

## 中国典型滨海城市碳排放分析及预测 ——以青岛市为例

明志军<sup>1a</sup>, 李沁原<sup>1b</sup>, 周娟<sup>1a</sup>, 李捷<sup>1a,\*</sup>, 李松枝<sup>1a</sup>, 王悦<sup>2</sup>

(1. 青岛理工大学 a. 环境与市政工程学院; b. 建筑与城乡规划学院, 青岛 266525; 2. 青岛明华电子仪器有限公司, 青岛 266000)

**摘要:** 准确评估城市温室气体排放并进行预测是建设低碳城市的重要难题之一。为厘清影响青岛市碳排放的主要影响因素, 通过 IPCC 温室气体清单法计算出青岛市 2005—2021 年全社会能源消费产生的碳排放量及青岛市自然碳汇量; 运用熵值法筛选后确定了影响青岛市碳排放的 5 个主要因素: 人口数量、人均 GDP、能源结构、能源强度、第二产业占比; 基于 STIRPAT 改进模型, 设置了 3 种情景模式对青岛市 2022—2030 年的碳排放进行预测, 得出以青岛市为代表的典型滨海城市碳排放趋势。结果表明: 能源结构是影响滨海城市碳排放的首要因素, 能源结构每增加 1%, 碳排放量增加 2.218%; 人均 GDP 的增长, 也会对碳排放起到正向作用, 人均 GDP 每增加 1%, 碳排放量增加 0.288%; 政府低碳政策调整优化可显著影响城市碳排放水平, 说明了建设低碳城市时政策引领的关键作用。

**关键词:** 碳排放; 碳排放预测; STIRPAT 模型; 滨海城市

**中图分类号:** X321 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2025)06-0055-09

## Carbon emission analysis and prediction of typical coastal cities in China: a case study of Qingdao

MING Zhijun<sup>1a</sup>, LI Qinyuan<sup>1b</sup>, ZHOU Juan<sup>1a</sup>, LI Jie<sup>1a,\*</sup>, LI Songzhi<sup>1a</sup>, WANG Yue<sup>2</sup>

(1. a. School of Environmental and Municipal Engineering; b. College of Architecture and Urban Planning, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Qingdao Minhope Electronic Instrument Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

**Abstract:** Accurately assessing and predicting urban greenhouse gas emissions is a crucial challenge in the development of low-carbon cities. To clarify the key factors influencing carbon emissions in Qingdao, the city's total carbon emissions from energy consumption and its natural carbon sink from 2005 to 2021 were calculated using the IPCC greenhouse gas inventory method in this study. After applying the entropy method for screening, five main influencing factors were determined, such as population size, per capita GDP, energy structure, energy intensity, and the proportion of the secondary industry. Based on this analysis, an improved STIRPAT model was employed to establish three scenario modes for predicting Qingdao's carbon emissions from 2022 to 2030. The resulting trends provide insights into

收稿日期: 2024-10-18

基金项目: 山东省住房和城乡建设厅研究开发项目(2022-k7-15); 青海省重点研发与转化项目(2024-SF-143)

作者简介: 明志军(1999—), 男, 湖北孝感人。硕士, 研究方向为碳达峰与碳中和。E-mail: 1486704253@qq.com。

\* 通信作者: 李捷(1972—), 男, 山东青岛人。博士, 教授, 主要从事节能减排及绿色低碳技术等方面的研究。  
E-mail: jli1972@sina.com。

the carbon emission patterns of typical coastal cities, with Qingdao serving as a representative case. The findings indicate that the energy structure is the most significant determinant of carbon emissions in coastal cities. Specifically, a 1% increase in the reliance on carbon-intensive energy sources leads to a 2.218% rise in carbon emissions. Additionally, GDP also contributes to carbon emissions; a 1% increase in per capita GDP results in a 0.288% increase carbon emissions; effective low-carbon policies and optimization measures can significantly mitigate emission levels, underscoring the critical role of policy guidance in achieving sustainable urban development.

**Key words:** carbon emissions; carbon emissions prediction; STIRPAT model; coastal cities

随着世界经济的不断发展,大量的能源消费导致温室气体过度排放所引发的环境问题也日益突出<sup>[1]</sup>。为此世界各国及地区相继确定碳达峰和碳中和目标,这将促使城市向新型低碳城市转型发展,低碳城市发展进程中如何准确测算城市碳排放是核心问题。

已有许多学者对城市碳排放领域进行了研究。如 RIBEIRO 等<sup>[2]</sup>提出了用人口规模和城市面积(或人口密度)同时描述城市碳排放的新模型,研究发现城市人口规模比人口密度对美国大都市区碳排放影响更大。WEIGERT 等<sup>[3]</sup>通过生命周期法测算了奥地利维也纳地区建筑行业的碳排放量。孙燕燕<sup>[4]</sup>采用“自下而上”法估算 1997—2017 年上海市旅游业碳排放量,发现旅游交通是上海旅游业碳排放增加的主要因素。贾涛等<sup>[5]</sup>提出了一种多源数据融合的城市居民建筑物碳排放定量计算方法,计算了武汉市所有单体居民建筑物的电能消耗碳排放量。但上述研究大多集中于分析城市中某一行业或部门的碳排放,缺乏对整个城市碳排放的分析研究。

近年来,以 STIRPAT 模型为基础进行拓展和调整,进而开展城市范围内的碳排放研究已成为一种趋势。WU 等<sup>[6]</sup>介绍了扩展的 STIRPAT 模型,并在扩展模型中确定了青岛市碳排放与驱动因素之间的关系。YANG 等<sup>[7]</sup>核算了成都 2009—2020 年的二氧化碳排放量,然后根据 STIRPAT 模型预测了 2021—2035 年 4 种情景下的二氧化碳排放量。然而,这些研究通常只计算城市碳排放的碳源部分,忽略了城市的碳汇部分,尤其是像青岛这样地理位置特殊的沿海城市,与内陆城市相比,沿海城市的碳汇具有独特的蓝碳成分,如红树林、海草床、滨海湿地等碳汇<sup>[8]</sup>。因此,本研究对青岛市的碳排放和自然碳储量进行了分析,并分析了不同驱动因素对青岛市碳排放的影响程度以及未来碳排放的变化趋势,为沿海城市控制温室气体排放和低碳城市发展规划提供理论依据和技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

青岛市区域总面积 11 293 km<sup>2</sup>。青岛市海岸线总长 905.2 km,海域面积约 1.17 万 km<sup>2</sup>,截至到 2020 年,全市建成区绿化覆盖率为 41%,较 2015 年减少 3.7%,现全市共有湿地面积 13.6 万 hm<sup>2</sup><sup>[9]</sup>。2021 年末全市常住人口数为 1025.67 万人,较 2015 年增加 81.07 万人。在“十三五”期间,全市生产总值由 0.93 万亿元增长至 1.24 万亿元,并保持年均约 7% 的增速快速发展。“十三五”以来,青岛市以绿色低碳发展为主线,大力推进能源结构持续优化,青岛市煤炭消费由 2015 年的 1832.56 万 t 下降到 2020 年的 1322.32 万 t,累计压减 510 万 t。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 碳排放计算方法

采用联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)清单法对青岛市 2015—2021 年全社会能源消费碳排放量进行计算:

$$M = \sum_{i=1}^x E_i \times H_i \quad (1)$$

$$H_i = C_i \times S_i \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中: $M$  为碳排放量,万 t; $E_i$  为能源  $i$  的消费量,万 t; $i$  为能源种类; $H_i$  为能源  $i$  的碳排放系数,t/t 或 t/万 m<sup>3</sup>; $C_i$  为能源  $i$  基于热值的碳含量值,g/MJ(以碳计); $S_i$  为能源  $i$  的低位发热量,MJ/t 或 MJ/万 m<sup>3</sup>,根据《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2020),标准煤的低位发热量为 29 307.6 kJ/kg,各能源的低位发热量即为各能源的折标煤系数乘以 29 307.6 kJ/kg。

### 1.2.2 自然碳汇计算方法

通过 IPCC 清单法得到碳汇的计算方法如下:

$$C = \sum_{i=1}^x K_i \times S_i \quad (3)$$

式中: $C$  为碳储量,万 t; $K_i$  为第  $i$  种储碳类型的储碳系数,t/hm<sup>2</sup>; $i$  为储碳类型; $S_i$  为第  $i$  种储碳类型的存储面积,hm<sup>2</sup>。

### 1.2.3 STIRPAT 模型

STIRPAT 模型是在 IPAT 模型的基础上,经过统计分析以及结合时代背景添加其他因素改编而成的,在研究碳排放方面有着较多的应用<sup>[10-12]</sup>。模型的基本形式如下:

$$I = \sigma P^a A^b T^c e \quad (4)$$

式中: $I$  为环境受影响程度; $P$  为人口数量; $A$  为人均 GDP; $T$  为技术水平; $e$  为随机误差; $\sigma$  为模型的系数; $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别为  $P$ 、 $A$ 、 $T$  的指数。

对等式两边同时取对数得到:

$$\ln I = \ln \sigma + a \ln P + b \ln A + c \ln T + \ln e \quad (5)$$

为使模型更贴近青岛实际情况,提高预测能力,利用影响较大的能源结构和第二产业占比与人口数量、人均 GDP、能源强度 5 个变量对 STIRPAT 模型进行扩展,等式两边取对数后表达式如下:

$$\ln M = \ln \sigma + \beta_1 \ln P + \beta_2 \ln A + \beta_3 \ln S + \beta_4 \ln R + \beta_5 \ln D_2 + \ln e \quad (6)$$

式中: $M$  为碳排放量; $P$  为人口数量; $A$  为人均 GDP; $S$  为能源强度; $R$  为能源结构; $D_2$  为第二产业占比; $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 、 $\beta_4$ 、 $\beta_5$  分别为各项的系数。

### 1.2.4 数据来源

基于数据的可获得性及准确性,按《青岛统计年鉴》《青岛市统计公报》及咨询青岛市统计局核算后的各种统计数据,选取 2005—2021 年青岛市能源消费量与 2015—2021 年青岛市碳汇数据进行研究。参考《中国能源统计年鉴》选取各能源折标准煤系数,储碳因子参考张春华、龙飞、FOURQUREAN、CHMURA 等的研究<sup>[13-16]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 青岛市碳排放核算分析

外调电力不计入青岛本市能源消费引起的碳排放,火力发电产生的碳排放已计入煤炭消费量中,故电力消费引起的碳排放不纳入核算。各能源的二氧化碳排放系数如表 1 所示。

表 1 各能源二氧化碳排放系数

能源种类	折标煤系数	低位发热量	碳含量	碳排放系数	二氧化碳排放系数
煤炭	0.7143 t/t	20 934.42 MJ/t	26.37 g/MJ	0.552 t/t	2.024 t/t
石油	1.4286 t/万 m <sup>3</sup>	41 868.84 MJ/t	20.10 g/MJ	0.842 t/t	3.086 t/t
天然气	1.33 t/万 m <sup>3</sup>	38 9791.08 MJ/万 m <sup>3</sup>	15.30 g/MJ	5.964 t/万 m <sup>3</sup>	21.868 t/万 m <sup>3</sup>

根据碳排放测算公式计算 2005—2021 年不同能源的二氧化碳排放量。煤炭、石油、天然气消费碳排放量计算结果如图 1 所示。

由图 1 可知青岛市的碳排放大致可分为以下 2 个时期:

1) 快速升高时期(2005—2012 年)。该阶段排放量的主要特点是变化幅度较大。对照青岛市经济发

展情况分析,2005年青岛市大力发展经济以及进出口行业,以煤炭为主的能源消耗逐年攀升,随之产生的碳排放量快速增加,这意味着青岛区域碳排放量与经济发展关联性强,尚未实现脱钩关系。

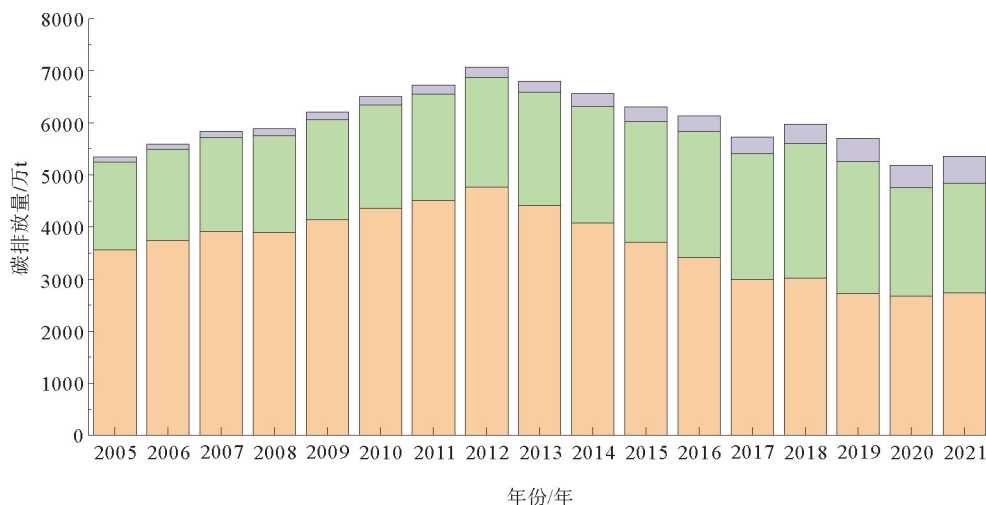


图1 2005—2021年不同能源的二氧化碳排放量

天然气; 石油; 煤炭

2) 波动降低时期(2012—2021年)。该阶段碳排放量从2012年的7068.73万t下降至2021年的5359.99万t。而这一阶段正是青岛市开始推行压减煤炭消费相关政策积极发展低碳经济的重要时期。煤炭消费产生碳排放量由2012年的4763.04万t削减到2021年的2730.95万t。推测受到新冠疫情的影响<sup>[17-18]</sup>,2020年青岛市碳排放量最小,为5184.62万t。

## 2.2 青岛市自然碳汇核算分析

结合青岛市实际情况进行分析,青岛市作为典型的滨海城市,拥有内陆城市不具备的蓝碳生态系统,但青岛市辖区内并无红树林、海草床等类型海域,故在实际计算青岛市海洋碳汇时只考虑盐沼及渔业养殖带来的碳汇增长。青岛市相关类型地域面积与储碳因子数据如表2所示。

表2 青岛市相关类型地域面积与储碳因子

碳汇类型	用地类型	地域面积/hm <sup>2</sup>							储碳因子
		2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	
绿地碳汇	林地	22 504	18 720	21 865	15 000	6 714	7 294	7 733	2.50
	耕地	67	67	68	67	68	67	66	1.92
	园地	28 472	27 203	27 156	27 470	28 184	29 446	31 179	2.10
海洋碳汇	盐沼	37 199	37 311	37 423	37 535	37 648	37 761	37 874	2.18
	渔业	33 829	33 255	33 275	32 403	32 344	31 516	32 233	1.73

青岛市2015—2021年自然碳汇量如图2所示。

由图2可看出,青岛市自然碳汇呈现波动下降趋势,由2015年的25.58万t波动下降至2021年的22.33万t。减少的碳汇大部分源于青岛市绿地碳汇,这是由于随着青岛市城镇化的快速发展,原始的林地区域面积近年不断缩小,土地利用变化致使自然碳汇下降。但青岛市的海洋碳汇近年来变化不大,青岛市碳减排工作不光需要关注碳排放源头的削减,同时还应重视末端的碳汇增汇,因此保护城市绿地碳汇和发挥海洋碳汇优势变得尤为重要。作为滨海城市,青岛市海洋蓝色碳汇开发仍有巨大潜力,如发展可持续性渔业养殖,保护滨海盐沼湿地等。

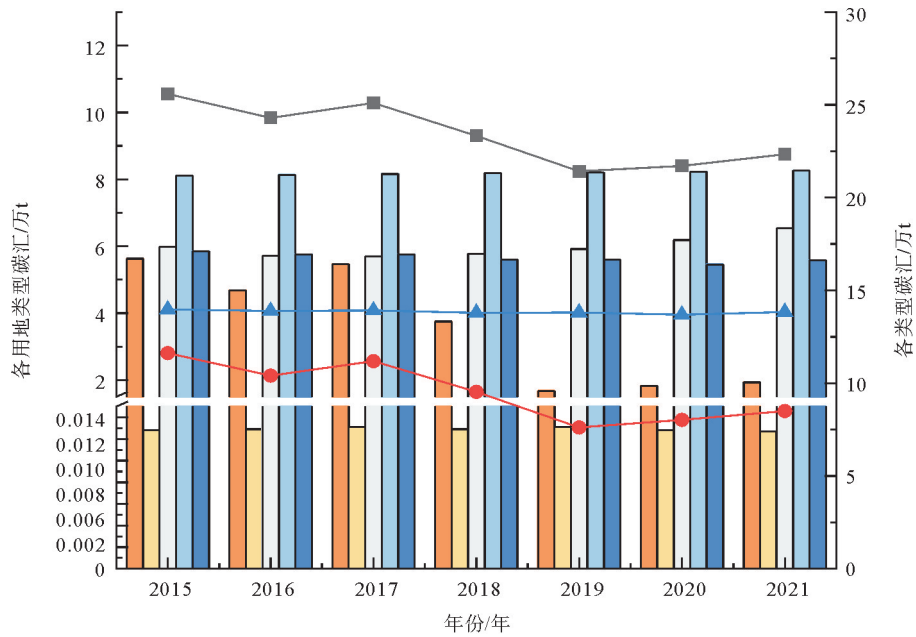


图 2 青岛市2015—2021年自然碳汇量

■ 林地; ■ 耕地; ■ 园地; ■ 盐沼; ■ 渔业;  
— 自然碳汇; — 绿地碳汇; — 海洋碳汇

### 2.3 青岛市碳排放影响因素分析

影响碳排放的因素有很多,如能源结构、能源强度、产业结构等<sup>[19-24]</sup>,为了精准地找出青岛市 2015—2021 年的主要影响因素,首先对冗长的变量进行筛选。熵值法可以在保证重要信息不丢失的同时简化数据的处理<sup>[25-26]</sup>。基于青岛市近 20 年基础数据与同类研究规律,拟定影响青岛市碳排放的变量如下:人口数量、人均 GDP、能源强度、能源结构、碳排放强度、城镇人口率、第一产业占比、第二产业占比、第三产业占比。其中,碳排放强度为单位 GDP 产生的二氧化碳量,能源强度为单位 GDP 所用的标准煤量,能源结构为单位标准煤产生的二氧化碳量,三者数据均通过计算得到。考虑 STIRPAT 基础模型中人口规模、财富水平、技术水平三方面因素,选定人口数量、人均 GDP、能源强度三者作为研究青岛市碳排放影响因素的一部分,其余因素经熵值法分析后得到的结果如表 3 所示。

表 3 经熵值法得到指标的权重

名称	城镇人口率/%	能源结构/(t·t <sup>-1</sup> )	碳排放强度/(t·万元 <sup>-1</sup> )	第一产业占比/%	第二产业占比/%	第三产业占比/%
权重	13.593	29.842	10.738	8.893	19.811	17.122

由表 3 可以看出,能源结构和第二产业占比的权重较大。因此选用影响较大的能源结构和第二产业占比与人口数量、人均 GDP、能源强度 5 个变量作为青岛市碳排放的主要影响因素进行分析研究。

将以上 5 个变量因素利用 SPSS 进行最小二乘法回归计算,计算得出 VIF(方差膨胀因子)如表 4 所示。

表 4 各变量膨胀因子(VIF)统计

变量	lnP	lnA	lnS	lnR	lnD <sub>2</sub>
VIF	166.292	179.176	425.849	35.518	25.287

由回归计算可知所有变量的 VIF 远大于 10,表明 5 个因素之间共线程度非常强烈,所以使用最小二乘法得到的模型无法准确地预测结果,为克服多个自变量间的共线问题,可以使用岭回归分析对式(6)进行拟合<sup>[27-28]</sup>。拟合岭迹如图 3 所示。

当  $K=0.02$  时,各自变量回归系数趋于平稳,选定岭回归参数为 0.02,得到拟合模型如下:

$$\ln M = 7.435 - 0.02 \ln P + 0.288 \ln A + 0.04 \ln S + 2.218 \ln R - 0.239 \ln D_2 \quad (7)$$

岭回归分析得到拟合优度  $R^2=0.911$ ,  $F$  检验显著,可知该模型拟合程度高,可用于后续预测。由改

进后的 STIRPAT 模型可以得出:

1) 青岛市人口数量每增加 1%, 碳排放量反而减少 0.02%, 这与多数学者研究结果有所不同。其原因在于青岛市作为山东省首个碳达峰城市, 近年来着力推行一系列削减煤炭消费的政策<sup>[29]</sup>, 从而使青岛市碳排放量明显下降, 因而人口数量这一因素在模型中变化系数为负值。由此可以看出地方政策性的约束对城市碳减排起到的作用较大, 城市的低碳化进程离不开政府政策性的引导。

2) 人均 GDP 每增加 1%, 碳排放量增加 0.288%, 说明人均 GDP 对碳排放的影响起到正向作用, 不符合库兹涅茨曲线<sup>[30-31]</sup>。这主要是因为青岛市经济飞速增长的同时, 仍需要依赖消耗大量的化石能源投入生产, 导致碳排放量增加。

3) 能源结构每增加 1%, 碳排放量增加 2.218%, 能源结构数值越大, 说明青岛市消费的能源中一次性化石能源占比越高, 所以碳排放量也就越大。从系数上看, 能源结构是驱动青岛市碳排放量增加的主要因素, 这也是为何青岛市近年来出台下发了一系列压减煤炭消费的政策文件以持续引导能源结构优化的原因。

4) 能源强度每增加 1%, 碳排放量增加 0.04%, 能源强度是指单位 GDP 所消耗的能源量, 能源强度越大, 单位 GDP 的能源消耗越多, 必然会导致碳排放量的增加。发展科技水平, 降低单位 GDP 所需消耗的能源量, 才能抑制青岛市碳排放量的增加。

5) 第二产业占比每增加 1%, 碳排放量减少 0.239%, 近年来青岛市不断优化产业结构, 第二产业占比持续下降, 但碳排放量仍有增加。这是因为青岛作为典型的滨海旅游城市, 旅游相关服务行业所产生的碳排放量日益增加且不容小觑, 说明青岛市应尽快发展低碳绿色旅游新模式和服务业的升级优化, 实现节能减排绿色发展及碳达峰目标。

#### 2.4 青岛市碳排放情景分析与预测

根据低碳发展目标, 采用情景分析法结合青岛市实际情况设定了 3 种模式: 基准模式、优化模式和低碳模式。基准模式: 基于现状条件下自然生态引导型的发展经济与碳排放状态。该情景假定人口、人均 GDP、能源强度、能源结构以及第二产业占比都基于现状测算未来的值。优化模式: 充分落实青岛市当前的节能减排措施, 采取国家政策促进所有能够实现碳减排的情景。在这种情景中, 青岛市的产业结构得到部分的调整, 能源结构得到一定的优化调整, 但节能减排的重大技术突破不显著。该情景假定人口、人均 GDP 等变量适度调整, 各变量变化适中。低碳模式: 全面展开低碳社会建设, 在经济、技术、能源等方面有重大举措且效果显著。该情景假定人口增长率进一步放缓, 人均 GDP 随着经济的发展增长速度放缓并趋于稳定, 第二产业占比明显下降。根据 3 种情景描述, 对人口总量、人均 GDP、能源强度、能源结构和第二产业占比分别设定 3 种变化速率: 低速率、中速率和高速率(表 5)。

人口数量: 根据《青岛市统计年鉴》以往人口统计数据, 设定青岛市人口增长速率: 2022—2030 年低、中、高年均增长率分别为 0.73%、1.24%、1.46%。

人均 GDP: 2015—2021 年青岛市人均 GDP 年均增长速率为 5.6%, 考虑到新冠疫情对地区经济生产的影响, 设定 2022—2030 年青岛市人均 GDP 增长速率: 中速率为 4.0%、高速率为 5.2%。

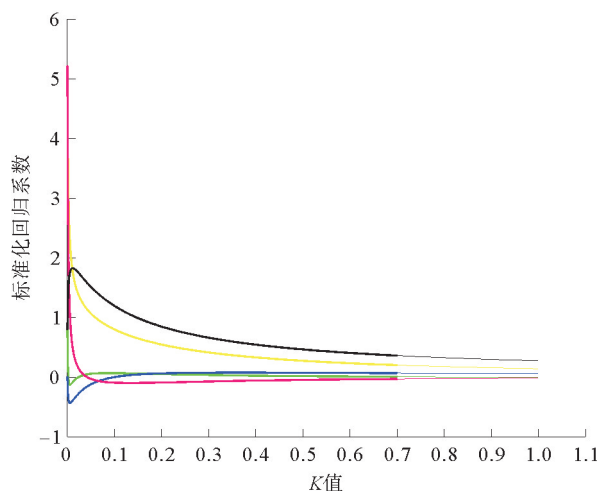


图3 岭迹

— 人口数量; — 第二产业占比; — 人均GDP;  
— 能源强度; — 能源结构

表5 3种情景预测下各因素变化速率

变量因素	基准模式	优化模式	低碳模式
人口数量	高	中	低
人均GDP	高	中	中
能源强度	低	中	高
能源结构	低	中	高
第二产业占比	低	中	高

能源强度:根据青岛市政府下发的《“十四五”能源发展规划》(青政办字〔2021〕78号),并结合青岛市“十三五”能源强度控制实际情况(2020年单位生产总值能耗为0.27t/万元,较2015年降低21.5%),设定能源强度降低速率为4%,中速率为5%,高速率为6.5%。

能源结构:根据青岛市政府下发的《“十四五”能源发展规划》(青政办字〔2021〕78号)中要求继续推进煤炭消费压减,到2025年,煤炭消费比重下降至23.5%左右,设定能源结构降低速率为1.6%,中速率为2.2%,高速率为3.1%。

第二产业占比:随着青岛市产业升级和产业转型工作的深入,工业占比势必呈下降趋势。根据青岛市近5年来第二产业占比年下降率1.1%,设定第二产业占比降低速率为1.3%,中速率为2.5%,高速率为4.2%。

根据3种情景模式下碳排放影响因素的预测值,采用STIRPAT改进模型对2022—2030年青岛市碳排放量进行预测,3种情景模式条件下的青岛市碳排放量发展趋势及预测结果见图4。

在3种情景预测下,青岛市的碳排放量均处于逐渐下降趋势,这与《中国净零碳城市发展报告(2022)》中研究结果一致<sup>[32]</sup>,由于近年来青岛市积极响应国家“双碳”目标政策,加大风能、氢能等绿色能源占比,碳排放指数排在样本城市首位。同时青岛市在“十三五”时期,单位面积碳汇量增长在报告选取的30个样本城市中排名第一。从预测结果看,在基准模式、优化模式、低碳模式3种情景下,到2030年时,青岛市碳排放较2021年将分别下降25.8%、34.77%、44.82%。

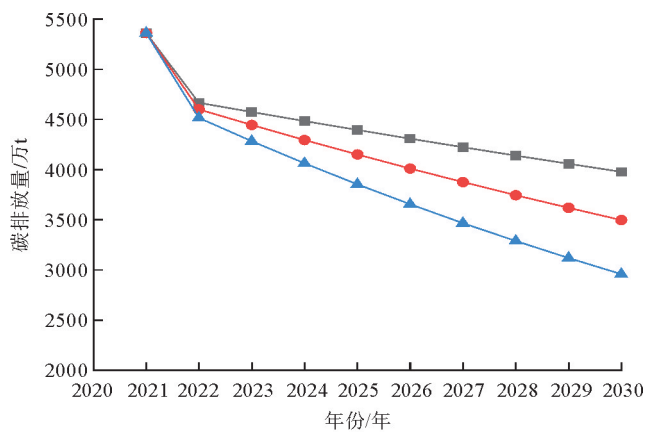


图4 青岛市碳排放情景设置预测  
—■— 基准模式; —●— 优化模式; —▲— 低碳模式

### 3 结论

1) 2005—2021年青岛市能源消费碳排放总量呈现先增加后减少的趋势,在2005—2012年期间,碳排放总量由5340.99万t上升至7068.73万t。青岛市能源消费碳排放总量中,煤炭消费产生的碳排放量占比最多。

2) 2015—2021年青岛市自然碳汇呈现波动下降趋势,自然碳汇总量从2015年的25.58万t下降至2021年的22.33万t。所有碳汇类型中林地碳汇下降比例最大。

3) 能源结构、人均GDP、能源强度会对青岛市碳排放总量产生正向作用,其中能源结构是青岛市碳排放量最主要影响因素,能源结构每变化1%,将引起碳排放量2.218%的变化。政策的强约束性,将对城市碳减排有较大的影响,导致模型中人口数量和第二产业占比的变化系数为负值。

4) 通过情景预测分析可知:青岛市通过优化能源结构、控制经济增速与提高能源利用技术水平可实现低碳模式,2030年时能够将能源消费碳排放量有效控制在2957万t左右,碳排放量仅为2021年的55.18%。

### 参考文献(References):

- [1] 国际能源署. 2021年全球二氧化碳排放反弹至历史最高水平[J]. 节能与环保, 2022(3):8.  
IEA. Global CO<sub>2</sub> emissions rebounded to an all-time high in 2021[J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2022(3):8.
- [2] RIBEIRO H V, RYBSKI D, KROPP J P. Effects of changing population or density on urban carbon dioxide emissions[J]. Nature Communications, 2019(10):3024.
- [3] WEIGERT M, MELNYK O, WINKLER L, et al. Carbon emissions of construction processes on urban construction sites[J]. Sustain-

- ability, 2022, 14(19): 12947.
- [4] 孙燕燕. 上海市旅游碳排放估算及其效应分解[J]. 地域研究与开发, 2020, 39(1): 122-126.  
SUN Yanyan. Estimation of CO<sub>2</sub> emission and its effect decomposition in tourism sector of Shanghai City[J]. Areal Research and Development, 2020, 39(1): 122-126.
- [5] 贾涛, 杨仕浩, 李欣, 等. 武汉居民建筑物碳排放反演计算和时空分析[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(5): 1063-1072.  
JIA Tao, YANG Shihao, LI Xin, et al. Computation of carbon emissions of residential buildings in Wuhan and its spatiotemporal analysis[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(5): 1063-1072.
- [6] WU C B, HUANG G H, XIN B G, et al. Scenario analysis of carbon emissions' anti-driving effect on Qingdao's energy structure adjustment with an optimization model, Part I: Carbon emissions peak value prediction[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 466-474.
- [7] YANG F M, SHI LY, GAO L J. Probing CO<sub>2</sub> emission in Chengdu based on STRIPAT model and Tapio decoupling[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 89: 104309.
- [8] 李捷, 刘译蔓, 孙辉, 等. 中国海岸带蓝碳现状分析[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(10): 207-216.  
LI Jie, LIU Yiman, SUN Hui, et al. Analysis of blue carbon in China's coastal zone[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(10): 207-216.
- [9] 刘岐涛. 青岛统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.  
LIU Qitao. Qingdao statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [10] 王琪. 基于 STIRPAT 模型的河北省碳排放峰值预测研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2019.  
WANG Qi. Forecast of carbon emission peak in Hebei Province based on STIRPAT model[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2019.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 张春华, 居为民, 王登杰, 等. 2004—2013 年山东省森林碳储量及其碳汇经济价值[J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1739-1749.  
ZHANG Chunhua, JU Weimin, WANG Dengjie, et al. Biomass carbon stocks and economic value dynamics of forests in Shandong Province from 2004 to 2013[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(5): 1739-1749.
- [14] 龙飞, 沈月琴, 吴伟光, 等. 区域林地利用过程的碳汇效率测度与优化设计[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 251-261.  
LONG Fei, SHEN Yueqin, WU Weiguang, et al. Measurement and optimum design of carbon sequestration efficiency of regional forestland use process[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(18): 251-261.
- [15] FOURQUREAN J W, DUARTE C M, KENNEDY H, et al. Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock[J]. Nature Geoscience, 2012, 5(7): 505-509.
- [16] CHMURA G L, ANISFELD S C, CAHOON D R, et al. Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2003, 17(4): 22.
- [17] 唐葆君, 吉嫦婧, 王翔宇, 等. 后疫情时期全国碳市场政策对经济和排放的影响[J]. 中国环境管理, 2021, 13(3): 19-27.  
TANG Baojun, JI Changjing, WANG Xiangyu, et al. Impact of national carbon market policy on economy and emissions in the post COVID-19 period[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, 13(3): 19-27.
- [18] 刘竹, 崔夺, 邓铸, 等. 新型冠状病毒肺炎疫情对中国 2020 年碳排放的影响[J]. 科学通报, 2021, 66(15): 1912-1922.  
LIU Zhu, CUI Duo, DENG Zhu, et al. Impact on China's CO<sub>2</sub> emissions from COVID-19 pandemic[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(15): 1912-1922.
- [19] 李敏. 青岛市能源消费碳排放及影响因素分析[J]. 经济师, 2017(7): 158-160.  
LI Min. Analysis of carbon emissions and influencing factors of energy consumption in Qingdao[J]. China Economist, 2017(7): 158-160.
- [20] ALGIERI B, FÜG O, LOMBARDO R. The Italian journey: Carbon dioxide emissions, the role of tourism and other economic and climate drivers[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 375: 134144.
- [21] FU L Y, WANG Q. Spatial and temporal distribution and the driving factors of carbon emissions from urban production energy con-

- sumption[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*,2022,19(19):12441.
- [22] 薛悦鑫,谢静超,怀超平,等.北京市能源碳排放影响因素分解分析[J].建筑节能,2022,50(9):128-132.  
XUE Yuexin,XIE Jingchao,HUAI Chaoping,et al. Decomposition analysis of influencing factors of energy related carbon emission in Beijing[J]. *Building Energy Efficiency*,2022,50(9):128-132.
- [23] 初丽霞,黄梦瑶.山东省碳排放脱钩效应及影响因素研究:基于Tapio脱钩指数和LMDI模型分析[J].环境科学与管理,2022,47(9):20-25.  
CHU Lixia,HUANG Mengyao. Study on decoupling effect and influencing factors of carbon emissions in Shandong Province:Based on Tapio Decoupling Index and LMDI model analysis[J]. *Environmental Science and Management*,2022,47(9):20-25.
- [24] 杨青,彭若慧,刘星星,等.基于地理加权回归的省域碳排放影响因素研究[J].环境工程技术学报,2023,13(1):54-62.  
YANG Qing,PENG Ruohui,LIU Xingxing,et al. Study on influencing factors of provincial carbon emission based on geographically weighted regression[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*,2023,13(1):54-62.
- [25] 朱喜安,魏国栋.熵值法中无量纲化方法优良标准的探讨[J].统计与决策,2015(2):12-15.  
ZHU Xi'an,WEI Guodong. Discussion on the excellent standard of dimensionless method in entropy method[J]. *Statistics & Decision*,2015(2):12-15.
- [26] 陆添超,康凯.熵值法和层次分析法在权重确定中的应用[J].电脑编程技巧与维护,2009(22):19-20.  
LU Tianchao,KANG Kai. The application of entropy method and AHP in weight determining[J]. *Computer Programming Skills & Maintenance*,2009(22):19-20.
- [27] 何秀丽.多元线性模型与岭回归分析[D].武汉:华中科技大学,2005.  
HE Xiuli. Research on multivariate linear model and ridge regression[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2005.
- [28] 赵东波.线性回归模型中多重共线性问题的研究[D].锦州:渤海大学,2017.  
ZHAO Dongbo. Study on multicollinearity in linear regression model[D]. Jinzhou:Bohai University,2017.
- [29] 陈思琦.青岛市用煤现状评估及对策建议[J].内蒙古煤炭经济,2020(22):151-152.  
CHEN Siqi. Assessment of the current situation of coal use in Qingdao and suggestions for countermeasures[J]. *Inner Mongolia Coal Economy*,2020(22):151-152.
- [30] 张哲,任怡萌,董会娟.城市碳排放达峰和低碳发展研究:以上海市为例[J].环境工程,2020,38(11):12-18.  
ZHANG Zhe,REN Yimeng,DONG Huijuan. Research on carbon emissions peaking and low-carbon development of cities:A case of Shanghai[J]. *Environmental Engineering*,2020,38(11):12-18.
- [31] 宋晓晖,张裕芬,汪艺梅,等.基于IPAT扩展模型分析人口因素对碳排放的影响[J].环境科学研究,2012,25(1):109-115.  
SONG Xiaohui,ZHANG Yufen,WANG Yimei,et al. Analysis of impacts of demographic factors on carbon emissions based on the IPAT model[J]. *Research of Environmental Sciences*,2012,25(1):109-115.
- [32] 21世纪经济研究院碳中和课题组.中国净零碳城市发展报告(2022):深圳高居榜首北京、青岛、杭州、昆明位列前五[N].21世纪经济报道,2022-06-02(11版).  
Carbon Neutrality Research Group of 21st Century Economic Research Institute. China net zero carbon cities development report 2022:Shenzhen tops the list,Beijing,Qingdao, Hangzhou and Kunming top five[N]. *21st Century Business Herald*,2022-06-02(11th ed).

(责任编辑 张晓靖;英文校审 李慧颖)