

中国碳排放达峰省区的碳脱钩水平及驱动因素研究

张玉欣

长春理工大学经济管理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2023年12月27日; 录用日期: 2024年1月8日; 发布日期: 2024年2月19日

摘要

结合中国30个省区的2002至2017年时间序列碳排放数据分析,在2017年前有15个省区达到碳排放峰值,为探究不同省区实现碳排放达峰的路径差异,本文采用投入产出原理和结构分解分析模型,分别探究能源结构、能源强度、生产结构、部门结构和最终需求五个驱动因素在三个研究时段对碳排放达到峰值省份的不同影响,结合脱钩模型将15个省区分为主动达峰型省区和被动减排型省区。研究发现,主动达峰的省区生产结构和部门结构都较合理,其中较少省区对化石能源依旧有依赖性,一般少部分增碳效应能和减碳效应所抵消;被动减排达峰的大部分省区中,能源强度和部门结构起到了主要的增碳作用,辽宁的能源强度是增碳的主要动因,最终需求起到减碳作用,福建和云南的减碳潜力较强。总体上,建议被动减排的省区挖掘导致碳排放下降的原因,充分发挥各省区自身资源禀赋单独设定各省区的排放目标,主动达峰的省区需要找到适合该地区保持碳排放量下降趋势的路径,避免碳排放反弹,各省区需探索符合自身发展情况的“双碳”目标实现路径,以期为未达峰和未实现主动达峰的省区提供科学有效的政策依据。

关键词

碳达峰, 投入产出模型, 结构分解分析, 脱钩, 主动达峰

Study on the Carbon Decoupling Level and Driving Factors in the Provinces with Peak Carbon Emissions in China

Yuxin Zhang

School of Economics and Management, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Dec. 27th, 2023; accepted: Jan. 8th, 2024; published: Feb. 19th, 2024

文章引用: 张玉欣. 中国碳排放达峰省区的碳脱钩水平及驱动因素研究[J]. 低碳经济, 2024, 13(1): 52-64.
DOI: 10.12677/jlce.2024.131005

Abstract

Based on the analysis of time series carbon emission data of 30 provinces and regions in China from 2002 to 2017, 15 provinces reached the peak of carbon emission before 2017. In order to explore the path differences of carbon emission peak in different, this paper adopts input-output principle and structural decomposition analysis to explore the different influences of five driving factors, namely energy structure, energy intensity, production structure, departmental structure and final demand, on the provinces with carbon emission peak in three research periods, and divides 15 provinces into active provinces by combining decoupling model. It is found that the production structure and sector structure of the provinces that actively reach the peak are reasonable, among which less provinces still depend on fossil energy, and generally a small number of carbon increase effects can be offset by carbon reduction effects; in most provinces where passive emission reduction reaches its peak, energy intensity and sector structure play a major role in increasing carbon. Liaoning's energy intensity is the main motivation for increasing carbon, and the final demand plays a role in reducing carbon. Fujian and Yunnan have strong carbon reduction potential. Generally speaking, it is suggested that provinces with passive emission reduction should explore the causes leading to the decline of carbon emissions, give full play to their own resource endowments and set their own emission targets. Proactively peaked provinces need to find a path suitable for the region to maintain the downward trend of carbon emissions and avoid the rebound of carbon emissions. Provinces need to explore the path to achieve peak carbon dioxide emissions and carbon neutrality in line with their own development, in order to provide scientific and effective policy basis for provinces that have not reached the peak and have not achieved the active peak.

Keywords

Peak Carbon Dioxide Emissions, Input-Output Model, Structural Decomposition Analysis, Decoupling, Proactively Peaked

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景

人类通过燃烧化石燃料排放温室气体，造成的全球变暖问题引发世界关注，2021年8月6日，IPCC第六次气候变化评估报告第一工作组报告发布：目前地球表面温度要比1850~1900年提高了1.09℃，全球变暖引发的冰川融化、海平面上升等现象已经开始突显。中国是世界上最大的发展中国家，目前能源消费量[1]和二氧化碳排放量[2] [3]均为全球最高。中国幅员辽阔，各地资源禀赋、产业分工和发展阶段不同，二氧化碳排放存在非常显著的空间异质性，且驱动因素存在明显的地区差异[4]。习近平总书记在中共中央政治局第三十六次集体学习时指出，“要充分考虑区域资源分布和产业分工的客观现实，研究确定各地产业结构调整方向和‘双碳’行动方案，不搞齐步走、‘一刀切’”[5]。《2030年前碳达峰行动方案》也指出，各地区要结合本地区经济社会发展实际和资源环境禀赋，坚持分类施策、梯次有序推进“碳达峰”[6]。

关于地区二氧化碳排放是否达峰的判断主要有两种，一种方法通过对比历史年度二氧化碳排放水平与最新一期二氧化碳排放水平，如果历史年份中某一年的二氧化碳排放水平高于最新一年的二氧化碳排

放水平则判断该地区二氧化碳排放已经达峰[7]；另一种地区二氧化碳达峰判断方法更为严苛，只有当地地区二氧化碳排放达到峰值后五年内，排放量至少减少 10%，才认为该地区的二氧化碳排放已经达峰[8]。综上，考虑中国各省区实际情况，本文应用 2002~2017 年期间的二氧化碳排放数据对中国 30 个省区的二氧化碳达峰情况进行判断，对比历年二氧化碳排放量，将历史二氧化碳排放量达到峰值并稳定不发生反弹保持 3 年及以上的省区确定为达峰省区。图 1 展示了将中国 15 个碳排放达峰省区 2002~2017 年期间的二氧化碳排放情况，根据本文提出的地区“碳达峰”判断原则，中国的 30 个省区中共有 15 个省区在 2017 年前达到了碳排放峰值，分别为北京、天津、河北、上海、福建、山东、河南、湖北、重庆、四川、云南、陕西、甘肃、辽宁和吉林。

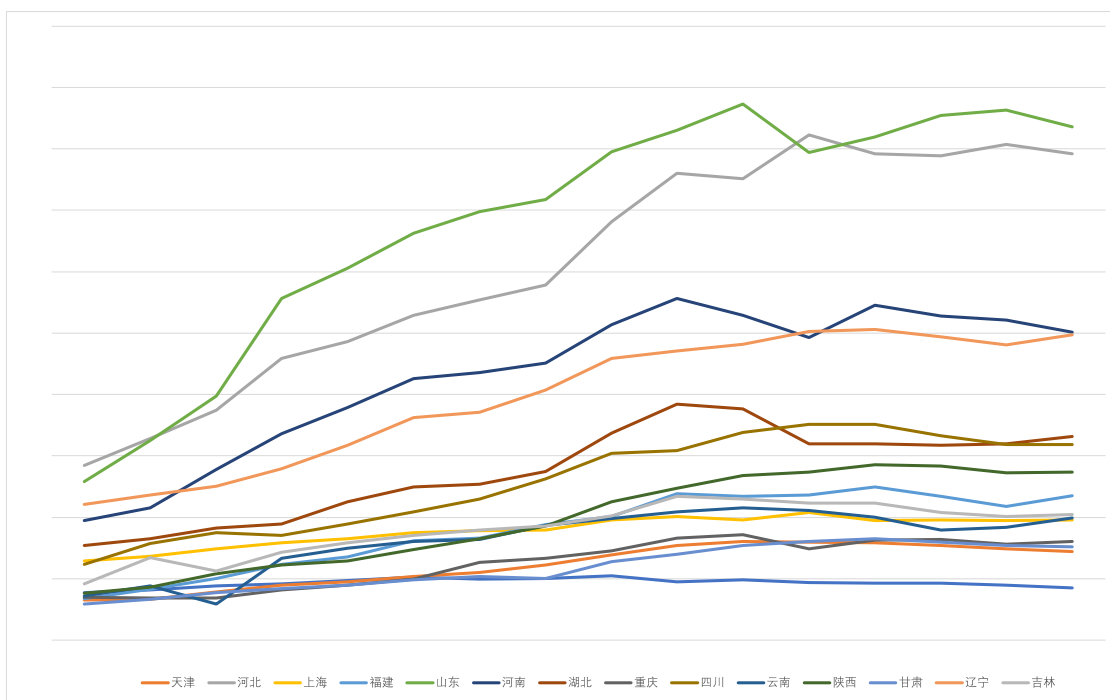


Figure 1. Carbon dioxide emissions in peak carbon dioxide emissions provinces (Mt)
图 1. 达峰省区二氧化碳排放量(百万吨)

2. 文献综述

碳达峰是指二氧化碳排放量在某一时间达到历史最高峰值，之后经历平台期并逐步下降[9]，同时也标志这碳排放与经济发展实现脱钩，其中碳达峰包括达峰年份和峰值[10]，对于二氧化碳排放达峰的统计与判断，有学者构建 M-K 趋势分析检验法对中国 36 个典型大城市进行碳达峰的判断[11]，但并没有对驱动因素做的进一步的分析，也有学者在城市层面的对城市二氧化碳排放达峰进行判断并分类讨论其驱动因素[12]。

我国一系列政策文件明确指出要推动部分地区率先达峰，各省区的达峰意愿和落实情况也存在着较大差异，同时在二氧化碳排放模式以及排放和经济发展之间的联系方面也有巨大的差异，近年来中国一些省区在碳排放量上出现了下降，一些省份为主动降低二氧化碳排放强度，通过改善能源结构等方式达到二氧化碳排放的峰值，这些省份已实现二氧化碳排放和经济发展的脱钩，在二氧化碳排放量下降的同时也保证了经济的发展；一些省份则是由于经济衰退或人口减少等因素，使二氧化碳的排放量被动减少[13]。碳达峰节奏和方式会影响经济增长速度和结果，所以应统筹好碳减排和稳增长之间的关系[14]。脱

钩模型经常用于衡量经济增长与环境压力或资源消耗之间的关系，Tapio [15]将其细化的脱钩指数和分类，并被国内外诸多学者用于描述中国二氧化碳排放和经济增长之间的关系[16]，诸多学者在考察脱钩状态的基础上，利用分解模型来测度排放脱钩的驱动因素，LMDI 分解方法应用最为广泛[17]。Shan 等[12]基于 287 个中国城市的碳排放清单，测度了达到峰值的城市达峰年份到最新年份的脱钩系数，将强脱钩省区归类为主动达峰城市，未达到强脱钩的省区定义为被动减排型城市，得出有 38 个城市的主动达峰的结论，并结合 IDA 对驱动因素进行了进一步分析。张诗卉[18]等选取 6 个指标对 31 个省区进行了层次聚类，结合脱钩模型将各省区分为达峰示范省等五类，并给出了差异化的达峰行动路径。通过已有研究表明，人口规模[17]、能源结构[19]、最终需求[20]、产业结构[21]、碳排放效率[22]等都是影响二氧化碳排放趋势和实现碳达峰碳中和的影响因素。

本文结合 Tapio 脱钩模型将基于本文提出的“碳达峰”判别准则得出 15 个碳排放达峰省区进行分类，并结合基于投入产出法和结构分解模型对碳排放达峰省区和各类省区的驱动因素进行分析，为推进各省区实现主动达峰和碳中和提供政策建议和决策依据。

3. 研究方法和数据来源

3.1. Tapio 脱钩模型

本文选取 Tapio 脱钩模型弹性系数来衡量各省区碳排放和经济发展之间的变动关系，Tapio 脱钩模型的计算公式为：

$$e = \frac{\%C}{\%GDP} = \frac{\frac{C_t - C_0}{C_0}}{\frac{G_t - G_0}{G_0}} = \frac{\frac{\Delta C}{C_0}}{\frac{\Delta G}{G_0}} \quad (1)$$

不同脱钩指数对应的碳排放与经济发展脱钩状态及其分类如表 1 所示，在所划分的八种脱钩状态中，强脱钩是最理想的状态，每种脱钩状态都对应具体的脱钩指数，每一种脱钩状态对应的脱钩指数和经济发展和碳排放水平如表 1 所示。

Table 1. Decoupling index and classification of decoupling state

表 1. 脱钩指数及脱钩状态的分类

分类	脱钩状态	经济发展	碳排放	脱钩指数
脱钩	强脱钩	+	-	<0
	弱脱钩	+	+	0~0.8
	衰退脱钩	-	-	>1.2
连接	扩张性连接	+	+	<0
	衰退性连接	-	-	0.8~1.2
负脱钩	扩张性负脱钩	+	+	>1.2
	弱负脱钩	-	-	0~0.8
	强负脱钩	-	+	<0

3.2. 投入产出模型

1936 年，美国经济学家 Leontief [23]提出了投入产出模型，对经济系统的多部门的投入与产出进行

研究, 编制投入产出表并建立数学模型, 其优点是能较全面的体现出各产业间的经济联系。投入产出矩阵关系为:

$$a_{ij} = \frac{X_{ij}}{X_j} \quad (2)$$

投入产出模型为:

$$X = AX + Y \quad (3)$$

如下(4)所示, 其中 I 为单位矩阵, L 表示 $(I - A)^{-1}$, 为列昂惕夫逆矩阵, S 为部门结构矩阵, F 表示最终需求

$$X = (I - A)^{-1}Y = LY = L \times S \times F \quad (4)$$

由此可以得出二氧化碳的排放总量 TC 由下式计算, 其中 C 为二氧化碳排放系数行向量; EM 为能源结构矩阵; EI 为能源强度矩阵; 总产出由中间产出和最终需求构成, 所以本文使用 X 总产出来表示二氧化碳排放量。最终二氧化碳排放量表达式为:

$$TC = C \times EM \times EI \times X = C \times EM \times EI \times L \times S \times F \quad (5)$$

3.3. 结构分解分析方法

对二氧化碳排放的驱动因素进行分析能够有效的识别研究地区所存在的问题, 主流的方法为分解方法, 诸多学者对二氧化碳排放进行了驱动因素的分析, 常见的分解方法有指数分解分析(IDA)和结构分解分析(SDA)两种。结构分解分析更适用于能源和排放的研究。

$$\begin{aligned} \Delta TC &= TC^t - TC^0 = C^t EM^t EI^t L^t S^t F^t - C^0 EM^0 EI^0 L^0 S^0 F^0 \\ &= \Delta CEM^t EI^t L^t S^t F^t + C^0 \Delta EMEI^t L^t S^t F^t + C^0 EM^0 \Delta EIL^t S^t F^t \\ &\quad + C^0 EM^0 EI^0 \Delta LS^t F^t + C^0 EM^0 EI^0 L^0 \Delta SF^t + C^0 EM^0 EI^0 L^0 S^0 \Delta F \end{aligned} \quad (6)$$

结构分解分析的分解结果不是唯一的, 根据李景华的研究表明两级分解法理论完善, 两级分解方法 [24] 运算过程简单且误差较小, 所以本文采用两级分解方法进行研究计算, 与式(6)对应的另一极分解可以表示为

$$\begin{aligned} \Delta TC &= TC^t - TC^0 = C^t EM^t EI^t L^t S^t F^t - C^0 EM^0 EI^0 L^0 S^0 F^0 \\ &= \Delta CEM^0 EI^0 L^0 S^0 F^0 + C^t \Delta EMEI^0 L^0 S^0 F^0 + C^t EM^t \Delta EIL^0 S^0 F^0 \\ &\quad + C^t EM^t EI^t \Delta LS^0 F^0 + C^t EM^t EI^t L^t \Delta SF^0 + C^t EM^t EI^t L^t S^t \Delta F \end{aligned} \quad (7)$$

由式(6)和式(7)加权平均值作为各个驱动因素对碳排放量的贡献测度, 故二氧化碳排放量可以表示为:

$$\begin{aligned} \Delta TC &= TC^t - TC^0 = f_{(\Delta C)} + f_{(\Delta EM)} + f_{(\Delta EI)} + f_{(\Delta L)} + f_{(\Delta S)} + f_{(\Delta F)} \\ f_{(\Delta C)} &= \frac{1}{2} (\Delta CEM^t EI^t L^t S^t F^t + \Delta CEM^0 EI^0 L^0 S^0 F^0) \\ f_{(\Delta EM)} &= \frac{1}{2} (C^0 \Delta EMEI^t L^t S^t F^t + C^t \Delta EMEI^0 L^0 S^0 F^0) \\ f_{(\Delta EI)} &= \frac{1}{2} (C^0 EM^0 \Delta EIL^t S^t F^t + C^t EM^t \Delta EIL^0 S^0 F^0) \\ f_{(\Delta L)} &= \frac{1}{2} (C^0 EM^0 EI^0 \Delta LS^t F^t + C^t EM^t EI^t \Delta LS^0 F^0) \end{aligned}$$

$$f_{(\Delta S)} = \frac{1}{2} (C^0 EM^0 EI^0 L^0 \Delta SF' + C^t EM^t EI^t L^t \Delta SF^0)$$

$$f_{(\Delta F)} = \frac{1}{2} (C^0 EM^0 EI^0 L^0 S^0 \Delta F + C^t EM^t EI^t L^t S^t \Delta F) \quad (8)$$

$f_{(\Delta C)}$ 、 $f_{(\Delta EM)}$ 、 $f_{(\Delta EI)}$ 、 $f_{(\Delta L)}$ 、 $f_{(\Delta S)}$ 、 $f_{(\Delta F)}$ 分别表示碳排放量变化的碳排放系数效应、能源结构效应、能源强度效应、列昂惕夫效应(即生产结构效应)、部门结构效应、最终需求效应,表示以上各个因素对碳排放量变化的贡献,其中碳排放系数为固定值,几乎不随时间发生变化,所以本文不考虑碳排放系数效应。

3.4. 数据来源

本研究使用中国碳核算数据库(CEADs)提供的碳排放数据清单判断全国 30 个省区的碳排放达峰情况,考虑到数据的可得性,以我国不包括港澳台及西藏地区的 30 个省份为研究对象,选用的投入产出表的数据来自《中国地区投入产出表》,分别采用 2002 年、2007 年、2012 年和 2017 年的数据,由于原始数据中投入产出表里的部门划分与能源消费的部门划分并不完全一致,为保证数据口径一致,本文和处理数据时将 42 个部门投入产出表合并为 28 个部门,将最终需求统一分为最终消费、资本形成总额和净出口三个部分。本文选取 CEADs 提供的《省级能源清单》,其中海南和宁夏的 2002 年能源数据缺失,本文用临近年 2003 年能源数据代替,研究过程中需要的不同类型的能源的碳排放系数来自政府间气候变化专门委员会(IPCC),通过数据整合,将 20 种能源形式根据折标准煤系数统一归为 9 种能源形式,分别为煤炭、焦原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气和一次电力。此外,最终需求由消费、投资和净出口组成,它们共同构成各省区经济的最终产出,其中净出口是该省区输出和输入的差额。

4. 达峰省区碳排放与经济增长的脱钩水平分析

本文对 15 个达峰省区的达峰时间进行统计,可以发现:最早达到峰值的省区为北京,于 2010 年达到二氧化碳排放峰值状态;河南、湖北、吉林三个省区于 2011 年达到排放峰值;天津、重庆和云南三个省区于 2012 年达到排放峰值;河北、上海、四川三个省区于 2013 年达到排放峰值;福建、陕西、甘肃、辽宁三个省区于 2014 年达到排放峰值。通过计算某一省区的碳排放与经济增长的脱钩情况能够反映该地区的效率和结构等因素对于减碳的作用,也可以反映该地区未来实现碳中和的潜力[25]。应用碳脱钩指数可以测算某个地区的碳排放与经济增长的脱钩情况,从而可以有效划分各省区的碳达峰类型。本文由公式(1)计算 15 个省份达到排放峰值的年份起计算每五年的脱钩系数,根据表 1 可以分类得出以下表 2 的脱钩状态结果。

本研究分别计算三个研究时期的脱钩指数,考虑 2012~2017 年期间的脱钩状态对达峰省区进行划分。天津、甘肃、山东、河南、湖北、重庆、四川、陕西、甘肃和吉林分别在 2012~2017 年实现了二氧化碳与经济增长的脱钩状态为强脱钩,说明这 10 个省区在二氧化碳排放量下降的同时经济保持合理增长,二氧化碳排放与经济增长的脱钩状态最为理想,本文将此类省区命名为主动达峰的省区。福建和云南两个省区的二氧化碳排放与经济发展呈现弱脱钩的状态,说明以上省区的二氧化碳排放增长的同时经济保持增长,且二氧化碳排放的增长速度小于经济增长的速度,二氧化碳排放与经济增长的脱钩状态较为理想;河北和上海是呈现扩张性负脱钩的状态,说明此两个省区的碳排放量和经济均增长,但碳排放量增长率大于经济增长率;辽宁省在 2012 年至 2017 年碳排放和经济增长呈现了强负脱钩的状态,说明其经济发展下降同时伴随着碳排放量的增加,是最差的脱钩状态,经济增长的相对缓慢是造成辽宁暂时达峰的主要推动力。以上省区的二氧化碳排放与经济增长并没有实现脱钩,本文将以上 5 个省区统一归类为被动达峰省区。

Table 2. Decoupling state after carbon peak in each province
表 2. 各省区碳达峰后的脱钩状态

Province	2002~2007		2007~2012		2012~2017	
	系数	状态	系数	状态	系数	状态
北京	0.14	WD	-0.71	SD	-2.95	SD
天津	0.22	WD	0.49	WD	-0.26	SD
山东	1.09	EC	0.46	WD	-1.04	SD
河南	0.81	EC	0.21	WD	-0.25	SD
湖北	0.47	WD	0.47	WD	-0.63	SD
重庆	0.14	WD	0.40	WD	-0.37	SD
四川	0.65	WD	1.01	EC	-0.11	SD
山西	0.41	WD	0.50	WD	-0.12	SD
甘肃	0.34	WD	0.42	WD	-0.47	SD
吉林	0.43	WD	0.20	WD	-2.15	SD
云南	0.87	EC	0.28	WD	0.00	WD
福建	2.40	END	0.67	WD	0.20	WD
河北	0.45	WD	0.38	WD	1.15	EC
上海	0.50	WD	0.41	WD	1.48	END
辽宁	0.32	WD	0.16	WD	-3.50	SND

注：SND：强负脱钩；WND：弱负脱钩；END：扩张性负脱钩；SD：强脱钩，WD：弱脱钩；RD：衰退脱钩；EC：扩张性连接；RC：衰退性连接。

5. 达峰省区碳排放变化的驱动因素分析

5.1. 达峰省区结构分解结果分析

本文应用结构分解分析模型，将达峰省区的二氧化碳排放变化分解为能源结构效应、能源强度效应、生产结构效应、部门结构效应和最终需求效应五类驱动因素的影响，图 2 中各图中的柱形图表示某个驱动因素三个阶段对各省区二氧化碳排放变化的驱动作用。

如图 2 所示，13 个省区 2002~2017 年能源结构对碳排放量变化的平均贡献均为负值，说明能源结构在大部分达峰省区都促进了碳减排。在四川和吉林两个省区，能源结构起到了增加碳排放的作用，这说明以上两个省区近年来能源结构的变化并不理想，但这两个省区的能源结构对二氧化碳排放的推动作用不是非常明显，但能源结构优化和调整依旧是以上两个省区未来实现碳中和的重要方向。从时间维度分析，大部分达峰省区的能源结构正在变得越来越合理，到 2007~2012 年期间，只有 4 个省区的能源结构效应值为正，且效应值相对于上一个阶段明显下降。到 2012~2017 年期间，只有 3 个省区的能源结构效应值为正，且效应值数值进一步下降。这表明能源结构效应在达峰省区的减排效果正在变得越来越显著。

能源强度体现地区能源效率水平，从三个研究时段的平均水平来看，15 个达峰省区的能源强度效应均促进了碳减排，且减排效果非常显著，特别是在山东、河南、河北等经济总量较大且部门结构偏向于

能源密集型的省区，能源强度效应对碳减排的作用最为明显。这表明在 2002~2017 年期间中国所有达峰省区的能源效率均有较大幅度的提升。从时间维度来看，2002~2007 年期间，各省区的能源强度效应的减碳作用最为显著，而随着时间的发展能源强度效应的减碳作用虽然仍然存在，但是已经明显减弱，特别是到了 2012~2017 年期间，已经有 4 个省区能源强度效应增加了二氧化碳的排放，这说明以上 4 个省区的能源效率在这一阶段并没有明显的提升，同时由于以上省区经济增长的明显放缓，单位能源消费带来的经济增长水平还有所下降。

生产结构效应代表中间产出相对水平。由图 2 从平均水平上看，生产结构效应推动了北京、天津、河北、山东、河南和陕西共 6 个省区的碳排放增长，其余 9 个省区的生产结构效应而是促进了碳排放的下降，可见大部分省区的生产结构在研究期间正在变得更为合理。分析达峰省区的生产结构效应在时间维度的变化可以发现：北京、天津、上海、山东、河北、四川、云南、陕西和辽宁等 9 个省区的生产结构由 2002~2007 年的增长二氧化碳排放变为 2012~2017 年的降低二氧化碳排放，这表明以上省区在 2002~2007 年期间生产结构存在明显的不合理现象，由于产能过剩等原因造成中间产出比例过高的问题，然而伴随着这些省区的进一步发展，产能过剩等问题普遍得到了解决，到 2012~2017 年期间以上省区的生产结构效应全部表现出降低二氧化碳排放的作用。

研究期间，达峰省区的部门结构并不尽如人意。从平均水平来看，除北京外的大部分省区的部门结构效应起到了推动二氧化碳增长的作用，这说明这类省区的能源密集型的部门的比重加大了，研究期间这些省区的部门结构不但没有得到优化，反而变得更差。从时间发展维度来分析，从 2002 年到 2017 年，大多数省区的部门结构正在变得越来越合理，其中天津、河北、河南、重庆、云南、陕西、甘肃、辽宁等 8 个省区的部门结构正在发生积极的变化，从 2002~2007 年到 2012~2017 年期间，部门结构效应对二氧化碳排放的作用向原来的正向变成了负向，这说明这些省区的部门结构在 2012 年之后逐渐向非能源密集型的部门结构转变。另外 8 个省区的部门结构效应对二氧化碳排放的作用仍然为正，这说明这些省区的部门结构仍然存在不尽合理的问题，部门结构优化也将成为这类省区未来实现碳中和目标的一个重要路径。

从平均水平上看，所有达峰省区的最终需求效应均对二氧化碳排放产生了正向影响。其中河北、山东、河南、湖北、四川的平均水平较高，这五个省区都是经济相对发达省区，虽然研究期间经济增长保持较高水平，但二氧化碳排放依然能够达峰，这说明这些省区的效率和结构方面在研究期间均取得较大进步。从时间发展维度来分析，最终需求效应在 2012 年之前对二氧化碳排放增长的推动作用非常显著，但是在 2012 年之后，仍然在绝大多数省区最终需求效应仍然保持对二氧化碳排放增长的推动，但是相对于 2012 年之前，这一推动作用明显下降，分析原因，2012 年之后中国政府的不再唯经济增长的新常态发展战略这是一现状的直接原因





Figure 2. The contribution of each driving factor to the change of carbon emissions in various peak carbon dioxide emissions provinces

图 2. 各驱动因素对各达峰省区的碳排放变化贡献

综上，本文将碳排放达峰的 15 个省区在 2002~2017 年期间各驱动因素的贡献绝对值分别加总，可以得到 15 个省区各驱动因素对二氧化碳排放差异的总体贡献，计算结果如表 3 所示，可以得出，能源强度效应是促进二氧化碳减排的最主要因素，其次是能源结构效应，生产结构效应起到了较小的增碳作用，部门结构效应起到较大的促进二氧化碳排放的作用，毋庸置疑的是最终需求是导致二氧化碳排放量增长的最主要因素。

Table 3. Total absolute contribution of each driving factor in 15 provinces (unit: million tons)

表 3. 15 省区各驱动因素贡献绝对值加总(单位：百万吨)

驱动因素	驱动因素贡献绝对值	排序
能源强度	-2762.31	1
能源结构	-185.22	2
列昂剔夫	117.57	3
部门结构	1154.04	4
最终需求	4050.45	5

5.2. 基于碳脱钩结果的碳排放驱动因素分析

表 4 展示了主动达峰省区和被动达峰省区结构分解的结果，条形图分别表示三个阶段能源结构效应、能源强度效应、部门结构效应、生产部门效应和最终需求效应五种驱动因素对二氧化碳排放变化的百分比贡献。

5.2.1. 主动达峰型省区

主动达峰的省区包括天津、甘肃、北京、山东、湖北、陕西、吉林、河南、重庆和四川十个省区，这十个省区都是在 2012~2017 年保持二氧化碳与经济增长处于强脱钩状态的，也就是在经济保持增长的情况下二氧化碳保持下降的态势。对以上十个省区的二氧化碳排放进行结构分解可以解释以上十个省区达峰后二氧化碳与经济增长保持强脱钩的原因。结构分解结果表明：2012 年之前，以上十个省区的二氧化碳保持增长态势，除能源强度效应对二氧化碳增长起到明显的抑制作用以外，其他大多数效应均表现出推动二氧化碳排放增长的作用。而到 2012 年之后，大部分省区的能源结构、生产结构和部门结构效应均表现出对二氧化碳排放的抑制作用，且抑制作用非常明显，所以上省区才能在经济保持增长的情况下，二氧化碳排放出现了达峰和下降。

Table 4. Percentage contribution of driving factors to carbon emissions in peak carbon dioxide emissions provinces (Mt)
表 4. 达峰省区各驱动因素对碳排放的百分比贡献(百万吨)

省区	ΔC	ΔEM	ΔEI	ΔL	ΔS	ΔF	
北京	14.86	0.20	-87.04	85.66	-48.83	64.87	
天津	25.43	-2.53	-36.62	5.29	11.21	48.07	
山东	288.68	18.18	-59.43	98.19	34.46	197.28	
河南	162.99	6.45	-87.76	55.80	56.55	131.95	
湖北	68.04	-5.31	-14.45	-7.55	17.97	77.38	
重庆	15.20	-2.38	-58.86	-18.44	51.87	43.00	
四川	60.33	-1.23	-48.12	11.52	29.86	68.30	
山西	02-07	40.06	3.17	-75.35	15.33	43.87	53.04
甘肃	27.51	-0.64	-26.71	-4.94	24.30	35.51	
吉林	69.87	2.80	-19.75	-23.10	40.38	69.53	
云南	65.65	2.26	-73.68	10.10	77.36	49.60	
福建	64.91	6.08	-2.30	1197054.62	-1197030.30	36.82	
河北	218.78	0.23	-239.25	126.45	139.07	192.28	
上海	55.05	-2.45	-67.12	55.52	-10.21	79.32	
辽宁	127.18	-3.16	-90.92	46.86	31.31	143.08	
北京	-15.55	-7.70	-76.96	13.38	14.12	41.62	
天津	64.35	1.31	-45.47	12.91	14.87	80.74	
山东	146.95	-4.02	-239.58	90.46	39.45	260.64	
河南	42.26	-14.23	-179.43	58.16	23.27	154.49	
湖北	07-12	152.75	8.94	-132.81	60.81	31.90	183.92
重庆	65.93	3.61	-30.93	-12.07	15.64	89.68	
四川	166.71	11.26	-75.70	40.73	51.15	139.27	
山西	64.73	0.00	-69.99	18.66	24.83	91.24	
甘肃	32.45	-2.16	-33.95	19.28	4.12	45.16	
吉林	42.42	-3.60	-127.75	-24.82	100.36	98.23	

续表

云南		48.68	-6.63	-49.86	0.82	15.47	88.89
福建		48.67	-4.76	-57.49	15.42	17.34	78.15
河北	07-12	181.28	-2.71	-201.68	-9.70	149.73	245.64
上海		13.27	-1.99	-47.17	0.61	9.36	52.46
辽宁		76.77	-1.30	-214.62	30.45	41.22	221.02
北京		-13.45	-7.41	-33.03	-9.15	10.25	25.89
天津		-5.39	-3.57	-28.39	-8.67	-1.72	36.96
山东		-88.02	-60.30	-197.25	-115.84	135.20	150.17
河南		-12.78	-12.77	-72.03	47.19	-72.91	97.74
湖北		-60.18	-22.02	-132.46	-75.67	52.00	117.97
重庆		-18.33	-8.28	-35.33	0.23	-35.21	60.26
四川		-7.40	-7.19	-39.18	-79.36	11.65	106.69
山西	12-17	-2.88	-10.21	-12.18	-21.00	-4.75	45.25
甘肃		-5.72	-4.82	3.29	-14.86	-4.96	15.63
吉林		-23.23	1.22	-43.51	-9.60	9.08	19.58
云南		0.08	-8.23	-4.57	-28.03	-20.70	61.62
福建		5.79	-13.55	-56.13	-21.94	32.95	64.46
河北		98.98	-18.21	221.04	-33.24	-167.21	96.60
上海		25.92	1.92	6.10	-84.53	47.25	55.18
辽宁		69.20	-9.53	232.06	-80.74	-7.89	-64.69

5.2.2. 被动减排型省区

被动减排的省区包括河北、上海、福建、云南、辽宁五个省区。通过对以上省区进行结构分解分析可以发现，各省区未实现碳排放和经济发展强脱钩的原因各不相同。从结构分解分析的结果上看，福建和云南在 2012~2017 年期间大多数驱动因素都是促进了二氧化碳减排，且在被动减排型省区中，云南和福建 2012~2017 年脱钩状态为弱脱钩，整体未来减碳潜力较大，下面将被动减排省区分为两类分析，一类是福建和云南，另一类是被动减排省区中的其它省区，即河北、上海、辽宁。在被动达峰省区中，福建和云南的未来减碳潜力较大，对于被动减排省区，最终需求，能源强度和部门结构是增加二氧化碳排放的主要动因，说明提高能源效率和调整部门结构是以上省区实现主动达峰的重要路径。

6. 结论与政策启示

本研究运用投入产出原理和结构分解分析的方法分析达峰省份的驱动因素，并结合脱钩模型将碳排放达到峰值的 15 个省区分为主动达峰型省区和被动达峰型省区，其中主动达峰型省区在 2012~2017 年期间达到了经济增长和碳排放强脱钩，被动达峰省区未达到强脱钩状态。以下为本文的结论：

(1) 对于碳排放达到峰值的省区，能源结构和能源强度稳定的对大部分省区二氧化碳排放的影响为负向，生产结构和部门结构却在各省区各研究时段对碳排放增加产生了不同的刺激作用和抑制作用，除辽宁外最终需求不同程度的正向促进了各省区二氧化碳的排放。能源强度是促进碳排放省区碳减排的主要因素，其次是能源结构，最终需求是使各省区二氧化碳排放增长的最大动因。

(2) 随着碳排放变化和经济增长, 各省区展现了不同的脱钩状态, 本文将 15 个达峰省区分为 10 个主动达峰省区, 5 个被动达峰省区, 天津、甘肃、北京、山东、湖北、四川、陕西、吉林、河南和重庆为主动达峰型省区; 河北、上海、福建、云南和辽宁为被动减排型省区。

(3) 在 2012~2017 年期间, 主动达峰的大部分省区能源结构和能源强度都起到抑制二氧化碳排放的作用, 主要是由部门结构效应和生产需求效应引起的二氧化碳排放增加, 但均和减碳效应所抵消; 被动达峰的大部分省区中, 能源强度效应、部门结构效应和最终需求效应是增加二氧化碳排放的主要因素, 辽宁的最终需求效应起到了较大抑制二氧化碳排放的作用。

针对省区的特征并结合各省区的实际发展状况, 本文提出以下推进达峰省区进一步实现碳中和的政策建议如下。

综上, 要分类施策, 由于各省区的资源禀赋、工业化水平和社会经济特征均有所不同, 需要考虑各省区的差异性来单独设定排放目标, 主动达峰的省区应在碳减排方面发挥主导和引领的作用, 为实现双碳目标创造先例, 被动减排型省区应正视其增加二氧化碳排放的原因, 结合自身条件制定符合地区发展的碳减排目标和低碳发展政策, 识别双碳目标所带来的机遇, 积极学习其他省区的减排经验, 充分发挥减排潜能。本研究结果增强了对省区层面二氧化碳排放驱动因素动态演变的理解, 有助于通过考虑各省区具体情况因地制宜的制定有针对性的节能减排政策, 从而使各省区科学有效的找到促进低碳发展的政策着力点, 在保证经济发展增长的同时实现碳排放的主动达峰。

参考文献

- [1] Zou, S.H. and Zhang, T. (2020) CO Emissions, Energy Consumption, and Economic Growth Nexus: Evidence from 30 Provinces in China. *Mathematical Problems in Engineering*, **2020**, Article ID: 8842770. <https://doi.org/10.1155/2020/8842770>
- [2] Shan, Y., Huang, Q., Guan, D., et al. (2020) China CO₂ Emission Accounts 2016-2017. *Scientific Data*, **7**, Article No. 54. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0393-y>
- [3] Shan, Y., Guan, D., Zheng, H., et al. (2018) China CO₂ Emission Accounts 1997-2015. *Scientific Data*, **5**, Article ID: 170201. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.201>
- [4] Qin, H.T., Huang, Q.H., Zhang, Z.W., Lu, Y., Li, M.C., Xu, L. and Chen, Z.J. (2019) Carbon Dioxide Emission Driving Factors Analysis and Policy Implications of Chinese Cities: Combining Geographically Weighted Regression with Two-Step Cluster. *Science of the Total Environment*, **684**, 413-424. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.352>
- [5] 刘华军, 田震, 石印. 中国二氧化碳排放的空间差异及其双维内在结构解析: 2000-2019 年[J]. 地理研究, 2023, 42(3): 857-877.
- [6] 刘华军, 石印, 郭立祥, 乔列成. 新时代的中国能源革命: 历程、成就与展望[J]. 管理世界, 2022, 38(7): 6-24. <https://doi.org/10.19744/j.cnki.11-1235/f.2022.0098>
- [7] WRI (World Resources Institute) (2014) Mitigation Goal Standard. <http://www.ghgprotocol.org/mitigation-goal-standard>
- [8] C40 (2018) 27 Cities Have Reached Peak Greenhouse Gas Emissions Whilst Populations Increase and Economies Grow. https://www.c40.org/press_releases/27-cities-have-reached-peak-greenhouse-gas-emissions-while-populations-increase-and-economies-grow
- [9] 王文举, 孔晓旭. 中国 2030 年碳达峰的省级目标、政策工具与路径选择[J]. 社会科学战线, 2022(11): 78-88.
- [10] 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.
- [11] 蒋含颖, 段祎然, 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[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(2): 131-139.
- [12] Shan, Y.L., Guan, Y.R., Hang, Y., Zheng, H.R., Li, Y.X., Guan, D.B., Li, J.S., Zhou, Y., Li, L. and Hubacek, K. (2022) City-Level Emission Peak and Drivers in China. *Science Bulletin*, **67**, 1910-1920. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2022.08.024>
- [13] Xiao, H.J., Duan, Z.Y., Zhou, Y., Zhang, N., Shan, Y.L., Lin, X.Y. and Liu, G.S. (2019) CO₂ Emission Patterns in

- Shrinking and Growing Cities: A Case Study of Northeast China and the Yangtze River Delta. *Applied Energy*, **251**, Article ID: 113384. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113384>
- [14] 郭春丽, 易信. “双碳”目标下的中国经济增长: 影响机制、趋势特征及对策建议[J]. *经济学家*, 2022(7): 24-33. <https://doi.org/10.16158/j.cnki.51-1312/f.2022.07.009>
- [15] Tapio, P. (2005) 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*, **12**, 137-151. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2005.01.001>
- [16] 何建坤, 卢兰兰, 王海林. 经济增长与二氧化碳减排的双赢路径分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(10): 9-17.
- [17] Zhao, X.C., Jiang, M. and Zhang, W. (2022) Decoupling between Economic Development and Carbon Emissions and Its Driving Factors: Evidence from China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **19**, Article No. 2893. <https://doi.org/10.3390/ijerph19052893>
- [18] 张诗卉, 李明煜, 王灿, 安康欣, 周嘉欣, 蔡博峰. 中国省级碳排放趋势及差异化达峰路径[J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(9): 45-54.
- [19] Xu, G.Y., Schwarz, P. and Yang, H.L. (2020) Adjusting Energy Consumption Structure to Achieve China's CO₂ Emissions Peak. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **122**, Article ID: 109737. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109737>
- [20] Wang, X.Z., Huang, H., Hong, J.K., Ni, D.F. and He, R.X. (2020) A Spatiotemporal Investigation of Energy-Driven Factors in China: A Region-Based Structural Decomposition Analysis. *Energy*, **207**, Article ID: 118249. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118249>
- [21] Wang, K., Wu, M. and Sun, Y. (2019) Resource Abundance, Industrial Structure, and Regional Carbon Emissions Efficiency in China. *Resources Policy*, **60**, 203-214. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.01.001>
- [22] Gao, P., Yue, S.J. and Chen, H.T. (2020) Carbon Emission Efficiency of China's Industry Sectors: From the Perspective of Embodied Carbon Emissions. *Journal of Cleaner Production*, **283**, Article ID: 124655. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124655>
- [23] Leontief, W. (1936) Quantitative Input and Output Relations in the Economic Systems of the United States. *The Review of Economics and Statistics*, **18**, 105-125. <https://doi.org/10.2307/1927837>
- [24] 李景华. SDA 模型的加权平均分解法及在中国第三产业经济发展分析中的应用[J]. *系统工程*, 2004, 22(9): 69-73.
- [25] 王中英, 王礼茂. 中国经济增长对碳排放的影响分析[J]. *安全与环境学报*, 2006, 6(5): 88-91.