

文章编号:1008-1542(2023)04-0421-10

基于 STIRPAT 模型的京津冀“碳达峰”预测研究

康利改¹, 曹紫霖¹, 刘伟², 吴小敬¹, 杨炆¹, 袁小雪², 王文静¹, 赵薇¹

(1. 河北科技大学建筑工程学院, 河北石家庄 050018; 2. 河北省科学院能源研究所, 河北石家庄 050081)

摘要:为了解决京津冀地区碳排放量达峰问题,以河北省为例,研究京津冀碳排放达峰实现路径,对京津冀未来的碳排放量进行预测分析,建立以河北省2004—2021年碳排放相关数据为基础的STIRPAT碳排放预测拓展模型。设置了6个情景,通过综合考虑人口规模、人均GDP、城镇化率、产业结构、能源强度、能源结构数据的变化速度,模拟不同情景下京津冀2022—2040年的碳排放趋势,进而预测京津冀三地的“碳达峰”时间与碳排放峰值。结果表明:北京除清洁发展情景是在2030年达峰,其余情景均在2035年达到峰值;天津除经济放缓情景是在2030年达峰,其余情景均在2035年实现“碳达峰”;河北除基准情景在2035年达峰外,其余情景均是在2030年达到峰值。所提的碳排放预测拓展模型在考虑多情景分析下,就京津冀地区如何控制和减少碳排放量提出相关建议,可为京津冀低碳经济的发展提供一定的参考依据。

关键词:统计预测理论;“碳达峰”;STIRPAT模型;岭回归;情景模拟;路径选择

中图分类号:X321 文献标识码:A DOI:10.7535/hbkd.2023yx04011

Prediction of carbon peak in Beijing-Tianjin-Hebei Region based on STIRPAT model

KANG Ligai¹, CAO Zilin¹, LIU Wei², WU Xiaojing¹, YANG Yang¹,
YUAN Xiaoxue², WANG Wenjing¹, ZHAO Wei¹

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 2. Institute of Energy, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050081, China)

Abstract: In order to solve the problem of early peak of carbon emissions the Beijing-Tianjin-Hebei Region, taking Hebei Province as an example, the realization path of peaking carbon emissions in the region was studied, and the future carbon emissions in the region were predicted and analyzed, the STIRPAT carbon emission prediction expansion model based on

收稿日期:2023-03-02;修回日期:2023-05-21;责任编辑:卢琼

基金项目:河北省创新能力提升计划项目(21557697D)

第一作者简介:康利改(1983—),女,河北石家庄人,副教授,博士,主要从事综合能源系统、建筑节能、双碳等方面的教学和研究。

通信作者:刘伟高级工程师。E-mail:283831530@qq.com

康利改,曹紫霖,刘伟,等.基于STIRPAT模型的京津冀“碳达峰”预测研究[J].河北科技大学学报,2023,44(4):421-430.

KANG Ligai, CAO Zilin, LIU Wei, et al. Prediction of carbon peak in Beijing-Tianjin-Hebei Region based on STIRPAT model[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2023, 44(4): 421-430.

carbon emission data in Hebei Province from 2004 to 2021 was established. Six scenarios were set up to simulate the carbon emission trend from 2022 to 2040 under different scenarios by comprehensively considering the change rates of six data such as population size, per capita GDP, urbanization rate, industrial structure, energy intensity and energy structure, and to predict the carbon peak time and carbon emission peak of Beijing, Tianjin and Hebei. The results show that: Except for the clean development scenario, which peaks in 2030, the other scenarios of Beijing will reach the peak in 2035. Except for the economic slowdown scenario, which is to peak in 2030, the remaining scenarios of Tianjin were to achieve carbon peak in 2035. In Hebei Province, except for the baseline scenario, which is to reach the peak in 2035, the remaining scenarios are to reach the peak in 2030. The proposed carbon emission forecast expansion model, considering multi-scenario analysis, puts forward relevant suggestions on how to control and reduce carbon emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, and provides certain reference for the development of low-carbon economy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region.

Keywords: statistical prediction theory; carbon peak; STIRPAT model; ridge regression; scenario simulation; path selection

随着全球平均气温迅速上升,人类即将面临的气候风险愈发增多。排放的温室气体种类很多,其中二氧化碳排放量占总量的73%。在“双碳”目标的大背景下,众多学者和机构围绕碳排放和“碳达峰”预测展开了大量研究。中国始终高度关注气候问题并积极实施减排降碳工作。

国内外相关研究成果逐渐丰富,众多学者针对碳排放预测的方法及模型进行了大量研究,碳排放预测模型主要有STIRPAT模型^[1-4]、LEAP模型^[5]、环境库茨涅兹(EKC)曲线^[6]、混频数据抽样模型^[7]、长期能源代替规划系统模型(LEAP-BTH)^[8]、系统动力学模型^[9-10]、动态情景模拟模型^[11-14]、反向传播神经网络模型^[15]和能源技术扩散模型^[16]等。此外,影响碳排放的驱动因素分析方面,基于Kaya恒等式^[17]、迪氏对数平均指数分解^[18]、拉氏指数分解^[19]、蒙特卡罗模拟^[20]等方法对影响碳排放的驱动因素进行分析,研究各因素对碳排放量的影响。

京津冀地区作为中国核心经济区的重要组成部分,也是能源消耗和二氧化碳排放的重点区域,京津冀地区的碳排放早日达到峰值对实现国家“碳达峰”目标尤为关键。2021年,北京能源消费结构持续优化,加快推动重点区域、重点行业可再生能源规模化利用,可再生能源开发利用总量达849.3万t标准煤。天津市作为中国首批低碳试点城市之一,其发展对于强化京津联动,促进京津冀协同发展、落实京津冀环境保护等方面具有重要作用。河北省是能源消耗大省,碳排放水平在全国处于前列。本文采用STIRPAT模型,对京津冀能源发展路径进行预测研究,有助于摸清京津冀能源行业碳排放底数、存在的问题及发展瓶颈,积极落实国家和京津冀地区“碳达峰”和“碳中和”的相关工作要求。以河北省为例,基于2004—2021年历史数据,对主要变量参数进行分析处理,对模型进行验证。随后设置6种不同的情景方案,分别预测6种情景下北京、天津和河北碳排放达峰时间及排放量峰值,模拟预测各情景方案对其“碳达峰”的影响。

1 模型建立

碳排放研究中常使用IPAT及衍生的ImPACT和STIRPAT模型、LMDI因素分解法、环境库茨涅兹曲线以及其他研究方法。其中IPAT模型表达形式简单,且人口、经济水平和技术的弹性系数均是1,不能体现出不同驱动因素的区别。为克服IPAT等式中各因素等比例影响的不足,YORK等^[18]基于IPAT等式进行改进,构建了STIRPAT模型。STIRPAT模型通过对数变换和回归分析对其中的参数进行估计,之后基于情景设置预测碳排放量,其中的变量数据都为人口、GDP、能源强度等这样的宏观指标,因此这个模型是“自上而下”的。相比其他模型及方法,该模型处理较为简单,同时具有更好的灵活性和拓展空间,能检验不同因素对环境压力的影响,因此,本研究应用STIRPAT模型对二氧化碳排放达峰进行预测。

模型的基本表达式如式(1)所示:

$$I = aP^bA^cT^de, \quad (1)$$

式中: I, P, A, T 分别为环境压力、人口规模、富裕程度和技术水平; a 为模型系数; b, c, d 分别为变量的弹性系数; e 为模型误差项。

由文献[4]和文献[5]可知,人口规模、人均GDP、城镇化率、产业结构、能源强度和能源结构是影响减排降碳的重要因素,本研究选用二氧化碳排放量来表示环境压力、人均GDP表示富裕程度项、技术水平考虑产

业结构、能源强度、能源结构。因此研究选取该 6 项因素作为自变量对 STIRPAT 模型进行扩展,扩展后的模型见式(2):

$$\ln I = \ln a + b \ln P + c \ln A + d \ln U + f \ln (IS) + g \ln (EI) + h \ln (ES) + \ln e, \quad (2)$$

式中: I 表示二氧化碳排放量; P 表示人口规模; A 表示人均 GDP; U 代表城镇化率; IS 代表产业结构; EI 代表能源强度; ES 代表能源结构; a 为模型系数; b, c, d, f, g, h 分别为变量的弹性系数; e 为模型误差项。具体变量及说明见表 1。

表 1 主要变量及说明

Tab.1 Main variables and explanations

变 量	说 明	单 位
二氧化碳排放量(I)	二氧化碳排放总量	t
人口规模(P)	年末常住人口数	万人
人均 GDP(A)	生产总值/年末常住人口数	万元/人
城镇化率(U)	城镇居民人口/年末常住人口	%
产业结构(IS)	第二产业/河北省当年 GDP 总额	%
能源强度(EI)	单位 GDP 能源消费量(以标准煤计)	t/万元
能源结构(ES)	煤炭消费量/能源消耗总量	%

2 模型验证

2.1 数据共线性检验

多重共线性是指在进行回归计算时,多个自变量之间存在相关关系,会使模型中的系数失去实际意义。以河北省为例,搜集 2004—2021 年的历史数据,如表 2 所示。采用 SPSS 数据分析软件对相关自变量进行共线性检验,结果见表 3。

表 2 河北省 2004—2021 年相关数据

Tab.2 Relevant data of Hebei Province from 2004 to 2021

年份	$I \times 10^{-6}/t$	$P/万人$	$A/(万元 \cdot 人^{-1})$	$U/\%$	$IS/\%$	$EI/(t \cdot 万元^{-1})$	$ES/\%$
2004	365.7	6 809.0	1.1	35.83	50.80	1.523	91.4
2005	408.9	6 850.8	1.3	37.69	51.80	1.623	91.8
2006	409.1	6 897.9	1.5	38.44	53.28	1.445	91.6
2007	454.1	6 943.2	1.8	40.25	52.93	1.367	92.3
2008	482.0	6 899.8	2.0	41.90	54.34	1.388	92.3
2009	511.0	7 034.4	2.2	43.00	51.98	1.319	92.5
2010	569.4	7 193.6	2.5	44.29	52.50	1.256	89.9
2011	623.4	7 240.5	3.0	45.60	53.50	1.183	89.1
2012	642.3	7 287.5	3.2	46.80	52.69	1.173	88.9
2013	657.8	7 332.6	3.3	48.12	52.20	1.165	88.7
2014	624.6	7 383.8	3.4	49.33	51.04	5.853	88.5
2015	639.4	7 424.9	3.6	51.33	48.00	1.140	88.8
2016	614.6	7 470.0	3.8	53.32	47.57	1.071	87.3
2017	541.9	7 519.5	4.1	55.00	46.58	1.087	86.1
2018	595.3	7 556.0	4.3	56.40	44.50	1.208	83.6
2019	593.4	7 592.0	4.6	57.62	38.30	1.204	82.0
2020	524.4	7 461.0	4.8	56.00	37.55	1.167	80.5
2021	525.6	7 448.0	5.4	61.14	40.50	1.089	67.0

表 3 河北省自变量共线性检验

Tab.3 Colinearity test of independent variables in Hebei Province

自变量	$\ln I$	$\ln P$	$\ln A$	$\ln U$	$\ln (IS)$	$\ln (EI)$	$\ln (ES)$
$\ln I$	1.000						
$\ln P$	0.842	1.000					
$\ln A$	0.902	0.974	1.000				
$\ln U$	0.807	0.982	0.978	1.000			
$\ln (IS)$	0.190	0.113	0.107	0.064	1.000		
$\ln (EI)$	-0.055	-0.102	-0.124	-0.140	0.961	1.000	
$\ln (ES)$	-0.460	-0.559	-0.524	-0.528	-0.860	-0.760	1.000

由表2可知,在2004—2012年间河北省年二氧化碳排放总量呈现逐年增加的趋势,在2013年达到阶段性峰值之后开始逐年降低,2017年出现峰谷,随后在2018—2021年期间波动较大;河北省人口规模除2008年出现轻微降低之外,基本呈现逐年上升的趋势;河北省人均GDP和城镇化率呈现逐年上升的趋势;产业结构在2004—2011年期间波动较大,之后开始逐年降低;能源强度在2014年出现尖峰,达到5.853 t/万元,这与2014年总能源消费量达到近10年峰值有关,其余年份均在1~1.7 t/万元之间波动;而能源结构在2014年出现峰谷,这同样与2014年总能源消费量达到近10年峰值有关。

由表3可知,能源强度和能源结构与其余因素存在负相关的情景,人口规模、人均GDP、城镇化率、产业结构4个变量之间均是正相关。此外,样本相关系数绝对值大于0.8时,可视为2个变量高度相关。由表3可以看出,多处绝对值超过了经验系数0.8。可见,人口规模、人均GDP、城镇化率、产业结构、能源强度和能源结构6个变量之间都不是相互独立的关系,存在严重的多重共线性。

2.2 岭回归方法

目前有许多解决多重共线性的方法,例如主成分分析法、带有岭回归的最小二乘法等,其中岭回归方法是通过约束长度系数来间接解决多重共线性问题,是对最小二乘回归的一种补充,模型的泛化能力强,从而提高模型的计算精度,同时可以有效地解决多重共线性问题,提高模型的稳定性和可靠性。因此,本文选取岭回归方法对STIRPAT拓展模型系数进行拟合,利用SPSS软件对数据进行岭回归处理以消除共线性,分别拟合各因素对河北省碳排放的影响模型,得出的岭迹图和决定系数RSQ的变化趋势,如图1所示,其中R为拟合优化指标,K为岭回归参数。

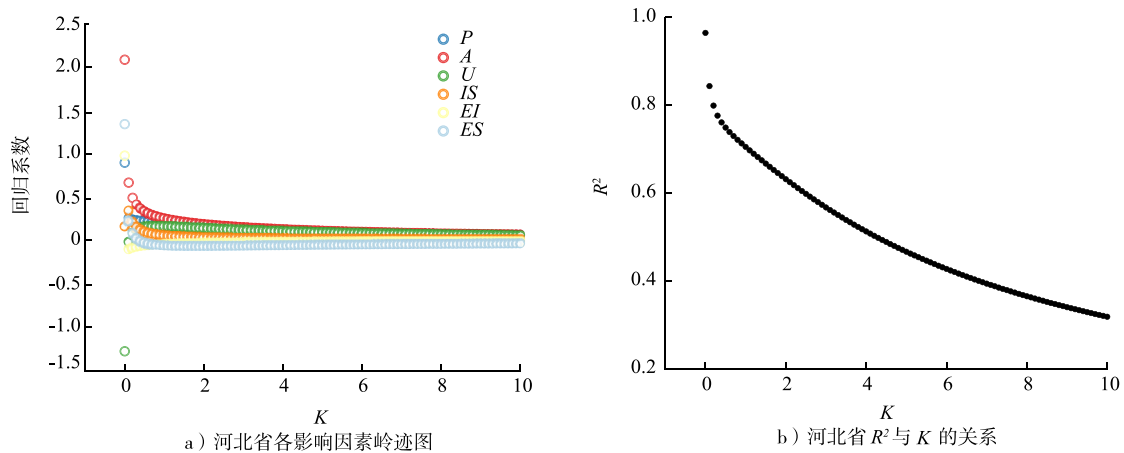


图1 河北省碳排放的影响因素岭迹图及决定系数变化

Fig. 1 Ridge plot of influencing factors and determination coefficient of carbon emissions in Hebei Province

通过观察图1可知,根据岭迹图,选择尽可能小的岭回归系数K,同时岭迹曲线逐渐平稳时的取值。在 $K=0.7$ 时,自变量逐渐平稳,同时 R^2 与K的关系图中对应的 R^2 处于较高水平。对数据进行标准化处理之后,得出拟合方程,表达式如式(3)所示:

$$\ln I = 0.3690 + 0.1549 \ln P + 0.1551 \ln A + 0.1548 \ln U + 0.1435 \ln (IS) + 0.1406 \ln (EI) + 0.1369 \ln (ES) + e_i \quad (3)$$

从式(3)来看,对于河北省,在保持其他变量不变的情况下,人口规模每增加1%,则碳排放量平均增加0.1549%;人均GDP每增加1%,则碳排放量平均增加0.1551%;城镇化率每增加1%,则碳排放量平均增加0.1548%。第二产业占比每减少1%,则碳排放量平均减少0.1435%;单位GDP能耗每减少1%,则碳排放量平均减少0.1406%;煤炭消耗占比每减少1%,则碳排放量平均减少0.1369%。由此可见,人均GDP对碳排放的影响最大。

对回归方程系数进行检验,其方差分析结果见表4,预测方程可决系数结果见表5。样本方差自由度为6,残差为3;样本方差的平方和为216.405,残差为3.109;样本方差为36.068,残差为1.036。预测模型的F值为34.798,F检验的Sig值为0.007,方程通过检验。调整之前R为0.993, R^2 为0.986,调整后的 R^2 达到0.96,标准误差为1.018,表明预测方程较为合理。

3 京津冀“碳达峰”前景预测

3.1 情景设置

从上文可知影响二氧化碳排放的因素,根据京津冀历年的经济发展水平以及社会民生相关情况,设置相关因素变化率为慢速、中速和快速3种模式。其中,慢速即各变量变化速率放缓;中速即假定各变量按照适中的速度发展;快速即各变量变化速率较快。以中速变化率为基准,根据各变量变化范围和各地区实际情况,慢速与中速相比年平均速率要减缓0.2%~1%,同理快速与中速相比年平均速率增加0.2%~1%。

参考近年来国家发展战略规划的节点设置,在2021—2040年间,以5年为周期对不同因素的变化率进行调整。各影响因素具体变化情况如下。

1)人口规模 人口规模受性别构成、人口质量、人口流动等因素影响,《北京城市总体规划(2016—2035)》中提出,“十四五”时期北京市的常住人口数量要控制在2300万人以下,且要长期保持在这一水平。2021年北京市人口规模为2188.6万人,假设中速下2021—2030年的平均年增速为0.55%,于2030年达到峰值2300万人,随后在2031—2040年平均年增速为-0.1%;天津人口发展“十四五”规划中提出,到2025年天津市常住人口达到1500万人左右。因此,假设中速发展模式下2021—2030年的平均年增速为2%,于2030年达到峰值,随后在2031—2040年的平均年增速为-0.1%;根据《河北省人口发展规划(2018—2035)》的要求,河北省人口总量会经历从快速增加到缓速增长,到2035年人口规模将会维持在7910万人左右。因此,假设中速下2021—2030年的平均年增速为1%,于2030年达到峰值,随后在2031—2040年的平均年增速为-0.5%;设定人口总量在慢、中、快速发展情况下,京津冀三地均分别在2035,2030,2025年达到最大值。

2)人均GDP 人均GDP一般指人均国内生产总值,是人们了解和把握一个地区宏观经济运行状况的有效工具。北京市2021年人均GDP为18.4万元,相关政策表示,北京“十四五”时期人均GDP将达到21万元。远景规划指出,到2035年人均GDP将达到32万元。假设中速发展下2021—2030年间的人均GDP平均年增速为5%,2031—2040年人均GDP保持3.5%的速率匀速增长;天津市“十四五”规划指出,到2025年天津市地区人均生产总值预期年均增长6%左右。因此,设定2021—2025年人均GDP以每年6%的速率增长,随后2026—2040年间,人均GDP年增长速率每5年降低1%;河北省目前发展处于工业化中后期,未来一两年很有可能跨入工业化后期,在“京津冀一体化”等战略推动下,河北省吸收了多家大中型企业,经济实现了快速增长,人均GDP也在缓慢增加。同时结合2010—2015年人均GDP年均增长率为7.5%,2016—2021年人均GDP年均增长率为7%。设定中速发展模式下,河北省人均GDP在2022—2025年间年均增长率为6.5%,2026—2040年间的年均增长率每5年降低0.5%。

3)城镇化率 城镇化是一个地区经济社会发展和资源配置的直观显示。近年来,京津冀不断完善城乡融合发展体制,常住人口稳步增加,城镇化率也稳步提高。由于北京2021年城镇化率为87.50%,较2010年增长了1.81%,因此假设中速发展模式下,2021—2025年间北京城镇化率年增速为0.14%,设定北京市城镇化率每5年年均速率减缓0.02%;天津2021年城镇化率为84.88%,天津人口发展“十四五”规划中提出,城镇化率预计于2025年达到86%,因此设定天津市城镇化率每5年增速降低0.06%;河北2021年城镇化率为61.14%,根据《河北省人口发展规划(2018—2035)》的要求,明确提出到2035年,常住人口城镇化率达到70%左右,因此设定中速发展下,2021—2025年城镇化率年均增速为1.3%,2026—2040年间每5年年均增速降低0.1%。

4)产业结构 产业结构是指在国家宏观调控制度和市场经济行为的双重作用下,逐渐形成的各个产业之间的数量比例关系^[20]。根据京津冀地区的政府发展报告,可以看出在京津冀协同一体化的整体目标下,北京将降低一般制造业的发展,努力发展节能环保产业并持续互联网行业的蓬勃发展,将呈现第三产业占主导的局面,2020年第二、第三产业综合占比99.7%,2021年第二产业占比18%,未来预计呈逐年下降趋势,

表4 方差分析

Tab.4 Analysis of variance

参数	df	SS	MS	F	Sig 值
Regress	6.000	216.405	36.068	34.798	0.007
Residual	3.000	3.109	1.036		

注:df表示回归方程系数的方差自由度;SS表示回归方程系数的方差平方和;MS表示回归方程系数的方差;F值为回归方程系数的F检验的统计量,是组间与组内的离差平方和与自由度的比值;Sig值为回归方程系数的显著性;Regress为回归;Residual为残差。

表5 预测方程可决系数

Tab.5 Predictable coefficient of the equation

R	R ²	调整后 R ²	SE
0.993	0.986	0.958	1.018

注:R为拟合优化指标;SE为标准误差。

假定北京地区中速模式下的第二产业结构占比在2021—2025年的年均降速为2.8%，随后每5年年均速率减缓0.2%；天津作为“碳达峰”试点城市之一，2021年第二产业占比为37.3%，假定2021—2025年间，中速模式下的第二产业结构年均降速为2%，随后每5年年均速率减缓0.1%；河北省目前第二产业仍占主导地位，2021年第二产业占比40.5%，产业结构从二三一转变为三二一，但整体上看第二产业占比较大，改革任务艰巨，仍需推进产业结构改革。假定2021—2025年间第二产业结构占比年均降速为0.6%，随后每5年年均速率减缓0.05%。

5)能源强度 用单位GDP的能源消耗量来表示能源强度，同时其也是衡量技术水平的指标。这一数值会随着技术的改进逐渐下降。京津冀高度重视科技企业发展，优化科技创新环境，为技术发展提供条件。但是随着技术瓶颈的出现下降速度会逐渐缓慢。《北京市“十四五”时期应对气候变化和节能规划》中指出，“十四五”时期北京市地区生产总值能耗下降14%，因此设定2021—2025年能源强度每年降低2.8%，2026—2040年间，每5年年均速率减缓0.2%；《天津市加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的实施方案》中指出，到2025年，单位地区生产总值能源消耗降低14.5%，即年均降速为2.9%，因此设定2026—2040年间，每5年年均变化率减缓0.2%；《河北省“十四五”循环经济发展规划》提出到2025年，单位GDP能源消耗比2020年降低15%左右，即每年降低3%，另外，由于河北省正处于能源转型阶段，因此设定2026—2040年间，每5年年均变化率减缓0.1%。

6)能源结构 能源结构指能源总生产量或总消费量中各类一次能源、二次能源的构成及其比例关系，本文中代表煤炭消费量占总能源消费量之比。北京市能源结构已基本实现清洁转型，煤炭消费量由2015年的1 165.2万t大幅削减到2020年的135万t，占全市能源消费比重由13.1%降为1.5%。《北京市“十四五”时期应对气候变化和节能规划》表明，到2025年煤炭消费总量控制在100万t以内，假设中速发展模式下2021—2025年煤炭消费量占比降速为2.3%，随后每5年年均速率减缓0.1%。天津煤炭消费占能源消费总量的比重由2015年的40.8%下降到2020年的34.1%，天津能源发展“十四五”规划明确指出，到2025年煤炭占能源消费总量比重降至28%左右，因此设定中速发展模式下2021—2025年能源结构下降速率为3.8%，随后每5年年均变化速率减缓0.2%。河北省目前仍以化石能源为主，但随着大力发展光伏、风电等新能源产业政策的推进，未来污染严重的能源消费比例会逐渐下降，非化石能源包括可再生能源的利用量会大幅度上升，2012—2021年，煤炭占能源消费总量的比重由88.9%逐步下降至67.0%。《河北省减污降碳协同增效实施方案》提出，到2025年煤炭消费量较2020年下降10%左右，因此设定2021—2025年煤炭消耗量占比降速为2%，随后每5年年均速率减缓0.1%。

3.2 情景组合

情景分析是预测多尺度碳排放路径的重要工具。情景分析法通过判断各种影响因素做出不同的假设，来规划未来可能的二氧化碳排放趋势。在影响因素较多的情况下，碳排放预测模型与情景分析法相结合可以更准确地把握碳排放发展趋势。通过设定京津冀地区影响二氧化碳排放相关因素变化率，得出了2022—2040年各因素对应的预测值。结合经济、文化、民生等相关行业政策的发展规律，同时参考文献[9]和文献[21]，对相关影响因素的变化率进行排列组合，建立6种具有典型代表意义的情景组合，并以此作为案例预测京津冀未来碳排放趋势，试图找出实现北京、天津、河北早日“碳达峰”的最优路径。情景组合设置详见表6。

表6 碳排放情景组合

Tab. 6 Carbon emission scenario combination

情景组合	<i>P</i>	<i>A</i>	<i>U</i>	<i>IS</i>	<i>EI</i>	<i>ES</i>
基准情景(S1)	中速	中速	中速	中速	中速	中速
产业升级情景(S2)	中速	中速	中速	高速	中速	中速
节能发展情景(S3)	中速	中速	中速	中速	高速	中速
清洁发展情景(S4)	中速	中速	中速	中速	中速	高速
绿色发展情景(S5)	中速	中速	中速	高速	高速	高速
经济放缓情景(S6)	中速	低速	低速	中速	中速	中速

1)基准情景(S1) 6个影响因素在未来的变化率均设置为中速，该情景是基本情况的体现。该情景是在现有关于经济、民生等政策不变的基础下，来制定制约碳排放的相关措施，即按照目前的发展趋势，不再进行另外调整。此外，6个影响因素的未来变化率也延续了之前的变化趋势。基准情景可作为比较另外5种情景的参考。

2) 产业升级情景(S2) 该情景下设定产业结构的变化率为高速,其余因素的变化率设定为中速。目前,京津冀地区逐步实施产业结构改革,大力发展以现代服务业、教育、社会保障为主的第三产业,同时推动第二产业各环节各部门的用能规范。在基准情景的前提下,该情景更着眼于产业结构调整,政府将花费更多精力去发展第三产业,致力于降低第二产业占比,从而对“高能耗、高排放”的行业进行有效抑制,淘汰落后产能,推动传统产业的升级改造。

3) 节能发展情景(S3) 在这一情景中,能源强度的变化率设定为高速,其余因素的变化率设定为中速。能源供给侧改革,推动了能量梯级利用、电转气、有机固碳循环等技术的应用,除了利用现有技术提高效率,一些新兴技术也将会被引入,技术水平的提高会有助于京津冀地区碳排放量的控制,使得能源利用率不断提高。该情景可以得出在基准情景基础上专注能源规范使用及能源利用技术升级的碳排放趋势。

4) 清洁发展情景(S4) 该情景下设置能源结构的变化率为高速,其余因素的变化率为中速。随着碳税相关政策的实施,碳交易市场快速发展,为清洁能源的发展提供了有力条件。该情景可以看出在现有基础上因地制宜、因时制宜,推广清洁能源的使用,进一步降低污染严重能源在能源消费中占比的碳排放趋势。

5) 绿色发展情景(S5) 该情景下设置产业结构、能源强度和能源结构的变化率为高速,其余因素的变化率设定为中速。绿色发展情景与基准情景相比,将更多注重于减碳因素的发展。该情景可以看出京津冀在保证经济平稳发展的基础上,推动产业升级、采用合理手段提高人均 GDP、实施节能减排、优化能源结构等多种措施,最终实现绿色发展的碳排放趋势。

6) 经济放缓情景(S6) 该情景中,人均 GDP 和城镇化率的变化率设置为低速,其余因素的变化率设置为中速。经济发展与节能环保等理念存在一定的冲突,在必要的时候需要选择优先发展对象。人均 GDP 和城镇化率对碳排放均有正向的推动作用。居民生活水平的提高、人均 GDP 的增长会促使二氧化碳排放量的增加。城镇化率的提高首先反映在城市面积的扩大,增加了城市交通距离和能源消耗,同时增加了城市居住空间以及供冷供热需求,因此能源消耗量也会增加。该情景可以看出京津冀在国家“碳达峰”目标的刚性约束的前提下,放缓经济发展步伐,相应的能源消耗总量和排放总量降低对碳排放趋势的影响。

3.3 结果分析

本文利用改进的 STIRPAT 模型进行碳排放预测,结合设置的 6 种情景组合,预测出不同情景下京津冀 2022—2040 年的碳排放趋势,如图 2—图 4 所示,并得到不同情景下北京、天津、河北二氧化碳排放达峰年份及对应数值,如表 7 所示。

从上述结果可以看出,北京除绿色发展情景(S5)是在 2030 年达峰之外,其余情景均是在 2035 年达到峰值。北京是中国最早提出“碳达峰”目标的城市之一,目前基本已实现清洁能源作为主要消费能源。由图 2 可知,绿色发展情景下的产业结构、能源强度、能源结构等因素均为高速发展,碳排放达峰日期早于基准情景,这是由于产业结构是影响碳排放的重要因素之一,该情景下,产业结构的高速发展优化意味着第二产业占比的高速降低。第二产业集中了多数的高能耗部门,产业结构向服务业优化升级可降低经济发展对能源资源消耗的依赖程度,有助于促进碳减排的达标。同时能源强度和能源结构均为高速发展模式,即人均 GDP 能耗和煤炭消费量占比较高的速率下降,从而减少二氧化碳排放量,因此该情景下的碳排放峰值是 6 种情景中最低的。

天津除经济放缓情景(S6)是在 2030 年达峰之外,其余情景均是在 2035 年达到峰值。由图 3 可知,经济放缓情景(S6)下的人均 GDP 和城镇化率为低速发展,其余各项因素为中速发展。首先,人均 GDP 的提高意味着居民消费水平的提高,这可能会导致资源和能源消耗的增加,在生活水平提高的同时也会增加能源消耗的碳排放。对于天津来说,作为北方的经济中心,小范围降低经济增长速度有助于达到排污减碳的目的。其次,城市已经成为经济活动的主要领域和二氧化碳排放的主要来源,城市二氧化碳排放量约占中国二氧化碳排放总量的 85%,城镇化率的提高一方面会导致对土地资源和生态环境的过度开发,进而增加碳排放和

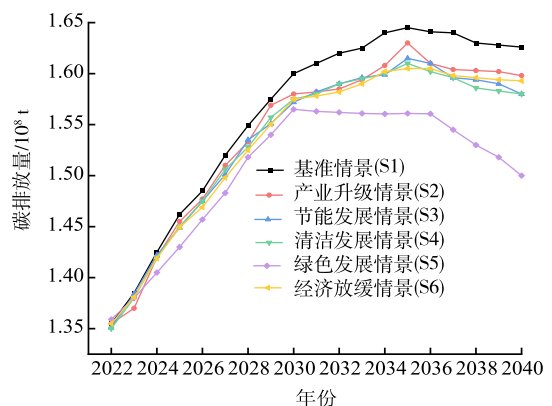


图 2 不同情景组合下北京碳排放趋势

Fig. 2 Carbon emission trends in Beijing under different scenarios

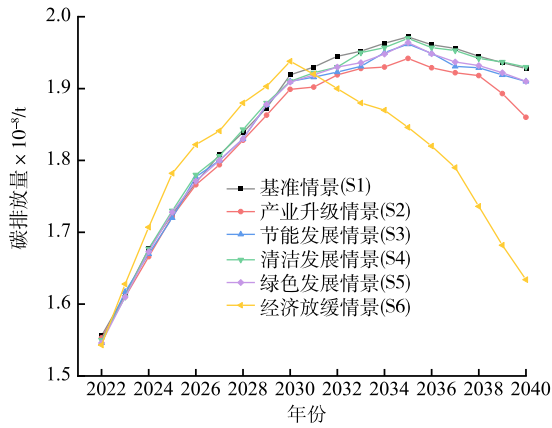


图3 不同情景组合下天津碳排放趋势

Fig. 3 Carbon emission trends in Tianjin under different scenarios

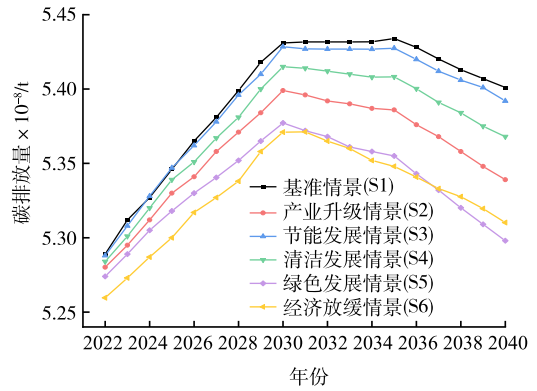


图4 不同情景组合下河北碳排放趋势

Fig. 4 Carbon emissions trend in Hebei province under different scenarios

表7 不同情景下京津冀“碳达峰”年份与数值

Tab. 7 Time and value of carbon peak in Beijing-Tianjin-Hebei under different scenarios

不同情景	北京		天津		河北	
	“碳达峰”年份	峰值 $\times 10^{-8}/t$	“碳达峰”年份	峰值 $\times 10^{-8}/t$	“碳达峰”年份	峰值 $\times 10^{-8}/t$
基准情景(S1)	2035	1.645	2035	1.972	2035	5.434
产业升级情景(S2)	2035	1.630	2035	1.942	2030	5.399
节能发展情景(S3)	2035	1.615	2035	1.962	2030	5.428
清洁发展情景(S4)	2035	1.610	2035	1.970	2030	5.415
绿色发展情景(S5)	2030	1.565	2035	1.964	2030	5.377
经济放缓情景(S6)	2035	1.605	2030	1.938	2030	5.371

能源消耗,另一方面可能会增加人口流动和交通拥堵,进一步增加能源消耗和碳排放。由于天津处于新一线城市,发展速度介于北京与河北之间,所以控制人均GDP以及城镇化率的增速有助于“碳达峰”早日实现,同时该情景下的碳排放峰值最低。

河北除基准情景(S1)是在2035年达峰之外,其余情景均是在2030年达到峰值。京津冀地区碳排放量主要由河北贡献,河北是京津冀地区乃至全国的“碳排放大户”。由图4可知,6种情景的峰值碳排放量由大到小分别是基准情景(S1)、节能发展情景(S3)、清洁发展情景(S4)、产业升级情景(S2)、绿色发展情景(S5)、经济放缓情景(S6)。其中,S2—S5分别加快了产业结构、能源强度和能源结构的发展。首先,产业结构对河北省“碳达峰”的影响较为显著,由于目前河北省大多为传统重工业和高能耗、高污染的行业,减碳压力较大,所以优化产业结构向低能耗、低污染的产业转型,能够有效减少能源消耗和碳排放。其次,能源强度和能源结构也是影响河北省“碳达峰”的关键因素,通过提高能源的使用效率,减少单位产出的能量消耗,同时提高能源结构,逐步采用清洁、可再生能源代替传统能源,也是减缓河北省碳排放的重要举措。同时考虑产业结构、能源强度和能源结构,可以促进碳减排的早日实现。另外,由于河北属于人口大省,较低的人均GDP和城镇化率意味着较低的物质消费水平和相应的能源消耗,可以减少碳排放,同时还有助于减少城市土地的过度开发和城市交通的拥堵问题,这说明在现有发展条件下,提高技术水平同时降低城镇化步调是最有利于“碳达峰”目标实现的路径,从而降低能源消耗和碳排放。

由表7可以看出,京津冀三地在基准情景下的碳排放峰值都是最大的,可知其余5种情景对各地碳减排有一定的促进效果,北京作为中国典型的高速发展城市,相较于天津、河北,北京的碳效率、能源效率始终保持在最优水平,有望最早实现“碳达峰”目标。天津处于向后工业化转变的阶段,碳减排效率处于北京与河北之间,在产业升级情景(S2)下,无法使得天津碳排放达峰时间提前,但可使碳排放峰值较基准情景(S1)降低了0.03亿t。天津与河北的能源结构消耗中煤炭仍占主体,所以在节能发展情景(S3)下天津与河北的碳排放峰值较基准情景(S1)降低较为明显。河北目前仍处于工业化中期,相较于北京和天津,河北第二产业仍然占主体地位并且第三产业水平偏低,这造成了能源消耗量大、碳排放量大的特点。除此之外,河北人口规

模较大,城镇化率并不理想。因此,除基准情景外,另外5种情景对河北“碳达峰”都有促进作用,且较北京、天津效果显著。

4 结 语

本文采用 STIRPAT 模型对京津冀碳排放达峰进行预测,选取岭回归方法对 STIRPAT 拓展模型系数进行拟合,建立了碳排放达峰预测模型,对京津冀实现“碳达峰”的现状和技术路径进行研究。通过综合考虑人口规模、人均 GDP、城镇化率、产业结构、能源强度和能源结构6种数据参数的变化速度,设置了6种不同的情景,并对6种情景进行了碳排放达峰预测,重点分析了实现“碳达峰”的影响因素,得出以下结论。

1)拓展的 STIRPAT 碳排放预测模型表明,人口规模、人均 GDP、城镇化率、产业结构、能源强度和能源结构是实现“碳达峰”的主要影响因素。

2)通过岭回归方法对北京、天津、河北2004—2021年的数据做出分析,拟合出了不受多重共线性影响的具有稳定性的 STIRPAT 回归方程,包括人口规模、人均 GDP、城镇化率、产业结构、能源强度和能源结构在内的6项指标。人口规模、人均 GDP、城镇化率的增加会导致碳排放量的增加,产业结构、能源强度、能源结构的优化有助于二氧化碳排放量的减少。

3)北京除绿色发展情景是在2030年达峰,碳排放峰值为 1.565×10^8 t,其余情景均是在2035年达到峰值;天津除经济放缓情景是在2030年达峰,碳排放峰值为 1.938×10^8 t,其余情景均是在2035年达到峰值;河北除基准情景是在2035年达峰,碳排放峰值为 5.434×10^8 t,其余情景均是在2030年达到峰值。

4)基准情景下,碳排放峰值最高,北京、天津、河北碳排放峰值分别为 1.645×10^8 , 1.972×10^8 , 5.434×10^8 t;北京在绿色发展情景下的碳排放峰值最低,为 1.565×10^8 t;天津与河北在经济情况放缓情景下,碳排放峰值较低,分别为 1.938×10^8 , 5.371×10^8 t。

为京津冀能早日实现“碳达峰”,结合本研究给出几点建议。

1)北京已具备实现“碳达峰”的经济基础,在保证经济平稳发展的基础上,采用合理手段推动产业升级、实施节能减排、优化能源结构有利于进一步促进碳减排。因此,应重点完善能源结构升级,加强工业污染治理,推动北京市的碳减排。

2)天津在产业升级、能源结构平稳发展的基础上,控制对土地生态的过渡开发,放缓经济发展,有利于进一步促进碳减排,应协调经济与能源结构的综合发展,以推动天津市的减排降碳工作。

3)河北地理面积广、人口密度大,在经济快速发展的同时造成了较为严重的环境污染,碳排放达峰之路任重而道远,在目前的基础发展模式下,碳排放很难在2030年达到峰值。因此,应在加快产业结构升级、能源清洁化发展的同时,着重发展制造业、服务业,不断优化创新,多措并举协调发展。

根据京津冀地区实际情况,本研究仅选取了6个影响较大的碳排放因素。在未来研究其他地区的碳排放问题时,可根据所研究地区的实际情况作进一步讨论,同时融合当地政策来设定不同情景。

参考文献/References:

- [1] 闫新杰,孙慧.基于 STIRPAT 模型的新疆“碳达峰”预测与实现路径研究[J].新疆大学学报(自然科学版)(中英文),2022,39(2):206-212.
YAN Xinjie,SUN Hui. Research on prediction and realization path of "carbon peak" in Xinjiang based on STIRPAT model[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition in Chinese and English),2022,39(2):206-212.
- [2] 邓小乐,孙慧.基于 STIRPAT 模型的西北五省区碳排放峰值预测研究[J].生态经济,2016,32(9):36-41.
DENG Xiaole,SUN Hui. Forecast of the northwest five provinces' carbon emissions based on STIRPAT model[J]. Ecological Economy,2016,32(9):36-41.
- [3] SU Kai,LEE C M. When will China achieve its carbon emission peak? A scenario analysis based on optimal control and the STIRPAT model[J]. Ecological Indicators,2020,112:106138.
- [4] 张攀路,都沁军.京津冀地区碳排放影响因素研究——基于扩展 STIRPAT 模型[J].国土资源科技管理,2022,39(3):14-23.
ZHANG Panlu,DU Qinjun. On influencing factors of carbon emissions in Beijing-Tianjin-Hebei region:Based on the extended STIRPAT model[J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources,2022,39(3):14-23.
- [5] 张亚博.基于 STIRPAT-LEAP 模型的京津冀区域碳排放峰值预测[D].北京:中国石油大学(北京),2021.
ZHANG Yabo. Prediction of Carbon Emission Peak in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on STIRPAT-LEAP Model[D]. Beijing,China

University of Petroleum (Beijing), 2021.

- [6] 许华,王莹. EKC视角下陕西经济增长与碳排放量实证研究[J]. 调研世界, 2021(1): 54-59.
XU Hua, WANG Ying. An empirical research on economic growth and carbon emissions of Shaanxi Province from the perspective of EKC [J]. The World of Survey and Research, 2021(1): 54-59.
- [7] 秦华英,韩梦. 基于 MIDAS 模型中国碳排放量的实时预报与短期预测[J]. 环境科学学报, 2018, 38(5): 2099-2107.
QIN Huaying, HAN Meng. Real-time forecasting and short-term prediction of Chinese carbon dioxide emissions based on MIDAS model [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(5): 2099-2107.
- [8] 黄昱杰,刘贵贤,薄宇,等. 京津冀协同推进碳达峰碳中和路径研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(2): 160-172.
HUANG Yujie, LIU Guixian, BO Yu, et al. Beijing-Tianjin-Hebei coordinated development toward the carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(2): 160-172.
- [9] 韩楠,罗新宇. 多情景视角下京津冀碳排放达峰预测与减排潜力[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1277-1288.
HAN Nan, LUO Xinyu. Carbon emission peak prediction and reduction potential in Beijing-Tianjin-Hebei region from the perspective of multiple scenarios [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1277-1288.
- [10] LI Dezhi, HUANG Guanying, ZHU Shiyao, et al. How to peak carbon emissions of provincial construction industry? Scenario analysis of Jiangsu Province [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 144. DOI: 10. 1016/j. rser. 2021. 110953.
- [11] 杨玉文,吴爱玲,朱洋洋. 碳排放驱动因素分解及动态模拟:以内蒙古自治区为例[J]. 统计与决策, 2020, 36(12): 76-80.
- [12] CUI Xuezhu, ZHAO Kuokuo, ZHOU Zhanhang, et al. Examining the uncertainty of carbon emission changes: A systematic approach based on peak simulation and resilience assessment [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2021, 91. DOI: 10. 1016/j. eiar. 2021. 106667.
- [13] HUO Tengfei, MA Yuling, CAI Weiguang, et al. Will the urbanization process influence the peak of carbon emissions in the building sector? A dynamic scenario simulation [J]. Energy and Buildings, 2021, 232. DOI: 10. 1016/j. enbuild. 2020. 110590.
- [14] MA Minda, MA Xin, CAI Wei, et al. Low carbon roadmap of residential building sector in China: Historical mitigation and prospective peak [J]. Applied Energy, 2020, 273. DOI: 10. 1016/j. apenergy. 2020. 115247.
- [15] LU Can, LI Wei, GAO Shubin. Driving determinants and prospective prediction simulations on carbon emissions peak for China's heavy chemical industry [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 251. DOI: 10. 1016/j. jclepro. 2019. 119642.
- [16] DING Suiting, ZHANG Ming, SONG Yan. Exploring China's carbon emissions peak for different carbon tax scenarios [J]. Energy Policy, 2019, 129: 1245-1252.
- [17] 朱勤,彭希哲,陆志明,等. 中国能源消费碳排放变化的因素分解及实证分析[J]. 资源科学, 2009, 31(12): 2072-2079.
ZHU Qin, PENG Xizhe, LU Zhiming, et al. Factor decomposition and empirical analysis of carbon emission changes in China's energy consumption [J]. Resource Science, 2009, 31(12): 2072-2079.
- [18] YORK R, ROSA E A, DIETZ T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts [J]. Ecological Economics, 2003, 46(3): 351-365.
- [19] WANG Can, CHEN Jining, ZOU Ji. Decomposition of energy-related CO₂ emission in China: 1957—2000 [J]. Energy, 2005, 30(1): 73-83.
- [20] 泰勒. 结构主义宏观经济学 [M]. 颜泽龙, 译. 北京: 经济科学出版社, 1990.
- [21] 刘彦君. 京津冀地区碳排放峰值预测与分析 [D]. 保定: 华北电力大学, 2017.
LIU Yanjun. The Forecast and Analysis of Carbon Emissions' Peak Value in the Beijing-Tianjin-Hebei Region [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2017.