

# 中国建筑业碳排放强度的空间特征与影响因素分析

徐水太<sup>1</sup>, 李晞薇<sup>1\*</sup>, 董信<sup>2</sup>

1. 江西理工大学经济管理学院, 赣州 341000

2. 江西理工大学电气工程与自动化学院, 赣州 341000

**摘要** 对中国30个省份建筑业碳排放强度进行测算的基础上, 利用地理统计方法分析中国建筑业碳排放强度的空间特征, 进一步建立随机森林模型动态量化识别碳排放强度的关键影响因素并分析其影响规律。结果显示: 2010—2019年中国建筑业碳排放强度整体空间格局显著空间自相关, 呈现波动上升趋势; 中国30个省份建筑业碳排放强度在局部空间格局上存在较为显著的南北分异; 热点区呈自西南向华北转移态势, 冷点区则呈华东向华南转移态势; 建筑业发展过程中, 建筑业材料消耗水平、城市化率、人口流动、能源消耗水平对建筑业碳排放强度影响显著。提出应从不同区域的碳排放空间特性、能源利用、人口集聚等多角度制定差异化碳减排政策。

**关键词** 建筑业; 碳排放强度; 双碳目标

随着城镇化的快速发展和工业化的不断推进, 带动了以房地产为首的固定资产投资的高速增长, 同时催生建筑业的迅猛发展和扩张。建筑业作为中国重要的固定资产投资经济增长行业, 是各行业赖以发展的先导性产业。同时, 建筑业也是高污染、高能耗的代表, 是中国碳排放的主要来源<sup>[1]</sup>。根据中国建筑节能协会统计报告, 2020年中国建筑

全过程碳排放总量为50.8亿t, 占全国碳排放的一半以上<sup>[2]</sup>。在党的十八大提出的大力推进生态文明建设、党的十九大提出的建设美丽中国以及2020年习近平提出的“双碳”目标承诺的时代背景下, 建筑业面临巨大的碳减排压力。建筑作为全球能源消耗和二氧化碳排放的三大部门(工业、交通业、建筑业)之一<sup>[3]</sup>, 将很大程度决定未来能否实现“双碳”

收稿日期: 2023-05-14; 修回日期: 2023-09-25

基金项目: 江西省高校人文社会科学重点研究基地项目(JD23043)

作者简介: 徐水太, 副教授, 研究方向为建筑经济与可持续发展, 电子信箱: stxu@jxust.edu.cn; 李晞薇(通信作者), 硕士研究生, 研究方向为建筑低碳经济, 电子信箱: 2744940975@qq.com

引用格式: 徐水太, 李晞薇, 董信. 中国建筑业碳排放强度的空间特征与影响因素分析[J]. 科技导报, 2024, 42(6): 103-111;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.06.011

目标<sup>[4]</sup>。虽然中国建筑业近些年由于房地产萧条导致经济增速放缓,但是如何能在推动经济发展的情况下通过建筑业发展来完成节能减排目标,是亟待解决的问题。因此,准确测算建筑业的碳排放强度,识别碳排放强度的影响因素,为中国碳排放政策的制定和减少碳排放提供科学依据,具有重要的现实和理论意义。

1 研究现状

随着环境污染的加剧,近年来关于建筑业碳排放的研究不断涌现。当前国内外关于建筑业碳排放的研究主要集中在碳排放量的测算<sup>[5-7]</sup>、影响因素分解<sup>[8-10]</sup>、碳排放预测<sup>[5]</sup>等方面。建筑业碳排放测算可分为宏观层面(如针对国家<sup>[11-12]</sup>、省域<sup>[13]</sup>、市域<sup>[14]</sup>进行碳排放的测算)以及微观层面的测算(如某类建筑物<sup>[15]</sup>或某个建筑物的测算<sup>[16]</sup>)。涉及的测算方法包括投入产出法<sup>[17]</sup>、全生命周期法<sup>[18]</sup>等。在影响因素研究上,能源结构、产业规模对建筑业碳排放的影响已成为共识<sup>[19-20]</sup>,另外,还有学者认为节能技术、低碳化水平等也会对此产生影响<sup>[21]</sup>。对于建筑业碳排放的预测多基于情景模拟分析法进行,并预测绿色建筑、近零能耗建筑对未来建筑业碳排放起重要作用<sup>[22-23]</sup>。

综上所述,较多学者针对建筑业碳排放开展的研究在理论和实证等方面奠定了一定基础。然而值得注意的是,目前在建筑领域中碳排放的研究多选用碳排放量为研究对象,难以全面反映建筑业碳排放水平;其次,中国幅员辽阔,不同地区的建筑业

碳排放空间特征差异较大,空间特征与区域差异尚缺乏深入讨论;且已有研究多使用传统的多元回归分析方法<sup>[24-26]</sup>进行影响因素的研究,对影响程度及时序演进规律刻画略显不足。鉴于此,本研究将建筑业碳排放强度作为研究对象,运用IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会,Intergovernmental Panel on Climate Change,简称IPCC)系数法及强度计算方法构建了中国建筑业碳排放强度计算模型,基于地理统计方法和随机森林模型从时空层面上进行空间特征分析并探讨各因素与碳排放强度之间的演变关系,以期为中国建筑业碳减排提供指导参考和理论支撑。

2 研究方法数据来源

2.1 碳排放测算

2.1.1 建筑业碳排放测算

考虑到建筑业与其他产业关联性强的特点,将建筑业碳排放分为直接碳排放和间接碳排放。直接碳排放为建筑业直接消耗的一次能源所产生,间接碳排放与其他上下游企业密切相关,表示为建筑材料生产、运输过程中所释放的二氧化碳。借鉴金柏辉等<sup>[27]</sup>研究成果,在充分考虑数据可获得性的前提下,将直接碳排放源确定为建筑全生命周期过程中涉及的原煤、汽油、煤油等8种能源,每种能源的折标准煤系数和碳排放系数如表1所示;将间接碳排放源确定为建筑全过程中主要使用到的玻璃、木材、水泥、铝材、钢材5大建筑材料,每种建筑材料的碳排放系数和回收系数如表2所示。

表1 不同能源种类折算标准煤系数及其碳排放系数

| 能源种类                           | 原煤     | 汽油     | 煤油     | 柴油     | 燃料油    | 液化石油气  | 天然气    | 电力     |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 折算标准煤系数(kgce/kg)               | 0.7143 | 1.4714 | 1.4714 | 1.4571 | 1.4286 | 1.7143 | 1.3300 | 0.1229 |
| 碳排放系数(kgCO <sub>2</sub> /kgce) | 0.7559 | 0.5538 | 0.5714 | 0.5921 | 0.6185 | 0.5042 | 0.4483 | 0.2900 |

表2 主要建筑材料的碳排放、回收系数

| 建筑材料  | 水泥          | 玻璃           | 钢材          | 铝材        | 木材                       |
|-------|-------------|--------------|-------------|-----------|--------------------------|
| 碳排放系数 | 0.815 kg/kg | 0.9655 kg/kg | 1.789 kg/kg | 2.6 kg/kg | -842.8 kg/m <sup>3</sup> |
| 回收系数  | —           | 0.7          | 0.8         | 0.85      | 0.2                      |

利用 IPCC 系数法对 2010—2019 年中国 30 个省建筑碳排放进行了测算。建筑业碳排放计算模型为

$$E = E_D + E_M = \frac{44}{12} \sum_{i=1}^8 C_i \times f_i \times v_i + \sum_{j=1}^5 M_j \times Q_j \times (1 - \alpha_j) \quad (1)$$

式中,  $E$  表示建筑业碳排放量,  $E_D$  表示建筑业直接碳排放量,  $E_M$  表示建筑业间接碳排放量,  $C_i$  表示第  $i$  种能源消耗量,  $f_i$  表示第  $i$  种能源折算为标准煤系数,  $v_i$  表示第  $i$  种能源碳排放系数,  $M_j$  表示为第  $j$  种建筑材料消耗量,  $Q_j$  表示第  $j$  种能源碳排放系数,  $\alpha_j$  表示其回收系数。

### 2.1.2 建筑业碳排放强度测算

相比于建筑业碳排放总量而言, 建筑业碳排放强度更能刻画出一个国家或一个地区行业发展水平。建筑业碳排放强度表示为单位建筑业生产总值带来的碳排放增长, 计算式为:

$$\sigma_i = \frac{P_i}{G_i} \quad (2)$$

式中,  $\sigma_i$  表示第  $i$  年建筑业碳排放强度,  $P_i$  表示第  $i$  个省份的建筑业碳排放量( $t$ ),  $G_i$  表示第  $i$  个省份的建筑业生产总值(万元)。

## 2.2 时空分析模型

### 2.2.1 全局空间自相关性分析

各省由于经济结构、资源禀赋等因素的不同, 可能导致建筑业碳排放强度在空间上呈现不同的空间特性, 为避免由于松紧不一的碳减排策略而导致“碳泄漏”风险, 在碳减排策略的制定上需要考虑空间上的异质性<sup>[28]</sup>。空间相关性分析能一定程度反映中国建筑业碳排放强度的空间相关性和聚类趋势, 利用 Moran's  $I$  指数可量化离散程度, 判断其在空间上是否出现了集聚或异常值, Moran's  $I$  指数计算公式为

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (3)$$

式中,  $n$  表示研究对象个数,  $x_i$  和  $x_j$  表示  $i$  省份和  $j$  省份碳排放强度,  $\bar{x}$  为 30 个省份碳排放强度均值,  $W_{ij}$

表示空间权重矩阵(相邻  $W_{ij}=1$ ; 不相邻  $W_{ij}=0$ )。具体步骤如下。

数据处理: 首先运用 Excel 软件整理包含 2010—2019 年中国 30 个省份建筑业碳排放指标数据并导入 ArcGIS 软件中, 建立个人地理数据库, 加载至中国省级行政区划矢量图。

空间权重矩阵的选择: Moran's  $I$  的相关计算在 ArcGIS10.8 软件中 ArcToolbox—空间统计工具—分析模式—空间自相关(Moran  $I$ )下进行。本研究使用 Queen 邻接矩阵, 即当区域  $i$  与区域  $j$  存在共同的区域边界或顶点边界时, 区域间相邻  $W_{ij}=1$ , 否则  $W_{ij}=0$ 。

空间相关性分析: 根据 ArcGIS 软件计算得到的 Moran's  $I$  指数及相应的  $P$  值和  $Z$  值进行全局空间自相关性分析。其中, Moran's  $I$  指数取值范围为  $[-1, 1]$ 。当 Moran's  $I$  指数小于 0, 表示空间上呈负相关, 即相邻或邻近的省份碳排放强度相异, 越接近 -1 在空间上分布越不集中, 空间差异越大; 当 Moran's  $I$  指数大于 0 时, 表示在空间上呈正相关, 即相邻或邻近的省份碳排放强度相关, 其值越接近 1, 表明其碳排放强度分布聚集, 空间关联性越大。Moran's  $I$  指数等于 0, 表示空间上不具有相关性, 且建筑业碳排放强度趋于随机分布。

显著性评价: 以  $Z$  检验和  $P$  值进行显著性评价,  $P$  值小于 0.05 则认为建筑业碳排放强度的 Moran's  $I$  指数显著;  $Z$  值越大, 空间自相关性越高。

### 2.2.2 局部空间自相关性分析

中国建筑业碳排放强度具有复杂的空间关联性, 利用热点分析  $G_i^*$  指数进一步揭示省域范围内的建筑业碳排放强度空间集聚情况。当  $G_i^*$  指数为正, 说明  $i$  省周围碳排放强度相对较高为热点区; 反之, 则说明周围碳排放强度较低, 为冷点区。其公式为

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} X_j}{\sum_{j=1}^n X_j} \quad (4)$$

式中,  $W_{ij}$  表示空间权重矩阵(相邻  $W_{ij}=1$ ; 不相邻  $W_{ij}=0$ );  $X_i$  表示为  $i$  省的建筑业碳排放强度。

2.3 建筑业碳排放影响因素分析

建筑业碳排放数据部分的缺少会对影响因素的识别结果造成影响;传统的多元回归分析预设条件过多,会造成多重共线性和自由度下降等问题;且2010—2019年建筑业碳排放数据及影响因子样本量过大,其他机器学习算法模型对于高维度数据的处理较慢。为了解决上述问题,本研究建立随机森林模型来动态识别关键影响因素。随机森林模型是Breiman<sup>[29]</sup>于2001年构建的一种通过集成学习的思想将多棵树集成的一种算法,相较于传统回归模型和其他机器学习算法,具有独特的算法优势。随机森林模型具有很强的抗干扰性,对缺失的数据和非平衡的数据处理比较稳健,能够提供相对精度较高的预测结果<sup>[30-31]</sup>;且在处理高维度数据时,不对数据进行假设,能够避免多重共线问题,具有容易实现和解释性强的特点<sup>[32-33]</sup>。

本研究以30个省域数据为样本,利用Python语言,通过建立随机森林模型,将计算出的各省建

筑业碳排放强度作为被解释变量,选取的8个影响因素作为被解释变量,对构建的随机森林模型进行运算,进而基于增量均方误差(IncMSE)分析、增量节点纯度(IncNodePurity)分析影响因子驱动力大小,其公式<sup>[34]</sup>为

$$im_i = \frac{1}{nt} \sum_{v \in S_{ii}} Gain(X_i, v)$$

(5)

式中, $im_i$ 表示 $X_i$ 对模型的贡献,表示为IncMSE。IncMSE为随机森林模型的均方误差的增量,即变量随机取值后,模型的均方误差相对于原来均方误差的增量,IncMSE值越大表明变量越重要; $Gain(X_i, v)$ 表示 $X_i$ 在分裂节点 $v$ 的基尼信息增益; $S_{ii}$ 表示在 $nt$ 棵回归树的随机森林中被 $X_i$ 分裂的节点集合。

2.4 数据来源和变量说明

根据已有研究<sup>[35-37]</sup>,考虑到人口、经济发展、能源消耗水平和建筑业自身发展情况等因素对建筑业碳排放强度的影响,结合区域数据可获取性,本研究选取变量如表3所示。

表3 建筑业碳排放强度影响因素及解释说明

| 变量       |         | 解释说明             | 单位              |
|----------|---------|------------------|-----------------|
| 人口       | 人口数量    | 各省份人口数量          | 万人              |
|          | 人口流动    | 各地区年末城镇人口比重      | %               |
| 经济发展水平   | 收入      | 各地区人均可支配收入       | 元               |
| 其他行业发展水平 | 第三产业增加值 | 第三产业增加值占地区生产总值比重 | %               |
| 能源消耗水平   | 一次能源消耗量 | 8种主要能源折算成标准煤消耗总量 | 万t              |
|          | 建筑业材料消耗 | 5种主要建筑材料消耗量      | 万t              |
| 技术水平     | 技术装备率   | 建筑业企业技术装备率       | 元/人             |
| 建筑业发展水平  | 城市化率    | 城市建成区面积          | km <sup>2</sup> |

选取2010—2019年中国30个省、市、自治区截面数据进行计算(港、澳、台、西藏数据缺失)。其中,人口流动及人口数量、人均可支配收入、第三产业增长值数据来自《中国统计年鉴》;第三产业增加值、技术装备率、建筑业材料消耗、城市化率数据来自《中国建筑业统计年鉴》。根据《中国能源统计年鉴》提供的建筑业化石燃料消耗数据及国家能源局提供的能源转换二氧化碳系数计算出了建筑业碳排放量。

3 实证结果与分析

3.1 建筑业碳排放强度空间格局演变分析

3.1.1 全局自相关分析

借助ArcGIS软件,分别测得2010—2019年中国30个省份建筑业碳排放强度Moran's  $I$ 指数(表4)。2010—2019年中国建筑业碳排放强度Moran's  $I$ 指数均大于零,除2015年( $Z$ 值小于1.69; $P$ 值大于0.1)以外均通过了90%以上的显著性检验。

这表明中国建筑业碳排放强度 2010—2019 年在空间上呈现空间自相关性,即相邻或相近省份的建筑业碳排放强度存在相关关系。研究期间,中国建筑业碳排放强度 Moran's *I* 指数均值为 0.22,空间相关程度较弱。总体来看,碳排放强度空间集聚性不

强,一定程度上表明,建筑业碳排放强度既受周边省份的影响又与自身经济发展水平、资源禀赋等有关。在研究期内,Moran's *I* 指数呈减弱—增强的动态上升趋势,尤其从 2013 年开始,集聚程度进一步提高。

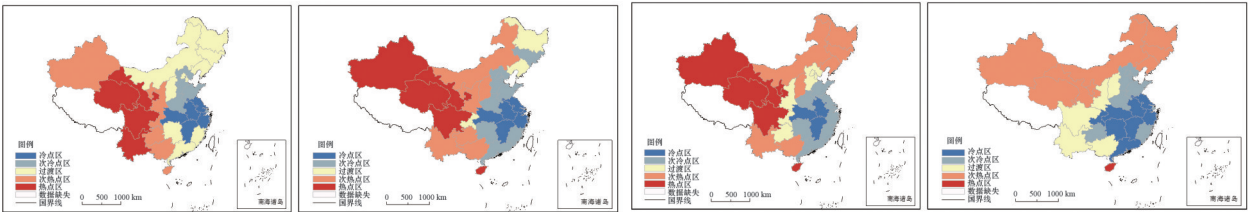
表 4 2010—2019 年建筑业碳排放强度全局 Moran's *I* 指数

| 指数               | 2010 年 | 2011 年 | 2012 年 | 2013 年 | 2014 年 | 2015 年 | 2016 年 | 2017 年 | 2018 年 | 2019 年 |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Moran's <i>I</i> | 0.3706 | 0.3308 | 0.2604 | 0.1420 | 0.1687 | 0.1047 | 0.1597 | 0.1607 | 0.2390 | 0.2255 |
| Z 值              | 3.4788 | 3.1548 | 2.5243 | 1.6942 | 1.7471 | 1.1820 | 1.7243 | 1.9059 | 2.6003 | 2.5496 |
| P 值              | 0.0005 | 0.0016 | 0.0116 | 0.0902 | 0.0806 | 0.2372 | 0.0847 | 0.0566 | 0.0093 | 0.0107 |

3.1.2 局部自相关分析

为进一步研究建筑业碳排放强度在局部空间演变规律和区域差异,利用 ArcGIS 软件进行空间冷热点分析,进一步测算出 2010—2019 年建筑业

碳排放强度的  $G_i^*$  指数,并通过自然断点法将  $G_i^*$  指数由高到低分为热点区、次热点区、过滤区、次冷点区、冷点区 5 类,碳排放强度局部空间演变趋势如图 1 所示。



注:基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2020)4619 号,底图无修改

图 1 2010—2019 年建筑业碳排放空间格局

从整体上来看,2010—2019 年建筑业碳排放强度空间格局变化不大,存在明显的南北分异和东西分异,热点区主要集中在华北和西南地区,冷点区主要集中在华南和华东地区。从局部上来看,空间上存在明显变化,其中热点区域上呈现西南向华北方向的转移,区域范围逐渐缩小,呈现减弱趋势;冷点区域呈现华东向华南方向的转移,区域范围不断扩大,呈现增强趋势。这表明中国建筑业碳排放强度整体呈下降趋势,与中国走绿色低碳高质量发展道路息息相关。

3.2 碳排放强度影响因素分析

本研究首先对影响因素进行重要性特征排序,再通过绘制偏依赖图对预测变量与建筑业碳排放强度之间的影响时序变化进行可视化表达。在影

响因素特征重要性排序上,利用 IncMSE 和 Inc-NodePurity 两个指标来判断预测变量的重要性得分,IncMSE 与 IncNodePurity 的值越大,说明该影响因素子越重要。

随机森林模型结果显示,IncMSE 和 Inc-NodePurity 两种方法进行特征重要性排序结果相差不大,如图 2 所示。建筑业材料消耗量、城市化率、年末城镇人口比重、一次能源消耗量在两种测度方法中均排名靠前。究其原因,作为建筑业碳排放量的直接来源和间接来源,建筑业能源消耗与建筑材料消耗是建筑业碳排放结构演变最主要的驱动因素;其次,人口作为经济增长的原动力,其分布会对经济产出和城镇化过程起到推动作用,从而影响建筑碳排放强度的大小<sup>[38]</sup>。各影响因子对建筑

业碳排放强度的影响关系如图3。本研究选取排名前四项影响因子利用偏依赖图分析其与建筑业碳排放强度的边际效应。

1) 建筑业材料消耗水平。建筑材料消耗量对建筑业碳排放强度的影响总体呈现先下降后趋于平稳,建筑业材料消耗达到4亿t时,对强度的影响趋于稳定。从发展历史来看,中国城镇化进程大致可分为起步发展阶段、快速发展阶段、平稳发展阶段和存量发展阶段<sup>[39]</sup>。在快速发展阶段采取的是粗放式发展,高投入、高消耗投入驱动建筑业快速

发展,导致过度消耗和环境污染,建筑业碳排放强度升高;随着城镇化水平的进一步发展,发展方式随之发生转变,逐渐由高速发展转为追求高质量发展,建筑业生产要素的投入减少,碳排放强度逐渐降低。

2) 建筑业发展水平。城市化率对建筑业碳排放强度的影响呈波动下降后趋于平稳态势。当城市化率低于2000 km<sup>2</sup>时,其对建筑业碳排放的影响呈阶梯式下降趋势;当城市化率达到2000 km<sup>2</sup>后,其对建筑业碳排放强度的影响趋于一个平稳的状

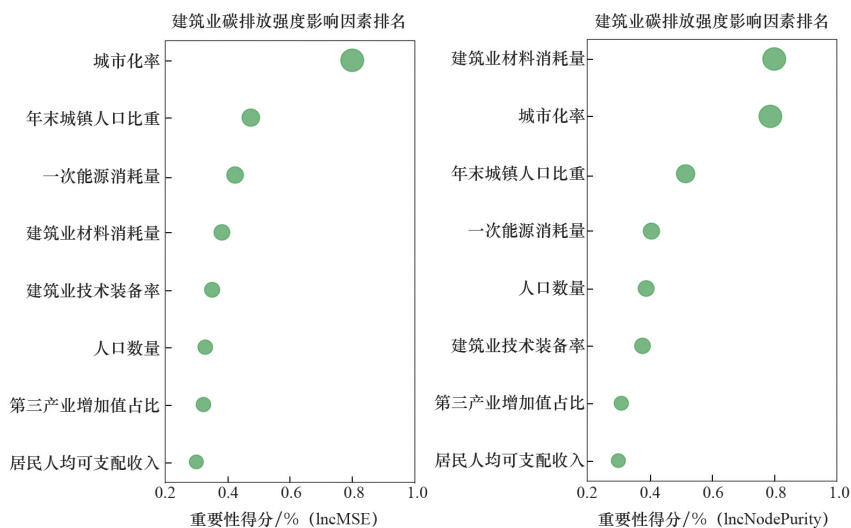


图2 2010—2019年建筑业碳排放强度影响因素排序

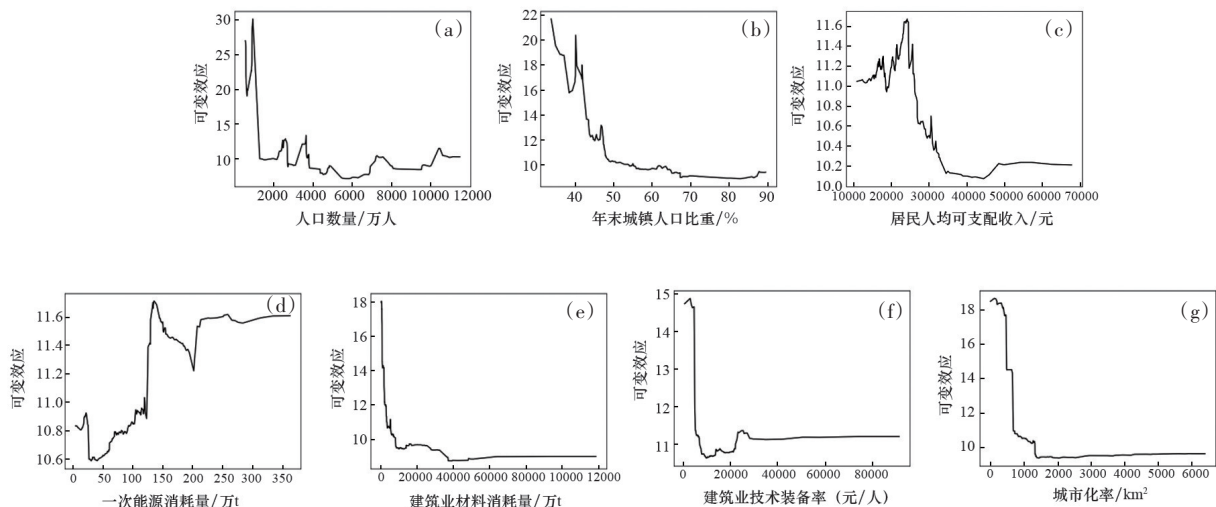


图3 各影响因子对建筑业碳排放强度影响程度

态。从模型的结果可以看出,城市城镇化发展到一定的水平后,有利于降低建筑业碳排放强度。总的来说,建筑业碳排放强度是建筑业发展的产物,当建筑业发展到一定的规模时,建筑业碳排放量趋于稳定,经济稳步上升,碳排放强度将降低。如城市化率更高的华东地区属于碳排放强度冷点区。

3) 人口流动。根据已有研究,人口流动是经济增长和推动城镇化加速发展的驱动因素<sup>[40-42]</sup>,城镇化不仅包括人口从农村向城市集聚的过程,也包括流入人口的生活和生产方式的城镇化过程,国内大规模的流动人口对中国可持续城镇化进程产生重要影响<sup>[43]</sup>。从图3(b)上看,年末城镇人口比重对建筑业碳排放强度的影响呈先短暂上升再阶梯式下降最后趋于平稳。当城镇人口比重小于45%时,短时间内人口快速向区域集聚对建筑业碳排放强度具有促进作用,然而,当涌入城市人口达过一定的值时,随着人口的增加,带动着区域的发展,使得碳排放强度逐渐降低,对建筑业碳排放强度的影响开始减弱。

4) 能源消耗水平。一次能源消耗量对建筑业碳排放强度的影响呈先阶梯式上升再波动下降,最后趋于较平稳态势。当一次能源消耗量低于150万t时,大量的能源消耗会带动建筑业碳排放的增长,对强度的影响持续增强。然而,能源消耗达到一定的值时,建筑业发展规模效应开始显现,经济开始快速增长,影响趋势也从上升转为下降。但随着能源消耗量的增加,会导致环境调节能力的失衡,出现小幅度的反弹。

## 4 结论与建议

基于ArcGIS软件进行的空间特征分析及随机森林模型的影响因素识别与量化,利用随机森林模型动态分析了建筑业碳排放强度影响因素,并对各影响因素与建筑业碳排放强度之间的非线性关系进行了可视化分析,得出3点结论。第一,中国建筑业碳排放强度整体空间格局表现出集聚特征,空间自相关性呈波动上升趋势,但相关性较弱,表明建筑业碳排放强度受周边省份的影响又与自身发

展水平等有关。第二,在研究期内,局部空间格局上存在明显的南北分异和东西分异,其中,碳排放强度热点区集中在华北和西南区域,冷点区集中在华南和华东区域,热点区呈北上转移态势,冷点区呈南下扩张趋势。第三,关键影响因素中,建材消耗量、城市化率、年末城镇人口比重、一次能源消耗量对建筑业碳排放强度影响显著,不同影响因素对建筑业碳排放强度作用方向存在差异。建筑业碳排放强度与建材消耗量、城市化率、年末城镇人口比重、一次能源消耗量呈非线性响应关系,其中建材消耗量、城市化率、年末城镇人口比重对建筑业碳排放强度的影响重要性随自身的增长逐渐减弱,而一次性能源消耗量的影响重要性则呈正向加强。

根据以上结论,提出3点政策建议。第一,加强区域间协作,推动建筑业低碳高质量发展。合理利用建筑业碳排放强度的空间关联性特征,在制定环境政策时加强顶层设计,利用好周边省份的空间辐射效应,加强省际的协调合作。鼓励各省政府、建筑企业加强地区合作与技术交流,打破地理空间关系的壁垒,提高碳排放冷点区省份的带动作用。第二,分区域推进建筑业碳排放强度削弱,制定差异化碳减排策略。在制定相关政策时,应该根据碳排放强度冷热点区域分布情况,重点着力削减碳减排潜力大的热点区域,强化碳排放热点区域碳排放责任,具体包括关中城市群、宁夏沿黄城市群等。通过政策扶持,优化碳排放热点区域的产业结构,挖掘碳减排潜能。同时,应依据各地区经济发展阶段,结合当地产业发展特点,及时进行建筑业产业结构的调整与经济发展方式的转型升级,将碳减排目标分区域合理分解,实现中国碳排放强度整体下降。第三,充分发挥各驱动因素在建筑业低碳高效发展中的促进作用,助力建筑业结构优化和产业升级。首先,应提升建筑材料的环保性能,构建高效清洁的建筑能源使用体系;其次,要统筹规划好城市化高质量发展,逐步迈向存量时代,避免大拆大建;同时,利用好人口集聚效应带来的经济发展和碳减排红利,运用政策激励引导人口向华北、西南地区转移,合理控制人口数量,尽快释放人口规模效应,从而最大程度实现碳减排;最后,应加大清洁

能源的开发力度,构建高效的建筑能源使用体系,减少建筑业对一次能源消耗的依赖性。

### 参考文献(References)

- [1] 惠明珠, 苏有文. 中国建筑业碳排放效率空间特征及其影响因素[J]. 环境工程, 2018, 36(12): 182-187.
- [2] 中国建筑能耗研究报告 2020[J]. 建筑节能, 2021, 49(2): 1-6.
- [3] 牛鸿蕾, 刘志勇. 基于动态空间杜宾面板模型中国建筑业碳排放的影响因素研究[J]. 生态经济, 2017, 33(8): 74-80.
- [4] 蒋博雅, 黄宝麟, 张宏. 基于LMDI模型的江苏省建筑业碳排放影响因素研究[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(10): 202-212.
- [5] 魏光普, 康瑜, 范浩文, 等. 重工业城市建筑业碳排放核算与预测研究[J]. 生态经济, 2022, 38(9): 43-48.
- [6] 纪建悦, 姜兴坤. 中国建筑业碳排放预测研究[J]. 中国海洋大学学报(社会科学版), 2012(1): 53-57.
- [7] 卢娜, 冯淑怡, 孙华平. 江苏省不同产业碳排放脱钩及影响因素研究[J]. 生态经济, 2017, 33(3): 71-75.
- [8] 秦建成, 陶辉, 占明锦, 等. 新疆行业碳排放影响因素分析与碳减排对策研究[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(4): 1375-1382.
- [9] 孔凡文, 李鲁波. 省域建筑业碳排放空间分异及驱动因素分析[J]. 建筑经济, 2019, 40(8): 102-106.
- [10] 谢锐, 王振国, 张彬彬. 中国碳排放增长驱动因素及其关键路径研究[J]. 中国管理科学, 2017, 25(10): 119-129.
- [11] Huang L, Krigsvoll G, Johansen F, et al. Carbon emission of global construction sector[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 1906-1916.
- [12] Pan W, Pan W, Shi Y, et al. China's inter-regional carbon emissions: An input-output analysis under considering national economic strategy[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 197: 794-803.
- [13] 洪竞科, 刘禹彤, 陈雨欣. 中国省域建筑业碳锁定效应时空演进[J]. 资源科学, 2022, 44(7): 1388-1404.
- [14] 杜强, 冯新宇, 孙强. 市域建筑业碳排放与经济发展关系及影响因素研究——以西安市为例[J]. 环境工程, 2017, 35(2): 174-179.
- [15] 赵愈, 孙思园, 刘陆. 装配式建筑碳减排驱动因素与路径研究[J]. 建筑经济, 2022, 43(10): 90-95.
- [16] 陆瑶, 王宏燕, 李炎锋, 等. 大型体育场馆水-能-碳足迹关联模型与不确定性分析[J]. 环境工程, 2022, 40(12): 165-172.
- [17] Acquaye A A, Duffy A P. Input-output analysis of Irish construction sector greenhouse gas emissions[J]. Building and Environment, 2010, 45(3): 784-791.
- [18] Hermawan, Marzuki P F, Abduh M, et al. The sustainable infrastructure through the construction supply chain carbon foot print approach[J]. Procedia Engineering, 2017, 171: 312-322.
- [19] 李爽, 陶东, 夏青. 基于扩展STIRPAT模型的我国建筑业碳排放影响因素研究[J]. 管理现代化, 2017, 37(3): 96-98.
- [20] 周会祥. 我国超大型城市碳达峰碳中和发展模式比较研究[J]. 北京联合大学学报(人文社会科学版), 2023, 21(2): 114-124.
- [21] 樊琳梓, 李爽, 裴志海. 中国建筑业优化升级对其碳排放影响的分阶段研究[J]. 技术经济, 2018, 37(8): 96-105.
- [22] 常莎莎, 冯国会, 崔航, 等. 建筑行业碳排放特征及减排潜力预测分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2023, 39(1): 139-146.
- [23] 唐晓灵, 刘嘉敏. 基于PSO-LSTM网络模型的建筑碳排放峰值预测[J]. 科技管理研究, 2023, 43(1): 191-198.
- [24] 项英辉, 张豪华. 环境规制提高建筑业碳生产率了吗?——基于空间计量和门槛效应的实证分析[J]. 生态经济, 2020, 36(1): 34-39.
- [25] 李龙, 周盛世, 孙瑞鸿. 基于超效率SBM模型的省域建筑业碳排放效率及影响因素分析[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2023, 42(1): 91-96.
- [26] 张智慧, 刘睿劼. 基于投入产出分析的建筑业碳排放核算[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(1): 53-57.
- [27] 金柏辉, 李玮, 张荣霞, 等. 中国建筑业碳排放影响因素空间效应分析[J]. 科技管理研究, 2018, 38(24): 238-245.
- [28] 邵帅, 徐俐俐, 杨莉莉. 千里“碳缘”一线牵: 中国区域碳排放空间关联网的结构特征与形成机制[J]. 系统工程理论与实践, 2023, 43(4): 958-983.
- [29] Breiman L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.
- [30] 赵艳艳, 张晓平, 陈明星, 等. 中国城市空气质量的区域差异及归因分析[J]. 地理学报, 2021, 76(11): 2814-2829.
- [31] 刘卫东, 唐志鹏, 夏炎, 等. 中国碳强度关键影响因子的机器学习识别及其演进[J]. 地理学报, 2019, 74(12): 2592-2603.
- [32] 夏晓圣, 陈菁菁, 王佳佳, 等. 基于随机森林模型的中

- 国PM2.5浓度影响因素分析[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2057-2065.
- [33] 郭远智, 李许红. 基于随机森林模型的黄河流域城市建设用地结构时空演化及其驱动机制研究[J]. 地理科学进展, 2023, 42(1): 12-26.
- [34] 余文梦, 张婷婷, 沈大军. 基于随机森林模型的我国县域碳排放强度格局与影响因素演进分析[J]. 中国环境科学, 2022, 42(6): 2788-2798.
- [35] 李玉敏, 张友国. 中国碳排放影响因素的空间分解分析[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2016, 16(3): 73-85.
- [36] 赵红岩, 霍正刚, 查晓庭, 等. 建筑碳排放影响因素分析及情景预测[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2022, 25(6): 65-70.
- [37] 徐水太, 马彩薇, 张胜龙, 等. 中国建筑业生态经济效率测度及影响因素[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(6): 833-840.
- [38] 易莹莹, 张宁. 中国城镇化发展中空气污染效应的系统仿真分析[J]. 城市问题, 2020, 304(11): 82-93.
- [39] 解安, 林进龙. 新型城镇化: 十年总结与远景展望[J]. 河北学刊, 2023, 43(1): 115-126.
- [40] 许学强, 周一星, 宁越敏. 城市地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [41] 吾丽娜·艾尔肯, 吴碧波. 西部地区流入人口地方融入对区域经济发展的影响机理与提升路径[J]. 区域经济评论, 2022, 57(3): 66-74.
- [42] 朱竑, 张博, 马凌. 新型城镇化背景下中国流动人口研究: 议题与展望[J]. 地理科学, 2019, 39(1): 1-11.
- [43] 王新贤, 高向东. 中国流动人口分布演变及其对城镇化的影响——基于省际、省内流动的对比分析[J]. 地理科学, 2019, 39(12): 1866-1874.

## Spatial characteristics and influencing factors of carbon emission intensity of construction industry in China

XU Shuitai<sup>1</sup>, LI Xiwei<sup>1\*</sup>, DONG Xin<sup>2</sup>

1. School of Economics and Management, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China

2. School of Electrical and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China

**Abstract** The carbon emissions in the construction industry in China have become one of the main sources of carbon emissions in the entire society. Analyzing the spatial characteristics of carbon emissions intensity in the construction industry and identifying its key influencing factors are the key to achieving sustainable urban development and achieving the dual carbon goals. Based on the calculation of the carbon emission intensity of the construction industry in 30 provinces of China from 2010 to 2019, this paper analyzes the spatial characteristics of the carbon emission intensity of the construction industry in China using geostatistical methods, and further establishes Random Forest model to dynamically quantify and identify the key influencing factors of carbon emission intensity and analyze their impact laws. The results show that: 1) From 2010 to 2019, the overall spatial pattern of carbon emission intensity in China's construction industry showed significant spatial autocorrelation with a fluctuating upward trend. 2) The carbon emission intensity of the construction industry in 30 provinces of China exhibits significant north-south differentiation in local spatial patterns, with hot spots shifting from West China to North China, and cold spots shifting and expanding from East China to South China. 3) In the development process of the construction industry, the level of material consumption, urbanization rate, population mobility, and energy consumption have a significant impact on the carbon emission intensity of the construction industry. Subsequently, differentiated carbon emission reduction policies should be formulated from multiple perspectives such as the spatial characteristics of carbon emissions, energy utilization, and population agglomeration in different regions.

**Keywords** construction industry; carbon emission intensity; carbon peaking and carbon neutrality goals ●



(责任编辑 卫夏雯)