

# 基于地理探测器的中国碳排放时空分布 特征及驱动因素研究

田娟娟<sup>1,2</sup> 张金锁<sup>2,3,1</sup>

(1. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054;

2. 西安科技大学 能源经济与管理研究中心, 陕西 西安 710054;

3. 延安大学 经济管理学院, 陕西 延安 716000)

**【摘要】:** 基于 30 个省份的面板数据, 分别运用探索性空间数据分析法及地理探测器考察了我国省域碳排放时空分布特征与驱动因素, 结果表明: (1) 我国碳排放空间分异及空间相关特征显著, 初期呈现“西低东高”“北高南低”特征, 而后高值区逐渐向东南及西北省份移动。(2) 碳排放热点区主要聚集于华北、长三角、河南、山东等地, 冷点聚集程度逐年下降。(3) 经济发展、环境规制及固定资产投资是碳排放空间分异的主要驱动因子, 产业结构的解释力度最小, 且多数因子在与其他因子空间叠加后会产生非线性增强作用。(4) 经济发展、人口规模、产业结构、能源强度、固定资产投资、外商投资的高值区, 碳排放量均处于较高水平。

**【关键词】:** 碳排放 空间相关性 地理探测器 驱动因素

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

全球气候变暖所带来的环境问题及日益凸显的极端天气, 正在严重威胁人类的生存发展。政府间气候变化专门委员会发布的《全球变暖 1.5°C》<sup>[1]</sup>特别报告强调, 将全球变暖限制在 1.5°C 而不是 2°C, 要求到 2030 年全球人为二氧化碳净排放量在 2010 年水平上下降约 45%, 并在 2050 年左右达到“净零”。作为 2006 年首次超越美国成为全球最大温室气体排放国<sup>[2]</sup>的中国, 在 2015 年向《联合国气候变化框架公约》提交的《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》中承诺 2030 年左右二氧化碳排放达到峰值并争取尽快达峰, 2060 年前实现碳中和。为实现尽早达峰, 2016 年国务院及各省先后发布了《“十三五”控制温室气体排放工作方案》, 以推动减排计划实施。但是我国幅员辽阔, 各省份经济社会发展异质性导致碳排放呈现显著的空间分异化特征<sup>[3]</sup>, 因此, 科学认识碳排放时空分布规律及其驱动因素, 对于科学制定各省份二氧化碳减排目标, 因地制宜制定减排策略具有重要意义。

关于碳排放的研究, 国内外重点聚焦于碳排放影响因素辨识上, 研究多基于时间序列数据运用 STIRPAT 模型<sup>[4]</sup>、LMDI 模型

**作者简介:** 田娟娟, 博士研究生, 研究方向为资源经济与管理。E-mail: anniel0tian@126.com; 张金锁, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为资源经济与管理。E-mail: mark56zhang@163.com

**基金项目:** 国家自然科学基金项目“不确定条件下我国重要能源资源供给安全管理的理论与政策研究”(71273206); 国家自然科学基金项目“生态环境约束下我国煤炭跨期最优开采规模及保障机制研究”(71704140); 教育部人文社会科学研究青年基金项目“省际视角下中国煤炭产能动态优化机理与政策研究”(20YJC630190)

[5]、灰色模型<sup>[6]</sup>等方法，分别从国家<sup>[7]</sup>、区域<sup>[8,9]</sup>、部门<sup>[10]</sup>等尺度进行分析。研究发现人口、城镇化、经济发展、产业结构、能源结构、固定资产投资、外商投资、能源强度<sup>[11,12,13,14,15,16,17,18]</sup>等因素均对碳排放产生显著影响。随着区域协同治理减排的提出，碳排放空间溢出效应逐渐受到学者重视，从空间分异视角对碳排放的研究日益增多，已有研究表明，无论是省域之间<sup>[3,19]</sup>、区域城市之间<sup>[20]</sup>、县域之间<sup>[21]</sup>，碳排放均存在不同程度的空间分异性，并且呈现显著的空间聚集特征。关于空间分异驱动因素的研究，学者们运用空间计量模型及地理加权回归模型研究发现，技术创新、产业结构优化、外商投资发展、固定资产投资、环境管制等社会经济因素不仅会对本地的碳排放产生影响，同时也会通过空间溢出效应作用于周边地区，是导致碳排放空间分异的主要因素<sup>[22,23,24]</sup>。

综上，关于我国碳排放空间分异的研究已取得了丰硕的成果，但是仍存在一些问题，主要体现在，研究方法上多数研究采用空间计量模型，尽管基于空间相关视角，但是这种全局模型用于分析具有异质性的对象时，容易将研究对象的异质性掩盖，进而导致结果被混合效应干扰产生错误结果<sup>[25]</sup>。因此，有必要采用更为专业的工具对异质性对象进行分析。王劲峰等<sup>[26]</sup>提出一种探测空间异质性的方法：地理探测器。该方法不仅可以独立处理自变量及因变量，探索他们空间分布的相似性，还可以判断两因子是否有交互作用，及交互作用的强弱及性质，被广泛应用于大气污染<sup>[26,27]</sup>、区域发展<sup>[28,29]</sup>、

人口增长<sup>[30]</sup>等研究中，是空间数据探索性分析的有力工具。因此，本文将在揭示我国省域碳排放空间分异及空间聚集特征的基础上，运用地理探测器方法，探索我国碳排放空间分异的驱动因素，以期识别不同省份碳排放的主导因素，进而正确认识我国二氧化碳排放情况，为实现科学减排提供参考。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究方法

本文选取我国 30 个省份(西藏、港澳台地区除外)作为研究对象，对其碳排放空间分异状况及驱动因素进行分析。首先运用 ArcGIS10.3 软件，分别对 2000 年、2005 年、2010 年和 2017 年各省碳排放量空间分异化特征进行归纳，然后分别运用全局及局部自相关分析法对我国省域碳排放的空间聚集特征进行分析。在此基础上，运用我国 30 个省份二氧化碳排放和经济社会数据，采用地理探测器方法和 GeoDetector 软件，探索各因素对我国省域尺度碳排放空间分异的影响程度，并展开进一步分析。

#### 1.1.1 空间自相关

根据地理学第一定律<sup>[31]</sup>，距离越近，事物的相关性越强。空间自相关通常分为全局空间自相关和局部空间自相关。本文选用 Moran' sI 来计算全局空间自相关指数，表达式为：

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right] \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (1)$$

式中： $x_i$ 、 $x_j$  分别为  $i$  省和  $j$  省的碳排放量， $W_{ij}$  为空间权重矩阵， $\bar{x}$  为碳排放量的平均值。I 的取值范围为 $[-1, 1]$ ，绝对值越大说明空间自相关越强。当  $I > 0$  表示各省份碳排放分布趋于高一高聚集或低—低聚集，相反则趋于高低离散分布。

全局 Moran' sI 指数的显著性通过 Z 指标检验，表达式为：

$$Z(I) = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{Var}(I)}} \quad (2)$$

式中：E(I)为Moran' sI 的数学期望，Var(I)为Moran' sI 的方差。

由于 Moran' sI 指数只能测算空间关联性，无法对局部的空间聚集特征进行识别。因此本文运用 Getis-Ord 指 $G_i^*$ 数来识别碳排放量的高值、低值聚集区，表达式为：

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij}(d) X_j}{\sum_{j=1}^n X_j} \quad (3)$$

$$Z(G_i^*) = \frac{[G_i^* - E(G_i^*)]}{\sqrt{\text{Var}(G_i^*)}} \quad (4)$$

式中： $E(G_i^*)$ 为 $G_i^*(d)$ 的数学期望， $\text{Var}(G_i^*)$ 为变异系数。 $Z(G_i^*)$ 显著为正则意味着该区域为碳排放的高值聚集区，即热点分布区； $Z(G_i^*)$ 显著为负则意味着该区域为碳排放的低值聚集区，即冷点分布区。

### 1.1.2 地理探测器

地理探测器是基于空间异质性，对空间数据进行分析的新统计工具。若某个自变量对因变量有重要影响，那么二者的空间分布就具有一定相似性<sup>[25]</sup>。因此，通过探测自变量与因变量空间分布的一致性，可以探索自变量对因变量分布的解释程度。当样本量小于 30 时，地理探测器具有更高的统计精度，同时还可以克服传统计量回归不可避免的多重共线性问题。此外，地理探测器对于变量交互作用的识别不仅局限于乘项交互，而是将各因子值和叠加后的值进行对比。地理探测器包含因子探测、交互作用探测、风险区探测、生态探测四个模块。

不同省份碳排放值受到各种社会经济因素的综合影响，基于文献梳理及数据可得性，本文选取人口规模、经济发展、城镇化水平、产业结构、能源强度、固定资产投资、外商投资、环境规制 8 个影响因子。

因子探测主要探测因变量的空间分异性，及各自变量对因变量空间分异的解释程度，用 q 值来表示，表达式为：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (5)$$

式中：q 的取值范围为[0, 1]，值越大说明因子对被解释变量空间分异的解释力度越强，N 表示省份数量，h 为探测因子分层数， $N_h$ 表示层 h 省份数量， $\sigma^2$ 为全国碳排放量的方差， $\sigma_h^2$ 表示层 h 碳排放量的方差。

交互作用探测首先分别计算两个因子  $X_1$  和  $X_2$  对 Y 的 q 值： $q(X_1)$  和  $q(X_2)$ ，然后计算两个因子发生交互作用（叠加  $X_1$  和  $X_2$  两个图层相切所形成的新的多边形分布）的 q 值： $q(X_1 \cap X_2)$ ，并将其与  $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$  值对比，以识别两个因子的相互作用是否会增强

或减弱对因变量的影响<sup>[25]</sup>。

风险区探测主要检验被解释变量在不同区域的均值是否存在显著差异，用统计量 t 来检验，表达式为：

$$t_{\bar{y}_{h=1}-\bar{y}_{h=2}} = \frac{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}}{\left[ \frac{Var(\bar{Y}_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{Var(\bar{Y}_{h=2})}{n_{h=2}} \right]^{1/2}} \quad (6)$$

式中： $\bar{Y}_h$ 表示 h 内的属性均值， $n_h$ 为子区域 h 内样本数量，Var 表示方差。

生态探测通过统计量 F 来比较两个因子对被解释变量空间分布是否有显著差异，表达式为：

$$F = \frac{N_{X1}(N_{X2}-1)SSW_{X1}}{N_{X2}(N_{X1}-1)SSW_{X2}} \quad (7)$$

式中： $N_{X1}$ 、 $N_{X2}$ 分别表示两个因子的样本量， $SSW_{X1}$ 、 $SSW_{X2}$ 分别表示两个因子分层的层内方差和。

## 1.2 数据来源

本研究所需要的各省份二氧化碳排放数据，采用 Shan 等<sup>[33]</sup>的调查结果，相比其他的数据集，该研究更接近于中国官方公布的碳排放数据。其他经济、人口、产业结构等基础数据分别来源于历年各省份统计年鉴和历年《中国环境统计年鉴(1998—2018)》，或者在以上数据基础上计算得出。为了消除价格因素的影响，各省份的人均 GDP 及固定资产投资以 2005 年为基期进行平减处理。此外，需要说明的是，由于地理探测器只能处理类型变量，因此，在分析前需基于自然间断点分级法将自变量进行离散化处理。

## 2 碳排放时空分布特征

### 2.1 碳排放时空分布特征及空间自相关分析

首先，选取样本期内 2000 年、2005 年、2010 年、2017 年的碳排放数据，借助 ArcGIS10.3 软件绘制不同年份的空间分布图进行比较，进而归纳出其时空演变特征，结果如图 1 所示。

可以看出，2000—2017 年我国碳排放呈现稳步持续增长态势，2000 年全国绝大多数省份碳排放量少于 200Mt，其中二分之一省份的碳排放量少于 100Mt。2005—2010 年增长态势最为显著。而到 2017 年，大部分省份碳排放量高于 300Mt，且排放量大于 600Mt 的省份日渐增多。

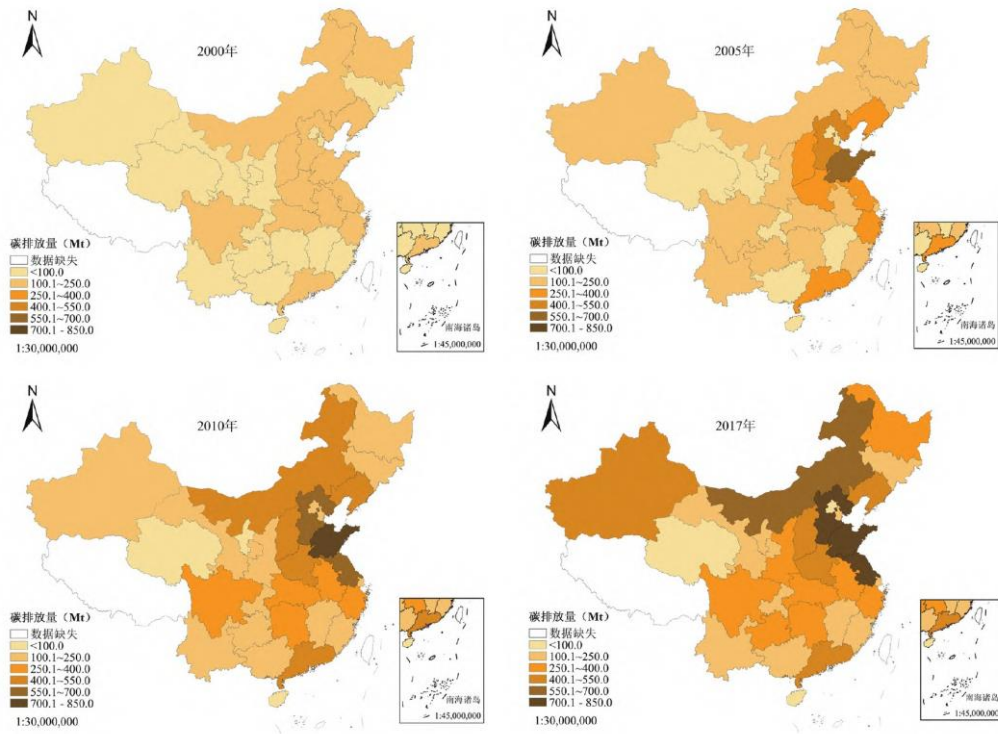


图 1 2000—2017 年中国碳排放总量 (Mt) 空间格局变化

注：本图在自然资源部标准地图基础上制作而成，底图无修改，审图号：GS(2019)1822 号。图 2、图 3 同。

从空间维度看，碳排放量空间格局发生了显著的变化。2000 年及 2005 年碳排放呈现“西低东高”“北高南低”的空间分异特征，而 2010 年及 2017 年碳排放逐渐呈现不平衡的空间分异特征，高碳排放区向东南及西北移动趋势日趋明显。具体来看，2005 年高碳排放省份主要聚集在河北、山东、河南、江苏、广东。2010 年新增了内蒙古、山西、辽宁、四川、湖北等地。2017 年新增了湖南安徽、浙江、新疆，并且 2010—2017 年内蒙古及江苏碳排放迅速增长，成为仅次于山东及河北的碳排放区域，新疆也由低碳排放区发展为较高碳排放区。可以发现，河北、山东及江苏一直是我国二氧化碳排放较高区域，东北地区碳排放增长较为稳定，中部经济区及长三角地区碳排放量增长趋势明显，此外，新疆及内蒙古逐渐成为新的高碳排放聚集区。出现以上现象的原因可以归结为：(1) 山东及河北依托资源优势，是我国主要的工业大省，能源消费结构以煤炭为主，再加上河北承接了大量来自京津的转移产业，导致能源消费及碳排放量大幅上升。(2) 作为我国老牌工业基地，资源枯竭问题日益凸显，东北地区支柱性工业产业下行，使其出现了较长时间的经济下行局面，这也是碳排放增长幅度较小的主要原因。(3) 随着中部崛起战略的实施，中部地区依托承东启西的区位优势，积极发展工业，推动产业承接，工业增速及消费增长均保持较高水平，同时也促进了碳排放的增长。(4) 长三角作为我国经济最活跃区域，经济及人口的快速增长导致该地区碳排放量随着能源消耗急剧增长。此外，长三角一体化战略也推动了资源型产业逐渐向周边江苏、浙江、安徽等区域转移，能源消费也产生了相应的增长。(5) 新疆及内蒙古作为我国主要的煤炭资源富集区，近些年随着煤化工西移项目的稳步推进，成为我国主要的煤炭产区及煤化工产业聚集区，导致近几年碳排放迅速增长。

分别计算全局 Moran' sI 指数，可以看出 Moran' sI 均大于 0，且 Z 值在 0.01 水平上全部显著，说明中国省域碳排放有着显著的正相关性特征，空间分布呈现高一高聚集或低—低聚集。

## 2.2 空间聚集特征

利用 ArcGIS10.3 计算各省的局部空间关联指数  $Getis-OrdG_i^*$ ，并进行可视化，结果如图 2 所示。可以发现中国省域碳排放热点分布大致相同，主要分布于华北地区的京津冀、山西、内蒙古，长三角地区以及山东、河南、辽宁，这也说明这些地区已经形成了持续连片的高排放区域。但是冷点聚集程度却不断下降。

具体来看，2000 年的四川、青海及甘肃地区，由于区位及经济发展条件的约束，整体聚集于冷点区，而随着经济社会发展，2005 年及 2010 年只有青海出现了明显的冷点，2017 年冷点已不存在，这也说明这些地区的碳排放发生了较大变化。对于热点区域，从 2005 年起，内蒙古开始处于热点区域，与 2005 年相比，2010 年热点区域没有显著变化，而 2017 年随着环境治理力度加大，热点区域呈现显著缩小趋势。

### 3 碳排放空间分异影响因素分析

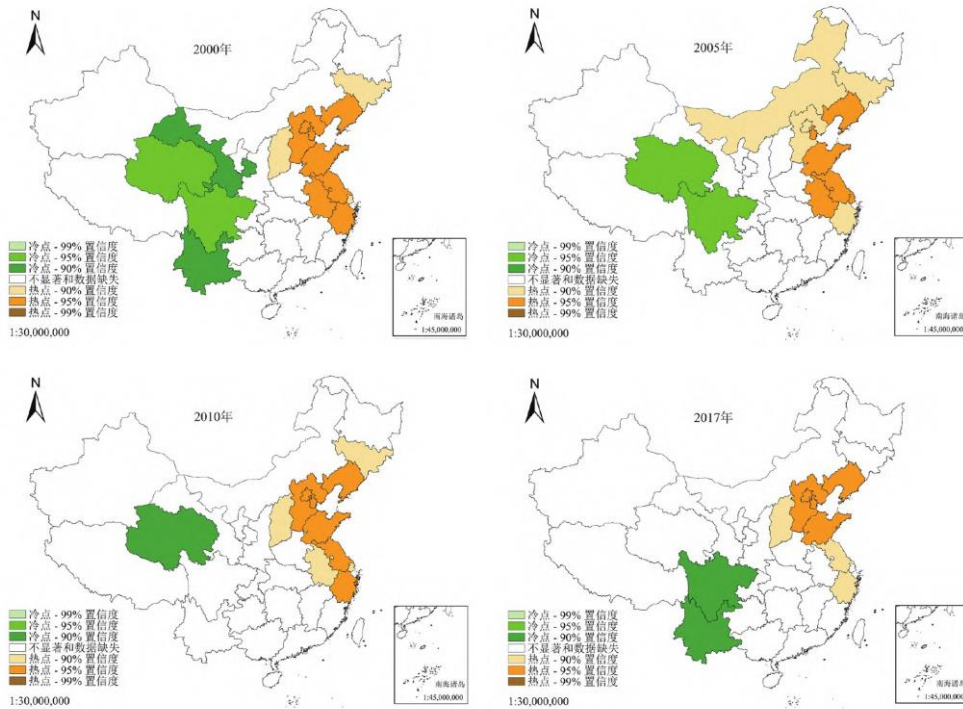


图 2 1997—2017 年全国碳排放冷热点空间分布

选取 2017 年省域碳排放作为研究对象，利用地理探测器揭示各影响因子的作用强度，并对因子之间的交互作用与高风险区进行了分析。

#### 3.1 因子探测及交互作用探测

通过因子探测可以获得各影响因子对碳排放空间分异的影响程度，并以  $q$  值进行度量， $q$  值越大，说明该因素对碳排放空间分异的影响程度越大。

8 个影响因子的  $q$  值均通过了显著性检验，并且作用力从大到小依次为：经济发展 (0.6070) > 环境规制 (0.5768) > 固定资产投资 (0.4567) > 外商投资 (0.4298) > 城镇化水平 (0.4160) > 人口规模 (0.4120) > 能源强度 (0.1715) > 产业结构 (0.0995)。由此可知，经济发展是我国省域碳排放空间分布格局的主导因子，环境规制、固定资产投资、外商投资、城镇化水平、人口规模也发挥着关键

作用，而能源强度及产业结构在碳排放空间格局中发挥的作用最小。

8 个因子在两空间交互叠加后形成了 28 对交互作用。可以看出，每一对影响因子交互作用的  $q$  值皆大于这对影响因子的任一因子的  $q$  值，其中有 12 对交互作用的  $q$  值大于两个影响因子  $q$  值之和，说明它们的交互作用对碳排放分布作用为非线性增强型，而剩余 16 对交互作用的  $q$  值小于两个影响因子  $q$  值之和，说明它们的交互作用对碳排放分布作用为双变量增强型。

具体来看，人口规模和经济发展交互作用的  $q$  值最大 (0.9328)，说明二者在空间叠加后对碳排放空间分布起主导作用，其次为环境规制和能源强度 (0.9035)，第三位为经济发展和固定资产投资 (0.8780)。此外，其他因子交互作用  $q$  值普遍大于 0.7，也有较强的交互作用。这也说明碳排放省域分布是各种经济社会因素共同作用的结果。

### 3.2 风险区探测

首先运用 Jenks 自然突变分类法将碳排放的 8 个影响因子分为 6 个亚区，然后运用地理探测器得到了这 8 个影响因子在不同区域的平均碳排放值。区域碳排放值越高，则说明该区域为影响因子的主要影响区域，即为高风险区。然后运用 ArcGIS10.3 将结果以地图形式展现出来，如图 3 所示。

可以看出，人口对碳排放的主要影响体现在区域 6 中，地图中该因子高风险区主要位于四川、广东、河南、山东、江苏。此外，区域 5 和区域 2 对应的碳排放值仅次于区域 6，其中区域 2 主要集中于新疆、内蒙古、吉林、上海、重庆，区域 5 主要集中于河北、湖北、湖南、安徽。总的来说，人口数量越高的区域碳排放量越大。归其原因，随着人口数量的增长，生活能源需求日益增长，人类经济活动已经成为碳排放增长的主要诱因。

城镇化水平的主要影响区域为 5 区，主要位于内蒙古、重庆、福建。而位于区域 6 的碳排放值尽管仍处于较高值，但是却低于区域 5，在地图上主要位于辽宁、北京、天津、江苏、上海、浙江、广东。这说明城镇化加速发展会导致人口不合理集聚，高耗能的生产及生活方式导致城市环境成为快速城镇化的牺牲品。而随着城镇化发展到一定水平，人力资本积累及生产生活方式的转变显著抑制了碳排放增长。

产业结构的主要影响区域为区域 2，集中分布于我国西部地区，包括内蒙古、甘肃、四川、云南、贵州、广西。此外，区域 3 和区域 5 的碳排放均值水平仅次于区域 2，主要分布于天津、河北、河南、安徽、江西、福建、宁夏、浙江、湖南、广东。但是对于产业结构水平最高的陕西，碳排放水平却仅次于最低值。经济发展的主要影响区域为区域 5 和区域 6，集中于京津、内蒙古及东南沿海省份。可以发现，经济发展水平越高的区域，碳排放水平也越高。近年来中国经济快速发展，但是高投入、高消耗的生产方式使经济面临发展方式粗放、资源环境代价过高的问题。

能源强度的主要影响区域为区域 5，分布在内蒙古、甘肃、山西、贵州。总的来说，区域能源强度越高，碳排放量也越高。随着工业化快速发展，依托资源优势，我国不仅发展了大量本土能源密集型产业，同时还承接了大量国际产业，长期的能源资源粗放利用导致较高的资源消耗，产生了大量的污染排放物。

固定资产投资的主要影响区域为区域 6，集中分布于广东、山东、江苏、浙江。这也印证了固定资产投资是促进碳排放增长的重要驱动力。长久以来中国形成了以投资拉动为主的经济增长结构，大规模的基础设施建设与工业发展刺激了能源消费快速增长，进而推动碳排放量快速增长。

外商投资的主要影响区域为区域 6，分布于天津、江苏、广东。此外可以发现区域 2 也有着较高的碳排放均值，主要分布于内蒙古、山西、贵州。这些省份依托丰富的能源储量，成为外商投资的重要区域，并且大部分投资行业为矿业。总的来说，外商投资对碳排放增长产生显著的积极效应。随着改革开放的不断深入，外商投资企业纷纷进入我国市场，外商投资额不断增长。但

是根据国家统计局 2017 年的数据，外商投资最多的行业为制造业，再加上较低的进入壁垒，使得外资在不断扩张的同时进一步加剧了资源粗放利用，带来了环境问题。

环境规制的主要影响区域为区域 5，分布于天津、山东。可以看出，从区域 1 到区域 5，随着环境规制强度的加强，碳排放量呈现增长趋势，但是对于区域 6 即北京作为环境规制强度最大的省份，碳排放量却最少。这说明除北京外，目前我国的环境规制强度整体上并没有产生预期的抑碳效应。

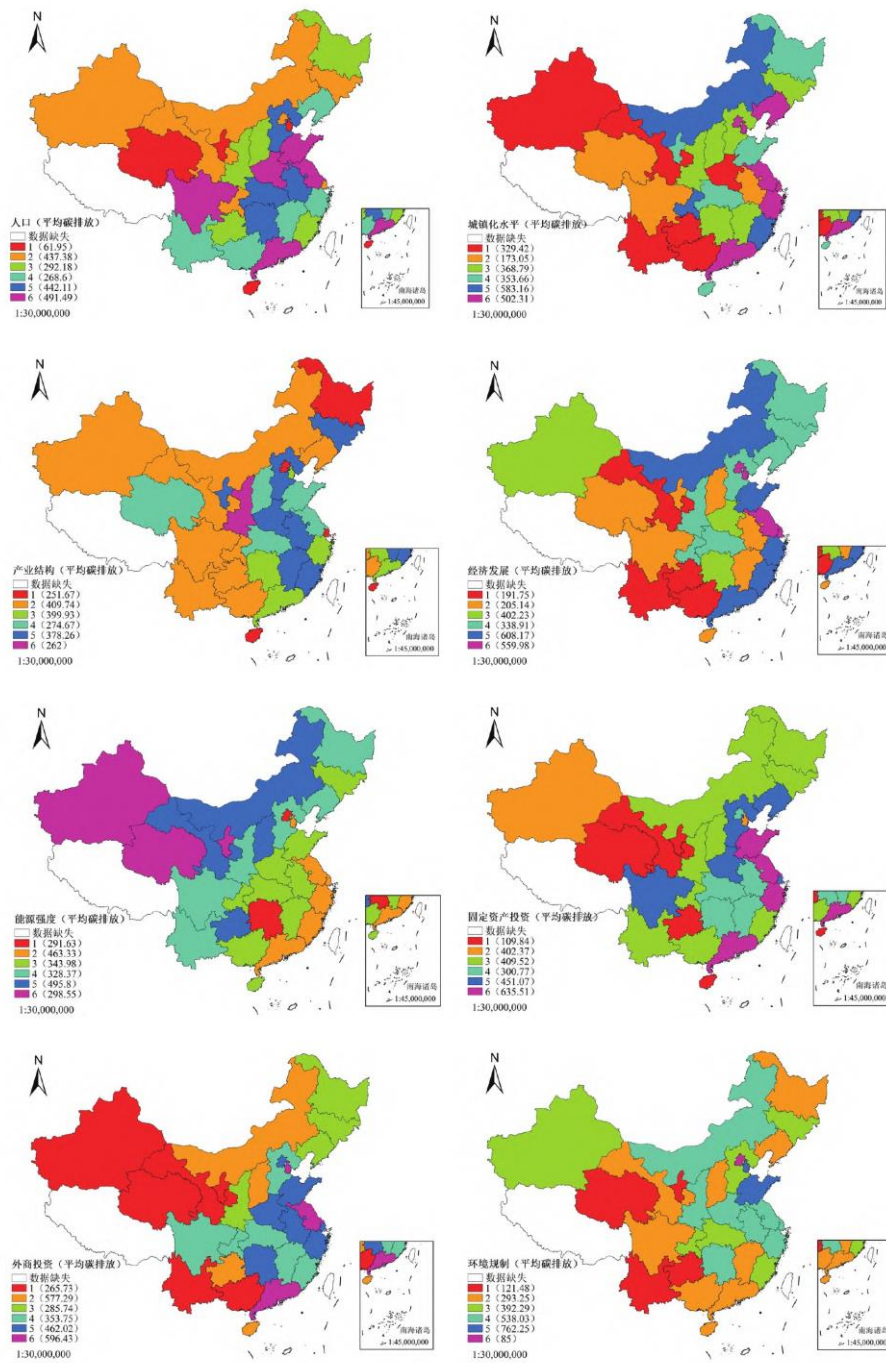


图 3 风险因子分区及对应碳排放数量 (Mt)

## 4 结论与建议

本文基于 1997—2017 年中国 30 个省份的面板数据,运用空间分析法及地理探测器模型分析了我国省域二氧化碳排放的时空分布特征,并分析社会经济因素及其相互作用对碳排放的影响,结果表明:(1)从空间分布来看,近年来我国碳排放整体上呈现增长趋势,并且存在显著的空间分异特征,具体表现为:初期呈现“西低东高”“北高南低”特征,而后向东南及西北移动趋势日趋明显。碳排放冷点区域显著减少,热点区域没有显著变化,主要聚集于华北、长三角、河南、山东等地区。

(2)因子探测结果表明,经济发展、人口规模、城镇化水平、产业结构、能源强度、固定资产投资、外商投资及环境规制均与二氧化碳排放正相关,其中,经济发展、环境规制及固定资产投资是主要解释因子,产业结构的解释力度最小。(3)交互作用探测结果表明,碳排放增长是社会经济等多种要素共同作用的结果,双因子交互作用对碳排放的影响均大于单因子的影响,其中人口规模与经济发展的交互效应最大,其次是环境规制与能源强度、经济增长与固定资产投资。(4)风险区探测结果表明,经济发展、人口规模、产业结构、能源强度、固定资产投资、外商投资、环境规制的高值区,碳排放量均处于较高水平。只有城镇化水平发展到一定阶段才起到抑制碳排放的效应。总体来看,京津冀、山东、江苏、内蒙古、广东、四川等地区作为二氧化碳排放的高风险区,是各种社会经济因素共同作用的结果。

为尽早实现碳达峰、碳中和的目标,本文提出以下建议:首先,针对碳排放呈现的空间聚集特征,加强区域尤其是高碳排放区域合作减排势在必行,应推动区域企业开展技术创新及环保治理合作,构建区域间污染核算体系,开展区域联合治理,实现互利共赢。其次,针对碳排放呈现的显著空间分异,对于碳排放高值、高增长区域,必须重视碳排放绝对量的控制,同时不同社会经济因素对不同区域碳排放发挥的作用不尽相同,因此需因地制宜采取减排措施。如西部地区尤其是新疆、内蒙古等富煤省份,应以优化产业结构、降低能源强度为重心,积极推进煤炭清洁生产及低碳高效利用;对于东部沿海地区的广东、江苏等省份,应加快转变经济增长方式,优化产业结构,不断拓展生产及生活性服务业空间,并且推进固定资产投资结构调整。最后,对于目前环境规制没有发挥有效碳减排效应的区域,应继续加大环境规制力度,建立严格政府考核标准,采取差异化的环境规制工具,积极引导企业创新投入向环保技术转移。

### 参考文献:

- [1]IPCC. Special report on global warming of 1.5°C[R]. Korea: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018.
- [2]International Energy Agency. CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion, highlights[EB/OL]. (2015-11-20). <http://indiaenvironmentportal.org.in/content/421473/co2-emissions-from-fuel-combustion-highlights-2015/?page=>.
- [3]王瑛, 何艳芬. 中国省域二氧化碳排放的时空格局及影响因素[J]. 世界地理研究, 2020(3): 512-522.
- [4]冯宗宪, 高赢. 中国区域碳排放驱动因素、减排贡献及潜力探究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2019(4): 13-20.
- [5]Zhang Y Q, Liu C G, Chen L, et al. Energy-related CO<sub>2</sub> emission peaking target and pathways for China's city: A case study of Baoding City[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 226, 471-481.
- [6]Wu L, Liu S F, Liu D L, et al. Modelling and forecasting CO<sub>2</sub> emissions in the BRICS (Brazil, Russia, India, China, and South Africa) countries using a novel multi-variable grey model[J]. Energy, 2015, 79: 489-495.
- [7]Fang K, Tang Y, Zhang Q, et al. Will China peak its energy-related carbon emissions by 2030? Lessons from 30 Chinese provinces[J]. Applied Energy, 2019, 255: 1-12.

- 
- [8]徐斌, 陈宇芳, 沈小波. 清洁能源发展、二氧化碳减排与区域经济增长[J]. 经济研究, 2019(7): 188-202.
- [9]Yang L, Xia H, Zhang X, et al. What matters for carbon emissions in regional sectors? A China study of extended STIRPAT model[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 180:595-602.
- [10]Shao S, Liu J, Geng Y, et al. Uncovering driving factors of carbon emissions from China's mining sector[J]. Applied Energy, 2016, 166:220-238.
- [11]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.
- [12]Su K, Wei D Z, Lin W X. Influencing factors and spatial patterns of energy-related carbon emissions at the city-scale in Fujian province, Southeastern China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 244:118840.
- [13]Zhang X, Geng Y, Shao S, et al. How to achieve China's CO<sub>2</sub> emission reduction targets by provincial efforts—An analysis based on generalized Divisia index and dynamic scenario simulation[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 127:109892.
- [14]刘玉珂, 金声甜. 中部六省能源消费碳排放时空演变特征及影响因素[J]. 经济地理, 2019(1): 182-191.
- [15]孙作人, 周德群. 基于迪氏指数分解的我国碳排放驱动因素研究——人口、产业、能源结构变动视角下的解释[J]. 经济学动态, 2013(5): 54-61.
- [16]Wang S, Wang J, Li S, et al. Socioeconomic driving forces and scenario simulation of CO<sub>2</sub> emissions for a fast-developing region in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 216:217-229.
- [17]Xie Q, Wang X, Cong X. How does foreign direct investment affect CO<sub>2</sub> emissions in emerging countries? New findings from a nonlinear panel analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 249:119422.
- [18]刘清春, 孔令群, 安泽扬. 中国制造业能源相关的碳排放因素分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2014(S2): 14-18.
- [19]平智毅, 吴学兵, 吴雪莲. 长江经济带碳排放效率的时空差异及其影响因素分析[J]. 生态经济, 2020(3): 31-37.
- [20]李庆. 长江经济带城市二氧化碳排放空间异质性分析[J]. 生态经济, 2020(12): 21-26, 33.
- [21]张赫, 彭千芮, 王睿, 等. 中国县域碳汇时空格局及影响因素[J]. 生态学报, 2020(24): 8988-8998.
- [22]刘汉初, 樊杰, 曾瑜哲, 等. 中国高耗能产业碳排放强度的时空差异及其影响因素[J]. 生态学报, 2019(22): 8357-8369.
- [23]王霞, 张丽君, 秦耀辰, 等. 中国高碳制造业碳排放时空演变及其驱动因素[J]. 资源科学, 2020(2): 323-333.
- [24]单子丹, 项朝霞, 李云竹. 低碳经济视角下区域碳排放时空差异与驱动因素分析——基于内蒙古自治区 101 个县域截面数据的空间计量研究[J]. 科技与管理, 2020(2): 1-8.

- 
- [25]王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017(1): 116-134.
- [26]Bai L, Jiang L, Yang D, et al. Quantifying the spatial heterogeneity influences of natural and socioeconomic factors and their interactions on air pollution using the geographical detector method: A case study of the Yangtze River Economic Belt, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 232:692-704.
- [27]柏玲, 罗溢斌, 姜磊, 等. 中国城市 NO<sub>x</sub> 排放的时空特征与驱动因素: 基于空间分异视角[J]. 环境科学学报, 2020(2): 687-696.
- [28]胡雪瑶, 张子龙, 陈兴鹏, 等. 县域经济发展时空差异和影响因素的地理探测——以甘肃省为例[J]. 地理研究, 2019(4): 772-783.
- [29]王楠楠, 李俊明, 段琳琼, 等. 长三角和中原城市群城市扩张时空特征及驱动力比较研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2017(6): 681-692.
- [30]王录仓, 武荣伟, 李巍. 中国城市群人口老龄化时空格局[J]. 地理学报, 2017(6): 1001-1016.
- [31]Tobler W. On the first law of geography: A reply[J]. Annals of the Association of American Geographers, 2004, 94(2): 304-310.
- [32]杨振兵, 邵帅, 杨莉莉. 中国绿色工业变革的最优路径选择——基于技术进步要素偏向视角的经验考察[J]. 经济学动态, 2016(1): 76-89.
- [33]Shan Y, Huang Q, Guan D, et al. China CO<sub>2</sub> emission accounts 2016-2017[J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 54-63.