

# 中国城市碳排放强度的空间溢出效应及驱动因素

王少剑, 黄永源

(中山大学地理科学与规划学院 广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广州 510275)

**摘要:** 采用核密度估计、空间自相关、空间马尔科夫链和面板分位数回归等方法对1992-2013年全国283个城市碳排放强度的空间溢出效应和驱动因素进行了分析。①核密度估计结果表明, 中国城市碳排放强度总体均值下降, 差异在逐步缩小。②空间自相关Moran's  $I$ 指数表明城市碳排放强度存在显著的空间集聚性且空间集聚性在逐渐增强, 但空间集聚水平的变化逐年缩小。③空间马尔科夫链分析结果表明: 第一, 中国城市碳排放强度存在马太效应, 低强度与高强度的城市在相邻年份转移过程中呈现维持初始状态的特征。第二, 城市碳排放“空间溢出”效应明显, 且不同区域背景下溢出效应存在异质性, 即若与碳排放强度低的城市为邻, 该城市的碳强度能够增加向上转移的概率, 反之亦然。④面板分位数结果显示: 在碳排放强度低的城市, 经济增长、技术进步、适当的人口密度起到减排作用; 外商投资强度与交通排放是使碳强度增大的主要因素。在碳排放强度高的城市, 人口密度是重要的减排因素, 技术进步暂时没起减排作用; 工业排放、粗放式的资本投资以及城市土地蔓延则是碳强度上升的主要因素。

**关键词:** 中国城市尺度; 碳排放强度; 空间溢出; 空间马尔科夫链; 面板分位数回归

DOI: 10.11821/dlxb201906005

## 1 引言

虽然温室气体尤其碳排放是造成气候变化主要原因的观点仍有争议, 但推动减排计划来应对气候变化带来的挑战已成为全球主流科学界的共识<sup>[1]</sup>。中国在改革开放后实现经济持续高速增长的同时, 城市化和工业化的快速推进促使能源消费需求不断提升。国际能源署(IEA)2009年公布的统计资料显示, 在2007年中国的CO<sub>2</sub>排放总量已经超越美国跃居世界第一。面对国际舆论压力, 中国政府在2009年将减排任务作为约束性指标写进国民经济和社会发展中长期规划中, 即承诺到2020年中国碳排放强度相比2005年降低40%~45%。而在2017年公布的《BP世界能源统计年鉴(2017年)》显示, 中国的CO<sub>2</sub>排放总量仍在不断上升, 份额从2005年的20.9%上升至2014年的27.5%。对于中国来说, 如何在保持经济持续增长的同时降低碳排放强度仍是较大的考验。因此, 对碳排放强度的时空演化规律和驱动因素的研究将有利于减排措施的进一步制定。

碳排放强度即单位GDP的二氧化碳排放量, 是衡量一个国家或地区碳排放量与经济发展之间关系的指标。对于发展中国家来说, 相比于碳排放总量或人均碳排放量指标, 用碳排放强度来量化减排目标更有现实意义<sup>[2]</sup>。近年来, 许多学者就碳排放的问题进行研

收稿日期: 2018-04-04; 修订日期: 2019-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601151); 广东省特支计划; 广州市珠江科技新星 [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41601151; Guangdong Special Support Program; Pearl River S&T Nova Program of Guangzhou]

作者简介: 王少剑(1986-), 男, 河南驻马店人, 博士, 副教授, 中国地理学会会员(S110011019M), 研究方向为城市地理、城市与区域规划。E-mail: 1987wangshaojian@163.com

究,研究成果非常丰富,研究内容主要包含碳排放强度的测度和分解、时空演变特征和规律(包括区域差异、空间集聚性和空间相关性)以及驱动因素探究<sup>[3]</sup>;研究尺度涉及国家、区域、省域和市域单元,大多数研究尺度集中于省域层面。在研究方法上,学者常采用泰尔系数、锡尔系数、变异系数、空间自相关(全局Moran's  $I$ 指数和局部 $G$ 系数)来揭示碳排放强度的区域差异和空间相关性,例如,孙耀华等<sup>[4]</sup>基于泰尔指数探究中国省际及区域(东、中、西、东北部)碳排放强度差异,发现中国省际间碳排放强度存在差异且逐渐增大,但区域内部的差异在逐年下降,省际间的差异主要源于区域之间的差异;赵雲泰等<sup>[5]</sup>将全国划分为八大经济区域,使用泰尔指数、全局自相关Moran's  $I$ 和冷热点分析方法探究区域碳排放强度空间演变特征,同样发现全国区域碳排放强度差异扩大是区域之间的差异扩大造成的,而区域内部差异较小。综上可知,中国省际间的碳排放强度存在显著差异,且差异性主要来源于其地理区域之间的差异。然而,前人的研究大多基于省际尺度,对城市尺度的碳排放强度研究较少,且在划分区域时往往根据习惯性经验进行区域划分,例如中东西部、六大经济区、沿海地区和内陆地区等。对此,许多研究表明:随着时间的推移,地区之间的壁垒正逐渐减小,要素与产品在相邻城市、县区之间的流动更加自由<sup>[6]</sup>,这使得各地区间空间溢出效应的作用尺度逐渐缩小,仅仅对省际尺度的分析不满足中国的实际情况<sup>[7]</sup>。此外,大多数经济地理学家认为城市是区域发展的核心,也是碳排放的主要来源地,低碳城市建设是碳减排的关键所在<sup>[8]</sup>,在城市尺度的碳排放强度研究重要性由此凸显。基于以上不足,本文将在城市尺度层面对全国283个城市的碳排放强度进行空间溢出效应和驱动因素研究,更进一步解释碳排放强度的空间性和探究其影响因素。

在碳排放的时空演进特征规律方面,不少学者引入收敛理论和方法进行研究<sup>[9-12]</sup>。基于核密度估计方法的图形特征能够反映数据演变趋势的优点,马大来等<sup>[13]</sup>和赵巧芝等<sup>[3]</sup>使用核密度估计方法刻画了不同年份碳排放绩效和强度的演进过程。同时,赵桂梅等<sup>[14]</sup>尝试引入马尔科夫状态转移概率矩阵用于反映碳排放强度的内部动态演进趋势。然而上述方法仅仅探讨了区域自身的发展变化,忽略了碳排放的邻近关联性以及空间性特征。考虑到以上两种重要特征,本文在传统马尔科夫链方法的基础上加上空间滞后条件,采用空间马尔科夫链转移概率矩阵,动态地揭示了城市及其领域碳排放强度的时空演化过程,从而解决了现有的文献资料中忽略区域背景演化过程的问题。

此外,在驱动因素探究方面,一方面,学者使用的主要方法为指数分解法、结构分解法、协整检验、格兰杰因果检验以及利用面板数据的回归实证分析。程叶青等<sup>[15]</sup>利用空间计量模型探究影响因素,发现能源结构、产业结构和城市化率对碳排放强度的格局演变有重要作用;颜艳梅等<sup>[16]</sup>采用夏普里值分解法对中国29个省份碳排放强度的影响因素进行分解分析,认为经济发展水平对碳强度差异贡献率最大且随着时间的推移贡献逐渐增大;周杰琦等<sup>[17]</sup>使用面板回归模型探究碳排放强度的驱动因素,结果表明人均资本、城镇化、市场化及产业结构是造成强度差异的主要原因。另一方面,学者主要从规模因素、结构因素和技术因素三方面出发探讨影响因素。另外,根据国际能源署的数据,2007年全球交通部门排放的CO<sub>2</sub>达66.23亿t,占全部能源活动所排放量的23%,交通是影响碳排放的重要因素之一<sup>[18]</sup>。而根据蔡博峰等<sup>[19]</sup>的测算,2007年中国道路运输二氧化碳排放量占交通运输排放量的86.32%,是交通碳排放的主要来源。目前交通与碳排放关系的研究主要包含交通碳排放的影响因素<sup>[20]</sup>,交通部门<sup>[21]</sup>以及交通基础设施<sup>[22]</sup>对碳排放的影响。综合已有研究成果,本文选取城市经济发展水平、人口密度、产业结构、资本投资强度、外资强度、土地城市化和道路密度作为驱动因素,结合马尔科夫方法中对

状态类型的分位数分类方法,采用分位数回归方法探究城市碳排放强度的驱动因素。

在以上分析的基础上,本文以全国283个城市为研究单元,首先使用空间自相关方法检验城市碳排放的空间集聚性,接着运用空间马尔科夫链分析区域背景和城市碳排放强度的演化以及在不同区域背景下城市碳排放强度的空间溢出效应;运用面板分位数回归模型探讨在不同碳排放强度背景下影响城市碳排放强度的驱动因素。研究具有3点创新:①将研究尺度进一步降为城市尺度,更加符合空间溢出效应的现实情况。②采用空间马尔科夫链方法有效地揭示了城市在不同区域背景下空间溢出效应的异质性。③使用分位数回归方法探究在不同条件碳排放强度水平下的驱动因素,为处于不同碳排放强度阶段城市的减排策略提供依据。

## 2 研究数据与研究方法

### 2.1 研究区域与数据来源

作为人类社会经济活动最集中的区域,城市成为碳排放最集中的地区<sup>[8]</sup>,城市减排对于实现全球减排目标具有重大的意义。因此,许多国家和地区将城市作为地方实施减排措施重要的空间载体<sup>[23]</sup>,力求推进建设低碳城市的目标。本文将城市作为研究的基本单元,以城市行政边界界定城市范围。行政区划以2013年为准进行数据归并,由于某些原因造成部分城市的统计数据缺失,因此本研究的城市数量为283个城市且不含港澳台,全国34个省级行政单元均有覆盖。研究的主要指标为城市碳排放强度,研究时段为1992-2013年共22年。

数据来源方面,由于中国城市缺少详细的能源资料,因而不能全面衡量中国城市碳排放,为分析中国城市碳排放强度的空间溢出效应和驱动因素,城市碳排放数据来源于已发表文献<sup>[24]</sup>。城市的社会经济数据来源于各年份《中国城市统计年鉴》《中国区域经济统计年鉴》和各省市县的统计年鉴、国民经济与社会发展统计公报和政府工作报告。

### 2.2 基于空间马尔科夫链的空间溢出效应探究

**2.2.1 马尔科夫链** 传统的马尔科夫链为在数学中具有马尔科夫性质的离散事件随机过程,其在时间和状态上是离散的,强调历史状态与未来状态无关。由于许多地理现象的演变过程均具备无后效性特征,故马尔科夫链在地理学中的运用较为广泛<sup>[25]</sup>,而城市碳排放强度的演化过程具备“无后效性”的特征,因此可运用马尔科夫链方法进行分析。具体来说,马尔科夫链方法将不同时间阶段下的城市碳排放强度进行数据离散化处理,将城市碳排放强度按照分位数划分为 $k$ 个类型,通过计算各种类型的概率分布和转移情况,将其演变过程近似为马尔科夫过程。通常而言, $t$ 时刻的城市碳排放状态类型用一个 $1 \times k$ 的状态概率向量 $E_t = [E_{1,t}, E_{2,t}, \dots, E_{k,t}]$ 表示,则整个研究时间段内城市碳排放强度的状态转移过程就可以用一个 $k \times k$ 的马尔科夫转移概率矩阵 $M$ 抽象表示。本文遵循每种类型的城市数量相近原则,将城市碳排放强度按照四分位点(0.25/0.5/0.75)划分为4种类型,分别用 $k = 1, 2, 3, 4$ 来表示, $k$ 越大表示城市碳排放强度越大。状态类型从强度高转向强度低定义为向上转移,反之则定义为向下转移。 $m_{ij}$ 表示在 $t$ 时刻中属于类型 $i$ 的区域在 $t+1$ 时刻转移到 $j$ 类型的概率值,并采用下列式子估计:

$$m_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i} \quad (1)$$

式中: $n_{ij}$ 表示在整个研究期间内,由 $t$ 时刻属于 $i$ 类型的区域在 $t+1$ 时刻转移为 $j$ 类型的区域的数量总和; $n_i$ 是研究时期内所有实现转移的年份中属于类型 $i$ 的区域数量总和。



**2.2.2 空间马尔科夫链** 区域相互联系和相互作用的过程使区域之间存在空间溢出效应,揭示区域间的空间溢出效应对认识区域的发展具有重要的意义,而空间马尔科夫链能够更好地刻画区域空间溢出模式。空间马尔科夫链方法本质上是传统的马尔科夫链引入“空间滞后”概念后的产物<sup>[26]</sup>。从地理空间的角度来看,区域现象在地理空间上并非相互孤立。区域现象总受到地理相邻区域状况的影响,即一个区域的领域状态将会对该区域的状态转移过程产生影响。空间马尔科夫链方法通过引入“空间滞后”来表达区域的领域状态,从而改进了传统马尔科夫链忽略空间性的不足<sup>[27]</sup>。空间马尔科夫链转移概率矩阵以某一区域 $a$ 在 $t$ 时刻的空间滞后类型为条件,将传统的马尔科夫链分解为 $k$ 个 $k \times k$ 的条件转移概率矩阵。在第 $k$ 个条件矩阵中, $m_{kij}$ 为某一区域 $a$ 在空间滞后类型为 $k$ 的条件下,从 $t$ 时刻状态类型 $i$ 转移到 $t+1$ 时刻状态类型 $j$ 的概率。区域 $a$ 的空间滞后值是该区域的空间邻近区域属性值的加权平均,具体公式如下:

$$Lag_a = \sum Y_b W_{ab} \quad (2)$$

式中:空间权重矩阵 $W_{ab}$ 表示区域 $a$ 和区域 $b$ 的空间关系,本文采用邻接原则定义空间关系。同时,由于统计数据缺失的问题而形成的孤岛问题,我们将与该城市距离最近的城市定义为邻接城市。 $Y_b$ 表示区域 $b$ 的属性值, $Lag_a$ 为区域 $a$ 的空间滞后值,表示区域 $a$ 的领域状态。

通过比较马尔科夫转移概率矩阵和空间马尔科夫转移概率矩阵中的元素,可以判断区域背景对于区域变化转移的重要性。

### 2.3 基于分位数回归模型的驱动因素探究

绝大部分回归模型均由经典最小二乘法发展而来,着重考察解释变量 $x$ 对解释变量 $y$ 的条件期望 $E(y|x)$ 的影响,其本质上是均值回归,刻画的是集中趋势。但事实上大多数数据的分布不满足最小二乘法的经典假设,条件期望 $E(y|x)$ 很难反映整个条件分布全貌<sup>[28]</sup>。为了改进该缺陷,Koenker等提出了“分位数回归”(Quantile Regression)<sup>[29]</sup>。分位数回归刻画了在不同分为数下被解释变量对解释变量进行回归,其结果能够得到解释变量对整个条件分布的影响。除此之外,此方法使用残差绝对值的加权平均作为最小化的目标函数,故估计结果不易受极端值影响,相对于最小二乘法更加稳健。在分位数回归中,被解释变量 $y$ 的 $\tau$ 分位数函数 $Q(\tau)$ 定义为:

$$Q(\tau) = \inf\{y: F(y) \geq \tau\}, \quad (0 < \tau < 1) \quad (3)$$

式中: $F(y)$ 为 $y$ 的分布函数; $\tau$ 表示在回归线以下的数据占总体数据的百分比;因此 $y$ 的分布根据 $\tau$ 分成两个部分,小于分位数 $Q(\tau)$ 的占比为 $\tau$ ,大于分位数 $Q(\tau)$ 的占比为 $(1-\tau)$ 。对于面板数据,一般模型为:

$$Y_{it} = x_{it}^T \beta_i + \alpha_i + u_{it}, \quad (i=1,2,\dots,K; t=i=1,2,\dots,T) \quad (4)$$

式中: $i$ 表示不同个体; $t$ 表示样本观察的时间; $x_{it}$ 表示第 $i$ 个个体在 $t$ 时期的 $k \times 1$ 维的自变量; $u$ 表示随机误差项向量; $\beta_i$ 表示 $k \times 1$ 维的未知系数; $\alpha_i$ 表示第 $i$ 个个体的个体效应。考虑面板分位数回归参数估计的条件分位函数:

$$Q_{y_{it}}(\tau|x_{it}, \alpha_i) = x_{it}^T \beta(\tau_q) + \alpha_i \quad (5)$$

式中: $\tau \in (0, 1)$ ,当 $\tau$ 取不同的值时,求解加权绝对残差最小化问题就可以获得在不同分位点上的参数估计量。参数 $\beta$ 一般由下列公式求解:

$$\hat{\beta} = \underset{\alpha, \beta}{\operatorname{argmin}} \sum_{q=1}^Q \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N W_k \rho_{\tau}(y_{it} - x_{it}^T \beta(\tau_q) - \alpha_i) \quad (6)$$

式中: $\rho_{\tau}(u)$ 为分段线性分位数损失函数,具体式为:

$$\rho_{\tau}(u)=\begin{cases} u\times(\tau-1), & u<0 \\ u\times\tau, & u\geq0 \end{cases} \tag{7}$$

针对面板分位数估计方法存在的多种问题<sup>[30]</sup>，Koenker提出固定效应的惩罚分位数回归方法，该方法通过加入带有调节参数 $\lambda$ 的惩罚项  $P(\alpha)=\sum_{i=1}^n|\alpha_i|$  对个体效应进行适当调整从而有效地减小了由于估计 $\alpha_i$ 而导致的方差<sup>[31]</sup>。在加入惩罚项后，解释变量在分位点上的系数可以通过以下式子求解最小化问题得到：

$$\min \sum_{k=1}^q \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N W_k \rho_{\tau_k} \left( y_{it} - x_{it}^T \beta(\tau_k) - \alpha_i \right) + \sum_{i=1}^N |\alpha_i| \tag{8}$$

式中： $W_k$ 为权重系数，用于控制在 $q$ 个分位点对估计系数的影响程度。

已有文献对碳排放强度的影响因素进行过许多有益的探究。其中，基于IPAT模型改进的STIRPAT模型认为人类活动造成的环境压力主要受到人口（ $P$ ）、富裕程度（ $A$ ）与技术进步（ $T$ ）三方面的影响，并建立了三者与环境影响（ $I$ ）之间的随机模型<sup>[32]</sup>。STIRPAT模型在国内被广泛地用于研究各类环境影响指标，如碳排放、空气污染、能源消费等。近年来，许多学者对STIRPAT模型进行扩展，影响因素除人口、富裕程度和技术外还涉及城市化、经济增长、对外贸易、产业结构等<sup>[33]</sup>。此外，在模型中加入富裕程度的二次项或多项式可以验证环境库兹涅兹曲线的假说。本文以STIRPAT模型和理论为基础，综合碳排放强度的相关研究成果，分析了富裕程度、人口、产业结构、外商投资、城市化和道路交通等人文因素对碳排放强度的影响程度（表1，图1），并加入富裕程度的二次项（ $SA$ ）以验证富裕与环境影响之间的库兹涅兹曲线假说。需要说明的是，考虑到在城市化的过程中政府行为更加注重土地城市化，因此，本文以土地城市化指标来衡量城市化<sup>[34]</sup>。其中，对碳排放强度、城市富裕程度、人口密度、城市化和道路密度分别取对数放入模型。

表1 回归方程主要变量表

Tab. 1 Main variables in the regressions

变量类型	变量名称	变量单位	变量解释
被解释变量	碳排放强度( $CEI$ )	t/万元	城市碳排放总量/GDP
解释变量	城市富裕程度( $A$ )	元	人均GDP
	人口密度( $P$ )	人/km <sup>2</sup>	总人口数/市域面积
	产业结构( $IS$ )	%	第二产业增加值/GDP
	投资强度( $CI$ )	%	固定资产投资总额/GDP
	外资强度( $FDI$ )	万美元/万元	实际利用外资额/GDP
	技术进步( $T$ )	万元/tce	能源强度(能源消费总量/GDP)的倒数
	土地城市化( $UB$ )	%	道路500 m缓冲区面积/市域面积
	道路密度( $RD$ )	km/百 km <sup>2</sup>	公里里程数/市域面积

在模型的设定上，在模型的设定上，对于面板固定效应模型中的原假设“ $H_0: allui = 0$ ”， $F(282, 5935) = 21.41$ ，其 $P$ 值小于0.01，故拒绝原假设。同时使用最小二乘虚拟变量模型（LSDV）法进行进一步考察，发现大多数个体虚拟变量均很显著，因此，可以拒绝“所有个体虚拟变量都为0”的原假设，即模型不应该采用混合回归模型。接下来，Hausman 检验表明模型应该选用固定效应模型。因此，本文采用固定效应惩罚分位数回归模型进行模型估计，并使用Koenker提供的R程序软件包rqpd进行运算，沿用其设定的估计方法进行求解，通过自助法求得标准误<sup>[31]</sup>。

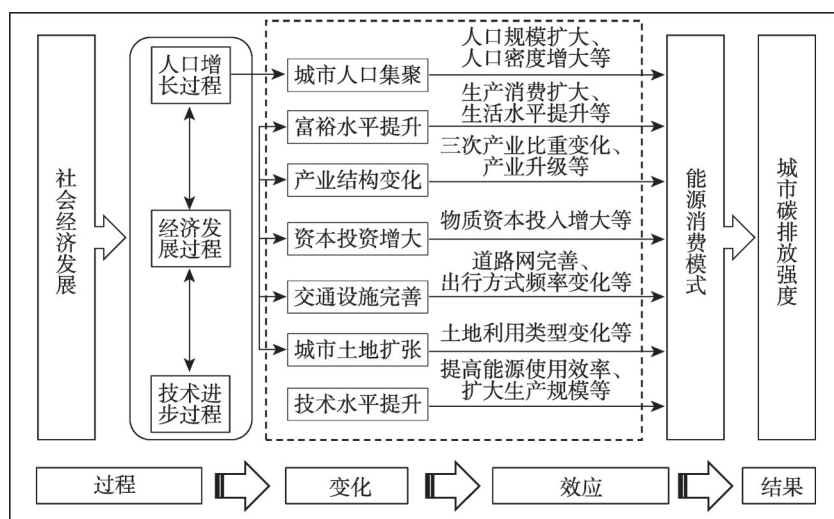


图1 城市碳排放强度的社会经济影响机制

Fig. 1 The socioeconomic impact mechanism of urban carbon emission intensity

### 3 实证结果与分析

#### 3.1 城市碳排放强度的时间序列与空间相关性分析

在分析空间溢出效应和影响因素前, 本文对城市碳排放强度进行时间序列与空间相关性分析。由图2可知, 1992年碳排放强度较高的地区主要集中于黑龙江、吉林、内蒙古、宁夏、山西、陕西、河北和河南省以及广东省的珠三角地区; 而到2013年, 碳排放强度高的地区主要集中于黑龙江、宁夏和山西省。这表明中国城市碳排放强度整体呈现下降趋势, 中南部以及东部地区城市碳排放强度下降趋势尤其突出。

由图3可知, 在22年期间中国城市碳排放强度均值逐步下降, 城市之间的差异在不断缩小, 呈收敛趋势。为了进一步了解城市碳排放强度的分布, 选择1992年、2000年、2005年和2013年4个年份进行核密度估计(图4)。由图4可知, 1992-2013年间, 城市碳排放强度呈偏态分布的总体趋势发生变化, 1992-2005年间, 核密度曲线由“矮胖”型变为“高瘦”型, 峰值向左移动, 这说明城市碳排放强度总体差距逐渐减小, 且总体强度在减小, 政府的“减排”措施初见成效。从核密度曲线尾部的波动情况来看, 2000-2013年间, 碳排放强度较高的城市数值差异在逐渐增大, 这说明城市碳排放强度在总体减小的同时, 少部分强度较大的地区仍然未实现减排目标, 且与其他城市差距越来越大。

箱型图和核密度估计方法仅在时间维度上分析了城市碳排放强度的变化趋势和分布情况, 并未体现碳排放强度的空间特征, 因此, 本文采用全局Moran's  $I$ 指数来刻画中国城市碳排放强度的空间特征并对空间相关性进行检验。表2为整个探究时段内全局Moran's  $I$ 指数变化, 全部年份均在1%的显著性水平上通过检验, 表明中国城市碳排放强度在空间分布上呈现显著的空间聚类 and 空间正相关现象。1992-2013年间, 全局Moran's  $I$ 指数呈现微弱向上波动的趋势, 且波动幅度逐渐减小。这说明一方面, 城市碳排放强度的空间集聚性逐渐增强, 相邻城市之间的能源利用效率和技术水平具有一定的溢出效应; 另一方面, 城市与区域间的交流与合作趋于稳定, 空间集聚水平变化越来越小。

#### 3.2 城市碳排放强度的空间溢出效应分析

根据碳排放强度的类型划分, 城市碳排放强度分为低强度、较低强度、较高强度和



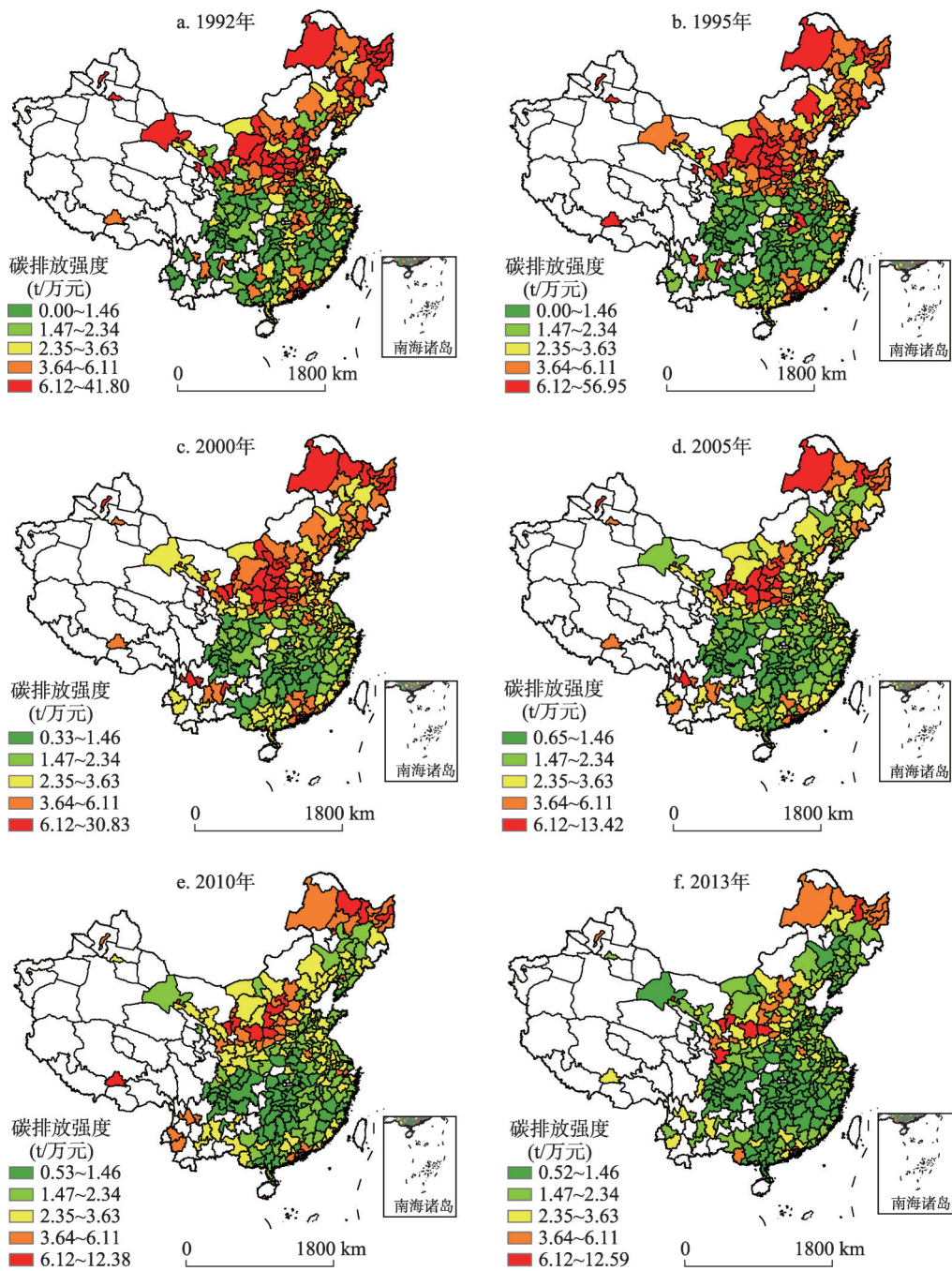


图2 1992-2013年中国城市碳排放强度空间分布格局

Fig. 2 Spatial patterns of carbon emission intensity at city level in China from 1992 to 2013

高强度4种类型，分别对应 $k=1, 2, 3, 4$ 。

图5是整个研究时期中国城市碳排放强度类型转移的空间分布。从数量上来看，向上转移的城市占城市总数的57.95%，向下转移的城市占城市总数的13.07%，而保持平稳的城市占总数的28.98%。从空间分布来看，向上转移的地区主要集中分布在东北地区、华中地区，以及内蒙古、山东和广东地区，向下转移的地区集中分布在广西、云南、陕

西、宁夏以及甘肃省南部地区，呈现较强的地理集聚性。

表3为中国城市碳排放强度类型的马尔科夫转移概率矩阵。从传统的马尔科夫概率矩阵中可看出，① 概率矩阵对角线上的概率值均大于非对角线的概率值，最低值为77.98%，最高值为89.65%，即在整个研究时段内保持原有状态的最小概率为77.98%，这说明城市碳排放强度类型具有较强的稳定性。② 在对角线上，位于中间的较低强度和较高强度两种类型的稳定性（77.14%、77.98%）明显低于两端的低强度与高强度类型（89.65%、88.79%）；从对角线两侧的概率值来看，位于中间的两种类型向上转移的概率（12.9%、17.13%）均大于向下转移的概率（9.54%、4.76%），这说明较低强度和较高强度类型呈现向上转移的良好势头。③ 但是，必须注意到城市碳排放强度存在“马太效应”。在连续相邻年份的类型转移过程中，区域保持低强度类型的概率为89.65%，向下转移的概率仅为10.35%，这说明碳排放效率高的地区存在时间维度的趋同现象；而初始年份为高强度类型

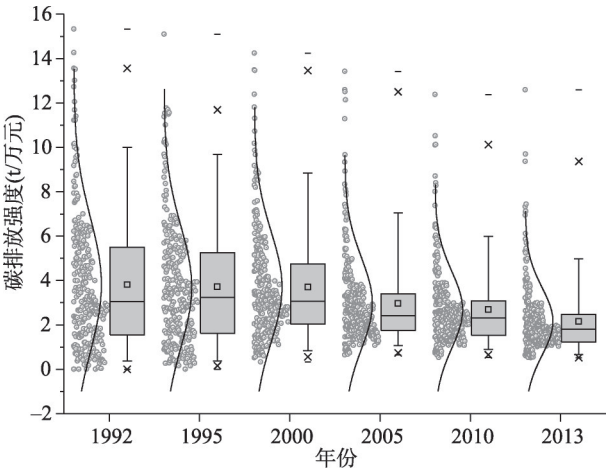


图3 中国城市碳排放强度箱型图  
Fig. 3 Box-plot of carbon emission intensity at city level in China

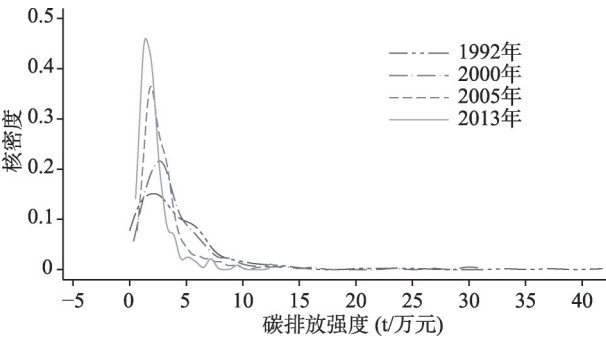


图4 中国城市碳排放强度的核密度估计  
Fig. 4 The Kernel density estimation of carbon emission intensity at city level in China

表2 中国城市碳排放强度 Moran's I 指数值

Tab. 2 Moran's I for carbon emission intensity at the city level of China in 1992-2013

年份	Moran's I	Z值	年份	Moran's I	Z值
1992	0.359	8.717**	2003	0.434	11.018**
1993	0.416	10.459**	2004	0.435	10.942**
1994	0.336	8.807**	2005	0.498	12.424**
1995	0.325	8.653**	2006	0.478	11.903**
1996	0.292	7.565**	2007	0.464	11.564**
1997	0.460	11.741**	2008	0.443	11.003**
1998	0.316	8.143**	2009	0.489	12.150**
1999	0.431	11.005**	2010	0.448	11.124**
2000	0.411	10.504**	2011	0.435	10.880**
2001	0.414	10.453**	2012	0.428	10.599**
2002	0.417	10.516**	2013	0.380	9.534**

注：\*表示在5%水平下显著，\*\*表示在1%水平下显著。



的区域，其保持该类型的概率为88.79%，向上转移的概率仅为11.21%，说明该地区可能陷入资源依赖、路径锁定的发展路径，难以实现能源效率的提高。

④ 非对角线且非对角线两侧的概率值较小，最大值仅为0.54%，这说明实现技术进步和提高碳排放效率是一个持续的、渐进的过程，在短时间内较难实现跨越式发展，但与此同时，跨越式发展并不是不可能实现。

中国城市碳排放强度在地理空间上并非相互独立，城市的碳排放强度往往受到其所在区域的影响，具有较强的空间集聚性和空间交互效应<sup>[11, 35]</sup>。同时，知识、技术溢出具有区域性特征，且溢出强度与空间距离衰减呈指数型函数模式<sup>[36]</sup>。由图6可知，区域和邻域状态类型均向上转移的区域主要集中在东北、华中地区以及山东和广东省，均向下转移的区域主要分布于陕西、甘肃和四川三地交界处，地理集聚性突出。

使用空间马尔科夫链方法可以辨别不同邻域类型对城市碳排放强度类型转移概率的影响。在传统的马尔科夫转移概率矩阵的基础上加入邻域类型为条件，得到空间马尔科夫转移概率矩阵（表4）。假设区域背景（区域的邻域类型）对于区域的转移不重要，那么在空间马尔科夫转移概率矩阵中，区域在不同区域背景下的转移概率矩阵应分别相等，且与传统的马尔科夫转移概率矩阵中的元素对应相等。

对比表3和表4可知：① 该假设不成立，在以不同区域背景为条件后，区域的状态转移呈现较大差异，因此区域背景对于区域的状态转移具有重大的影响。② 不同的邻域类型对于区域状态转移的影响方向不同。通常来说，一个区域若以碳排放强度低的区域为邻，其碳排放强度向上转移的概率将会增加，向下转移的概率将会减小，邻居对区域状态起到正向作用；一个区域若以碳排放强度高的区域为邻，其碳排放强度向上转移的概率将会减少，而向下转移的概率将会增加，此时邻居对区域状态起到负向作用。例如，对于碳排放强度高的区域来说，其向上转移的概率为11.21%，相比较而言，在碳排放强度低的区域背景下，其向上转移的概率增加至13.64%，而在强度高的区域背景下，其向上转移的概率降至8.55%。对于碳排放强度低的区域来说，其向下转移的概率为10.35%，在碳排放强度低的区域背景下，其向下转移的概率降至5.92%，而在强度高的区域背景下，其向下转移的概率提高到18.97%。③ 不同的区域状态类型受到区域背景的影响大小不同。对于碳排放强度较低类型的区域来说，在邻域状态类型为1、2、3时，

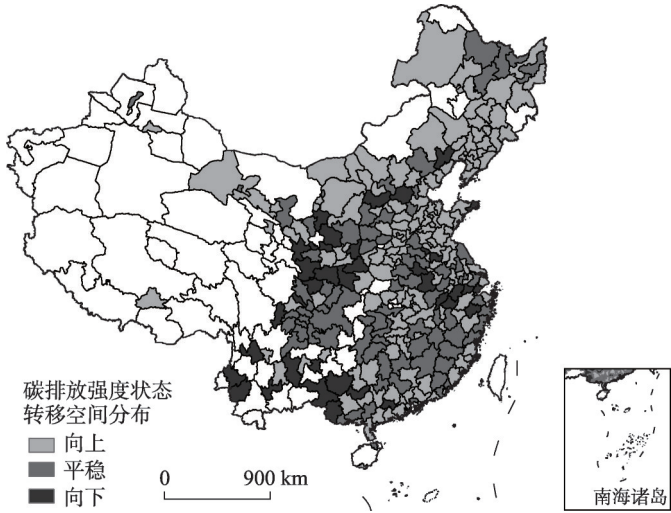


图5 1992-2013年中国城市碳排放强度类型转移空间分布  
Fig. 5 Spatial patterns of CEI class transition at city level in China in 1992-2013

表3 1992-2013年中国城市碳排放强度类型马尔科夫转移概率矩阵  
Tab. 3 Markov matrix for carbon emission intensity classes at the city level of China in 1992-2013

$t+1$	$n$	1	2	3	4
1	1439	0.8965	0.0980	0.0056	0
2	1457	0.1290	0.7714	0.0954	0.0041
3	1512	0.0013	0.1713	0.7798	0.0476
4	1535	0.0020	0.0007	0.1094	0.8879

其向上和向下转移的概率相近,约为13%与9%。但当与碳排放强度高的地区为邻时,其向上转移的概率下降至7.6%,向下转移的概率增至14.62%。说明碳排放强度较低的地区对碳排放强度高的邻居更敏感,受负面影响突出。④从动态的视角来看整个研究时段区域和区域背景的变化,50.9%的区域与邻居的状态转移方向相同,其中区域与邻居类型同时向上转移的区域数量为110个,同时向下转移的数量为3个,状态均未发生转移的数量为31个。可见区域与邻居的碳排放强度状态转移具有协同性,且协同向上转移的区域居多。

从以上分析可以看出基于区域背景的碳排放强度存在空间溢出效应,且空间溢出的类型具有重要的意义。为了检验这种空间溢出性是否在统计学上具有显著性,需要进行假设检验。原假设为区域的碳排放强度类型是相互独立的,与空间滞后类型无关。具体检验的模型公式如下:

$$S_b = -2 \log \left\{ \prod_{l=1}^k \prod_{i=1}^k \prod_{j=1}^k \left[ \frac{m_{ij}}{m_{ij}(l)} \right]^{n_{ij}(l)} \right\} \quad (9)$$

式中: $k$ 为碳排放强度类型; $m_{ij}$ 为传统的马尔科夫转移概率; $m_{ij}(l)$ 、 $n_{ij}(l)$ 分别为空间滞后类型为 $l$ 的空间马尔科夫转移概率和相对应的城市个数; $S_b$ 服从自由度为 $k(k-1)^2$ 的卡方分布。

未调整自由度的情况下(即剔除整个研究时段中转移概率矩阵中为0的元素),自由度为 $4 \times (4-1)^2 = 36$ 。而由该公式得,在 $\alpha = 0.005$ 的置信水平下, $S_b = 93.76 > \chi^2(40) = 66.77$ ,因此,拒绝接受在1992-2013年期间中国城市碳排放强度类型转移在空间上是相互独立的假设,并认为城市碳排放强度类型与领域的状态类型之间表现出显著的空间相关性。

能源强度是反映区域社会经济发展模式的重要指标,区域的社会经济发展具有强烈的能源依赖性,揭示能源强度的空间溢出效应模式具有重要的意义。本文的空间马尔科夫链分析结果显示,中国城市碳排放强度具有显著的空间溢出效应与区域协同性。空间溢出效应表现出两种模式:处于碳排放强度高的区域时,地方碳排放强度上升的概率将会增大;而处于碳排放强度低的区域时,地方碳排放强度下降的概率将会增大。该结果进一步说明了区域能源强度的空间关联性与空间交互作用模式。而区域协同性表明区域内部能源强度的变化方向趋于一致,区域经济发展模式的协同转变导致区域内部的能源消费模式的协同转变。同时,区域之间不同的发展模式表现出不同的能源需求和强度。

区域经济发展模式是一个在劳动力、资本、技术等要素在特定的制度、资源、文化等地理环境相互作用下形成的复杂系统<sup>[37]</sup>,因此发展模式具有区域之间的差异性与区域内部的相似性的特征。在市场化的进程中,区域间由于要素的流动产生各种溢出效应,转移支付和技术扩散促使中国区域经济发展发生极化与溢出现象<sup>[38]</sup>。新经济地理学的市

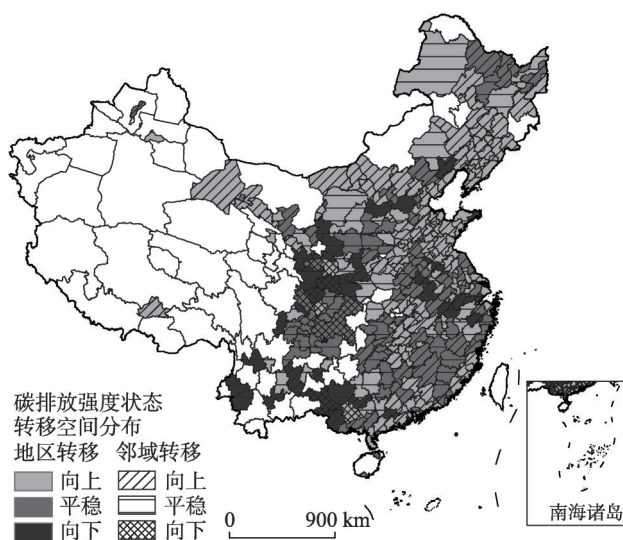


图6 中国城市碳排放强度类型转移及邻居转移类型空间格局

Fig. 6 Spatial patterns of CEI class transition of city units and neighbors in China in 1992-2013

表4 1992-2013年中国城市碳排放强度类型空间马尔科夫转移概率矩阵

Tab. 4 Spatial Markov matrix for carbon emission intensity classes at the city level of China in 1992-2013

邻域类型	$t/t+1$	$n$	1	2	3	4
1	1	659	0.9408	0.0561	0.0030	0
	2	357	0.1345	0.7703	0.0924	0.0028
	3	257	0.0039	0.2257	0.7237	0.0467
	4	176	0	0	0.1364	0.8636
2	1	478	0.8766	0.1192	0.0042	0
	2	467	0.1370	0.7687	0.0878	0.0064
	3	314	0	0.2070	0.7516	0.0414
	4	204	0.0098	0.0049	0.1422	0.8431
3	1	244	0.8361	0.1516	0.0123	0
	2	462	0.1364	0.7727	0.0887	0.0022
	3	483	0.0021	0.1843	0.7723	0.0414
	4	313	0.0032	0	0.1374	0.8594
4	1	58	0.8103	0.1724	0.0172	0
	2	171	0.0760	0.7778	0.1404	0.0058
	3	458	0	0.1026	0.8384	0.0590
	4	842	0	0	0.0855	0.9145

场潜能理论指出，经济水平高、发展速度快的地区对周边地区产品的需求能力大，从而对周边地区有较强的带动作用<sup>[7]</sup>，经济溢出效应使得区域之间的能源需求具有更强的空间依赖性。同时，交通基础设施具有区域外部性的特征，其网络属性将区域连为一体，降低了要素流动成本<sup>[39]</sup>，促进区域间要素的流动。一方面，更频繁的要素流动需要更多能源支撑，另一方面，例如劳动力、资本等要素的流动加强了区域间能源需求的关联性。而根据地理学第一定律，地方发展的空间关联性和依赖性将更多地表现在区域内部。在区域内部要素流动和互联互通基础设施建设趋于完善的条件下，区域内部经济发展模式也逐渐趋同。此外，来自外生和内生力量的技术溢出效应也影响着区域能源强度与特点<sup>[40]</sup>。区域的社会经济活动具有复杂的空间交互过程，能源强度的空间溢出效应的模式和结果是经济要素、制度要素等多种要素共同作用的结果。

3.3 城市碳排放强度的驱动因素分析

已有碳排放的研究成果显示，虽然自20世纪80年代以来中国碳排放总量不断增加，但由于经济增长速率总体上高于碳排放量的增长速率，因此碳排放强度呈现波动下降趋势<sup>[15, 41-42]</sup>。目前中国已处于经济新常态的经济换挡、增长动能切换的过渡时期，经济增速从2010年的10.45%降至2017年的6.9%。在此背景下，中国减排任务面临更加艰巨的挑战。城市碳排放强度驱动因素分析旨在从城市层面找出促进和降低碳排放强度的关键因素，并针对不同类型的城市找到有效的减排对策和措施。

为了对比传统面板数据模型的均值回归系数，首先估计了普通固定效应面板模型(FE)。在面板分位数模型估计中，选择具有代表性的10%、25%、50%、75%和90%五个分位点进行估计(表5)。面板分位数回归结果显示了在城市碳排放强度条件分布中所有变量弹性系数的变化。首先关注城市富裕程度对城市碳排放强度的影响。无论是均值回归还是分位数回归，在1%的显著水平下人均GDP的对数一次项为正，二次项为负，说明人均GDP和碳排放强度存在倒“U”型关系。这意味着城市碳排放强度随着人均GDP的增加而增大，在人均GDP达到一定水平后，碳排放强度将随着人均GDP的上升而下降。



从回归结果来看,人口密度和技术进步能够显著降低城市碳排放强度。能源是城市居民生活和生产的基本保障,人口要素与城市能源需求密切相关。而作为人口要素中的关键因素,人口密度主要通过改变居民的生活行为方式影响碳排放强度,且影响具有两面性<sup>[43-44]</sup>。一方面,部分城市将受益于高城市人口密度的规模效应和集聚效应,促进城市公共基础设施和服务的共享以及知识溢出和劳动力池等集聚经济的形成,从而提升城市的生产效率,降低能源消耗。另一方面,过高的城市人口密度将导致集聚不经济的问题,过度拥挤导致各类竞争成本上升,交通拥堵以及对基础设施过度需求带来较高的建设、运营和维修费用<sup>[45-46]</sup>。从本文的实证结果来看,人口密度对碳排放强度起显著的负向作用,没有出现明显的集聚不经济现象。人口密度的各分位点的估计系数绝对值均大于均值回归系数,说明均值回归有夸大负向影响的倾向。随着分为点的变化,人口密度估计系数存在显著差异。大于50%的分位点系数的绝对值明显大于前50%分位点的估计系数的绝对值,估计系数从75%分位点的-0.0813变化至10%分位点的-0.0665。这表明人口紧凑分布的减排效应对碳排放强度高的城市更加明显,而对于碳排放强度较低的城市来说,增加人口的减排效应减弱。一般来说,技术进步主要通过提高能源使用效率来降低碳排放强度,即在产生相同GDP的情况下消耗更少的能源。但由已有研究成果来看,技术进步对能源消耗同样存在正向和负向两种影响。虽然技术进步能够提高能源使用效率,但与此同时,回报效应意味着技术进步刺激了经济活动,加大对能源的消耗,进而抵消了由于效率提高节约的能源。此外,技术进步存在一定的门槛和时间滞后效应<sup>[47-48]</sup>,对于落后地区来说,技术进步的减排效应可能还没有体现。本文实证结果显示技术进步对碳排放强度起负向作用,在高分位下(75%与90%)技术进步的负向作用不显著,而其他分位点均在1%的置信水平下表现为显著的负效应。估计系数绝对值随分位数的减小而增大,技术进步的负效应在10%分位数上达到最大值。该结果表明,技术进步是碳排放强度较低地区主要的减排因素,因技术进步节约的能源大于由经济增长刺激而增加的能源需求;在碳排放强度较高的地区,技术进步对减排的贡献还并不显著。

产业结构、投资强度、外资强度、城市化和道路密度等因素则促进了城市碳排放强度的增加。①不少研究成果认为,中国碳排放量增长的驱动力之一来源于产业结构<sup>[49]</sup>,本文研究样本中,2013年第二产业占地方生产总值比重大于50%的城市数量占总体的58%,中国城市产业结构仍以二、三、一为主。同时,第二产业内部结构也不合理,高耗能、高排放、低效率产业多,能源依赖性强<sup>[50]</sup>。本文实证结果验证了上述观点,估计系数在均值回归和各分位点上均表现为显著的正值,第二产业比重是导致中国城市碳排放强度增加的重要因素。对于不同碳排放强度条件分位数而言,估计系数随着分位点降低逐渐减小,这表明在碳排放强度高地区,第二产业具有更强的促增作用。由于碳排放强度高的地区大部分仍处于快速工业化阶段,以煤炭为主导的能源结构和粗放的工业发展模式均增大了能源消耗;碳排放强度相对低的地区多为经济发达地区,有力的环境规制、产业转移和转型升级整体提高了第二产业的能源利用效率<sup>[51-52]</sup>。②投资强度促进了碳排放的增长,估计系数随分位点的增大而增大,但在均值回归、25%和50%分位点处不显著。该结果说明在碳排放强度高的地区,投资驱动的粗放式经济发展模式是导致碳排放的增加原因之一<sup>[53]</sup>。③已有文献对外资投入与能源消耗之间的关系一般围绕“污染避难所假说”和“污染光环假说”进行讨论。“污染避难所假说”认为FDI向东道国转移了高能耗高污染的产业从而导致东道国碳排放增加,而“污染光环假说”则认为在母国环境规制下FDI通过知识技术溢出提高了东道国的技术水平从而提升了能源使用效率,降低能源强度。本文实证结果验证了“污染避难所假说”,从城市层面来看,外资投资强

表5 FE与分位数回归估计结果  
Tab. 5 Fixed effected and quantile regression estimates

变量	(1) FE	(2) $q_{10}$	(3) $q_{25}$	(4) $q_{50}$	(5) $q_{75}$	(6) $q_{90}$
<i>A</i>	2.138*** (8.85)	1.5515*** (4.97)	1.6227*** (5.58)	1.6329*** (5.97)	1.4469*** (5.16)	1.2669*** (5.08)
<i>SA</i>	-0.140*** (-10.60)	-0.1018*** (-5.69)	-0.1066*** (-6.14)	-0.1102*** (-6.49)	-0.1071*** (-6.15)	-0.1023*** (-7.07)
<i>P</i>	-0.210*** (-2.76)	-0.0665** (-2.42)	-0.0747*** (-2.65)	-0.0792*** (-2.89)	-0.0813*** (-2.97)	-0.0771*** (-2.81)
<i>IS</i>	0.369*** (3.21)	0.1758** (2.25)	0.1963** (2.16)	0.3458*** (2.85)	0.4681*** (4.88)	0.4350*** (5.22)
<i>CI</i>	0.159 (1.65)	0.0982** (2.42)	0.0954 (1.36)	0.1408 (1.46)	0.2881** (2.53)	0.4066*** (3.34)
<i>FDI</i>	5.427** (1.99)	8.6024*** (5.15)	7.7062*** (4.85)	6.3488*** (4.09)	4.9094*** (3.84)	3.3846*** (3.03)
<i>T</i>	-0.0221*** (-4.80)	-0.2610*** (-4.48)	-0.2528*** (-3.68)	-0.2087*** (-2.71)	-0.0922 (-1.12)	-0.0182 (-0.41)
<i>UB</i>	0.0426*** (4.79)	0.0347*** (4.77)	0.0377*** (4.9)	0.0474*** (5.4)	0.0672*** (5.98)	0.0836*** (6.77)
<i>ROD</i>	0.0435*** (6.04)	0.0301*** (3.17)	0.0248*** (3.06)	0.0187*** (2.64)	0.0092 (1.42)	0.00349 (0.65)
<i>Cons</i>	-6.114*** (-4.91)	-4.4682*** (-3.14)	-4.5841*** (-3.58)	-4.3932*** (-3.76)	-3.0907** (-2.54)	-1.9161* (-1.71)
<i>N</i>	6226	6226	6226	6226	6226	6226

注：括号内为 $t$ 统计量；\*： $P < 0.1$ ；\*\*： $P < 0.05$ ；\*\*\*： $P < 0.01$ 。

度对碳排放强度存在显著的正向作用。就不同的碳排放强度条件分位数水平而言，外资强度对于碳排放强度低的地区表现出更强的促进作用。对此可能的解释为：碳排放强度高的地区多数为经济水平和技术水平相对落后的地区，由FDI的技术溢出带来的减排效应抵消了一部分增加的能源消耗；而在碳排放强度低的地区，由于FDI企业的竞争压力过高而阻碍了FDI的技术溢出<sup>[54]</sup>。④中国的城市化伴随着城市土地扩张与利用类型转变的过程，从而改变了城市碳汇和碳循环过程；同时，由包括基础设施建设、建筑物建造等的城市土地开发也会带来后续的能源需求<sup>[55]</sup>。实证结果显示，土地城市化对碳排放强度起显著的正向作用，估计系数随条件分位数增大而增大，在碳排放强度高的地区土地城市化的正向作用达到最大，可见地方依赖土地财政以及粗放式、蔓延式土地开发的城市化模式给城市减排带来巨大的压力<sup>[56]</sup>。⑤通常而言，合理的城市形态可以减少交通拥堵提升交通效率，进而起到减排效果。然而本文实证结果显示，除在75%与90%条件分位数水平下不显著外，道路密度对碳排放强度在1%的置信水平下起显著的正向作用，该结果得到已有文献的支持<sup>[57]</sup>。估计系数随分位数的降低而减小，表明在碳排放强度越低的地区道路密度的促进作用越强。一种可能的解释是在碳排放强度低的地区交通运输已经成为其增加能耗的重要因素<sup>[58]</sup>。换句话说，在碳排放强度低的地区道路密度的提升改善了城市交通通达性，刺激了交通出行需求，促使交通部门能耗增大<sup>[59]</sup>。

城市碳排放强度驱动因素的异质性主要受两点因素影响：纵向来看，在城市发展的不同阶段，碳排放强度的主要驱动因素不同；横向来看，城市发展模式的差异也将引起碳排放强度的驱动因素的差异。在城市化的初期和中前期阶段，城市化与工业化开始起

步并进入快速发展阶段,城市的扩张与发展伴随着大量资本的投入,较初级的产业结构和粗放式的增长加大了对能源的消耗。而从城市化中后期阶段开始,城市化和工业化开始减速,产业结构逐渐优化,城市功能进一步完善,并开始吸引大量外商投资。在FDI技术溢出和本地技术积累的内外生因素的共同作用下,能源使用效率逐步提高。但与此同时,由于交通道路网络的完善及经济发展的需求,要素之间的流动性增强,从而导致交通部门的能耗增加。此外,城市的发展模式也显著影响城市的碳排放强度。例如,陕西、山西、内蒙古和黑龙江省的资源型城市,其发展依托于资源的开发和利用,从而形成高耗能高排放为主要特征的产业群,因此产业结构仍是碳排放的主要因素。而东部沿海较发达的城市,服务业的比重上升、产业转移和升级降低了产业结构的能源消耗。

上述分析可知,对于碳排放强度低的城市来说,经济增长和技术进步是关键减排对策,适当的人口密度和紧凑高密度的城市发展形态也可以起到减排效果;外商投资强度与交通排放则是使碳强度增大的主要因素。而在碳排放强度高的城市,注重发展紧凑型城市,适当提高人口密度,发挥人口规模效应和集聚效应是重要的减排手段;工业排放、粗放式的资本投资以及城市土地蔓延是碳强度主要的促增因素。

## 4 结论与讨论

本文首先使用核密度估计方法和空间自相关法得出1992-2013年中国283个城市碳排放强度的时空演进规律,核密度估计结果表明,城市碳排放强度总体均值下降,差异在缩小。另一方面,在城市碳排放强度的分布中,包含在分布两端的重要信息并不能通过均值回归表现出来,因此分位数回归方法是探究大国城市碳排放强度驱动因素的更好选择;空间自相关Moran's  $I$ 指数表明城市碳排放强度存在显著的空间集聚性且空间集聚性在逐渐增强,但区域之间的差异趋向于稳定。其次,基于马尔科夫链和空间马尔科夫链的空间动态分析过程表明,中国城市碳排放强度存在马太效应,低强度与高强度的城市在相邻年份的动态转移过程中呈现出维持原有状态的特征。同时,城市碳排放的“空间溢出”效应明显,在不同区域背景下溢出效应存在异质性特征,与碳排放强度低的地方为邻能够有效地增加碳排放强度向上转移的概率,反之亦然。此外,城市碳排放强度还存在区域趋同的趋势,城市与区域背景在相邻年份的动态转移方向一致的区域数量达一半以上。

为进一步探究城市碳排放强度的影响机制,本文基于分位数回归方法,选取经济发展、人口密度、产业结构、资本投资强度、外资强度、技术进步、土地城市化和道路密度等多种因素进行分位数回归分析,结果表明:城市经济发展水平、人口密度、技术进步有利于降低城市碳排放强度,而产业结构、资本投资强度、外资强度、土地城市化和道路密度则增加城市碳强度。在碳排放强度低的城市,经济增长与技术进步是关键减排因素,适当的人口密度和紧凑高密度的城市发展形态也可以起到减排效果;外商投资强度与交通排放则是使碳强度增高的主要因素。而在碳排放强度高的城市,注重发展紧凑型城市,适当提高人口密度,发挥人口规模效应和集聚效应是重要的减排手段;工业排放、粗放式的资本投资以及城市土地蔓延是碳强度上升的主要因素。本文认为,在碳排放强度低的地区应引导外资投向低耗能、低污染、高效率的高新行业,同时发挥好外资投资带来的知识溢出效应;提高对道路交通耗能的重视程度,通过改善交通出行结构和发展交通节能技术以达到减排目的。而对于碳排放强度高的地区而言,优化产业结构、提高资本利用效率是进一步减低碳强度的关键。同时,地方政府应避免由于过度依赖土地财政而造成城市无序蔓延的问题。



本研究发现,在碳排放强度研究领域采用空间马尔科夫链方法能够有效地测度城市及其区域碳排放强度的时空演化过程和规律,直观地揭示了碳排放强度“空间溢出”效应的异质性和区域性特征。该方法将时序演变尺度缩小至相邻年份,展现了区域碳排放强度演化的延续性过程并突出了区域在邻域背景作用下的转移趋势。此外,研究尺度缩小至城市层面,能够更好地解释省域内部城市发展的异质性以及省与省交界处的趋同性,为政府针对不同城市制定不同的减排策略提供科学的依据。分位数回归分析是探究驱动因素的重要方法之一,其目的在于寻求对碳排放强度更全面的解释,该分析方法强调了在不同碳排放强度背景下驱动因素的异质性,从而避免了均值回归的理想化处理模式,其实证研究结果能够更好地反映现实状况,为全国各类城市制定针对性的政策措施。

### 参考文献(References)

- [1] Liu Yanhua, Ge Quansheng, He Fanneng, et al. Countermeasures against international pressure of reducing CO<sub>2</sub> emissions and analysis on China's potential of CO<sub>2</sub> emission reduction. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(7): 675-682. [刘燕华,葛全胜,何凡能,等.应对国际CO<sub>2</sub>减排压力的途径及我国减排潜力分析.地理学报,2008,63(7): 675-682.]
- [2] Jotzo F, Pezzey J C V. Optimal intensity targets for greenhouse gas emissions trading under uncertainty. *Environmental & Resource Economics*, 2007, 38(2): 259-284.
- [3] Zhao Qiaozhi, Yan Qingyou, Zhao Hairui. Research on spatial characteristics and influencing factors of provincial carbon emissions in China. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2018, 20(1): 9-16. [赵巧芝,闫庆友,赵海蕊.中国省域碳排放的空间特征及影响因素.北京理工大学学报(社会科学版),2018,20(1): 9-16.]
- [4] Sun Yaohua, Zhong Weizhou, Qing Dongrui. Analysis on differences of carbon emission intensity of each province in China based on Theil Index. *Finance and Trade Research*, 2012, 2(3): 1-7. [孙耀华,仲伟周,庆东瑞.基于Theil指数的中国省际碳排放强度差异分析.财贸研究,2012,2(3): 1-7.]
- [5] Zhao Yuntai, Huang Xianjin, Zhong Taiyang, et al. Spatial pattern evolution of carbon emission intensity from energy consumption in China. *Environmental Science*, 2011, 32(11): 3145-3152. [赵云泰,黄贤金,钟太洋,等.1999-2007年中国能源消费碳排放强度空间演变特征.环境科学,2011,32(11): 3145-3152.]
- [6] Li Shantong, Hou Yongzhi, Liu Yunzhong, et al. The analysis on survey of local protection in China domestic market. *Economic Research Journal*, 2004(11): 78-84. [李善同,侯永志,刘云中,等.中国国内地方保护问题的调查与分析.经济研究,2004(11): 78-84.]
- [7] Pan Wenqing. Regional linkage and the spatial spillover effects on regional economic growth in China. *Economic Research Journal*, 2012(1): 54-65. [潘文卿.中国的区域关联与经济增长的空间溢出效应.经济研究,2012(1): 54-65.]
- [8] Gu Chaolin, Tan Zongbo, Liu Wan, et al. A study on climate change, carbon emissions and low-carbon city planning. *Urban Planning Forum*, 2009(3): 38-45. [顾朝林,谭纵波,刘宛,等.气候变化、碳排放与低碳城市规划研究进展.城市规划学刊,2009(3): 38-45.]
- [9] Pettersson F, Maddison D, Acar Sevil et al. Convergence of carbon dioxide emissions: A review of the literature. *International Review of Environmental & Resource Economics*, 2014, 7(2): 141-178.
- [10] Xu Guangyue. The convergence in carbon dioxide emissions: Theoretical hypotheses and empirical research in China. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2010(9): 31-42. [许广月.碳排放收敛性:理论假说和中国的经验研究.数量经济技术经济研究,2010(9): 31-42.]
- [11] Lin Boqiang, Huang Guangxiao. Dynamics of China's regional carbon emissions under gradient economic developing mode: A view of spatial analysis. *Journal of Financial Research*, 2011(12): 35-46. [林伯强,黄光晓.梯度发展模式下中国区域碳排放的演化趋势:基于空间分析的视角.金融研究,2011(12): 35-46.]
- [12] Wu Jianxin, Guo Zhiyong. Research on the convergence of carbon dioxide emissions in China: A continuous dynamic distribution approach. *Statistical Research*, 2016, 33(1): 54-60. [吴建新,郭智勇.基于连续性动态分布方法的中国碳排放收敛分析.统计研究,2016,33(1): 54-60.]
- [13] Ma Dalai, Chen Zhongchang, Wang Ling. Spatial econometrics research on inter-provincial carbon emissions efficiency in China. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(1): 67-77. [马大来,陈仲常,王玲.中国省际碳排放效率的空间计量.中国人口·资源与环境,2015,25(1): 67-77.]
- [14] Zhao Guimei, Chen Lizhen, Sun Licheng, et al. Markov steady state prediction of carbon emission intensity in China based on the perspective of spatial differentiation. *Science and Technology Management Research*, 2017, 37(22): 228-233. [赵桂梅,陈丽珍,孙立成,等.空间分异视角下中国碳排放强度的Markov稳态预测.科技管理研究,2017,37

- (22): 228-233.]
- [15] Cheng Yeqing, Zhang Shouzhi, Ye Xinyue, et al. Spatial econometric analysis of carbon emission intensity and its driving factors from energy consumption in China. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(10): 1418-1431. [程叶青, 张守志, 叶信岳, 等. 中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量. *地理学报*, 2013, 68(10): 1418-1431.]
- [16] Yan Yanmei, Wang Zheng, Wu Leying, et al. Analysis of the determinants of carbon emission intensity on regional differences. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(9): 3436-3444. [颜艳梅, 王铮, 吴乐英, 等. 中国碳排放强度影响因素对区域差异的作用分析. *环境科学学报*, 2016, 36(9): 3436-3444.]
- [17] Zhou Jieqi, Wang Tongsan. Research on the convergence and mechanism of regional economic growth and carbon emissions intensity differences: An empirical analysis based on provincial panel data in China. *Social Science Research*, 2014(5): 66-73. [周杰琦, 汪同三. 地区经济增长与碳强度差异的收敛性及其机理: 基于中国省际面板数据的实证分析. *社会科学研究*, 2014(5): 66-73.]
- [18] Iea International Energy Agency. *World Energy Outlook 2009 Factsheet*, 2010.
- [19] Cai Bofeng, Cao Dong, Liu Lancui, et al. China transport CO<sub>2</sub> emission study. *Advances in Climate Change Research*, 2011, 7(3): 197-203. [蔡博峰, 曹东, 刘兰翠, 等. 中国交通二氧化碳排放研究. *气候变化研究进展*, 2011, 7(3): 197-203.]
- [20] Zhang Taoxin, Zeng Aozhi. Spatial econometrics analysis on China transport carbon emissions. *Urban Development Studies*, 2013, 20(10): 14-20. [张陶新, 曾熬志. 中国交通碳排放空间计量分析. *城市发展研究*, 2013, 20(10): 14-20.]
- [21] Glaeser E L, Kahn M E. The greenness of cities: Carbon dioxide emissions and urban development. *Journal of Urban Economics*, 2010, 67(3): 404-418.
- [22] Xie R, Fang J Y, Liu C J. The effects of transportation infrastructure on urban carbon emissions. *Applied Energy*, 2017, 196
- [23] Cong Jianhui, Liu Xuemin, Zhao Xueru. Demarcation problems and the corresponding measurement methods of the urban carbon accounting. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(4): 19-26. [丛建辉, 刘学敏, 赵雪如. 城市碳排放核算的边界界定及其测度方法. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(4): 19-26.]
- [24] Wang S J, Liu X P. China's city-level energy-related CO<sub>2</sub> emissions: Spatiotemporal patterns and driving forces. *Applied Energy*, 2017, 200.
- [25] Xu Jianhua. *Mathematical Methods in Contemporary Geography*. Beijing: Higher Education Press, 1996. [徐建华. 现代地理学中的数学方法. 北京: 高等教育出版社, 1996.]
- [26] Le Gallo J. Space-time analysis of GDP disparities among European regions: A Markov chains approach. *International Regional Science Review*, 2004, 27(2): 138-163.
- [27] Chen Peiyang, Zhu Xigang. Regional convergence at county level in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(11): 1302-1308. [陈培阳, 朱喜钢. 中国区域经济趋同: 基于县级尺度的空间马尔可夫链分析. *地理科学*, 2013, 33(11): 1302-1308.]
- [28] Chen Qiang. *Advanced Econometrics and Stata Application*. Beijing: Higher Education Press, 2010. [陈强. 高级计量经济学及Stata应用. 北京: 高等教育出版社, 2010.]
- [29] Koenker R, Bassett Jr G. Regression quantiles. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1978, 46(1): 33-50.
- [30] Luo Youxi, Tian Maozai. Quantile regression for panel data and its simulation study. *Statistical Research*, 2010, 27(10): 81-87. [罗幼喜, 田茂再. 面板数据的分位回归方法及其模拟研究. *统计研究*, 2010, 27(10): 81-87.]
- [31] Koenker R. Quantile regression for longitudinal data. *Journal of Multivariate Analysis*, 2004, 91(1): 74-89.
- [32] York R, Rosa E A, Dietz T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. *Ecological Economics*, 2003, 46(3): 351-365.
- [33] Jiao Wenxian, Chen Xingpeng. Environmental impact analysis of Gansu Province based on the STIRPAT model: A case study of energy consumption during 1991-2009. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(1): 105. [焦文献, 陈兴鹏. 基于STIRPAT模型的甘肃省环境影响分析: 以1991-2009年能源消费为例. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(1): 105.]
- [34] Dong F, Yu B, Hadachin T, et al. Drivers of carbon emission intensity change in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 129: 187-201.
- [35] Wang Yuan, Cheng Xi, Yin Peihong, et al. Research on regional characteristics of China's carbon emission performance based on entropy method. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(7): 1106-1116. [王媛, 程曦, 殷培红, 等. 影响中国碳排放绩效的区域特征研究: 基于熵值法的聚类分析. *自然资源学报*, 2013, 28(7): 1106-1116.]
- [36] Wang Zheng, Ma Cuifang, Wang Ying, et al. A geographical investigation into knowledge spillovers between regions. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(5): 773-780. [王铮, 马翠芳, 王莹, 等. 区域间知识溢出的空间认识. *地理学报*, 2003, 58(5): 773-780.]
- [37] Zeng Gang, Shang Yongmin, Si Yuefang. The convergent evolution of China's regional economic development models.

- Geographical Research, 2015, 34(11): 2005-2020. [曾刚, 尚勇敏, 司月芳. 中国区域经济发展模式的趋同演化: 以中国16种典型模式为例. 地理研究, 2015, 34(11): 2005-2020.]
- [38] Long G Y. Understanding China's recent growth experience: A spatial econometric perspective. *Annals of Regional Science*, 2003, 37(4): 613-628.
- [39] Zhang Xueliang. Has transport infrastructure promoted regional economic growth? With an analysis of the spatial effects of transport infrastructure. *Social Sciences in China*, 2012(3): 60-77. [张学良. 中国交通基础设施促进了区域经济增长吗: 兼论交通基础设施的空间溢出效应. 中国社会科学, 2012(3): 60-77.]
- [40] Li Guozhang, Wang Shuang. Regional factor decompositions in China's energy intensity change: Based on LMDI technique. *Journal of Finance and Economics*, 2008, 34(8): 52-62. [李国璋, 王双. 中国能源强度变动的区域因素分解分析: 基于LMDI分解方法. 财经研究, 2008, 34(8): 52-62.]
- [41] Li Yanmei, Zhang Lei, Cheng Xiaoling. A decomposition model and reduction approaches for carbon dioxide emissions in China. *Resources Science*, 2010, 32(2): 218-222. [李艳梅, 张雷, 程晓凌. 中国碳排放变化的因素分解与减排途径分析. 资源科学, 2010, 32(2): 218-222.]
- [42] Zhang Youguo. Economic development pattern change impact on China's carbon intensity. *Economic Research Journal*, 2010(4): 120-133. [张友国. 经济发展方式变化对中国碳排放强度的影响. 经济研究, 2010(4): 120-133.]
- [43] Liu Y H, Gao C C, Lu Yingying. The impact of urbanization on GHG emissions in China: The role of population density. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 157: 299-309.
- [44] Chai Zhixian. Density effects, development level and China's urban carbon dioxide emission. *On Economic Problems*, 2013(3): 25-31. [柴志贤. 密度效应、发展水平与中国城市碳排放. 经济问题, 2013(3): 25-31.]
- [45] Chen Liangwen, Yang Kaizhong. Productivity, city size and economic density: A empirical study on effect of urban agglomeration economies. *Social Sciences in Guizhou*, 2007(2): 113-119. [陈良文, 杨开忠. 生产率、城市规模与经济密度: 对城市集聚经济效应的实证研究. 贵州社会科学, 2007(2): 113-119.]
- [46] Cai Yinyin, Sun Bindong. Spatial dispersion of population and economic growth: Based on empirical analysis of megacities. *Urban Insight*, 2013, 27(5): 94-101. [蔡寅寅, 孙斌栋. 城市人口空间分散与经济增长: 基于特大城市的实证分析. 城市观察, 2013, 27(5): 94-101.]
- [47] Li Lianshui, Zhou Yong. Can technological advance improve energy effect: A empirical study based on industrial sectors in China. *Management World*, 2006(10): 82-89. [李廉水, 周勇. 技术进步能提高能源效率吗? 基于中国工业部门的实证检验. 管理世界, 2006(10): 82-89.]
- [48] Li Kaijie, Qu Ruxiao. Impact of technological change on carbon dioxide emission: An empirical analysis based on provincial dynamic panel data model. *Journal of Beijing Normal University (Social Sciences)*, 2012(5): 129-139. [李凯杰, 曲如晓. 技术进步对碳排放的影响: 基于省际动态面板的经验研究. 北京师范大学学报(社会科学版), 2012(5): 129-139.]
- [49] Zhang Lifeng. Relations among the industry structure, energy structure and carbon emissions. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(5): 1-7. [张丽峰. 我国产业结构、能源结构和碳排放关系研究. 干旱区资源与环境, 2011, 25(5): 1-7.]
- [50] Zhang Changde, Liu Shuai. Industrial structure and carbon emissions: A analysis based on provincial panel data in China. *Research on Development*, 2011(2): 26-33. [郑长德, 刘帅. 产业结构与碳排放: 基于中国省际面板数据的实证分析. 开发研究, 2011(2): 26-33.]
- [51] Zhao Ruyu, Qiu Zhenzhuo. Review on the relationship between industrial structure and carbon emissions. *Economic Review*, 2014(10): 110-113. [赵儒煜, 邱振卓. 产业结构与碳排放关系研究述评. 经济纵横, 2014(10): 110-113.]
- [52] Xiao Yanfei, Wan Zijie, Liu Hongguang. An empirical study of carbon emission transfer and carbon leakage in regional industrial transfer in China: Analysis based on inter-regional input-output model in 2002 and 2007. *Journal of Finance and Economics*, 2014, 40(2): 75-84. [肖雁飞, 万子捷, 刘红光. 我国区域产业转移中“碳排放转移”及“碳泄漏”实证研究: 基于2002年、2007年区域间投入产出模型的分析. 财经研究, 2014, 40(2): 75-84.]
- [53] Guo Chaoxian. An analysis of the increase of CO<sub>2</sub> emission in China: Based on SDA technique. *China Industrial Economics*, 2010(12): 47-56. [郭朝先. 中国二氧化碳排放增长因素分析: 基于SDA分解技术. 中国工业经济, 2010(12): 47-56.]
- [54] Li Zihao, Liu Huihuang. FDI, technology progress and emission of CO<sub>2</sub>: Evidence from Chinese provincial data. *Studies in Science of Science*, 2011, 29(10): 1495-1503. [李子豪, 刘辉煌. 外商直接投资、技术进步和二氧化碳排放: 基于中国省际数据的研究. 科学学研究, 2011, 29(10): 1495-1503.]
- [55] Zhao Rongqin, Huang Xianjin, Xu Hui, et al. Progress in the research of carbon cycle and management of urban system. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(10): 1847-1859. [赵荣钦, 黄贤金, 徐慧等. 城市系统碳循环与碳管理研究进展. 自然资源学报, 2009, 24(10): 1847-1859.]



- [56] Tian Li. Urbanization of land in urbanization process of China: Boon or bane? *City Planning Review*, 2011(2): 11-12. [田莉. 我国城镇化进程中喜忧参半的土地城市化. *城市规划*, 2011(2): 11-12.]
- [57] She Qiannan, Jia wenxiao, Pan Chen, et al. Spatial and temporal variation characteristics of urban forms' impact on regional carbon emissions in the Yangtze River Delta. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(11): 44-51. [余倩楠, 贾文晓, 潘晨, 等. 长三角地区城市形态对区域碳排放影响的时空分异研究. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(11): 44-51.]
- [58] Peng Mi, Lu Bin, Zhang Chun, et al. On the spatial differentia of carbon emissions in energy and its influencing factors on provincial level in China. *Urban Studies*, 2010(7): 6-11. [彭觅, 吕斌, 张纯, 等. 中国能源碳排放的区域差异及其影响因素分析. *城市发展研究*, 2010(7): 6-11.]
- [59] Park Juhee. The effects of compact city form on transportation energy consumption and air pollution [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014. [朴珠希. 紧凑城市形态对交通能耗及大气污染的影响实证研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.]

## Spatial spillover effect and driving forces of carbon emission intensity at city level in China

WANG Shaojian, HUANG Yongyuan

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Urbanization and Geo-simulation, School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** Since the Paris Climate Change Conference in 2015, reducing carbon emission and lowering carbon intensity has become a global consensus to deal with climate change. Due to different economic development stages, carbon intensity is regarded as a better index to measure regional energy-related carbon emissions. Although previous scholars have made great efforts to explore the spatiotemporal patterns and key driving factors of carbon intensity in China, the results lack the perspective from city level because of limited availability of statistical data of city-level carbon emission. In this study, based on carbon intensity of 283 cities in China from 1992-2013, we used the kernel density estimation, spatial autocorrelation, spatial Markov-chain and quantile regression panel model to empirically reveal its spatial spillover effects and explore the critical impact factors of carbon intensity at the city level. Our result indicates that although the total carbon emission increased during the study period, carbon intensity saw a gradual decline and regional differences were shrinking. Secondly, the city-level carbon intensity presented a strong spatial spillover effect and diverse regional backgrounds exerted heterogeneous effects on regions. Thirdly, quantile panel data analysis result showed that for low-intensity cities, on the one hand, FDI and transport sector were main contributing factors, and economic growth, technical progress and high population density negatively affected carbon intensity. On the other hand, industrial activity, extensive growth of investment and urban sprawl were key promoting factors for high-intensity cities, and population density was beneficial to emission reduction task. Furthermore, technological advance has not exerted negative influence on carbon intensity in high-intensity cities. At last, we suggested that Chinese government should take different carbon intensity levels into full consideration before policy making.

**Keywords:** city level; carbon emission intensity; spatial spillover effect; spatial Markov-chain; quantile regression panel model