

中国城市碳排放的空间分布特征研究

杨青林 赵荣钦 邢月 满洲*

摘要:城市作为人类经济社会活动集中分布的区域,是重要的碳排放源。本文基于中国2005–2013年各城市的相关数据,利用GIS和空间自相关分析方法研究中国城市的碳排放空间分布特征,得到以下结论:2005–2013年,中国市域碳排放量稳定增加,空间区域差异呈现“高–低–高–低”的态势,同时形成了东北、京津冀、成–渝经济圈、长三角这些高碳排放量集聚区;碳排放强度逐年降低,在空间分布上呈现“西北高,东南低”的特点,单位GDP碳排放存在显著的空间自相关性,在空间上表现出明显的集聚特征。根据研究结果,本文提出了城市碳减排和低碳转型的政策建议。

关键词:城市碳排放;空间分布;碳减排

一、研究背景

改革开放近40年来,中国经济飞速发展,是一种以快速城市化为特征的经济。城市化水平不断提高的同时也产生了诸多的环境问题,其中以二氧化碳为代表的温室气体排放是一个受到普遍关注的问题。1992年签订的《联合国气候变化框架公约》,要求最终目标是减少温室气体排放,以确保经济可持续发展(国家发展和改革委员会,2003);1997年通过的《京都议定书》进一步规定了发达国家的具体减排目标;2015年达成的《巴黎协定》要求尽快实现全球温室气体排放峰值,标志着2020年后的全球气候治理将进入一个新阶段。

国际能源署的报告中指出,1990–2008年间,中国的碳排放量增长了近三倍(叶晓佳等,2011)。据美国橡树岭国家实验室CO₂信息分析中心(CDIAC)发布的数据显示,2006年中国的碳排放量为60.99亿吨,已经超过了美国,成为世界上最大的碳排放国家(吴开亚等,2013)。中

*杨青林,华北水利水电大学资源与环境学院,邮政编码:450045,电子信箱:yangedu@foxmail.com;赵荣钦(通讯作者),华北水利水电大学资源与环境学院,邮政编码:450045,电子信箱:zhaorq234@163.com;邢月,华北水利水电大学资源与环境学院,邮政编码:450045,电子信箱:13923734987@163.com;满洲,华北水利水电大学资源与环境学院,邮政编码:450045,电子信箱:mz_manzhou@163.com。

本文系国家自然科学基金项目“城市典型产业空间的碳排放强度与碳代谢效率研究”(41301633)的阶段性成果。感谢匿名审稿人提出的宝贵建议,文责自负。

国政府也在积极转变经济发展方式,加大节能减排力度并积极与其他国家达成碳减排共识。2009年,中国政府在联合国气候变化峰会上承诺,争取到2020年中国的碳排放强度比2005年下降40%~45%(林伯强等,2010)。2015年,中国向《联合国气候变化框架公约》秘书处提交了《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》,提出到2030年,中国的碳排放强度比2005年下降60%~65%,并提出到2030年左右中国的碳排放达到峰值。

城市是人类经济社会活动集中分布的地域,城市化过程中建设用地扩张、工业生产、消费以及交通工具等大量增长都带来了大量的碳排放。但由于中国的自然禀赋、经济发展水平、产业结构及能源利用效率等存在较大的空间差异,所以不同城市的碳排放结构与强度存在较大的差异。因此,深入分析碳排放的空间分布特征尤为重要。开展城市碳排放空间分布特征的研究可以深入地了解城市碳排放强度及其空间集聚状态,揭示中国快速城市化进程中不同类型和发展水平的城市经济增长与碳排放之间的关系,有助于对比评估中国不同城市的碳排放态势及其影响因素,为差别化的低碳城市管理和碳排放峰值控制提供数据支撑,并为探索不同类型的城市低碳发展道路和模式提供指导。

二、文献综述

随着中国城市化水平不断提高,以二氧化碳为代表的温室气体排放成为当前中国城市可持续发展面临的巨大挑战之一(荣培君等,2016)。有研究表明,我国能源消费产生的二氧化碳占全国排放总量的75%(Streets et al., 2001)。而城市在空间上覆盖了中国经济活动和能源消耗的绝对主体(蔡博峰、张力小,2014),是我国实现总体减排目标的主要执行单元之一(郑海涛等,2016)。研究当前碳排放空间特征以及不同城市与碳排放之间的关系,有利于解决城市化进程与环境保护之间的矛盾,为环境保护和经济发展寻求一条共赢之路;量化研究城市化进程与碳排放量的关系,可以为中国未来的碳排放总量控制提供参考(周葵、戴小文,2013)。

目前国内外在研究城市碳排放的问题上,主要是对城市碳排放的区域差异及影响因素进行分析。在研究碳排放区域差异方面,国内外学者主要研究碳排放的空间特征。Rey和Janikas(2006)首次提出从时空耦合角度探讨碳排放空间特征;Antczak和Suchecka(2011)发现欧盟国家二氧化碳存在空间自相关性。国内学者大多从全国视角和省域视角进行了分析,赵云泰等(2011)、付云鹏等(2015)、冯宗宪和陈志伟(2015)从国家层面研究了中国碳排放强度之间的空间自相关性并核算了2001-2012年中国的碳排放量;李建豹等(2015)、程叶青等(2013)、高长春等(2016)从省域层面研究了空间相关性、碳排放强度和碳排放量的时空格局特征。

研究城市碳排放主要使用定量方法,很少使用定性方法。定性研究主要是对文献的搜集和整理或者是通过分析原始数据研究碳排放。定量研究的方法多种多样,主要有指数分解分析(汪东等,2012)、结构分解分析(汪臻,2012)、环境压力等式(Dietz & Rosa, 1997)、Kaya等式、

STIRPAT模型(杨晓军、陈浩,2013)、时空地理加权回归模型(肖宏伟、易丹辉,2014)、协整分析(Gam & Rejeb, 2012)、多指标面板数据聚类分析(Liddle, 2014)、极值边界分析(王立平等,2014)等。每一种方法都有自己的优缺点,例如指数分解分析、Kaya等式和STIRPAT模型的优点是可以利用公式对各影响因素进行逐一分解分析。缺点主要是大多从时间序列数据分析各影响因素对碳排放的影响,并且选取的影响因素有数量限制,数据不易得且不易与实际问题相结合。而回归模型方法在数据的使用上比较灵活,可以使用时间序列、基年横截面和面板数据,数据易得且能够与实际问题相结合。目前,运用地理学中ArcGis、空间统计分析模型(Wong & Lee, 2005)、空间自相关(赵荣钦等,2014)分析空间格局特征已经成为主流。以上文献丰富了碳排放空间特征及相关性的研究,为本文提供了重要的借鉴。

总体来看,国内外学者针对国家和省域层面的研究比较多,而对市域层面的碳排放空间分布特征的研究还有待进一步加强。市域空间是中国城市的基本单元,开展不同城市碳排放空间差异研究有助于定量分析城市化水平、产业结构等因素对城市碳排放的影响,有助于从城市角度探寻低碳发展策略,推动城市低碳转型。因此,本文基于市域空间的视角,对中国城市碳排放的空间分布特征进行了分析,为快速城市化进程中的中国低碳城市发展策略的选择提供参考。

三、中国城市碳排放的空间分布特征分析

(一) 研究区域与数据来源

本文以中国285个^①地级以上城市(包括了281个地级市,4个直辖市)为研究对象(因为三沙市、铜仁市、毕节市、拉萨市、普洱市以及香港、澳门、台湾地区的数据不全或者统计口径不一致,未包含在本研究中),收集整理2005–2013年各城市年度统计数据,主要是化石能源,包括煤炭、石油、天然气的消耗量(万吨)。这些数据主要来自《中国城市统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国区域经济统计年鉴》等。需要说明的是,在碳排放空间特征分析中,为了保证地图的连续性,探索城市碳排放的空间规律性,除了以上285个城市之外,又计算了67个城市的碳排放量与碳排放强度(以2013年《中国城市统计年鉴》的城市为统计范围,包括了县级市、自治县、州、盟和地区),共计352个空间单元。其中,由于缺乏黔东南苗族侗族自治州、黔南布依族苗族自治州、黔西南布依族苗族自治州三个空间单元的人口、GDP和能源消费数据,所以在城市碳排放空间分析部分没有计算以上地区的碳排放及其强度。

(二) 研究方法

1. 碳排放核算方法

借鉴IPCC的计算方法,确定各种能源消费碳排放的计算公式为(赵荣钦等,2012):

^①中国地级以上城市数量参考《中国城市统计年鉴》。

$$CEnergy_{-i} = Qenergy_{-i} \times Henergy_{-i} \times (Cenergy_{-i} + Menergy_{-i}) \quad (1)$$

(1)式中, $CEnergy_{-i}$ 为第 i 种能源的碳排放量; $Qenergy_{-i}$ 为第 i 种能源的消费量; $Henergy_{-i}$ 为第 i 种能源的净发热值; $Cenergy_{-i}$ 为第 i 种能源的碳排放系数; $Menergy_{-i}$ 为第 i 种能源的CH₄排放系数。其中 $Cenergy_{-i} = A_i \times B_i$, A_i 为缺省碳含量, B_i 为缺省氧化碳因子。具体数值见表1。

表1 各种能源类型的碳排放系数计算表

能源类型	净发热值 (kJ/kg 或 kJ/m ³)	缺省碳含量 (kgC/GJ)	氧化碳因子	CH ₄ 排放系数 (kgCH ₄ /TJ)	总碳排放系数 (kgC/kg 或 kgC/m ³)
原煤	20908	25.8	1	1	0.539
石油	41816	20	1	3	0.836
天然气	38931	15.3	1	1	0.596

2. 城市碳排放强度的空间自相关分析

空间自相关指数可以衡量城市间碳排放强度在空间上的依赖程度。自相关分析包括全局和局部空间自相关分析,其中全局空间自相关用于探测一个总的空间范围在空间上的依赖程度,用Moran's I指数来度量空间自相关的全局指标。全局自相关指数计算方法如下(赵荣钦等,2014):

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

(2)式中, n 为研究区域的空间样本个数, x_i 和 x_j 分别是市域 i 和 j 的碳排放强度, w_{ij} 是空间权重,本文通过基于邻接关系 rook 获得空间权重矩阵。 \bar{x} 是所有城市碳排放强度的平均值。 I (Moran's I)系数值介于-1和1之间,越接近于1,表明具有极强的正空间自相关;该值越接近-1,表明具有极强的负空间自相关;如果该值接近或等于0,表明空间单元属性属于随机分布状态。

用局部空间自相关(Local Indicators of Spatial Association, LISA)指数来判别局部空间单元集聚的类型。LISA指数其实就是局部空间自相关,全局空间自相关解释了研究区域到底有无集聚(H-H, L-L),而LISA集聚图反映的是空间联系的局部指标。局部空间自相关计算方法如下:

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{s^2} \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (3)$$

3. 空间自相关显著性检验

Moran's I没有显著性检验的功能,将其转化成正态检验统计量 Z (周文、赵果庆,2016):

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{VAR(I)}} \quad (4)$$

(4)式中, I 为Moran's I的值, $VAR(I)$ 为全局Moran's I的方差, $E(I)$ 为全局Moran's I的期望值。根据 Z 值的大小,在设定的显著性水平下进行显著性检验。

(三) 中国城市碳排放的空间特征分析

1. 中国城市碳排放量的空间特征分析

从全国市域碳排放量空间分布图来看,碳排放量呈“高-低-高-低”的特点(图1)。结合前文的计算方法,对中国352个城市的能源消费碳排放量进行了核算,结果发现,2013年352个城市的碳排放总量约为17亿吨,其中上海市的碳排放量最高,为4380.583万吨,主要以工业碳排放为主。上海市作为全国的经济中心,第二产业占绝对优势,在产业发展的过程中,化石能源的使用率远远高于其他能源,导致碳排放量大。天津、郑州、广州等东、中部城市碳排放量也位居前列,这是由于东、中部地区工业基础好、化石能源使用率较高、城市化进程较早且城市化速度快、生活水平普遍较高、居民能源消费结构单一。加之“中部崛起”战略的实施,带动了中部城市迅速发展,特别是第二产业的发展,这也增加了碳排放量。而西部城市,工业生产相对落后,工业能源消费水平低,所以碳排放量总体而言低于东、中部的城市,但是随着“西部大开发战略”的实施,西部城市发展速度明显加快,以成都、重庆、贵阳为代表的城市群迅速发展,所以这些地区的碳排放量也明显高于周边城市。从图1可以看出,碳排放量在空间格局上呈“高-低-高-低”的特点。

碳排放量的空间分布呈集聚特征。从图1可以看出,东北工业经济区、京津冀经济区、成渝经济区、以上海为中心的长三角经济区是高碳排放量集聚地,外围城市的碳排放量小于集聚中心。在地域经济特征方面,这些区域工业基础较好,城市与城市之间有着历史上的联系,在产业发展、能源开采、能源流通率和流通量、交通联系程度等方面都远远高于外围城市,另一方面,这些城市本身能源资源丰富,是以化石能源为主的工业城市,以往过度追求经济发展速度导致这些区域碳排放量大于周边城市。

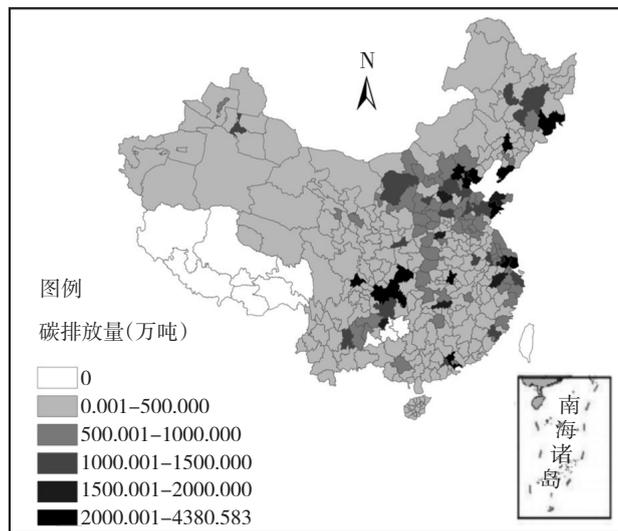


图1 2013年中国城市碳排放量空间分布

城市的GDP与碳排放量有显著的正向线性关系。经济相对发达的城市一般是重度排放单元,例如北京、上海、重庆、成都等,而经济相对落后的城市,碳排放量远远小于经济发达的城市。例如三亚市、大理市、五指山市等,这些城市属于轻度排放单元。由GDP与碳排放量散点图(图2)可以看出,GDP和碳排放量的线性关系很明显, R^2 达到0.8574,说明城市的GDP增长对碳排放量的大小有显著影响,当GDP增长时,碳排放量随之增长。从产业的角度来看,第二产业的发展是城市经济发展的基本保证,当第二产业发展较快时,城市GDP也增长较快,同时第二产业也具备高耗能、碳排放量大的特点,所以高碳排放的企业主要涉及的是第二产业。在碳排放量图(图1)中可以看出,第二产业发达的城市分布的地区主要是在沿海或中部城市,这些城市的特点是经济比较发达,碳排放量高,所以碳排放量的大小在很大程度上受产业结构和GDP的影响。

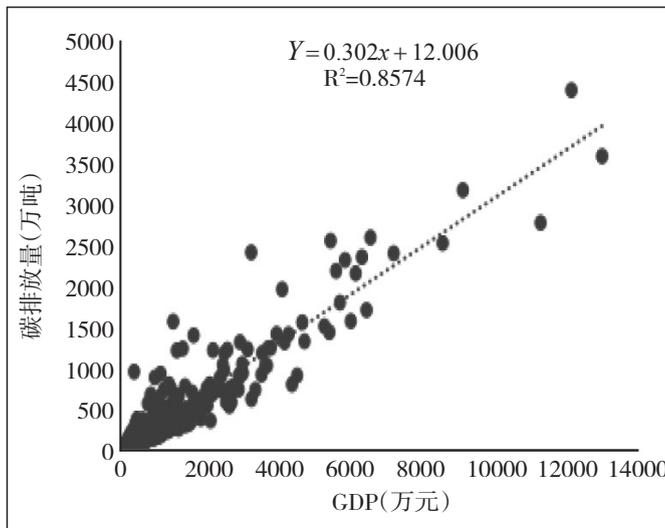


图2 2005-2013年中国城市GDP与碳排放量的散点图

2. 中国城市碳排放强度的空间特征分析

碳排放强度空间分布呈西高东低的态势。碳排放强度是指每单位国民生产总值的增长所带来的二氧化碳排放量,根据碳排放量与GDP之比,可以得到各个城市的碳排放强度。由图3可知,中国市域碳排放强度的空间差异明显,大体呈西高东低的特征。其中六盘水、贵阳等市碳排放强度最大,中卫市、石嘴山市、固原市、银川市等次之,五指山市、三亚市、深圳市、苏州市、上海市等东南沿海城市碳排放强度明显低于西部城市,所以总体上呈西高东低的特点。碳排放强度与碳排放量分布在空间上有明显差异,且存在不匹配现象,经济发达的地区,碳排放量一般也较高,而碳排放强度较低,例如北京市的碳排放强度较小,只有0.15万吨/万元。而经济相对落后的地区,单位GDP碳排放量高。这是由于随着经济发展和社会进步,各城市GDP随之增长,虽然碳排放总量依旧增加,但是随着低碳技术革新、能源利用效率不断提高,碳排放强度却不断降低(图4)。因此,一般高新技术地区有较低的碳排放强度,而传统工业地区碳排放强度高。

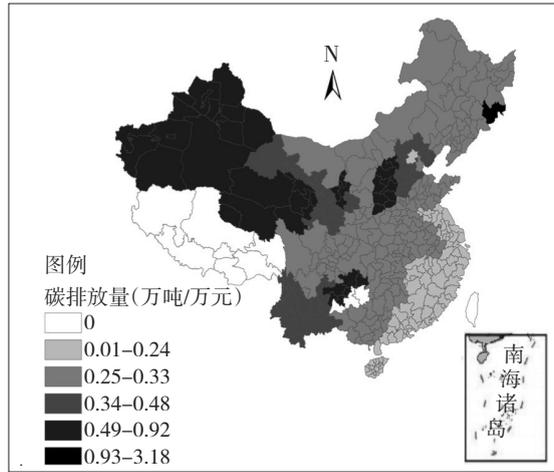


图3 2013年中国城市碳排放强度空间分布

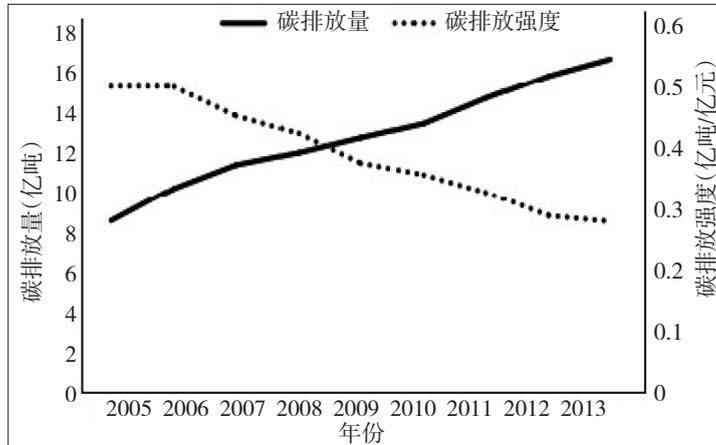


图4 2005-2013年中国碳排放总量和碳排放强度

碳排放强度具有明显的空间集聚特征。为了揭示中国市域碳排放强度的局部空间自相关性,基于opengeoda软件计算了2013年全国市域碳排放强度数据并绘制了2013年中国城市碳排放强度空间集聚格局图(图5)和市域空间碳排放强度Moran's I散点图(图6)。全局Moran's I指数是0.321,经随机化运行999次,显著性水平 $p=0.001$, $z=10.8239$,在1%的水平上显著。表明中国城市的碳排放强度呈现显著的空间正相关关系,也就是说碳排放强度较高(较低)的城市在空间上相邻,全国市域碳排放强度的单元集聚特征比较明显。从图5可以看出,中国城市碳排放强度空间集聚明显,主要以高高集聚和低低集聚为主。分析空间集聚图可知,高高集聚的城市主要分布在西部和中部部分城市,低低集聚的城市主要分布在东部沿海地区。随着“西部大开发”战略和“中部崛起”战略的实施,西部和中部城市为了能加快发展速度,忽略了技术带来的附加值,只是利用本地区先天条件,形成了粗放的发展模式,尽管西部和中部地区的碳排放量低于东部,但是碳排放强度高于东部城市。而东部城市城市化起步较早,工业基础

好,同时注重低碳产业的发展 and 低碳技术的投入,能源利用效率不断提高,碳排放强度较小。可见,在今后的发展中,各城市应该大力发展低碳产业,运用新技术提高能源利用效率,走低碳城市道路。

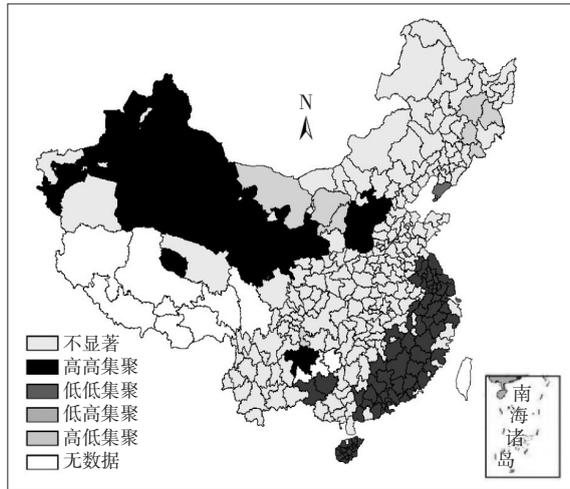


图5 2013年中国城市碳排放强度空间集聚格局

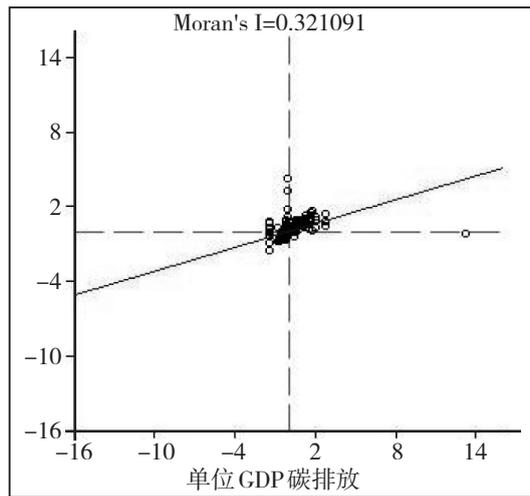


图6 2013年市域空间碳排放强度 Moran's I散点图

3. 中国城市碳排放的时序演变特征

分析图4可知,碳排放量呈总体上升的趋势,碳排放强度总体呈下降趋势。2005-2013年,中国城市能源消费碳排放量从8.744亿吨增加到17.006亿吨,年均增长率为8.67%,GDP年均增长率为15.46%。2005-2013年,中国城市的碳排放强度由2005年的0.52亿吨/亿元降至2013年的0.29亿吨/亿元,年均降幅7.57%,并有持续下降的趋势。在“十一五”期间,国家提出优化产业结构的政策,各城市积极加快转变经济增长方式,优化产业结构,强力推进节能减排,能源利用

效率不断提高,碳排放量增长速度有减缓趋势,碳排放强度明显降低。“十一五”期间的碳排放量年均增长率为7.11%,低于2005-2013年的年均增长率。

实际上,当GDP增长速度超过碳排放量增长速度时,此时GDP增长主要依赖技术带来的产值增长,从而可以改变原来以大量能源消耗带来产值的增长方式,所以碳排放强度不断降低,这有利于实现城市碳减排。在未来的城市发展中,应该对城市的高耗能产业开展低碳技术革新,加快先进技术推广应用,不断优化产业结构,提高能源利用效率,降低碳排放量与碳排放强度。

四、结论与政策建议

本文采用2005-2013年间的统计数据,对中国352个城市碳排放及其强度的空间分布特征进行了分析,主要结论如下:

(1)2005-2013年间中国城市碳排放量不断增加。碳排放量在空间分布中呈“高-低-高-低”的特点,东部地区的碳排放量高于西部地区,同时形成了东北、京津冀、成渝经济圈、长三角等高碳排放量集聚区。高碳排放量的城市群产业结构单一,第二产业占据绝对优势,在产业发展的过程中,主要使用化石能源,导致碳排放量大于周边城市。

(2)中国城市的碳排放强度逐年降低,在空间特征中呈“西北高-东南低”的特点,单位GDP碳排放存在显著的空间正相关关系,并在空间上表现出集聚特征,西部和中部部分城市呈现高高集聚的特征,东南沿海城市则呈现出低低集聚。

(3)不同城市碳排放及其碳排放强度具有较大的空间差异,且存在明显的不匹配现象。一般在经济发达的城市,碳排放量也较高,但是单位GDP的碳排放量较低。由于经济发展和社会进步,各城市生产总值随之增长,虽然碳排放总量依旧增加,但是发达地区的城市有资源、技术、交通、工业基础、对外交流等优势,所以随着低碳技术革新、低碳理念深入人心、能源利用效率不断提高,碳排放强度却不断减少。因此经济发达地区有较低的碳排放强度,而经济欠发达的地区碳排放强度高。

根据以上结论,本文提出推动城市碳减排和低碳转型的政策建议,主要有以下四个方面:

第一,推进低碳技术革新,提高能源利用效率。中部和西部的碳排放强度较高,东部城市的碳排放强度较低,是由于东部发达城市注重低碳产业的发展 and 运用新技术降低碳排放,不断提高能源利用率。我国正处于工业化中期阶段,该阶段的一个重要特点是能源消耗大,主要以化石能源为主,长时期大规模利用化石能源,关键是要提高能源利用效率,降低碳排放强度。在未来的城市发展中应该不断对城市高耗能产业开展低碳技术革新,加快先进技术推广应用,同时尽量降低化石能源比重、提高能源利用效率。

第二,调整产业结构,推动产业结构转型升级。从2006年起,根据“十一五”规划纲要的要求,各城市积极加快转变经济增长方式,优化产业结构,能源利用效率不断提高,因而碳排放强

度明显降低。所以一方面要充分发挥传统工业在经济发展中的中坚力量以及长足的优势,另一方面应该加快对传统的重工企业进行改造,严加管制,推动产业结构转型升级以及技术和制度的创新。如东北、京津冀、成-渝经济圈、长三角这些高碳排放量集聚区,未来应重点从调整城市产业结构入手,加快发展低能耗低排放产业,推动产业结构转型升级,推进高碳产业向高科技低碳产业逐步转型,对高碳产业设置碳排放准入门槛,鼓励低碳产业发展。

第三,优化城市空间结构,以低碳理念引领城市规划。空间结构是城市空间、农业空间和生态空间等不同类型的空间在国土空间开发中的反映,城市空间结构的变化在一定程度上决定着城市经济发展方式及资源配置效率。在城市空间规划中,应注意通过适当用地混合、优化交通格局、产业空间结构优化等措施对城市空间结构进行优化,构筑低碳型城市空间格局,以城市规划来引导未来城市的低碳转型。

第四,实施以低碳为导向的城市差别化发展模式和管理策略。从城市低碳发展的角度来看,由于各类主体功能区发展方式、发展方向、开发强度不同,所以各类主体功能区下的低碳城市发展道路需要差别化对待。我国现在实行的是西部大开发、东北老工业基地振兴、中部崛起、东部率先的战略,应该差别化对待四个主体功能区。东部城市,如上海、苏州、杭州、青岛、广州、深圳等城市,特点是碳排放量高,碳排放强度较低,所以应该在大力发展高新技术产业,增加生产总值的同时,降低碳排放强度。中部城市,如石家庄、保定、郑州、太原、邯郸等城市,特点是碳排放量高,碳排放强度也比较高,这些城市应该调整产业结构、调整能源消费结构,将低碳技术产业化,在降低碳排放量的同时也降低碳排放强度。西部城市,如丽江、大理、贵阳、遵义、乌鲁木齐、兰州等,这些城市虽然有较低的碳排放量,但是碳排放强度很高,西部城市发展主要依赖先天资源禀赋,未来西部城市发展中,应该打造具有西部特色的低碳产业。东北地区,如吉林、长春、沈阳、大连、哈尔滨等城市,碳排放量较高,碳排放强度有下降的趋势,应该继续加强产业结构转型和升级,引进高新技术,优化能源使用结构。

本文虽然在中国城市碳排放空间分布特征上做出了有益的探索,但是未能定量研究城市碳排放呈现这种空间分布特征的具体原因,这也是未来研究值得深入的方向。

参考文献:

- [1] 蔡博峰,张力小. 上海城市二氧化碳排放空间特征[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(6): 417-426.
- [2] 程叶青,王哲野,张守志,叶信岳,姜会明. 中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量[J]. 地理学报, 2013, 68(10): 1418-1431.
- [3] 冯宗宪,陈志伟. 区域能源碳排放与经济增长的脱钩趋势分析[J]. 华东经济管理, 2015, 29(1): 50-54.
- [4] 付云鹏,马树才,宋琪. 中国区域碳排放强度的空间计量分析[J]. 统计研究, 2015, 32(6): 67-73.
- [5] 高长春,刘贤赵,李朝奎,张勇,余光辉. 近20年来中国能源消费碳排放时空格局动态[J]. 地理科学进展, 2016, 35(6): 747-757.
- [6] 国家发展和改革委员会能源研究所. 中国可持续发展能源暨碳排放情景分析——综合报[R]. 2003.

- [7] 李建豹,黄贤金,吴常艳,周艳,徐国良. 中国省域碳排放影响因素的空间异质性分析[J]. 经济地理,2015,35(11):21-28.
- [8] 林伯强,姚昕,刘希颖. 节能和碳排放约束下的中国能源结构战略调整[J]. 中国社会科学,2010,(2):58-71.
- [9] 秦耀辰,荣培君,杨群涛,李旭,宁晓菊. 城市化对碳排放影响研究进展[J]. 地理科学进展,2014,33(11):1526-1534.
- [10] 荣培君,杨群涛,秦耀辰,李旭,张天宁,张帅帅. 中国省域能源消耗碳排放安全评价[J]. 地理科学进展,2016,35(4):487-495.
- [11] 孙昌龙,靳诺,张小雷,杜宏茹. 城市化不同演化阶段对碳排放的影响差异[J]. 地理科学,2013,33(3):266-272.
- [12] 汪东,汲奕君,田丽丽,朱坦. 中国居民生活能源消费 CO₂ 排放的影响因素研究[J]. 环境污染与防治,2012,34(4):101-105.
- [13] 汪晓庭. 关于回归预测模型的稳健性研究[J]. 统计与预测,1995,(1):34-37.
- [14] 汪臻. 中国居民消费碳排放的测算及影响因素研究[D]. 中国科学技术大学,2012.
- [15] 王立平,张海波,刘云. 基于EBA模型的中国碳排放稳健性影响因素研究[J]. 地理科学,2014,34(1):47-53.
- [16] 吴开亚,郭旭,王文秀,张浩. 上海市居民消费碳排放的实证分析[J]. 长江流域资源与环境,2013,22(5):535-543.
- [17] 肖宏伟,易丹辉. 基于时空地理加权回归模型的中国碳排放驱动因素实证研究[J]. 统计与信息论坛,2014,29(2):83-89.
- [18] 杨晓军,陈浩. 中国城镇化对二氧化碳排放的影响效应:基于省级面板数据的经验分析[J]. 中国地质大学学报(社会科学版),2013,13(1):32-37.
- [19] 叶晓佳,孙敬水,董立锋. 低碳经济发展中的碳排放驱动因素实证研究——以浙江省为例[J]. 经济理论与经济管理,2011,31(4):13-23.
- [20] 赵荣钦,黄贤金,彭补拙. 南京城市系统碳循环与碳平衡分析[J]. 地理学报,2012,67(6):758-770.
- [21] 赵荣钦,张帅,黄贤金,秦耀辰,刘英,丁明磊,焦士兴. 中原经济区县域碳收支空间分异及碳平衡分区[J]. 地理学报,2014,69(10):1425-1437.
- [22] 赵云泰,黄贤金,钟太洋,彭佳雯. 1999~2007年中国能源消费碳排放强度空间演变特征[J]. 环境科学,2011,32(11):3145-3152.
- [23] 郑海涛,胡杰,王文涛. 中国地级城市碳减排目标实现时间测算[J]. 中国人口·资源与环境,2016,26(4):48-54.
- [24] 周葵,戴小文. 中国城市化进程与碳排放量关系的实证研究[J]. 中国人口·资源与环境,2013,23(4):41-46.
- [25] 周文,赵果庆. 中国的区域经济协调发展:空间集聚与政策效应——基于2136个市县1999、2010年数据[J]. 经济科学,2016,(4):17-29.
- [26] Antczak,E. and J.SucHECKA. Spatial Autoregressive Panel Data Models Applied to Evaluate the Levels of Sustainable Development in European Countries[R]. 2011.
- [27] Dietz,T. and E.A.Rosa. Effects of Population and Affluence on CO₂ Emissions[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1997, 94(1): 175-9.
- [28] Gam,I. and J.B.Rejeb. Electricity Demand in Tunisia[J]. Energy Policy, 2012, 45(11): 714-720.
- [29] Liddle,B. Might Electricity Consumption Cause Urbanization Instead? Evidence from Heterogeneous Panel Long-run Causality Tests[J]. Global Environmental Change, 2014, 24(1): 42-51.
- [30] Rey,S.J. and M.V.Janikas. STARS: Space-time Analysis of Regional Systems[J]. Geographical Analysis, 2006,

38(1): 67–86.

[31] Streets,D.G., K.Jiang, X.L.Hu, J.E.Sinton, X.Q.Zhang, D.Y.Xu, M.Z.Jacobson, and J.E.Hansen. Recent Reductions in China's Greenhouse Gas Emissions[J]. Science, 2001, 294(5548): 1835–1837.

[32] Wong,D.W. and J.Lee. Statistical Analysis of Geographic Information with ArcView GIS and ArcGIS[R]. 2005.

[33] Zha,D.L., D.Q.Zhou, and P.Zhou. Driving Forces of Residential CO₂ Emissions in Urban and Rural China: An Index Decomposition Analysis[J]. Energy Policy, 2010, 38(7): 3378–3383.

Spatial Distribution Characteristics of Carbon Emissions in China's Cities

Yang Qinglin, Zhao Rongqin, Xing Yue and Man Zhou

(School of Resource and Environment, North China University of Water Resource and Electric Power)

Abstract: As human economic and social activities concentrating area, cities are important carbon emission sources. Based on data from 2005 to 2013, the spatial distribution characteristics of carbon emissions in China's prefectural-level cities are analyzed by GIS and spatial autocorrelation in this paper. The results are as follows. Firstly, the carbon emissions in China had a steady increase from 2005 to 2013 with a “high-low-high-low” situation in spatial distribution, forming high carbon emission regions in Northeast, Beijing-Tianjin-Hebei, Chengdu-Chongqing and Yangtze River Delta. Secondly, the emission intensity had a decline while higher in Northwest and lower in Southeast. Finally, the carbon emissions per unit GDP had a significant spatial autocorrelation which showed aggregation characters. According to the results, we put forward some suggestions on urban carbon reduction and low carbon transformation.

Keywords: Urban Carbon Emissions; Spatial Distribution; Carbon Reduction

JEL Classification: Q56

(责任编辑:朱静静)