

碳达峰战略下全国统一碳排放权交易市场配额总量设定及分配建议

何昀凌

南京信息工程大学数学与统计学院, 江苏 南京

收稿日期: 2024年1月10日; 录用日期: 2024年1月31日; 发布日期: 2024年4月8日

摘要

碳排放权交易市场通过提供经济激励、促进清洁能源发展等方式, 推动企业减排, 助力实现碳达峰、碳中和。在我国的“双碳”目标背景下, 加快全国统一碳排放权交易市场的建设, 并明确其配额分配机制, 已成为政府积极应对气候变化、推动经济绿色发展的关键举措。本文基于碳达峰目标的明确定义, 运用全国碳排放总量相关的历史数据, 通过一系列建模方法对全国碳排放总量进行科学预测, 并在此基础上对各省对应的碳排放配额进行合理分配, 对碳市场的交易制度和监管措施提出了一系列切实可行的建议, 为我国设计、建设、发展碳市场, 并在“双碳”目标下迈向更加可持续和低碳的未来提供了一定的参考。

关键词

“双碳”政策, 碳排放权交易市场, 碳市场配额, 碳排量预测

Suggestions on Setting and Distributing the Total Quota of the National Unified Carbon Emission Trading Market under the Carbon Peak Strategy

Yunling He

College of Mathematics and Statistics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing Jiangsu

Received: Jan. 10th, 2024; accepted: Jan. 31st, 2024; published: Apr. 8th, 2024

Abstract

The carbon emissions trading market, by providing economic incentives and promoting clean

energy development, drives corporate emission reductions, facilitating the achievement of carbon peaking and neutrality. Against the backdrop of China's "dual-carbon" goals, accelerating the nationwide unified construction of the carbon emissions trading market and clarifying its quota allocation mechanism have become key measures for the government to actively address climate change and promote green economic development. This paper, based on the clear definition of the carbon peaking goal, utilizes historical data related to the national carbon emissions, employs modeling methods to scientifically predict the total national carbon emissions, and subsequently allocates reasonable quotas to each province. Practical suggestions for the trading system and regulatory measures of the carbon market are proposed, providing valuable insights for the design, construction, and development of the carbon market in China.

Keywords

Dual-Carbon Policy, Carbon Emissions Trading Market, Carbon Market Quotas, Carbon Emissions Forecasting

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

1.1. 研究背景

近年来,随着人类活动范围的不断拓展,环境问题日益严峻,特别是因温室效应带来的全球气候变暖问题日益突出。作为世界上最大的发展中国家和全球第二大经济体,在经济高速发展的同时,我国政府也高度重视生态环境的保护,同时积极为全球碳减排世界作出贡献。在2020年的第七十五届联合国大会中,国家主席习近平向世界各国宣布中国的“双碳”目标,即“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”。

碳达峰是指二氧化碳的排放达到历史峰值,之后逐步回落的过程,是二氧化碳排放量由增转降的历史拐点,标志着碳排放与经济发展实现脱钩[1]。中国是全球温室气体排放最大国,2019年二氧化碳排放量达到98.3亿吨,占据全球总排放的28%。为了在2030年实现碳达峰目标,必须使单位国内生产总值的二氧化碳排放量比2005年减少65%以上[2]。可以说,中国完成双碳目标时间紧,任务重,只有“技术”“政策”双管齐下,多种机制相互配合才能完成。因此本文通过多种模型对我国碳排量趋势进行预测,以期为科学合理地制定碳达峰目标下的碳排放路径提供一定的数据支持。

1.2. 欧盟碳排放权交易市场发展历史

碳市场被塑造为一个由政府政策主导的市场,其核心在于通过二氧化碳排放权作为资产进行买卖,以市场机制有效降低温室气体排放[3]。在这个过程中,高耗能企业为了尽可能降低成本则会最大程度控制碳排放量,承担起自身的社会责任;而碳市场中的投资机构和个人投资者也通过碳交易为企业提供了资金支持,促进了碳市场的流动性和发展。

2005年,欧盟碳市场EU ETS (European Union Emissions Trade System)正式启动,是世界上首个,也是最成熟的碳市场。EU ETS采用“基于总量”的调控方式,政府首先在一级市场规定碳排总量,限制温室气体排放的总体水平;再由各个排放总体在二级市场买卖配额,实现碳配额的市場定价,借助市场机

制促使各个排放主体履行减排义务，达成减排目标[4]。

EU ETS 在过去近 20 年给整个欧盟的碳减排进程带来深刻影响，也是其他国家和地区进行碳市场建设的主要借鉴对象。在过去的八年中，欧盟仅通过碳市场拍卖碳配额就获得累计 570 亿欧元的收入，这些资金也被用于支持欧盟资助的气候项目。根据《欧洲绿色协议投资计划》，未来十年计划动员至少 1 万亿欧元的可持续投资，重点支持碳中和和绿色经济领域的发展[5]。碳市场的发展也促进了欧盟经济朝着脱碳方向的成功转型。为了应对减排压力，欧洲各大制造企业正在逐步减少对传统能源的依赖，向更多使用清洁能源的制造服务业转型。欧盟制造业占 GDP 的比重从 1991 年的 19.8% 下滑至 2020 年的 13.6%，而同一时期服务业增加值占比也从 59% 爬升至 65.8%，使欧盟过去 15 年 GDP 的增长划出了与二氧化碳排放量呈现负相关的漂亮轨迹。

1.3. 我国碳排放权交易市场发展现状

2011 年，中国首次宣布利用排放权交易管理二氧化碳排放的提议，并于 2013 年开始在七个省市进行试点。2017 年底，有关部门正式宣布启动建立中国国家碳排放权交易市场。我国碳市场在 2021 年 2 月开始试行，目前运转良好。但结合中国碳排放权交易市场相关数据和诸多专家学者的研究，发现我国碳市场仍旧存在一些问题，包括碳配额分配方式相对单一、市场监管存在漏洞等等，说明中国碳排放权交易市场建设任务依旧艰巨[6]。

2022 年 4 月 10 日，《中共中央、国务院关于加快建设全国统一大市场的意见》[7]指出，打造统一的要素和资源市场，培育发展全国统一的生态环境市场。依托公共资源交易平台，建设全国统一的碳排放权、用水权交易市场，实行统一规范的行业标准、交易监管机制[8]。在此背景下讨论全国统一碳排放大市场的基准概念，运行机制及各省份分配具有重要意义。因此本文试图通过一系列建模方法对全国碳排放总量做出预测，并在此基础上根据各地区的实际情况为该地区分配碳排放配额，同时结合“全国统一大市场”背景对现有碳排放交易体系作出建议，以其服务国家战略。

2. 全国碳排放量规模预测

2.1. 基于 ARIMA 的全国碳排放规模预测

尽管《联合国气候变化框架公约》《京都议定书》及《巴黎协定》确定了共同但有区别责任的原则(Common but Differentiated Responsibility)，反映各缔约国历史排放责任、经济发展水平等方面的差别，中国作为负责任的大国，不断推行碳减排与经济发展并行的模型[10]。基于 2000~2019 年全国碳排放规模历史数据，本文对 2020~2030 年全国碳排放内生性规模增长做预测。2020 年，新型冠状病毒肺炎(COVID-19，简称“新冠疫情”)的全球大流行是一场前所未有的全球性公共卫生危机，也对全球经济生产带来巨大冲击。因此，考虑到 2020~2022 年新冠疫情的影响，不使用这几年的数据做预测。

碳排放规模数据是典型的时间序列(Time Series)，因此本文利用自回归求和滑动平均(Autoregressive Integrated Moving Average, ARIMA)模型对线性时间序列预测性较优的特点对我国碳排放总量进行预测。

ARIMA 模型是一种广泛应用于时间序列分析和预测的统计模型。它结合了自回归(AR)和移动平均(MA)的特性，同时考虑了时间序列的差分(Integrated)，因此被称为 ARIMA 模型。ARIMA(p, d, q)模型中三个主要的组成部分为：

自回归(AR)部分：表示当前观测值与过去观测值之间的关系。AR 部分用 p 表示，表示模型中考虑的过去观测值的数量。

差分(Integrated)部分：表示时间序列的差分，即当前观测值与前一个观测值之间的差异。通过差分，可以使非平稳的时间序列变得平稳。差分部分用 d 表示，表示差分的次数。

移动平均(MA)部分：表示当前观测值与过去观测值的误差(残差)之间的关系。MA 部分用 q 表示，表示模型中考虑过去观测值的残差的数量。

结合这三部分，可以得到 ARIMA 模型的公式：

$$Y_t = \varphi_1 Y_{t-1} + \varphi_2 Y_{t-2} + \cdots + \varphi_p Y_{t-p} + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} + \cdots + \theta_q \varepsilon_{t-q} + \varepsilon_t \quad (1)$$

其中， Y_t 是时间序列在时刻 t 的观测值； $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$ 是自回归系数，表示当前观测值与过去 p 个观测值的线性关系； $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ 是移动平均系数，表示当前观测值与过去 q 个残差的线性关系； ε_t 是白噪声误差项，代表模型未能解释的随机波动； p 是自回归的阶数； q 是移动平均的阶数； d 是差分的次数，用来使时间序列平稳。

ARIMA 模型的关键是通过对时间序列进行适当的差分(d 次)以使其平稳，然后通过自回归和移动平均项来拟合平稳的序列。模型的阶数 p, q, d 的选择通常通过观察自相关图(ACF)和偏自相关图(PACF)，以及一些统计准则来确定。

本文收集了我国的历史碳排放数据并采用 1 阶差分将非平稳的数据平稳化[11]，建立了 ARIMA 预测模型，其结果如图 1 及表 1。

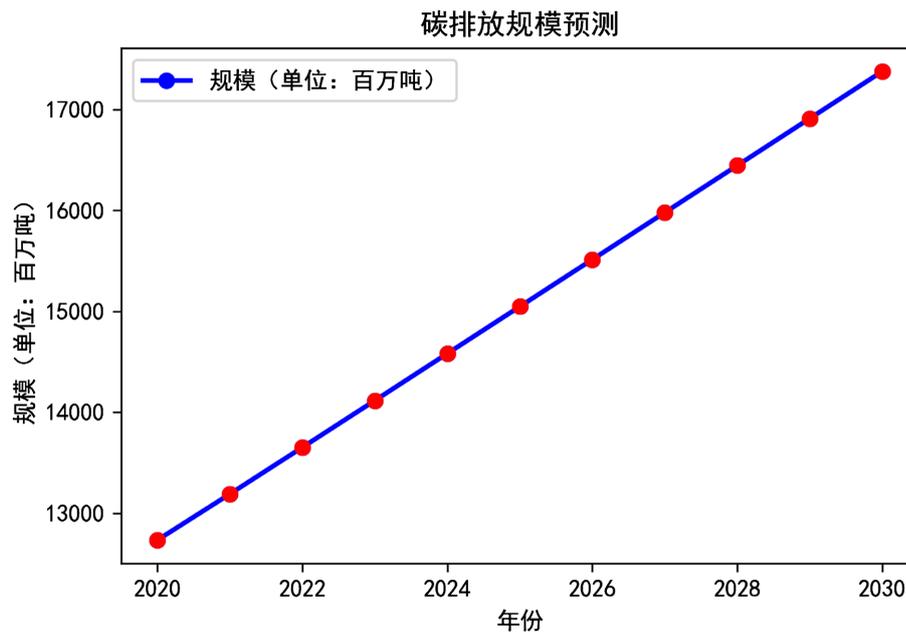


Figure 1. Trend of total carbon emissions predicted by ARIMA model

图 1. ARIMA 模型预测全国碳排放总量趋势

Table 1. Results of the ARIMA model predicting the total carbon emission in China

表 1. ARIMA 模型预测全国碳排放总量结果

年份	规模(单位: 百万吨)
2020	12733.72154439
2021	13190.32021506
2022	13652.2950706
2023	14116.55529622
2024	14581.78701305

续表

2025	15047.43170246
2026	15513.25194296
2027	15979.14680874
2028	16445.07339707
2029	16911.01347039
2030	17376.95927607

2.2. 基于 STIRPAT 模型的全国碳排放规模预测

上一节对碳排放规模预测所利用的 ARIMA 模型是根据碳排放量自身的变化规律所建立的模型,但在现实中,经济、人口、技术等多方面的因素都会影响到碳排放。因此,我们查阅参考文献后,又建立了在环境领域最常用的 STIRPAT 拟合模型,并与 ARIMA 模型进行了对比。STIRPAT 模型是 YORK R 和 DIETZ T 等[12]在 IPAT 恒等式的基础上提出的随机特殊形式,考虑了人口、财富和技术等因素各自变动时对环境的单独影响,消除了同比例变动问题的影响。该模型是目前研究碳排放规模与路径最常用的方法,克服了 Kaya 方程和 IPAT 模型的缺陷,并且具有很好的拓展性。因此,利用 STIRPAT 拓展模型对我国的碳排放规模变化进行研究是可行的。

STIRPAT 模型表示为:

$$\ln C = a + b \ln P + c \ln A + h \quad (2)$$

式中, a, b, c, d 代表各指标的弹性系数。

扩展的 STIRPAT 模型表示为:

$$\ln C = a + b \ln P + c \ln (GDP/P) + d \ln T + e \ln P_s + f \ln E_s + g \ln I_s + h \quad (3)$$

式中,全国碳排放量(C)单位为万吨;人口(P)单位为万人;人均 GDP(A)单位为万元/人;碳排放强度(T)单位为吨/万元、能源消耗强度(P_s)单位为吨标煤/万元、能源结构(E_s)为百分比%;产业结构(I_s ,表示第二产业占比)为百分比%; e, f, g 代表各指标的弹性系数; h 表示误差。

表 2 给出了预测工作所需要的统计数据以及相应的说明。

Table 2. Description of STIRPAT model variables

表 2. STIRPAT 模型变量说明

数据名称	数据说明
碳排放量(C)	CO ₂ 排放量
人口(P)	我国年末常住人口
人均 GDP (A)	GDP/年末常住人口
碳排放强度(T)	碳排放量/GDP
能源消耗强度(P_s)	能源消耗量/GDP
能源结构(E_s)	煤炭消耗量/能源消耗总量
产业结构(I_s)	第二产业附加值/GDP

由于变量较多,且变量之间可能存在相关性,因此我们需要对上述六个变量进行筛选和取舍。我们

应用回归法检验各变量的显著性，结果如下表 3、表 4 所示。

Table 3. The significance of each variable was tested by regression method

表 3. 进入回归法回归检验各变量显著性

模型	未标准化系数		标准化系数 <i>Beta</i>	<i>t</i>	显著性
	<i>B</i>	标准错误			
(常量)	20.003	00.885		2.263	0.045
总人口	00.837	00.072	0.075	11.671	0.000
人均 GDP	10.010	00.004	1.950	226.818	0.000
1 产业结构	-00.002	00.009	0.000	-0.257	0.802
能源结构	-00.019	00.008	-0.004	-2.436	0.033
能源消耗强度	00.014	00.004	0.016	3.633	0.004
碳排放强度	00.993	00.003	1.081	312.798	0.000

Table 4. The significance of each variable was tested by stepwise regression method

表 4. 逐步回归法回归检验各变量显著性

模型	未标准化系数		标准化系数 <i>Beta</i>	<i>t</i>	显著性
	<i>B</i>	标准误差			
1 (常量)	12.998	0.042		309.320	0.000
1 人均 GDP	0.500	0.034	0.966	14.838	0.000
2 (常量)	11.815	0.009		1247.424	0.000
2 人均 GDP	1.021	0.004	1.972	239.283	0.000
碳排放强度	0.954	0.008	1.039	126.123	0.000
3 (常量)	0.275	0.532		0.518	0.613
3 人均 GDP	1.000	0.001	1.930	805.782	0.000
碳排放强度	0.997	0.002	1.086	418.832	0.000
人口	0.977	0.045	0.088	21.704	0.000
4 (常量)	0.758	0.461		1.645	0.124
4 人均 GDP	1.003	0.001	1.936	683.669	0.000
碳排放强度	0.990	0.003	1.078	308.487	0.000
人口	0.936	0.039	0.084	24.005	0.000
能源消耗强度	0.009	0.003	0.010	2.901	0.012
5 (常量)	1.836	0.575		3.190	0.008
5 人均 GDP	1.009	0.003	1.949	361.088	0.000
碳排放强度	0.993	0.003	1.081	340.417	0.000
人口	0.851	0.047	0.076	18.138	0.000
能源消耗强度	0.014	0.003	0.015	4.277	0.001
能源结构	-0.019	0.008	-0.004	-2.532	0.026

以上检验结果表明, 在 0.05 的显著性水平下, 总人口(P)、人均 GDP (A)、碳排放强度(T)、能源消耗强度(P_s)可以通过显著性检验, 因此可以作为自变量构建模型。

为了规避面板数据自身存在的多重共线性干扰, 更大程度保留自变量和因变量的信息[13], 我们采用岭回归方法对数据进行回归。岭回归分析是一种专用于共线性数据分析的有偏估计回归方法, 实质上是一种改良的最小二乘法, 通过放弃最小二乘法的无偏性, 以损失部分信息、降低精度为代价获得回归系数更为符合实际、更可靠的回归方法, 对病态数据的耐受性远远强于最小二乘法[14]。

我们以总人口、人均 GDP、碳排放强度和能源消耗强度为自变量, 碳排放总量为因变量, 得到不同岭参数 K 值对应的方程、岭迹图和拟合优度 R^2 值, K 值越小, 样本数据损失的信息越少, 模型精确度越高。根据岭迹图变化情况, 当 $K = 0.1$ 时, 系数逐步趋于稳定, R^2 为 0.991, 拟合程度较好, 可选择参数为 0.1 进行回归, 岭迹图如图 2 所示。

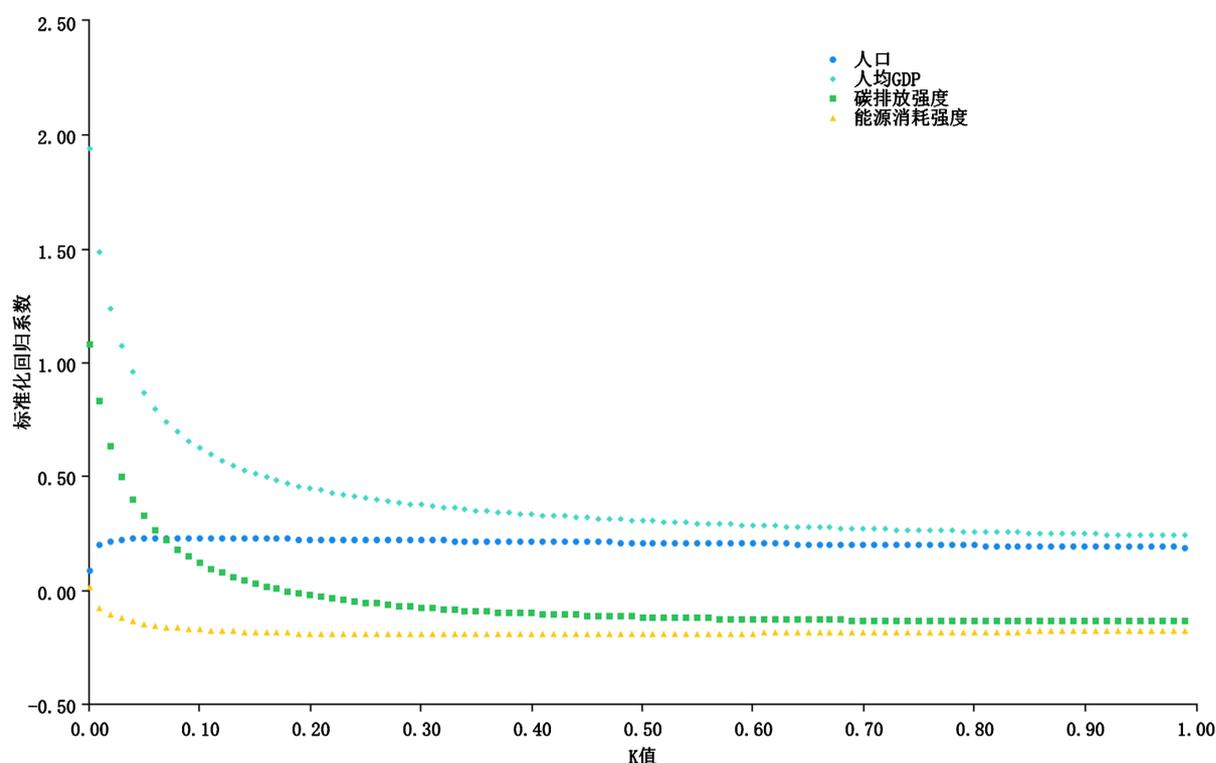


Figure 2. Ridge trace map

图 2. 岭迹图

选择 K 值为 0.1, 进行岭回归分析, 得到结果如下表 5、表 6 所示。

根据上表, 我们构建出 SPIRTPAT 模型:

$$\ln C = 2.170 \ln P + 0.768 \ln A + 0.761 \ln T - 0.071 \ln P_s - 13.428 \quad (4)$$

采用该模型对我国历史碳排放总量进行模拟, 并将模拟值与历史值进行回归, 结果发现拟合效果较好, R^2 达到 0.99。因此, 采用该模型对未来我国的碳排放总量进行预测是可行的。模拟值与预测值对比如图 3 所示。

为了利用所建立的模型更准确预测我国未来的碳排放发展趋势, 参考我国目前应对气候变化以及能源相关的政策文件, 按照常规发展速度预测人口、人均 GDP、碳排放强度、能源消耗强度这四个因素的

变化。各因素变化速度以及具体情景模式参数设置如表 7、表 8 所示。

Table 5. Ridge regression analysis results

表 5. Ridge 回归分析结果

变量	非标准化系数		标准化系数 <i>Beta</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	R^2	调整 R^2	<i>F</i> 值
	<i>B</i>	标准误						
常数	-13.428	13.714	-	-0.979	0.345			
人口	2.170	1.162	0.195	1.868	0.084			
碳排放强度	0.761	0.085	0.829	8.998	0.000**	0.991	0.989	$F(4, 13) = 378.859,$ $p = 0.000$
能源消耗强度	-0.071	0.092	-0.080	-0.769	0.455			
人均 GDP	0.768	0.048	1.482	15.900	0.000**			

Table 6. Summary of Ling regression models

表 6. 岭回归模型汇总

样本量	R^2	调整 R^2	模型误差 RMSE
18	0.991	0.989	0.030

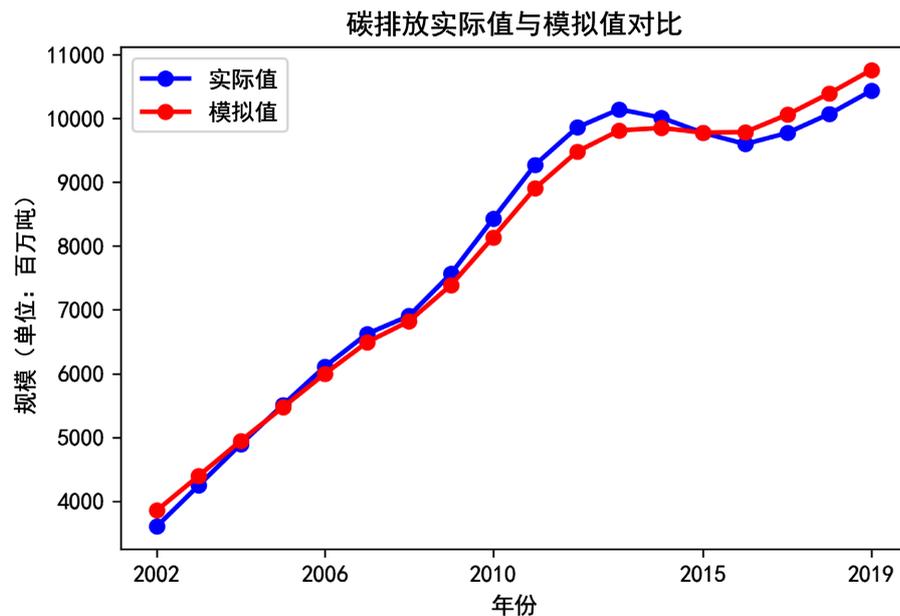


Figure 3. Comparison between prediction results of SPIRTPAT model and actual values

图 3. SPIRTPAT 模型预测结果与实际值对比

Table 7. Scenario settings

表 7. 情景设置

影响因素	变化速度
人口(<i>P</i>)	较高
人均 GDP (<i>A</i>)	较高
碳排放强度(<i>T</i>)	较低
能源消耗强度(P_s)	较低

Table 8. Setting of speed parameters of each factor change
表 8. 各因素变化速度参数设置

影响因素	情景模式	变化率				
		2020~2025 年	2026~2030 年	2031~2035 年	2036~2040 年	2041~2050 年
人口	较低	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	较高	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45
人均 GDP	较低	6.00	5.50	5.00	4.50	3.50
	较高	6.50	6.00	5.50	5.00	4.50
碳排放强度	较低	-3.90	-4.20	-4.50	-4.80	-5.00
	较高	-4.85	-5.00	-5.20	-5.60	-5.80
能源消耗强度	较低	-4.50	-4.30	-4.10	-4.00	-3.75
	较高	-4.00	-3.80	-3.60	-3.50	-3.25

依据设定的情景模式，并基于 STIRPAT 拓展模型对我国 2020~2030 年的碳排放总量进行拟合，我国未来的碳排放量并与前文所建立的 ARIMA 模型的预测结果进行对比，如图 4 所示。

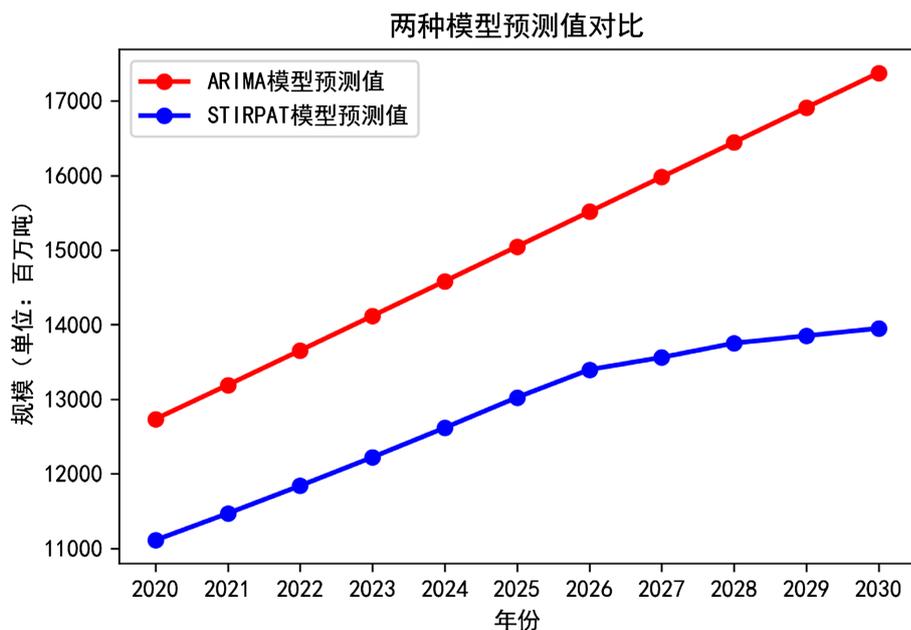


Figure 4. Comparison of predicted carbon emission results of the two models
图 4. 两种模型预测碳排放量结果对比

从已有结果看，ARIMA 模型所得结果近似线性增长，所得结果与目前普遍预测或减排目标下的碳排放规模控制目标相差较大；而 STIRPAT 模型结果较为接近，且出现逐年缓增趋势。从模型原理分析角度，ARIMA 模型适用于波动较大、信息较多、数据较大的时间序列，这也正是此模型的优势，然而，全国碳排放总量是一个比较平稳的过程，且数据量不大，利用一次差分预测，即出现增长线近似“直线”的现象；而我们在 STIRPAT 模型中选定的几个因素既是影响碳排放的主要因素，又是比较平稳的量，且该模型为我们做减排决策也提供了参考信息。综述，我们将在下文基于 STIRPAT 模型预测结果做进一步分析，

供制定“双碳”目标下碳排放路径规划时参考。

3. 碳达峰战略目标下碳排放路径预测

3.1. 碳达峰峰值及年份

从碳排放现状看，我国是世界第一大排放国，且我国从 2030 年前碳达峰到实现 2060 年碳中和时间仅为 30 年左右，远远少于欧美(45 年左右或更长)。因此，我国近 5-8 年需尽早达峰并尽可能降低峰值，长期来看要提前部署碳中和实施路径和技术研发，在实现碳达峰目标基础上，顺利实现碳中和目标[15]。王灿等人[16]基于碳中和愿景将 2020~2060 年排放路径分为 4 个阶段，并对过程特征做了很好地描述，即达峰期(尽早达峰，2020~2030 年) - 平台期(稳中有降，2030~2035) - 下降期(快速减排，2035~2050 年) - 中和期(深度脱碳，2050~2060 年)。

对中国碳达峰年份和峰值，许多学者或机构也做过不同预测[17][18]。在 2022 年 3 月 31 日召开的第六届创新与新兴产业发展国际会议上，中国工程院发布重大咨询项目成果《中国碳达峰碳中和战略及路径》[19]。报告指出，通过积极主动作为，全社会共同努力，我国二氧化碳排放有望于 2027 年前后实现达峰，峰值控制在 122 亿吨左右。在此基础上推动发展模式实现根本转变，可在 2060 年前实现碳中和。

综合研判，我们将面向碳中和愿景的碳排放路径重新划分为 5 个阶段，达峰期(尽早达峰，2020~2027 年) - 波动期(抑制增长，2028~2030) - 平台期(稳中有降，2030~2035) - 下降期(快速减排，2035~2050 年) - 中和期(深度脱碳，2050~2060 年)。并据此，本文选定 2027 年及 125 亿吨作为达峰年份和峰值目标，为 2028~2030 年碳排放总量波动提供对冲空间，以服务我国碳达峰目标能如期达成。

3.2. 基于相似方法的碳排放达峰路径预测

我们需要注意，第二章对碳排放增长规模所做的预测，实质上是对碳排放规模依惯性增长做出的预测。但依据预测数据来看，我国的碳排放规模与 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和的目标仍有一定差距。因此本节将在此达峰目标下，“倒向”预测 2023~2026 年的全国碳排放总量，为实现“双碳目标”制定碳排放倒逼机制提供参考。

针对已知的序列 a_1, a_2, \dots, a_8 (即第二章第二节所得基于 STIRPAT 模型的全国碳排放 2020~2027 年预测数据)，为了使碳达峰目标下采取的各类调节方式不利影响尽可能小，即尽可能地符合自发增长，我们建立基于相似方法的反问题预测模型。

设碳达峰目标下的序列为 b_1, b_2, \dots, b_8 ，满足

1) 初值条件： $b_1 = 9899.3$ (即 2020 年实际全国碳排放总量)

2) 终值条件： $b_8 = 12500.0$ (碳达峰峰值及达峰年份)

3) 相似条件： $\frac{a_2 - a_1}{b_2 - b_1} = \frac{a_3 - a_2}{b_3 - b_2} = \dots = \frac{a_8 - a_7}{b_8 - b_7}$ (增长幅度保持相似)

据此可以推出 2020~2027 年碳排放达峰路径，如图 5 及表 9 所示。

4. 全国统一碳排放交易市场下碳排放量配额

4.1. 基准制度及各省基础配额

全国统一大市场背景下的碳排放权交易的交易机制应该具有鲜明的市场主导，政府辅助这一特色，这是中国特色社会主义市场经济制度所决定的，也是经济学界目前公认的理想市场，即有效市场和有为政府并举相协调，而在 2021 年 2 月 1 日起实施的《碳排放权交易管理办法(试行)》文件中，已明确规定

我国碳排放权交易的管理部门为发展与改革委员会。

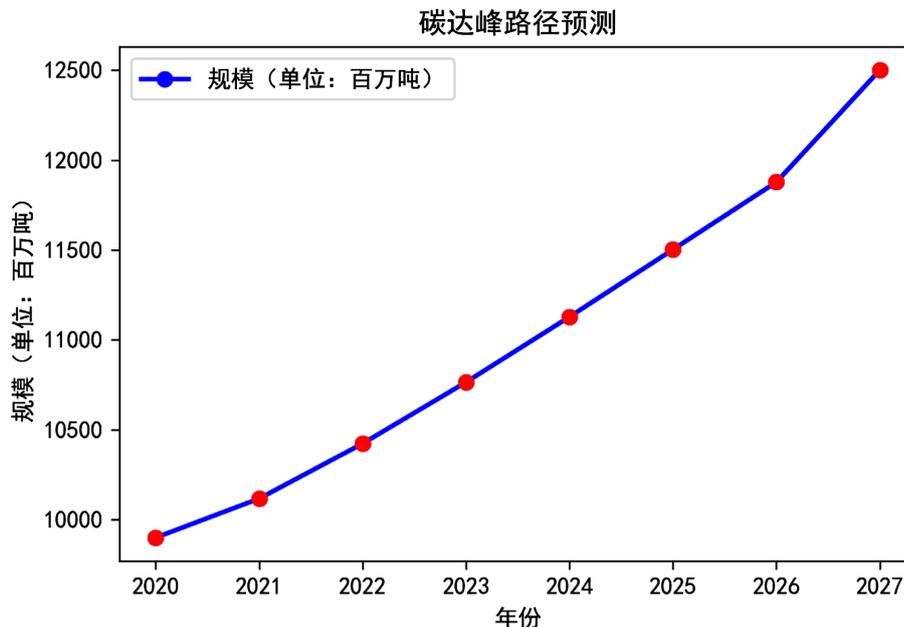


Figure 5. Prediction trend of carbon peaking path based on similar methods
图 5. 基于相似方法碳达峰路径预测趋势

Table 9. Prediction results of carbon peaking path based on similar methods
表 9. 基于相似方法碳达峰路径预测结果

年份	规模(单位: 百万吨)
2020	9899.3
2021	10116.328201404
2022	10422.4557566088
2023	10763.9685236879
2024	11127.4017410985
2025	11501.8106832507
2026	11877.1356401398
2027	12500

前文已对碳达峰战略目标下全国 2023~2027 年的碳排放路径做了预测，本节在此基础上，将所得数据视为全国年度可排放的碳总量，结合各省碳排放增长需求“分配”给各省。由此即得碳达峰战略下 30 个地区 2023~2027 年碳排放管控目标。进一步考虑全国统一大市场战略措施具体实施过程中，以省份分配额(基于 30 个地区 2015~2019 年碳排放规模占全国碳排放的平均比例)后，在微观内部层面中省内企业可自由交易，考虑到地区间资源丰富程度，经济发展水平，人口密度等因素差异，在宏观层面的规模交易中以省为基本单位进行交易。

由上述讨论，我们建立“预期 - 目标误差最小化优化模型”。设基于 STIRPAT 模型所得第 j 个地区第 i 年碳排放量预测值为：

$$a_j^{(i)}, \quad j = 1, 2, \dots, 30; \quad i = 2023, 2024, 2025, 2026, 2027 \quad (5)$$

设碳达峰战略下第 j 个地区第 i 年碳排放量记为:

$$b_j^{(i)}, \quad j = 1, 2, \dots, 30; \quad i = 2023, 2024, 2025, 2026, 2027 \quad (6)$$

依据矩阵二范数, 建立优化问题:

$$\begin{aligned} & \min \sum_{j=1}^{30} (a_j^{(i)} - b_j^{(i)})^2, \quad i = 2023, 2024, 2025, 2026, 2027 \\ & s.t. \\ & E_i = \sum_{j=1}^{30} b_j^{(i)}, \quad i = 2023, 2024, 2025, 2026, 2027 \end{aligned} \quad (7)$$

其中 E_i 表示碳达峰战略目标下全国第 i 年碳排放总量预测值。

据此, 得到碳达峰战略下 30 个地区碳排放规模分配。我们以 2025 年全国碳排放预测规模(11501.810 百万吨)为参照, 设定 11500 为碳排放权交易市场初始免费配额, 各个地区的具体配额如下表 10 及图 6 所示。

Table 10. Carbon emission quotas for 30 regions in 2025

表 10. 30 个地区 2025 年碳排放规模配额

序号	省份	配额(百万吨)	序号	省份	配额(百万吨)
1	安徽	384.28777	16	江西	176.8743756
2	北京	70.62297311	17	辽宁	544.1132661
3	福建	242.5232907	18	内蒙古	825.7789322
4	甘肃	174.8469204	19	宁夏	222.1290682
5	广东	529.7838993	20	青海	47.00037421
6	广西	198.8498084	21	山东	1140.659966
7	贵州	306.2652657	22	山西	1550.533714
8	海南	62.23264693	23	陕西	583.8041707
9	河北	576.6288023	24	上海	153.191224
10	河南	498.8512436	25	四川	249.0525022
11	黑龙江	337.7408721	26	天津	132.1745837
12	湖北	259.6399343	27	新疆	455.0069142
13	湖南	248.1967986	28	云南	184.3953852
14	吉林	200.0648111	29	浙江	392.0150937
15	江苏	628.0979107	30	重庆	126.4484825

为贯彻《中共中央、国务院关于加快建设全国统一大市场的意见》, 本文提出在中央层面领导下, 在各省设立交易分所, 摒弃地域设分交易所的制度。在定价方面, 根据《意见》原则, 考虑区域经济融合、产业差异、生态环境等因素, 分阶段在在京津冀(北京、天津、河北)、长三角(上海、江苏、浙江、安徽)、川渝(重庆、四川)、东北(吉林、黑龙江、辽宁)、中部五省(河南、山西、湖北、湖南、江西)、西北五省(陕西、甘肃、青海、新疆、宁夏)实施区域统一定价, 而后逐步破除各省交易壁垒。如广西、内蒙古

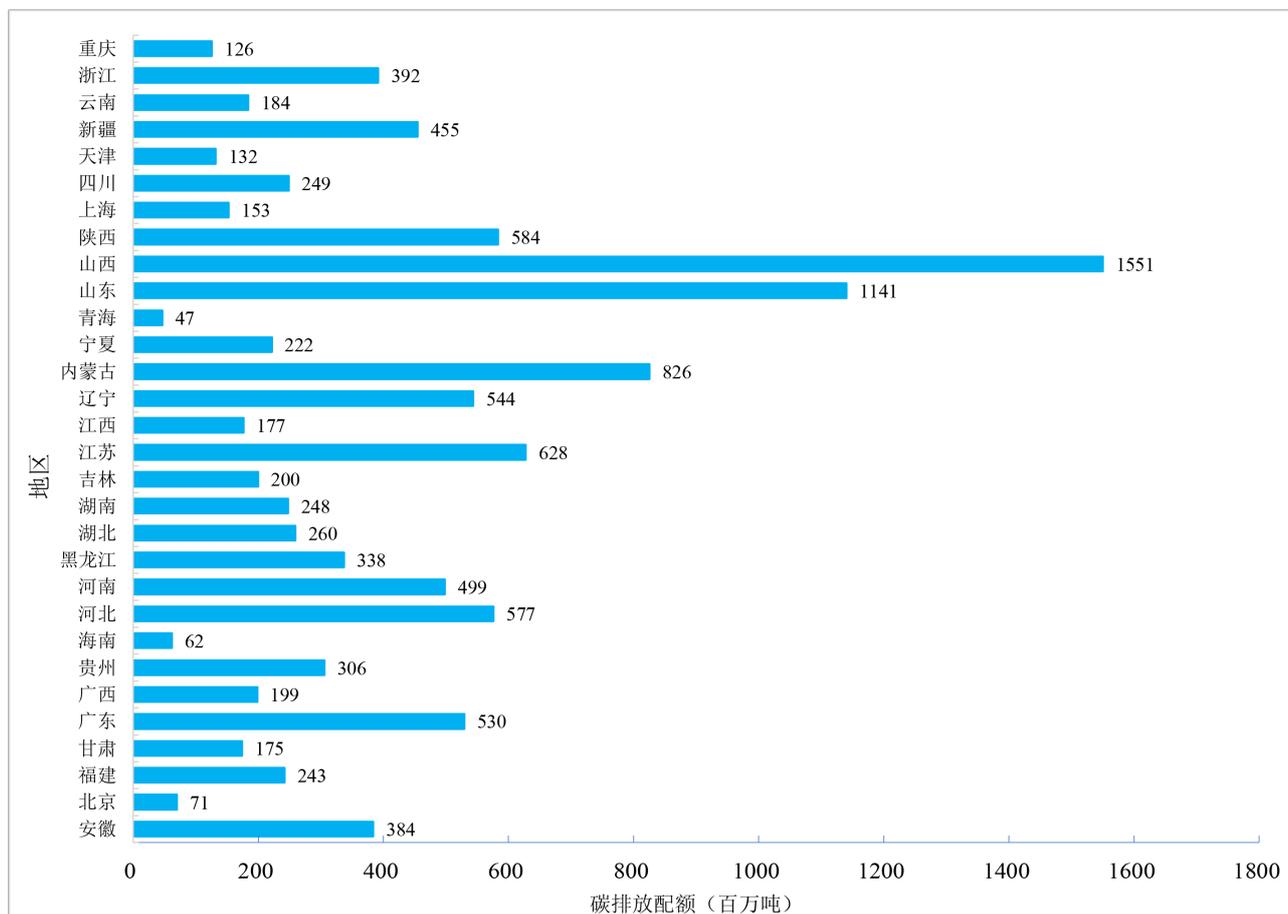


Figure 6. Comparison of carbon emission quotas of 30 regions in 2025

图 6. 30 个地区 2025 年碳排放配额对比

以区域交易市场的外延形式融入西北五省碳交易市场，京津冀、山东、长三角、广东和福建以区域交易市场的融合形式建立更大范围的区域碳交易市场。据此，持续推进“泛全国统一大市场”（全国仅剩三到四个大区），在 2027 年最终建立真正的“全国统一大市场”。

4.2. 交易制度

全国统一大市场背景交易制度的内核机制为钉住爬行波动制度，所谓钉住，即该制度参考一个由一系列碳相关锚定物所综合的指标，锚定物的价格可包括当年 GDP 增速，当年 CO₂ 排放量增速，人口密度变化等多重指标。爬行波动则突出其波动幅度较小的特点。考虑到设立初期激发市场活力的需求，参照欧盟碳排放交易波动幅度 200%，结合我国特色社会主义市场经济制度，拟在 2023 年设立最大波动幅度为 100%，后随各市场主体的参与积极性和综合预期的不断平稳逐步回落，最终在 2021 年达到 50% 的最终波动范围。在该波动机制外，监管机构根据交易频率，权额流向进行综合研判，有权进行价格回溯和交易终止和取消等方式维护全国碳排放权交易市场的稳定。而在交易成本方面，为响应《意见》中进一步降低交易成本要求，同时也为增强碳排放权流动性，提高其调控效率，在 2023 年设立初期，每手交易手续费为 2.5‰，相较于现有制度中的 7.5‰，费用降低幅度达 66%，同时针对绿色科技型企业的大规模交易进行资费减免，最终在 2027 年全国统一碳排放权交易市场建立时，资费降至 0.1‰。

4.3. 监管机构

碳排放权交易市场与其他金融市场一样存在风险，如价格风险、流动性风险、操作风险等。建立统一的碳排放权交易市场监管体系，制定规范化的交易规则、监管规则、信息披露规则，是防止碳排放权交易市场失灵、防范和化解风险并保护交易安全的有效途径。碳排放权交易市场与其他金融市场一样，具有价格敏感度高、波动性强、风险传导性强的特点。在碳排放权交易市场上，同样存在借助信息优势进行的内幕交易、欺诈、市场操纵等违规行为。因此，必须加强对碳排放权交易市场的统一监管，对交易的全过程进行监管，其中明确监管主体、制定相关的信息披露规范是关键。

此外，随着我国碳排放权交易市场的发展，除了控排主体，越来越多的其他投资者，包括自然人，将会参与到市场中，因而，应当未雨绸缪，进一步完善我国碳排放权交易市场监管体系，加强统一监管，保护市场参与者利益。

5. 总结与讨论

为积极响应我国的“双碳”政策并助力建设我国碳排放权交易市场，本文利用 ARIMA 模型、STIRPAT 模型预测了我国未来的碳排放趋势，并结合碳达峰目标所明确定义的达峰时间与总排放量规模为我国的碳排放路径做出规划。在此基础上，将预测所得数据视为全国年度可排放的碳总量，结合各地区的碳排放增长需求对不同省份的碳排放配额做出合理分配，得到碳达峰战略下 30 个地区 2023~2027 年碳排放管控目标，并针对我国碳市场的交易制度和监管措施提出了一系列切实可行的建议，为我国设计、建设、发展碳市场提供了一定的参考。结果发现，仅仅从碳排量自身规律出发使用 ARIMA 模型拟合我国碳排放量数据，所得结果与实际值相差较大，而考虑到了现实中经济、人口、技术等多方面的因素的 STIRPAT 模型效果更优；此外，除了依惯性增长做出碳排放规模的预测，根据碳达峰战略明确定义的时间与总量“倒向”预测我国的碳排放路径则是以目标为导向，能够更加突出我国的达峰目标，因此以该方法为基础分配各地区的碳排量配额更为科学合理。

通过本文的研究讨论，可以发现我国碳排放内生性增长需求与碳达峰目标峰值存在一定差距，可见中国未来面临 5~10 亿吨的减排压力，因此需采取一系列切实可行的减排措施，以实现“双碳”目标并推动碳排放的逐步减少。从国家层面，应该重点关注山西、山东、内蒙古、陕西、广东等地区，其减排侧重点又有不同。如山西、内蒙古主要原因在于能源领域，应加速经济产业结构调整；广东和山东，作为东部沿海地区，应给自身提出更高减排目标，承担责任，为后发地区留有碳排放空间。本文给各省份未来五年年度碳排放规模制定了配额，实质是为各地区提出了控制碳排放规模增长的目标。考虑到全国统一碳排放权交易市场，规模应在 120 亿吨左右，中央可以截留部分配额，向特定地区免费释放，把碳排放权作为新形式财政转移工具，促进共同富裕。

然而本文的研究也存在一定的不足。首先，在进行碳排放趋势预测和碳排放配额规划时，所使用的模型仍然具有一定的不确定性。未来的碳排放受到多种因素的影响，包括经济增长、技术创新、政策调整等，这些因素难以完全被模型考虑到。因此，在未来研究中可以考虑引入更多因素，采用多种模型组合的方法，提高对未来碳排放趋势预测的准确性。其次，碳排放配额的分配涉及到多方面的考虑，包括地区经济发展水平、产业结构、能源利用状况等。本文虽然考虑了各地区的碳排放内生性的增长需求，但在具体实施时还需要更加详细的因素考虑，以确保分配的公平和科学性。未来的工作可以进一步加强对不同地区碳排放分布规律以及地区经济、人口、政策、技术等多方面的深入分析，更精准地确定碳排放配额。

参考文献

- [1] 黄昱森. 碳达峰、碳中和: 一场广泛而深刻的经济社会系统性变革[J]. 国际人才交流, 2021(8): 18-19.

- [2] 曾维翰. “双碳”背景下完善中国碳排放权交易体系研究[J]. 福建金融, 2021(11): 60-70.
- [3] 李威. 欧盟碳排放权交易体系对我国碳市场发展的借鉴与启示[J]. 海南金融, 2023(4): 44-51.
- [4] 张晓燕, 殷子涵, 李志勇. 欧盟碳排放权交易市场的发展经验与启示[J]. 清华金融评论, 2023(2): 28-31.
- [5] 张锐. 欧洲碳市场的精彩构图与成果提炼[J]. 上海企业, 2021(6): 48-52.
- [6] 杨文琦, 杨剑, 张愉聆, 程琳, 高梦婷. 中国碳排放权交易市场发展现状与对策探究[J]. 投资与创业, 2023, 34(19): 148-150.
- [7] 中共中央 国务院关于加快建设全国统一大市场的意见[EB/OL]. 新华社.
https://www.gov.cn/zhengce/2022-04/10/content_5684385.htm, 2024-01-31.
- [8] 陈婉. 向碳数据造假行为说“不” [J]. 环境经济, 2022(13): 28-29.
- [9] 余碧莹, 赵光普, 安润颖, 陈景明, 谭锦潇, 李晓易. 碳中和目标下中国碳排放路径研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2021, 23(2): 17-24.
- [10] 杨博文. 习近平新发展理念下碳达峰、碳中和目标战略实现的系统思维、经济理路与科学路径[J]. 经济学家, 2021(9): 5-12.
- [11] 张树京, 齐立心. 时间序列分析简明教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 北京交通大学出版社, 2003: 49-53.
- [12] York, R., Rosa, E.A. and Dietz, T. (2003) STIRPAT, IPAT and ImpACT: Analytic Tools for Unpacking the Driving Forces of Environmental Impacts. *Ecological Economics*, **46**, 351-365.
[https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(03\)00188-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(03)00188-5)
- [13] 高素英, 李延军, 金浩. 岭回归在经济增长影响因素分析中的应用[J]. 统计与决策, 2005(10): 142-144.
- [14] 李晓津, 张蝶. 基于岭回归法的航油消耗评价指标研究与修正[J]. 中国民航大学学报, 2013, 31(3): 62-64.
- [15] 张贤, 郭偲悦, 孔慧, 赵伟辰, 贾莉, 刘家琰, 仲平. 碳中和愿景的科技需求与技术路径[J]. 中国环境管理, 2021, 13(1): 65-70.
- [16] 王灿, 张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. 中国环境管理, 2020, 12(6): 58-64.
- [17] 胡剑波, 罗志鹏, 李峰. “碳达峰”目标下中国碳排放强度预测——基于 LSTM 和 ARIMA-BP 模型的分析[J]. 财经科学, 2022(2): 89-101.
- [18] Wei, Y.-M., Chen, K.Y., Kang, J.-N., Chen, W.M., Wang, X.-Y. and Zhang, X.Y. (2022) Policy and Management of Carbon Peaking and Carbon Neutrality: A Literature Review. *Engineering*, **14**.
- [19] 中国工程院: 我国有望 2027 年实现碳达峰, 2060 年前实现碳中和[EB/OL].
https://m.gmw.cn/2022-04/01/content_1302876708.htm, 2024-02-05.