

DOI: 10.20103/j.stxb.202311182513

义欣,张正勇,刘琳,雷勇杰,梁慧,刘星,义家安.聚类分析视角下的中国省域碳排放时空格局及驱动因素分析.生态学报, 2024, 44(11): 4558-4573.

Yi X, Zhang Z Y, Liu L, Lei Y J, Liang H, Liu X, Yi J A. Spatiotemporal pattern and driving factors of carbon emissions in Chinese provinces from the perspective of cluster analysis. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(11): 4558-4573.

聚类分析视角下的中国省域碳排放时空格局及驱动因素分析

义欣¹, 张正勇^{1,*}, 刘琳¹, 雷勇杰², 梁慧¹, 刘星³, 义家安⁴

1 石河子大学理学院, 石河子 832003

2 石河子大学化学化工学院, 石河子 832003

3 石河子大学经济与管理学院, 石河子 832003

4 昆明理工大学管理与经济学院, 昆明 650031

摘要:中国碳排放的时空格局对全球气候治理极为重要,其驱动机制是“减排”的关键所在。对中国省域碳排放时空特征和驱动模式进行聚类研究,揭示不同省域的模式相似性与差异性,对于各省域的“双碳”目标达成和路径安排具有重要影响和现实支撑。研究采用 1997—2019 年碳排放量及社会经济数据,从聚类分析角度探讨了中国省域碳排放的趋势及驱动模式,基于偏最小二乘法(PLS)模型的归因结果,识别不同省域碳排放的驱动因素的贡献度和敏感性,进一步探寻省域减排方案。研究表明:①研究期内中国碳排放以 499.25mt/a 的速率上升,呈低位平缓波动—大幅上升—高位缓慢波动的趋势变化,省域碳排放呈北高南低、东高西低格局。②省域碳排放模式具有差异性,北京、天津等为低起点低速发展类,趋势呈扁平“S”型;吉林、新疆等为低起点高速发展类,呈上升“S”型;河南、广东等为中起点高速发展类,呈扩张“S”型。山东、山西为高起点超高速发展类,呈指数“S”型。③中国省域碳排放驱动因子的贡献度和敏感性存在空间差异。经济发展、产业结构、城市化水平与能源消耗等对碳排放的贡献度较高,其中地区 GDP、人均 GDP、第二产业占比 GDP、年底非农人口比例、地区能源消耗总量等是碳排放的主要贡献因子。碳排放对产业结构、科技发展、环境规制的敏感性较强。④中国省域碳排放驱动模式的分异性较为明显,同类驱动模式省域多在地理空间范围内形成“集聚”现象。因此,不同省域政府减排策略的落实应考虑其碳排放的发展规模及驱动机制的差异,实现地区发展和减排“两手抓”的同时利用地区优势,资源互通、交流合作,加强省域间碳排放的“共治”,进一步促进高质量发展。

关键词:碳排放;聚类分析;时空格局;驱动机制;偏最小二乘法(PLS)模型;敏感性分析

Spatiotemporal pattern and driving factors of carbon emissions in Chinese provinces from the perspective of cluster analysis

Yi Xin¹, ZHANG Zhengyong^{1,*}, LIU Lin¹, LEI Yongjie², LIANG Hui¹, LIU Xing³, YI Jiaan⁴

1 College of Science, Shihezi University, Shihezi 832003, China

2 School of Chemistry and Chemical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China

3 School of Economics and Management, Shihezi University, Shihezi 832003, China

4 Faculty of Management and Economics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650031, China

Abstract: The spatiotemporal pattern of China's carbon emissions is extremely important for global climate governance, and

基金项目:国家自然科学基金项目(41781108);新疆生产建设兵团社会科学基金项目(21YB05)

收稿日期:2023-11-18; **采用日期:**2024-05-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyz0815@163.com

#限于数据的可获取性,本研究尚未含中国港、澳、台、西藏地区统计数据。

its driving mechanism is the key to emission reduction. The clustering analysis of the temporal and spatial characteristics and driving patterns of China's provincial carbon emissions has important influence and practical support for promoting the realization and path arrangement of "dual carbon" in provinces. This article used carbon emissions and socio-economic data from 1997 to 2019 to explore the trend and driving models of carbon emissions in China's provinces from the perspective of cluster analysis. Based on the attribution results of the PLS model, the contribution and sensitivity of driving factors of carbon emissions in different provinces were identified, and further exploration of provincial emission reduction plans was carried out. The results were found in this research. Firstly, during the research period, China's carbon emissions increased at a rate of 499.25 mt/a, showing a trend of low level gentle fluctuation, significant increase, and high level slow fluctuation. The provincial carbon emissions showed a pattern of high in the north, low in the south, and high in the east and low in the west. Then, there were differences in the models of carbon emissions across provinces. Beijing, Tianjin, etc are the low starting point of low-speed development category for carbon emissions, whose trend was flat "S" type. Jilin, Xinjiang, etc., for carbon emissions the low starting point of high-speed development category, whose trend was rising "S" type. Henan, Guangdong, etc., for carbon emissions the medium starting point of high-speed development category, whose trend was expanding "S" type. Shandong, Shanxi, etc., for carbon emissions the high starting point of ultra-high-speed development category, whose trend was exponential "S" type. Meanwhile, there were spatial differences in the contribution degree and sensitivity of provincial carbon emission drivers in China. Economic development, industrial structure, urbanization level and energy consumption had high contribution to carbon emissions, among which regional GDP, per capita GDP, the proportion of secondary industry in GDP, the proportion of non-agricultural population at the end of the year, and regional total energy consumption were the main contributing factors. In addition, the sensitivity of carbon emissions to industrial structure, scientific and technological development and environmental regulation was strong, and the sensitivity was most obvious in the proportion of industries at all levels to GDP, the proportion of college students and above, and the proportion of national fiscal education funds to GDP. At last, the differentiation of carbon emission driving modes was relatively obvious, and similar driving modes were prone to forming agglomeration phenomenon within a certain geographical and spatial range. Therefore, the implementation of emission reduction strategies by different provincial governments should take into account the variations in their carbon emissions' development scale and driving mechanisms. This necessitates achieving a "dual grasp" on regional development and emission reduction, leveraging regional advantages, promoting resource exchanges and cooperation, strengthening inter-provincial co-governance of carbon emissions, and further advancing high-quality development.

Key Words: carbon emissions; cluster analysis; spatial and temporal patterns; driving mechanism; PLS model; sensitivity analysis

气候变化及其影响已经成为当今世界面临的最为严重的环境问题之一^[1]。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次全球气候评估中指出,全球变暖已是无可争议的事实,人类活动及温室气体的大量排放是导致全球气候变化的主要原因。CO₂作为最重要的温室气体之一,与全球气候变暖息息相关^[2]。节能减排一直是中国的国家发展战略的重点^[3-4],政府在2020年提出了“碳达峰、碳中和”的目标,而该目标的实现既要基于“全国一盘棋”的统筹布局,加强政策措施的衔接协调,确保形成合力,又要因地制宜考虑不同省域间的经济发展、资源分布和产业分工等存在不同程度的差异性这一客观现实,确保不同省域的“碳减排”政策和具体措施的落地^[5-6]。而如何确保不同省域的“碳减排”政策更高效的提出,这对中国省域的碳排放模式分类研究有着不小的要求。因此,对不同省域进行碳排放分类的研究对实现“双碳”目标具有重要的推进作用,通过“共建共治”,进一步减少省域的碳排放已刻不容缓。

基于上述背景,“低碳”、“减排”等迅速成为学术研究的热点话题。在区域碳排放量估算研究方面,学者

们多基于统计数据^[7]、栅格数据^[8-9]等,通过系数估计法^[10-12]等对碳排放进行测度。在碳排放时空格局方面,大多学者认为碳排放的总体呈现增长趋势^[13],各地区的碳排放趋势的空间异质性较为明显^[14-15]。在碳排放特征分类方面,郝瑞军等发现碳排放在地级市水平存在高值聚集或低值聚集现象^[16]。曹俊文等通过对北京、上海等的碳排放进行特征分类来探寻减排路径^[17],但对其分类主要以脱钩指数为主。以上研究在区域碳排放发展特征聚类及差异性的研究上存在部分局限性,而省域碳排放模式聚类研究的缺乏,可能导致各地区忽视其碳排放的区域联动性,这既不利于区域间的碳排放相关资源互通,也不利于碳排放“共治”政策的颁布与实施。从碳排放归因模型来看,多以空间杜宾模型^[18]、Kaya 恒等式^[19]、STIRPAT 模型、LMDI 分解法模型^[20-21]等为主,同时随着相关研究的拓展,超效率 SBM 模型^[22]、流体动力学模型^[23]也逐渐用于碳排放驱动分析。此外,还有学者基于 OLS、决策树、BP 神经网络^[24-25]模型等来研究并预测碳排放的变化趋势。然而,区域碳排放的驱动因素及其影响程度各不相同,相关研究基于城市化水平、政策、能源结构、能源强度、经济增长、人口规模、产业结构等因素,分别研究了陕西^[8]、江西^[26-27]、甘肃^[28]、湖南^[29]、河北^[30]等省域的碳排放驱动机制,驱动结果具有明显地域分异性。经济发展和人口增长是区域碳排放增长的重要因素,产业结构优化以及能源消费下降能够抑制碳排放的增加^[31],但城市化水平、科技发展等对碳排放的影响存在区域差异。现有研究多从部分省域开展碳排放的归因分析,或基于不同的影响因素,或采用不同方法对碳排放机制进行分析探寻,缺乏在同一准则层面对省域碳排放机制的分类研究,这也致使其驱动因素的贡献度和敏感性的整体性和异质性不能客观对比分析,同时也忽视了不同省域的碳排放驱动模式的相似性对联合减排政策制定与实施的影响。

鉴于此,本文以中国 30 个省(自治区、直辖市)的碳排放为研究对象(因数据受限原因,未包括西藏自治区、台湾省、香港和澳门特别行政区),选取经济发展、产业结构、城市化水平、科技发展等相关指标,在分析碳排放的整体变化的基础上,基于聚类分析的视角对中国省域的碳排放格局进行研究。借助偏最小二乘法模型(PLS)进行驱动因素分析,通过贡献度和敏感性识别并对碳排放的驱动模式进行聚类,以揭示不同地区碳排放的驱动机制的空间异质性,进而为推行阶段化的减排措施和提升实施效果提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 碳排放数据来源

本文将中国 30 个省、直辖市和自治区等省域的碳排放量作为研究对象(受限于数据的可得性和完整性,暂未包括西藏自治区、台湾省、香港和澳门特别行政区)。1997—2019 年省域碳排放数据来源于中国碳核算数据库(CEADs)(<https://www.ceads.net/data>),该数据通过表观排放核算法计算得出,其具有统计口径一致的优势^[32-35]。

1.2 排放驱动因子选取及处理

碳排放驱动因子选取及处理碳排放驱动机制较为复杂,一般的线性结构较难解释其内在机理,驱动因子选取和驱动模式界定一直是研究难点。系统动力学是认识研究信息反馈系统的具有交叉性的学科,对解决复杂系统的非线性问题具有较大优势^[23]。在对系统内部机制及各影响因素相互作用分析的基础上,通过系统因果反馈回路进行因素的简化可得到较好的研究效果。故本文参考目前关于碳排放影响因素的研究结果,基于系统动力学进行驱动因素的信息流分析并提取其主要驱动因素,将其转为线性结构,进一步通过经济发展、环境规制、科技发展、能源消耗、人口增长、城市化水平和产业结构等来探究省域碳排放的驱动机制^[16-23](图 1),研究所用到的地区 GDP^[19-30]、地区能源消费总量^[20]、专利授权批准量合计^[23]、人口自然增长率等二级指标的基础数据来源于《中国统计年鉴》以及各省、自治区、直辖市的统计年鉴,地区 GDP 增长量^[23]、人均 GDP^[30]、各级产业占比 GDP^[14]、城镇年底非农人口比例^[30]、国家财政性教育经费占比、大专及以上受教育人数比例、工业废水与工业废气治理设施运行费用占比 GDP^[23]等由基础数据计算得出。对于个别缺失的数据,采用线性插值法进行相应补充。

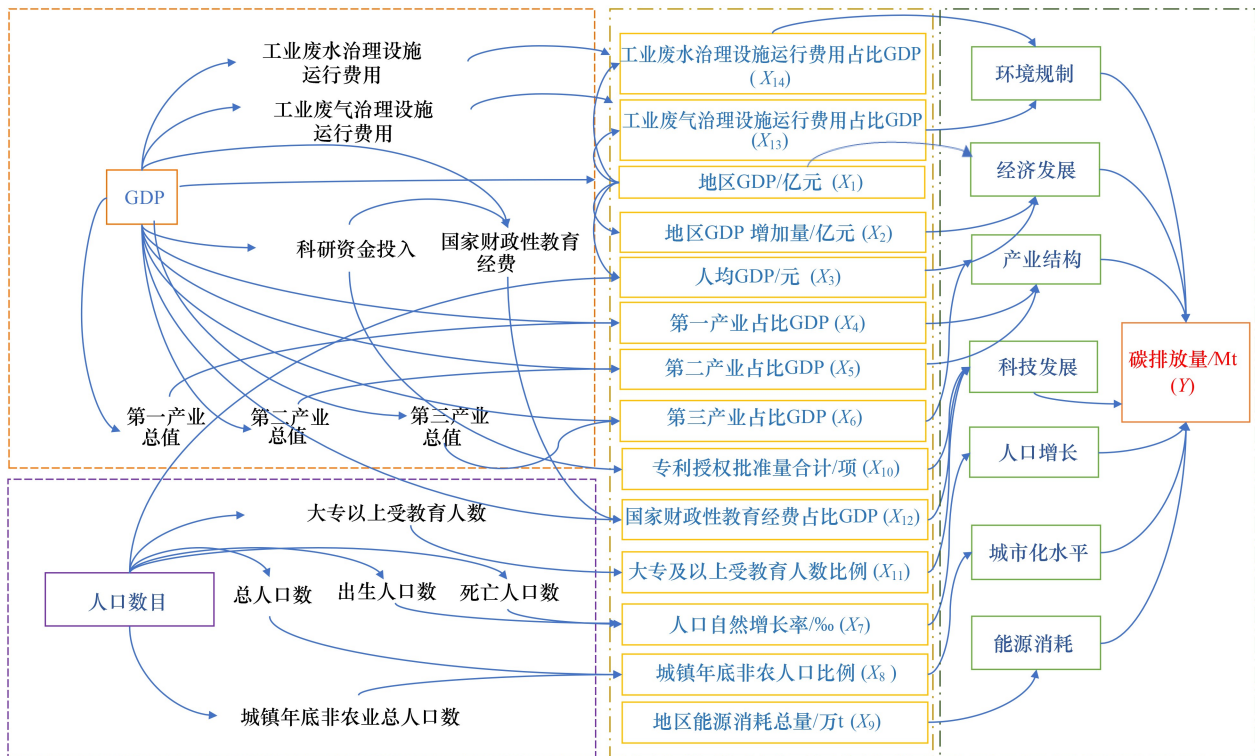


图 1 碳排放驱动因子选取流体图

Fig.1 Fluid diagram of carbon emission driving factor selection

1.3 研究方法

1.3.1 聚类分析

聚类分析又称为群分析,“类”是其相似元素的集合。系统聚类法可将多种类由多变少,其聚类原则决定于数据间的距离及类间距离的定义^[36]。由于碳排放及其驱动模式过程较为繁杂,多数研究仅单一考虑碳排放数据的类间距离分类而不考虑类中的样本个数^[37],这难以实现碳排放研究的数据聚类目的。与其它根据距离定义的聚类方法相比,重心法聚类分析能将每一类中包含的数据个数都考虑在内^[38],故本文基于标准欧式距离的重心法对碳排放数据、碳排放驱动系数分别进行聚类,以各省域的碳排放量进行碳排放模式聚类,结合碳排放驱动方程中各因子的标准化系数进行碳排放驱动模式聚类研究。重心法聚类分析的基本步骤和原理表述如下^[39-40]:

步骤 1:以标准欧式距离作为样本间的距离,以两类重心间的距离作为类间的距离,其中每类的重心为该样本的均值。

步骤 2:计算 N 个样本两两之间的距离,得到距离矩阵。

步骤 3:构造 N 个类,每类只含有一个样本。

步骤 4:合并符合类间距离定义要求的两类 G_p 和 G_q 为一个新类 G_r 。

步骤 5:计算新类与当前各类(如)的距离。全部个体聚为一类聚类终止,转到步骤 6,否则回到步骤 4。

步骤 6:画出聚类谱系图。

1.3.2 偏最小二乘法(PLS)模型

PLS 集中了多元线性回归分析、典型相关分析和主成分分析等方法的优点。本文基于 PLS 模型得出各省域的碳排放驱动方程。基于典型相关分析和主成分分析,首先寻找自变量中存在的多重共线性关系,然后从中提取成分,它既是自变量的线性组合也能最大程度地携带相关的数据变异^[41-42]。假定估计量 $Y = B_{t_1}$,再

在对 Y 有最大解释能力即达到最大相关度下实施 Y 对 t_1 的回归,得到

$$Y = B_{\text{PLS}} t_1 + e_Y \quad (1)$$

最后进行交叉有效性检验,如果方程未达到满意的精度,则利用自变量和 Y 被 t_1 解释后的残余信息 e_X 和 e_Y 进行第二轮成分提取,一直达到满意精度。最终,若通过交叉有效性检验的成分个数为 m ,则估计量:

$$Y^* = \sum_{i=1}^m B_{\text{PLS}_i} t_i \quad (2)$$

再还原成关于原始变量的回归方程:

$$Y = B_{\text{PLS}} X + e_{\text{PLS}} \quad (3)$$

以上最终方程中, Y 是碳排放量矩阵, X 是驱动因子矩阵, B_{PLS} 是驱动系数矩阵, e_{PLS} 是常数项矩阵。

1.3.3 贡献度及敏感度识别

基于 PLS 得出的各省域的碳排放驱动方程,对驱动因子进行贡献度和敏感性分析。

(1) 贡献度

因子贡献度表示某一指标对结果的影响程度^[43-44]。不同驱动因素贡献度能说明其对碳排放的解释力度,亦有助于诠释驱动因素的空间差异性。各省域的影响因素对碳排放的相对贡献度计算公式如下:

$$W_{ij} = \frac{|\beta_{ij}| \times \bar{X}_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |\beta_{ij}| \times \bar{X}_{ij}} \quad (4)$$

式中 $m=30, n=14$, W_{ij} 为研究时段内驱动因子 j 对 i 省碳排放的贡献程度, $|\beta_{ij}|$ 是 j 因子对 i 省碳排放驱动系数绝对值, $\bar{X}_{ij}$ 表示该驱动系数对应的自变量的平均值。

(2) 敏感性

敏感性分析是通过逐一改变相关变量数值的方法来解释碳排放受这些因素变动影响大小的规律^[45]。若某参数的小幅度变化能导致经济效果指标的较大变化,则称此参数为敏感性因素,反之则称其为非敏感性因素^[46]。本文使用偏导求解对驱动方程函数进行相关变量的敏感性分析,能更精准的确定各因子对碳排放量的影响状况,研究碳排放对各因子变动的灵敏性程度及其响应机制。对某一驱动因子进行碳排放的敏感性分析公式如下:

$$f'(x) = \frac{\frac{Y_2 - Y_1}{Y_1}}{\frac{x_2 - x_1}{x_1}} = \frac{\partial Y}{\partial x} = \frac{\partial f(X)}{\partial x} \quad (5)$$

式中: Y 为某省的碳排放量, Y_1 为前一阶段的碳排放量, Y_2 为后一阶段的碳排放。 x_1 为前一阶段的驱动因子量, x_2 为后一阶段的驱动因子量, $f(x)$ 为碳排放驱动方程, $f'(x)$ 为碳排放对驱动因子 x 的敏感性。

2 结果与分析

2.1 中国省域碳排放时空格局分析

1997—2019 年中国(除港澳台、西藏外)碳排放量呈现低位平缓波动-大幅上升-高位缓慢波动的变化趋势,省域碳排放呈现北高南低和东高西低的基本格局(图 2)。中国总体碳排放量以 499.25mt/a 的速率上升,其碳排放量的年增长率最高值为 0.174,最低为 -0.0337,中位数为 0.046。通过中国总体碳排放量每年的增长率的四分位数分布来看,有 25% 研究年份的增长率不超过 0.02,有 25% 研究年份碳排放量增长率大于 0.12。同时,碳排放量增长率多集中在 0 至 0.15 的增长率区间内。从时间来看,1997—2002 年,中国碳排放量以 61.59mt/a 的速率增加,呈低位平缓波动。2003 到 2012 年期间,中国碳排放量以 708.36mt/a 的速率大幅上升。2013 年中国碳排放后呈高位缓慢波动的趋势。从各省域的碳排放趋势来看,2013 年以前各省域的碳排放皆呈现上升趋势。2013—2015 年是省域碳排放趋势分异的起始段,中国总体碳排放的上升幅度开始趋于

平缓,而各省碳排放趋势开始突显差异。2016 年后多数省域碳排放趋势平缓甚至呈现轻微下降趋势。从空间来看,山西、河北、内蒙古等多数北方省份的碳排放高于南方地区。山东、辽宁、江苏、河南等东部地区的碳排放普遍较高,而青海、云南、宁夏等西部地区的碳排放较低。同时,沿海地区的碳排放普遍高于内陆地区。由此来看,中国碳排放增长特征明显而不同省域碳排放趋势的时空差异显著,省域碳排放间的相似性与差异性并存。

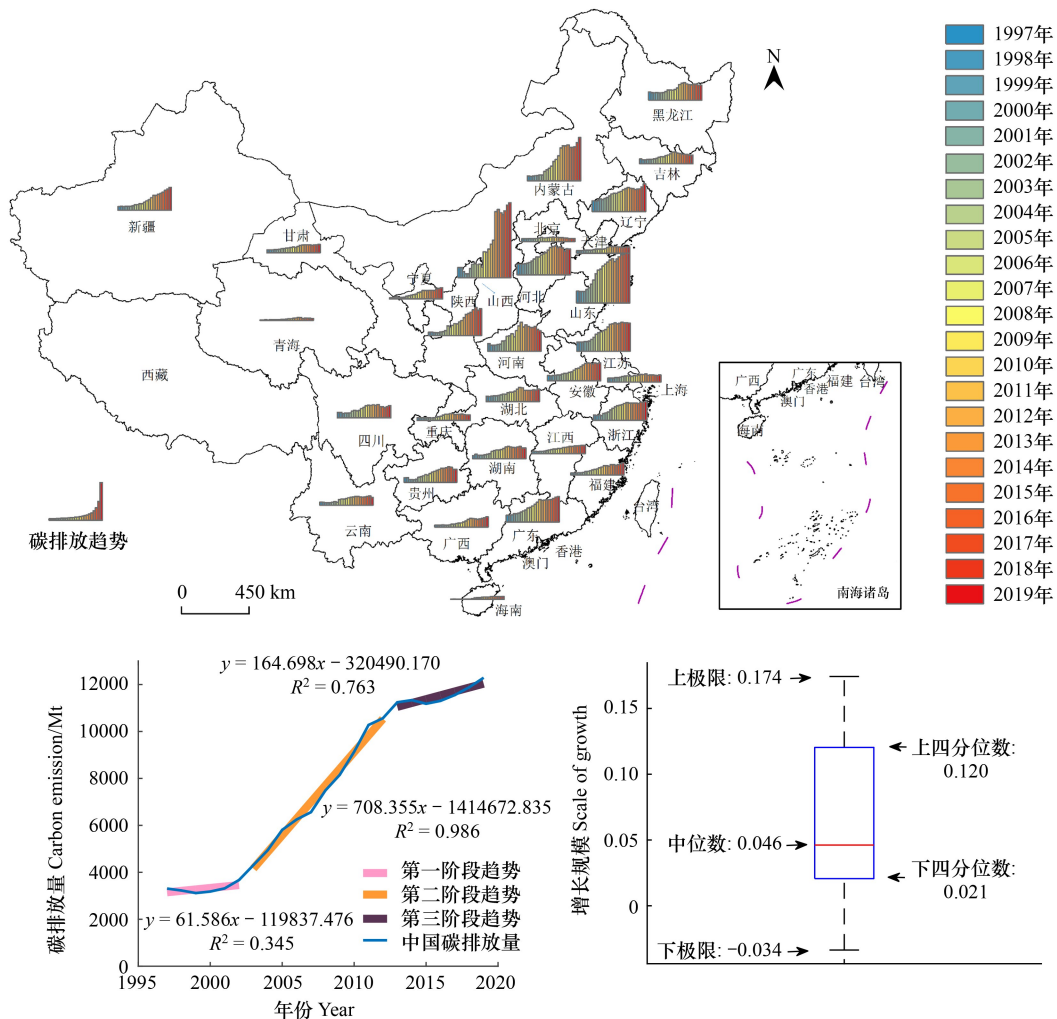


图 2 中国碳排放发展趋势及规模

Fig.2 Development trend and scale of China's carbon emission

2.2 中国省域碳排放模式聚类分析

中国省域碳排放的增长幅度不尽相同,因此有必要进一步基于聚类分析视角,识别不同省域间碳排放模式的相似性和差异性。本研究基于 MATLAB 对省域碳排放进行“标准欧氏距离-重心法”的聚类分析,依据碳排放数额和趋势的不同将 30 个省级行政单位的碳排放发展规模进行分类研究(图 3)。

中国省域碳排放模式可分为:低起点高速发展类、低起点低速发展类、中起点高速发展类、高起点超高速发展类。其中,海南、青海、北京、天津、重庆、江西、甘肃、福建、云南、广西、宁夏等碳排放起点在全国范围内均属于低值,同时涨幅偏低,增长趋势与其他地区相比较为缓慢,呈现扁平“S”型。该类地区碳排放量平均涨幅均不超过 11mt/a,其中青海的平均涨幅最小约为 1.5mt/a。吉林、湖南、贵州、安徽、湖北、四川、新疆、上海、陕西等为碳排放低起点高速发展类,其增长趋势呈现上升“S”型。该类的平均涨幅最高涨幅约为 24.24mt/a,除

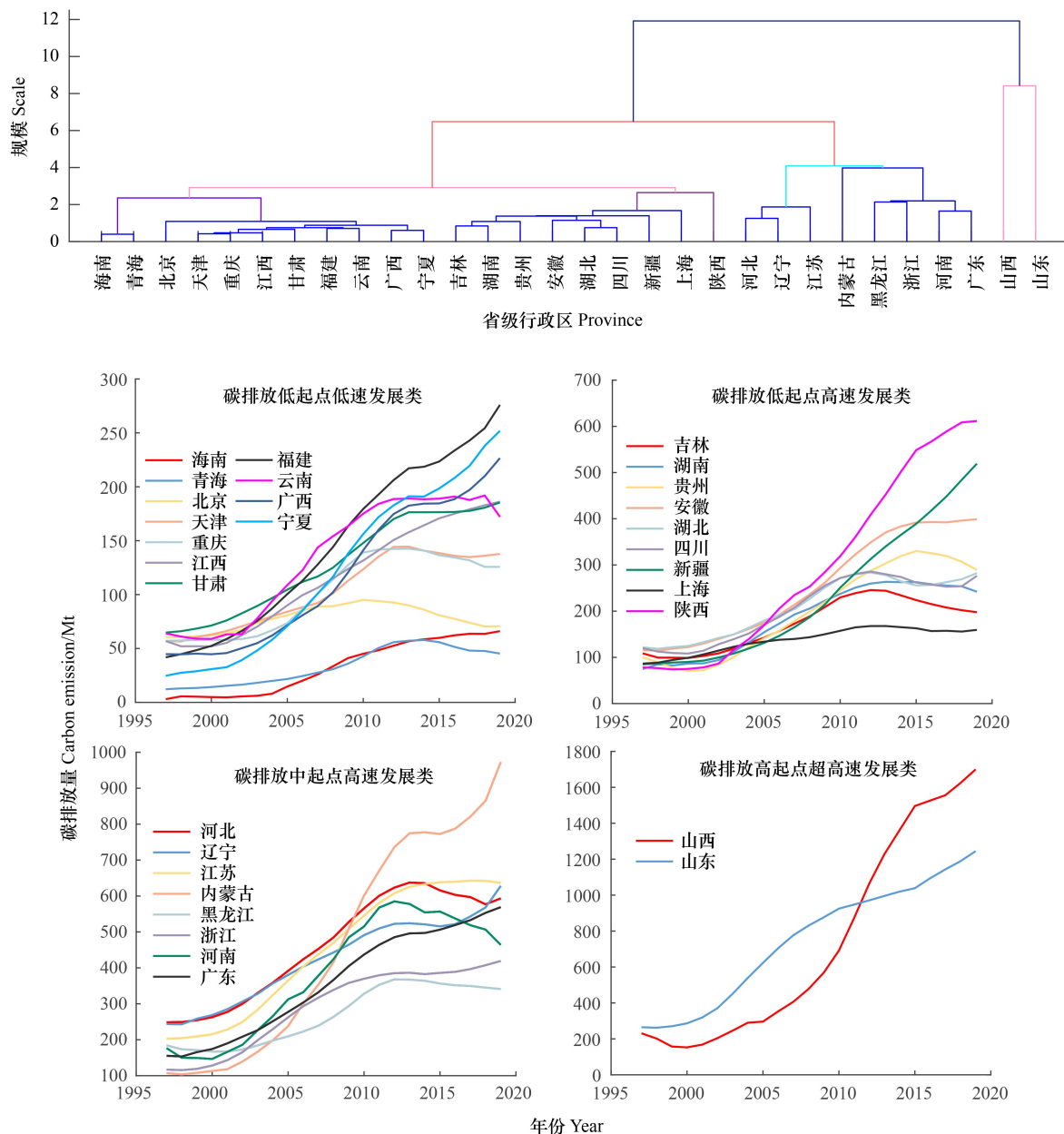


图3 中国省域碳排放趋势及模式聚类

Fig.3 Trend and pattern clustering of carbon emissions at provincial level in China

新疆、吉林、上海外,其余省份均分布于中部地区。河北、辽宁、江苏、内蒙古、黑龙江、浙江、河南、广东等省域为碳排放中起点高速发展类,该类的碳排放量平均涨幅较高,碳排放发展趋势呈现扩张“S”型,其中内蒙古碳排放的增长趋势最高,约为 39.35mt/a。该部分省域多数集中于北方地区,空间上表现为除广东省外有着较为明显的碳排放发展的集聚现象。山东、山西两省碳排放起点均大于 230mt,研究期内其增长趋势较迅猛,平均涨幅分别为 44.54 mt/a、66.78mt/a,属于碳排放高起点超高速发展类,其碳排放发展趋势呈现指数“S”型。这可能与该地区的煤炭开采等重工业发展有着密切关系。

总体来看,我国多数省份的碳排放处在高速发展阶段,同类碳排放模式的空间集聚现象较为突出。同时,碳排放分布和趋势的不均衡性较为明显。黄河流域的山东、山西两省的碳排放趋势比较迅猛,远高于其它省域,而与之相邻的河南、安徽、江苏等则比较平缓。

2.3 中国省域碳排放驱动机制分析

中国省域碳排放的趋势各不相同。因此有必要探究不同地域间的碳排放驱动因素的解释力度的大小和异同,进一步探究省域碳排放的驱动机制。对此,本研究基于 PLS 模型求解的各省域碳排放驱动系数,进一步模拟分析驱动因素的贡献度及碳排放对其的敏感度。

2.3.1 中国省域碳排放驱动因素贡献度分析

碳排放格局和演变是诸多因子共同作用的结果。由于各省份经济发展水平和政策差异等原因,不同省份碳排放驱动因子的解释力度也各不同(图 4)。经济发展对山东、广东、黑龙江、江苏、辽宁、四川、湖北、福建、甘肃、青海等省域碳排放的贡献度较大。其中,地区 GDP、人均 GDP 对黑龙江、湖北、江苏、辽宁等省域的碳排放的贡献度都属于高值。产业结构对河北、新疆、河南、贵州、云南、重庆等地碳排放的贡献程度明显,主要以第二产业占比 GDP、第三产业占比 GDP 为主。河北省产业结构对碳排放的贡献度最大,约占 55%。重庆碳排放的贡献因子中第三产业占比 GDP 对碳排放的影响度最大,为 21.83%。人口增长对于宁夏、内蒙古等地碳排放的贡献程度与其他地区相比较。江苏省的人口增长对碳排放的贡献度是所有研究区内的最小值,约为 0.01%。城市化水平对碳排放的贡献以吉林、陕西、山西等地最为突出。其中,吉林的城镇年底非农人口比例对碳排放的贡献度为 59.09%,在本文研究区内达到最大。随着城市化进程的进一步发展,城镇年底非农人口比例的上升,城镇人口的快速增加,各类资源的消费需求也不断扩大,对碳排放量的影响也随之加大。能源消耗对河南、内蒙古、上海、安徽、江西、北京等地的碳排放影响较大,其地区能源消耗总量的贡献度都大于

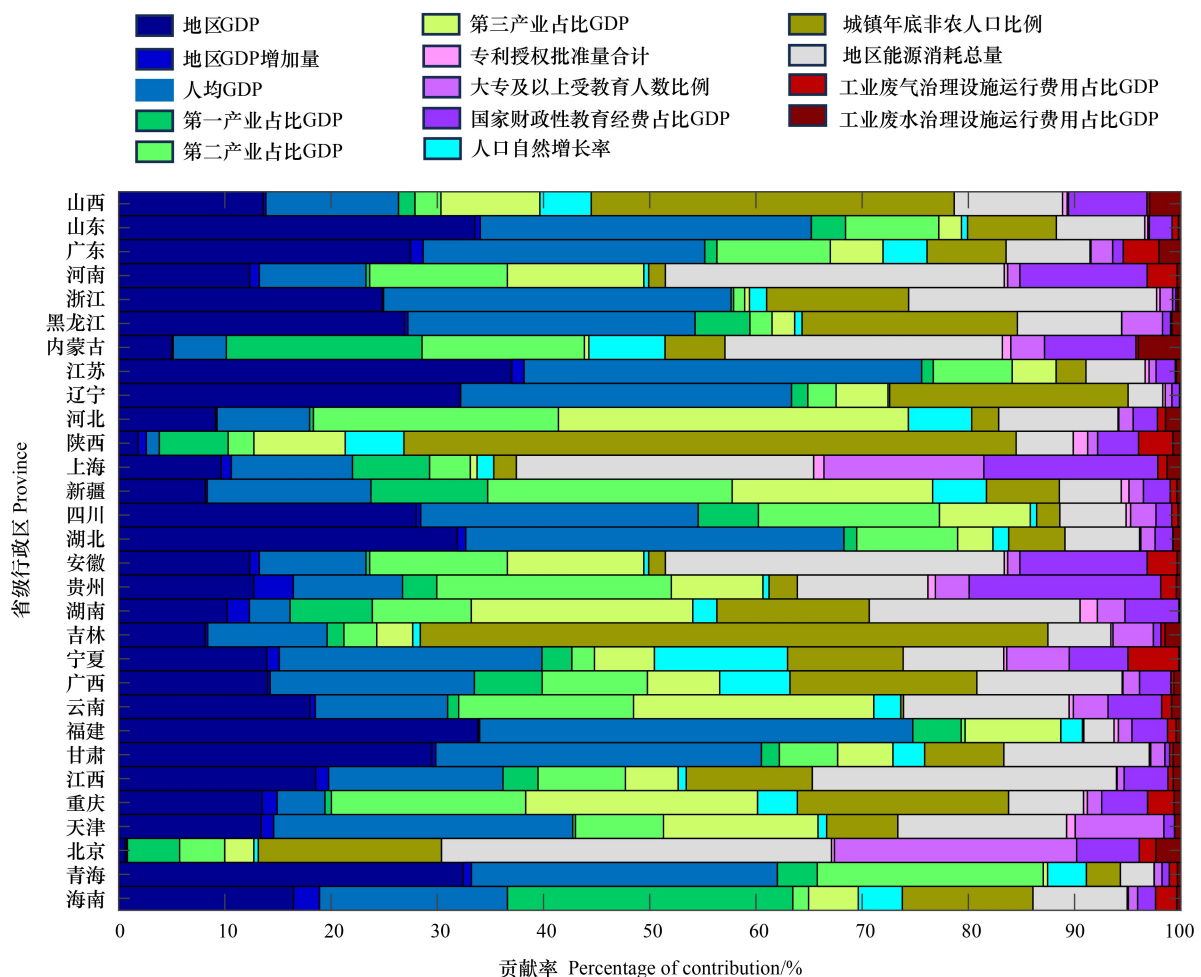


图 4 中国省域碳排放驱动因子贡献度

Fig.4 Contribution of carbon emission driving factors at provincial level in China

23%。其中北京的地区能源消耗总量对碳排放影响度最大,约占 36.72%。科技发展对于碳排放量的解释力度在上海、北京两地最大。大专及以上学历受教育人数比例对北京碳排放影响力度约 22.80%,上海次之。国家财政性教育经费占比 GDP 对上海、贵州、安徽、河南等省的碳排放影响力度属于前列。环境规制对碳排放的解释度与其他因素相比较小,各地治理污染设施运行费用占比 GDP 对其碳排放的影响度都属于低值。全国范围来看,宁夏、广东、内蒙古、陕西、北京等地工业废气和工业废水污染治理设施运行费用占比 GDP 对碳排放的贡献较高。

综上所述,驱动因素对碳排放的贡献度具有明显的区域差异性。从一级指标来看经济发展、产业结构、城市化水平与能源消耗等对碳排放的贡献度较高。从二级指标来看,地区 GDP、人均 GDP、第二产业占比 GDP、第三产业占比 GDP、城镇年底非农人口比例、地区能源消耗总量是我国各省碳排放的主要贡献因子。同时第一产业占比 GDP、大专及以上学历受教育人数比例等对不同省域的碳排放的贡献存在分异性。而地区 GDP 增加量、人口自然增长率、工业废气治理设施运行费用占比 GDP 等对碳排放的贡献程度较小,但仍然不可忽视。

2.3.2 中国省域碳排放驱动因素敏感性分析

贡献度识别到某一驱动因素对于碳排放的总体贡献情况,而敏感性分析进一步通过对驱动方程的系数测算与识别,逐一找出对碳排放指标有促进或抑制作用的驱动因素及其敏感程度,有益于更进一步揭示研究期间碳排放驱动因素的具体分异规律。对此,本文基于碳排放驱动方程(表 1—4),进一步探究不同省域碳排放对各驱动因子的敏感性。

表 1 中国省域碳排放低起点低速发展区驱动方程

Table 1 Driving equation of carbon emission low speed development area with low starting point at provincial level in China	
省份 Provinces	驱动方程 Driving equation
海南	$Y = 0.021X_1 + 0.03X_2 - 0.002X_3 - 238.73X_4 + 16.314X_5 - 26.824X_6 + 1.159X_7 - 67.696X_8 + 0.019X_9 - 0.000316X_{10} - 31.342X_{11} + 107.486X_{12} + 4228.065X_{13} - 1015.171X_{14} + 102.481$
青海	$Y = 0.332X_1 - 0.084X_2 - 0.017X_3 + 418.047X_4 + 573.247X_5 - 13.273X_6 + 4.804X_7 + 100.514X_8 - 0.017X_9 - 0.000471X_{10} + 124.082X_{11} - 164.508X_{12} - 3225.393X_{13} + 7231.179X_{14} - 362.166$
北京	$Y = 0.000156X_1 - 0.000436X_2 + 0.000003X_3 - 1079.216X_4 + 57.837X_5 + 14.47X_6 + 0.597X_7 + 72.079X_8 + 0.022X_9 + 0.000028X_{10} - 262.547X_{11} + 507.783X_{12} - 5210.826X_{13} + 11605.624X_{14} - 64.385$
天津	$Y = 0.014X_1 + 0.018X_2 - 0.004X_3 - 90.623X_4 + 147.691X_5 + 271.63X_6 + 3.481X_7 + 79.403X_8 + 0.025X_9 + 0.000527X_{10} + 427.578X_{11} + 358.05X_{12} + 46.899X_{13} - 4994.601X_{14} - 230.689$
重庆	$Y = -0.01X_1 + 0.009X_2 + 0.001X_3 - 31.937X_4 + 255.642X_5 + 324.166X_6 + 6.223X_7 + 257.641X_8 + 0.007X_9 + 0.000177X_{10} + 116.558X_{11} - 884.029X_{12} + 5899.185X_{13} - 4589.306X_{14} - 288.649$
江西	$Y = -0.01X_1 + 0.006X_2 + 0.004X_3 - 101.991X_4 - 88.703X_5 - 67.178X_6 - 0.474X_7 - 144.604X_8 + 0.026X_9 + 0.000027X_{10} - 53.884X_{11} + 650.043X_{12} - 1302.22X_{13} - 2855.328X_{14} + 118.477$
甘肃	$Y = -0.059X_1 + 0.008X_2 + 0.016X_3 - 82.797X_4 - 99.295X_5 - 99.534X_6 - 3.46X_7 - 173.798X_8 + 0.02X_9 + 0.000326X_{10} + 157.461X_{11} - 63.496X_{12} + 682.671X_{13} - 3928.414X_{14} + 175.638$
福建	$Y = -0.051X_1 - 0.002X_2 + 0.023X_3 - 883.019X_4 + 17.241X_5 - 497.384X_6 + 7.063X_7 + 5.745X_8 - 0.008X_9 + 0.000382X_{10} + 380.225X_{11} - 3214.393X_{12} + 12178.513X_{13} + 11658.646X_{14} + 325.671$
云南	$Y = -0.031X_1 + 0.007X_2 + 0.01X_3 + 76.717X_4 + 525.784X_5 + 761.272X_6 + 4.158X_7 + 10.499X_8 + 0.028X_9 + 0.001093X_{10} - 889.217X_{11} + 1371.422X_{12} - 4755.418X_{13} - 9598.849X_{14} - 591.769$
广西	$Y = -0.026X_1 - 0.005X_2 + 0.017X_3 - 516.079X_4 - 408.005X_5 - 296.255X_6 - 13.74X_7 - 792.526X_8 + 0.035X_9 - 0.000245X_{10} - 503.222X_{11} - 1379.759X_{12} - 2135.332X_{13} + 6769.059X_{14} + 676.092$
宁夏	$Y = -0.043X_1 + 0.037X_2 + 0.005X_3 - 116.458X_4 + 22.422X_5 + 68.424X_6 + 5.965X_7 + 116.4X_8 + 0.013X_9 + 0.00135X_{10} - 329.472X_{11} - 604.182X_{12} + 4255.805X_{13} - 422.499X_{14} - 92.035$

Y 为碳排放量, X_1 为地区 GDP, X_2 为地区 GDP 增加量, X_3 为人均 GDP, X_4 为第一产业占比 GDP, X_5 为第二产业占比 GDP, X_6 为第三产业占比 GDP, X_7 为人口自然增长率, X_8 为城镇年底非农人口比例, X_9 为地区能源消耗总量, X_{10} 为专利授权批准量合计, X_{11} 为大专及以上学历受教育人数比例, X_{12} 为国家财政性教育经费占比 GDP, X_{13} 为工业废气治理设施运行费用占比 GDP, X_{14} 为工业废水治理设施运行费用占比 GDP

表 2 中国省域碳排放高起点超高速发展区驱动方程

Table 2 Driving equation of carbon emission ultra-high speed development area with high starting point at provincial level in China

省份 Provinces	驱动方程 Driving equation
山东	$Y = 0.058X_1 - 0.011X_2 - 0.052X_3 - 1828.76X_4 + 1047.695X_5 + 335.092X_6 + 6.067X_7 - 1068.43X_8 + 0.019X_9 + 0.000432X_{10} + 116.881X_{11} - 6400.979X_{12} + 17329.782X_{13} + 8632.733X_{14} + 198.158$
山西	$Y = 0.199X_1 - 0.044X_2 - 0.066X_3 - 2513.391X_4 + 555.262X_5 - 2707.266X_6 + 91.074X_7 + 8676.258X_8 - 0.081X_9 + 0.011727X_{10} - 175.378X_{11} + 24463.156X_{12} + 4813.562X_{13} - 139721.543X_{14} - 2283.268$

表 3 中国省域碳排放低起点高速发展区驱动方程

Table 3 Driving equation of carbon emission high speed development area with low starting point at provincial level in China

省份 Provinces	驱动方程 Driving equation
吉林	$Y = -0.029X_1 - 0.016X_2 + 0.011X_3 - 273.315X_4 - 180.886X_5 + 238.933X_6 - 9.066X_7 - 2955.97X_8 + 0.024X_9 - 0.001223X_{10} - 1159.404X_{11} - 594.884X_{12} + 4111.903X_{13} - 51456.564X_{14} + 1716.21$
湖南	$Y = 0.004X_1 - 0.008X_2 - 0.001X_3 - 285.264X_4 + 135.961X_5 - 309.53X_6 - 2.505X_7 + 218.976X_8 + 0.011X_9 - 0.000704X_{10} - 235.806X_{11} - 1183.722X_{12} + 432.704X_{13} + 566.799X_{14} + 151.746$
贵州	$Y = -0.024X_1 + 0.055X_2 + 0.007X_3 + 177.431X_4 + 578.393X_5 + 219.838X_6 - 0.692X_7 + 90.361X_8 + 0.017X_9 - 0.001452X_{10} - 612.081X_{11} + 3537.691X_{12} + 3108.547X_{13} + 3226.739X_{14} - 483.791$
安徽	$Y = -0.008X_1 + 0.005X_2 + 0.004X_3 - 17.103X_4 - 226.623X_5 - 283.931X_6 - 0.563X_7 + 31.65X_8 + 0.03X_9 + 0.000128X_{10} - 154.538X_{11} + 3189.116X_{12} + 11933.625X_{13} + 2162.714X_{14} + 89.179$
湖北	$Y = 0.051X_1 + 0.011X_2 - 0.033X_3 - 215.352X_4 + 516.712X_5 + 215.164X_6 + 9.29X_7 + 301.634X_8 + 0.015X_9 - 0.000180X_{10} + 403.119X_{11} - 1799.627X_{12} + 589.855X_{13} + 16907.547X_{14} - 377.751$
四川	$Y = 0.068X_1 - 0.009X_2 - 0.052X_3 + 1326.688X_4 + 1606.025X_5 + 916.845X_6 - 6.386X_7 - 246.659X_8 + 0.018X_9 + 0.000695X_{10} - 1536.966X_{11} - 1936.73X_{12} + 16218.209X_{13} - 9532.12X_{14} - 1161.438$
新疆	$Y = -0.033X_1 - 0.007X_2 + 0.014X_3 + 1265.881X_4 + 1152.061X_5 + 1062.604X_6 - 10.185X_7 - 377.133X_8 + 0.014X_9 - 0.005402X_{10} + 267.637X_{11} + 1086.156X_{12} - 6358.719X_{13} + 5627.605X_{14} - 991.096$
上海	$Y = -0.004X_1 + 0.004X_2 + 0.001X_3 - 4714.992X_4 + 60.134X_5 - 7.197X_6 - 7.888X_7 + 15.41X_8 + 0.02X_9 - 0.000204X_{10} - 461.879X_{11} + 3818.598X_{12} + 4000.702X_{13} + 6224.606X_{14} - 50.729$
陕西	$Y = 0.004X_1 - 0.015X_2 + 0.001X_3 + 1180.029X_4 - 106.546X_5 - 487.958X_6 + 25.946X_7 + 2898.377X_8 - 0.015X_9 - 0.002339X_{10} + 227.37X_{11} + 2341.193X_{12} - 48244.553X_{13} - 16241.128X_{14} - 860.685$

表 4 中国省域碳排放中起点高速发展区驱动方程

Table 4 Driving equation of carbon emission high speed development area with medium starting point at provincial level in China

省份 Provinces	驱动方程 Driving equation
河北	$Y = 0.016X_1 + 0.003X_2 - 0.011X_3 - 80.679X_4 - 1428.336X_5 - 2815.352X_6 - 30.633X_7 + 193.399X_8 + 0.016X_9 - 0.000189X_{10} + 686.631X_{11} + 2814.394X_{12} + 6433.202X_{13} + 29154.523X_{14} + 1775.648$
辽宁	$Y = -0.169X_1 - 0.002X_2 + 0.071X_3 - 1194.931X_4 - 430.965X_5 - 921.943X_6 + 11.873X_7 + 2876.56X_8 + 0.015X_9 + 0.00147X_{10} - 418.159X_{11} + 2329.765X_{12} - 2101.121X_{13} - 3332.015X_{14} - 806.87$
江苏	$Y = -0.049X_1 + 0.015X_2 + 0.039X_3 - 711.192X_4 - 761.01X_5 - 524.886X_6 - 0.139X_7 - 263.175X_8 + 0.014X_9 + 0.000181X_{10} + 372.999X_{11} + 4578.564X_{12} + 3000.655X_{13} + 17037.387X_{14} + 703.234$
内蒙古	$Y = 0.016X_1 - 0.005X_2 + 0.004X_3 + 3631.72X_4 - 975.748X_5 + 33.576X_6 - 48.747X_7 - 319.725X_8 + 0.059X_9 - 0.009275X_{10} - 948.667X_{11} - 8686.854X_{12} - 2341.554X_{13} - 144418.091X_{14} + 164.891$
黑龙江	$Y = -0.134X_1 - 0.029X_2 + 0.051X_3 - 1543.266X_4 - 197.057X_5 - 241.147X_6 + 15.263X_7 - 1643.663X_8 + 0.046X_9 + 0.00011X_{10} + 2093.278X_{11} - 1117.843X_{12} + 3770.092X_{13} - 18702.661X_{14} + 1022.514$
浙江	$Y = 0.024X_1 - 0.001X_2 - 0.017X_3 - 86.271X_4 - 50.69X_5 - 26.037X_6 - 8.428X_7 - 557.513X_8 + 0.041X_9 - 0.000083X_{10} + 293.406X_{11} + 326.855X_{12} + 2465.298X_{13} - 3463.844X_{14} + 314.721$
河南	$Y = 0.115X_1 + 0.013X_2 - 0.126X_3 - 5166.861X_4 - 738.04X_5 - 50.278X_6 - 20.465X_7 - 1648.247X_8 + 0.05X_9 - 0.001231X_{10} + 3780.621X_{11} + 9962.066X_{12} - 6240.13X_{13} + 229609.891X_{14} + 1109.61$
广东	$Y = 0.014X_1 - 0.006X_2 - 0.014X_3 + 376.913X_4 + 493.774X_5 - 249.307X_6 - 11.371X_7 - 249.581X_8 + 0.008X_9 - 0.000017X_{10} + 567.208X_{11} - 936.781X_{12} + 56382.688X_{13} - 38500.602X_{14} + 217.505$

研究发现除部分区域外,省域碳排放对经济发展的敏感性在数值上存在一定趋同性,分异性较弱。而地区 GDP 的正向敏感的最高的省域为青海,其次为山西。甘肃、辽宁、黑龙江为碳排放负向敏感最高的三省。地区 GDP 增加值的正向敏感最高的地区为贵州(0.055mt/亿元)。产业结构的优化对减少碳排放尤为重要,目前的产业结构对四川、新疆碳排放的促进作用正向领先于其他省份,而对河北、辽宁等存在较强的抑制作用。碳排放对自然增长率负向敏感最高的地区为内蒙古,其次为河北与河南。城镇年底非农人口比例增加对于甘肃、广西、河南等省的碳排放起到了较强的负作用。而辽宁、山西和陕西处于高值促进区间。能源供给是一切经济活动的基本保障^[47]。山西、青海、陕西、福建的碳排放对地区能源消费总量为负敏感,其抑制比约为 8.1、1.7、1.5、0.8。除此之外,其他省域的地区能源消费总量对于碳排放有较大促进作用。对此,控制能源消耗是降低碳排放的关键要素^[48]。专利授权批准量的敏感度最高的省域为山西,该因素对碳排放起促进作用。大专及以上受教育人数比例每上升 1%时,河南、黑龙江的碳排放量增加超 20mt,而对于四川、吉林、内蒙古,该比例呈现较强抑制作用。国家财政性教育经费占比 GDP 对山西、河南、江苏等省的碳排放有较大的正作用,对内蒙古、山东、福建等省碳排放量则呈现负作用。各省域的碳排放对工业污染治理设施运行费用占比 GDP 的敏感性存在较大差异,云南、江西、陕西、辽宁,内蒙古等呈抑制作用。广东和陕西对工业废气治理最敏感。河南、内蒙古、山西的碳排放对工业废水治理的敏感度远超过其他省份,其中河南为正敏感,山西、内蒙古为负敏感。

整体而言,不同省域的碳排放变化对各因素的敏感程度均存在一定的差异性。从一级指标上看经济发展、能源消耗敏感性的地区分异性较弱,其他指标对碳排放的影响存在较强的地区分异性。同时,产业结构、科技发展、环境规制的敏感性较强。从二级指标上看,第一产业占比 GDP、第二产业占比 GDP、第三产业占比 GDP、大专及以上受教育人数比例、国家财政性教育经费占比 GDP、工业废气与工业废水治理设施运行费用占比 GDP 等敏感性最为明显。结合碳排放发展分类情况看,因子敏感程度的高值多位于中起点高速发展地区,其次是低起点中速发展和高起点超高速发展地区。低起点低速发展区的碳排放对各因子的敏感程度较低。

2.3.3 中国省域碳排放驱动模式聚类分析

驱动因子的贡献度和敏感性分析只停留在单一因子与省域碳排放的单一驱动关系,而聚类更有利于识别不同省域间碳排放驱动模式的相似性。进一步根据其驱动模式的相似程度进行分门别类,更有利于不同省域之间的碳排放分区研究和交流合作、促进区域间的碳排放管理和发展政策的综合提出。本文基于驱动因子标准化系数的聚类分析结果,根据其系数的驱动特性将驱动模式分为“正”与“负”,基于标准化系数数值的高低进行中国省域碳排放驱动模式的分级绘制(图 5)。

从不同省域的碳排放驱动模式来看,省域驱动模式类型的空间分异性较强,同时伴随一定的集聚现象。其中经济发展对碳排放的影响区域,除负影响低值区外,存在着较为明显的集聚现象。研究时段内,长江中下游地区经济发展对碳排放以负作用为主,而黄河流域地区以正作用为主。新疆、内蒙古、青海、吉林、福建、四川、广西等地区经济发展对碳排放呈现高值促进作用。西北地区及北方部分地区的经济发展对碳排放呈现出正作用的集聚特征。产业结构对碳排放负值影响的集聚效应明显,集聚区域多以东部为主,呈片状分布在沿海地区。产业结构对碳排放的正值影响则体现在中西部地区,其中影响高值区以带状形式分布在西南、西北地区。考虑该地区生态环境较为敏感,同时该类地区目前的部分产业结构不合理,多以高排放产业为主,产业结构的不合理造成碳排放对产业结构有着高值的正反馈。人口增长对于碳排放的影响有着明显的异质性,多以负值影响区为主同时其集聚性较强,正值影响区相对较少。而正影响高值区域多以对角线形式分布,两端为云南和黑龙江,部分以团状型集聚在陕西、山西、湖北、重庆等中部地区,低值地区中北京、天津、山东、福建的人口规模较大,人口增长带来大量的新生人口,该部分地区目前阶段人口到其环境承载力的距离在缩短。同时,人口增长引起的当地可用资源不足,可能对附近省份的资源形成掠夺性影响。人口增长负影响低值区多以团状分布南方地区,而高值区多呈带状分布于我国的相对高纬地区及广西、四川等地。人口增长对碳排

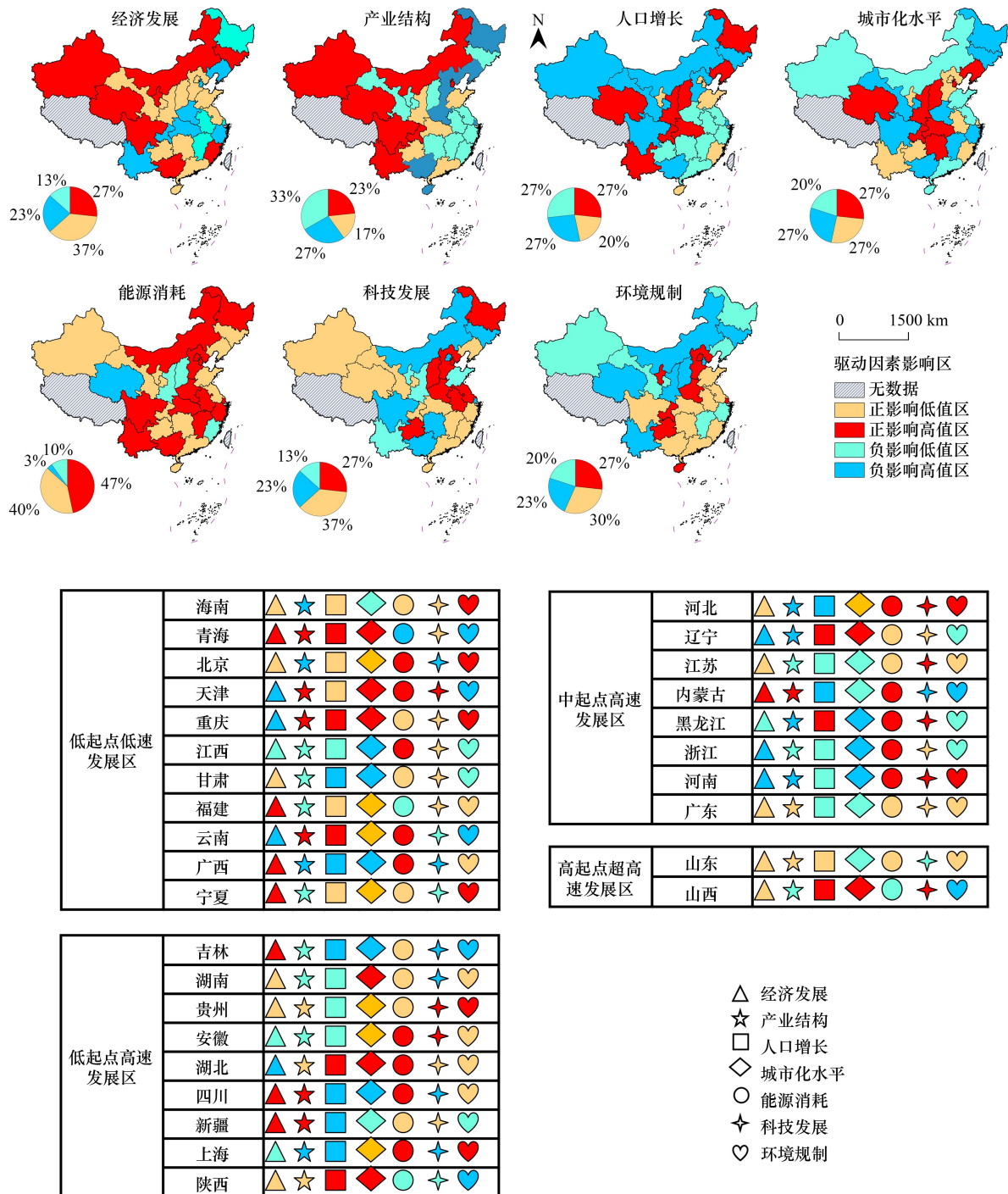


图 5 中国省域碳排放驱动模式分类

Fig.5 Classification of driving patterns of carbon emissions at provincial level in China

放负影响区域呈包围状分布于正影响区域周围,这有利于负影响区域引导“中心省”,进一步带动正向影响区域减排。

城市化对碳排放的正影响区多集中在东部与中部地区,部分高值区呈团状分布于中部。该部分地区的城市化水平多数高于平均水平,城市化水平的提高促进了工业发展,进一步加大了碳排放的力度。而对于负值影响区,尤其是对黑龙江等城市化负影响高值区而言,城市化水平的提高,带来的是企业结构的调整、工业设

备的完善和城市环境的进一步改善,因此碳排放负反馈于城市化水平的增加。能源消耗对各地区碳排放以正作用为主,研究区内除山西、陕西、青海、福建等省份外,其他地区能源消耗对碳排放增加都处于正促进区间。能源消耗对碳排放的正值影响的集聚效应明显,集聚区域呈片状分布。其中能源消耗正影响高值区以“ε”型带状分布于长江流域和环渤海沿岸、北方和西南边境。该类地区多是西部大开发的能源输出和引入省份,需要考虑调动资源进行资源配置,运输途中进一步加大了能源消耗。而能源消耗正影响低值区“U”带状分布于广东、湖南延伸至甘肃新疆等地区,同时部分于东部沿海地区分布。科技发展对碳排放以促进作用为主。科技发展正低值影响范围较大呈现较明显的集聚现象,团状分布在西北-东南等地。科技发展正影响高值区呈现“C”型包围趋势,负影响高值区以吉林、内蒙古、广西、湖南、四川、北京、上海等为主。该类地区与其他地区相比较,其科技发展对碳排放的抑制作用较为明显。环境规制对碳排放有正向影响的区域多数位于南方和部分沿海地区,其中贵州、重庆、宁夏、湖北、河北等地区的碳排放对工业治理水平有着较大的正反馈,工业治理费用占比 GDP 费用越大,其碳排放就越大,其原因考虑该类地区多数属于季风区,废气废水污染容易被自然环境降解,当工业治理费用占比 GDP 费用上升时,说明该地区的碳排放含量上升到需要人工治理的级别,对此该类地区工业治理水平对碳排放有促进作用。环境规制对碳排放负影响区多呈片状分布在西北和北方地区,其中部分负影响高值区集聚分布于内蒙古、吉林、山西、陕西等省,该部分省份的工业治理有助于促进碳排放的下降。

从不同发展类的碳排放反馈机制来看,低起点高速发展区与高起点超高速发展区的经济发展对碳排放以正影响为主,此类地区的经济快速发展,加大了其碳排放力度,导致其碳排放发展速度较快。产业结构对低起点低速发展区的碳排放多为正影响,而对中起点高速发展区的碳排放以负影响为主。人口增长对中起点高速发展区与低起点高速发展区的碳排放以负影响为主。人口发展有利于碳排放高速发展区发挥人力资本优势,进一步推动地区实现技术创新与发展,减少了碳排放^[49]。城市化水平对中起点高速发展区的碳排放多呈现抑制作用,对于其他发展区则以促进作用为主。能源消耗对区域减排的负面影响较大,需要引起重视。而科技发展对中起点高速发展区的碳排放以正作用为主。环境规制对低起点高速发展区的碳排放以正作用为主。

总体来看,中国省域的排放驱动模式的分异性较为明显,同时,同类驱动模式容易在一定的地理空间范围内形成“集聚”现象,这有助于同一模式下的省域碳减排政策的联动,从而实现碳排放的“共治”。

3 讨论

3.1 中国省域碳排放驱动机制和分类对比

就目前已有的碳排放时空特征及驱动机制相关研究来看,各区域碳排放的影响因素存在异同。多数研究认为 GDP、城市化水平等是影响碳排放的主要因素,江西省的经济发展水平与碳排放效率显著正相关,而能源结构、能源强度、城镇化水平等与碳排放效率显著负相关^[26]。同时,对该省碳排放量增加起促进作用的因素不仅包含能源结构还有经济产出效应和人口^[27]。对甘肃省碳排放而言,经济增长和人口规模产生增量效应,能源强度、能源结构产生减排效应^[28]。人口、人均 GDP、第二产业比重与湖南省的单位 GDP 碳排放能耗呈现正相关^[29]。经济发展水平是影响河北省农业碳排放的主要因素,而城镇化率对农业碳排放增长有负向作用^[30]。以上有关结果虽然表明碳排放由其产业结构和经济发展水平、人口规模等因素直接决定,但仍不能忽视研究过程中也存在归因模型选择与研究尺度确定等细节问题。基于不同地域尺度、不同驱动机制因素、不同领域的碳排放衍生对象,缺乏研究的整体性和统一性。与上述研究不同的是,本文尝试基于统一的省域尺度和同一研究对象,先研究中国整体和省域的碳排放时空格局,后基于同一驱动模型和多种驱动因子对省域的驱动机制进行了探寻,极大的体现了中国碳排放的整体性的同时也保留了省域的分异性。

国内省域的碳排放类型划分和比较分析的研究较少。部分学者基于省域级别研究了碳排放量变化及其影响因素^[50-52],研究的尺度统一的同时也包含机制对比,但其结果呈独立状态,缺乏进一步对碳排放机制的类别划分,驱动状态独立的同时也丧失了整体性,不利于区域间减排机制的联动。而基于自定分类准则对各

省份碳排放进行类型划分,其研究的内容仅限于碳强度与脱钩弹性系数^[17],缺乏了影响机制的探讨。而本文对中国各省域的碳排放的时空特征及驱动机制进行研究,基于省域的“碳排放及驱动数据”对其增长趋势及驱动模式进行聚类分析,为省域行政尺度的碳排放机制的横向对比提供了较为可靠的依据,也为同种驱动模式下的省域碳减排的机制联动提供了理论基础。

3.2 中国省域碳排放对策建议

“十四五”时期是实现碳达峰、碳中和目标的重要机遇期,推动能源消费结构性改善和减污降碳的政策落实到地方,是改善生态环境和可持续发展的关键举措。各省域因社会经济发展阶段差异,碳排放水平和驱动模式存在明显的空间异质性,同时聚类后驱动模式的集聚趋势愈发明显。而省域存在不同的碳排放驱动模式意味着驱动因子对各地区碳减排有着不同的效果,因此需重视不同类型的驱动模式和驱动因子在地区碳减排中的作用。根据碳排放相关模式的分类结果,本文提出以下建议。

通过省域间合作和地方政策解锁中西部地区的经济发展对碳排放影响的“趋同”效应,促进东部发达区域对西北欠发达区域的技术带动,缓解东部地区由科技发展带来的碳排放压力,实现区域间社会经济和生态环境的协调发展。产业结构负值影响的沿海地区应继续保证其产业的减排优势,保持发展特色产业,积极传授相关经验,带动其他区域减排。其它省份通过调整产业结构,促进产业转型升级,联合周边省份建立产业资源共享链,促进资源互通,减少资源浪费,提升减排效果。人口政策的制定需考虑地区差异,人口增长正值影响区的人口政策与经济发展应匹配。扩大城市规模时要重视城市规划。结合城市化发展,引导中部省份提高素质的转化率与相关城市建设的紧凑度,实现公共资源和设施的集约利用。加快建设城市有效绿化带,改善城市环境,加快减排进程。对于其他地区,城市化水平政策与人口政策应重视原有碳排放的基础,统筹城乡协调发展。同时,全国多数省份处于能源消耗正影响区,在生产活动中需加快传统能源利用技术的转换升级,降低单位产值的能耗和排放水平。加快规划建设新型能源体系,提高清洁能源在能源构成中的比重,可通过引导能源消费结构的多元化来优化能源生产结构达到减排目的^[51]。此外,应加强处在环境规制正影响区的南方地区的工业污染协同治理。环境治理是一种跨省域的公共物品,具有明显的经济外部性。在减少工业污染、节能减排的区域协同中,要从长期的全局利益出发,改变其为了短期局部利益而产生的“逐底竞争”现象^[52],实现“共治”。西北、北方地区的环境规制负值影响区要重视其原本的环境基础,在接受产业转入时慎重考虑相应的环境效应,并从长远角度出发,贯彻落实“山水湖田林草沙命运共同体”的思想。财政支持需从中央落实到地方,加快生产技术的改进,提高各省清洁能源的研发资金投入,促进基础设施服务的绿色化,实现高碳排放区域的低碳转型。

3.3 不足与展望

本文基于中国 1997—2019 年 30 个省级行政单位的碳排放量数据研究其时空格局,并通过聚类分析的视角对其发展规模特征和驱动模式开展了研究,对于省域碳排放的“共治”和政府减排策略的落实有着重要的意义,为实现地区发展和减排“两手抓”,进一步促进高质量发展提供了理论基础。本文所使用的 CEADs 的碳排放数据为碳排放研究提供了较精准的数据基础,填补了统计数据的能源数据的空白,被国内外学者广泛应用在碳排放驱动机制、碳排放与经济的脱钩和碳排放预测的研究中,但现有的碳排放量数据年限较短,无法开展更具时效性的研究。近年来,随着中国发展进入新常态,经济发展态势改变较大,对碳排放演变趋势和空间特征也会产生深远的影响,未来可对碳排放量进行进一步核算或拓宽碳排放来源渠道以开展进一步研究。同时,本文基于 PLS 进行驱动机制分析,其模型本质还是回归求解,未来可进一步基于更深层次的非线性模型进一步探索驱动机制。

4 结论

本文基于 1997—2019 年中国 30 个省级行政单位的面板数据,采用 PLS 模型对中国省域碳排放驱动研究,并研究驱动因素对碳排放的贡献度和敏感性程度,同时基于标准欧式距离的重心法对碳排放数据及驱动

方程系数进行聚类分析,刻画碳排放的时空格局,对碳排放增长特征和驱动模式进行合理分类。主要结论为:

(1) 从时空格局分布来看,整体上中国碳排放呈现低位平缓波动-大幅上升-高位缓慢波动的趋势变化,省域碳排放呈现北高南低,东高西低格局。从碳排放模式聚类情况来看,海南、青海、北京等低起点低速发展类的碳排放趋势呈扁平“S”型。碳排放高速发展地区较多,湖南、湖北、四川等低起点高速发展类多分布于中部地区,碳排放趋势呈现上升“S”型。河北、辽宁、江苏等属于中起点高速发展类,碳排放趋势呈扩张“S”型。山西、山东碳排放发展迅猛,远超其他地区,呈现指数“S”型,属于高起点超高速发展类。

(2) 不同省域的碳排放变化对各因素的贡献度及敏感程度均存在一定的地区差异性。经济发展、产业结构、城市化水平与能源消耗等一级指标对碳排放的贡献度较高,其中地区 GDP、人均 GDP、第二产业占比 GDP、年底非农人口比例、地区能源消耗总量等是省域碳排放的主要贡献因子。碳排放对产业结构、科技发展、环境规制的敏感性较强,第一产业占比 GDP、第二产业占比 GDP、第三产业占比 GDP、大专及以上学历受教育人数比例、国家财政性教育经费占比 GDP、工业废气与工业废水治理设施运行费用占比 GDP 等敏感性最为明显。因子敏感程度的高值多数集中于中起点高速发展类的省域,其次是低起点中速发展类和高起点超高速发展类的省域,而低起点低速发展类的省域的碳排放对各因子的敏感程度多属于低值区。

(3) 从驱动模式聚类情况来看,省域的碳排放驱动模式的分异性较为明显,同类驱动模式容易在一定的地理空间范围内形成“集聚”现象。除负影响低值区外,经济发展的影响有着较为明显的集聚现象。产业结构对碳排放的负值区的集聚效应明显,多呈片状分布在东部沿海地区,正值影响则体现在中西部地区。人口增长对于碳排放的影响多以负值为主,集聚性较强。城市化对碳排放的正影响区多集中在东部与中部地区,部分高值区呈团状分布于中部。能源消耗对碳排放的正向影响区域呈片状集聚分布。科技发展对碳排放以正作用为主,其中低值区范围较广且呈集聚现象,高值区呈现“C”型包围趋势。环境规制对碳排放有正向影响区域多位于南方和部分沿海地区,而负向影响区域则多位于西北地区。

参考文献(References):

- [1] 董亮. “碳中和”前景下的国际气候治理与中国的政策选择. 外交评论(外交学院学报), 2021, 38(6): 132-154+8.
- [2] 朱诚, 姜逢清, 吴立, 曾蒙秀, 贾天骄, 周生路, 宁越敏, 于军, 冯智智. 对全球变化背景下长三角地区城镇化发展科学问题的思考. 地理学报, 2017, 72(4): 633-645.
- [3] 王少剑, 王泽宏, 方创琳. 中国城市碳排放绩效的演变特征及驱动因素. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(8): 1613-1626.
- [4] Huang Y M, Wang Y, Peng J T, Li F, Zhu L, Zhao H H, Shi R. Can China achieve its 2030 and 2060 CO₂ commitments? Scenario analysis based on the integration of LEAP model with LMDI decomposition. The Science of the Total Environment, 2023, 888: 164151.
- [5] 宋苑震, 曾坚, 王森, 梁晨. 中国县域碳排放时空演变与异质性. 环境科学, 2023, 44(1): 549-559.
- [6] 颜建军, 冯君怡, 陈彬. 中国城市生态基础设施对碳排放量的影响. 生态学报, 2024, 44(2): 637-650.
- [7] 刘晓婷, 陈闻君. 西北五省碳排放与区域经济增长脱钩关系实证分析——基于时空差异分析. 新疆农垦经济, 2015(4): 70-77.
- [8] 张杰, 陈海, 刘迪, 史琴琴, 耿甜伟. 基于县域尺度土地利用碳排放的时空分异及影响因素研究. 西北大学学报: 自然科学版, 2022, 52(1): 21-31.
- [9] 李虹, 张红, 贺桂珍, 张霄羽, 刘勇. 基于主体功能区的山西省碳排放时空特征及减排评价. 生态学报, 2024, 44(1): 143-153.
- [10] 陈靖松, 张建军, 李金龙, 李山. 京津冀地区碳排放时空格局变化及其驱动因子研究. 生态学报, 2024, 44(6): 1-14.
- [11] 黄汉志, 贾俊松, 张振旭. 江西县域土地利用变化碳排放时空演变及其影响因素. 生态学报, 2023, 43(20): 8390-8403.
- [12] 吴强, 张园园, 张明月. 中国畜牧业碳排放的量化评估、时空特征及动态演化: 2001—2020. 干旱区资源与环境, 2022, 36(6): 65-71.
- [13] 刘华军, 邵明吉, 吉元梦. 中国碳排放的空间格局及分布动态演进——基于县域碳排放数据的实证研究. 地理科学, 2021, 41(11): 1917-1924.
- [14] 陈楠, 庄贵阳. 中国区域碳达峰关键路径研究——以环渤海 C 型区域为例. 中国地质大学学报: 社会科学版, 2023, 23(3): 81-95.
- [15] 范紫月, 齐晓波, 曾麟岚, 吴锋. 中国农业系统近 40 年温室气体排放核算. 生态学报, 2022, 42(23): 9470-9482.
- [16] 郝瑞军, 魏伟, 刘春芳, 颜斌斌, 杜海波. 中国能源消费碳排放的空间化与时空动态. 环境科学, 2022, 43(11): 5305-5314.
- [17] 曹俊文, 张钰玲. 中国省域碳排放特征与碳减排路径研究. 生态经济, 2022, 38(08): 13-19.
- [18] 史亚栋, 李刚. “双碳”背景下煤炭资源禀赋对碳排放影响的空间效应研究. 煤炭经济研究, 2022, 42(2): 31-36.
- [19] 王长建, 汪菲, 张虹鸥. 新疆能源消费碳排放过程及其影响因素——基于扩展的 Kaya 恒等式. 生态学报, 2016, 36(8): 2151-2163.

- [20] 王梦凯,白艳萍.基于 LMDI 模型的江苏省碳排放强度影响因素分解研究. 宁夏大学学报(自然科学版), 2022, 43(1): 109-114.
- [21] Luo X, Liu C, Zhao H. Driving factors and emission reduction scenarios analysis of CO₂ emissions in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and surrounding cities based on LMDI and system dynamics. *Science of the Total Environment*, 2023, 870: 161966.
- [22] 王少剑,高爽,黄永源,史晨怡.基于超效率 SBM 模型的中国城市碳排放绩效时空演变格局及预测. 地理学报, 2020, 75(6): 1316-1330.
- [23] 韩楠,罗新宇.多情景视角下京津冀碳排放达峰预测与减排潜力. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1277-1288.
- [24] 胡振,龚薛,刘华.基于 BP 模型的西部城市家庭消费碳排放预测研究——以西安市为例. 干旱区资源与环境, 2020, 34(7): 82-89.
- [25] 闫凤英,刘思娴,张小平.基于 PCA-BP 神经网络的用地碳排放预测研究. 西部人居环境学刊, 2021, 36(6): 1-7.
- [26] 林峰.江西省碳排放效率测度及影响因素研析. 现代企业, 2022(7): 82-84.
- [27] 陈燕玲,王投婧,占明锦,秦建成.2000—2019 年江西省能源消费碳排放变化及其影响因素. 气象与减灾研究, 2022, 45(1): 38-45.
- [28] 吴茜,陈强强.甘肃省行业碳排放影响因素及脱钩努力研究. 干旱区地理, 2023, 46(2): 274-283.
- [29] 赵先超,彭竞霄,胡艺觉,张子兮.基于夜间灯光数据的湖南省县域碳排放时空格局及影响因素研究. 生态科学, 2022, 41(1): 91-99.
- [30] 周一凡,李彬,张润清.县域尺度下河北省农业碳排放时空演变与影响因素研究. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(4): 570-581.
- [31] Li H N, Mu H L, Zhang M, Li N. Analysis on influence factors of China's CO₂ emissions based on Path - STIRPAT model. *Energy Policy*, 2011, 39(11): 6906-6911.
- [32] Shan Y L, Guan D B, Zheng H R, Ou J M, Li Y, Meng J, Mi Z F, Liu Z, Zhang Q. China CO₂ emission accounts 1997 - 2015. *Scientific Data*, 2018, 5: 170201.
- [33] Shan Y L, Huang Q, Guan D B, Hubacek K. China CO₂ emission accounts 2016 - 2017. *Scientific Data*, 2020, 7: 54.
- [34] Guan Y R, Shan Y L, Huang Q, Chen H L, Wang D, Hubacek K. Assessment to China's recent emission pattern shifts. *Earth's Future*, 2021, 9(11): e2021EF002241.
- [35] Shan Y L, Liu J H, Liu Z, Xu X, Shao S, Wang P, Guan D B. New provincial CO₂ emission inventories in China based on apparent energy consumption data and updated emission factors. *Applied Energy*, 2016, 184: 742-750.
- [36] 裴孝东,吴静,薛俊波.基于 LMDI 和层次聚类的中国省级工业 SO₂ 排放影响因素分析. 生态经济, 2021, 37(12): 183-189.
- [37] 高惠璇.应用多元统计分析. 北京: 北京大学出版社, 2005: 369-374.
- [38] 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.
- [39] 董莹,华中,陆志翔,许宝荣,邹松兵.面向低碳转型的甘肃省地区聚类分析. 中国沙漠, 2020, 40(5): 25-31.
- [40] 赵宇翔,李彦彬,张海涛,王生鑫.基于聚类分析的水资源开发利用分区研究. 水电能源科学, 2022, 40(11): 40-44.
- [41] 王惠文. 偏最小二乘回归方法及其应用. 北京: 国防工业出版社, 1999: 15-80.
- [42] 张正勇,刘琳,徐丽萍.冰川分布格局对地理因子响应机制. 生态环境学报, 2018, 27(2): 290-296.
- [43] 刘红琴,谭丽峰,杨红娟.贡献量和敏感度双视角下云南省高耗能行业碳排放控制研究. 生态经济, 2020, 36(10): 41-47.
- [44] 田浩,刘琳,张正勇,陈泓瑾,张雪莹,王统霞,康紫薇.2001—2020 年中国地表温度时空分异及归因分析. 地理学报, 2022, 77(7): 1713-1729.
- [45] 彭静,丹利,王永立,冯锦明,杨富强,祁威.百年尺度不同区域地表气温对 CO₂ 浓度非均匀动态分布敏感度的研究. 气候与环境研究, 2023, 28(2): 117-130.
- [46] 张时聪,刘常平,吕燕捷,徐伟.基于关键因素敏感度分析的低碳社区碳排放控制指标研究. 建筑科学, 2023, 39(2): 36-45.
- [47] 王锋,吴丽华,杨超.中国经济发展中碳排放增长的驱动因素研究. 经济研究, 2010, 45(2): 123-136.
- [48] 王少剑,谢紫寒,王泽宏.中国县域碳排放的时空演变及影响因素. 地理学报, 2021, 76(12): 3103-3118.
- [49] 高新才,韩雪.黄河流域碳排放的空间分异及影响因素研究. 经济经纬, 2022, 39(1): 13-23.
- [50] 陈慧灵,高子恒,王振波.省级尺度工业碳排放影响因素及碳转移格局. 生态学报, 2023, 43(14): 5816-5828.
- [51] 谢克昌.新型能源体系发展背景下煤炭清洁高效转化的挑战及途径. 煤炭学报, 2024, 49(1): 47-56.
- [52] 毛小明,钟诚.产业集聚对于中国省域碳排放的影响及空间效应分析. 南昌大学学报(人文社会科学版), 2022, 53(2): 56-65.