

引用格式: 范建双, 周琳. 中国建筑业碳排放时空特征及分省贡献[J]. 资源科学, 2019, 41(5): 897-907. [Fan J S, Zhou L. Spatiotemporal distribution and provincial contribution decomposition of carbon emissions for the construction industry in China[J]. Resources Science, 2019, 41(5): 897-907.] DOI: 10.18402/resci.2019.05.07

中国建筑业碳排放时空特征及分省贡献

范建双, 周琳

(浙江工业大学管理学院, 杭州 310023)

摘要: 建筑业作为中国快速城镇化进程中的重要支柱产业, 为国家经济发展做出重要贡献的同时, 也存在高能耗和高排放等问题, 减少建筑业碳排放对中国实现节能减排目标具有重要意义。本文首先在对全国30个省(市、自治区)建筑业碳排放量进行核算的基础上, 运用空间自相关和核密度函数方法对其时空特征进行刻画和分析, 并进一步采用乘积式对数平均迪氏指数分解(M—LMDI)方法对中国建筑业碳排放量进行因素分解。研究结果表明: ①中国建筑业碳排放总体上呈现上升趋势, 在全国范围内具有空间正相关性, 且表现出空间集聚特征, 建筑业碳排放集聚中心在研究期内逐渐往中南部地区转移, 空间集聚效应越来越显著; ②中国30个省(市、区)建筑业碳排放存在空间上存在显著差异, 且区域间差距不断扩大, 存在两极分化的现象; ③1997—2015年中国30个省(市、区)建筑业碳排放量增加了115%, 其中建筑业发展水平和建筑业从业人口规模是建筑业碳排放增加的主要贡献因素, 分别导致建筑业碳排放增加106.52%、85.43%; 相反, 建筑业能源消费强度对建筑业碳排放具有抑制作用, 使碳排放减少了77.33%; ④从分省(市、区)的角度来看, 对建筑业碳排放下降贡献最大的是黑龙江省和海南省, 对建筑业碳排放增加贡献最大的是山东省和浙江省。

关键词: 建筑业; 碳排放; 空间自相关; 核密度函数; 因素分解; 分省贡献; 中国

DOI: 10.18402/resci.2019.05.07

1 引言

随着中国城镇化进程的快速推进, 建筑业发展迅猛, 建筑业增加值占GDP的比重不断提高。与此同时, 建筑业是专门从事土木工程、房屋建筑和设备安装等的生产部门, 现阶段建筑业的施工机械化水平不高, 传统的建造方式和粗放的经营方式尚未改变, 建筑业的粗放生产势必对环境带来负面影响。尽管建筑业的环境污染和能源消耗相对工业行业较低, 但也应引起高度重视。中国已经明确提出要在2020年达到能效水平比2015年提升20%的发展目标。该目标已经作为约束性指标纳入到《建筑业发展“十三五”规划》中。在现有制度安排下, 中国建筑业要实现上述绿色低碳发展目标, 必须根据各地区的不同情况进行有效分解和落实。而目标顺利完成则需要各地区之间的通力配合与因地制宜。因此, 系统考察中国建筑业整体碳排放与各

省(市、自治区)建筑业碳排放之间的关系, 以及各省(市、区)建筑业碳排放对全国整体碳排放的影响, 能够更好地为实现全国建筑业节能减排目标提供理论参考。

随着学者们对建筑业发展对碳排放的影响逐渐引起关注和重视, 专门对建筑业碳排放研究的文献近年来不断涌现。现有研究主要集中在碳排放的测度和驱动因素研究2方面。在碳排放测度方面: 有学者采用投入产出法分别对瑞典、爱尔兰和美国的建筑部分碳排放进行了核算^[1-4]; 有学者采用普遍使用的IPCC碳排放系数法对中国建筑业碳排放量进行了测算^[5,6]。在驱动因素研究方面: 主要采用因素分解方法, 包括LMDI方法^[7-10]和结构分解方法(SDA)^[11]。有学者同时采用因素分解和脱钩分析方法对碳排放驱动因素进行分析^[12-14]。也有学者采用回归方法对影响因素进行识别, 如地理加权回归模

收稿日期: 2018-04-17; 修订日期: 2018-06-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(71774142); 教育部人文社科项目(17YJAZH022); 浙江省自然科学基金项目(LY16G030029)。

作者简介: 范建双, 男, 辽宁盖州市人, 副教授, 博士, 研究方向为城镇化与碳排放绩效。E-mail: fjshmy@zjut.edu.cn

型^[15]。此外,还有学者将碳排放作为非期望产出引入到DEA模型中,从而对建筑业的碳排放绩效进行综合测度^[16,17]。例如,Liu等采用随机边界分析方法对考虑碳排放的建筑业能源效率进行综合测算^[18]。值得关注的是,现有研究大多将研究视角聚焦到某一个国家或者地区建筑业的整体碳排放研究;并且学者们普遍认为建筑业的碳排放主要来自2部分:直接碳排放和间接碳排放。直接碳排放是建筑业生产过程中直接消耗化石能源产生的碳排放;间接碳排放是建筑业拉动其他行业所产生的碳排放。

鉴于全国建筑业碳排放是区域汇总的结果,因此从各省(市、区)的角度研究碳排放具有重要的理论与现实意义。冯博等采用IPCC碳排放系数法对中国各省建筑业碳排放量进行测度和因素分解^[13];Li等^[8]和Du等^[15]对中国30个省(市、区)建筑业碳排放量的空间相关性进行分析。上述3篇文献从省(市、区)的角度测算了中国各省(市、区)的建筑业碳排放量,并对区域之间的差异性进行了比较。但因素分解仅研究不同能源种类对碳排放的影响,并没有研究各省(市、区)的建筑业碳排放及其相关变量对全国建筑业整体碳排放量的影响。因此,本文除考察中国建筑业碳排放的时空分异特征外,还将进一步把各省(市、区)的碳排放量及相关变量与全国碳排放量指标纳入到同一个框架下,系统考察各省(市、区)的相关变量对全国碳排放量的影响效应。

2 方法与数据

2.1 建筑业碳排放量核算

现有对于中国建筑业碳排放的研究,以省(市、区)范围为研究对象的研究基本以2005年为起点,至2015年,研究区间相对较短,无法反映长期趋势性特征。本文将研究期间扩展到1997—2015年,由于2005年之前建筑材料的相关统计数据缺失,之前年份建筑材料产生的碳排放无法核算。因此,依据IPCC中碳排放的计算方法^[19],本文将建筑业消耗的17种能源(直接碳排放)以及热力和电力(间接碳排放)作为建筑业碳排放的来源(表1)。17种能源的碳排放量是指参照IPCC提供的低位热值、碳排放因子和碳氧化比率来估算出建筑业的直接碳排放量。各省(市、区)电力的碳排放系数如表2所示。热力的碳排放系数如表3所示。具体测算公式如下:

$$C^j = \sum_{i=1}^{17} C_i^j + C_e^j + C_h^j$$

$$= \sum_{i=1}^{17} (E_i^j \times O_i^j \times LCV_i^j \times CF_i^j) \times \frac{44}{12} + E_e^j \times \delta_e + E_h^j \times \delta_h \quad (1)$$

式中: C^j 表示第 j 省(市、区)的建筑业碳排放总量; C_i^j 表示第 j 省(市、区)建筑业第 i 种化石能源消费碳排放量, $i=1,2,\dots,17$,指17类化石能源类型; C_e^j 和

表1 不同能源的碳排放转换因子

Table 1 Carbon emission conversion factors of different energy sources

能源名称	碳排放因子/ (TC/TJ)	低位热值/(GJ/T)	碳氧化比率
原煤	25.8	20.908	0.899
洗精煤	25.8	26.344	0.899
其他洗煤	25.8	9.409	0.899
型煤	25.8	16.800	0.899
焦炭	29.2	28.435	0.970
焦炉煤气	12.1	17.981/(GJ/10 ³ m ³)	0.990
其他煤气	12.1	8.429/(GJ/10 ³ m ³)	0.990
原油	20.0	41.816	0.980
汽油	18.9	43.070	0.980
煤油	19.5	43.070	0.980
柴油	20.2	42.652	0.980
燃料油	21.1	41.816	0.980
液化石油气	17.2	50.179	0.990
炼厂干气	15.7	45.998	0.990
天然气	15.3	38.931/(GJ/10 ³ m ³)	0.990
其他石油制品	20.0	40.190	0.980
其他焦化产品	29.2	28.435	0.970

资料来源:表中低位热值来源于《中国能源统计年鉴》(2016);碳排放因子和碳氧化比率来源于IPCC国家温室气体清单指南。

表2 中国各省(市、区)电力的CO₂排放系数

Table 2 CO₂ emission coefficient of electricity of 30 provinces in China's mainland

省(市、区)	所属区域	CO ₂ 排放系数/ (t CO ₂ /MWh)
北京、天津、河北、山西、山东、内蒙古	华北区域电网	1.0069
辽宁、吉林、黑龙江	东北区域电网	1.1293
上海、江苏、浙江、安徽、福建	华东区域电网	0.8825
河南、湖北、湖南、江西、四川、重庆	华中区域电网	1.1255
陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆	西北区域电网	1.0246
广东、广西、云南、贵州	南方电网	0.9987
海南	海南电网	0.8154

资料来源:国家发展改革委应对气候变化司《关于公布2009年中国区域电网基准线排放因子的公告》。

表3 中国各省(市、区)热力的CO₂排放系数Table 3 CO₂ emission coefficient of heating of 30 provinces in China's mainland(t CO₂/MWh)

省(市、区)	CO ₂ 排放系数	省(市、区)	CO ₂ 排放系数	省(市、区)	CO ₂ 排放系数	省(市、区)	CO ₂ 排放系数	省(市、区)	CO ₂ 排放系数
安徽	116	贵州	292	湖南	110	宁夏	120	四川	105
北京	88	海南	57	吉林	132	青海	245	天津	108
福建	112	河北	122	江苏	109	山东	114	新疆	109
甘肃	110	河南	124	江西	134	山西	116	云南	149
广东	93	黑龙江	155	辽宁	130	陕西	149	浙江	104
广西	153	湖北	122	内蒙古	160	上海	102	重庆	98

资料来源:表格数据来源于文献[20]。

C_h^j 分别表示第 j 省(市、区)的建筑业电力和热力的二次能源消费产生的碳排放量; E_i^j 表示第 j 省(市、区)的建筑业第 i 类化石能源终端消耗量; O_i^j 表示第 j 省(市、区)第 i 类化石能源的碳氧化率; LCV_i^j 表示第 j 省(市、区)建筑业第 i 类化石能源的平均低位热值; CF_i^j 表示第 j 省(市、区)第 i 类化石能源的碳排放因子; E_e^j 和 E_h^j 分别表示第 j 省(市、区)建筑业电力消费量和热力消费量; δ_e^j 和 δ_h^j 分别表示第 j 省(市、区)建筑业电力和热力消费的碳排放系数。

2.2 空间自相关分析模型

空间自相关分析方法有全局空间自相关分析和局部空间自相关。全局空间自相关一般采用全局Moran's I 分析,中国区域建筑业碳排放量的全局Moran's I 指数计算公式如下:

$$\text{Moran's } I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中: n 表示省(市、区)总数; x_i 和 x_j 分别是省(市、区) i 和省(市、区) j 建筑业碳排放量; \bar{x} 表示变量 x 的均值; ω_{ij} 代表空间权重矩阵。本文选择地理单元距离二次方的倒数来形成空间权重矩阵,即用2个省会之间的距离来代表2个地区之间的距离,并将所得的矩阵进行标准化。

全局Moran's I 指数仅能评价整体分布和趋势,不能揭示独立单元的空间关联。为此,本文采用局部空间相关性分析来进一步揭示省(市、区)范围的局部集聚特征。采用局部Moran's I 指数来分析,其计算公式如下:

$$\text{Moran's } I_i = \frac{n(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sum_{j \neq i}^n \omega_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (3)$$

式中:各系数的含义与式(1)相同。如果局部Moran's I 指数取值为正,说明该省(市、区)与相邻省(市、区)有类似的高值或者低值,空间集群表现为HH集群(高取值省(市、区)与高取值省(市、区)相邻)和LL集群(低取值省(市、区)与低取值省(市、区)相邻);如果局部Moran's I 指数取值为负,则说明该省(市、区)的取值与相邻省(市、区)的取值相比有显著差异,即空间离群。空间离群表现为HL集群(高取值省(市、区)与低取值省(市、区)相邻)和LH集群(低取值省(市、区)与高取值省(市、区)相邻)。

2.3 动态评价分析模型

本文进一步将各省建筑业碳排放量的空间特征引入到时间坐标轴上进行动态评价,并采用核密度函数来分析时间特征。核密度函数方法能分析建筑业碳排放的整体空间差异,并且能够通过函数曲线收敛度和收敛范围的变化,对建筑业碳排放量的总体差异的分阶段动态评价进行可视化表达。核密度函数计算公式如下:

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x_i - x}{h}\right) \quad (4)$$

式中: n 为样本总数; h 表示设定的窗宽, $\lim_{n \rightarrow \infty} h(n) = 0$, $\lim_{n \rightarrow \infty} nh(H) = H \rightarrow 0$; $K(\cdot)$ 是核密度函数,本文采用高斯核函数进行估计,其表达式为:

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{x^2}{2}\right] \quad (5)$$

结合分布形式和核密度函数图,就可以对建筑业碳排放量取值在不同观察期的变化进行有效判断,进而刻画其动态特征。

2.4 LMDI因素分解模型

本文采用乘积式对数平均Divisa指数模型(M-LMDI)方法对中国建筑业碳排放进行因素分解,首

先将建筑业碳排放分解为30个省(市、区)的4个变量乘积之和的形式:

$$C(t) = \sum_{j=1}^{30} C_j(t) = \sum_{j=1}^{30} \frac{C_j(t)}{E_j(t)} \times \frac{E_j(t)}{G_j(t)} \times \frac{G_j(t)}{P_j(t)} \times P_j(t) \quad (6)$$

式(6)可以进一步表示为:

$$C(t) = \sum_{j=1}^{30} CE_j(t) \times EG_j(t) \times GP_j(t) \times P_j(t) \quad (7)$$

式(6)和(7)中: $j=1, 2, \dots, 30$, 分别表示30个省(市、区); t 表示时间; E_j 表示第 j 省(市、区)的建筑业消费能源总量; G_j 表示第 j 省(市、区)的建筑业总产值; P_j 表示第 j 省(市、区)的建筑业从业人员数量; $CE_j(t) = C_j(t)/E_j(t)$ 表示第 t 年 j 省(市、区)建筑业碳排放强度; $EG_j(t) = E_j(t)/G_j(t)$ 表示第 t 年 j 省(市、区)建筑业能源消费强度,用来衡量建筑业的能源使用效率; $GP_j(t) = G_j(t)/P_j(t)$ 表示第 t 年 j 省(市、区)建筑业经济发展水平。通过M-LMDI方法对式(6)进一步分解,则各省建筑业在相邻2个时段 $t-1$ 期到 t 期的碳排放量变化的可以表达为:

$$\ln \frac{C(t)}{C(t-1)} = \sum_{j=1}^{30} W_j(t_i^*) \left[\ln \frac{CE_j(t)}{CE_j(t-1)} + \ln \frac{EG_j(t)}{EG_j(t-1)} + \ln \frac{GP_j(t)}{GP_j(t-1)} + \ln \frac{P_j(t)}{P_j(t-1)} \right] \quad (8)$$

式中: $W_j(t_i^*)$ 为权重函数 $W_j(t) = C_j(t)/C(t)$ 在时刻 $t_i^* \in (t-1, t)$ 的函数值。式(7)表示全国建筑业碳排放量从 $t-1$ 时期到 t 时期的变动情况,并且分解为30个省(市、区)的4种因素变动的加权平均值之和。 $W_j(t_i^*)$ 可以运用下列的对数平均函数求取:

$$L(x, y) = \begin{cases} (x-y)/(\ln x - \ln y), & x \neq y \\ x, & x = y \\ 0, & x = y = 0 \end{cases} \quad (9)$$

根据上述对数平均函数,则M-LMDI方法采用的指数形式为:

$$W_j(t_i^*) \cong \frac{L[C_j(t)/C(t), C_j(t-1)/C(t-1)]}{\sum_{j=1}^{30} L[C_j(t)/C(t), C_j(t-1)/C(t-1)]} \quad (10)$$

2.5 数据来源

选取中国30个省(市、区)(西藏、台湾、香港和澳门因数据缺失未包含在内)1997—2015年的面板数据作为研究对象,本文涉及的指标包括建筑业碳排放量(C)、能源消耗量(E)、建筑业总产值(G)和

建筑业从业人员数量(P)。其中,碳排放量(C)采用公式(1)进行核算;各省建筑业能源消耗量(E)来源于《中国能源统计年鉴》(1998—2016年)^[21]中各省能源平衡表(实物量)中的相关数据。本文系统收集了建筑业直接消耗的17种化石能源以及热力和电力数据,将其统一折算成标准煤后求和,求得的能源消费总量作为建筑业能源消耗量;建筑业总产值(G)和建筑业从业人员数量(P)数据来源于《中国建筑业统计年鉴》(1998—2016年)^[22]。考虑到数据的可比性,本文采用地区生产总值指数将总产值数据以1997年为基期进行了价格调整。

3 结果与分析

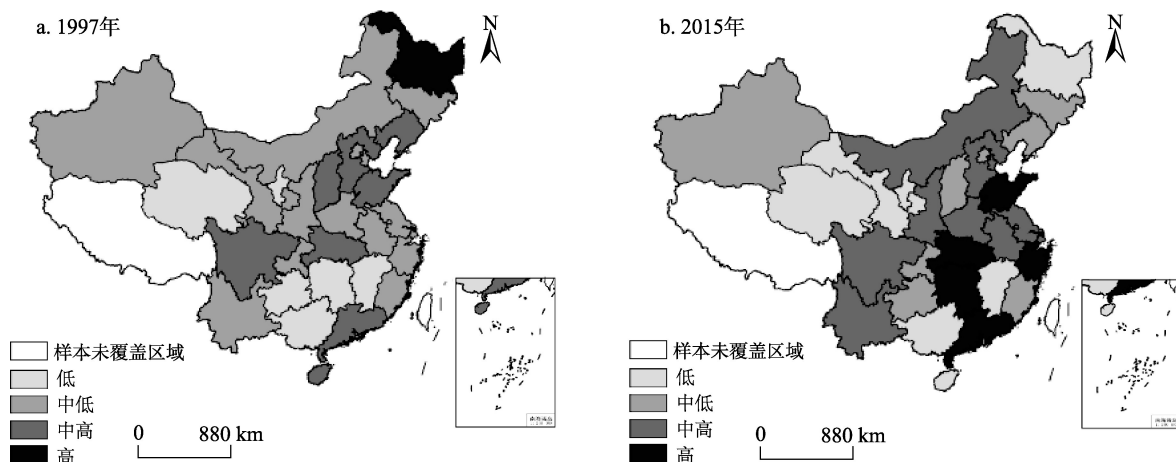
3.1 中国建筑业碳排放量的空间分布特征

基于对中国建筑业分省碳排放量的测算结果,本文绘制了中国30个省(市、区)1997年和2015年建筑业碳排放空间分布如图1所示。不难看出,中国建筑业碳排放总体上呈上升趋势,且在空间上存在显著差异。1997年东北地区建筑业碳排放明显高于其他地区,辽宁、河北、山西、山东一带集聚效应显著,建筑业碳排放量最高的2个省份是黑龙江和海南。2015年建筑业碳排放量高的省(市、区)明显多于1997年,且在此期间,建筑业碳排放集聚中心逐渐往中南部地区转移,空间集聚效应越发显著,浙江、湖北、湖南、广东等东南地区一带以及安徽、河南、陕西、四川、云南等中部地区均呈现集聚效应,建筑业碳排放量最高的2个省份为浙江和湖北。同时,1997年建筑碳排放最高的黑龙江和海南在2015年变为低度排放区域,这说明这2个地区产业结构转型较快。黑龙江省第三产业增加值在国内生产总值占比从1997年的“29.5:40.7:29.8”调至2015年的“17.5:31.8:50.7”;海南则从1997的“28.6:39:32.4”调至2015年的“15.1:39.8:44.9”;2省产业结构实现了从“二一三”、“二三一”到“三二一”的蜕变。中南部地区近年来随着城市化进程的加快,城市基础设施建设及房地产投资不断增加,建筑业发展较快,2015年广东、河南、湖北、湖南、陕西、安徽等省建筑业生产总值和增加值均位居全国前列,与之相关的钢铁和水泥生产、建材家装等产业也发展迅速,因此碳排放量增长也较快。

3.2 全局空间自相关结果分析

本文进一步利用全局空间自相关系数研究了各

2019年5月



(该图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(2016)3237号的标准地图制作,底图无修改)

图1 中国30个省(市、区)1997年和2015年建筑业碳排放空间分布

Figure 1 Spatial distribution of construction industry carbon emissions in 30 provinces in China's mainland, 1997-2015

省(市、区)建筑业碳排放空间上的相关性(图2)。从图2可知,除1999—2003年以外Moran's I 均显著为正,表明中国建筑业碳排在大多数年份存在显著的正向空间关联特征,且2004年以后正向空间集聚效应越来越大。

3.3 局部空间自相关结果分析

为了进一步研究各省(市、区)建筑业碳排放的局部空间相关性,利用GeoDa和ArcGIS软件绘制了1997年和2015年碳排放的LISA空间集聚图(图3)。1997年以LL集群为主,这表明1997年中国建筑业碳排放量较低的区域空间集聚程度较高,源于这一阶段中国大部分省(市、区)的城市化建设水平相对较低,还没有出现省(市、区)之间竞相进行大规模城市建设的模仿效应;仅有辽宁和黑龙江2个省份处于HH集群。这与实际相符。辽宁和黑龙江作为

东北老工业基地,其经济发展模式中高能耗和高污染产业占比较高,碳排放量较高也就不难理解。2015年以HH集群为主,这表明2015年中国区域建筑业碳排放量较高的区域空间集聚程度较高。13个HH集群中,河南、陕西、云南、湖南、广东等中南部地区城镇化水平起步低,随着中国城镇化进程的加速,各省(市、区)政府在GDP指标考核的推动下将大量政府投资用于大规模的城市建设和基础设施建设,这一方面提高了建筑业产值进而提升GDP,也催生了大量与之相关的碳排放;上海、江苏、天津、河北、山东、浙江等东部沿海地区一方面因为城镇化建设推动了城市建设,增加了建筑业碳排放;另一方面东部地区人口虹吸效应显著,人口的增加带动了大量建筑业的需求,从而加剧了碳排放。处于LL集群的有6个省(市、区),其中甘肃、青海和新疆均属于西部。这些地区经济相对落后,政府投入城市建设的资金不足,建筑业碳排放相对较低也就不难理解。值得注意的是辽宁和黑龙江省均从1997年的HH集聚转变为2015年LL集聚,源于黑龙江和辽宁所在东北产业基地经济增长乏力,建筑产业发展较为缓慢,碳排放相对于城镇化和经济发展迅速的省(市、区)较少。对比分析来看,出现了建筑业高排放聚集区域向东南地区转移而低排放区域向西部和东北地区转移的现象。从数量和空间动态分布来看,1997—2015年LL集群从19个变为6个,HH集群从2个变为13个,这表明1997—

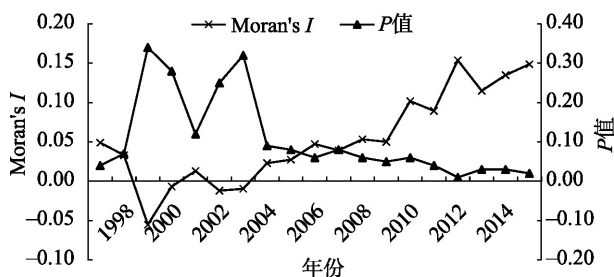
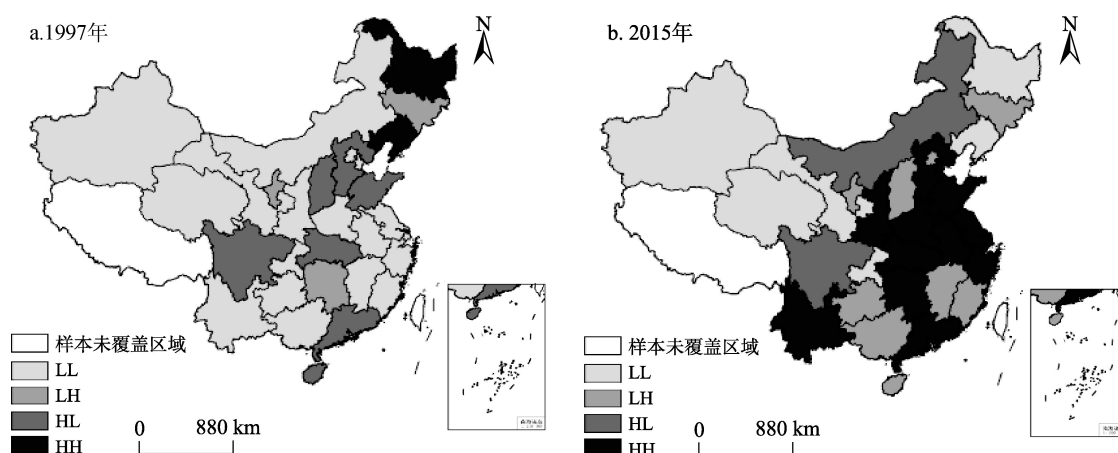


图2 1997—2015年全国30个省(市、区)建筑业碳排放量Moran's I 指数折线图

Figure 2 Moran's I index line chart of construction industry carbon emissions in 30 provinces in China's mainland, 1997-2015



(该图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(2016)3237号的标准地图制作,底图无修改)

图3 1997年和2015年建筑业碳排放LISA空间集聚图

Figure 3 Local indicators of spatial association (LISA) spatial clustering of construction carbon emissions, 1997 and 2015

2015年建筑业碳排放量较低的省(市、区)空间集聚程度有所减少,而建筑业碳排放量较高的省(市、区)空间集聚程度有所增强。

3.4 基于核密度函数的动态评价分析

为了进一步厘清建筑业碳排放区域之间差异的动态变化特征,本文采用高斯核密度函数和增长分布图来刻画建筑业碳排放的区域差异演化趋势。选择了1997年、2003年、2009年和2015年为研究样本,使用R软件(density函数)绘制了中国各省(市、区)建筑业碳排放量在不同集群类型下(2015年空间集群分类结果)的动态演进过程如图4所示。由于HL集群只有四川和内蒙古2个省区,因此不单独绘制。全国30个省(市、区)总体层面上,建筑业碳排放核密度曲线的波峰逐渐变缓,1997年的波峰是最窄的,之后年份呈现逐渐扩大趋势并随时间向右移动,如图4a所示。这说明该期间内中国30个省(市、区)建筑业碳排放量逐年增加,而且区域间差距也在逐渐扩大,两极分化现象越来越严重,存在部分地区建筑业碳排放降低的同时个别地区急剧增加的情况。

图4b描述了中国HH集群地区建筑业碳排放量在样本考察期内的分布演进状况。不难发现,与1997年相比,2003年密度函数中心向右移动,且峰值变小,表明HH集群区域间的差异扩大;随着时间的推进,2009年、2015年,密度函数中心大幅度向右移动,波峰变缓,宽度明显拉大,这表明建筑业碳排

放量地区间差距呈现扩大的趋势。

图4c描述了中国LH集群地区的分布演进状况。整体来看,密度函数在样本考察期内均出现了多峰现象,表明LH集群地区出现了较大的两极分化。具体而言,相较于1997年,2003年的密度函数中心移动不明显,2009年密度函数中心开始略有右移;密度函数峰值阶梯式递减,且出现显著的双峰,说明1997—2009年期间LH集群区域间建筑业碳排放的差异呈现逐步扩大的趋势,且两极分化的现象越来越明显。2015年密度函数中心与之前年份相比仍在右移,而双峰现象则由之前的左大右小变为左小右大,表明两极分化的阵营发生了较大变化。

图4d为中国LL集群地区的分布演进状况。整体来看,密度函数在样本考察期内由双峰变为了单峰,峰值出现了阶梯式下降趋势,宽度不断拉大。这表明LL集群地区间差距扩大,两极分化的现象有所改观。具体而言,1997年出现了明显的双峰,两级分化最为严重。相对于1997年,2003年密度函数的中心向右移动,双峰变得不明显,说明在1997—2003年期间LL集群区域的两极分化被弱化。相对于2003年,2009年的密度函数中心没有明显右移,但是双峰又开始凸显。2015年又从双峰变为单峰,说明两级分化现象的由强变弱。

3.5 建筑业碳排放的分省因素分解结果

以1997年为基年、2015年为比较期,运用乘积式对数平均迪式指数模型(M-LMDI)对全国建筑业

2019年5月

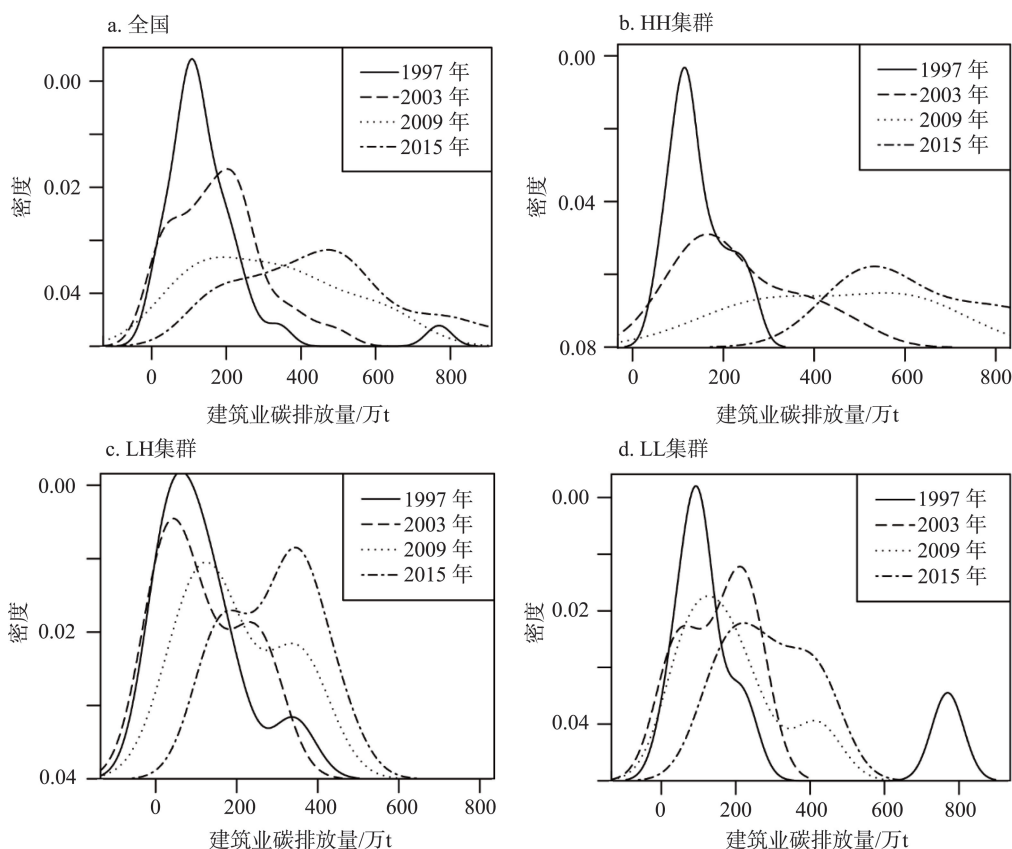


图4 不同集群类型下区域建筑业碳排放分布的动态演进特征

Figure 4 Characteristics of dynamic change of regional construction industry carbon emissions for different spatial clusters

碳排放量在2015年相对于1997年的变动进行分省(市、区)的因素分解,得到建筑业碳排放强度(CE)、建筑业能源消费强度(EG)、建筑业经济发展水平(GP)、建筑业从业人口规模(P)4个因素累积效应的分省贡献度如图5和表4所示。

由图5可知,1997—2015年中国30个省(市、区)整体建筑业碳排放量增加了115%,呈现逐年上升的趋势,1997—2009年增速较快,2010—2015年增速有所减缓。其中建筑业经济发展水平和建筑业从业人口规模是碳排放增加的主要贡献因素,分别导致建筑业碳排放增加106.52%和85.43%。说明中国建筑业经济水平有了大幅度的提升,经济的发展带动了产业的发展,城镇化进程加快,房地产热持续升温,人民生活水平日益提高对基础设施建设、住房建设以及商业和工业用地建设的需求越来越高。随着建筑规模的不断扩大,建筑业能源消耗增加,建筑业碳排放量也相应增加,建筑业经济水平的提高是中国建筑业碳排放增加的主要因素之

一。同时,随着建筑业规模的扩大,建筑业从业人员不断增加,1997—2015年建筑业从业人员年均增长5.27%,建筑业人口规模的扩大。这一方面促进了建筑业的规模集聚,另一方面从业人口的增加提高了城市住宅和基础设施建设的需求,进一步促进了建筑业碳排放的增加。相反,建筑业能源消费强度分解值累计影响为负,表明对建筑业碳排放增加具有抑制作用,使碳排放减少了77.33%。说明建筑节能减排技术的应用已经开始出现成效,随着绿色建筑理念的深入以及节能减排技术的成熟与推广,建筑业能源消费强度对建筑业碳排放减少的贡献将会越来越大。建筑业碳排放强度因素由于各能源系数基本保持不变,因此对建筑业碳排放几乎没有影响。

从分省(市、区)的角度来看,对全国建筑业碳排放下降贡献最大的2个省为黑龙江和海南,1997—2015年期间黑龙江和海南的建筑业碳排放在全国的占比分别从17.10%和7.57%下降到1.27%

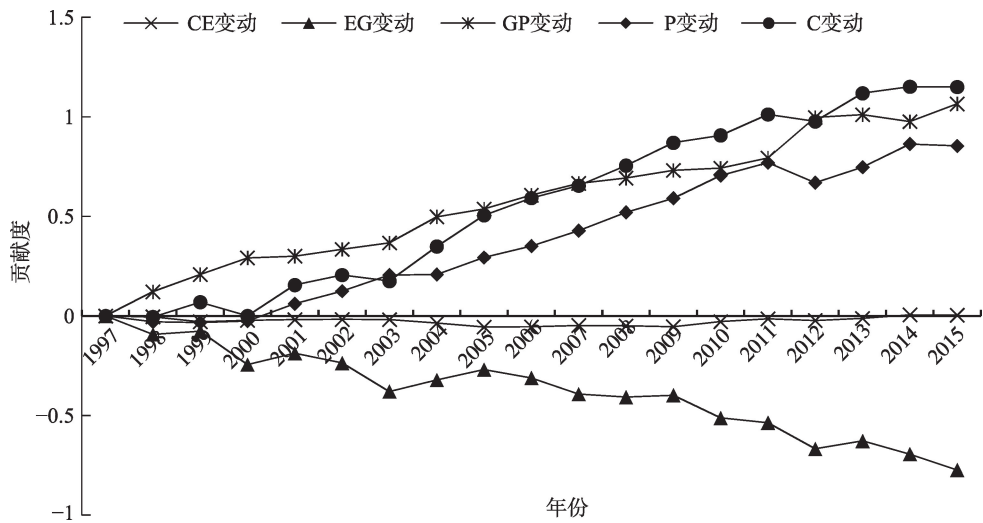


图5 1997—2015年全国建筑业碳排放量M-LMDI乘法分解结果

Figure 5 Multiplicative logarithmic mean Divisa index (M-LMDI) decomposition of construction carbon emissions in China's mainland, 1997-2015

表4 30个省(市、区)4类因素对中国建筑业碳排放变动影响的M-LMDI法分解结果

Table 4 Results of multiplicative logarithmic mean Divisa index (M-LMDI) decomposition of construction carbon emissions in China's mainland, 1997-2015

省(市、区)	合计影响	CE变动影响	EG变动影响	GP变动影响	P变动影响
北京	0.032 1	-0.000 3	-0.029 7	0.029 2	0.032 9
天津	0.041 1	-0.000 6	-0.016 0	0.026 8	0.030 9
河北	0.054 9	0.008 3	-0.068 6	0.092 1	0.023 1
山西	0.027 6	0.001 2	-0.042 7	0.042 3	0.026 9
内蒙古	0.046 8	0.002 2	-0.045 6	0.089 5	0.000 8
辽宁	0.026 6	0.005 7	-0.052 9	0.055 5	0.018 2
吉林	0.031 4	-0.001 9	-0.015 7	0.023 7	0.025 3
黑龙江	-0.156 7	-0.008 2	-0.175 9	0.032 9	-0.005 5
上海	0.057 9	0.001 9	-0.027 9	0.038 6	0.045 3
江苏	0.060 3	0.001 5	-0.024 1	0.019 3	0.063 7
浙江	0.117 0	-0.002 6	0.028 1	0.004 1	0.087 4
安徽	0.039 1	-0.000 9	-0.008 9	0.027 2	0.021 7
福建	0.044 6	-0.003 7	-0.011 1	0.015 2	0.044 3
江西	0.025 3	0.001 1	0.005 8	-0.002 0	0.020 4
山东	0.162 5	0.003 9	-0.081 5	0.146 1	0.094 0
河南	0.048 8	-0.001 6	0.000 8	0.023 4	0.026 2
湖北	0.074 2	0.000 5	-0.027 0	0.040 8	0.060 0
湖南	0.080 4	-0.003 2	0.025 0	0.024 2	0.034 5
广东	0.088 9	-0.001 0	-0.024 0	0.084 5	0.029 4
广西	0.018 4	0.000 7	0.000 7	0.006 2	0.010 8
海南	-0.061 2	0.001 2	-0.071 8	0.013 9	-0.004 4
重庆	0.049 4	-0.002 9	-0.014 2	0.034 1	0.032 3
四川	0.049 4	-0.002 9	-0.014 2	0.034 1	0.032 3
贵州	0.049 5	0.000 1	-0.028 0	0.044 4	0.033 1
云南	0.030 1	-0.001 7	-0.005 0	0.018 2	0.018 7
陕西	0.048 3	-0.000 5	0.000 3	0.023 8	0.024 7
甘肃	0.044 4	0.003 1	-0.026 3	0.039 3	0.028 3
青海	0.019 0	0.001 6	-0.019 9	0.030 0	0.007 3
宁夏	0.010 1	-0.000 3	-0.002 1	0.010 8	0.001 6
新疆	0.016 2	-0.000 5	0.003 5	0.008 3	0.004 9

2019年5月

和1.39%,说明其建筑业碳排放份额在全国下降较快,源于建筑业能源消费强度的大幅度下降;对建筑业碳排放的贡献值分别为-0.176、-0.072,位居全国领先地位,这也说明提高能源使用效率是进一步降低建筑业碳排放的关键。对建筑业碳排放增加贡献最大的2个省为山东和浙江。虽然山东建筑业能源消费强度对全国建筑业碳排放下降的贡献较大,贡献值为-0.082,但是其建筑业经济发展水平和建筑业从业人口规模对全国建筑业碳排放增加的贡献也较大。山东建筑业经济发展水平以10.96%的速度增长,建筑业产值份额一直处于领先地位,2015年建筑业产值份额为7.68%,对全国建筑业碳排放增加的贡献值为0.146,说明山东建筑业经济发展模式较为粗放,属于能源密集型产业,对建筑业碳排放的降低起抑制作用。同时,2015年山东建筑业从业人口达311万,建筑业从业人口规模对建筑业碳排放增加的贡献值为0.094,说明山东建筑业从业人员的绿色节能意识以及绿色建筑技术均有较大的提升空间。因此,总体来看,山东对全国建筑业碳排放的贡献值正大于负。浙江的情况比较典型,建筑业能源消费强度、建筑业经济发展水平、建筑业从业人口规模3个因素对建筑业碳排放的增加均起到了促进作用,浙江建筑业碳排放在全国的份额从1997年的1.89%持续上升到2015年的7.50%,虽然该期间内建筑业较为发达,但是其对全国建筑业碳排放增加的贡献值并不大,仅为0.004,表明浙江省建筑业经济发展模式较为集约;但是浙江建筑业能源消费强度对全国建筑业碳排放的贡献为正,贡献值为0.028,表明浙江建筑业技术的发展还不成熟,建筑业节能减排工作尚未见成效,应着力提高建筑业能源使用效率。浙江省建筑业从业人口规模对全国建筑业碳排放的影响与山东类似。

从单个分解因素的情况来看,建筑业能源消费强度对全国建筑业碳排放降低的贡献最大的省份为黑龙江、山东、海南,而浙江、江西、河南、湖南、广西、陕西和新疆7个省区建筑业能源消费强度对全国建筑业碳排放降低起到了抑制作用;建筑业发展水平对全国建筑业碳排放增加贡献较大的省区主要有山东、河北和内蒙古,而江西的贡献值为负,起到抑制作用;建筑业从业人口规模对全国建筑业碳排放增加贡献较大的省份有山东、浙江和江苏,而

黑龙江、海南的贡献值为负值,起到抑制作用。从汇总影响来看,对全国建筑业碳排放变动贡献排名前3的省份依次是山东、浙江和广东;对全国建筑业碳排放变动贡献值为负的有黑龙江和海南。

4 结论与建议

本文在对中国30个省(市、区)建筑业碳排放量进行核算的基础上,运用空间自相关和核密度函数方法对其时空特征进行刻画和分析,进一步采用乘积式对数平均迪式指数分解(M-LMDI)方法对中国30个省(市、区)建筑业能源消耗等相关变量对全国碳排放量的贡献进行分解。研究结果表明:①中国建筑业碳排放总体呈现上升趋势,在全国范围内具有空间正相关性,且表现出空间集聚特征,建筑业碳排放集聚中心逐渐往中南部地区转移,空间集聚效应越来越显著;②中国30个省(市、区)建筑业碳排放存在空间上存在显著差异,且区域间差距不断扩大,存在两极分化现象;③1997—2015年中国建筑业整体碳排放量增加了115%,其中建筑业经济发展水平和建筑业从业人口规模是建筑业碳排放增加的主要贡献因素,分别导致建筑业碳排放增加106.52%、85.43%,相反,建筑业能源消费强度对建筑业碳排放具有抑制作用,使碳排放减少了77.33%;④从单因素分解的角度来看,建筑业能源消费强度对全国建筑业碳排放降低的贡献最大的省份为黑龙江和山东;建筑业发展水平对全国建筑业碳排放增加贡献最大的省份是山东和河北;建筑业从业人口规模对全国建筑业碳排放增加贡献最大的省份是山东和浙江。汇总来看,对建筑业碳排放下降贡献最大的2个省份是黑龙江和海南,对建筑业碳排放增加贡献最大的2个省份是山东和浙江。

据此提出以下政策建议:①关注建筑业技术升级,提高能源使用效率。大力推进住宅产业化和绿色建筑技术,住宅产品的大规模定制和工厂化生产能极大提高建筑材料的使用效率,同时降低碳排放。而施工现场的装配式工艺和绿色技术同样能够降低人工、材料和机械的消耗量,从而降低碳排放。②加快建筑业能源结构升级,提升建筑材料低碳环保性能。在建筑材料生产过程中严格控制煤炭等化石能源的使用比例,提高风、电、核能等清洁能源的使用比例。同时积极推行绿色节能建筑材料,回收利用废旧建筑材料和建筑垃圾。③加快转

变经济增长方式,对传统工业技术进行革新,积极探索经济发展的结构性变革路径,改变建筑业产值与碳排放之间的关系,建立绿色建筑相关的法律法规,扶持绿色技术及评价的研究,致力于发展绿色建筑经济。④提高建筑业从业人员的教育水平,加强从业人员节能减排意识。对从业人员加强绿色环保和节能减排相关技术知识的培训,同时加强建筑业绿色低碳发展战略意义的宣传。⑤将降低建筑业碳排放的目标分解到各个因素和各个省(市、区),根据实际情况,系统考虑各省(市、区)碳排放份额及各因素的联动关系,兼顾公平和效率的原则下制定各省(市、区)节能减排目标,因地制宜开展减排工作。同时,由于各省(市、区)建筑业碳排放存在空间溢出效应,在未来的发展中应鼓励各地区加强地区间合作,促进建筑节能环保领域的技术交流,缩小地区间差异,实现共同发展目标。

参考文献(References):

- [1] Nassen J, Holmberg J, Wadeskog A, et al. Direct and indirect energy use and carbon emissions in the production phase of buildings: An input-output analysis[J]. *Energy*, 2007, 32(9): 1593-1602.
- [2] 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.
- [3] 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. [Zhang Z H, Liu R J. Carbon emission in the construction sector based on input-output analyses[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2013, 53(1): 53-57.]
- [4] Onat N C, Kucukvar M, Tatari O. Scope-based carbon footprint analysis of US residential and commercial buildings: An input-output hybrid life cycle assessment approach [J]. *Building and Environment*, 2014, 72: 53-62.
- [5] 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. [Ji J Y, Jiang X K. Carbon emissions prediction study in China's construction industry[J]. *Journal of Ocean University of China (Social Sciences)*, 2012, (1): 53-57.]
- [6] Chuai X W, Huang X J, Lu Q L, et al. Spatiotemporal changes of built-up land expansion and carbon emissions caused by the Chinese construction industry[J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 49(21): 13021-13030.
- [7] Lu Y J, Cui P, Li D Z. Carbon emissions and policies in China's building and construction industry: Evidence from 1994 to 2012 [J]. *Building and Environment*, 2016, 95: 94-103.
- [8] Li W, Sun W, Li G M, et al. Temporal and spatial heterogeneity of carbon intensity in China's construction industry[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2017, 126: 162-173.
- [9] Hu X C, Liu C L. Carbon productivity: A case study in the Australian construction industry [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 2354-2362.
- [10] Liang L F, Hu X C, Tivendale L, et al. The log mean divisia index based carbon productivity in the Australian construction industry [J]. *Construction Economics and Building*, 2017, 17(3): 68-84.
- [11] Shi Q, Chen J D, Shen L Y. Driving factors of the changes in the carbon emissions in the Chinese construction industry[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 166: 615-627.
- [12] 胡颖, 诸大建. 中国建筑业 CO₂排放与产值、能耗的脱钩分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(8): 50-57. [Hu Y, Zhu D J. Disconnect analysis between CO₂ emission output value and energy consumption of China construction[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(8): 50-57.]
- [13] 冯博, 王雪青. 中国各省建筑业碳排放脱钩及影响因素研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(4): 28-34. [Feng B, Wang X Q. Research on carbon decoupling effect and influence factors of provincial construction industry in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(4): 28-34.]
- [14] Li R R, Jiang R. Moving low-carbon construction industry in Jiangsu Province: Evidence from decomposition and decoupling models [J]. *Sustainability*, 2017, 9(6): 1-13.
- [15] Du Q, Wu M, Wang N, et al. Spatiotemporal characteristics and influencing factors of China's construction industry carbon intensity [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2017, 26(6): 2507-2521.
- [16] 冯博, 王雪青, 刘炳胜. 考虑碳排放的中国建筑业能源效率省际差异分析[J]. *资源科学*, 2014, 36(6): 1256-1266. [Feng B, Wang X Q, Li B S. Provincial variation in energy efficiency across China's construction industry with carbon emission considered [J]. *Resources Science*, 2014, 36(6): 1256-1266.]
- [17] Hu X C, Liu C L. Managing undesirable outputs in the Australian construction industry using data envelopment analysis models[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 101: 148-157.
- [18] Liu H X, Lin B Q. Energy substitution, efficiency, and the effects of carbon taxation: Evidence from China's building construction industry[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 141: 1134-1144.
- [19] IPCC. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[M]. Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006.
- [20] 李艳梅, 张红丽. 城市化对家庭 CO₂排放影响的区域差异: 基于中国省级面板数据的分析[J]. *资源科学*, 2016, 38(3): 545-556. [Li Y M, Zhang H L. Regional differences in the impact of urbanization on household carbon dioxide emissions based on panel data for 30 provinces in China[J]. *Resources Science*, 2016, 38(3): 545-556.]
- [21] 国家统计局能源司. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1998-2016. [National Bureau of Statistics of Energy of Chi-

na. China Energy Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 1998–2016.]

[22] 国家统计局固定资产投资统计司. 中国建筑业统计年鉴[M]. 北

京: 中国统计出版社, 1998–2016. [National Bureau of Statistics Fixed Assets Investment Statistics Division. China Statistical Yearbook on Construction[M]. Beijing: China Statistics Press, 1998–2016.]

Spatiotemporal distribution and provincial contribution decomposition of carbon emissions for the construction industry in China

FAN Jianshuang, ZHOU Lin

(School of Management, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: As an important pillar industry in the rapid urbanization process of China, the construction industry has been facing the problems of high energy consumption and high emissions, and reducing carbon emissions in the construction industry is of great significance for China to achieve its goal of energy conservation. Based on the accounting of construction carbon emissions of 30 provinces in China's mainland, this article describes and analyzes their spatiotemporal characteristics using the spatial autocorrelation and kernel density function, and the multiplicative logarithmic mean Divisa index (M-LMDI) method to decompose the contribution of energy consumption of construction industry and other related variables for 30 provinces of China's mainland to national carbon emissions. The results show that: (1) Construction carbon emissions in China showed an upward trend, with positive spatial correlation across the country and spatial agglomeration. Centers of construction carbon emissions gradually moved to the central and southern regions, and the spatial agglomeration effect became increasingly more clear. (2) There were significant differences in construction carbon emissions in the 30 provinces, the gap between regions has continued to expand, and polarization has aggravated; (3) In 1997—2015, construction carbon emissions increased by 115% in the 30 provinces, and the development level of the construction industry and the population employed in the industry were the major contributors to the increase in construction carbon emissions, which led to an increase in construction carbon emissions by 106.52% and 85.43% respectively. On the contrary, the intensity of energy consumption in the construction industry has a constraining effect on construction carbon emissions, reducing carbon emissions by 77.33%; (4) The top two provinces that made the largest contribution to the decline in construction carbon emissions were Heilongjiang and Hainan Provinces, and the bottom two provinces that made the largest contribution to the increase of construction carbon emissions were Shandong and Zhejiang Provinces.

Key words: construction; carbon emissions; spatial autocorrelation; kernel density function; factor decomposition; provincial contribution; China