

DOI: 10.5846/stxb202201270257

侯丽朋,王琳,钱瑶,唐立娜.“双碳”目标下闽三角碳排放脱钩状态及驱动机制分析.生态学报,2022,42(23):9663-9676.

Hou L P, Wang L, Qian Y, Tang L N. Decoupling status and driving mechanisms of carbon emissions in the Golden Triangle of Southern Fujian under “carbon peaking and neutrality” goals. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9663-9676.

“双碳”目标下闽三角碳排放脱钩状态及驱动机制分析

侯丽朋^{1,2}, 王琳¹, 钱瑶^{1,2}, 唐立娜^{1,3,*}

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:快速城市化背景下,建设低碳城市群是实现“双碳”目标的最佳方式。在碳排放核算的基础上,使用 Tapio 脱钩模型和 LMDI 方法对闽三角以及厦门、漳州和泉州的脱钩状态和碳排放的驱动机制进行了研究。主要结论如下:(1)2005—2017 年闽三角碳排放和人均碳排放均持续增加,二者有相同的变化趋势。闽三角的工业中心泉州有最高的碳排放和人均碳排放。发展型城市漳州碳排放最低,但碳排放和人均碳排放增长率均最高。服务型城市厦门碳排放增长率最低。(2)闽三角的脱钩状态逐渐改善,平均脱钩系数为 1.03,脱钩状态为扩张性连接。厦门、漳州和泉州的平均脱钩系数分别为 0.45、2.70 和 1.10,3 个城市分别以弱脱钩、扩张负脱钩和扩张性连接状态为主。(3)人均 GDP 和人口规模是闽三角碳排放的正向因素,能源结构和能源强度是负向因素。正向因素的贡献在下降,负向因素的贡献在升高。人均 GDP 和能源结构分别对漳州和厦门碳排放有最强的促进和抑制效应。能源强度对 3 个城市碳排放变化的效应不同。(4)人口扩张促进碳排放增加,使碳排放与经济发展无法脱钩。人口规模对闽三角碳减排无脱钩努力。能源结构优化和能源强度下降有助于碳排放与经济发展脱钩,是闽三角碳减排的强脱钩努力和弱脱钩努力。能源强度对泉州碳减排无脱钩努力。优化能源结构是闽三角实现碳减排和“双碳”目标的关键。已经脱钩的厦门宜尽早制定碳达峰行动计划,引领闽三角的碳达峰行动。漳州可通过升级产业结构实现减排。泉州必须提升能源效率才能降低碳排放。

关键词:Tapio 脱钩模型;LMDI 方法;脱钩努力;“双碳”目标

Decoupling status and driving mechanisms of carbon emissions in the Golden Triangle of Southern Fujian under “carbon peaking and neutrality” goals

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

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: Developing low-carbon urban agglomeration is the best way to achieve “carbon peaking” and “carbon neutrality” goals under the background of rapid urbanization. Based on carbon emissions accounting, the Tapio decoupling model and the Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) method are utilized to analyze the decoupling status and driving mechanisms of carbon emissions of the Golden Triangle of Southern Fujian (GTSF), Xiamen, Zhangzhou and Quanzhou. The main findings are as follows: (1) Carbon emissions and carbon emissions per capita both kept increasing from 2005 and 2017, with the same trend. Quanzhou, an industrial center of the GTSF, has the highest carbon emissions and carbon emissions per capita. Zhangzhou, a developing city, has the least carbon emissions but the highest growth rate of carbon emissions and carbon

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502902)

收稿日期:2022-01-27; 网络出版日期:2022-07-27

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

emissions per capita. Xiamen, a service-oriented city, holds the lowest growth rate of carbon emissions. (2) Decoupling status of the GTSF has improved. The average decoupling index of the GTSF is 1.03, and the decoupling status is dominated by the expansive connection. The average decoupling indices of Xiamen, Zhangzhou and Quanzhou are 0.45, 2.70 and 1.10, respectively. The dominant decoupling status of the three cities is weak decoupling, expansive negative decoupling, and the expansive connection, respectively. (3) Gross domestic product (GDP) per capita and population size are positive factors of carbon emissions of the GTSF, while energy structure and energy intensity are negative factors. The contribution of the positive factors is decreasing, while the contribution of the negative factors is increasing. GDP per capita and energy structure have the strongest promoting effects and inhibiting effects on carbon emissions of Zhangzhou and Xiamen, respectively. The effects of energy intensity on carbon emissions of the three cities are different. (4) Population expansion leads to an increase in carbon emissions, which is not conducive to the decoupling of carbon emissions and economic development. Population size has no decoupling efforts on carbon emissions reduction of the GTSF. The optimization of energy structure and the decline of energy intensity contribute to the decoupling of carbon emissions and economic development. Energy structure and energy intensity are the strong decoupling efforts and the weak decoupling efforts of carbon emissions reduction of the GTSF, respectively. Energy intensity has no decoupling efforts on carbon emissions reduction of Quanzhou. For the GTSF, optimizing energy structure is the key to realize carbon emissions reduction and “carbon peaking and neutrality” goals. It is suggested that Xiamen, which has been decoupled, should formulate carbon emissions peaking action plans, and lead the peaking actions of the GTSF. Zhangzhou can achieve carbon emissions reduction by upgrading industrial structure. Carbon emissions reduction of Quanzhou depends on the improvement of energy efficiency.

Key Words: Tapio decoupling model; LMDI method; decoupling efforts; “carbon peaking and neutrality” goals

温室气体浓度升高加剧了极端天气发生的频次和危害程度^[1], 低碳发展成为应对全球气候变化的必然选择。脱钩是判断发展模式是否符合低碳发展要求的重要手段^[2-3]。脱钩是经济合作与发展组织 (Organization for Economic Cooperation and Development, OECD) 提出的用于描述“阻断经济增长与环境污染之间联系”的理论, 后被引入环境领域, 描述“经济发展与环境污染之间从相互制约到响应关系不再存在的过程”^[4-6]。二氧化碳虽非污染物, 但其对可持续发展的不利影响难以忽略, 碳排放与经济发展关系的判定成为脱钩分析领域的焦点。当碳排放与经济发展“脱钩”时, 碳排放将不再随着经济发展而增加^[7]。碳达峰是二氧化碳排放达到最高值然后持续下降的过程^[8], 可见碳达峰的本质是碳排放与经济脱钩^[9], 实现碳中和必须将碳排放与经济发展脱钩。

Tapio^[10]脱钩模型是环境领域研究脱钩状态的通用的模型, 与 OECD 的脱钩模型相比, 该模型细化了脱钩状态的判断标准, 因此基于 Tapio 模型的相关研究其脱钩状态的判断更清晰。使用该模型, 学者们对发达国家和发展中国家的脱钩状态进行了对比^[11-13], 发现英美等已经实现碳达峰的发达国家以强脱钩状态为主, 而碳排放还在增长的中国等发展中国家以弱脱钩为主^[7]。碳达峰、碳中和 (“双碳”) 目标提出后, 碳排放的脱钩状态成为是否达峰的判断标准。当碳排放与经济发展处于强脱钩状态时, 碳达峰已经实现^[14], 当二者未脱钩时, 经济发展将促进碳排放持续增加, 碳达峰的实现较难。我国各省市以弱脱钩和扩张负脱钩为主, 强脱钩只是偶尔出现^[15], 可见实现碳达峰需要更多减排努力。由于碳排放受经济社会等因素的影响, 因此经济社会发展等的差异是导致碳排放脱钩状态多样性的关键原因^[16]。在实证研究中常将脱钩分析与驱动机制研究相结合^[17-18], 脱钩状态分析后开展碳排放驱动机制研究明确了经济社会发展等因素对脱钩以及碳排放的影响, 进而可对经济社会等因素进行调控, 以促进碳排放与经济发展脱钩, 助力碳达峰目标早日实现。Kaya 恒等式建立了人类活动碳排放与经济、政策和人口等因素的数学关系^[19], 以此为基础进行扩展的对数平均迪氏指数法 (LMDI) 的计算过程更简便、分解无残差, 且可根据实证研究的需要对模型中的因素进行扩展, 因此 LMDI 方

法是碳排放驱动机制研究中最常用的方法^[20]。使用该方法,学者们开展了全球尺度^[21]、地区尺度^[22]、国家尺度^[23]以及城市^[24]乃至产业尺度^[25]的研究。

城市群是城市的集合,是我国参与全球竞争的重要载体,对于推动区域协调发展和经济增长有重要的作用。城市群地区经济的快速发展导致其成为我国碳排放的重要来源^[26],削减城市群地区的碳排放是实现“双碳”目标的最佳方式^[27],因此开展城市群碳排放脱钩状态及驱动机制研究对于判断“双碳”目标约束下地区是否达峰,以及如何实现碳达峰等具有更重要的理论及实践意义。目前针对我国城市群开展的研究其研究对象有以下几类:一是成熟的城市群,例如长三角^[28]、京津冀^[29]以及成渝城市群^[30]等;二是我国中部人口密集地区,例如黄河流域地区^[31]、中原城市群^[32]等;三是我国经济相对欠发达地区,例如关中城市群^[33]、晋陕蒙^[34]以及东三省^[35]等。我国不同城市群之间以及同一城市群内的各个城市之间脱钩状态差别较大^[16],东部经济发达城市群的脱钩状态更好,但是强脱钩也只是偶尔出现,我国整体上未达到强脱钩这一理想状态。研究结果证明,经济发展和规模扩张是促进碳排放增加的正向因素^[36],对碳排放起抑制作用的因素是结构优化和效率提升,尤其是产业结构高级化和能源结构低碳化^[37]。

闽三角是我国经济发展最有活力的城市群之一,城镇化率高、经济增长快。经济规模虽不如长三角和珠三角,但也是带动海西经济区发展的重要增长极,未来该地区在辐射内地与沿海,以及对接长三角和珠三角等方面将发挥越来越重要的作用。闽三角拥有丰富的生态资源,是生态文明建设的重要地区,在保障东南沿海生态安全和削减碳排放方面占据重要地位。碳达峰、碳中和已被纳入福建省“生态省”建设布局中。作为福建省的碳排放中心^[38],闽三角有必要对经济和社会发展进行调控,实现率先达峰。以往针对闽三角碳排放驱动机制的研究更侧重综合性的战略研究^[39]。“双碳”目标的实现必须落实到各个城市、行业 and 部门,因此厦漳泉一体化背景下不仅要探索适合闽三角整体的减排路径,同时又必须兼顾城市的差异探索适合不同城市的多元化、差异化的减排路径。

本研究使用 Tapio 脱钩模型和 LMDI 方法分析了闽三角城市群的脱钩状态,探究了城市群碳排放的驱动机制,为“双碳”目标约束下该地区发展低碳经济和优化产业布局等提供了综合性的建议。同时考虑到厦门、漳州和泉州在产业结构和能源利用等方面的差异,本文同时对这 3 个城市在脱钩状态和碳排放驱动机制方面的差异,明确了不同发展模式下经济、人口以及能源消费等对碳排放的贡献,为各个城市的碳减排提供了有针对性的建议。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

闽三角城市群位于福建省南部,包括厦门、漳州和泉州(图 1)。2017 年地区总 GDP、第二产业 GDP 和常住人口在福建省的占比分别达到了 47.94%、51.33% 和 45.41%。厦门是以高科技产业为主的服务型城市,2020 年该市城镇化率几乎达到 90%。漳州是快速工业化的发展型城市,年均 GDP 增长率在 10% 以上,同时漳州也是福建省的生态示范区和农业示范区,生态竞争力较强。泉州经济总量连续多年位居福建省第一位,是福建省工业经济最发达的城市。闽三角是福建省的经济、

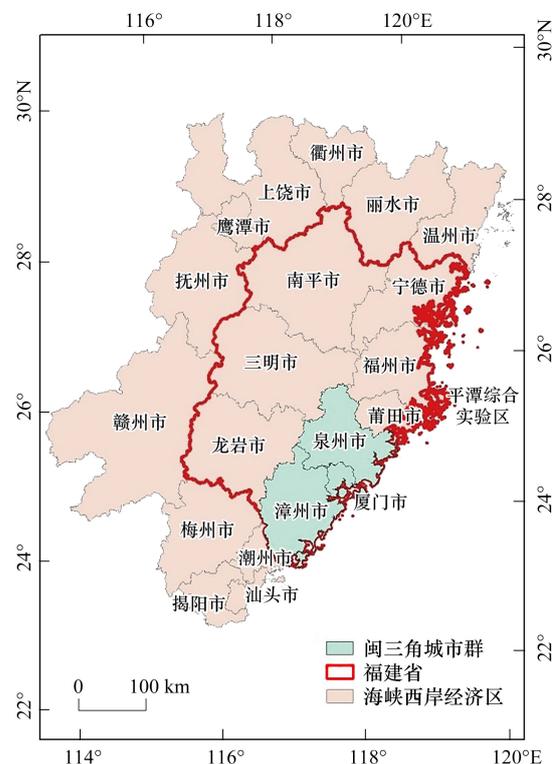


图 1 闽三角城市群区位图

Fig.1 Location plan of the Golden Triangle of Southern Fujian

工业和人口中心,同时也是福建省的碳排放中心。近年来在海西经济区建设的推动下,闽三角经济保持快速增长,导致其碳排放持续升高,碳减排和碳达峰压力持续增加。

1.2 清单法

本文采用政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)提供的框架^[40]对2005—2017年闽三角能源消费、工业生产、农业生产、林绿地、废弃物处置5个部门的碳排放进行核算。

$$CE = \sum_i CE_i \quad (1)$$

$$CE_i = \sum_j CE_j \quad (2)$$

$$CE_j = A_j \times I_j \quad (3)$$

式中, CE 为闽三角碳排放, CE_i 为城市碳排放, $i=1,2,3$ 分别表示厦门,漳州,泉州。 CE_j 为部门碳排放, $j=1\cdots 5$, A_j 和 I_j 分别为碳排放相关过程的活动强度和碳排放系数(表1)。

表1 部门碳排放来源及各活动的碳排放系数

Table 1 Sectoral carbon emissions sources and carbon emissions coefficients of activities

部门 Sectors	碳排放来源及碳排放系数 Carbon emissions sources and carbon emissions coefficients
能源消费 Energy consumption	工业企业以及交通运输的燃料消费 ^[41]
工业生产 Industrial production	水泥 ^[42] , 平板玻璃 ^[43] , 合成氨和化肥(氮肥) ^[44] , 钢铁 ^[45]
农业生产 Agriculture production	水稻种植 ^[46] , 动物肠道发酵 ^[47-48] , 粪便管理 ^[49] 和呼吸作用 ^[41]
林绿地 Forestry and green land	林地 ^[50] , 绿地和草地 ^[51]
废弃物 Waste	固废和废水 ^[41]

1.3 Tapio 脱钩模型

用 Tapio 脱钩模型^[10]计算 2006—2017 年碳排放的脱钩系数。

$$DI = \frac{\% \Delta EP}{\% \Delta DF} = \frac{\Delta CP / CP}{\Delta GP / GP} = \frac{(CP_{t+1} - CP_t) / CP_t}{(GP_{t+1} - GP_t) / GP_t} \quad (4)$$

式中, DI 表示脱钩系数(decoupling index), EP 和 DF 分别表示环境压力(environmental pressures)和经济驱动力(driving factors),分别用人均碳排放(carbon emissions per capita, CP)和人均GDP(GDP per capita, GP)表示(图2),因此脱钩系数是 $t-t+1$ 时期环境压力变化率($\% \Delta EP$)和经济驱动力变化率($\% \Delta DF$)的比值,脱钩状态的判断见图2。

1.4 LMDI 方法

参考 LMDI 方法^[20],将碳排放分解为碳排放系数(I_i)、能源结构(ES)、能源强度(EI)、人均GDP(GP)和人口规模(P)。

$$CE = \frac{CE}{E_i} \times \frac{E_i}{E} \times \frac{E}{G} \times \frac{G}{P} \times P = I_i \times ES \times EI \times GP \times P \quad (5)$$

$$\Delta CE = CE_{t+1} - CE_t = \Delta I_i + \Delta ES + \Delta EI + \Delta GP + \Delta P + \Delta CE_{rsd} \quad (6)$$

式中, CE 、 E_i 、 E 、 G 、 P 分别表示碳排放、煤炭消费、综合能耗、GDP和人口规模, $I_i = CE/E_i$ 、 $ES = E_i/E$ 、 $EI = E/G$ 、 $GP = G/P$,分别表示碳排放系数、能源结构、能源强度、人均GDP和人口规模。 ΔI_i 、 ΔES 、 ΔEI 、 ΔGP 、 ΔP 分别表示碳排放系数、能源结构、能源强度、人均GDP和人口规模对碳排放的贡献值。本研究设定,研究期内碳排放系数保持不变,因此 $\Delta I_i = 0$ 。加法分解的分解余量 $\Delta CE_{rsd} = 0$ 。上述因素对碳排放的贡献值通过以下公式计算:

$$D_{CE} = \frac{CE_{t+1}}{CE_t} = D_{I_i} \times D_{ES} \times D_{EI} \times D_{GP} \times D_P \times D_{rsd} \quad (7)$$

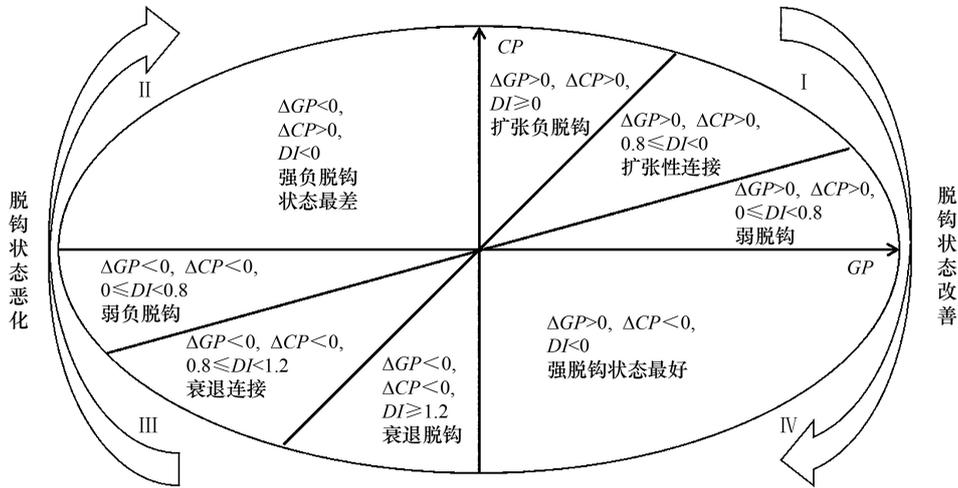


图 2 脱钩系数与脱钩状态

Fig.2 Decoupling index and decoupling status

CP: 人均碳排放 Carbon emissions per capita; GP: 人均 GDP GDP per capita; DI: 脱钩系数 Decoupling index

$$\Delta ES = \frac{CE_{i+1} - CE_i}{\ln CE_{i+1} - \ln CE_i} \times \ln \frac{ES_{i+1}}{ES_i} \tag{8}$$

$$\Delta EI = \frac{CE_{i+1} - CE_i}{\ln CE_{i+1} - \ln CE_i} \times \ln \frac{EI_{i+1}}{EI_i} \tag{9}$$

$$\Delta GP = \frac{CE_{i+1} - CE_i}{\ln CE_{i+1} - \ln CE_i} \times \ln \frac{GP_{i+1}}{GP_i} \tag{10}$$

$$\Delta P = \frac{CE_{i+1} - CE_i}{\ln CE_{i+1} - \ln CE_i} \times \ln \frac{P_{i+1}}{P_i} \tag{11}$$

$$w = \frac{\ln D}{\Delta CE} \tag{12}$$

$$D_{ES} = \exp(w\Delta ES) \tag{13}$$

$$D_{EI} = \exp(w\Delta EI) \tag{14}$$

$$D_{GP} = \exp(w\Delta GP) \tag{15}$$

$$D_P = \exp(w\Delta P) \tag{16}$$

式中, D_{CE} 表示 $t-t+1$ 时期碳排放变化率, D_{EI} 、 D_{ES} 、 D_{EI} 、 D_{GP} 、 D_P 分别表示上述五类驱动因素对碳排放变化率的贡献。乘法分解的分解余量 $\Delta D_{rsd} = 1$ 。

用贡献度 (con) 衡量各因素对碳排放的影响。不同因素间, 贡献度越高的因素, 其对碳排放的影响程度越强。当驱动因素的贡献度升高时, 表明该因素对碳排放的影响程度加深。

$$\text{con} = \frac{\Delta}{\sum |\Delta|} \tag{17}$$

式中, con 表示驱动因素的贡献度, Δ 表示驱动因素的贡献值, $|\Delta|$ 表示贡献值的绝对值

经济发展时, 所有能直接或间接促进碳减排的措施称为脱钩努力。用脱钩努力模型^[52] 评估各类因素对碳减排的贡献, 即脱钩努力, 用 ΔE 表示。

$$\Delta E = \Delta CE - \Delta GP \tag{18}$$

$$D = -\frac{\Delta E}{\Delta GP} = -\frac{\Delta ES + \Delta EI + \Delta P}{\Delta GP} = -\left(\frac{\Delta ES}{\Delta GP} + \frac{\Delta EI}{\Delta GP} + \frac{\Delta P}{\Delta GP}\right) = D_{ES} + D_{EI} + D_P \tag{19}$$

式中, ΔE 表示剔除人均 GDP 的影响后各类因素对碳减排的努力。 ΔCE 和 ΔGP 分别表示碳排放变化量和人均 GDP 对碳排放的贡献。 D 表示脱钩努力系数。 D_{ES} 、 D_{EI} 、 D_P 分别表示能源结构、能源强度和人口规模对碳减排的脱钩努力。 $D \leq 0$ 表示驱动因素未做脱钩努力, 即驱动因素的变化不能促进碳排放与经济发展脱钩; $0 < D \leq 1$ 表示驱动因素为弱脱钩努力, 即驱动因素对碳减排的作用弱于经济发展的促进作用; $D > 1$ 表示驱动因素为强脱钩努力, 即驱动因素的变化促进了碳排放与经济发展脱钩。

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 3)。碳排放从 2005 年的 1315.60 万 t 增长到 2017 年的 5471.89 万 t。从构成看, 泉州碳排放最多; 2005 年该市碳排放 948.13 万 t, 占比 72.07%, 2017 年碳排放为 4006.61 万 t, 占比 73.22%(图 3), 是闽三角最主要的碳源。漳州碳排放最少, 整体呈先增后降趋势。碳排放由 2005 年的 38.45 万 t 增加至 2014 年的 957.50 万 t, 随后又下降至 2017 年的 685.87 万 t, 占比由 2.29% 增加至 19.72% 又回落到 12.53%(图 3)。漳州碳排放增长率最高, 但增长率逐年下降(图 4)。漳州碳排放变化受工业发展的影响较大。2006 年碳排放是 2005 年的 2.98 倍, 此时碳排放增加主要受到了钢铁以及水泥产业扩张的影响。之后随着钢铁、水泥等产业的规模缩小, 地区碳排放增长率逐渐放缓。“新常态”之后, 上述产品的产量急速下降, 地区碳排放总量也开始下降。总体而言, 漳州碳排放增长率最高, 达到 35.78%, 高于地区整

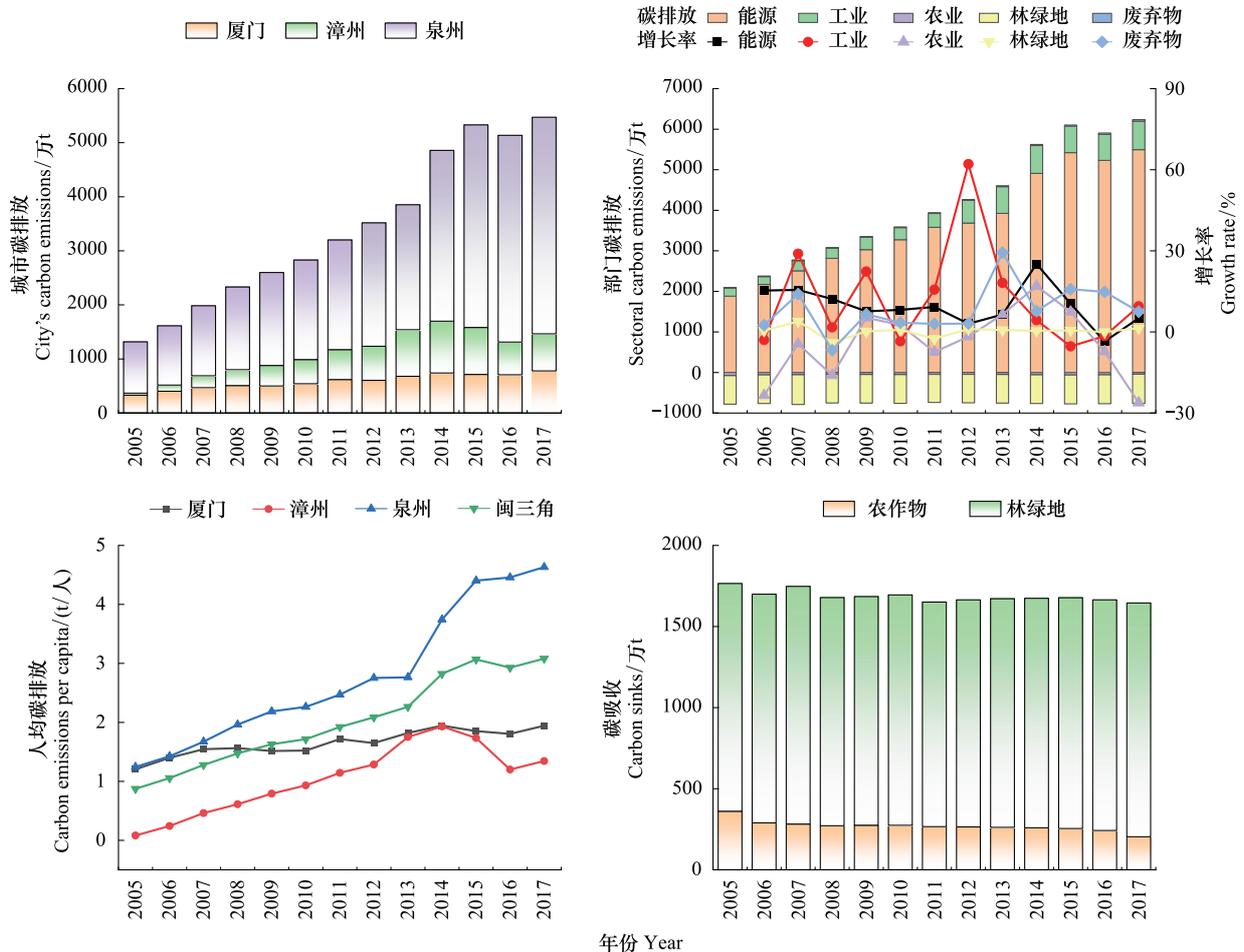


图 3 闽三角城市群及厦漳泉各市碳排放特征

Fig.3 Characteristics of carbon emissions of the Golden Triangle of Southern Fujian (GTSF), Xiamen, Zhangzhou and Quanzhou

体水平。厦门碳排在波动中增加,年均增长率 7.79%,低于地区整体水平,导致该市碳排放占比逐年下降(图 3)。厦漳泉 3 市在碳排放及增长率上的差异与部门碳收支有关(图 3)。闽三角碳支出最多的是能源活动部门,其碳支出占总碳支出的 70%以上,而工业部门碳支出的增长率最高,为 12.44%(图 3)。泉州能源消费量高是导致泉州碳排放量高且持续增长的主要原因。漳州工业发展较快导致了该市碳排放有最高的增长率。

闽三角人均碳排放从 2005 年的 0.87 t/人增加至 2017 年的 3.08 t/人,环境压力持续增大(图 3)。2005—2017 年厦门、漳州和泉州的人均碳排放分别从 1.21、0.08、1.24 t/人增加至 1.94、1.34、4.63 t/人(图 3)。泉州人均碳排放最高,环境压力最大;漳州人均碳排放最低,环境压力最小(图 3)。闽三角以及厦漳泉人均碳排放的变化趋势与碳排放一致(图 4),即厦门人均碳排放增长率最低,漳州人均碳排放先增后降,最大值也出现在 2014 年(1.93 t/人)(图 3),且人均碳排放的增长率最高(34.94%)(图 4)。

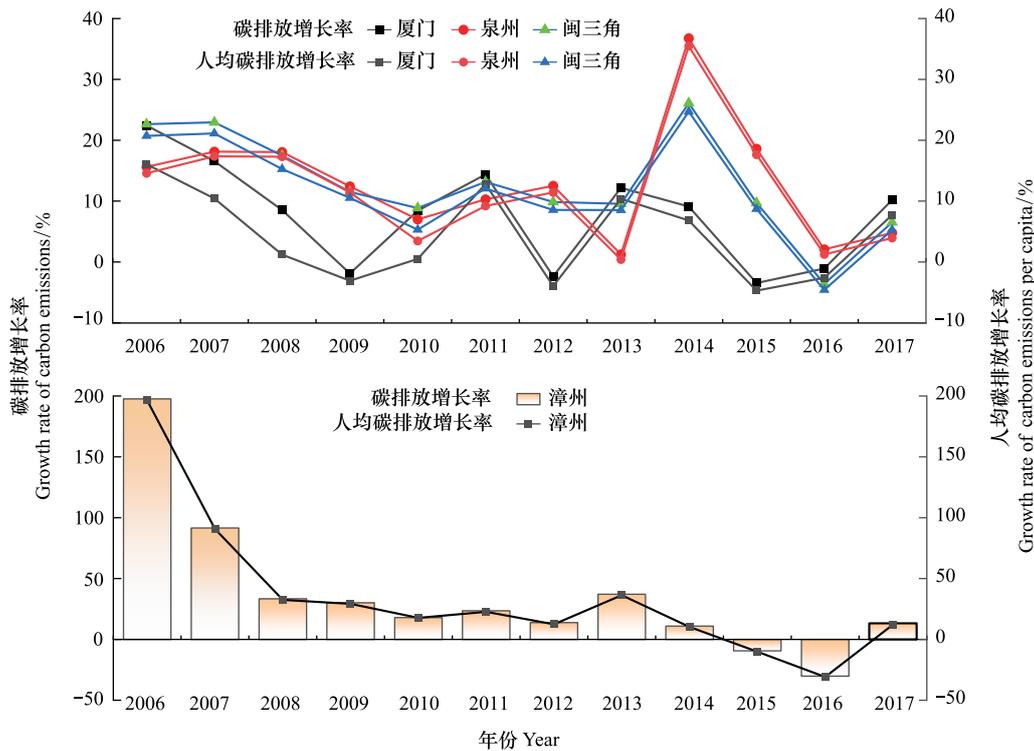


图 4 碳排放与人均碳排放增长率

Fig.4 Growth rate of carbon emissions and carbon emissions per capita

2.2 脱钩分析

2006—2017 年闽三角人均 GDP 升高,经济发展,脱钩状态处于第一和第四象限(图 2)。脱钩系数多年均值为 1.03,碳排放与经济发展处于扩张性连接的状态(表 2)。经济发展与碳排放增长的速率相当,二者的响应关系持续存在。闽三角的脱钩系数呈现“下降-升高-下降”的趋势,脱钩状态经历了“改善-恶化-改善”的过程(图 2)。2006—2010 年闽三角碳排放增长率和脱钩系数均逐渐下降,脱钩状态从扩张负脱钩发展为弱脱钩;2011—2015 年碳排放增长率和脱钩系数均升高,脱钩状态从弱脱钩恶化至扩张负脱钩;2016 年碳排放下降,碳排放与经济发展达到了最理想的强脱钩状态,之后碳排放反弹,脱钩状态变为弱脱钩(表 2)。整体而言,闽三角的脱钩状态以扩张性连接为主,强脱钩偶尔出现,该地区尚不具备碳达峰的条件。

利用公式(4)对厦漳泉的脱钩状态进行分析,发现,厦门、漳州和泉州的平均脱钩系数分别为 0.45、2.70 和 1.10,脱钩状态分别以弱脱钩、扩张负脱钩和扩张性连接为主(表 2)。厦门的脱钩系数多是<1 的(表 2),脱钩系数逐渐下降,脱钩状态得到改善。强脱钩出现的频次较多,说明低碳政策等对厦门碳减排的促进作用较强。厦门碳排放与经济发展已逐渐脱钩,具备碳达峰的条件。漳州的脱钩系数在多数年份都是>1.2 的(表

2),人均 GDP 和人均碳排放均增长,且后者的增长率更高。2005 年之后漳州进入快速工业化阶段。工业化带动经济增长的同时也造成能耗增加,进而促进碳排放以更高的速率增长。但是随着发展方式的转变,漳州碳排放的脱钩系数开始降低,尤其是 2014 年“新常态”之后随着碳排放下降,演变至强脱钩状态(表 2)。泉州的脱钩状态也在逐渐改善,但是从“十一五”到“十二五”整体的脱钩状态变差,最理想状态出现在 2016 年(表 2)。泉州未出现强脱钩状态。综上,闽三角以及厦漳泉各市的脱钩状态都得到了改善,但强脱钩出现频次极低,经济发展与碳排放未脱钩。

表 2 2006—2017 年闽三角城市群以及厦漳泉各市碳排放与经济脱钩系数与脱钩状态

Table 2 Decoupling indices and decoupling status between carbon emissions and economic development of the Golden Triangle of Southern Fujian (GTSF), Xiamen, Zhangzhou and Quanzhou during 2006 and 2017

年份 Year	闽三角 The GTSF		厦门		漳州		泉州	
	脱钩系数	脱钩状态	脱钩系数	脱钩状态	脱钩系数	脱钩状态	脱钩系数	脱钩状态
2006	1.50	扩张负脱钩	1.45	扩张负脱钩	16.33	扩张负脱钩	0.98	扩张性连接
2007	1.42	扩张负脱钩	0.96	扩张性连接	6.21	扩张负脱钩	1.08	扩张性连接
2008	1.26	扩张负脱钩	0.20	弱脱钩	2.52	扩张负脱钩	1.21	扩张负脱钩
2009	1.02	扩张性连接	-0.46	强脱钩	2.32	扩张负脱钩	0.99	扩张性连接
2010	0.52	弱脱钩	0.08	弱脱钩	1.21	扩张负脱钩	0.38	弱脱钩
2011	0.92	扩张性连接	0.93	扩张性连接	1.62	扩张负脱钩	0.74	弱脱钩
2012	0.78	弱脱钩	-0.38	强脱钩	1.10	扩张性连接	1.02	扩张性连接
2013	0.87	扩张性连接	1.36	扩张负脱钩	3.35	扩张负脱钩	0.04	弱脱钩
2014	2.79	扩张负脱钩	0.99	扩张性连接	0.96	扩张性连接	3.92	扩张负脱钩
2015	1.12	扩张性连接	-0.83	强脱钩	-1.00	强脱钩	2.20	扩张负脱钩
2016	-0.64	强脱钩	-0.42	强脱钩	-3.76	强脱钩	0.17	弱脱钩
2017	0.75	弱脱钩	1.49	扩张负脱钩	1.49	扩张负脱钩	0.52	弱脱钩
均值 Mean value	1.03	扩张性连接	0.45	弱脱钩	2.70	扩张负脱钩	1.10	扩张性连接

2.3 驱动机制分析

人均 GDP 和人口规模对闽三角碳排放的累计贡献值分别为 3724.38 万 t 和 519.15 万 t,二者是促进碳排放增加的正向因素,且人均 GDP 的贡献值更多(表 3),但其对碳排放变化的贡献度呈阶段性变化。2006—2011 年人均 GDP 对碳排放的贡献值增长较快,随后趋于稳定,在 2015 年达到最大值 381.22 万 t。人口规模对碳排放的贡献值除了在 2010 年出现较大幅度增加外其余时间较稳定,最大贡献值 90.08 万 t(2010 年)。人均 GDP 和人口规模对碳排放的年均贡献度分别为 35.97% 和 4.68%,人均 GDP 的影响更强,但二者的贡献度均在下降(图 5)。

能源结构和能源强度对闽三角碳排放的累计贡献值分别是-1814.72 万 t 和-419.36 万 t,二者均是碳排放的负向因素,且能源结构的负向贡献更多(表 3)。能源结构和能源强度的年均贡献度分别为-5.49% 和-10.44%,且二者的贡献度整体上呈增长趋势(图 5),表明能源结构和能源强度对碳排放的负向影响逐渐加强。能源结构和能源强度的最高贡献度分别为 45.77%(2012 年)和 35.53%(2010 年),最低贡献度分别为-53.81%(2015 年)和-36.88%(2016 年)(图 5)。能源结构的变动贡献了闽三角近一半的碳排放变化量,能源结构的变化决定了闽三角碳排放的变化趋势(图 6)。

使用公式(5)—公式(16)分析各驱动因素对厦漳泉碳排放的贡献。人均 GDP 对厦门、漳州和泉州碳排放的累计贡献值分别为 527.96 万 t、648.71 万 t 和 2567.90 万 t,人口规模的累计贡献值分别为 203.82 万 t、46.88 万 t 和 276.90 万 t(表 3)。与闽三角整体结果类似,人均 GDP 和人口规模是厦漳泉碳排放的正向因素。人均 GDP 的年均贡献度分别为 29.57%、48.60% 和 31.27%,人口规模的年均贡献度分别为 12.10%、2.93% 和 2.90%(图 5)。人均 GDP 对漳州碳排放有较强的影响,但是其贡献度从 2006—2010 年的 74.65% 下降到 2011—2015 年的 36.80%(图 5)。人口规模对厦门的碳排放有较强的影响,其贡献度从 2006—2010 年的 17.87% 下降到 2011—2015 年的 6.23%(图 5)。

表 3 各因素对闽三角城市群及厦漳泉各市碳排放的累计贡献值/($\times 10^4$ t)

Table 3 Cumulative contribution value of factors to carbon emissions in the GTSF, Xiamen, Zhangzhou and Quanzhou

区域 Area	能源结构 Energy structure	能源强度 Energy intensity	人均 GDP GDP per capita	人口规模 Population size
闽三角 The GTSF	-1814.72	-419.36	3724.38	519.15
厦门	-482.16	-312.67	527.96	203.82
漳州	-281.85	-273.64	648.71	46.88
泉州	-602.45	271.25	2567.90	276.90

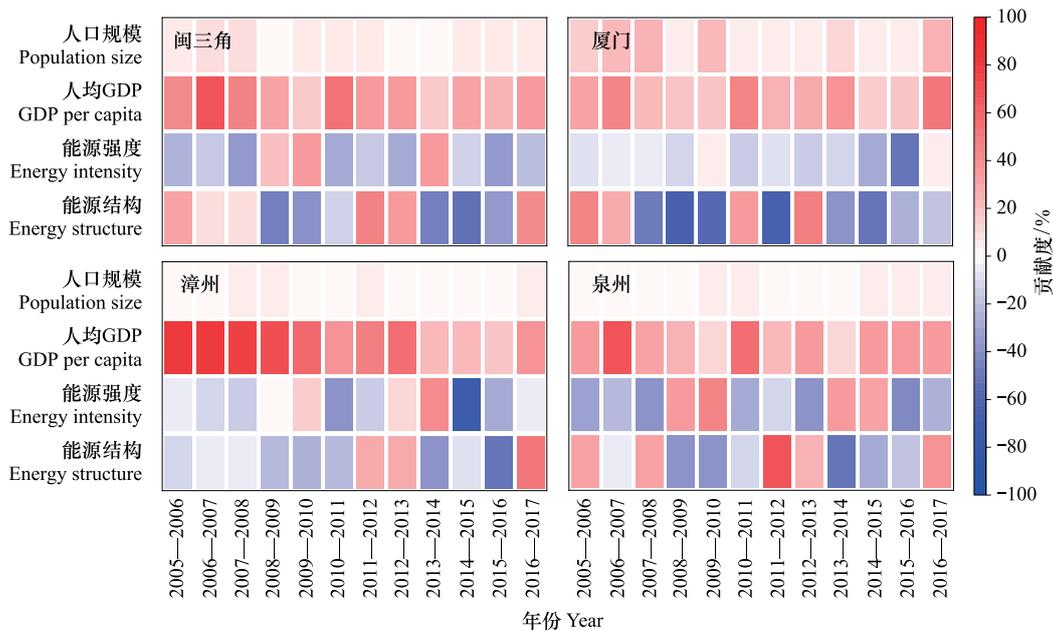


图 5 各因素对闽三角城市群及厦漳泉的贡献度

Fig.5 Contribution degree of factors to carbon emissions in the GTSF, Xiamen, Zhangzhou and Quanzhou

能源结构对厦门、漳州和泉州碳排放的累计贡献值分别为-482.16、-281.85、-602.45 万 t,能源结构变化促进了厦漳泉碳减排。能源强度的累计贡献值分别为-312.67、-273.64、271.25 万 t(表 3),能源强度对厦门和漳州碳排放起抑制作用,对泉州碳排放起促进作用。从贡献度看,能源结构对 3 个城市的年均贡献度分别为-22.98%、-5.76%和-2.99%,能源强度的年均贡献分别为-13.00%、-10.23%和-12.32%(图 5),能源结构和能源强度均对厦门的碳减排有较强的促进作用。

剔除人均 GDP 的影响后,其余各驱动因素对闽三角碳减排的总脱钩努力系数为 4.81(表 4),表明碳减排的努力抵消了部分经济增长对碳排放的促进作用。能源结构、能源强度和人口规模的脱钩系数分别为 5.46、1.05 和-1.70(表 4),因此能源结构和能源强度是闽三角碳减排的强脱钩努力,人口规模无脱钩努力。人口规

表 4 各因素的脱钩努力系数

Table 4 Decoupling efforts index of factors

区域 Area	能源结构 Energy structure	能源强度 Energy intensity	人口规模 Population scale	合计 Total
闽三角 The GTSF	5.46	1.05	-1.70	4.81
厦门	13.18	7.04	-5.38	14.85
漳州	3.91	4.26	-0.81	7.36
泉州	3.48	-2.20	-1.34	-0.06

模对厦漳泉碳减排的总脱钩努力系数分别为-5.31、-0.81和-1.34(表4),因此人口规模因素对厦漳泉碳减排均无脱钩努力。能源结构对3市碳减排的总脱钩努力系数分别为13.18、3.91和3.48(表4),能源结构是厦漳泉碳减排的强脱钩努力。能源强度对碳减排的总脱钩努力系数分别为7.04、4.26和-2.20(表4),能源强度对泉州碳减排无脱钩努力。

3 讨论

3.1 经济发展与碳排放的相互影响

由碳排放主导的全球气候变化已经成为人类发展面临的巨大挑战之一。经济发展促进了碳排放增加^[7,37],碳排放增长阻碍了可持续发展目标的实现。碳排放既是环境问题,又是经济问题。全球气候行动的领导者欧盟已在1990年实现了全面的碳达峰,并于2020年9月公布了碳中和目标。美国、日本以及加拿大等发达国家也已在2010年之前实现了碳达峰。

碳排放持续增加对我国对外贸易、国内经济的持续发展以及生态安全等都造成了十分不利的影 响。出于保障国内经济社会持续发展的内在要求和应对全球气候变化的责任,我国在2020年9月22日提出了“2030年前碳排放达峰、2060年前碳中和”的目标。碳达峰、碳中和将成为带动经济高质量发展的重要动力。

经济发展对闽三角碳排放增加有最强的促进作用。经济发展促进闽三角碳排放增加与地区经济发展模式有关^[53]。2005—2017年闽三角第二产业占比从53%提升至58%,产业扩张导致闽三角综合能源消耗以年均11.46%的速率增加,高于人均GDP的年均增速(10.51%),经济发展与能源消费难以脱钩,闽三角的经济发展模式远未达到低碳的标准。“双碳”目标明确了闽三角未来经济发展的方向,即绿色的、低碳的、由技术进步驱动的。实现“双碳”目标将对目前粗放的发展模式产生较强影响。对闽三角而言,实现“双碳”目标既是机遇又是挑战,关键在于如何平衡经济发展与碳减排的关系。

《福建省“十三五”控制温室气体排放工作方案》明确指示“支持厦门、泉州率先实现碳排放峰值目标”。厦门、漳州和泉州明确了节能减排目标,但尚未制定详细的碳达峰行动计划。研究发现,经济增长对厦漳泉碳排放增加也起促进作用,但影响程度不同。

厦门经济增长率最低,碳排放和人均碳排放的增长率也远低于地区整体水平。经济发展对该市碳排放的贡献度最低。碳排放与经济发展整体上达到了弱脱钩状态,强脱钩出现的频次也较高。厦门是“低碳示范型”城市,其直接排放已达峰,综合排放进入平台期,已具备了“率先达峰”的条件。

2005年之后漳州进入快速工业化阶段。钢铁、石化等产业的发展带动了地区人均GDP以年均11.66%的速率增长,可见漳州的经济发展是高碳的。经济增长对漳州碳排放的贡献度最高。漳州碳排放以扩张负脱钩状态为主,脱钩状态最差。基于经济发展的现实需求,漳州碳排放还将有较大的上升空间,经济发展对碳排放的促进作用将长期存在,漳州实现“双碳”的压力很大。漳州实现“双碳”目标的最佳方式是转变发展方式,提升发展质量。以高碳工业驱动经济发展于碳达峰不利。数字化、智能化将成为漳州经济扩量提质的手段。漳州农林碳汇抵消了部分碳排放,“双碳”约束下,漳州更要保障农林业稳定发展,稳定碳汇。

泉州贡献了闽三角2/3以上的碳排放,是闽三角碳达峰的关键。泉州从未出现强脱钩状态。泉州第二产业占比超过60%且持续升高。“双碳”目标下,泉州面临“率先达峰”的压力,但是第二产业对能源的高度依赖阻碍了碳达峰的实现,因此泉州实现碳达峰必须对产业结构进行升级,以实现降耗和减排。

3.2 能源是闽三角实现“双碳”目标的关键

能源消费是实现碳达峰、碳中和的关键^[54]。长期看优化能源消费结构是降低碳排放的主要手段^[55-56]。本文用煤炭消费占比表示能源结构。闽三角煤炭消费占比从2005年的35.72%下降到2017年的23.44%,能源结构持续改善。“控制煤炭资源的开发规模和强度”以及“调整优化能源结构和布局”等能源政策对闽三角能源结构优化和碳减排起到了积极的作用。厦漳泉3市煤炭消费占比也呈下降趋势。能源结构对厦门碳减排的贡献度最高(图5、图6)。厦门通过产业结构升级实现了结构节能。煤炭消费占比从2005年的35.32%

下降到了 2017 年的 16.80% (图 6), 能源结构优化程度较高。随着厦门抽水蓄能电站工程的建设, 能源结构将进一步优化, 煤炭消费占比将达到更低的水平, 能源结构优化将助力厦门“率先达峰”。能源结构对泉州减排的贡献度最低 (图 5)。泉州消耗了闽三角 45% 的煤炭。虽然福建省“能源发展专项规划”着重强调了泉州的节能降耗目标, 但受产业结构和规模影响, 泉州煤炭消费持续升高, 煤炭消费占比降低较少: 2017 年煤炭消费量是 2005 年的 3.55 倍, 2017 年煤炭消费占比 (23.94%) 仅比 2005 年 (19.95%) 下降了 4% (图 6), 能源结构优化程度有限, 能源结构变化对碳减排的贡献较低。

能源强度衡量了能源消费与经济产出间的关系, 该因素对碳排放的影响存在较大不确定性^[57]。总体而言, 能源强度抑制了闽三角碳排放, 但这种抑制作用仅发生在能源强度下降的阶段。

能源强度下降抑制碳排放, 能源强度升高促进碳排放的效应在厦漳泉 3 市也存在。2005—2017 年厦漳泉能源强度年均变化率分别为 -3.83%、-2.70 和 1.81%。厦门和漳州能源强度降低, 能源强度的贡献值 < 0, 泉州能源强度升高, 能源强度的贡献值 > 0。厦门能源强度下降幅度最大、节能效果最好, 能源强度对碳排放的抑制效应最强 (图 5、图 6)。漳州的能源强度在“十二五”时期的下降幅度更大, 因此“十二五”时期能源强度的负向贡献更高 (图 6)。泉州一直未将能源强度控制在省级约束目标内, 导致泉州在每个“五年规划”的初期必须降低能源强度来实现省级节能目标, 但在规划期末, 能源强度反弹, 所以在 2005—2008 年、2010—2013 年以及 2015—2017 年能源强度对碳排放是抑制作用, 在 2008—2010 年及 2013—2015 年是促进作用。

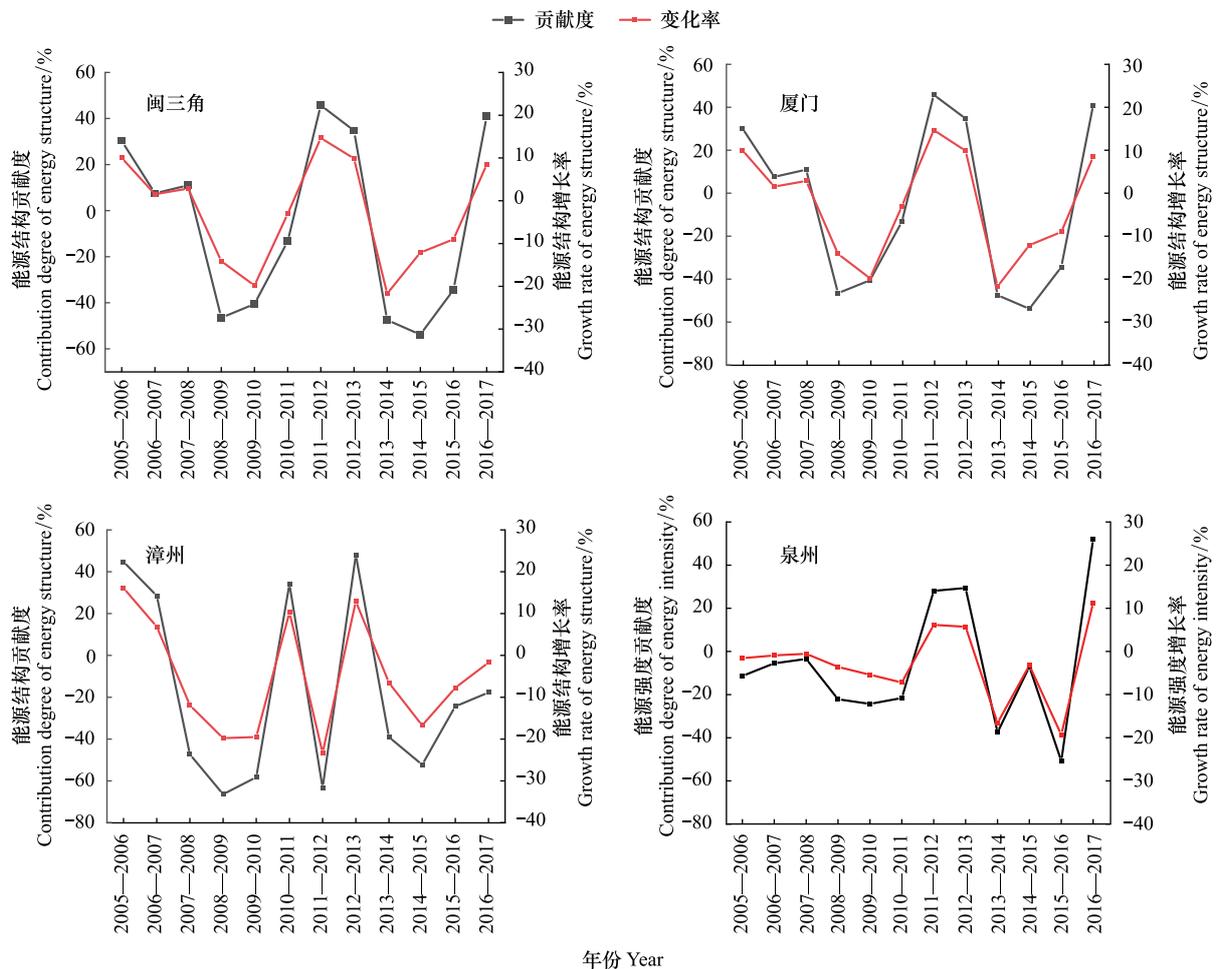


图 6 能源利用对闽三角城市群及厦漳泉碳排放的贡献度

Fig.6 Energy utilization and its contribution degree to carbon emissions of the GTSTF, Xiamen, Zhangzhou and Quanzhou

“双碳”目标提出之后闽三角的节能降耗力度将比之前更强,能源结构优化和能源强度下降将对碳排放产生更强的抑制作用。在保障能源供给安全的前提下,降低煤炭等化石能源的利用、提升能源效率将对闽三角以及厦漳泉“双碳”目标的实现起到积极的促进作用。

4 结论与政策建议

本研究运用 Tapio 脱钩模型和 LMDI 方法开展了闽三角碳排放脱钩状态及驱动机制研究,主要结论如下:(1)闽三角碳排放及人均碳排放均持续升高,二者趋势相同。工业中心泉州的碳排放及人均碳排放均最高。增长型城市漳州的碳排放及人均碳排放增长最快。服务型城市厦门碳排放增长最慢,人均碳排放最低。(2)能源消费部门碳支出最高,其次是林绿地部门,但同时林绿地也是闽三角最主要的碳汇。工业部门碳支出增长最快。(3)闽三角碳排放与经济发展未完全脱钩,但脱钩状态逐渐改善。厦门、漳州和泉州分别以弱脱钩、扩张负脱钩和扩张性连接为主。(4)人均 GDP 和人口规模是闽三角碳排放的正向因素,前者的促进效应更强,但二者的贡献度在降低。人均 GDP 和人口规模分别对漳州和厦门碳排放有最强的促进作用。(5)能源结构和能源强度是闽三角碳排放的负向因素,能源结构的抑制效应更强,二者的负向贡献度均在升高。能源结构是厦漳泉碳排放的负向因素,能源强度对不同城市碳排放的影响效应不同。人口规模对闽三角碳减排未做脱钩努力,能源结构是碳减排的强脱钩努力。

能源消费是闽三角碳排放的主要来源,能源结构对碳排放起主要抑制作用。“双碳”目标约束下闽三角实现低碳发展的关键在于能源消费结构的优化。在“十四五”及“十五五”时期,闽三角可依赖漳州核电、厦门水电以及泉州热能工程等,发展低碳甚至无碳能源,扩大可再生能源的应用,实现能源供给和消费结构的优化,进而实现碳减排。闽三角海洋资源丰富,蕴含着丰富的油气资源。与煤炭相比,相同热值的油气资源的碳排放量更低,因此开发海洋资源也应该纳入闽三角的能源发展规划中。闽三角可依托地区科研单位,探索可再生能源和海洋油气能源高效的利用方式。经济结构影响能源消费。闽三角第二产业,尤其是工业部门的发展导致了闽三角碳排放的迅速增长,实现低碳发展必须提升工业经济的发展质量。闽三角应尽快明确行业碳排放特征及驱动机制,参考厦门“东坪山近零碳排放示范区”的经验,对重点行业开展有针对性的减排措施。厦门应尽快制定碳达峰行动计划,明确达峰目标,引领闽三角“双碳”行动。漳州实现低碳发展的重点在于产业升级,提升现有的技术水平助力产业结构高级化。泉州实现低碳发展则必须提升能源效率。

参考文献(References):

- [1] Baker H S, Millar R J, Karoly D J, Beyerle U, Guilloid B P, Mitchell D, Shioyama H, Sparrow S, Woollings T, Allen M R. Higher CO₂ concentrations increase extreme event risk in a 1.5 °C world. *Nature Climate Change*, 2018, 8(7): 604-608.
- [2] Liu L L, Ding D H, He J. Fiscal decentralization, economic growth, and haze pollution decoupling effects: a simple model and evidence from China. *Computational Economics*, 2019, 54(4): 1423-1441.
- [3] Shi Y B, Zhao X X, Jang C L, Chang C P. Decoupling effect between economic development and environmental pollution: a spatial-temporal investigation using 31 provinces in China. *Energy & Environment*, 2019, 30(5): 755-775.
- [4] Rüstemoğlu H. Factors affecting Germany's green development over 1990—2015: a comprehensive environmental analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(7): 6636-6651.
- [5] 王世进, 姬桂荣, 仇方道. 雾霾、碳排放与经济增长的脱钩协同关系研究. *软科学*, 2021; 1-15. DOI: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1268.G3.20211026.1248.002.html>
- [6] Dong F, Li J Y, Zhang X Y, Zhu J. Decoupling relationship between haze pollution and economic growth: a new decoupling index. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 107859.
- [7] 王杰, 李治国, 谷继建. 金砖国家碳排放与经济增长脱钩弹性及驱动因素——基于 Tapio 脱钩和 LMDI 模型的分析. *世界地理研究*, 2021, 30(3): 501-508.
- [8] 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.
- [9] 臧宏宽, 杨威杉, 张静, 伍鹏程, 曹丽斌, 许野. 京津冀城市群二氧化碳排放达峰研究. *环境工程*, 2020, 38(11): 19-24, 77.

- [10] Tapio P. Towards a theory of decoupling: degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001. *Transport Policy*, 2005, 12(2): 137-151.
- [11] Wu Y, Zhu Q W, Zhu B Z. Decoupling analysis of world economic growth and CO₂ emissions; a study comparing developed and developing countries. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 190: 94-103.
- [12] Chen J D, Wang P, Cui L B, Huang S, Song M L. Decomposition and decoupling analysis of CO₂ emissions in OECD. *Applied Energy*, 2018, 231: 937-950.
- [13] Wang Q, Zhao M M, Li R R, Su M. Decomposition and decoupling analysis of carbon emissions from economic growth: a comparative study of China and the United States. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 197: 178-184.
- [14] 黄炜. 碳达峰背景下浙江经济增长和碳排放脱钩. *浙江经济*, 2021(1): 36-37.
- [15] 彭佳雯, 黄贤金, 钟太洋, 赵雲泰. 中国经济增长与能源碳排放的脱钩研究. *资源科学*, 2011, 33(4): 626-633.
- [16] Wu Y, Tam V W Y, Shuai C Y, Shen L Y, Zhang Y, Liao S J. Decoupling China's economic growth from carbon emissions; empirical studies from 30 Chinese provinces (2001-2015). *Science of the Total Environment*, 2019, 656: 576-588.
- [17] 刘博文, 张贤, 杨琳. 基于 LMDI 的区域产业碳排放脱钩努力研究. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(4): 78-86.
- [18] Yang L, Yang Y T, Zhang X, Tang K. Whether China's industrial sectors make efforts to reduce CO₂ emissions from production? - A decomposed decoupling analysis. *Energy*, 2018, 160: 796-809.
- [19] Yoichi K. Impact of Carbon Dioxide Emission on GNP Growth; Interpretation of Proposed Scenarios. Presentation to the Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, IPCC, Paris, 1989.
- [20] Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis; a practical guide. *Energy Policy*, 2005, 33(7): 867-871.
- [21] 张雨. “一带一路”沿线国家运输能源碳足迹生态压力驱动因素及脱钩研究. 西安: 长安大学, 2020.
- [22] Karmellos M, Kosmadakis V, Dimas P, Tsakanikas A, Fylaktos N, Taliotis C, Zachariadis T. A decomposition and decoupling analysis of carbon dioxide emissions from electricity generation; evidence from the EU-27 and the UK. *Energy*, 2021, 231: 120861.
- [23] 周彦楠, 杨宇, 程博, 黄季夏. 基于脱钩指数和 LMDI 的中国经济增长与碳排放耦合关系的区域差异. *中国科学院大学学报*, 2020, 37(3): 295-307.
- [24] 郑颖, 逯非, 刘晶茹, 王效科. 我国典型城市化石能源消费 CO₂ 排放及其影响因素比较研究. *生态学报*, 2020, 40(10): 3315-3327.
- [25] 刘汉初, 樊杰, 曾瑜智, 郭锐. 中国高耗能产业碳排放强度的时空差异及其影响因素. *生态学报*, 2019, 39(22): 8357-8369.
- [26] 杨美成. 城镇化对经济增长和碳排放的时变影响. *技术经济与管理研究*, 2022(1): 3-8.
- [27] 王军锋, 裴子璇. 深刻把握并科学谋划城市群碳达峰、碳中和行动. *环境保护*, 2022, 50(Z1): 41-43.
- [28] 郭炳南, 林基, 刘堂发. 长三角地区二氧化碳排放与经济增长脱钩关系的实证研究. *生态经济*, 2017, 33(4): 25-29.
- [29] 李健, 王尧, 王颖. 京津冀区域经济发展与资源环境的脱钩状态及驱动因素. *经济地理*, 2019, 39(4): 43-49.
- [30] 段林丰, 卢培利, 蒲寅羽, 胡伟, 陈敏, 邓迪, 李振亮, 翟崇治. 典型城市群碳排放的脱钩效应及驱动机制研究. *环境科学与技术*, 2021, 44(11): 55-62.
- [31] 张华明, 元鹏飞, 朱治双. 黄河流域碳排放脱钩效应及减排路径. *资源科学*, 2022, 44(1): 59-69.
- [32] Luo H, Li L, Lei Y L, Wu S M, Yan D, Fu X S, Luo X M, Wu L K. Decoupling analysis between economic growth and resources environment in Central Plains Urban Agglomeration. *Science of the Total Environment*, 2021, 752: 142284.
- [33] 周璟茹, 赵华甫, 吴金华. 关中城市群土地集约利用与碳排放关系演化特征研究. *中国土地科学*, 2017, 31(11): 55-61, 72.
- [34] 武娜, 沈镭, 钟帅, 张超. 晋陕蒙地区经济增长与碳排放时空耦合关系. *经济地理*, 2019, 39(9): 17-23.
- [35] 王越, 赵婧宇, 李志学, 刘学荣, 周嘉. 东北三省碳排放脱钩效应及驱动因素研究. *环境科学与技术*, 2019, 42(6): 190-196.
- [36] 王兆峰, 李竹, 吴卫. 长江经济带不同等级城市碳排放的时空演变及其影响因素. *环境科学研究*: 1-14. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2022.02.29
- [37] 林伯强. 碳中和背景下的广义节能——基于产业结构调整、低碳消费和循环经济的节能新内涵. *厦门大学学报: 哲学社会科学版*, 2022, 72(2): 10-20.
- [38] 钟宇声. 福建省碳排放影响因素及脱钩特征研究. 福州: 福建师范大学, 2018.
- [39] 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.
- [40] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>
- [41] 赵荣钦. 城市系统碳循环及土地调控研究. 南京: 南京大学, 2012.

- [42] 沈镭, 赵建安, 王礼茂, 刘立涛, 王燕, 姚予龙, 耿元波, 高天明, 曹植. 中国水泥生产过程碳排放因子测算与评估. 科学通报, 2016, 61(26): 2926-2938.
- [43] 严玉廷, 刘晶茹, 丁宁, 严丽. 中国平板玻璃生产碳排放研究. 环境科学学报, 2017, 37(8): 3213-3219.
- [44] 陈舜, 逯非, 王效科. 中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数的估算. 生态学报, 2015, 35(19): 6371-6383.
- [45] 那洪明, 何剑飞, 袁喻兴, 孙竞超. 钢铁企业不同生产流程碳排放解析. 第十届全国能源与热工学术年会论文集. 2019:402-408.
- [46] 王明星, 李晶, 郑循华. 稻田甲烷排放及产生、转化、输送机理. 大气科学, 1998, 22(4): 600-612.
- [47] 赵广永. 反刍动物瘤胃甲烷产量预测模型. 动物营养学报, 2014, 26(10): 3135-3139.
- [48] 冯仰廉, 李胜利, 赵广永, 张晓明, 莫放, 韩继福. 牛甲烷排放量的估测. 动物营养学报, 2012, 24(1): 1-7.
- [49] 何艳秋, 陈柔, 吴昊玥, 徐杰, 宋艺. 中国农业碳排放空间格局及影响因素动态研究. 中国生态农业学报, 2018, 26(9): 1269-1282.
- [50] 周立国, 宋清海, 张一平, 费学海, 邓云, 武传胜, 周瑞伍, 林友兴, 邓晓保, 陈爱国, 李培广. 4种森林生态系统光合作用光响应参数特征的比较. 生态学杂志, 2017, 36(7): 1815-1824.
- [51] 管东生, 陈玉娟, 黄芬芳. 广州城市绿地系统碳的贮存、分布及其在碳氧平衡中的作用. 中国环境科学, 1998, 18(5): 437-441.
- [52] 赖文亭, 王远, 黄琳琳, 黄逸敏, 罗进, 陈华阳. 福建省行业碳排放驱动因素分解及其与经济增长脱钩关系. 应用生态学报, 2020, 31(10): 3529-3538.
- [53] 唐晓灵, 康铭敏. 我国东西部城市碳排放差异性比较研究——基于对上海市和西安市的数据分析. 价格理论与实践, 2020(5): 169-172, 176.
- [54] 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.
- [55] 汪菲, 王长建. 新疆能源消费碳排放的多变量驱动因素分析——基于扩展的 STIRPAT 模型. 干旱区地理, 2017, 40(2): 441-452.
- [56] 刘洪涛, 刘文佳. 中国供给侧改革发展情景与碳排放研究. 生态经济, 2017, 33(8): 14-19, 31.
- [57] Gu W, Zhao X H, Yan X B, Wang C, Li Q. Energy technological progress, energy consumption, and CO₂ emissions: empirical evidence from China. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 236: 117666.