

华中地区碳达峰预测

——基于扩展的STIRPAT模型

贾子易, 李俊华*, 刘书景, 谭依琳

汉江师范学院数学与计算机科学学院, 湖北 十堰

收稿日期: 2023年12月17日; 录用日期: 2024年1月11日; 发布日期: 2024年1月17日

摘要

本文从我国“双碳”目标出发, 以华中地区为研究对象, 首先采用IPCC排放因子法对华中地区2005~2021年碳排放量数据进行核算整合, 发现该地区在2012年后碳排放量呈现缓慢增长趋势; 然后利用人口规模、人均GDP等五个指标建立了扩展的STIRPAT模型, 拟合模型 $R^2 = 0.9763$, 各指标均通过了95%的显著性检验; 再运用情景分析法对该地区碳达峰时间及达峰排放量进行预测, 预测结果显示该地区碳达峰时间最早出现于2026年, 达峰排放量为162,432万吨, 最迟达峰时间为2029年, 达峰排放量为165,062万吨; 最后根据预测结果给出了实现华中地区碳达峰的三条路径。

关键词

IPCC排放因子法, 岭回归, STIRPAT模型, 情景分析法, 碳达峰

Carbon Peak Prediction in Central China

—Based on Extended STIRPAT Model

Ziyi Jia, Junhua Li*, Shujing Liu, Yilin Tan

School of Mathematics and Computer Science, Hanjiang Normal University, Shiyan Hubei

Received: Dec. 17th, 2023; accepted: Jan. 11th, 2024; published: Jan. 17th, 2024

Abstract

Starting from China's "dual-carbon" goal, this paper takes central China as the research object, firstly, the IPCC emission factor method is used to account for and integrate the carbon emission data of Central China from 2005 to 2021, and it is found that the carbon emissions in this area show a slow growth trend after 2012. Then, an extended STIRPAT model is established by using five indicators, such as population size and per capita GDP. The fitting model $R^2 = 0.9763$, and all indicators

*通讯作者。

have passed the significance test of 95%. Then the scenario analysis method is used to predict the peak carbon time and peak emissions in the region, and the prediction results show that the earliest peak carbon time in the region will occur in 2026, with peak emissions of 1624.32 million tonnes, and the latest peak time will be 2029, with peak emissions of 1650.62 million tonnes. Finally, according to the forecast results, three paths for carbon peaking in Central China are given.

Keywords

IPCC Emission Factor Method, Ridge Regression, STIRPAT Model, The Scenario Analysis Method, Carbon Peaking

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

随着人类工业化程度的发展,全球温室气体也急速增加,导致了全球气温上升和极端天气频繁发生。在第七十五届联合国大会一般性辩论上,习近平主席正式宣布:“中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,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”[1],《2030 年前碳达峰行动方案》[2]为我国碳达峰工作作出总体部署。华中地区在地理位置上处于我国中心,是全国水陆交通枢纽;在经济地位上,是我国农业、工业中心之一,同时也是碳排放集中地区之一,其碳排放量不容忽视,研究华中地区碳排放情况及其影响因素对于华中三省政府调整战略安排,转变发展方式具有重要意义。

关于碳排放量影响因素与预测研究,目前已有多种方法。对于分地区碳排放量影响因素与预测主要有以下几种方法。IPAT 模型、LEAP 模型、LMDI 模型、灰色预测、神经网络预测模型结合情景分析法预测了长三角地区碳排放量、STIRPAT 模型等。李建豹等人利用改进的 IPAT,利用人口数、地区生产总值、碳排放强度、能源消耗总量等指标对长三角地区碳排放进行模拟预测[3]。王力等人利用 LEAP 模型结合 LMDI 分解方法对渭南市碳排放量进行预测,发现通过改善能源结构、优化产业结构、调整交通运输等方式对减少碳排放量具有显著效果[4]。刘茂辉等人利用 LMDI 模型与 STIRPAT 模型对天津市碳排放量进行预测研究,发现能源结构优化、能源强度降低是导致碳排放量减缓的主要因素[5]。黎孔清等人利用 STIRPAT 模型与 GM(1,1)模型对湖南省农地投入的碳排放进行预测研究[6]。胡剑峰等人利用 LSTM 神经网络与 ARIMA-BP 神经网络耦合模型对中国碳排放强度进行预测[7]。赵慈等人利用 STIRPA 模型对浙江省碳排放量进行预测研究,发现人口、人均 GDP、碳排放强度、能源消耗强度、能源结构、产业结构六个因素回归能够模拟代表当地碳排放量[8]。李心萍等人利用拓展的 STIRPAT 模型对福建省碳排放量进行预测研究,选择人口数量、人均 GDP、产业结构、能源结构、能源强度五个因素对福建省碳排放量进行回归预测[9]。廖祖君等人利用拓展的 STIRPAT 模型对四川省碳排放量进行预测研究,通过人口规模、人均 GDP、产业结构(第二、第三产业比重)、能源强度、能源结构、城镇化率七个因素对四川省碳排放量进行拟合,并对四川省未来碳排放量进行预测[10]。

目前,尚未有研究预测华中地区碳达峰具体年份,本研究从此实际出发,选择产业结构、省域富裕程度等与碳排放存在较高相关关系的因素建立扩展的 STIRPAT 模型,并根据未来不同发展情形预测华中地区碳达峰时间,提出针对性政策建议,为相关省份调整发展战略安排提供支持。

2. 研究方法与数据来源

2.1. 碳排放核算方法

本研究碳排放量核算范围包括直接能源活动碳排放(space 1)以及电力调入所导致的间接碳排放量(space 2)。核算采用排放因子法,直接碳排放根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)所提供的碳排放核算方程进行核算;间接排放利用国家发改委所发布的华中地区电网平均二氧化碳排放因子进行核算。

$$I = I_{sp1} + I_{sp2} \quad (1)$$

其中 I 表示总碳排放量, I_{sp1} 为直接能源活动碳排放量, I_{sp2} 为间接碳排放量。对于直接能源活动碳排放量,采用部门法进行核算,即从能源消费端考虑碳排放,部门法碳排放总量为不同生产、生活部门最终消耗化石能源总量所排放的全部二氧化碳。

$$I_{sp1} = AD_i \times NCV_i \times CC_i \times O_i \quad (2)$$

(2)式为二氧化碳直接碳排放总量,其中 AD_i 表示不同种类化石燃料的消耗量, NCV_i 为不同化石燃料的平均低拉发热值, CC_i 表示第 i 种燃料的单位热值含碳量, O_i 为第 i 种燃料的碳氧化率。

对于直接碳排放量采用中国碳核算数据库(CEADs)所核算的数据进行后续研究。

$$I_{sp2} = AD_{e-j} \times EF_j \quad (3)$$

(3)式为二氧化碳间接排放总量,其中 AD_{e-j} 表示第 j 个地区电力调入量, EF_j 为第 j 个地区电网平均二氧化碳排放因子,根据国家发改委所发布数据,华中地区电力碳排放因子为 $0.801 \text{ tCO}_2/(\text{MW}\cdot\text{h})$ 。

2.2. 扩展的 STIRPAT 模型

1971 年为了研究人口变化对环境的影响,西方学者提出了 IPAT 模型,其表达式为:

$$I = P \times A \times T \quad (4)$$

式中, I 表示环境情况, P 为人口规模, A 为富裕程度, T 为技术水平。由于 IPAT 模型不能反映各因素变换时环境的变化情况[11],在此基础上提出了 STIRPAT 模型,其表达式为:

$$I = \alpha P^b A^c T^d \varepsilon \quad (5)$$

其中, α 为常数项, b 、 c 、 d 为模型待估参数, ε 为误差项。为消除可能存在的异方差,在实际计算时对模型取对数,则有:

$$\ln I = \ln \alpha + b \ln P + c \ln A + d \ln T + \ln \varepsilon \quad (6)$$

此模型仅有三个变量,为全面考虑环境情况有关影响因素,需对模型进行扩展,以提高模型解释力,全面反映现实情况。

“十四五”规划期间,华中地区不断优化三次产业结构,持续深化供给侧结构性改革,致力于实现产业结构转型升级。随着华中地区经济不断发展,城乡地区生产活动划分愈发明显,由于生产条件差异与主要生产活动不同,导致城乡碳排放强度不一,城市生活区的生产方式决定了城市是碳排放量集中地区。已有研究表明,城市碳排放量约占直接碳排放量的 85% [12]。城镇化水平进一步提高,或将增加华中地区碳排放量。

综合以上分析,以第三产业增加值占 GDP 比重衡量华中地区产业结构,以城镇人口占年末总人口比重反映华中地区城镇化水平,并将以上两指标扩展至 STIRPAT 模型中。汇总后具体指标含义见表 1。

最终 STIRPAT 模型扩展为:

Table 1. Summary of indicator definitions
表 1. 指标定义汇总

指标	定义	单位
碳排放量(<i>I</i>)	碳排放总量	万吨
人口规模(<i>P</i>)	华中地区年末常住人口	万人
人均 GDP(<i>A</i>)	华中地区人均 GDP	元
碳排放强度(<i>T</i>)	碳排放总量/GDP	吨/万元
产业结构(<i>IS</i>)	第三产业增加值/GDP	%
城镇化水平(<i>U</i>)	城镇人口总量/总人口	%

$$\ln I = \ln \alpha + a \ln P + b \ln A + c \ln T + d \ln IS + f \ln U + \ln \varepsilon \tag{7}$$

其中, $\ln \alpha$ 为常数项, $\ln \varepsilon$ 为误差项, a 、 b 、 c 、 d 、 f 分别是总人口数量、人均 GDP、碳排放强度、产业结构、城镇化水平的系数。此模型解释为, P 、 A 、 T 、 IS 、 U 其中之一分别每变动 1%, 其他变量保持不变时, I 分别变动 $a\%$ 、 $b\%$ 、 $c\%$ 、 $d\%$ 、 $f\%$ 。

2.3. 模型参数估计方法

在回归分析问题中, 涉及多个复杂的经济因素的模型解释变量间通常存在一定相互影响关系, 造成解释变量间存在多重共线性, 本文采用方差膨胀因子(VIF)方法判断变量间是否存在多重共线性。

$$VIF_i = \frac{1}{1 - R_i^2} \tag{8}$$

其中, R_i^2 为把第 i 个解释变量作为被解释变量, 将其对其它 $k-1$ 个解释变量做线性回归所得的可决系数。 VIF 值越大则指标间的共线性越严重, 一般认为 VIF 大于 10 则变量间存在严重的多重共线性, 严格情况要求 $VIF < 5$ 。

为解决变量间的多重共线性, 可以采取岭回归方法估计参数。以放弃普通最小二乘法的无偏性, 损失部分信息、降低参数估计精度为代价, 缓解解释变量间存在的多重共线性。岭回归方法是向模型加入惩罚项, 对参数进行 L2 正则化, 其损失函数为:

$$J(\theta) = \frac{1}{2m} \left[\sum_{i=1}^m (h_{\theta}(x^{(i)}) - y^{(i)})^2 + k \sum_{i=1}^m \theta_i^2 \right] \tag{9}$$

其中, m 为样本个数, $h_{\theta}(x^{(i)})$ 为第 i 个样本的预测值, $y^{(i)}$ 为第 i 个样本的真实值; k 为岭参数。

2.4. 数据来源

本文所用二氧化碳直接碳排放量数据来源于中国碳核算数据库(CEADs) [13] [14]; 电力消费量来源于《中国能源统计年鉴》; 其他经济指标来源于《中国统计年鉴》以及《湖北省统计年鉴》、《湖南省统计年鉴》、《河南省统计年鉴》。

3. 实证分析

3.1. 华中地区碳排放与经济发展现状

利用(1)式~(3)式, 经过核算与数据整合, 华中地区 2005~2021 年碳排放总量见图 1 (单位万吨)。17 年来华中地区碳排放情况总体可分为两个阶段, 第一阶段自 2005 到 2011 年, 在此阶段华中地区碳排放

量高速增长, 最高涨幅高达 15.29%, 平均涨幅为 8.75%。第二阶段为 2012~2021 年, 由于国家出台相关政策加大对碳排放量的管控, 虽然总体上碳排放量仍处于较高水平, 但是碳排放量总体放缓, 其中有四年处于逆增长。2021 年突有较大增长为异常年份, 或与新冠疫情有关。

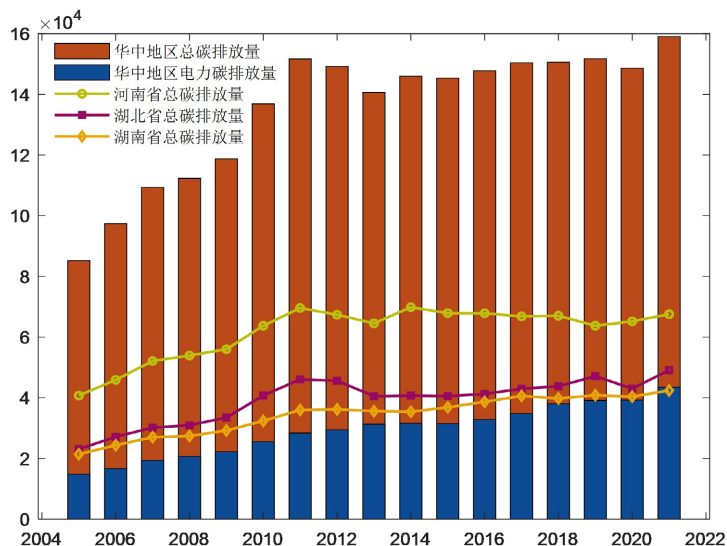


Figure 1. Total carbon emissions in Central China over a 17-year period
图 1. 华中地区 17 年间碳排放总量情况

从碳排放来源上看, 17 年来电力碳排放占比持续增加, 从 2005 年占比 17.37% 发展至 2021 年占比 27.34%, 上涨近 10 个百分点。由此可见, 华中地区能源结构优化卓有成效。从碳排放组成来看, 河南省碳排放总量 17 年来均远高于湖北省与湖南省, 其排放量占华中地区总碳排放量近半。湖北省与湖南省排放量相差不多, 总体上湖北省排放量略高于湖南省。未来在实现碳达峰与碳中和的经济发展中, 河南省“减排”工作或将成为工作重心。

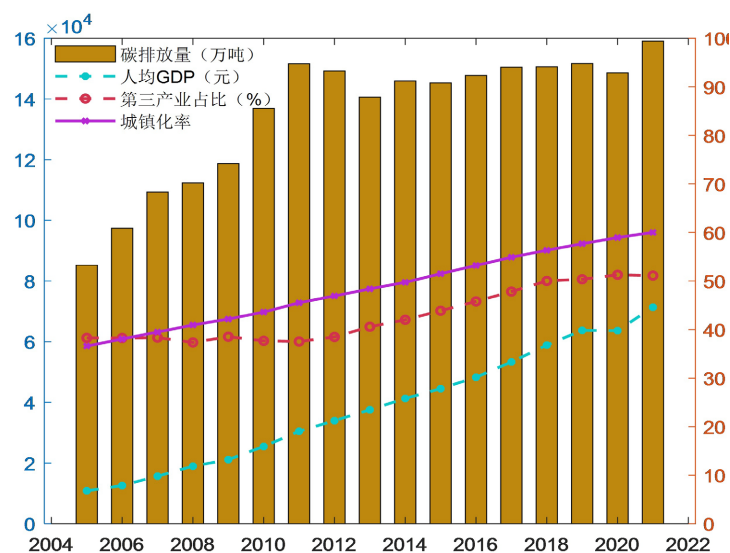


Figure 2. Trends in total carbon emissions and three economic indicators
图 2. 碳排放总量与三个经济指标变化趋势

华中地区碳排放总量与第三产业占比、城镇化率、人均 GDP 的变化趋势见图 2。其中人均 GDP 与城镇化率 17 年间均保持增长态势，与碳排放总量总体保持上涨趋势一致。第三产业占比变化趋势可同碳排放总量变化趋势一样以 2011 年为界分为两个阶段，第一阶段第三产业占比保持稳定且略有下降，同期碳排放总量高速增长；第二阶段第三产业占比稳步提高，同期碳排放总量基本稳定且呈现缓慢增长趋势。

17 年来华中地区人均 GDP 持续高速增长，2021 年华中地区人均 GDP 为 2005 年的 6.5 倍之多，说明华中地区经济发展活力旺盛，地区富裕程度日益提升，未来发展趋势向好。长期以来，由于国家战略安排，使得华中地区产业结构相对稳定，产业转型成果较为微弱，因此华中地区第三产业变化差比并不明显，但总体上仍有一定提高，经过 17 年的发展第三产业占比已从 38.2% 提高到 51.1%。华中地区城镇化率 17 年间稳步增长，城市化进程有序进行，在总体上显著提高，发展至 2021 年华中地区城镇化水平已达 60% 左右。

3.2. 建立扩展的 STIRPAT 模型

首先对模型(7)进行多元线性回归，以普通最小二乘法(OLS)对模型参数进行估计，估计结果见表 2。并对各解释变量利用(8)式进行共线性检验，检验 VIF 值见表 2。OLS 回归结果可以看出，参数结果与实际经济社会状况并不符合，且仅有 2 个解释变量通过了 95% 的显著性检验，各变量间 VIF 值均大于 10，存在严重的多重共线性问题，为缓解解释变量间的多重共线性问题，故采用岭回归方法对模型参数进行估计。

Table 2. OLS regression coefficients and related parameters
表 2. OLS 回归系数及相关参数

Variable	Coefficient	P > t	VIF
截距项	-2.93497	0.277	—
人口规模(<i>P</i>)	0.3838399	0.213	36.68
人均 GDP (<i>A</i>)	1.009175	0.000	937.81
碳排放强度(<i>T</i>)	1.02248	0.000	258.78
第三产业占比(<i>IS</i>)	0.0662099	0.359	104.52
城镇化率(<i>U</i>)	-0.0184153	0.917	1072.23

利用 SPSS26 软件对设定模型进行岭回归估计，其岭迹图见图 3。图中可以看出当 k 取 0.015 时各变量变化趋于平稳，故选择 $k = 0.015$ 对模型进行参数估计。

岭回归系数见表 3，所有解释变量均通过了 95% 的显著性检验，并且模型整体的 F 检验也通过了 99% 的显著性检验。所有系数中，仅第三产业占比系数为负，说明这两个变量对碳排放量表现出抑制作用；剩余三个变量对碳排放量均表现出促进作用。模型整体 $R^2 = 0.9763$ ，即所选解释变量能够解释碳排放量总量变动的 97.63%，说明模型设置合理，估计参数解释力强，符合现实经济意义，拟合效果表现优秀，模型拟合碳排放量与实际碳排放量对比图见图 4。最终模型(7)拟合为：

$$\ln I = -3.203 + 1.585 \ln A + 0.249 \ln T - 0.022 \ln T - 1.018 \ln IS + 0.552 \ln U \quad (10)$$

3.3. 基于情景分析法的华中地区碳达峰预测

情景分析法是根据历史发展情况，对未来不同发展速度的相关指标设定相应数据，达到预测的目的，此方法被广泛应用于碳排放量预测研究中。本文利用情景分析法，结合以上拟合的 STIRPAT 模型对华中地区碳达峰时间及达峰碳排放量进行预测。

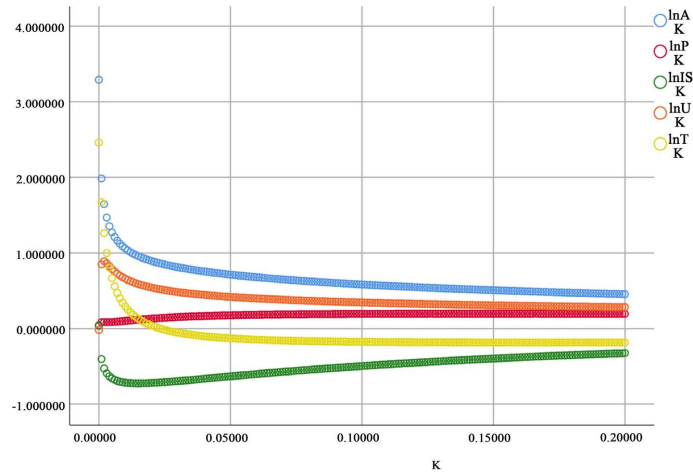


Figure 3. Ridge trace plot of model parameter estimates
图 3. 模型参数估计岭迹图

Table 3. Ridge regression coefficients and related parameters
表 3. 岭回归系数及相关参数

Variable	Coefficient	Std. err.	P > t
截距项	-0.7766462	26.22806	0.919
人口规模(<i>P</i>)	1.221095	2.968099	0.004(**)
人均 GDP (<i>A</i>)	0.2938688	0.4429458	0.000(***)
碳排放强度(<i>T</i>)	0.0541079	0.3154194	0.016(**)
第三产业占比(<i>IS</i>)	-1.061609	0.7069954	0.000(***)
城镇化率(<i>U</i>)	0.6719901	1.762671	0.020(**)

P (F-test) = 0.000***, R-square = 0.9763

其中**表示显著性水平为 0.05, ***表示显著性水平为 0.01。

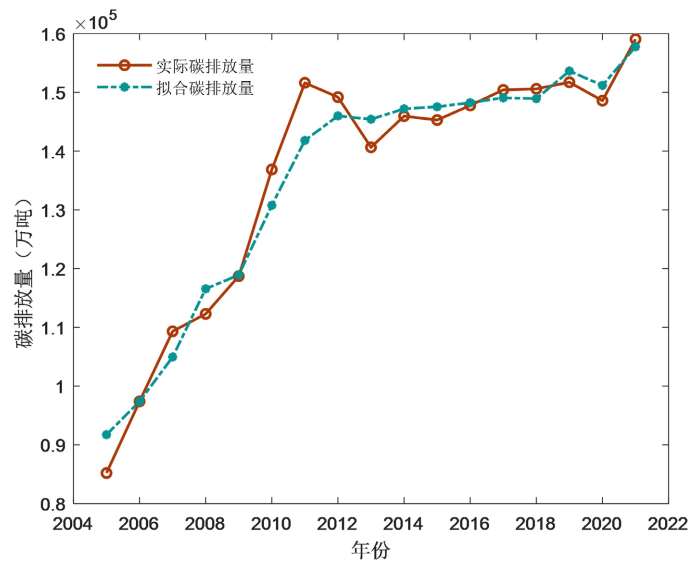


Figure 4. Comparison between fitted and actual values of the model
图 4. 模型拟合值与实际值对比

根据历史发展情况，设置基准发展情形、低速发展情形、高速发展情形三种情况对华中地区碳排放量进行预测。基准情形指标设以 2021 年近 5 年数据增速及增速变化速度，结合“十四五”规划相关数据为依据；低速发展情形即社会经济情况缓慢发展，相关社会、经济指标缓慢增加；同理，高速发展情形为社会进步较快，经济发展速度较快。低速发展情形与高速发展情形的指标数据设置以基准发展情况为基础做出相应调整。2021 年华中地区人口规模、人均 GDP、碳排放强度、第三产业占比、城镇化率增速分别为：0.042%、8.22%、-6%、2.24%、2.43%。以 2021 年各指标增速为增速，设置两个发展阶段，第一阶段为 2022~2025 年，第二阶段为 2026~2030 年，每阶段每年增速下降率见表 4。

Table 4. Decline in growth rate by stage of development

表 4. 各阶段发展增速下降率

阶段	情形	人口规模(%)	人均 GDP (%)	碳排放强度(%)	第三产业占比(%)	城镇化率(%)
阶段一	低	0.11	1.9	-0.4	0.5	0.2
	中	0.13	1.8	-0.5	0.6	0.3
	高	0.12	1.7	-0.6	0.7	0.4
阶段二	低	0.03	1.2	-1.2	0.03	0.35
	中	0.05	1.1	-1.3	0.1	0.3
	高	0.01	0.3	-1.57	-0.01	0.335

根据以上所设定发展情形，预测 2022~2030 年碳排放量变化趋势见图 5。其中，基准发展情形碳达峰时间为 2027 年，达峰碳排放量为 163,454 万吨；低速发展情形将于 2026 年完成碳达峰，其达峰排放量为 162,432 万吨；高速发展情形达峰时间为 2029 年，达峰排放量为 165,062 万吨。由于华中地区在 2012 年以后碳排放量管控相对严格，产业低碳转型效果较好，碳排放增速大大放缓，在 2019 年左右已基本达峰，所以三种发展情形预测碳达峰均在 2030 年前可以完成。

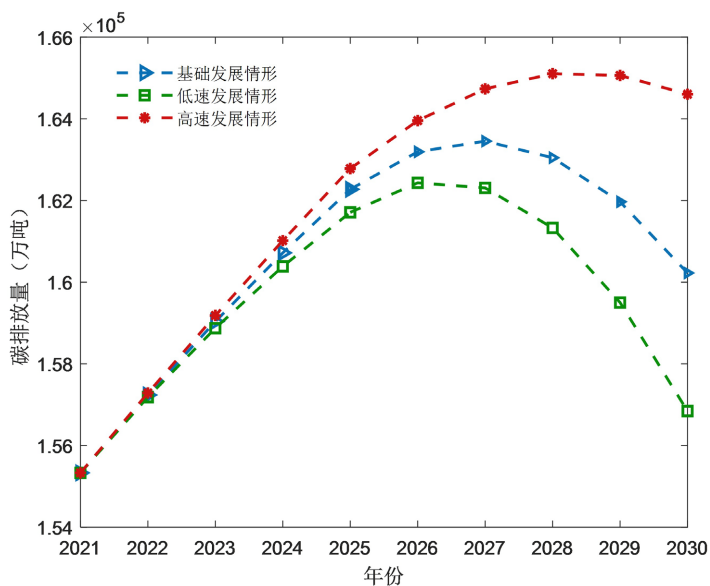


Figure 5. Trends in projected carbon emissions for three development scenarios

图 5. 三种发展情形预测碳排放量变化趋势图

4. 结论及建议

4.1. 结论

1) 通过对华中地区 2005~2021 年碳排放量进行核算, 发现华中地区碳排放总体呈现缓慢增长趋势。在 2005~2011 年前增长速度较快, 自 2012 年开始增速放缓, 二氧化碳排放得到有效控制。

2) 利用人口规模、人均 GDP、碳排放强度、第三产业占比、城镇化率五个指标对碳排放量建立扩展的 STIRPAT 模型, 各指标每变动 1% 对于碳排放量的影响分别为 1.22%、0.29%、0.05%、-1.06%、0.67%。其中, 第三产业对碳排放量增长贡献为负; 且随着科技的不断发展, 代表着技术水平的碳排放强度逐年降低, 说明这二者对于实现碳排放具有促进作用。

3) 通过情景分析法分别设定三种发展情形对未来华中地区碳排放量进行预测, 在三种情形下华中地区碳达峰时间均能在 2030 年前完成, 低速、基准、高速发展情形达峰时间分别为: 2026 年、2027 年、2029 年。

4.2. 建议

1) 加快产业结构升级, 合理分配三次产业构成, 适当提高第三产业占比, 推动产业结构转型。通过第三产业发展带动华中地区经济发展, 降低对工业经济效益的依赖, 在保持经济增长的同时逐步实现碳达峰。

2) 深化供给侧结构性改革, 坚持“三去一降一补”的发展导向, 着重“补”科技短板, 加大科技创新力度, 以科技创新推动各产业低碳发展。

3) 优化能源结构, 大力推广清洁能源, 降低化石燃料使用量。化石燃料燃烧碳排放是华中地区主要碳排放源, 通过清洁能源的普及, 将进一步降低碳排放量进而实现“双碳”目标。

基金项目

汉江师范学院 2023 年国家级大学生创新创业训练项目(编号: 202310518015)。

2021 年湖北省教育厅科学研究计划资助项目(B2021286)。

2022 年湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T2022035)。

参考文献

- [1] 习近平: 中国力争碳排放 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和[J]. 今日制造与升级, 2020(9): 10.
- [2] 2030 年前碳达峰行动方案[N]. 人民日报, 2021-10-27(007). <https://doi.org/10.28655/n.cnki.nrmrb.2021.011296>
- [3] 李建豹, 黄贤金, 揣小伟, 孙树臣. “双碳”背景下长三角地区碳排放情景模拟研究[J]. 生态经济, 2022, 38(11): 13-18+35.
- [4] 王力, 冯相昭, 马彤, 高健. 典型城市减污降碳协同控制潜力评价研究: 以渭南市为例[J]. 环境科学研究, 2022, 35(8): 2006-2014. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2022.06.30>
- [5] 刘茂辉, 翟华欣, 刘胜楠, 岳亚云, 杨多堃, 李婧. 基于 LMDI 方法和 STIRPAT 模型的天津市碳排放量对比分析[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(1): 63-70.
- [6] 黎孔清, 陈俭军, 马豆豆. 基于 STIRPAT 和 GM(1,1)模型的湖南省农地投入碳排放增长机理及趋势预测[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(2): 345-352.
- [7] 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.
- [8] 赵慈, 宋晓聪, 刘晓宇, 沈鹏, 陈忱, 刘磊. 基于 STIRPAT 模型的浙江省碳排放峰值预测分析[J]. 生态经济, 2022, 38(6): 29-34.
- [9] 李心萍, 苏时鹏, 张雅珊, 朱翔. 福建省碳排放预测与碳达峰路径分析[J]. 资源开发与市场, 2023, 39(2):

139-147.

- [10] 廖祖君, 张剑宇, 陈诗薇. 碳排放影响因素及达峰路径研究——基于四川省的分析[J/OL]. 软科学, 2022: 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1268.G3.20221109.1110.004.html>, 2023-03-17.
- [11] 孙洁, 王鹏飞. 基于 STIRPAT 模型研究南京碳排放的影响因素[J]. 物流科技, 2022, 45(2): 117-122. <https://doi.org/10.13714/j.cnki.1002-3100.2022.02.028>
- [12] 郭芳, 王灿, 张诗卉. 中国城市碳达峰趋势的聚类分析[J]. 中国环境管理, 2021, 13(1): 40-48. <https://doi.org/10.16868/j.cnki.1674-6252.2021.01.040>
- [13] Guan, Y.R., Shan, Y.L., Huang, Q., Chen, H.L., Wang, D. and Hubacek, K. (2021) Assessment to China's Recent Emission Pattern Shifts. *Earth's Future*, **9**, e2021EF002241. <https://doi.org/10.1029/2021EF002241> <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2021EF002241>
- [14] Shan, Y., Huang, Q., Guan, D., *et al.* (2020) China CO₂ Emission Accounts 2016-2017. *Scientific Data*, **7**, Article No. 54. <https://www.nature.com/articles/s41597-020-0393-y> <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0393-y>