

DOI: 10.5846/stxb202203010481

侯丽朋, 唐立娜, 王琳, 钱瑶. 闽三角城市群碳达峰的多情景模拟分析. 生态学报, 2022, 42(23): 9511-9524.

Hou L P, Tang L N, Wang L, Qian Y. Multi scenario stimulation of carbon emissions peaking in the Golden Triangle of Southern Fujian Province, China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9511-9524.

闽三角城市群碳达峰的多情景模拟分析

侯丽朋^{1,2}, 唐立娜^{1,3,*}, 王琳¹, 钱瑶^{1,2}

1 中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 厦门市城市代谢重点实验室, 厦门 361021

摘要:碳达峰、碳中和是应对气候变化的关键手段。在闽三角碳排放核算的基础上, 运用 STIRPAT 模型建立了碳排放与人口规模、城镇化率、人均 GDP、能源强度和产业结构间的函数关系。结合情景分析法, 模拟上述因素在不同变化速率下的目标值, 对 2021—2050 年的碳排放及碳排放强度进行了预测, 为闽三角碳达峰提供时间和技术路径参考。此外, 还引入人均 GDP 二次方指标, 验证 EKC 假说的存在性。结论如下: (1) 能源强度是闽三角碳排放的负向因素, 其他因素均为正向因素。产业结构和人均 GDP 分别对闽三角碳排放有最大和最小的影响。(2) 人均 GDP 的二次方与碳排放间的系数为正, 表明碳排放和人均 GDP 间不存在倒“U”型曲线关系。闽三角碳排放和人均 GDP 间的关系不符合 EKC 假说的描述。(3) 基准情景下, 闽三角碳排放和碳排放强度持续增加, 碳排放不能达峰。厦门的碳排放强度将持续下降。低碳情景下, 厦门最可能在 2020 年实现达峰目标。低发展、中减排情景下, 闽三角在 2030 年实现碳达峰, 碳排放最大值为 0.57 亿 t。(4) 所有情景下, 闽三角都未实现 2030 年碳排放强度比 2005 年下降 60%—65% 的目标。基于上述结论, 为闽三角碳达峰提供如下意见: (1) 优化产业结构。漳州和泉州既需要升级生产技术又需要淘汰高能耗高排放产业, 发展高端制造和智能制造等; (2) 优化能源消费结构。“十四五”期间重点建设漳州核电、厦门水电、泉州热能等可再生能源工程。加快特高压电网的建设, 减少化石能源的消耗; (3) 尽快制定厦门的碳达峰计划, 引领闽三角碳达峰行动。

关键词: STIRPAT 模型; EKC 理论; 情景分析; 主成分分析; 峰值预测; 碳达峰

Multi scenario stimulation of carbon emissions peaking in the Golden Triangle of Southern Fujian Province, China

HOU Lipeng^{1,2}, TANG Lina^{1,3,*}, WANG Lin¹, QIAN Yao^{1,2}

1 Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academic of Sciences, Xiamen 361021, China

2 Chinese Academic of Sciences, Beijing 100049, China

3 Key Laboratory of Xiamen Urban Metabolism, Xiamen 361021, China

Abstract: Carbon emissions peaking and carbon neutrality are key means to address climate change. Based on carbon emissions accounting of the Golden Triangle of Southern Fujian Province (GTSF), China, a STIRPAT model is used to establish the functional relationship between carbon emissions and population size, urbanization rate, gross domestic product (GDP) per capita, energy intensity, and industrial structure. Combined with the scenario analysis method, the target values of the above factors under various change rates are simulated to predicate carbon emissions and carbon emissions intensity from 2021 to 2050. Providing time and technical path reference for carbon emissions peaking actions of the GTSF. In addition, the quadratic power of the GDP per capita indicator is adopted to verify the existence of the Environmental

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0502902)

收稿日期: 2022-03-01; 网络出版日期: 2022-07-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lntang@iue.ac.cn

Kuznets Curve (EKC) hypothesis. The main findings are as follows: (1) Energy intensity has negative impact on carbon emissions of the GTSF, while other factors have positive impacts. Industrial structure and GDP per capita have the greatest and the least impacts on carbon emissions of the GTSF, respectively. (2) The coefficient between the quadratic power of the GDP per capita indicator and carbon emissions is positive, indicating that there is no inverted-U curve relationship between carbon emissions and GDP per capita. The relationship between carbon emissions and GDP per capita does not accord with the description of the EKC hypothesis. (3) In the baseline scenario, carbon emissions and carbon emissions intensity of the GTSF continue to increase. Carbon emissions will not peak. Carbon emissions intensity of Xiamen will continue to decline. In a low carbon scenario, Xiamen is most likely to achieve carbon emissions peaking in 2020. Carbon emissions of the GTSF will be peaked in 2030 in the scenario with a low-speed growth of positive factors, and a medium-speed decline of negative factors. The peak value of carbon emissions is 0.57×10^8 tons. (4) In all scenarios, the carbon emissions reduction target of “carbon emissions intensity in 2030 is 60%—65% lower than that in 2005” will not be achieved. Based on the above conclusions, the following suggestions are provided for carbon emissions peaking of the GTSF: (1) Optimizing the industrial structure. For Zhangzhou and Quanzhou, it is urgent to upgrade production technologies, eliminate industries with high energy consumption and high carbon emissions, and develop high-end and intelligent manufacturing. (2) Optimizing the energy structure. We should build renewable energy projects, such as hydroelectric engineering in Zhangzhou, hydroelectric project in Xiamen, and thermal engineering in Quanzhou during the 14th Five-Year Plan, speed up the construction of the ultra-high voltage grid power grid, and reduce consumption of fossil fuels. (3) Carbon emissions peaking plans of Xiamen should be formulated to lead the peaking actions of the GTSF.

Key Words: STIRPAT model; EKC hypothesis; scenario analysis; principal component analysis; peak value predication; carbon emissions peaking

人类活动已经“毋庸置疑”地引起并加剧了全球气候变化危机,若不严格控制二氧化碳等温室气体的排放,21 世纪的全球温升将超过 2°C ^[1],导致人类社会面临严重的危机。削减温室气体排放是全人类共同的责任。虽然 2019 年年底爆发的新型冠状病毒肺炎疫情(疫情)在一定程度上削减了全球碳排放水平,但疫情后伴随经济复苏碳排放开始反弹^[2]。碳达峰、碳中和是应对气候变化的关键。碳达峰指的是二氧化碳排放量达到最大,经历平台期然后持续下降的过程^[3]。作为全球气候行动的先驱,欧盟在 20 世纪 90 年代实现了整体的碳达峰,美国和巴西分别在 2007 年和 2004 年达到碳排放最大值,到 2020 年,几乎所有发达国家都将实现碳达峰^[4]。已经实现达峰目标的国家和地区正积极探索碳中和之路,而尚未达峰的国家则迫切地需要明确达峰目标。受经济发展的驱动,发展中国家成为全球碳排放的主要贡献者。中国因碳排放总量大、占比高成为减排的重点,其达峰时间和峰值水平成为全球关注的焦点。为应对全球气候变化,2020 年 9 月我国承诺“努力争取 2030 年前实现碳达峰,2060 年前实现碳中和”。推动碳排放达峰不仅能为我国争取更多气候谈判话语权,而且能驱动我国实现高质量发展。碳达峰、碳中和(“双碳”)目标提出之后,学者们围绕“达峰路径”以及“峰值预测”等主题开展了研究。

蔡博峰等^[5]梳理了我国重点行业的达峰路径,袁家海和苗若兰^[6]则研究了电力部门的达峰路径,龚翔^[7]、曲余玲等^[8]分别指出了建筑行业以及钢铁行业可能的达峰路径。上述研究为我国高能耗高排放行业和部门的节能减排和碳达峰奠定了基础,并为全国碳达峰目标的实现提供了借鉴。学者们还探讨了省域^[9-10]、城市群^[11-12]、城市^[13]甚至街区^[14]等的达峰路径,这为不同空间尺度上的碳达峰行动的开展提供了技术支撑。研究发现,在保障经济发展和削减碳排放的双重要求下,2030 年是最适合我国整体碳达峰的时间^[15],但各地区达峰时间存在明显差异^[16]。东南沿海以及三大城市群的达峰时间将提前至 2025 年左右,部分地区已经实现了碳达峰^[17-21],但是中西部地区的达峰时间将延迟至 2025—2030 年,甚至 2030 年之后^[22-23]。经济发达、技术先进的地区将成为率先达峰区,而依赖高碳发展路径的地区将成为同步或者滞后达

峰区,梯次达峰更适合我国碳达峰的实际需求^[24-26]。

碳达峰预测主要是对未来碳排放的发展趋势进行分析,因此需要对影响碳排放的经济和社会因素等的发展变化情况进行模拟。情景分析法是碳达峰预测中最常用的方法。将情景分析法与 RICE-LEAP 模型相结合,洪竞科等^[27]对我国 2020—2050 年的达峰情况进行了预测;结合 STIRPAT 模型学者们对我国整体的以及东中西部地区实现达峰的路径进行了探究^[28-29];王少剑等^[11]将情景分析与蒙特卡洛分析方法结合对珠三角的碳达峰进行了动态模拟;岳书敬^[18]则是将情景分析与分解分析相结合,预测了长三角城市群碳达峰的情况;结合 CGE 模型,王勇等^[30]分析了碳达峰对我国经济发展的影响。基于情景分析的碳达峰预测结果显示,实现碳达峰需要强化负向因素,尤其是能源类因素的抑制作用^[31-32]。基准情景下,如果不优化发展模式我国多数地区难以实现如期碳达峰^[33-35];减排情景下,各地区不仅能降低碳排放水平还能提前达峰;减排力度越强峰值越低、达峰时间越早^[36-37]。实现碳达峰须将促进碳排放增长的规模和强度因素控制在中低速增长,而起减排效应的结构和效率因素需设定为中低碳或强低碳情景^[38-40]。碳达峰路径优化以及碳达峰与碳中和的关系研究也逐渐得到了重视:一方面要以更低的成本实现碳达峰^[41],另一方面要尽早达峰,减轻碳中和的压力^[42]。

福建省是我国典型的碳排放总量少且强度低的省份,但经济快速发展驱动下地区碳减排压力持续升高。“双碳”目标提出后福建省也承诺提前达峰。闽三角是福建省的经济中心,同时也是碳排放中心^[43],闽三角的碳达峰对福建省“双碳”目标的实现至关重要。《福建省“十三五”能源发展专项规划》表示“支持厦门、泉州中心城区等优化开发区域率先实现碳排放峰值目标”。闽三角面临率先达峰的压力,但尚未明确达峰路径。梯次达峰路线下制定闽三角的碳达峰行动方案必须综合考虑地区历史碳排放和经济社会发展等多种因素。基于上述背景,本研究开展闽三角碳达峰预测研究。首先对其历史碳排放进行了核算,然后使用 STIRPAT 模型和主成分分析法评估了经济社会发展对碳排放的影响,建立了碳排放与人口、富裕度和技术的函数关系,最后结合情景分析法设定了上述因素在不同发展速率下的发展目标,对闽三角的碳排放进行了预测。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

闽三角城市群包括厦门、漳州和泉州 3 个城市。从经济发展水平看,泉州 GDP 总量最大,厦门人均 GDP 最高。从产业结构看,厦门是以高科技产业为主的服务型城市,漳州是处在快速工业化阶段的增长型的城市,泉州的产业活动以制造业为主。受经济发展和技术水平等的影响,3 个城市的节能减排目标以及碳达峰行动进程存在较大的差异。

厦门是我国首批低碳试点城市。依托国家低碳试点城市建设,厦门重点推动高端制造业以及先进服务业等的发展。参考国家《2030 年前碳达峰行动方案》,厦门对能源、交通以及工业等重点领域的节能降碳目标做出指示。福建省节能减排规划中强调了厦门率先达峰的重要性。相关研究表明厦门直接碳排放已达峰,综合碳排放进入平台期^[21]。厦门东坪山近零碳排放示范区是闽三角地区碳达峰的模板。漳州一直处于经济快速发展的态势中,碳排放增长较快。《漳州市“十三五”节能减排综合工作方案》规定,到 2020 年,全市万元生产总值能耗比 2015 年下降 14%,煤炭占一次能源消费比重从 2015 年的 67.5%下降到 44.6%等。目前漳州碳达峰行动重点关注的是节能和能源结构优化。规模以上工业企业的减排是漳州节能减排的重点。泉州是闽三角的能源消费中心,能源“双控”是重点。《泉州市“十三五”节能减排综合工作方案》规定,到 2020 年,全市万元地区生产总值能耗比 2015 年下降 16%。2022 年泉州市《政府工作报告》指出要落实“双碳”目标任务,从能耗“双控”向碳排放“双控”转变。《泉州制造 2025 发展纲要》明确指出要促进传统产业转型升级,加快新兴产业发展,加强重点领域节能。

1.2 清单法

本研究使用清单法结合本地碳排放系数对 2005—2017 年闽三角的碳排放进行核算^[44]。

$$CE = \sum_i CE_{\text{urban}} \quad (1)$$

$$CE_{\text{urban}} = \sum_j CE_{\text{sectoral}} \quad (2)$$

$$CE_{\text{sectoral}} = \text{Act}_{\text{sectoral}} \times I_{\text{sectoral}} \quad (3)$$

式中, CE 、 CE_{urban} 和 CE_{sectoral} 分别表示闽三角总碳排放、城市碳排放和部门碳排放, $\text{Act}_{\text{sectoral}}$ 和 I_{sectoral} 分别表示部门活动强度与碳排放系数, $i=1,2,3, j=1,2,\dots,5$ 。将与 GDP 相关的指标统一换算为 2005 年不变价。

1.3 STIRPAT 模型

环境退化的根源在人口增长和经济发展, 技术发展可消除这些不利效应, 因此环境 (I) 是人口 (P)、富裕度 (A) 和技术 (T) 的函数^[45], 将其修正为 STIRPAT 模型 (Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology) 可消除“所有因素同比例地影响环境”这一假设对回归的影响^[46]:

$$I = PAT \quad (4)$$

$$I = aP^b A^c T^d e \quad (5)$$

式中, a 、 b 、 c 、 d 分别为模型系数, 以及人口、富裕度和技术的系数, e 为随机误差, 将其进行对数转换:

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

式中, I 表示环境效应, 即碳排放 (CE)。人口因素为人口规模 (P) 和人口城镇化率 (U)。富裕度用人均 GDP (GP) 表示, 也表示经济发展。引入人均 GDP 的二次方, 分析碳排放与人均 GDP 间的曲线关系, 验证 EKC 假说, 判定标准见表 1。技术因素为能源强度 (EI) 和产业结构 (S), 上述公式扩展为:

$$\ln CE = a_0 + a_1 \ln P + a_2 \ln U + a_3 \ln GP + a_4 (\ln GP)^2 + a_5 (\ln GP)^3 + a_6 \ln EI + a_7 \ln S + \varepsilon \quad (7)$$

式中, a_0 和 ε 为常数项和随机误差项, a_1 — a_7 为待估计系数。

表 1 碳排放与人均 GDP 的曲线关系

Table 1 Curve relationship between carbon emissions and GDP per capita

系数 Coefficient	曲线样式与拐点 Curve style and inflection point
$a_3 > 0, a_4 < 0, a_5 = 0$	倒“U”型 先增加后减少, 拐点人均 GDP = $-a_3 / (2 \times a_4)$
$a_3 < 0, a_4 > 0, a_5 = 0$	“U”型 先减少后增加, 拐点人均 GDP = $-a_3 / (2 \times a_4)$

a_1 — a_7 为待估计系数

1.4 主成分分析

多重共线性指的是回归中由于变量的高度相关关系而使得模型估计失真的问题。多重共线性会导致伪回归, 进而导致回归模型失去实践意义。使用主成分分析法处理共线性问题。

(1) 统计检验

①稳定性检验: 在 Eviews 10 软件中使用 ADF (Augmented Dickey Fuller) 检验方法通过检验变量单位根 (unit root test) 的形式判定时间序列变量的稳定性。t 检验值 < 临界值时, 序列稳定; 所有序列都稳定时, 才能进行回归; ②协整检验: 使用普通最小二乘 (Ordinary Least Squares, OLS) 回归方法模拟变量间的回归方程, 对回归方程的残差进行单位根检验, 若残差通过单位根检验, 则时间序列间存在协整关系, 可以进行回归; ③共线性检验: 通过观察变量间的方差膨胀因子 (Variance Inflation Factor, VIF) 确定共线性, $VIF > 10$ 就存在共线性问题, VIF 越大共线性越严重^[47]; ④方法适用性检验: KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 检验中 $0 \leq KMO \leq 1$, 越接近 1 变量相关性越强, 主成分分析方法适用性越强^[48]。

(2) 提取主成分

在 SPSS 22.0 软件中使用因子分析法 (Factor Analysis) 提取特征值 > 1 或累积解释率 > 85% 的变量为主成分^[49]。

1.5 情景分析法

1.5.1 基准情景

趋势外推法常用于渐进式而非跳跃式变化的变量的预测。碳排放受经济社会因素影响, 经济社会因素随

着时间平稳变化,因此碳排放是时间轴上“渐进式”变化的变量。

$$Y = a + bX \quad (8)$$

$$a = \frac{\sum Y - b \sum X}{n} \quad (9)$$

$$b = \frac{\sum XY - a \sum X}{\sum X^2} \quad (10)$$

式中, Y 表示碳排放, X 表示时间序列, a 和 b 分别是截距和斜率。设定2011年的时间序列号 $X=0$,2005年的 $X=-6$,2017年的 $X=6$,因此2030年的 $X=19$,2050年的 $X=39$ 。

1.5.2 低碳情景

研究中将影响因素分为两类,发展型因素,包括人口规模、城镇化率和人均GDP;减排型因素,包括能源强度和产业结构。分别对上述因素设置高速(H)、中速(M)、低速(L)的发展速率,以五年为一个周期,预测不同发展速率的组合情景下五年时间节点上的碳排放,并结合经济发展数据对碳排放强度进行分析。

(1) 发展型因素

本研究中用常住人口表示地区人口规模。低生育率和老龄化^[50]是我国人口发展中十分显著的特征。

2005—2017年闽三角常住人口年均增长率为1.39%。第七次人口普查结果显示,厦门、漳州和泉州3个城市的常住人口规模比第六次人口普查分别增加了46.23%^[51]、5.1%^[52]和8.04%^[53],可见闽三角人口数量处于持续升高的趋势。常住人口扩张一方面与地区发达的经济有关,另一方面与地区生育观念有关。厦门在经济上较强的辐射为该地区吸引了大量外来人口,市辖区的跨省流入人口达到了139万人,以务工人员为主体的“流入人口”是厦门常住人口的重要组成部分。泉州是闽三角和福建省常住人口规模最大的城市^[54]。闽三角常住人口占福建省常住人口总量的45%,是该省的人口中心。福建省以及闽南地区长期出生性别比失衡^[55]，“男孩偏好”普遍存在。随着生育观念转变,地区出生性别比逐渐下降,更多女孩的出生为地区未来的生育提供了保障,这在一定程度上将降低老年人口占比^[56]。此外逐渐放宽的生育政策刺激了生育,带动了人口增长^[57]。统计显示全面“二孩”政策实施之后,地区常住人口增长率由2016年的1.04%上升至2017年的1.20%,人口增长速率有所反弹。本研究设定,人口高速增长(H)的情景下,闽三角人口保持增加趋势,但是受生育成本升高和疫情等的影响,人口扩张速率将持续下降,且越接近2050年人口总量增长越慢。2020—2050年每五年地区人口规模增长率下降0.2%,2020年人口比2017年增加1.3%,2030年人口规模增加0.8%,2050年地区人口规模增长率降至0%,达到最大值。若地区人口保持较低的增长速率(L),2020年常住人口增长率下降至0.8%,2030年下降至0%,即人口在2030年达峰,此后人口规模开始收缩。中等增长速率下(M),地区人口在2040年达到最大值。

参考厦漳泉各市的“人口发展规划”和“城市总体规划”,设定:H、M和L速率下,2030年闽三角城镇化率的目标值分别为85%、80%和75%。

人均GDP的增长率 >0 ,且随着发展质量提升增长率逐渐下降,最后趋于稳定。福建省预期“十四五”期间全省人均GDP年均增长5.4%,闽三角经济增长率高于全省平均水平。设定H、M和L速率下,2030年人均GDP增长率分别为9%、7.5%和6%;2050年分别为5%、4.5%和4%。

(2) 减排型因素

闽三角的能源强度调控目标以福建省节能减排目标为基准。福建省参考全国《“十四五”节能减排综合工作方案》制定了节能目标:到2025年,单位国内生产总值能源消耗比2020年下降13.5%^[58]。闽三角作为福建省的碳排放中心,率先达峰的压力下地区节能力度需比上述目标更强。本研究设定L速率下2025年能源强度下降15%,M和H速率下分别下降16.5%和18%。

研究期内第二产业占比已有下降的趋势。设定H速率时,2040年第二产业占比下降至30%,之后维持在该水平,此时第三产业占比稳定在65%以上。M速率时,2040年和2050年第二产业占比分别下降至40%和

30%。L 速率时,2050 年第二产业占比下降至 40%。

上述因素共组合成 15 种有低碳发展目标约束的情景(表 2)。

表 2 人口、富裕度和技术的情景组合

Table 2 Scenario group of population, affluence and technology factors

情景 Scenario	<i>P</i>	<i>U</i>	<i>A</i>	<i>EI</i>	<i>S</i>	组合 Group	情景 Scenario	<i>P</i>	<i>U</i>	<i>A</i>	<i>EI</i>	<i>S</i>	组合 Group	情景 Scenario	<i>P</i>	<i>U</i>	<i>A</i>	<i>EI</i>	<i>S</i>	组合 Group
S1	H	H	H	H	HHH		S5	M	H	H	M	M	M		S12	L	M	M	M	LMM
S2	H	H	M	M	HHM		S6	M	H	M	M	M	M		S13	L	M	L	L	LML
S3	H	M	H	H	HMH		S7	M	M	H	M	M	M		S14	L	L	M	M	LLM
S4	H	M	M	M	HMM		S8	M	M	M	M	M	M		S15	L	L	L	L	LLL
							S9	M	M	L	M	M	M							
							S10	M	L	M	M	M	M							
							S11	M	L	L	M	M	M							

P:人口规模 Population size;*U*:城镇化率 Urbanization;*A*:富裕度 Affluence;*EI*:能源强度 Energy intensity;*S*:产业结构 Industrial structure; H: 高 High; M: 中 Middle; L: 低 Low

2 结果与分析

2.1 碳排放核算结果

整体而言,闽三角碳排放保持增长趋势(图 1),从 2005 年的 1315.60 万 t 增长到 2017 年的 5471.89 万 t, 年均增长率 12.89%。其中泉州贡献了最多的碳排放(图 1),该市碳排放从 2005 年的 948.13 万 t 增加至 2017 年的 4006.61 万 t,多年平均占比 2/3 以上,是闽三角最主要的碳源。泉州碳排放强度最高(图 1):2005 年为 0.58 t/万元,2017 年为 0.62 t/万元,是闽三角的 1.46 倍,泉州碳减排压力最大。厦门碳排放占比居中、增长率 缓慢,且碳排放强度持续下降(图 1),减排压力持续降低,这有利于碳达峰目标的实现。漳州碳排放总量最低 但增长率最高(图 1),年均增长率 35.78%。漳州碳排放受产业结构变动的影响较明显。“十一五”时期漳州工业 开始腾飞,钢铁、水泥等工业产品产量迅速增加,导致 2006 年的碳排放总量和碳排放强度分别是 2005 年的 2.98 倍和 2.65 倍;2014 年之后随着产业结构调整,上述高能耗高排放产品产量迅速下降,城市碳排放也持续降低,

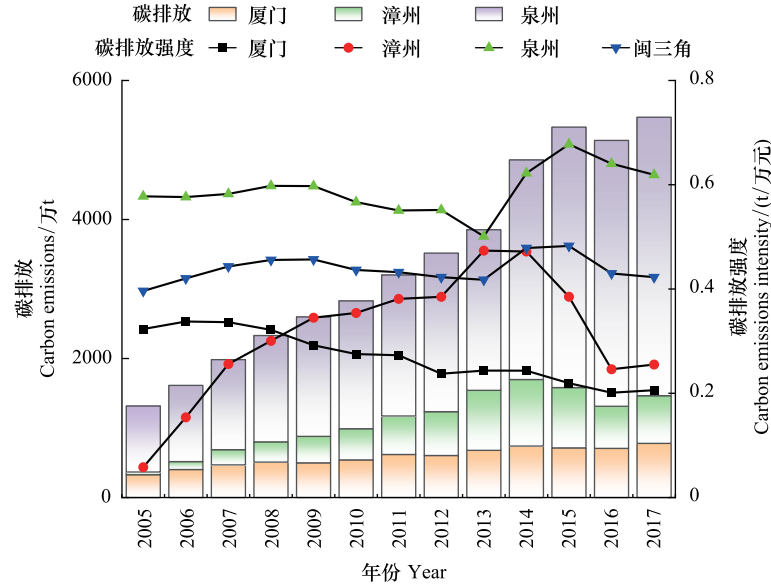


图 1 2005—2017 年闽三角城市群碳排放及碳排放强度

Fig.1 Carbon emissions and carbon emissions intensity of the Golden Triangle of Southern Fujian Province (GTSF) during 2005 and 2017

2015 年和 2016 年碳排放增长率 <0 。漳州碳排放整体上呈现先增加后下降的趋势,碳排放于 2014 年达到最大值(图 1)。受碳排放快速增长的影响,漳州碳排放强度增长率也是 3 个城市中最高的。快速增长的碳排放强度意味着快速增加的碳减排压力,因此漳州实现碳达峰的重点是控制碳排放及碳排放强度的高速增长。

2.2 统计检验

本研究中的时间序列变量二阶差分之后稳定(表 3)。残差单位根检验的 t 值为 -2.2057 ,5%显著水平下的临界值为 -1.9740 , P 值为 $0.0317<0.05$,残差稳定证明变量间存在协整关系。

表 3 变量稳定性检验结果
Table 3 Stability test of variables

变量 Variable	t	临界值 Critical value	t	临界值 Critical value	t	临界值 Critical value
P	-2.0269 (0.2726)	-2.7290	-7.1280 (0.0003)	-2.7477	-5.4714* (0.0073)	-5.1198
U	-1.3340 (0.5771)	-2.7138	-5.6516 (0.0016)	-2.7477	-6.2399* (0.0039)	-2.8984
GP	1.0627 (0.9991)	-3.4608	-3.0181 (0.0748)	-2.8014	-3.5260** (0.0497)	-3.5196
EI	-0.1571 (0.6088)	-1.6029	-3.3350 (0.0491)	-2.8014	-5.7535* (0.0027)	-4.5826
S	0.9203 (0.8897)	-1.6011	-1.1622 (0.6321)	-2.8014	-3.7313 (0.0399)	-3.5196

* 和 ** 分别表示 1% 和 5% 的显著性水平;GP: 人均 GDP Gross domestic product per capita

2.3 提取主成分

除了能源强度因素的 VIF 值为 $2.24<10$ 之外,其余所有变量的 VIF 值均 >10 ,表明变量间存在严重的共线性问题(表 4)。KMO 值 $=0.70>0.6$,证明主成分分析方法有较好的适用性。

表 4 变量的 VIF 值
Table 4 VIF value of variables

变量 Variable	VIF 值 VIF value	变量 Variable	VIF 值 VIF value
人口规模 Population size	1908.13	能源强度 Energy intensity	2.24
城镇化率 Urbanization	643.69	产业结构 Industrial	29.01
人均 GDP GDP per capita	572.86		

VIF: 方差膨胀因子 Variance inflation factor

本研究提取出两个主成分 F_1 和 F_2 ,特征值分别为 5.82 和 1.01,累积解释率为 97.59%。 F_1 、 F_2 与碳排放间的回归方程为:

$$\ln CE = 0.19F_1 - 0.04F_2 \quad (11)$$

将标准化后的变量代入回归方程,得到碳排放与影响因素的函数关系:

$$\ln CE = -12.54 + 1.47\ln P + 0.68\ln U + 0.21\ln GP + 0.07(\ln GP)^2 + 0.03(\ln GP)^3 - 0.28\ln EI + 1.55\ln S \quad (12)$$

能源强度对碳排放起抑制作用,其他因素均起促进作用,且影响程度为产业结构 $>$ 人口规模 $>$ 城镇化率 $>$ 能源强度 $>$ 人均 GDP(图 2)。由图 2 可知,产业结构对闽三角碳排放的影响最大,第二产业占比每提升 1% 会促进碳排放增加 1.55%。研究期内闽三角能源强度在波动中下降,促进了碳减排。能源强度每下降 1% 促进碳排放减少 0.28%。人均 GDP 相关指标的系数均 >0 ,表明闽三角碳排放与经济发展间不存在倒“U”型曲线关系。

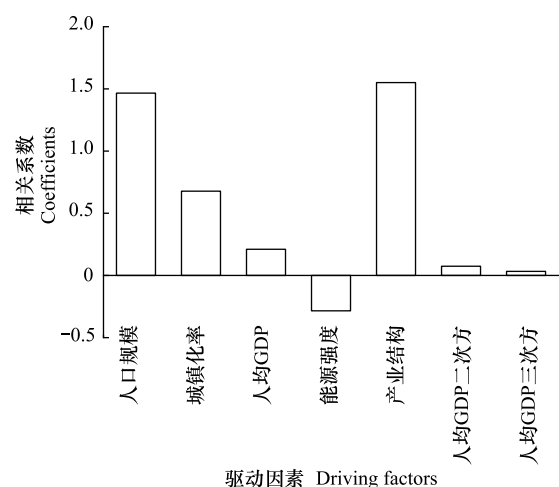


图 2 闽三角碳排放与驱动因素间的相关系数
Fig.2 Coefficients between carbon emissions and driving factors of the GTSF

使用回归方程对 2005—2017 年闽三角的碳排放进行“预测”,用误差率衡量上述回归模型的预测精度。结果发现基于回归模型的碳排放“预测值”和基于 IPCC 清单法的碳排放核算值二者之间的变化趋势基本一致,误差率在±20%之间(图 3),可见该模型有较好的预测精度^[59],可用于闽三角碳排放峰值预测研究中。

$$\text{误差率} = \frac{\text{预测值} - \text{核算值}}{\text{核算值}} \times 100\% \tag{13}$$

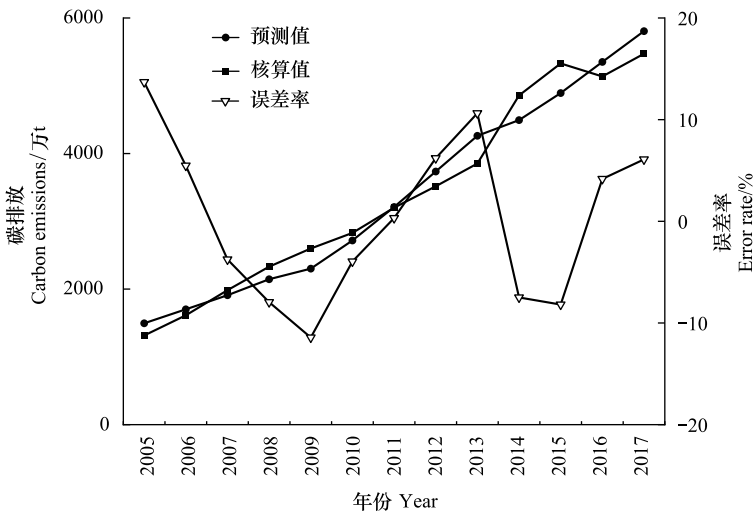


图 3 闽三角碳排放核算值与“预测值”间的误差率

Fig.3 Error rate between accounting value and predictive value of carbon emissions of the GTSF

2.4 峰值预测

2.4.1 基准情景

基准情景下,闽三角碳排放水平持续升高(图 4)。经预测,2030 年闽三角碳排放为 1.04 亿 t,2050 年增加至 1.77 亿 t。与我国多数城市群类似,若闽三角延续“新常态”前的发展模式,则无法实现碳达峰目标^[36]。基准情景下,闽三角碳排放增长率呈逐年下降趋势(图 4)。2021—2050 年闽三角碳排放整体增长率为 3.22%,

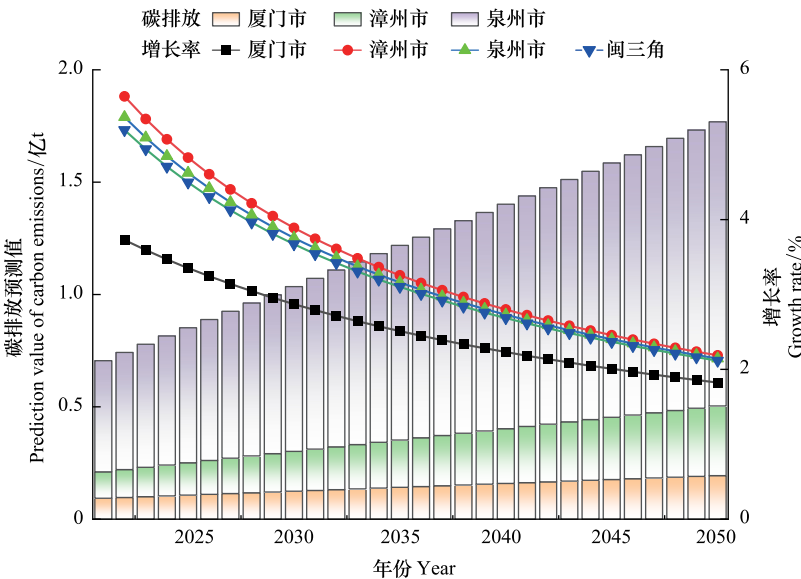


图 4 基准情景下闽三角及厦漳泉的碳排放

Fig.4 Carbon emissions of the GTSF, Xiamen, Zhangzhou and Quanzhou in the baseline scenario

低于 2005—2017 年的水平。2021—2025 年增长率为 4.84%, 2026—2030 年下降至 3.89%, 2031—2050 年又下降至 2.19%, 经济发展对碳排放的促进作用逐渐减弱。基准情景下, 泉州碳排放依然最多(图 4), 占比在 70% 以上。受经济增长驱动, 漳州碳排放超过厦门。厦漳泉碳排放的增长率也逐渐下降, 厦门最低, 漳州和泉州的碳排放增长率与闽三角整体水平接近(图 4)。

基准情景下, 闽三角的碳排放强度也逐年升高(图 5), 2030 年和 2050 年分别为 0.4462 t/万元和 0.4473 t/万元, 均高于 2005 年的水平, 碳减排压力持续增大。厦漳泉 3 市碳排放强度呈不同的变化趋势(图 5): 厦门碳排放强度逐年下降, 从 2021 年的 0.1998 t/万元下降至 2050 年的 0.1689 t/万元, 减排压力持续下降; 漳州和泉州的碳排放强度均持续升高(图 5), 前者从 2030 年的 0.3612 t/万元增长至 2050 年的 0.3760 t/万元, 后者从 2030 年的 0.6234 t/万元增长至 2050 年的 0.6385 t/万元, 泉州的碳减排压力依然最大。

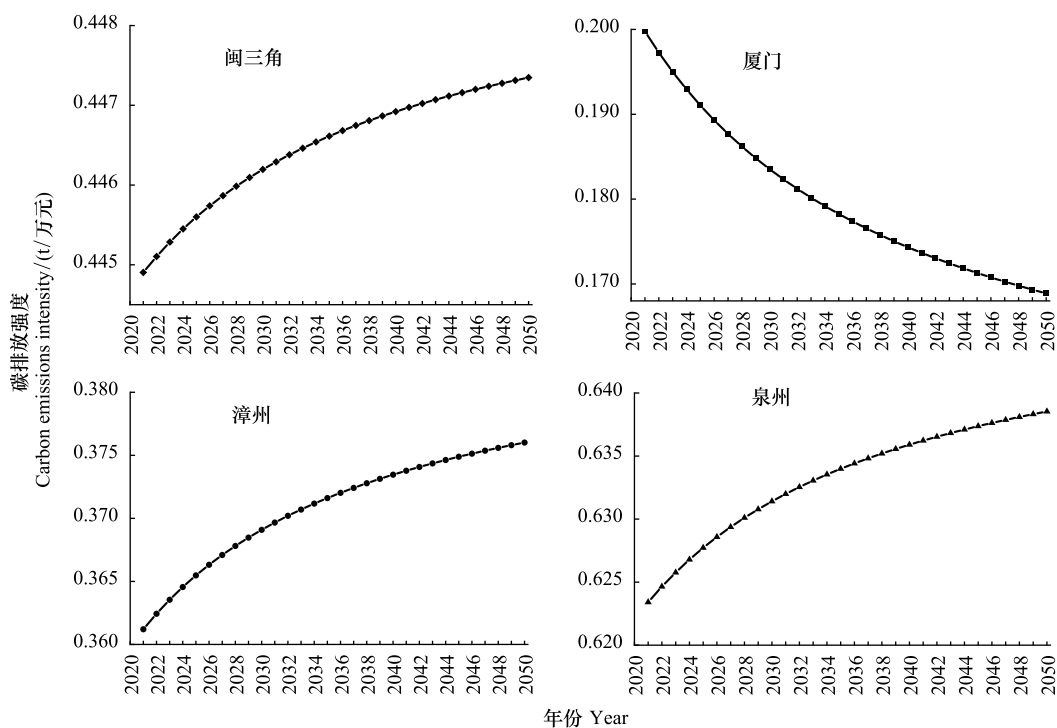


图 5 基准情景下闽三角及厦漳泉的碳排放强度

Fig.5 Carbon emissions intensity of the GTSF, Xiamen, Zhangzhou and Quanzhou in the baseline scenario

2.4.2 低碳情景

(1) 碳排放峰值

低碳情景下, 碳排放的变化趋势可分为三类: 增长型, 先降后增型和先增后降型(图 6)。低碳情景下的碳排放低于基准情景下的预测水平, 可见对经济社会发展因素进行调控可降低碳排放水平。

① 增长型

包括 S9(MML)、S11(MLL)、S13(LML) 和 S15(LLL) 情景(图 6)。S9 情景下的碳排放高于其他情景, 证明降低发展型因素的增长速率能促进碳排放下降。上述 4 种情景中, 闽三角没有强化负向因素能源强度对碳排放的抑制效应, 能源强度一直处于低速(L)下降的趋势中。减排型因素处于低减排情景时不能促进碳达峰^[37]。能源强度对碳排放的抑制弱于其他正向因素对碳排放的促进, 导致闽三角碳排放持续升高, 未实现达峰目标。

② 先降后增型

该趋势下碳排放曲线呈“U”型, 包含 S1(HHH)、S3(HMH)、S5(MHH) 和 S7(MMH) 情景, 最大值和最小

值分别出现在 2020 年和 2040 年(图 6)。S1 的峰值最高(0.67 亿 t),S7 的最低(0.64 亿 t)。

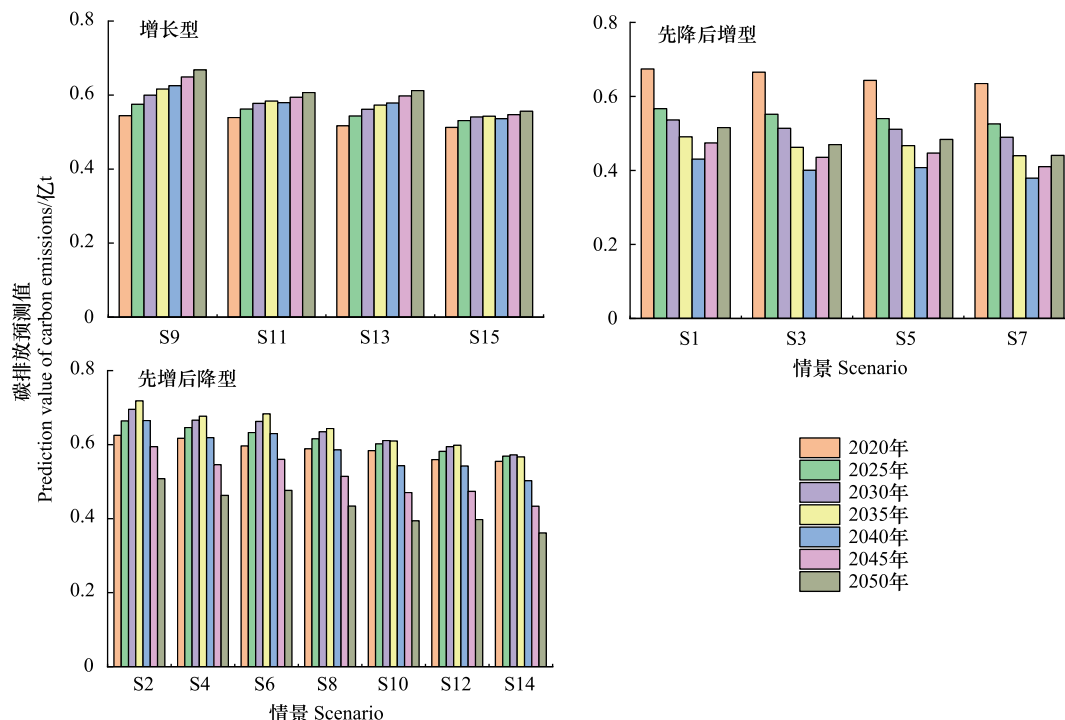


图 6 低碳情景下闽三角城市群碳排放

Fig.6 Carbon emissions of the GTSF and Xiamen, Zhangzhou and Quanzhou in the low carbon scenario

“十四五”是碳达峰的关键期、窗口期。统计显示,闽三角 2020 年人口规模、人均 GDP 分别为 1903 万人和 11.08 万元/人,满足 2020 年达峰的目标值,但是城镇化率 $72.29\% < 80\%$,难以满足达峰条件。厦漳泉 3 市 2020 年的人均 GDP (当年价格)均高于达峰时的目标值。厦门的产业结构水平以及能源强度下降的速率均符合达峰时的目标水平,且低于地区整体水平,此外厦门的碳排放强度在研究期内呈下降趋势,碳排放年均增长率低于其他两市且逐年降低。相关研究证明,截至 2019 年低碳示范型城市厦门的综合碳排放已经进入平台期,其直接碳排放已经达峰^[21],因此本研究认为厦门最可能在 2020 年实现达峰目标。传统工业转型期城市漳州和泉州人口发展规划中预期的 2030 年的人口城镇化率分别为 75% 和 71%,未达到 2020 年“达峰”时的目标值,城镇化率较低成为漳州和泉州碳达峰的阻碍。

这四种情景中减排型因素均处于高速(H)下降,即强减排情景中。能源是碳达峰的关键^[60-61]。H 速率下,2020 年闽三角的能源强度目标值为 0.65 t 标准煤/万元。2017 年厦门和漳州的能源强度已低于上述目标值,闽三角和泉州的能源强度分别为 0.68 t 标准煤/万元和 0.93 t 标准煤/万元。按照《泉州市“十三五”节能减排综合工作方案》的规定,2020 年泉州能源强度目标值为 0.89 t/万元,可见即使泉州实现了“十三五”的节能目标,2020 年闽三角的能源强度依旧高于达峰时的目标值,能源强度过高限制了碳达峰的实现。

H 速率下,2020 年产业结构的目标值为 55%。2017 年厦漳泉 3 市第二产业占比分别为 51.31%、54.26% 和 63.31%。统计显示,当泉州第二产业占比在 60% 时,闽三角整体的第二产业占比约为 55%,因此为了实现 2020 年碳达峰目标,2017—2020 年泉州第二产业占比至少下降 3%。统计显示,2020 年泉州第二产业占比为 57.17%,达到了上述要求。综上,发展型因素中的“城镇化率”以及减排型因素中的“能源强度”阻碍了闽三角碳达峰目标的实现。

③先增后降型

该趋势下碳排放曲线呈倒“U”型,包含 S2(HHM)、S4(HMM)、S6(MHM)、S8(MMM)、S10(MLM)、S12

(LMM)和 S14(LLM)共 7 种情景,其中 S2、S4、S6、S8、S12 情景在 2035 年达峰,S10 和 S14 情景在 2030 年达峰,且 2030 年达峰的情景其峰值水平更低(图 6)。S10 和 S14 的碳排放峰值分别为 0.61 亿 t 和 0.57 亿 t。S14(LLM)情景的峰值更低,更利于碳排放总量控制。研究证明,实现碳达峰的地区,经济发展速率将从高速转入中低速,同时进一步强化了对减排型因素的低碳约束力度^[62]。本研究证明,当人口和富裕度处于低速(L)增长状态,且能源强度和产业结构处于中速(M)下降的趋势时,闽三角碳排放在 2030 年达到峰值。

L 速率下,2030 年碳排放达峰时人口、城镇化率和人均 GDP 的目标值分别为 1790.2 万人、70%和 7.87 万元/人。统计显示,闽三角在 2020 年前已经实现了上述目标,因此发展型因素不是闽三角 2030 年碳达峰的阻碍。M 速率下,2030 年产业结构目标值为 52.5%。厦门预期 2025 年高技术制造业占比达到 45%,漳州预期 2025 年服务业增加值占比达到 42%,泉州预期 2035 年第三产业增加值占比达到 42%。按照 3 市“十四五”规划的设定,到 2030 年 3 市第二产业占比均在 50%以下,因此闽三角能实现碳达峰时产业结构领域的调控目标。M 速率下,2030 年能源强度为 0.63 t 标准煤/万元。厦门和漳州的能源强度已经实现了该目标。按照 M 速率下能源强度的下降标准,2030 年泉州能源强度为 0.62 t 标准煤/万元,因此闽三角整体上能在 2030 年实现能源强度下降目标。综上,闽三角整体碳达峰的时间宜设定在 2030 年。2030 年碳达峰既能保障漳州经济的发展,又能为泉州产业结构优化和能源强度下降预留时间。

受疫情影响,2020 年 1—4 月份我国整体碳排放较 2019 年同期有较大幅度的下降^[63]。5 月份开始随着地区复工复产的稳步推进,经济逐渐恢复,碳排放开始反弹,电力、工业等部门的碳排放很快就恢复到了 2019 年同期水平,可见疫情虽然导致短期内碳排放的大幅度下降,但随着经济的复苏碳排放迅速地反弹。与全国相比,福建省整体的与各个部门的碳排放与 2019 年同期水平相比下降幅度不大,整体碳排放波动受疫情影响较小。统计显示,厦漳泉各市的 GDP 较 2019 年均有所增加,GDP 增长率依然为正,经济处于发展中,所以本研究认为闽三角不能在 2020 年实现碳达峰。

研究表明,疫情对我国碳达峰的时间并未产生显著的影响,但改变了经济发展以及能源利用的模式^[64]，“绿色复苏”成为了共识。经济重建必须与绿色发展理念相结合、“双碳”成为了后疫情时代经济发展中十分重要的原则^[65-66]。清洁能源将得到更大规模的推广和应用,新型基础设施建设(“新基建”)将促进多个产业的低碳化发展^[67],因此碳排放的增长速率将逐渐降低。低碳情景下,碳排放曲线呈倒“U”型的七种情景(S2、S4、S6、S8、S10、S12、S14)中,达峰之前,碳排放增长率逐年降低;达峰后,碳排放下降速率加快,因此本研究认为疫情虽然造成了闽三角碳排放增长速率的下降但是未造成达峰时间的剧烈波动。

(2) 碳排放强度

低碳情景下,2020 年闽三角碳排放强度在 0.36—0.46 t/万元间波动(图 7)。碳排放强度低于 2005 年的有 S9、S11、S12、S13、S14 和 S15 共 6 种情景(图 7),分别比 2005 年下降了 3.73%、3.67%、0.71%、8.25%、0.65%、8.20%。2030 年所有情景下的碳排放强度均小于 2005 年(图 7),但强度下降幅度均不足 60%,可见闽三角未完成 2020 年和 2030 年的碳排放强度控制目标。

3 结论与政策建议

本研究在碳排放核算的基础上开展驱动机制分析,使用 STIRPAT 模型和主成分分析法评估了人口规模、城镇化率、人均 GDP、能源强度和产业结构对碳排放的影响,建立了碳排放与上述因素间的回归关系,结合情景分析法,通过设置上述因素在高、中、低发展速率下的发展目标,对闽三角的碳排放进行了预测。主要结论如下:(1)2005—2017 年闽三角城市群碳排放和碳排放强度均持续升高。泉州有最高的碳排放和碳排放强度;漳州碳排放和碳排放强度的增长率最高;(2)能源强度是碳排放的负向因素,其余均为正向因素。产业结构对碳排放影响最大,人均 GDP 最小;(3)闽三角碳排放与人均 GDP 间不存在倒“U”型曲线关系;(4)基准情景下,闽三角不能实现碳达峰。低增长、中减排情景下,闽三角将于 2030 年实现碳达峰目标,峰值水平 0.57 亿 t。低碳情景下厦门最可能在 2020 年实现碳达峰;(5)所有情景下,闽三角城市群均未实现“2030 年碳排放

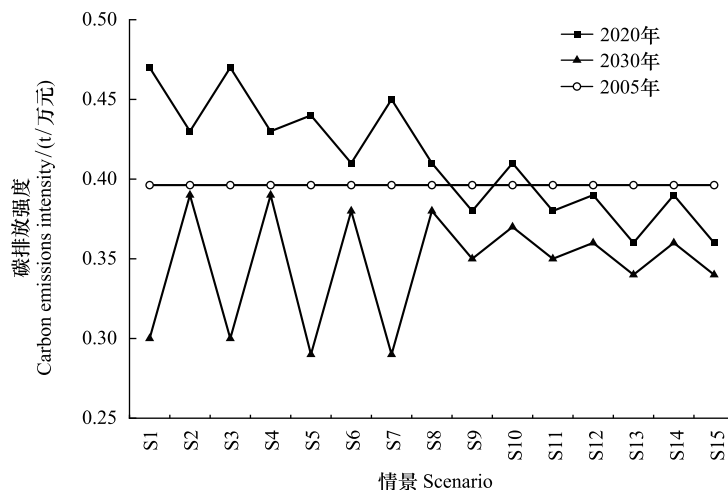


图7 低碳情景下闽三角碳排放强度

Fig.7 Carbon emissions intensity of the GTSF in the low carbon scenario

强度比2005下降60%—65%”的目标。

基于上述研究为闽三角碳减排和碳达峰提供如下建议:(1)升级产业结构。第二产业占比每升高1%会促进闽三角碳排放增加1.55%。漳州和泉州第二产业的扩张是闽三角产业结构难以优化的关键,“十四五”和“十五五”时期漳州和泉州可以《中国制造2025》《泉州制造2025发展纲要》《漳州市<中国制造2025>实施纲要》等为指导,遏制并淘汰能源和碳排放“双高”的产业,发展高端制造、智能制造、电子信息等产业;(2)优化能源结构。以煤炭等化石能源为主的能源消费结构导致闽三角能源强度下降幅度有限。优化能源消费结构是闽三角碳达峰的关键手段。以福建省和厦漳泉各市的能源发展专项规划为指导,严格管控煤炭等的开发利用,重点布局闽三角地区的核电、水电以及热能等可再生能源利用工程,逐步扩大可再生能源的利用。“新基建”,主要是特高压电网建设将助推闽三角碳达峰的实现。于闽三角而言,目前要对接福建省特高压电网工程建设,加快各市电网基础工程建设,实现能源结构优化目标;(3)厦门必须尽快制定碳达峰行动计划,以引领闽三角整体的碳达峰行动。

参考文献 (References):

- [1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2021.
- [2] Sikarwar V S, Reichert A, Jeremias M, Manovic V. COVID-19 pandemic and global carbon dioxide emissions: a first assessment. Science of the Total Environment, 2021, 794: 148770.
- [3] 庄贵阳, 窦晓铭, 魏鸣昕. 碳达峰碳中和的学理阐释与路径分析. 兰州大学学报: 社会科学版, 2022, 50(1): 57-68.
- [4] Turning Point: Which Countries' GHG Emissions Have Peaked? Which Will in the Future? <https://www.wri.org/insights/turning-point-which-countries-ghg-emissions-have-peaked-which-will-future>
- [5] 蔡博峰, 吕晨, 董金池, 汪旭颖, 郑逸璇, 李新, 王雪松, 李冰, 何捷, 李永亮, 吴立新, 邵朱强, 丁焰, 徐伟, 雷宇, 严刚. 重点行业/领域碳达峰路径研究方法. 环境科学研究, 2022, 35(2): 320-328.
- [6] 袁家海, 苗若兰. 电力部门碳达峰路径与政策研究. 煤炭经济研究, 2021, 41(12): 46-53.
- [7] 龚翔. 建筑业“碳达峰、碳中和”有效路径研究. 北京规划建设, 2022(1): 67-71.
- [8] 曲余玲, 狄嫣, 邢娜. 碳达峰、碳中和对钢铁行业的影响及路径分析. 冶金经济与管理, 2021(4): 36-38.
- [9] 王怡. 中国省域二氧化碳排放达峰情景预测及实现路径研究. 科学决策, 2022(1): 95-105.
- [10] 陈刚, 钱志权, 吴旭. 中国碳达峰目标实现的预测和政策组合方案比较——以浙江省为例. 经济研究参考, 2021(20): 39-56.
- [11] 王少剑, 莫惠斌, 方创琳. 珠江三角洲城市群城市碳排放动态模拟与碳达峰. 科学通报, 2022, 67(7): 670-684.
- [12] 程云鹤, 董洪光, 耿纪超, 何继善. 中部地区崛起的能源需求及碳达峰路径研究. 中国工程科学, 2021, 23(1): 68-78.

- [13] 钟薇薇,高海,徐维军,于孝建.多聚类视角下的碳达峰路径探索与趋势研判——基于广东省 21 个地级市面板数据的分析.南方经济, 2021(12): 58-79.
- [14] 孟秋赞.协同视域下社区碳达峰与网格化治理耦合路径研究——以 S 市 X 小区为例.环境科学与管理, 2022, 47(2): 97-101.
- [15] 赵明轩,吕连宏,王深,白梓函,张楠,罗宏,付加锋.中国碳达峰路径的 Meta 回归分析.环境科学研究, 2021, 34(9): 2056-2064.
- [16] 唐伟祺.中国及各省区能源碳排放达峰路径分析[D].杭州:浙江大学, 2020.
- [17] 潘栋,李楠,李锋,冯奎双,彭璐璐,王震.基于能源碳排放预测的中国东部地区达峰策略制定.环境科学学报, 2021, 41(3): 1142-1152.
- [18] 岳书敬.长三角城市群碳达峰的因素分解与情景预测.贵州社会科学, 2021(9): 115-124.
- [19] 林金钱.广东省碳排放影响因素分析与峰值预测[D].广州:暨南大学, 2016.
- [20] 刘彦君.京津冀地区碳排放峰值预测与分析[D].北京:华北电力大学, 2017.
- [21] 蒋含颖,段伟然,张哲,曹丽斌,徐少东,张立,蔡博峰.基于统计学的中国典型大城市 CO₂ 排放达峰研究.气候变化研究进展, 2021, 17(2): 131-139.
- [22] 吴青龙,王建国,郭丕斌.开放 STIRPAT 模型的区域碳排放峰值研究——以能源生产区域山西省为例.资源科学, 2018, 40(5): 1051-1062.
- [23] 王良栋,吴乐英,陈玉龙,马晓哲,杜梦娜.经济平稳增长下黄河流域相关省区碳达峰时间及峰值水平.资源科学, 2021, 43(11): 2331-2341.
- [24] 郭芳,王灿,张诗卉.中国城市碳达峰趋势的聚类分析.中国环境管理, 2021, 13(1): 40-48.
- [25] 庄贵阳,魏鸣昕.城市引领碳达峰、碳中和的理论和路径.中国人口·资源与环境, 2021, 31(9): 114-121.
- [26] Tian J J, Song X Q, Zhang J S. PREDICTION ON CARBON EMISSION PEAK FOR TYPICAL COAL-RICH REGIONS IN MIDWEST CHINA. Fresenius Environmental Bulletin, 2022, 31(1): 469-479.
- [27] 洪竞科,李沉潮,蔡伟光.多情景视角下的中国碳达峰路径模拟——基于 RICE-LEAP 模型.资源科学, 2021, 43(4): 639-651.
- [28] Liu D N, Xiao B W. Can China achieve its carbon emission peaking? A scenario analysis based on STIRPAT and system dynamics model. Ecological Indicators, 2018, 93: 647-657.
- [29] Su K, Lee C M. When will China achieve its carbon emission peak? A scenario analysis based on optimal control and the STIRPAT model. Ecological Indicators, 2020, 112: 106138.
- [30] 王勇,王恩东,毕莹.不同情景下碳排放达峰对中国经济的影响——基于 CGE 模型的分析.资源科学, 2017, 39(10): 1896-1908.
- [31] 张楠,张保留,吕连宏,白梓函,赵明轩,罗宏.碳达峰国家达峰特征与启示.中国环境科学, 2022, 42(4): 1912-1921.
- [32] 关敏捷,袁艳红,冉木希,王子.基于 STIRPAT 模型的山西省能源碳排放影响因素及峰值预测.中国煤炭, 2021, 47(9): 48-55.
- [33] 俞婷婷.区域碳排放峰值预测与控制策略研究——以浙江省为例[D].杭州:浙江工业大学, 2017.
- [34] 郑海涛,胡杰,王文涛.中国地级城市碳减排目标实现时间测算.中国人口·资源与环境, 2016, 26(4): 48-54.
- [35] 渠慎宁,郭朝先.基于 STIRPAT 模型的中国碳排放峰值预测研究.中国人口·资源与环境, 2010, 20(12): 10-15.
- [36] Wu C B, Huang G H, Xin B G, Chen J K. 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. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 466-474.
- [37] Chai Z Y, Yan Y B, Simayi Z, Yang S T, Abulimiti M, Wang Y Q. Carbon emissions index decomposition and carbon emissions prediction in Xinjiang from the perspective of population-related factors, based on the combination of STIRPAT model and neural network. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29(21): 31781-31796.
- [38] 芦颖,李旭东,杨正业.贵州省能源碳排放现状及峰值预测.环境科学与技术, 2018, 41(11): 173-180.
- [39] 张蓓.中原经济区碳排放峰值研究[D].开封:河南大学, 2017.
- [40] 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.环境工程, 2020, 38(11): 12-18.
- [41] 王深,吕连宏,张保留,王斯一,吴静,付加锋,罗宏.基于多目标模型的中国低成本碳达峰、碳中和路径.环境科学研究, 2021, 34(9): 2044-2055.
- [42] 鲁传一,陈文颖.中国提前碳达峰情景及其宏观经济影响.环境经济研究, 2021, 6(1): 10-30, 200.
- [43] 苏凯,陈毅辉,范水生,张明如.市域能源碳排放影响因素分析及减碳机制研究——以福建省为例.中国环境科学, 2019, 39(2): 859-867.
- [44] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>
- [45] Ehrlich P, Holdren L. Impact of Population Growth: Complacency concerning this component of man's predicament is unjustified and counterproductive. Science, 1972, 171(3977): 1212-1217.
- [46] Dietz T, Rosa E A. Effects of population and affluence on CO₂ emissions. PNAS, 1997, 94(1): 175-179.
- [47] 高惠璇.处理多元线性回归中自变量共线性的几种方法——SAS/STAT 软件(6.12)中 REG 等过程增强功能的使用.数理统计与管理,

2000, 19(5): 49-55.

- [48] 傅德印. 主成分分析中的统计检验问题. 统计教育, 2007(9): 4-7.
- [49] 虞晓芬, 傅玳. 多指标综合评价方法综述. 统计与决策, 2004(11): 119-121.
- [50] 陈艳玫, 刘子锋, 李贤德, 黄奕祥. 2015—2050 年中国人口老龄化趋势与老年人口预测. 中国社会医学杂志, 2018, 35(5): 480-483.
- [51] 厦门市第七次全国人口普查公报. http://tjj.xm.gov.cn/zfxgk/zfxgkml/tjsjzl/ndgh/202105/t20210527_2554550.htm
- [52] 漳州市第七次人口普查数据情况. <http://zhangzhou.bendibao.com/news/2021525/3863.shtm>
- [53] 泉州市第七次全国人口普查公报(第一号). http://tjj.quanzhou.gov.cn/tjzl/tjgb/202105/t20210524_2562693.htm
- [54] 侯佳伟. 从七次全国人口普查看我国人口发展新特点及新趋势. 学术论坛, 2021, 44(5): 1-14.
- [55] 汤兆云, 张赛群. 福建省出生性别比: 现状, 原因与对策. 长春理工大学学报: 社会科学版, 2008, 21(3): 19-23.
- [56] 张震, 马茜. 中国出生性别比转变的人口老龄化后果: 前景与对策. 人口研究, 2022, 46(1): 3-18.
- [57] 汤兆云. 全面两孩政策对人口结构的影响——以福建省为分析对象. 社会科学家, 2017(5): 12-18.
- [58] 国务院印发《“十四五”节能减排综合工作方案》. http://www.gov.cn/xinwen/2022-01/24/content_5670214.htm
- [59] 赵息, 齐建民, 刘广为. 基于离散二阶差分算法的中国碳排放预测. 干旱区资源与环境, 2013, 27(1): 63-69.
- [60] 裴庆冰. 典型国家碳达峰碳中和进程中经济发展与能源消费的经验启示. 中国能源, 2021, 43(9): 68-73.
- [61] 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径. 北京工业大学学报: 社会科学版, 2021, 21(3): 1-15.
- [62] 张志楠. 能源革命是实现碳达峰、碳中和的途径. 张江科技评论, 2022(1): 7.
- [63] 刘竹, 崔夺, 邓铸, 汪宜龙, 钟海旺, 乐旭, 张宁, 陈彬, 任小波, 魏伟, 吕永龙, 姜克隽, 窦新宇, 朱碧青, 郭睿, 孙韬淳, 柯丕煜, 关大博, 宫鹏. 新型冠状病毒肺炎疫情对中国 2020 年碳排放的影响. 科学通报, 2021, 66(15): 1912-1922.
- [64] 张友国. 疫情对中国碳脱钩进程的潜在影响——基于动态 CGE 模型的分析. 中国软科学, 2021(8): 19-29.
- [65] 曲申, 陈炜明, 刘丽静, 胡宇辰, 余运磊, 翟炳阳, 周琪. 后疫情重建阶段的碳排放趋势与减排策略研究. 中国环境管理, 2021, 13(3): 8-18.
- [66] 芮萌, 尹文强. 后疫情时代中国经济增长的新势能——双碳战略. 上海商学院学报, 2021, 22(4): 15-25.
- [67] 王科, 卢梅, 汪青青. 新冠疫情对中国二氧化碳排放的影响. 北京理工大学学报: 社会科学版, 2020, 22(4): 11-16.