

# 长江中游城市群碳压力时空演化格局及驱动因素分析

宋梅 常力月 郝旭光\*

**摘要:**绿色低碳是应对气候变化、实现高质量发展的重要路径。本文通过测算碳压力指数,运用探索性空间数据分析、标准差椭圆分析和地理探测器等方法,对2008—2018年长江中游城市群碳压力时空演化格局及驱动因素进行研究。结果显示:碳压力整体处于超载状态,研究期内呈现“N”字形上升趋势,城市间碳压力异质特征显著,空间相关性逐渐减弱;碳压力重心总体向东南偏移,武汉城市圈对长江城市群整体碳压力水平起主导作用,但环鄱阳湖城市群的作用逐渐显现;长江中游城市群碳压力空间分异格局的主要驱动因素为人口密度和技术进步,三个次级城市圈碳压力核心驱动因素差异明显,武汉城市圈、环长株潭城市群和鄱阳湖城市群碳压力核心驱动因素分别为人口密度、经济发展水平和环境规制。进而提出了优化人口结构、推动低碳技术发展,加强长江中游城市群生态系统的保护与修复、提高城市群碳吸收能力,建立区域联动机制、协同治理碳压力的政策建议。

**关键词:**碳压力;时空格局;驱动因素;地理探测器;长江中游城市群

## 一、引言

在全球气候变化背景下,绿色低碳逐渐成为世界各国实现经济转型与可持续发展的共同目标。习近平总书记在第75届联合国大会一般性辩论上提出,中国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。这标志着我国的低碳发展正式进入决策和落实阶段。因此,在区域和地方尺度下,如何落实国家层面提出的低碳发展目标,已成为重要的现实需求。

2020年11月14日,习近平总书记在全面推动长江经济带发展座谈会上强调,要推动长江

---

\*宋梅,中国矿业大学(北京)管理学院,邮政编码:100083,电子邮箱:songmei6361@cumtb.edu.cn;常力月(通讯作者),中国矿业大学(北京)管理学院,邮政编码:100083,电子邮箱:17888826848@163.com;郝旭光,中国矿业大学(北京)管理学院,邮政编码:100083,电子邮箱:hxx\_cumtb@163.com。

本文系自然资源部资源环境承载力评价重点实验室课题“资源型城市经济社会发展与资源环境承载力耦合研究”(CCA2019.16)、中国工程院重大咨询项目“我国煤矿安全及废弃矿井资源开发利用战略研究”(2017-ZD-03)的阶段性成果。感谢匿名审稿人提出的宝贵意见,文责自负。

经济带绿色高质量发展,打造区域协调发展新样板。长江中游城市群是长江经济带的核心区域,在我国经济发展中具有重要的战略地位。同时,长江中游城市群是我国典型的生态敏感区,作为长江流域中人口最密集、资源开发利用强度最高的地区之一,它拥有众多的工业基地,经济发展对资源的依赖性较强,环境破坏问题严重。目前,长江中游城市群正处在工业化和城镇化加速推进的重要阶段,能源消费和碳排放量快速增加,如何实现经济社会和绿色低碳的协调发展,是长江中游城市群亟待解决的难题。因此,科学辨识长江中游城市群碳压力水平及其驱动因素对实现低碳高质量发展具有重要的现实意义。

## 二、文献综述

碳压力是指区域能源消费碳排放量与碳承载力之间的比值,可以衡量碳排放量与碳承载力之间的平衡关系,直接反映了碳排放对区域生态环境的胁迫程度(梁中、徐蓓,2017)。从现有文献来看,与碳压力相关的概念有“碳足迹”(赵先贵等,2013a;田成诗、张诗雅,2019)、“碳赤字”(万伦来等,2020)等,其中,基于“碳足迹”的“碳足迹生态压力指数”“碳足迹广度”等与碳压力的概念最为相近。张清等(2015)将“碳足迹生态压力”的概念定义为能源消费产生的碳排放对自然生态系统产生的压力,用能源碳足迹与生产性土地面积的比值来进行表征,并在此基础上对1996—2010年中国能源碳足迹生态压力的动态变化进行了定量分析;朱向梅和王子莎(2021)为表征人类活动吸纳碳排放所占用的自然资本流量,引入“碳足迹广度”计算碳生态承载力范围内各省份实际占用的生态生产性土地面积。但目前学界对碳足迹的测算方式存在差异,部分研究以二氧化碳当量值测算碳足迹,也有部分研究用吸收1tCO<sub>2</sub>需要的林地或草地的面积表示碳足迹(白伟荣等,2014;闫丰等,2018),导致研究结论难以比较。为使碳排放量和碳承载力平衡关系的定义内涵更加清晰,梁中和徐蓓(2017)提出“碳压力”这一概念,并对中国省域的碳压力时空分布特征及其重心变化趋势进行了综合判断。马歆等(2019)以中国30个省域为研究对象,分析环境规制约束下区域创新对碳压力水平的影响。

碳压力的测度包括碳排放量和碳承载力的计算两个部分。对于碳排放量的核算,核算尺度主要是针对国家或省域层面(Mi et al., 2016;李建豹等,2020),城市层面大多针对直辖市、省会城市或一些发达城市碳排放量的测算(陈操操等,2014;宋祺佼、吕斌,2017;Shan et al., 2017)。但已有研究证明,城市范围内的碳排放量在全球碳排放量中的占比约为75%~80%,在中国,这一占比更是高达85%,城市已成为节能减排的重要区域(Han et al., 2018)。碳排放测算方法中运用最为广泛的有IPCC提供的参考方法和投入产出法。IPCC方法简单明确易于理解,且有成熟的核算公式和活动数据(刘明达等,2014),受到许多学者的青睐。投入产出法则多被用于隐含碳排放的计算当中(刘宇等,2015;王育宝、何宇鹏,2020;王安静等,2020)。碳承载力是指绿色植被的固碳能力,目前对于碳承载力的计算还没有形成统一的标准,测算范围主要包

括森林、草地、农田以及湿地的碳承载力(马彩虹,2012;赵先贵等,2013b;李明琦等,2018)。

为进一步明确区域碳减排路径,有必要对碳压力的驱动因素进行探析。目前对碳压力的驱动因素的研究仍较少,但国内外学者对碳足迹和碳排放的驱动因素已经做了大量的研究,相关研究方法和成果对碳压力及其驱动因素的研究可以起到一定的借鉴作用。碳足迹和碳排放驱动因素分析方法主要包括因素分解法和计量经济学方法(刘红琴等,2020)。孙丽文等(2019)采用LMDI方法对中国工业能源碳足迹生态压力进行了因素分解研究,结果表明经济发展始终是中国工业能源碳足迹生态压力增长的最大原因;张巍(2021)基于STIRPAT模型构建西安市碳足迹的预测模型,通过岭回归分析结果发现人口规模、人均GDP是西安市碳足迹的驱动因素;付华等(2021)采用LMDI方法对2000—2017年中国制造业28个子行业的碳排放影响因素进行分析,结果表明经济活动效应是制造业碳排放的首要驱动力;陈占明等(2018)采用扩展的STIRPAT模型考察了中国地级以上城市二氧化碳排放的影响因素,研究结果发现人口规模、第二产业产值占比的增长会显著提高城市的碳排放量;黄和平等(2019)运用计量经济学模型对长江经济带2006—2015年旅游业碳排放的时空分异特征及其影响因素进行研究,结果表明地区经济发展水平、地区环境污染治理水平、旅游产业结构对旅游业碳排放起着显著负向阻碍作用。李建豹和黄贤金(2015)在定量分析1998—2012年长江经济带二氧化碳的时空格局特征的基础上,构建空间面板模型分析碳排放的影响因素,结果表明人口总量是影响长江经济带碳排放时空格局演化的决定性因素,其次依次为经济水平、技术水平和城市化水平。此外,近几年兴起的地理探测器模型也开始应用于碳排放驱动因素的研究中。赵领娣和吴栋(2018)基于能源供给侧视角,运用地理探测器方法识别1997—2014年中国能源碳排放空间分异格局的主导驱动因子,并探测关键交互因子的多重空间叠加交互效应,结果表明工业化是碳排放空间分异格局的主导驱动因子,所有包含工业化的交互因子均为关键交互因子;王兴民等(2020)运用地理探测器等方法对城市尺度的中国CO<sub>2</sub>排放空间分异的驱动因子进行探究,结果表明能源强度和城市经济规模分别是资源型、北方城市和非资源型、南方城市CO<sub>2</sub>排放空间分异的主导驱动因子。

综上所述,与碳压力相关的研究已取得了一定的进展,但仍存在一些不足:(1)目前有关碳压力的研究仍较少,对其驱动因素的研究较为匮乏;(2)城市已成为节能减排的重要区域,但由于城市能源消费数据的可获性问题,现有与碳压力相关的研究多从国家或省级尺度开展,城市层面的研究较少;(3)传统的方法在探究各项驱动因素的作用时缺乏对空间分异格局主导驱动力的探测分析,且不能很好地反映驱动因素之间的交互作用。因此,本文利用“自上而下”的分解方法,通过省级能源平衡表折算出城市层面的各能源种类的消耗量,以此为基础测算长江中游城市群各城市的碳排放量;综合碳排放量和碳承载力两个指标构建碳压力指数来客观反映长江中游城市群的碳压力水平,运用探索性空间数据分析、标准差椭圆分析等工具进一步分析长江中游城市群碳压力的时空演化格局;采用地理探测器模型分析长江中游城

城市群碳压力的驱动因素,对各驱动因素对碳压力空间分异格局的驱动力进行探测,同时分析驱动因素的交互作用对碳压力的影响,为长江中游城市群制定减排政策,实现区域低碳高质量发展提供科学参考。

### 三、方法与数据

#### (一)碳压力测算方法

##### 1.城市碳排放量的核算

采用IPCC的参考方法进行能源消耗碳排放的计算,计算公式如下:

$$CE = \sum_i AD_i \times NCV_i \times EF_i \times O_i, i \in [1, 17] \quad (1)$$

上式中:  $CE$  代表城市化石能源消耗碳排放量;  $AD_i$  代表城市第  $i$  种化石燃料的消耗量;  $NCV_i$  代表化石燃料  $i$  的热值;  $EF_i$  代表化石燃料  $i$  的排放因子;  $O_i$  代表化石燃料  $i$  的氧化效率。

城市分品种化石燃料的消耗量无法直接获取,本文参考景侨楠等(2019)的研究,基于省级能源平衡表采用自上而下的分解方法进行折算:

$$AD_{i,j}^c = AD_{i,j}^p \times a_j \quad (2)$$

$$a_j = \frac{I_j^c}{I_j^p} \quad (3)$$

上式中:  $j$  代表省级能源平衡表中的行,即能源消耗的类别;  $AD_{i,j}^c$  代表目标城市第  $j$  类的化石燃料  $i$  的消耗量;  $AD_{i,j}^p$  代表目标城市所属省份的第  $j$  类的化石燃料  $i$  的消耗量;  $a_j$  为第  $j$  行的分配系数。  $I_j^c$  代表目标城市第  $j$  行的分配指标的值;  $I_j^p$  代表目标城市所属省份第  $j$  行的分配指标的值。

##### 2.城市碳承载力的测度

由于农田是否有净吸收量和吸收量大小存在一定争议(郑德凤等,2020),故本研究考虑森林、草地以及湿地的碳吸收能力,碳承载力的计算公式为:

$$CC = C_f + C_g + C_w \quad (4)$$

上式中,  $CC$  为碳承载力( $\text{tC} \cdot \text{a}^{-1}$ , 其中  $C$  表示  $\text{CO}_2$ ,  $a$  表示每年,下同);  $C_f$  为森林固碳量( $\text{tC} \cdot \text{a}^{-1}$ );  $C_g$  为草地固碳量( $\text{tC} \cdot \text{a}^{-1}$ );  $C_w$  为湿地固碳量( $\text{tC} \cdot \text{a}^{-1}$ )。  $C_f$ 、 $C_g$ 、 $C_w$  分别用各城市森林、草地及湿地面积乘以相应的碳吸收能力计算。相关参数如表1所示。

在计算出各城市碳排放和碳承载力的基础上,构建碳压力指数( $CBI$ )。

$$CBI = \frac{CE}{CC} \quad (5)$$

表 1 森林、草地、湿地的年均碳吸收强度

类别	碳吸收能力 (tC/hm <sup>2</sup> ·a)
森林	3.8096
草地	0.9482
湿地	0.57

注：以上参数参考谢鸿宇等(2008)和段晓男等(2008)的研究。

若碳压力指数  $CBI > 1$ , 表明该城市碳排放量大于碳承载力, 城市处于碳压力超载状态; 若碳压力指数  $CBI < 1$ , 则表明城市碳排放量在其碳吸收能力的可承受范围内, 城市碳生态系统存在碳盈余; 若碳压力指数  $CBI = 1$ , 则城市碳排放量与碳承载力相等, 该城市的碳生态系统位于超载的临界点。

(二)标准差椭圆

标准差椭圆可以从全局的角度定量解释地理单元某一属性值空间分布的中心性、方向性和空间形态等整体性特征。椭圆重心表示变量在空间上的相对位置, 方位角表示该变量发展的主要方向, 长轴和短轴分别代表在主要方向和次要方向上的离散程度(赵璐、赵作权, 2014)。标准差椭圆主要要素的计算公式为:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \tag{6}$$

$$\theta = \arctan \left[ \frac{(\sum_{i=1}^n w_i^2 \bar{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n w_i^2 \bar{y}_i^2) + \sqrt{(\sum_{i=1}^n w_i^2 \bar{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n w_i^2 \bar{y}_i^2)^2 + 4(\sum_{i=1}^n w_i^2 \bar{x}_i \bar{y}_i)^2}}{2 \sum_{i=1}^n w_i^2 \bar{x}_i \bar{y}_i} \right] \tag{7}$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \bar{x}_i \cos \theta - w_i \bar{y}_i \sin \theta)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}}, \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \bar{x}_i \sin \theta + w_i \bar{y}_i \cos \theta)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}} \tag{8}$$

上式中,  $\bar{X}$  和  $\bar{Y}$  表示标准差椭圆的重心坐标;  $x_i$  和  $y_i$  为研究区域各城市的中心坐标;  $w_i$  表示各城市能源消费碳压力的权重;  $\theta$  表示椭圆方向角;  $\bar{x}_i$ ,  $\bar{y}_i$  表示各城市中心坐标到重心坐标的偏差;  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  分别表示标准差椭圆的长、短轴的距离。

(三)探索性空间数据分析

全局 Moran'I 指数可以反映整个研究区域的空间特征和空间相关性的整体趋势。计算公式为:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}}, W_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{地区 } i \text{ 与地区 } j \text{ 相邻} \\ 0, & \text{地区 } i \text{ 与地区 } j \text{ 不相邻} \end{cases} \tag{9}$$



其中,  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$  表示样本均值;  $S^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / n$  表示样本方差;  $W_{ij}$  是空间权重矩阵, 表示空间单元的拓扑关系。由于长江中游城市群各城市在空间上呈现连续性, 因此本文采用更为适合的空间邻接矩阵,  $i, j (i, j = 1, 2, \dots, n)$  是位于不同位置的观测点。为了便于解释, 本文对空间权重矩阵进行了归一化处理;  $x_i$  是长江中游城市群地区  $i$  的观测值;  $n$  是长江中游城市群地级市的数目(取值为31)。Moran'I取值为 $[-1, 1]$ , 越接近1, 正空间相关性越强, 总体的空间差异越小; 越接近-1, 负空间相关性越明显, 总体的空间差异越大; 值为0时表示不存在空间相关性。

局部 Moran'I 可以解释空间地域单元与周边空间单元属性特征值之间的空间差异程度, 计算公式为:

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S^2} \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (10)$$

在特定的置信水平下, 局部 Moran'I > 0 时, 表示相邻的空间地域单元存在正的空间集聚效应; 局部 Moran'I < 0 时, 表示相邻的空间地域单元存在负的空间集聚效应。

#### (四) 地理探测器

地理探测器是探测空间分异性, 并揭示其因子驱动力的一组统计学方法(王劲峰、徐成东, 2017)。驱动因子探测模型如下:

$$q = 1 - \frac{1}{n\sigma_G^2} \sum_{i=1}^m n_{D,i} \sigma_{D,i}^2 \quad (11)$$

上式中:  $i = 1, \dots, m$  为驱动因子的分层;  $n_{D,i}$  为分层  $i$  上的个数,  $\sigma_G^2$  和  $\sigma_{D,i}^2$  分别是观测区域和层  $i$  的碳压力的方差;  $q$  值的取值范围为 $[0, 1]$ ,  $q$  值越大说明  $D$  因子对区域碳压力的驱动作用越大, 反之, 则越小。

长江中游城市群碳压力的时空演变是一个较为复杂的过程, 受经济、政策、技术发展、环境规制等因素的综合作用。通过文献梳理, 选取城镇化(URB)、人口密度(POP)、经济发展水平(PGDP)、产业结构(IND)、技术进步(TEC)和环境规制(EVI)6项因子(见表2), 对长江中游城市群碳压力时空分异的驱动力进行探测。

表2 碳压力驱动因素指标

代码	探测因子	具体含义
URB	城镇化水平	城镇人口占总人口比重(%)
POP	人口密度	每平方公里人口数(万人/平方公里)
PGDP	经济发展水平	人均GDP(万元)
IND	产业结构	产业结构高级化指数(付凌晖, 2010)
TEC	技术进步	专利申请量(件)
EVI	环境规制	环境规制综合指数(黄志基等, 2015)

(五)数据来源

根据2015年国务院批准的《长江中游城市群发展规划》，确定长江中游城市群包括武汉城市圈、环长株潭城市群、环鄱阳湖城市群共31个地级市<sup>①</sup>。省级能源平衡表数据来源于《中国能源统计年鉴》(2009—2019年)；各城市分品种能源消费量折算所需数据，森林、草地、湿地面积及各驱动因素数据来自历年湖北、湖南和江西省统计年鉴以及各地市统计年鉴和国民经济与社会发展统计公报。为消除价格因素影响，各城市GDP及工业总产值以2005年为基期进行折算，缺失值采用插值法处理。

四、结果与分析

(一)长江中游城市群碳压力的时空演化格局分析

1.长江中游城市群碳压力时序演化分析

由图1可知，2008—2018年长江中游城市群碳压力值由1.59上升至2.28，碳排放量呈“N”字形变化态势，碳承载力增长乏力，碳压力的变化由碳排放量的变化趋势主导。2008—2011年长江中游城市群碳压力呈快速增长趋势，年均增速为10%，这一阶段长江中游城市群经济发展速度快，能源消费量快速增长导致其碳排放量增加，碳压力增强；2011—2012年碳压力增速放缓且在2013年出现大幅下降，2013年之后又逐渐缓慢上升，这可能是由于2011年以后长江中游城市群经济增速放缓，尤其是自2012年以来，我国经济发展进入新常态，经济发展由高速增长逐步向高质量集约型发展转变，城市群能源消费增幅降低，碳压力增速减缓。

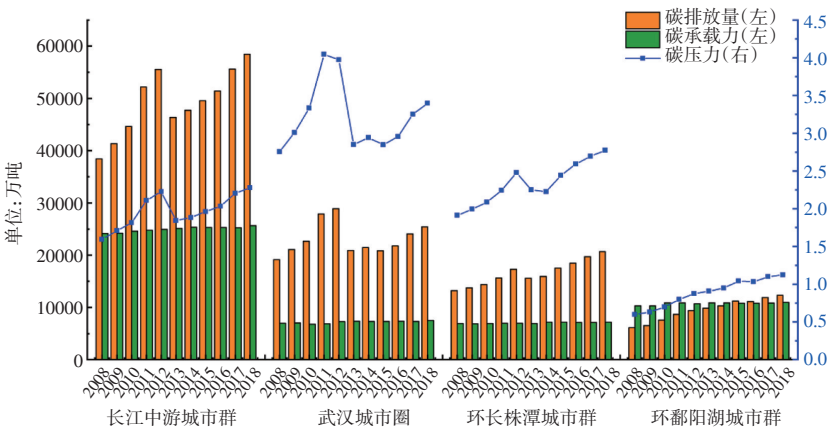


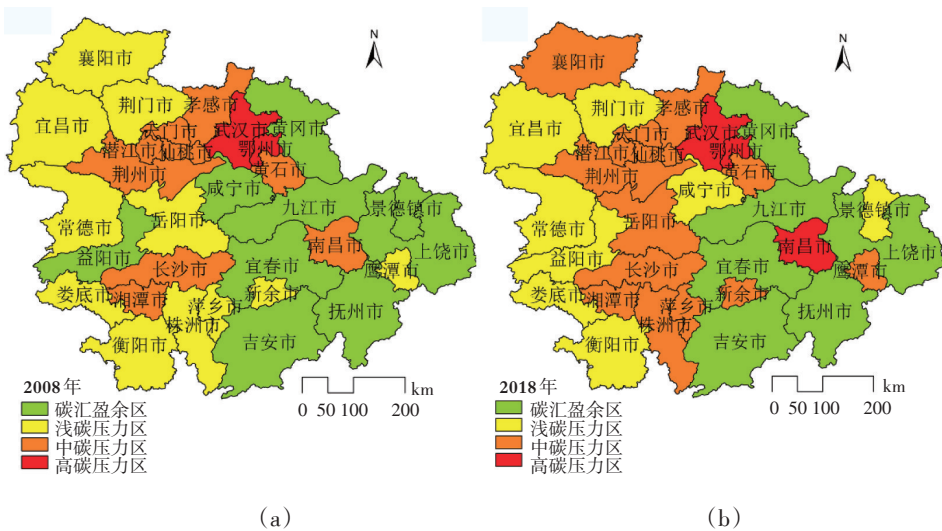
图1 长江中游城市群碳排放、碳承载力及碳压力

①规划范围包括：武汉市、黄石市、鄂州市、黄冈市、孝感市、咸宁市、仙桃市、潜江市、天门市、襄阳市、宜昌市、荆州市、荆门市、长沙市、株洲市、湘潭市、岳阳市、益阳市、常德市、衡阳市、娄底市、南昌市、九江市、景德镇市、鹰潭市、新余市、宜春市、萍乡市、上饶市及抚州市、吉安市的部分县（区）。基于空间连续性 & 数据获取性的考虑，本文将抚州及吉安市的整体纳入研究范围。

从三个次级城市群角度看,区域间碳压力差异较大,碳压力大小具体表现为:武汉城市圈>环长株潭城市群>环鄱阳湖城市群。2008—2018年武汉城市圈和环长株潭城市群碳压力呈“N”字形增长态势,环鄱阳湖城市群碳压力则呈现出稳定增长的趋势。2018年武汉城市圈、环长株潭城市群、环鄱阳湖城市群碳压力分别为3.39、2.87和1.12,较2008年的增长幅度分别为23%、50%和89%。武汉城市圈的碳压力最大,但增幅最小,而环鄱阳湖城市群的碳压力水平最低,增长速度最快,在未来将面临较大的碳增量压力。

## 2.长江中游城市群碳压力空间演化分析

(1)长江中游城市群碳压力空间分异特征显著。2008—2018年长江中游城市群各城市碳压力分布呈不均衡性显著。根据2008年碳压力的大小,运用自然断点法将长江中游城市群31个城市划分为4种类型,分别是高碳压力区、中碳压力区、浅碳压力区和碳汇盈余区(图2)。其中,高碳压力区主要包括武汉和鄂州,碳压力值分别高达23.15和10.93,处于区域碳生态的极端高压状态;中碳压力区主要为高于城市群平均碳压力值(武汉、鄂州除外)的区域,包括长沙、南昌等9个城市,其碳压力值总体在5左右,也处于严重碳压力超载状态。浅碳压力区为碳压力值大于1,但低于长江中游城市群平均值的区域,主要包括株洲、荆门、萍乡等11个城市( $1 < CBI < 2$ )。碳汇盈余区包括黄冈、益阳、宜春等9个城市,碳压力值均小于1。



注:本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图(审图号:GS(2019)1823)制作,底图无修改。

图2 2008和2018年长江中游城市群碳压力空间分布格局

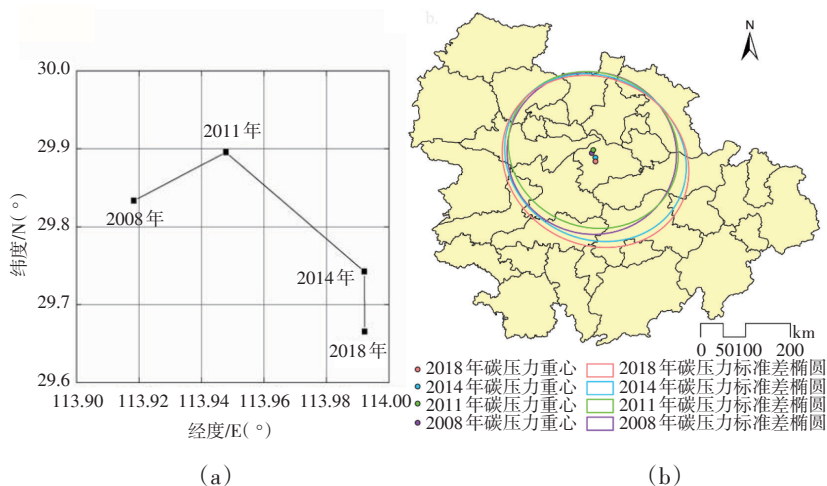
根据上述四类碳压力区形成性质的不同,将其分为三种类型。第一种为高排放、低承载类,大部分中碳压力区都属于这种类型。第二种为低排放、极低承载类,即碳排放总量虽然不大,但碳承载力极低,比如处于高碳压力区的鄂州和处于中碳压力区的仙桃等城市。这些城市的碳排放量均低于长江中游城市群平均水平,但由于固碳资源禀赋匮乏,碳承载力极低,从



而导致其碳压力水平处于高值;第三种为低排放、高承载类,即碳排放量相对较低,同时碳承载力较高,大部分浅碳压力区和碳汇盈余区都属于这种类型。

通过对比2008年和2018年长江中游城市群碳压力情况可知,浅碳压力区和碳汇盈余区的碳压力总体增长最快,在10个发生跃迁的城市中,有3个城市由碳汇盈余区跃迁至浅碳压力区,6个城市由浅碳压力区跃迁至中碳压力区,1个城市由中碳压力区直接跃迁至高碳压力区。整体来看,高碳压力区的碳压力水平处于降速状态,碳汇盈余区和浅碳压力区的碳压力水平则呈增加态势。说明碳压力基数比较大的城市碳压力增长幅度相对较小,而碳压力基数相对较小的城市,总体表现出碳压力增速快的特征。

(2)长江中游城市群碳压力重心迁移路径与标准差椭圆演变态势。根据长江中游城市群各城市空间位置坐标和碳压力情况,运用ArcGIS10.2软件计算碳压力空间重心及标准差椭圆。2008年、2011年、2014年和2018年长江中游城市群碳压力重心变化过程如图3(a)所示。从图中可以看出,2008—2018年长江中游城市群碳压力重心位于东经113.92°~113.99°,北纬29.67°~29.89°,整体位于武汉城市圈内,碳压力重心纬度下降,经度上升,2008—2011年碳压力重心向东北部偏移,2011—2018年向东南部偏移。表明武汉城市圈碳压力水平对长江中游城市群碳压力起主导作用,2011年前武汉城市圈碳压力水平增速较快,碳压力重心向武汉城市圈偏移,2011年以后,武汉城市圈碳压力水平整体增速放缓,环鄱阳湖城市群碳压力对长江中游城市群碳压力的拉动作用逐渐显现。



注:本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作(审图号:GS(2019)1823),底图无修改。

图3 长江中游城市群碳压力重心迁移及标准差椭圆变化过程

长江中游城市群碳压力的标准差椭圆在2008、2011、2014和2018年变化过程如图3(b)所示。长江中游城市群碳压力方位角由2008年的104.42°增加至2018年的117.01°,顺时针旋转12.59°。武汉城市圈的工业资本丰富,尽管环长株潭城市群和环鄱阳湖城市群碳压力处于增

长趋势,但武汉城市圈的经济总量仍相对较大,其快速的经济增长导致碳排放量的规模更大,碳压力值也更大。因此,武汉城市圈碳压力对环长株潭城市群和环鄱阳湖城市群的拉动效应更为显着,这导致碳压力标准偏差椭圆的方位角在空间上增大。

在长轴方向上,长江中游城市群碳压力标准差椭圆 2018 年长轴长度较 2008 年增加 12.75%,说明碳压力分布在西北-东南方向上有较明显的增加,尤其东南方向增速较快,表明环鄱阳湖城市群碳压力增幅较大;在短轴方向上,2008—2018 年长江中游城市群碳压力标准差椭圆短轴长度整体变化不大,表明长江中游城市群碳压力的向心力基本稳定。

(二)长江中游城市群碳压力空间相关性分析

2008—2018 年长江中游城市群碳压力全局 Moran'I 指数如表 3 所示。2008—2011 年 Moran'I 指数呈增长趋势,说明长江中游城市群碳压力的空间相关性逐渐增强;2012—2018 年 Moran'I 指数整体呈波动下降趋势,表明长江中游城市群碳压力的空间相关性特征在不断减弱,说明在区域碳减排的过程中,各地区减排力度和政策实施效果的差异导致各地区之间的碳压力整体差异正在逐渐拉大。

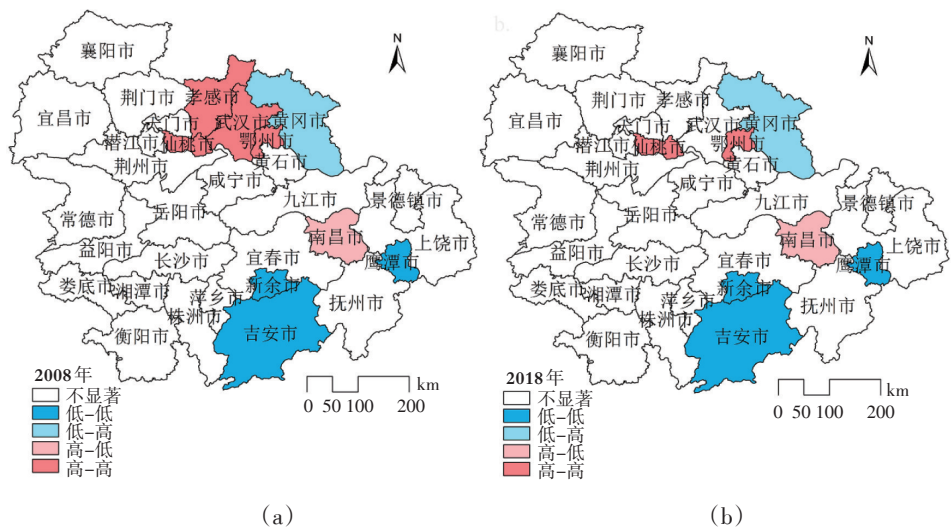
表 3 2008—2018 年长江中游城市群碳压力全局 Moran'I 指数

年份	Moran'I 值	P 值
2008	0.229	0.014**
2009	0.256	0.010**
2010	0.268	0.016**
2011	0.289	0.008***
2012	0.277	0.013**
2013	0.205	0.029**
2014	0.211	0.028**
2015	0.168	0.048**
2016	0.165	0.049**
2017	0.196	0.033**
2018	0.163	0.050**

注: \*\*、\*\*\* 分别代表在 5%、1% 的水平上显著。下表同。

图 4 为 2008 和 2018 年长江中游城市群碳压力的 Lisa 集聚图。由图 4 可知,四个象限均有部分城市通过了 5% 的显著性检验。2008 和 2018 年,鄂州和仙桃始终处于碳压力水平的高-高区,说明这两个城市与相邻地区的碳排放量均较高,空间上呈现出正相关关系。处于低-低区的城市为吉安、新余和鹰潭,表明这三个城市与相邻地区的碳压力水平均较低。研究期内,南昌始终处于碳压力水平的高-低区,表明南昌自身碳压力水平较高,而相邻地区碳排放量较低,空间上表现出中心较高四周较低的负相关关系。黄冈始终处于碳压力的低-高区,说明黄冈自身碳压力水平较低,相邻城市碳压力水平较高。武汉和孝感由 2008 年的碳压力高-高区

转变为2018年的不显著地区,表明武汉和孝感的碳压力水平在研究期内得到了有效缓解。



注:本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作(审图号:GS(2019)1823),底图无修改。

图4 2008和2018年长江中游城市群碳压力Lisa集聚图

(三)长江中游城市群碳压力空间分异格局的驱动因素分析

1.长江中游城市群碳压力空间分异格局的驱动因素探测

首先,运用自然断裂法对探测因子进行离散化和类别化处理,再通过地理探测器模型测算各探测因子对长江中游城市群碳压力空间分异格局驱动能力的 $q$ 值(见表4)。探测结果显示,各因子对长江中游城市群碳压力的驱动作用均通过了显著性检验。

表4 2008年和2018年长江中游城市群探测因子 $q$ 值结果				
代码	探测因子	$q$ 值		驱动作用变化
		2008 年	2018 年	
URB	城镇化水平	0.3011***	0.6247***	↑
POP	人口密度	0.5369***	0.8479***	↑
PGDP	经济发展水平	0.4784***	0.3083***	↓
IND	产业结构	0.3511***	0.5720***	↑
TEC	技术进步	0.2546***	0.7667***	↑
EVI	环境规制	0.3586***	0.6206***	↑

人口密度(POP)对城市群碳压力空间分异格局的驱动作用最大。研究期内,长江中游城市群人口密度由2008年的354人/平方公里增长至2018年的371人/平方公里。一方面,随着人口的不断集聚,城市生产生活方式随之发生改变,对基础设施及居民住宅建设的需求增加,能源资源等需求逐渐增大,导致碳排放量增大;另一方面,人口密度的增长也使得各城市不得不减少绿地及林地的面积建造住房,一定程度上降低了区域碳汇水平(朱天舒、秦晓微,

2012)。因而2018年人口密度对碳压力空间分异格局的作用(0.8479)比2008年(0.5369)有所提升。

技术进步水平(TEC)对碳压力空间分异格局有显著影响。科学技术不仅为经济发展提供动力支持,低碳技术进步还是发展低碳经济的有效途径(孙欣等,2016)。低碳技术的应用不仅可以从碳源端有效降低碳排放,碳捕集、利用和封存技术还可以提高碳储存能力,增加区域碳承载力,缓解区域碳压力。因而,与2008年相比,2018年技术进步水平抑制碳压力的作用在增强。随着国家创新驱动发展战略的实施和对科技发展能力的高度重视,长江中游城市群会有更多绿色环保科技成果产出并转化落地,这将对区域碳减排发挥着决定性作用。

城镇化水平(URB)对碳压力空间分异格局的影响明显。长江中游城市群作为中西部城镇化先行区,近年来城镇化进展迅猛。一方面,城镇化的高速推进带来了资本、劳动力、技术等要素的集聚和消费需求的增加,促进了生产发展与经济增长,同时也带动了能源消费和碳排放的快速增长;另一方面,城镇化的快速发展使得城区土地的利用方式发生改变,降低了区域的碳汇水平(王峰等,2017)。因而城镇化对碳压力空间分异格局的驱动作用有所增加,由2008年的0.3011增加至2018年的0.6247。

环境规制(EVI)对碳压力空间分异格局的影响有所增加。环境规制会对污染密集型产业形成有效约束,推动产业结构优化转型,从而缓解碳压力(徐盈之等,2015)。当环境规制标准不断提升时,会直接或间接增加企业的生产成本,倒逼高耗能、高污染的企业进行生产技术创新、治污技术升级以及管理模式革新,进而推动企业资源利用效率不断提高(李珊珊、马艳芹,2019)。另外,《长江经济带生态环境保护规划》《中华人民共和国长江保护法》等环保法规的颁布和实施增强了长江中游城市群的环保意识,对区域碳汇能力水平的提升起到了积极作用。因此2018年环境规制对碳压力的影响(0.6206)比2008年(0.3586)有所提升。

产业结构(IND)对碳压力空间分异格局起到一定的驱动作用。研究期内,长江中游城市群产业结构高级化水平逐渐提升,产业结构由第二产业主导逐步向第三产业转移。近年来,长江中游城市群以国家级承接产业转移示范区、自贸区、开发区等产业平台为引领,将产业转移协作视为经济发展的重要引擎,承接高新技术、智能制造装备等新兴产业,产业优化升级效果明显。产业结构的优化升级既可以对产业间的生产要素和资源进行合理配置和有效利用,还能够提高劳动生产率和能源利用效率,协调产业间的发展(王淑英等,2021),与2008年相比,2018年产业结构抑制碳压力的作用在增强。

经济发展水平(PGDP)对碳压力空间分异格局起到关键作用,经济的快速发展消耗大量化石能源直接导致区域碳压力增大。近年来,随着国家和地方政府一系列生态保护政策的出台和人民日益提高的环保意识(辛龙等,2020),长江中游城市群的经济增长方式由高速增长型逐步向高质量集约型转变,因此2018年经济发展水平对碳压力的影响(0.3083)比2008



年(0.4784)有所降低。

## 2.三个次级城市群碳压力空间分异格局驱动因素探测

为探测上述驱动因素对三个次级城市群碳压力空间分异格局的驱动作用,采用地理探测器对武汉城市圈、环长株潭城市群和环鄱阳湖城市群分别进行探测,得出各因子在不同区域上的  $q$  值(见表5),进一步揭示各因子对碳压力空间分异格局的驱动作用。

表5 2008年和2018年三个次级城市群探测因子  $q$  值结果

代码	探测因子	2008			2018		
		武汉城市圈	环长株潭城市群	环鄱阳湖城市群	武汉城市圈	环长株潭城市群	环鄱阳湖城市群
URB	城镇化水平	0.8721***	0.9262***	0.9728***	0.7979*** (↓)	0.4546*** (↓)	0.9883*** (↑)
POP	人口密度	0.9130***	0.5037***	0.9868***	0.9583*** (↑)	0.9104*** (↑)	0.9782*** (↓)
PGDP	经济发展水平	0.8774***	0.8967***	0.6792***	0.2336*** (↓)	0.9181*** (↑)	0.6336*** (↓)
IND	产业结构	0.1667***	0.5266***	0.9789***	0.5340*** (↑)	0.3574*** (↓)	0.7168*** (↓)
TEC	技术进步	0.9214***	0.9043***	0.9656***	0.9294*** (↑)	0.8788*** (↓)	0.9943*** (↑)
EVI	环境规制	0.1722***	0.9309***	0.7667***	0.1545*** (↓)	0.8720*** (↓)	0.9367*** (↑)

(1)武汉城市圈。人口密度是影响武汉城市圈碳压力空间分异格局的最主要因素。研究期内,人口密度、产业结构和技术进步对武汉城市圈碳压力空间分异格局的驱动作用有所增强。武汉城市圈作为国内第一个“两型社会”综合改革试验区的城市群,2008年以来城市圈内各城市均得到了快速发展,人口规模也随之增长,能源资源等消耗量逐渐增大;武汉城市圈各城市的产业在近年来进行了有机融合,打造了一批高端产业基地和特色产业集群,使整个武汉城市圈的产业结构得到了优化升级;同时,武汉城市圈具备优渥的教育资源,积累了大量的科研人才,技术发展突飞猛进,创新技术的落地投产使得传统重工业企业的能耗降低,污染物排放减少。未来武汉城市圈应通过合理控制人口规模,进一步优化产业结构,加大科技研发方面的投入等措施,促进区域绿色低碳发展。

(2)环长株潭城市群。环境规制是影响环长株潭城市群碳压力空间分异格局的最主要因素。人口密度和经济发展水平对环长株潭城市群碳压力的影响有所增强。研究期内,区域人口的迅速增加使环长株潭城市群各城市规模急剧扩张,直接引起能源消费的增长;环长株潭城市群依托湘江新区、两型社会试验区和国家自主创新示范区三大平台积极参与长江中游城市群合作与建设,对区域经济发展起到了较强的推动作用,经济的快速发展直接影响区域的



碳压力水平,因而环长株潭城市群的经济发展水平在研究期内对碳压力的影响有所增强。环长株潭城市群应在合理控制区域人口密度的同时进一步推进区域经济由高速增长向高质量集约型发展转变,以实现减缓区域碳压力的目标。

(3)环鄱阳湖城市群。技术进步是影响环鄱阳湖城市群碳压力空间分异格局的最主要因素。城镇化、技术进步和环境规制对区域碳压力的作用有所增强。环鄱阳湖城市群的城镇化和技术创新水平一直相对较低,同时人才流失严重、环境监管不严格等社会问题突出。虽然环鄱阳湖城市群有先天的生态环境优势,碳汇能力位于三个次级城市群之首,但由于其城镇化进程迟缓,对人才的吸引力不足,低碳技术发展缓慢,环保意识薄弱且措施不当,致使碳压力水平增速较快。政府部门需稳步推进城镇化进程,同时提升人才引育力度,加大科研创新投入,制定并实施严格的环境保护政策,进一步降低区域碳压力水平。

### 3.驱动因素交互探测分析

在因子探测的基础上,得到2018年长江中游城市群碳压力驱动力的交互探测结果(见表6)。结果表明,双因子交互作用的驱动力均比单因子作用强。与单因子作用相比,每个影响因子与其他因子共同作用时的 $q$ 值均有不同程度的提高。在所有驱动因素中,对碳排放空间分异格局决定力水平相对较高的交互因子为 $URB \cap POP$ 、 $POP \cap PGDP$ 、 $POP \cap IND$ 、 $POP \cap TEC$ 、 $IND \cap TEC$ ,这表明包含人口密度的交互因子对长江中游城市群碳压力空间分异格局的多重空间叠加交互效应最强,其次是技术进步和产业结构。

表6 2018年长江中游城市群碳压力空间分异格局的交互探测结果

	$URB$	$POP$	$PGDP$	$IND$	$TEC$	$EVI$
$URB$	0.6247					
$POP$	0.9329	0.8479				
$PGDP$	0.6748	0.9138	0.3083			
$IND$	0.7096	0.9274	0.6635	0.5720		
$TEC$	0.8665	0.9381	0.7842	0.9277	0.7667	
$EVI$	0.8682	0.8867	0.8574	0.8171	0.8230	0.6206

## 五、结论与建议

本文基于省级能源平衡表,通过“自上而下”的分解方法对长江中游城市群31个地级市的碳排放量进行了测算,以此为基础测度了长江中游城市群碳压力水平,进一步运用探索性空间数据分析、标准差椭圆和地理探测器等分析手段,探讨区域碳压力时空演化格局及驱动因素,主要结论如下:

(1)长江中游城市群碳压力整体处于超载状态,研究期内呈现“N”字形上升趋势,城市间碳压力异质特征明显,空间相关性逐渐减弱。其中,经济发达的武汉城市圈碳压力最大,但增

速和变化强度最低;环长株潭城市群碳压力有小幅增加;经济欠佳的环鄱阳湖城市群的碳压力基数最小,但增速最快,未来将面临更巨大的碳增量压力。大部分中碳压力区是由于排放总量大和低承载力所导致,部分高碳压力区和少部分中碳压力区主要是由于低排放量和极低承载所导致,而浅碳压力区和碳汇盈余区则均由低排放量和高承载力所致。

(2)2008—2018年长江中游城市群碳压力重心位于武汉城市圈,总体向东南部发生偏移;碳压力的标准差椭圆显示出“西北-东南”格局,方位角逐渐增大,有向北旋转的趋势。长轴长度在东南方向上增速较快,表明武汉城市圈碳压力在长江中游城市群整体碳压力水平起主导作用,但环鄱阳湖城市群碳压力对长江中游城市群的作用在逐渐显现。短轴长度变化不大,碳压力向心力基本稳定。

(3)人口密度是影响长江中游城市群碳压力的最重要因素,其次为技术进步,提高技术进步水平是降低区域碳压力的有效途径。三个次级城市群探测的驱动力差异显著,驱动三个次级城市群碳压力空间分异格局的核心因素分别为:武汉城市圈为人口密度、产业结构和技术进步;环长株潭城市群为经济发展水平和人口密度;环鄱阳湖城市群为城镇化、技术进步和环境规制。双因子交互作用驱动力强于单因子,人口密度、技术进步和产业结构的相互作用对城市群碳压力影响较大。

本文提出如下政策建议:

(1)优化人口结构,推动低碳技术发展。人口密度和技术进步是目前长江中游城市群碳压力空间差异的主要驱动因素。政府应通过优化人口结构适度控制区域人口密度,提高人口素质。此外,政府也要给予相对落后城市更多的资金与政策支持,促进人才和高新技术流动,缓解人口和技术差异所导致的城市碳压力空间分异格局现状。三个次级城市群碳压力存在显著差异,各地应因地制宜地制定碳减排政策。武汉城市圈应合理控制人口规模,发挥其科学技术优势,持续扩大技术创新投入,推进产业转型升级;环长株潭城市群应着重推进区域经济高质量发展和控制人口规模;环鄱阳湖城市群应加速城镇化进程,加大科学技术方面的投入,制定并实施严格的环境保护政策,推进区域低碳发展。

(2)加强对长江中游城市群生态系统的保护与修复,提高城市群碳吸收能力,进而有效减缓碳压力。各地政府要做好天然林保护及湿地保护等生态修复工程,将政策措施和宣传引导相结合,开展宜林荒山及无立木林地造林、疏林地及未成林地实施封山育林,通过调整林木种植结构,增加森林林木蓄积量等措施从整体上提高区域生态自然对碳的吸附能力。以创建森林城市、文明城市为重要抓手,鼓励城乡居民和社会资金投入绿化建设中,抓好城乡闲置散碎土地的绿化,进一步提高城市生态碳承载力。在此基础上,大力推进碳捕集、利用与封存技术的发展,在一些企业或领域开展前期示范,通过示范提高技术的可行性和可靠性,降低成本,为最终实现“3060”双碳目标提供技术支撑。

(3)建立区域联动机制,对碳压力进行协同治理。由于碳压力存在空间相关性,城市碳压力不仅与自身碳压力水平高度相关,还会受相邻城市碳压力的影响。因而长江中游城市群各地政府在制定碳减排政策时必须综合考量自身和临近城市的经济社会和环境特征,“以邻为伴”促进长江中游城市群全面、协调、可持续发展。湖北作为我国七个碳试点之一,在碳市场运行过程中取得了卓越成效,应以湖北碳试点带动整个长江中游城市群碳市场的发展,坚持“高位推动、强头带动”,在各地政府政策支持的同时借鉴湖北碳试点的先进经验,完善区域碳市场,为建立全国统一碳市场奠定基础。

## 参考文献:

- [1] 白伟荣,王震,吕佳. 碳足迹核算的国际标准概述与解析[J]. 生态学报,2014,34(24):7486-7493.
- [2] 陈操操,刘春兰,汪浩,关婧,陈龙,王海华,张继平,李铮,刘晓洁. 北京市能源消费碳足迹影响因素分析——基于STIRPAT模型和偏小二乘模型[J]. 中国环境科学,2014,34(06):1622-1632.
- [3] 陈占明,吴施美,马文博,刘晓曼,蔡博峰,刘婧文,贾小平,张明,陈洋,徐丽笑,赵晶,王思元. 中国地级以上城市二氧化碳排放的影响因素分析:基于扩展的STIRPAT模型[J]. 中国人口·资源与环境,2018,28(10):45-54.
- [4] 段晓男,王效科,逯非,欧阳志云. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报,2008,(02):463-469.
- [5] 付华,李国平,朱婷. 中国制造业行业碳排放:行业差异与驱动因素分解[J]. 改革,2021,(05):38-52.
- [6] 付凌晖. 我国产业结构高级化与经济增长关系的实证研究[J]. 统计研究,2010,27(08):79-81.
- [7] 黄和平,乔学忠,张瑾,李亚丽,曾永明. 绿色发展背景下区域旅游业碳排放时空分异与影响因素研究——以长江经济带为例[J]. 经济地理,2019,39(11):214-224.
- [8] 黄志基,贺灿飞,杨帆,周沂. 中国环境规制、地理区位与企业生产率增长[J]. 地理学报,2015,70(10):1581-1591.
- [9] 景侨楠,侯慧敏,白宏涛,徐鹤. 自上而下的城市能源消耗碳排放估算方法[J]. 中国环境科学,2019,39(01):420-427.
- [10] 李建豹,黄贤金,揣小伟,孙树臣. 基于碳排放总量和强度约束的碳排放配额分配研究[J]. 干旱区资源与环境,2020,34(12):72-77.
- [11] 李建豹,黄贤金. 基于空间面板模型的碳排放影响因素分析——以长江经济带为例[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(10):1665-1671.
- [12] 李明琦,刘世梁,武雪,孙永秀,侯笑云,赵爽. 云南省农田生态系统碳足迹时空变化及其影响因素[J]. 生态学报,2018,38(24):8822-8834.
- [13] 李珊珊,马艳芹. 环境规制对全要素碳排放效率分解因素的影响——基于门槛效应的视角[J]. 山西财经大学学报,2019,41(02):50-62.
- [14] 梁中,徐蓓. 中国省域碳压力空间分布及其重心迁移[J]. 经济地理,2017,37(02):179-186.
- [15] 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[J]. 生态经济,2020,36(10):41-47.
- [16] 刘明达,蒙古军,刘碧寒. 国内外碳排放核算方法研究进展[J]. 热带地理,2014,34(02):248-258.
- [17] 刘宇,吕郢康,周梅芳. 投入产出法测算CO<sub>2</sub>排放量及其影响因素分析[J]. 中国人口·资源与环境,2015,25(09):21-28.
- [18] 马彩虹. 中国能源碳足迹与植被碳承载力的对比分析[J]. 生态经济,2012,(06):53-55.

- [19] 马歆,薛天天,WAQAS ALI,王继东.环境规制约束下区域创新对碳压力水平的影响研究[J].管理学报,2019,16(01):85-95.
- [20] 宋祺佼,吕斌.城市低碳发展与新型城镇化耦合协调研究——以中国低碳试点城市为例[J].北京理工大学学报(社会科学版),2017,19(02):20-27.
- [21] 孙丽文,王丹涪,杜娟,韩莹.基于LMDI的中国工业能源碳足迹生态压力因素分解研究[J].生态经济,2019,35(01):13-18.
- [22] 孙欣,沈永昌,陶然.中国低碳技术进步测度及对碳排放强度影响效应研究[J].江淮论坛,2016,(06):64-71.
- [23] 田成诗,张诗雅.中国行业供应链碳足迹的来源分解分析——基于投入产出的生命周期评价模型[J].环境经济研究,2019,4(02):59-75.
- [24] 万伦来,林春鑫,陈艺.基于相对碳赤字的中国省际碳补偿时空格局研究[J].长江流域资源与环境,2020,29(12):2572-2583.
- [25] 王安静,孟渤,冯宗宪,刘宇.增加值贸易视角下的中国区域间碳排放转移研究[J].西安交通大学学报(社会科学版),2020,40(02):85-94.
- [26] 王锋,秦豫徽,刘娟,吴从新.多维度城镇化视角下的碳排放影响因素研究——基于中国省域数据的空间杜宾面板模型[J].中国人口·资源与环境,2017,27(09):151-161.
- [27] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(01):116-134.
- [28] 王淑英,卫朝蓉,寇晶晶.产业结构调整与碳生产率的空间溢出效应——基于金融发展的调节作用研究[J].工业技术经济,2021,40(02):138-145.
- [29] 王兴民,吴静,白冰,王铮.中国CO<sub>2</sub>排放的空间分异与驱动因素——基于198个地级及以上城市数据的分析[J].经济地理,2020,40(11):29-38.
- [30] 王育宝,何宇鹏.中国省域净碳转移测算研究[J].管理学报,2020,33(02):1-10.
- [31] 谢鸿宇,陈贤生,林凯荣,胡安焱.基于碳循环的化石能源及电力生态足迹[J].生态学报,2008,(04):1729-1735.
- [32] 辛龙,孙慧,王慧,肖涵月.基于地理探测器的绿色经济效率时空分异及驱动力研究[J].中国人口·资源与环境,2020,30(09):128-138.
- [33] 徐盈之,杨英超,郭进.环境规制对碳减排的作用路径及效应——基于中国省级数据的实证分析[J].科学学与科学技术管理,2015,36(10):135-146.
- [34] 闰丰,王洋,杜哲,陈影,陈亚恒.基于IPCC排放因子法估算碳足迹的京津冀生态补偿量化[J].农业工程学报,2018,34(04):15-20.
- [35] 张清,郑丹,许宪硕.中国能源碳足迹生态压力变动的因素分解研究[J].干旱区资源与环境,2015,29(04):41-46.
- [36] 张巍.基于STIRPAT模型的西安市碳足迹预测和情景分析[J].生态经济,2021,37(04):25-29.
- [37] 赵领娣,吴栋.中国能源供给侧碳排放核算与空间分异格局[J].中国人口·资源与环境,2018,28(02):48-58.
- [38] 赵璐,赵作权.基于特征椭圆的中国经济空间分异研究[J].地理科学,2014,34(08):979-986.
- [39] 赵先贵,马彩虹,肖玲,纪芙蓉.陕西省碳足迹时空变化研究[J].地理科学,2013a,33(12):1537-1542.
- [40] 赵先贵,马彩虹,肖玲,胡攀飞.北京市碳足迹与碳承载力的动态研究[J].干旱区资源与环境,2013b,27(10):8-12.
- [41] 郑德凤,刘晓星,王燕燕,吕乐婷.中国省际碳足迹广度、深度评价及时空格局[J].生态学报,2020,40(02):447-458.
- [42] 朱天舒,秦晓微.城镇化路径:转变土地利用方式的根本问题[J].地理科学,2012,32(11):1348-1352.

- [43] 朱向梅,王子莎. 中国碳足迹广度空间关联格局及影响因素研究[J]. 调研世界, 2021, (05): 38–48.
- [44] Han, F., R. Xie, Y. Lu, J. Y. Fang, and Y. Liu. The Effects of Urban Agglomeration Economies on Carbon Emissions: Evidence from Chinese Cities[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172: 1096–1110 .
- [45] Mi, Z. F., Y. M. Wei, B. Wang, J. Meng, Z. Liu, Y. L. Shan, J. R. Liu, and D. B. Guan. Socioeconomic Impact Assessment of China's CO<sub>2</sub> Emissions Peak Prior to 2030[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 142: 2227–2236.
- [46] Shan, Y. L., D. B. Guan, J. H. Liu, Z. F. Mi, Z. Liu, J. R. Liu, H. Schroeder, B. F. Cai, Y. Chen, S. Shao, and Q. Zhang. Methodology and Applications of City Level CO<sub>2</sub> Emission Accounts in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161: 1215–1225.

## Analysis on the Spatio–Temporal Evolution and Driving Factors of Carbon Pressure of the Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River

Song Mei, Chang Liyue and Hao Xuguang

(School of Management, China University of Mining & Technology, Beijing)

**Abstract:** Green and low-carbon is an important way to tackle climate change and achieve high-quality development. This paper constructs a carbon pressure index, and uses exploratory spatial data analysis, standard deviation ellipse analysis and geographic detector method to analyze the spatio-temporal evolution and driving factors of carbon pressure of the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River from 2008 to 2018. The results showed that the overall carbon pressure was overloaded. During the study period, there was an upward trend of “N” shape, and the carbon pressure heterogeneity between cities was significant. The gravity center of carbon pressure shifted to the southeast. The Wuhan Metropolitan Area plays a leading role in the overall carbon pressure level of the middle reaches of Yangtze River, but the effect of the Poyang Lake urban agglomeration has gradually emerged. The main driving factors for the spatial differentiation of carbon pressure in the middle reaches of the Yangtze River are population density and technological progress. The core driving factors of carbon pressure in the three sub-agglomeration are significantly different. The core driving factors of carbon pressure in the Wuhan Metropolitan Area, the Ring Changsha–Zhuzhou–Xiangtan urban agglomeration and the Poyang Lake urban agglomeration are population density, economic development level and environmental regulation respectively. Furthermore, some policy suggestions are put forward of optimizing the population structure, promoting the development of low-carbon technology, strengthening the protection and restoration of the ecosystem of the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River, improving the carbon absorption capacity of the urban agglomeration, establishing a regional linkage mechanism and coordinating carbon pressure.

**Keywords:** Carbon Pressure; Spatio–Temporal Evolution; Driving Factors; Geographical Detector Model; The Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River

**JEL Classification:** P18, Q58

(责任编辑:卢 玲)