

# 中国省域碳排放特征与碳减排路径研究

曹俊文 张钰玲<sup>1</sup>

(江西财经大学 统计学院, 江西 南昌 330013)

**【摘要】:** 基于 Tapio 模型考察各省份碳排放脱钩情况, 依据脱钩弹性系数、碳强度构建分类准则对各省份进行类型划分, 进一步采用 STIRPAT 模型识别不同类型省域碳排放的驱动因素, 探寻不同类型省域碳减排路径。实证结果表明, 对于北京、上海、浙江等类型 I 省域, 调整产业结构、优化能源结构是有效的减排途径; 对于湖南、湖北、江西等类型 II 省域, 优化产业结构、提升城镇化质量是减少碳排放的关键; 云南和福建需重点优化产业结构; 对于山西和新疆两省区, 调整产业结构、优化能源结构是关键; 宁夏和内蒙古减排空间较大, 需优化产业结构、发展低碳经济、降低碳强度。

**【关键词】:** 碳达峰 碳排放 脱钩 STIRPAT 模型

**【中图分类号】:** F062.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2022)08-013-07

进入工业文明时代以来, 人类在创造巨大物质财富的同时, 也加速了对自然资源环境的破坏, 人与自然的矛盾日益凸显。海平面上升、荒漠化加剧、极端气候事件频发等, 给人类生存发展带来了严重影响。中国作为全球生态文明建设的参与者、贡献者、引领者, 一贯以来履行着中方责任。2020 年 9 月, 习近平主席在联合国大会上郑重宣布: 中国将提高国家自主贡献力度, 二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和<sup>[1]</sup>。接着, 2021 年习近平主席在出席世界经济论坛“达沃斯议程”和“领导人气候峰会”时多次提到“双碳”目标, 足以体现我国实现低碳发展的目标和决心。“十四五”时期是我国实现碳达峰的关键阶段, 但由于各省份经济发展水平、人口、地理环境等方面的不同, 也将造成碳排放省域之间的差异, 因此各省份如何根据自身情况实现碳减排、达成碳达峰目标至关重要。

自中国提出 2030 年前实现碳达峰目标后, 不同学者采用多种方法对中国如何实现碳减排展开了激烈讨论。王凤婷等<sup>[2]</sup>采用脱钩模型以及对数平均迪氏指数模型(LMDI)研究了京津冀产业碳排放与经济增长的关系, 并探究了碳排放的驱动因素。佟昕等<sup>[3]</sup>利用 STIRPAT 模型和灰色模型 GM(1, 1)对中国碳排放进行了影响因素分析及趋势预测。李强和左静娴<sup>[4]</sup>运用 STIRPAT 模型基于长江经济带 11 个省市 2000—2014 年的面板数据预测了长江经济带碳达峰的可能时间。戴勇等<sup>[5]</sup>利用 ECK 模型探究了 1995—2016 年江苏碳排放量与城市化率的 ECK 曲线。Sun 等<sup>[6]</sup>通过 IPAT 模型及集中 DEA 方法设计了 48 个情景, 并对各情景碳排放配置效率进行了评价。张永强和张捷<sup>[7]</sup>、王蓉和邢俊玲<sup>[8]</sup>采用 Tapio 模型分别研究了广东和陕西经济发展与碳排放的脱钩关系。Tapio 模型常用于分析碳排放与经济增长的脱钩关系, 而 STIRPAT 模型可用于碳排放驱动因素及碳减排路径的探索。

已有研究基于不同方法、角度探析了碳减排的措施及路径。在国家层面, 屈超和陈甜<sup>[9]</sup>利用萤火虫优化算法拟合 IPAT 模型并估算了中国 2030 年二氧化碳的排放强度; 刘降斌和刘秋明<sup>[10]</sup>基于 STIRPAT 理论模型, 以我国 2003—2017 年 30 个省域的的面板数据构建空间计量模型来研究分析经济增长、城镇化对我国二氧化碳排放强度的影响。在我国省级、区域层面, 邵桂兰等<sup>[11]</sup>通过 ZSG-DEA 效率模型构建我国碳排放配额的省际分解方案并结合碳汇来分析各省、直辖市和自治区今后的碳排放空间; 任建兰等<sup>[12]</sup>利用 Tapio 脱钩模型及 LMDI 分解模型分析了影响黄河三角洲高效生态经济区工业碳排放的主要因素, 同时运用 LEAP 模型

**作者简介:** 曹俊文, 博士, 教授, 研究方向为资源环境统计。E-mail:cjw6207@163.com

**基金项目:** 国家社会科学基金项目“增加值视角下贸易隐含碳核算及绿色贸易利益评估研究”(19BTJ009)

对碳排放进行了预测。具体到省份，马艳梅和吴玉鸣<sup>[13]</sup>运用 ESDA 和空间计量模型研究了山东 17 个地级市工业碳排放的空间相关性及溢出效应；吴青龙等<sup>[14]</sup>使用开放 STIRPAT 模型从山西和全国两个层面运用情景分析方法预测了山西 2016—2040 年的碳排放峰值。基于不同行业，刘学之等<sup>[15]</sup>构建了动态 CGE 模型预测中国石化行业 2020 年经济规模、能源消费、碳排放量等变量的变化趋势。细分到城市，禹湘等<sup>[16]</sup>研究了我国低碳试点城市的碳减排路径。

总体来看，已有研究基于中国分区域、分省份、分行业的碳排放情况展开了一系列研究，碳强度、经济增长、人口、产业结构等被认为是碳排放的主要驱动因素，然而中国整体各省份目前碳排放的特征差异及碳减排路径有待深入解析。一方面，中国不同省域经济发展与碳排放特征有所不同，精准辨析不同省域碳排放区域特征、脱钩情况，有助于中国分省域碳减排策略分析；另一方面，在 2030 年碳达峰目标背景下，解析目前中国省域经济发展与碳排放相对关系及碳强度情况、探寻不同省域碳排放影响因素有助于省域碳减排目标的制定，为制定可行的区域低碳发展政策提供借鉴参考。在此背景下，本文首先采用 Tapio 模型分析了我国 30 个省份（因数据缺失，不含西藏及港澳台地区，下同）在“十三五”规划期间碳排放与经济发展之间的脱钩情况，并根据弹性系数、碳排放强度的差异对各省份碳排放类型进行划分。进一步采用 STIRPAT 模型基于 2000—2018 年各省份面板数据分析不同类型省域碳排放的驱动因素，提出不同类型省份的降碳发展模式及路径，进而为实现碳达峰与碳中和目标的政策制定提供参考。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 碳排放的测算

目前，我国各省份没有给出直接的碳排放量，本文参考联合国气候变化专门委员会 (IPCC) 提供的碳排放方法进行估算<sup>[17]</sup>，计算公式为：

$$CO_2 = \sum_{i=1}^N E_i \cdot W_i \quad (1)$$

式中： $E_i$  表示第  $i$  种能源的消费量， $W_i$  表示第  $i$  种能源的碳排放系数。依据《中国能源统计年鉴》中能源消费量的数据，本文选取煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气这八种能源的最终消费量来核算碳排放量，由于我国目前大多为火力发电，且电力消耗不直接产生碳排放，因此电力消耗不包括在其中。各种能源二氧化碳排放因子如表 1 所示。

表 1 各种能源碳排放系数 单位：吨碳/吨标准煤

能源名称	煤炭	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气
碳排放系数	0.7559	0.8550	0.5857	0.5538	0.5714	0.5921	0.6185	0.4483

数据来源：《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》（第 II 卷）。

### 1.2 Tapio 区域碳排放脱钩模型

Tapio<sup>[18]</sup>教授于 2005 年在研究交通领域碳排放时提出了“脱钩弹性” (decoupling elasticity) 的概念，并构建了脱钩弹性系数。本文基于改进的 Tapio 模型对中国各省域碳排放特征进行分析。

Tapio 弹性系数模型计算公式如下：

$$T = \frac{\frac{CO_2^t - CO_2^{t-1}}{CO_2^{t-1}}}{\frac{GDP^t - GDP^{t-1}}{GDP^{t-1}}} = \frac{\frac{\Delta CO_2}{CO_2}}{\frac{\Delta GDP}{GDP}} \quad (2)$$

式中：t 表示当期，t-1 表示上一期。

本文考虑到各省份人口、经济发展程度的不同，对上述弹性系数公式进行改进，改进后的公式如下：

$$T_p = \frac{\frac{PCO_2^t - PCO_2^{t-1}}{PCO_2^{t-1}}}{\frac{PGDP^t - PGDP^{t-1}}{PGDP^{t-1}}} = \frac{\frac{\Delta PCO_2}{PCO_2}}{\frac{\Delta PGDP}{PGDP}} \quad (3)$$

式中： $PCO_2^t$ 和 $PCO_2^{t-1}$ 表示当期和上一期的人均碳排放量， $PGDP^t$ 和 $PGDP^{t-1}$ 为当期和上一期的人均 GDP。根据禹湘等<sup>[16]</sup>、韩梦瑶等<sup>[19]</sup>的研究，传统的 Tapio 模型根据脱钩弹性系数 T 值的大小和 $\Delta CO_2$ 、 $\Delta GDP$ 的正负情况，界定了衰退连接、增长连接、衰退脱钩、强脱钩、弱脱钩、弱负脱钩、强负脱钩、增长负脱钩八种脱钩状态，考虑到我国目前 GDP 的稳定正增长性，根据  $T_p$  值的大小和 $\Delta PGDP$ 、 $\Delta PCO_2$ 的正负情况，将弹性系数分为四类，具体如表 2 所示。

表 2 Tapio 脱钩类型

类型	$\Delta PCO_2$	$\Delta PGDP$	$T_p$
强脱钩	<0	>0	$(-\infty, 0)$
弱脱钩	>0	>0	$(0, 0.8)$
增长连接	>0	>0	$(0.8, 1.2)$
增长负脱钩	>0	>0	$(1.2, +\infty)$

本文基于 Tapio 脱钩模型对我国 30 个省份的经济发展与碳排放脱钩关系进行研究，考察不同类型省域的碳排放特征。考虑到数据可获得性，弹性系数的测算考察期为“十二五”及“十三五”规划期间，即 2011—2015 年和 2016—2018 年。

### 1.3 STIRPAT 碳排放驱动模型

York 等<sup>[20]</sup>在 IPAT 和 ImPACT 的基础上进一步提出了 STIRPAT 模型，克服了 IPAT 模型运用中不允许影响因素存在非单调、不同比例变化的局限性。本文使用 York 等<sup>[20]</sup>的处理方法，将所有变量对数化处理，并加入二次项，将模型扩展为：

$$\ln I_{it} = a + b \ln P_{it} + c \ln A_{it} + d (\ln A_{it})^2 + f \ln T_{it} + e_{it} \quad (4)$$

式(4)表述了人口 P、富裕程度 A、技术水平 T 与环境压力 I 之间的非线性关系。选取碳强度与二氧化碳排放量代表环境压力，目的在于分析经济增长与二氧化碳排放量及碳强度之间可能存在的非线性关系，探寻不同影响因素对碳排放及碳强度的影响程度。本文选取了碳达峰、碳中和工作关注的几个方面，即能源结构、产业结构、科技投入和人口城镇化率。王佳和杨俊<sup>[21]</sup>、曹玲娟<sup>[22]</sup>、潘栋<sup>[23]</sup>的研究也认为这几个因素对碳排放量有显著影响。由于不同类型省域碳排放特征的差异性，基于 Tapio 弹性系数模型的分析，引入表示不同省域类型的虚拟变量 type，构建模型 (5) 和 (6)，分别考察不同类型省域碳排放总量及碳排放强度的影响因素。

$$\ln TC_{it} = a + b \ln PGDP_{it} + c (\ln PGDP_{it})^2 + f \ln UR_{it} + g \ln RD_{it} + h \ln IS_{it} + j \ln ERS_{it} + type + e_{it} \quad (5)$$

$$\ln ES_{it} = a + b \ln PGDP_{it} + c (\ln PGDP_{it})^2 + f \ln UR_{it} + g \ln RD_{it} + h \ln IS_{it} + j \ln ERS_{it} + type + e_{it} \quad (6)$$

式中：PGDP 表示以 2000 年不变价计算的人均 GDP；ES 为碳排放量与 GDP 的比值，表示碳排放强度；RD 为科技投入；UR 为城市化率；IS 为工业增加值占总增加值比重，代表产业结构；ERS 为煤炭占一次能源的比重，代表能源结构；下角标 i 代表省份，t 代表年份。

本文使用我国 30 个省份 2000—2018 年的面板数据结合 Tapio 模型分类对各类型省域碳排放进行分析，数据主要来源于《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》及各省份统计年鉴。

## 2 区域碳减排特征及路径分析

### 2.1 基于脱钩指数的区域类型划分

依据各省份 GDP 及能源消费相关数据可计算出 30 个省份的脱钩弹性系数，依据表 1 确定其脱钩状态。总体来看，“十二五”规划(2011—2015 年)、“十三五”规划(2016—2018 年)期间，我国大部分省份碳排放与经济增长关系处于强脱钩与弱脱钩这两种状态，只有内蒙古、宁夏、新疆这 3 个省份处于增长连接或增长负脱钩状态。同时，处于强脱钩与弱脱钩状态的省份中，碳强度参差不齐，2016—2018 年各省份脱钩状态及碳强度如表 3 所示。2016—2018 年处于强脱钩与弱脱钩状态的省份占比高达 96.66%，只有宁夏处于增长负脱钩状态，但处于强脱钩、弱脱钩省份的碳强度极差分别为 0.99 和 2.44，标准差分别为 0.34 和 0.68。表明处于强脱钩与弱脱钩状态的省份碳强度差异较大，虽然目前大部分省份人均碳排放增长率小于人均 GDP 增长率甚至负增长，但是碳强度有高有低，由于各省份经济发展水平、碳排放基数的不同，所以需分类讨论。

表 3 2016—2018 年各省份脱钩与碳强度

区域类型	省份占比	碳强度/(吨/万元)				
		均值	标准差	最小值	最大值	极差
强脱钩省份	33.33%	0.48	0.34	0.06	1.05	0.99
弱脱钩省份	63.33%	0.77	0.68	0.21	2.65	2.44
增长负脱钩省份	3.33%	6.04	—	6.04	6.04	—
30 个省份	100.00%	0.74	0.71	0.06	2.86	2.80

原 Tapio 模型中, 以  $T=0.8$  为分界点, 本文更关注各省份碳排放与经济增长相对程度, 故以  $T_p=1$  作为分界点。当  $T_p < 1$  时, 人均碳排放实现负增长; 当  $0 < T_p < 1$  时, 人均碳排放正增长且增长速度小于人均 GDP 增长速度; 当  $T_p > 1$  时, 人均碳排放正增长且增速大于人均 GDP 增速。考虑到目前各省份的脱钩情况, 我们结合碳强度(碳排放量/GDP)对各省份进行分类。由表 3 可知, 2016—2018 年我国各省份碳强度均值为 0.74 吨/万元。为了便于分界, 本文以  $ES=1$  作为分界点。当  $ES < 1$  时, 定义为碳强度相对较低; 当  $ES > 1$  时, 定义为碳强度相对较高。结合 Tapio 弹性系数及碳强度, 从增长速度与绝对量两个方面对各省份进行分类。在实际分析时, 为避免过度解读, 将处在临界点处的情况弹性考虑。具体分类准则见表 4。

表 4 分类准则

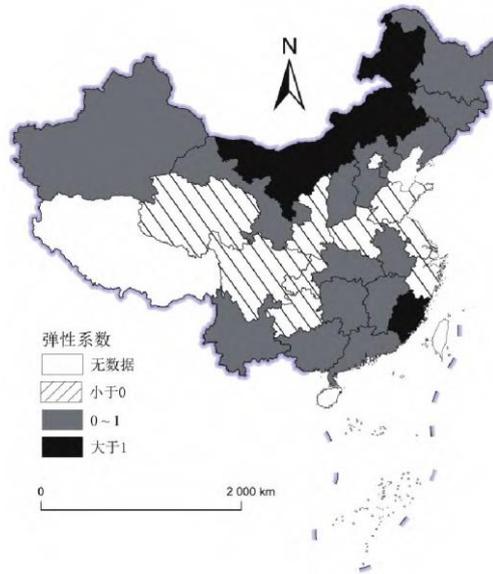
指标	弹性系数 $T_p \in (-, 0)$	弹性系数 $T_p \in (0, 1)$	弹性系数 $T_p \in (1, +)$
碳强度 $ES \in (1, +)$	类型 IV (高碳负增长)	类型 V (高碳低增长)	类型 VI (高碳高增长)
碳强度 $ES \in (0, 1)$	类型 I (低碳负增长)	类型 II (低碳低增长)	类型 III (低碳高增长)

结合调整过的 Tapio 划分临界, 综合考虑“十三五”规划期间 2016—2018 年各省份弹性系数及碳强度, 将其划分为类型 I 省域( $T_p < 0$  且  $ES < 1$ )、类型 II 省域( $0 < T_p < 1$  且  $ES < 1$ )、类型 III 省域( $T_p > 1$  且  $ES < 1$ )、类型 IV 省域( $T_p < 0$  且  $ES > 1$ )、类型 V 省域( $0 < T_p < 1$  且  $ES > 1$ )、类型 VI 省域( $T_p > 1$  且  $ES > 1$ ) 六种。其中, 处于类型 I 的省份人均碳排放实现负增长且碳强度较低; 类型 II 省域人均碳排放增速小于人均 GDP 增速且碳强度较低; 类型 III 省域人均碳排放增速大于人均 GDP 增速但碳强度较低, 该区域省份处于以牺牲环境换取经济增长的阶段; 类型 IV 省域人均碳排放量逐年递减且碳强度较高; 类型 V 省域人均碳排放量正增长但增速小于人均 GDP 增速同时伴随着较高的碳强度; 类型 VI 省域人均碳排放增速大于人均 GDP 增速且碳强度较高。

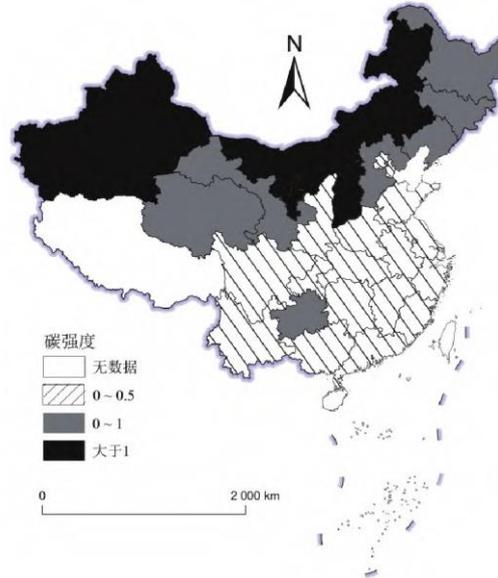
## 2.2 基于脱钩指数的碳排放区域特征分析

我国省域 2017—2018 年弹性系数及碳强度分布如图 1 所示。依图 1a 所示, 2017—2018 年只有内蒙古、福建和宁夏人均弹性系数大于 1, 这 3 个省份人均碳排放量增长速度大于人均 GDP 增长速度, 其余省份人均碳排放增速小于人均 GDP 增速, 青海、四川、贵州、重庆等西部省份以及山东、江苏、浙江等东部沿海地区碳排放实现了负增长。总体上, 我国目前大部分省份人均碳排放增速小于人均 GDP 增速, 或进一步碳排放实现负增长。图 1b 为 2018 年碳强度分布, 内蒙古、新疆、宁夏、山西 4 个省份碳强度大于 1, 碳强度较高, 减排空间较大。比较碳强度小于 1 的省域, 地理位置处于我国南部地区的广东、福建、浙江等省份, 其碳强度分布于 0~0.5, 相对于青海、甘肃、陕西等西北、东北地区碳强度更低。总体上, 我国大部分省份碳强度小于 1, 空间上呈现从北到南依次递减的状态。

依据表 4 划分准则, 将处于临界点的值弹性考虑, 我国省域碳排放类型划分如图 2 所示。目前, 大多数省份落入区域 I 和区域 II, 为低碳强度、低碳排放增长或碳排放负增长状态, 没有省份处于高碳强度且碳排放量逐年下降的状态。中西部省份宁夏、内蒙古落入了区域 VI 中, 这两个省份目前碳强度较高且二氧化碳增长速度高于 GDP 增速, 情况较不理想; 中西部省份山西、新疆落入了区域 V 中, 这两个省份目前处于碳强度较高但碳排放增速小于 GDP 增速的状态, 还有较大的减排空间; 上海、北京、浙江等 11 个省份落入了区域 I 中, 此类省份处于碳强度小于 1 吨/万元且碳排放量实现负增长的最理想情景; 广东、湖南、天津等 13 个省份处于区域 II 中, 此类省份目前碳排放量增速小于 GDP 增速且碳强度相对较低, 下一阶段的主要目标是实现碳排放的负增长; 云南和福建落入了区域 III 中, 此类省份人均碳排放增速大于人均 GDP 增速同时伴随着较低的碳强度, 碳强度有增加的风险。



a. 2017—2018 年各省份弹性系数空间分布



b. 2018 年各省份碳强度空间分布

图 1 中国省域 2017—2018 年弹性系数及碳强度分布

注：本图基于国家基础地理信息中心的标准地图服务平台下载的审图号为 GS(2020)4619 的标准地图制作，底图无修改。

### 2.3 基于 STIRPAT 模型的碳减排路径分析

基于上文 Tapio 模型省域碳排放类型的划分，我们进一步基于 STIRPAT 模型对不同类型省域 2000—2018 年的面板数据进行分析。在做面板模型分析之前，我们须对相关自变量进行单位根检验和协整检验，从而避免“伪回归”现象的发生。首先，本研究选择用 Levin, Lin and Chu (LLC)、Im, Pesaran and Shin (IPS) 这两种检验方法对变量的单位根进行检验。如表 5 所示，在 LLC 检验中， $\ln PGDP$ 、 $\ln EC$ 、 $\ln UR$  为平稳序列，其他变量均为非平稳序列；IPS 检验显示所有变量均存在单位根，但经过一阶差分后都呈现平稳性，说明原序列为一阶单整序列。

表 5 单位根检验结果

变量	LLC 检验		IPS 检验	
	原值	一阶差分	原值	一阶差分
lnTC	-1.062	-12.401***	-0.030	-10.937***
lnES	-1.654**	-8.722***	-0.023	-10.892***
lnPGDP	-1.460*	-2.187***	2.926	-3.381***
lnIS	-1.181	-5.507***	1.700	-8.326***
lnRD	1.681	-3.721***	1.195	-10.747***
lnUR	-3.255***	-69.098***	-0.856	-8.584***
lnERS	8.682	-5.930***	1.135	-10.683***

注：上角标\*代表  $P < 0.1$ ，\*\*代表  $P < 0.05$ ，\*\*\*代表  $P < 0.01$ 。表 6 同。

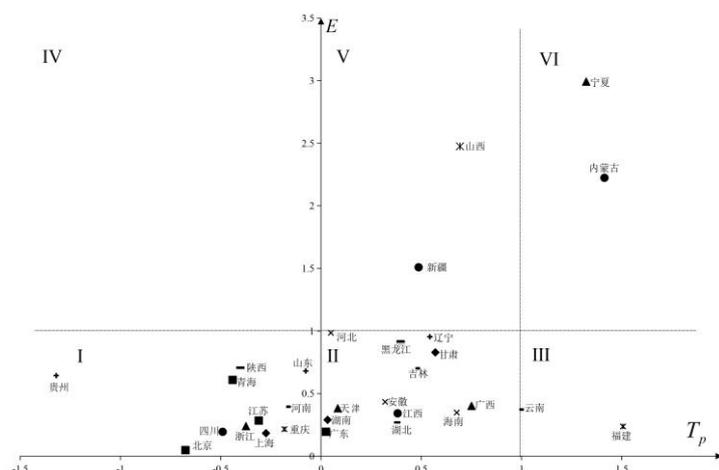


图 2 2017—2018 年各省份降碳类型划分象限图

接下来，通过 Pedroni 检验进行面板协整分析。结果显示，在 5% 的显著性水平下拒绝原假设，即认为各变量间存在协整关系，因变量与自变量之间存在长期稳定的关系。最后，对各类型省域样本分别进行 Hausman 检验，结果均显示  $P = 0.000$ ，拒绝原假设随机效应模型。因此，最终各类别省域面板模型都选择固定效应模型。

由于分类后各省域面板数据为长面板，我们需要对各类型省域数据进行组间异方差、组内自相关以及组间同期相关检验，以判定各省域类型回归估计方法，检验结果如表 6 所示。省域 I 和省域 II 面板数据存在组间异方差和组内自相关，省域 III、省域 V、省域 VI 面板数据不存在异方差、自相关及同期相关。对省域 I 和省域 II 应用广义最小二乘 (FGLS)，对省域 III、省域 V 和省域 VI 继续使用 OLS 估计 (LSDV)，并使用固定效应模型，不同省域面板回归结果如表 7 所示。

二氧化碳排放量与碳强度都是常用的碳排放衡量指标，以二氧化碳作为因变量和以碳强度作为因变量的回归结果相差不大，这进一步验证了模型的结果。类型II、类型VI省域中存在倒“U”型库兹涅茨曲线，类型III中倒“U”型曲线不显著。对于二氧化碳总量和碳强度，根据回归方程系数可知，人均GDP对各类省域碳排放均有较大的驱动作用，而能源结构、城市化率、产业结构、科技投入四个因素对碳排放量的驱动减排效应在各类型省域中各不相同。科技投入这一要素仅在类型II省域中与二氧化碳排放总量在10%的显著性水平下正相关，本文的研究表明科技投入的增加对碳排放无显著的抑制作用，这与高新伟和朱源<sup>[24]</sup>的研究一致，反而促进了类型I省域二氧化碳排放量的增加<sup>[25]</sup>。

表6 协整检验及模型选择

检验方法	指标名称	省域 I	省域 II	省域 III	省域 V	省域 VI
Pedroni 检验	MPP-t	4.290***	5.080***	1.859**	1.159	2.489***
	PP-t	-2.793***	-3.737***	-1.845**	-4.621***	0.214**
	ADF-t	-2.492***	-2.906***	-1.057	-4.729***	0.400
组间异方差	Waldtest	121.85***	801.53***	0.000	0.000	0.000
组内自相关	F 值	51.124***	28.49***	42.951	42.042	14.635
组间同期相关	Pesaran' stest	-2.168	-2.835	-4.359	-4.359	-4.359

对于能源结构、产业结构及城市化率，在类型I省域中，城市化率、能源结构、产业结构与碳排放总量及碳强度呈显著正相关，其中产业结构对碳排放总量弹性系数为1.206，说明产业结构对类型I省域碳排放量驱动效应较大；而在类型II省域中，科技投入、城市化率对碳排放总量有驱动效应，能源结构与碳排放量呈显著负相关；对于类型III省域而言，产业结构与碳排放量呈显著正相关，且弹性系数为4.318，说明云南与福建应着重优化产业结构，发展低碳产业；在类型V省域中，能源结构、产业结构对碳排放量有显著增加弹性，能源结构对碳排放量的增加弹性为2.751，而产业结构对碳排放量的增加弹性为1.69，相较而言，能源结构对碳排放量与碳强度的增加弹性更大，说明山西与新疆应严控化石能源消费，增加清洁能源使用，同时调整产业结构；在类型VI省域中，产业结构对碳排放总量有增加弹性，表明宁夏和内蒙古应优化调整产业结构，坚决遏制高耗能、高排放项目盲目发展，降低碳强度。

对比类型I、V省域能源结构对碳排放总量的弹性系数值的大小可得，能源结构的优化对减少类型V省域二氧化碳排放总量及碳强度的效果更为明显；对比类型I、III、V省域产业结构对碳排放量的弹性，类型III省域产业结构优化对碳排放量的减排效果更为明显。

表7 不同省域面板回归结果

变量	类型 I		类型 II		类型 III		类型 V		类型 VI	
	lnTC	lnES	lnTC	lnES	lnTC	lnES	lnTC	lnES	lnTC	lnES
lnPGDP	-	-	1.337** (0.613)	1.733*** (0.601)	1.849 (3.158)	0.902 (3.074)	-	-	19.09*** (4.054)	17.25*** (3.950)
P	1.106** (0.542)	1.499*** (0.532)					5.841 (4.281)	5.525 (4.130)		

(lnPGDP) <sup>2</sup>	0.060*(0.031)	0.045(0.031)	-0.062*(0.033)	-0.125*** (0.033)	-0.081(0.139)	-0.088(0.136)	0.379*(0.211)	0.301(0.203)	-0.920*** (0.199)	-0.878*** (0.194)
lnRD	0.0171(0.038)	0.00572(0.041)	0.0487*(0.029)	0.0258(0.032)	-0.188(0.323)	-0.167(0.314)	-0.034(0.119)	-0.050(0.115)	-0.200(0.159)	-0.204(0.155)
lnUR	0.571**(0.261)	0.731*** (0.261)	0.195(0.161)	0.066(0.165)	2.110(1.514)	2.015(1.474)	-1.048(0.867)	-0.939(0.836)	-0.417(0.327)	-0.594*(0.319)
lnERS	0.336*** (0.0912)	0.299*** (0.101)	-0.636*** (0.136)	-0.654*** (0.130)	-0.367(0.877)	-0.372(0.854)	2.751*** (0.871)	2.625*** (0.840)	-0.613(0.567)	-0.644(0.553)
lnIS	1.206*** (0.207)	1.223*** (0.206)	0.0495(0.147)	-0.0351(0.134)	4.318*** (0.521)	4.256*** (0.507)	1.690*** (0.287)	1.529*** (0.277)	0.353(0.699)	0.468(0.682)
— cons	14.47*** (2.577)	11.88*** (2.476)	1.683(3.051)	-5.370*(2.974)	3.151(19.00)	4.121(18.50)	32.32(21.68)	27.86(20.92)	-87.83*** (20.63)	-82.22*** (20.10)
个体效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
时间效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
N	209	209	247	247	38	38	38	38	38	38
R <sup>2</sup>	0.999	0.948	0.999	0.929	0.929	0.948	0.987	0.975	0.981	0.820

注：上角标\*代表 P<0.1，\*\*代表 P<0.05，\*\*\*代表 P<0.01；括号中为标准误；数据由作者计算整理得出。

### 3 结论及建议

结合 Tapio 模型和碳强度对我国 30 个省份碳排放特征进行类型划分，利用 STIRPAT 模型对 2000—2018 年不同省域面板数据展开分析，探寻不同省域的碳减排路径。可以看出，属于类型 I 省域是北京、上海、浙江、重庆、江苏等 11 个省份碳排放实现负增长且碳强度相对较低，目前处于碳排放量逐年递减且低碳强度的理想状态，需优化能源结构，严控煤炭消费，降低煤炭占一次能源的比重；类型 II 省域的广东、湖南、湖北、江西等 13 个省份碳排放目前仍处于逐年增长的状态，但其碳排放增速小于 GDP 增速且碳强度相对较低，仍具有一定的减排空间，此类省份应注意城市化过程中的碳排放增加问题，发展低碳城市，同时要注意调整产业结构；云南、福建两省目前碳强度较低但碳排放量增速大于 GDP 增速，碳强度有递增的风险，要着重优化产业结构；山西和新疆目前碳排放量增速小于 GDP 增速且碳强度较高，有较大的减排空间，应重点优化能源结构、产业结构；宁夏和内蒙古碳排放增速大于 GDP 增速且碳强度较高，应优化能源结构，控制煤炭等化石能源的使用。基于本文的分析结论，结合我国各

---

省域碳排放现状针对性地提出几点建议：

(1) 考虑到 2030 年前碳达峰目标，应制定自上而下的分省份、分区域、分批次的碳达峰时间表。北京、上海、浙江等目前碳排放实现负增长且碳强度较低的地区可以安排先行达峰；山西、新疆、宁夏、内蒙古等地区碳强度较高，减排空间较大，可适当放缓碳达峰的时间点。制定整体的碳达峰规划才能倒逼各省份、各行业碳减排的实现和落实，使低碳发展有条不紊地进行。

(2) 鉴于各省域碳排放特征的差异性，应根据自身目前碳排放特征因地制宜、对症下药，分省域制定同类减排政策。对于类型 I 省域，其减排潜力相对较小，应严控煤炭消费，同时积极发展低碳经济，做好示范作用；对于类型 II 和类型 III 省域，其减排潜力较大，需发展低碳城市，调整产业结构，积极借鉴类型 I 省域降碳减排措施，实现碳达峰；对于类型 V 和类型 VI 省域，目前碳强度较高且碳排放增长速度较快，需要有针对性地重点突破，优化能源结构，严控高污染、高排放产业。

(3) “十四五”时期是我国实现碳达峰的关键阶段，目前各省份均发布了各自的《国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标规划》，但有关碳减排、碳达峰的目标规划措施有待进一步细化。北京、上海、浙江等经济发达地区可以充分利用其资源技术优先发展碳捕获、储存再利用技术，发展碳循环经济，为实现 2060 年前碳中和打下基础。而对于山西、新疆、宁夏、内蒙古，应尽快制定落实碳减排措施，调整产业结构，优化能源结构，借鉴低碳地区的减排经验，同时发挥自身优势。新疆可因地制宜发展旅游服务业等第三产业，倡导生态旅游。山西作为中国重要的能源生产基地，应积极发展低碳技术，提高能源的生产、使用效率，发展低碳经济，降低碳强度。

在 2030 年前实现碳达峰的背景下，各个省份应根据自身情况积极作为，探索适合本地的降碳路径。本文的分析表明，鉴于不同类型的省份呈现出不同的减排特征，同时碳排放情况存在较大的区域差异，需明确和细化 2030 年前实现碳达峰为目标的不同类型省域碳减排路径，精准施政，采用差异化、多元化的降碳措施，实证研究对我国各省份如何根据实际情况对症下药，助力我国 2030 年前实现碳达峰具有重要借鉴意义。

#### 参考文献：

[1] 新华社. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话 [EB/OL]. (2020-09-22). [http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content\\_5546168.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm).

[2] 王凤婷, 方恺, 于畅. 京津冀产业能源碳排放与经济增长脱钩弹性及驱动因素——基于 Tapio 脱钩和 LMDI 模型的实证[J]. 工业技术经济, 2019(8): 32-40.

[3] 佟昕, 陈凯, 李刚. 中国碳排放影响因素分析和趋势预测——基于 STIRPAT 和 GM(1, 1) 模型的实证研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015(2): 297-300.

[4] 李强, 左静娴. 基于 STIRPAT 模型的长江经济带碳排放峰值预测研究[J]. 东北农业大学学报(社会科学版), 2017(5): 53-58.

[5] 戴勇, 陈翔, 王敏. 碳排放库兹涅茨效应研究：以江苏省为例[J]. 统计与决策, 2020(6): 75-78.

[6] Sun Z R, Liu Y D, Yu Y N. China's carbon emission peak pre-2030: Exploring multi-scenario optimal low-carbon behaviors for China's regions[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 231:963-979.

[7] 张永强, 张捷. 广东省经济增长与碳排放之间的脱钩关系——基于 Laspeyres 分解法的实证研究[J]. 生态经济, 2017(6):

---

46-52.

- [8]王蓉,邢俊玲. 陕西经济增长与二氧化碳排放量脱钩关系研究——基于 Tapio 脱钩模型[J]. 西安财经学院学报,2013(6): 48-52.
- [9]屈超, 陈甜. 中国 2030 年碳排放强度减排潜力测算[J]. 中国人口·资源与环境, 2016(7): 62-69.
- [10]刘降斌, 刘秋明. 空间视角下经济增长、城镇化与二氧化碳排放强度关系研究[J]. 商业经济研究, 2021(12): 184-188.
- [11]邵桂兰, 王金, 李晨. 基于 2030 年碳减排目标的中国省际碳排放配额研究[J]. 山东财经大学学报, 2021(4): 13-23.
- [12]任建兰, 徐成龙, 陈延斌, 等. 黄河三角洲高效生态经济区产业结构调整与碳减排对策研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015(4): 35-42.
- [13]马艳梅, 吴玉鸣. 山东省工业碳减排政策研究——基于空间效应视角[J]. 生态经济, 2019(7): 39-43.
- [14]吴青龙, 王建明, 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[J]. 资源科学, 2018(5): 1051-1062.
- [15]刘学之, 黄敬, 郑燕燕, 等. 碳交易背景下中国石化行业 2020 年碳减排目标情景分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2017(10): 103-114.
- [16]禹湘, 陈楠, 李曼琪. 中国低碳试点城市的碳排放特征与碳减排路径研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2020(7): 1-9.
- [17]IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[EB/OL]. (2006-10-24).<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>.
- [18]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[J]. Transport Policy, 2005, 12(2): 137-151.
- [19]韩梦瑶, 刘卫东, 谢漪甜, 等. 中国省域碳排放的区域差异及脱钩趋势演变[J]. 资源科学, 2021(4): 710-721.
- [20]York R, Rosa E A, Dietz T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts[J]. Ecological Economics, 2003, 46(3): 351-365.
- [21]王佳, 杨俊. 地区二氧化碳排放与经济发展——基于脱钩理论和 CKC 的实证分析[J]. 山西财经大学学报, 2013(1): 8-18.
- [22]曹玲娟. 我国碳排放省域差异及影响因素研究[D]. 南昌: 江西财经大学, 2017.
- [23]潘栋. 中国省域能源碳排放影响因素分析及预测研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [24]高新伟, 朱源. 科研投入抑制碳排放了吗?——基于 LMDI 模型和 STIRPAT 模型的碳排放影响因素分析[J]. 资源与产业,

---

2020(6): 37-45.

[25]王钊, 王良虎. R&D 投入、产业结构升级与碳排放关系研究[J]. 工业技术经济, 2019(5): 62-70.