

# 基于超效率SBM模型的中国城市碳排放绩效 时空演变格局及预测

王少剑<sup>1</sup>, 高爽<sup>1</sup>, 黄永源<sup>2</sup>, 史晨怡<sup>1</sup>

(1. 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;

2. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871)

**摘要:** 由CO<sub>2</sub>排放所引起的气候变化是当今社会所关注的热点话题, 提高碳排放绩效是碳减排的重要途径。目前关于碳排放绩效的研究多从国家尺度和行业尺度进行探讨, 由于能源消耗统计数据有限, 缺乏城市尺度的研究。基于遥感模拟反演的1992—2013年中国各城市碳排放数据, 采用超效率SBM模型对城市碳排放绩效进行测定, 构建马尔可夫和空间马尔可夫概率转移矩阵, 首次从城市尺度探讨了中国碳排放绩效的时空动态演变特征, 并预测其长期演变的趋势。研究表明, 中国城市碳排放绩效均值呈现波动中稳定上升的趋势, 但整体仍处于较低的水平, 未来城市碳排放绩效仍具有较大的提升空间, 节能减排潜力大; 全国城市碳排放绩效空间格局呈现“南高北低”特征, 城市间碳排放绩效水平的差异性显著; 空间马尔可夫概率转移矩阵结果显示, 中国城市碳排放绩效类型转移具有稳定性, 且存在“俱乐部收敛”现象, 地理背景在中国城市碳排放绩效类型转移过程中发挥重要作用; 从长期演变的趋势预测来看, 中国碳排放绩效未来演变较为乐观, 碳排放绩效随着时间的推移而逐步提升, 碳排放绩效分布呈现向高值集中的趋势。因此未来中国应继续加大节能减排力度以提高城市碳排放绩效, 实现国家节能减排目标; 同时不同地理背景的邻域城市之间应建立完善的经济合作联动机制, 以此提升城市碳排放绩效水平并追求经济增长与节能减排之间协调发展, 从而实现低碳城市建设和可持续发展。

**关键词:** 城市碳排放绩效; 超效率SBM模型; 空间马尔可夫链; 时空演变; 趋势预测; 中国

DOI: 10.11821/dlxb202006016

## 1 引言

气候变化及其影响已经成为当今世界面临的最为严重的环境问题之一<sup>[1]</sup>。联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第四次全球气候评估中指出, 全球变暖已是无可争议的事实, 人类活动及温室气体的大量排放是导致全球气候变化的主要原因。CO<sub>2</sub>作为最重要的温室气体之一, 与全球气候变暖息息相关<sup>[2]</sup>。随着城市化与工业化的继续推进, CO<sub>2</sub>的排放量持续增加, 由CO<sub>2</sub>带来的环境问题引起了各国政府和学者的广泛关注。为了实现可持续发展, 在“低碳化”的趋势下, 各国提出相应的低碳行动计划, 例如英国的低碳行动计划, 日本的低碳社会行动计划等。中国作为世界上最大的CO<sub>2</sub>排放国, 节能减排一直是国家发展战略的重点<sup>[3]</sup>。中国于2005年签订《京都协议书》, 同时在国家的规划

收稿日期: 2019-04-25; 修订日期: 2020-03-12

基金项目: 中央高校基本科研业务青年教师重点培育项目(19lgzd09); 广东省特支计划; 广州市珠江科技新星(201806010187) [Foundation: Fundamental Research Funds for the Central Universities, No.19lgzd09; Guangdong Special Support Program; Pearl River S&T Nova Program of Guangzhou, No.201806010187]

作者简介: 王少剑(1986-), 男, 河南驻马店人, 博士, 副教授, 博士生导师, 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

中也有明确的节能减排目标，例如国家在“十二五”规划提出到2015年实现碳排放强度比2010年下降17%的减排目标，“十三五”规划强化了绿色低碳发展的目标，在2020年相比2015年的碳排放强度下降18%，中美联合声明也提出中国规划在2030年CO<sub>2</sub>的排放总量达到峰值<sup>[4]</sup>，一系列的规划纲要明确提出了低碳发展的目标。相关研究表明，城市是最大的能源消耗及温室气体排放来源<sup>[5]</sup>，建立低碳城市是中国应对气候变化、发展低碳经济的必然选择。

基于上述背景，“低碳”“减排”迅速成为学术研究的热点话题，诸如CO<sub>2</sub>排放的估算方法<sup>[6-7]</sup>、影响因素<sup>[8-10]</sup>、强度<sup>[11-12]</sup>和绩效<sup>[13]</sup>等相关研究相继开展，其中碳排放绩效作为环境绩效评估的重要内容，是相关学者关注的重点。当前对于碳排放绩效的研究，根据测度方法可以分为单要素和全要素两类。对于单要素指标，Mielnik等最先以单位能源消耗的碳排放量即碳指数评估发展中国家的碳排放绩效<sup>[14]</sup>；Yamaji则将CO<sub>2</sub>排放总量与GDP的比值定义为CO<sub>2</sub>生产率，以此研究日本地区的碳排放水平<sup>[15]</sup>；此后又逐渐出现了其他单要素指标，包括CO<sub>2</sub>排放强度<sup>[16]</sup>、人均CO<sub>2</sub>排放量<sup>[17]</sup>、工业化的人均累积排放量<sup>[18]</sup>、能源强度<sup>[19]</sup>等。

上述有关碳排放绩效的单要素指标，多以CO<sub>2</sub>排放量与经济或能源相关指标的比值衡量，在实际测算过程中便于理解 and 操作，但是存在着一定的局限性。碳排放绩效实质是一种经济活动过程中的投入产出效率，无法单纯依赖能源直接产生，是资本、劳动力等经济投入共同作用的结果，故在测算过程中需要突出指标的“全要素”特点，考虑经济生产过程其他投入要素的替代效应<sup>[20]</sup>。基于全要素和要素替代的思想，在经济生产的过程中将能源消费、资本投资、劳动力作为投入指标形成GDP期望产出与CO<sub>2</sub>非期望产出，使得CO<sub>2</sub>排放绩效测算结果更加精确与合理<sup>[21]</sup>。以此为基础，Ramanathan利用数据包络分析法（Data Envelopment Analysis, DEA）构建包含二氧化碳排放、能源消耗和经济活动变量的投入产出指标体系，以此比较各国的碳排放绩效水平<sup>[22]</sup>。随后大量学者沿用这一思路，研究各国不同行业的碳排放绩效水平。例如Zhou等利用DEA模型和Malmquist指数对全球碳排放量最高的18个国家碳排放绩效进行测度，并考察其影响因素<sup>[23]</sup>；Wang等从产业的角度，利用DEA方法进一步分析了中国各工业部门碳排放效率，结果发现轻工业的碳排放绩效水平普遍高于重工业<sup>[24]</sup>；Meng等利用RAM-DEA模型对中国工业部门2001—2013年期间的低碳经济效率进行估计，发现大部分行业低碳经济效率仍处于较低的水平，但在研究期间效率有了很大提高<sup>[25]</sup>。研究方法上，由于DEA模型只注重经济活动过程中的期望产出而忽视了非期望产出，可能使结果产生偏差<sup>[26]</sup>，部分学者在测算碳排放绩效时使用改进后的模型，如有向距离函数模型<sup>[27-28]</sup>、基于松弛变量测度模型（Slacks-Based Measure, SBM）<sup>[29-31]</sup>、基于超效率SBM模型<sup>[32]</sup>等。总体来看，已有研究多从国家尺度、区域尺度和行业尺度开展碳排放绩效的测度分析，缺少城市尺度碳排放绩效的相关研究。

基于以上分析，目前关于碳排放绩效的研究现状主要有两点不足：① 受限于城市能源统计数据的缺失，大多数研究关注的是国家或区域CO<sub>2</sub>排放绩效，主要反映不同国家或区域之间CO<sub>2</sub>排放绩效的对比研究，对城市尺度CO<sub>2</sub>排放绩效研究不足，而城市作为最大的能源消费和温室气体排放的来源<sup>[33]</sup>，研究其碳排放绩效水平对低碳城市建设和低碳经济发展具有重要的理论与现实意义。② 已有研究主要对排放绩效的测度、空间特征和影响因素进行分析，较少涉及CO<sub>2</sub>排放绩效预测研究，而研究CO<sub>2</sub>排放绩效的未来发展趋势有助于实现经济增长与碳减排之间的解耦发展。基于此，本文以中国283个地级市的碳排放为研究对象，采用基于非期望产出的超效率SBM模型核算中国各城市1992—

2013年CO<sub>2</sub>的排放绩效，分析其时空演变特征；并分别构建传统和空间马尔科夫链转移概率矩阵对中国城市碳排放绩效的空间溢出效应进行了实证分析，预测中国城市碳排放绩效的长期演变和发展趋势。本文旨在通过以上探索性研究工作，分析中国城市碳排放绩效的时空演变特征及空间溢出效应，预测其长期演变和发展趋势，从而为科学制定低碳可持续发展政策提供依据。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

本文研究内容为基于投入产出视角测算中国城市碳排放绩效，考虑到部分城市数据的缺失，最终研究对象为全国283个城市，研究时段为1992—2013年，从城市层面对全国碳排放绩效及其空间溢出效应及未来演变趋势进行评价。在有关碳排放绩效核算的文献中，最重要的投入要素一般为资本、劳动力、能源<sup>[20, 29]</sup>，对经济活动过程中碳排放的影响机制如图1所示。借鉴已有研究，本文选取固定资产投资作为资本投入，选取各城市年末从业人数作为劳动力投入，选取城市电力消费作为能源投入，并选取国内生产总值作为经济活动过程中的期望产出，将城市CO<sub>2</sub>排放量视为经济活动的非期望产出，构建中国城市碳排放绩效投入产出指标体系（表1）。由于中国实行自上而下的能源统计模式，缺乏城市尺度的能源消费数据，无法进行城市的碳排放核算。为分析城市尺度碳排放绩效的空间溢出效应和发展趋势，本文碳排放数据来自Wang等的研究<sup>[34]</sup>，由夜间灯光影像模拟反演得到。根据DMSP/OLS夜间灯光影像获取城市范围内的夜间灯光数据进行模拟，为确保夜间灯光模拟碳排放数据的精确性，将基于夜间灯光数据模拟的碳排放量结果与部分具有能源消费数据城市的统计计算值进行对比分析，发现模拟值与计算值的

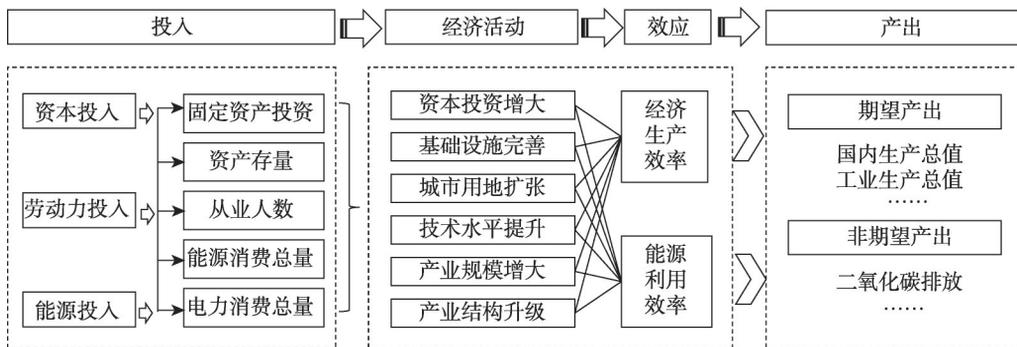


图1 基于投入产出视角的城市碳排放绩效影响机制

Fig. 1 Impact mechanism of urban carbon emission efficiency based on input and output perspectives

表1 城市碳排放绩效投入产出指标体系

Tab. 1 System of urban carbon emission performance input-output index

指标	变量	单位	平均值	中间值	标准差	最小值	最大值
投入指标	固定资产投资	10 <sup>8</sup> 元	42.65	22.50	66.34	12.95	836.24
	从业人员	10 <sup>4</sup> 人	220.36	183.02	169.70	0.32	1729.55
	电力消费	10 <sup>4</sup> kwh	680.87	366.25	907.31	0.25	8514.69
期望产出	GDP	10 <sup>8</sup> 元	103.97	71.34	125.46	2.96	1483.55
非期望产出	CO <sub>2</sub> 排放	10 <sup>4</sup> t	1665.89	896.10	2219.91	0.62	20832.94

相对误差为7.65%<sup>[35]</sup>，具有较好的模拟精度，因此可以使用模拟结果开展中国城市尺度的碳排放绩效研究。投入产出指标体系其余数据均来自《中国城市统计年鉴》和相关城市统计资料，部分年份缺失数据通过线性插值法得到。为了消除通货膨胀的影响以保证数据之间的可比性，国内生产总值、固定资产投资均折算为2000年不变价。

## 2.2 研究方法

**2.2.1 基于非期望产出的超效率SBM模型** 在经济生产过程中，劳动力、资本、能源的投入不仅生产出工业产品，同时也会产生副产品CO<sub>2</sub>，即非期望产出。最先由Tone<sup>[36]</sup>提出的SBM模型，由于考虑了生产过程中的非期望产出，更加符合实际情况，故被广泛应用于碳排放绩效<sup>[37]</sup>、生态效率<sup>[38]</sup>和能源效率<sup>[39]</sup>等的测算研究。与传统的数据包络模型(DEA)相比，基于非期望产出的SBM模型一方面可以解决投入产出松弛性问题，另一方面也解决了非期望产出存在下的效率分析问题<sup>[40]</sup>。因此，基于前人的研究，本文采用了基于非期望产出的SBM模型核算中国城市CO<sub>2</sub>的排放绩效。

假设有 $n$ 个决策单元的生产系统，每个决策单元由投入、期望产出和非期望产出三个投入产出向量构成，使用 $m$ 单位投入产生 $S_1$ 的期望产出和 $S_2$ 的非期望产出<sup>[41]</sup>。三个投入产出向量可表示为： $x \in R^m, y^g \in R^{S_1}, y^b \in R^{S_2}$ 。其中，矩阵 $X, Y^g, Y^b$ 的定义如下：

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n] \in R^{m \times n}, Y^g = [y_1^g, y_2^g, \dots, y_n^g] \in R^{S_1 \times n}, Y^b = [y_1^b, y_2^b, \dots, y_n^b] \in R^{S_2 \times n}$$

假设 $X > 0, Y^g > 0, Y^b > 0$ ，则生产可能性集可定义为：

$$P = \{(x, y^g, y^b) | x \geq X\theta, y^g \geq Y^g\theta, y^b \leq Y^b\theta, \theta \geq 0\} \quad (1)$$

式中：实际的期望产出低于前沿理想期望产出水平，实际非期望产出高于前沿的非期望产出水平<sup>[42]</sup>。基于生产可能性集，根据Tone的SBM模型将非期望产出纳入评价决策单元 $(x_0, y_0^g, y_0^b)$ 的SBM模型为：

$$\rho = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{S_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{S_1 + S_2} \left( \sum_{r=1}^{S_1} \frac{S_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{r=1}^{S_2} \frac{S_r^b}{y_{r0}^b} \right)}, \quad \text{s.t.} \begin{cases} x_0 = X\theta + S^- \\ y_0^g = Y^g\theta - S^g \\ y_0^b = Y^b\theta - S^b \\ S^- \geq 0, S^g \geq 0, S^b \geq 0, \theta \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中： $S = (S^-, S^g, S^b)$ 表示投入、期望产出和非期望产出的松弛量， $\rho$ 的目标函数值是决策单元的效率值，其范围在0~1之间，对于给定的决策单元 $(x_0, y_0^g, y_0^b)$ ，当且仅当 $\rho = 1$ ，即 $S^- = S^g = S^b = 0$ 时，该决策单元是有效的，如果 $0 \leq \rho < 1$ ，被评价单元是低效的，此时投入和产出则需要改进。由于上述模型是非线性模型，不利于计算效率的计算，通过Charnes-Cooper变换，将非线性方程转化为线性模型，其等价形式如下：

$$\tau = \min t - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{S_i^-}{x_{i0}}, \quad \text{s.t.} \begin{cases} 1 = t + \frac{1}{S_1 + S_2} \left( \sum_{r=1}^{S_1} \frac{S_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{r=1}^{S_2} \frac{S_r^b}{y_{r0}^b} \right) \\ x_0 t = X\mu + S^- \\ y_0^g t = Y^g\mu - S^g \\ y_0^b t = Y^b\mu - S^b \\ S^- \geq 0, S^g \geq 0, S^b \geq 0, \mu \geq 0, t > 0 \end{cases} \quad (3)$$

在大多数效率评价的研究中，存在一个共同的现象，即多个决策单元具有100%的“效率状态”，因此在效率排序时，区分这些效率决策单元与影响因素是非常重要的。为了保证效率分析产生更合理的效率评价值，结合Tone<sup>[43]</sup>的研究，本文选择超效率SBM模型进行测算，其模型表达如下：

$$\rho^* = \min \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{x}_i}{\frac{1}{S_1 + S_2} \left( \sum_{r=1}^{S_1} \bar{y}_r^g + \sum_{r=1}^{S_2} \bar{y}_r^b \right)}, \quad s.t. \begin{cases} \bar{x} \geq \sum_{j=1, \neq k}^n \theta_j x_j \\ \bar{y}^g \leq \sum_{j=1, \neq k}^n \theta_j y_j^g \\ \bar{y}^b \geq \sum_{j=1, \neq k}^n \theta_j y_j^b \\ \bar{x} \geq x_0, \bar{y}^g \leq y_0^g, \bar{y}^b \geq y_0^b, \bar{y}^g \geq 0, \theta \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\rho^*$ 的目标函数值是决策单元的效率值，值的大小可以超过1，其他变量定义与公式(3)类似，以上的模型都是基于规模不变的假设之下。

**2.2.2 空间马尔科夫链** 揭示区域的时空动态变化是地理学研究中的重要内容。泰尔指数、锡尔系数和变异系数等方法与探索性空间统计方法的结合，可以反映地理现象的时空演变规律和空间分布特征，进一步通过比较不同年份的核密度估计结果，可以描述数据整体分布形态的演变特征与规律。然而，上述方法偏重于反映区域现象的静态过程，不能直接反映区域的动态发展特征，同时上述方法更偏向于提供区域整体的信息，却不能提供事物在演进过程中的任何内部动态的信息。为了补充上述方法的不足，马尔科夫链方法将区域现象的演变过程视为马尔科夫过程，通过引入转移概率矩阵分析方法从而叠合区域内每个个体现象在不同时期的动态演变过程，能够反映出区域内每个地区的状态及其向上或向下转移的流动性<sup>[44-45]</sup>。

马尔科夫链的基本方法是：根据区域现象量化的连续数值的大小，将区域现象离散为  $k$  种状态类型，计算各种类型的变化及其概率，从而将区域现象演变过程近似为马尔科夫过程。首先，建立一个  $1 \times k$  的矩阵  $F_t = [F_{1,t}, F_{2,t}, \dots, F_{k,t}]$  用于存储在  $t$  时期各区域碳排放绩效的状态概率，而不同时期区域碳排放绩效的转移可用一个  $k \times k$  矩阵  $M$  表示（表2）。根据每种类型划分数量相似的原则，本文将中国城市碳排放绩效值按照四分位数（0.25, 0.5, 0.75）分为4种类型，数值从小到大划分为  $k = 1, 2, 3, 4$ 。矩阵  $M$  即为马尔科夫转移概率矩阵，矩阵中的元素  $P_{ij}$  表示在  $t$  时刻属于  $i$  类型而在  $t+1$  时刻属于  $j$  类型的概率，例如  $P_{11}$  表示城市在  $t$  时刻碳排放绩效为1类型时在  $t+1$  时刻仍属于1类型的概率， $P_{ij}$  的公式为：

$$P_{ij} = \frac{z_{ij}}{z_i} \quad (5)$$

式中： $z_{ij}$ 表示在整个研究期间内由  $t$  时刻属于  $i$  类型的研究区在下一时刻转移为  $j$  类型的研究区的数量总和； $z_i$ 表示在整个研究时期内属于类型  $i$  的区域数量总和。

在不同时期的研究中，学者们均发现由于地理邻近性而产生的空间溢出性对区域的发展演变具有重要的作用<sup>[46]</sup>。考虑区域现象空间性特征，基于传统马尔科夫链的转移概率矩阵，引入“空间滞后”的概念作为条件并同样划分为  $k$  种类型，将  $k \times k$  的转移概率矩阵分解为  $k$  个  $k \times k$  的转移条件概率矩阵（表3）。其中，矩阵中的元素  $P_{kij}$  表示在空间滞后类型为  $k$  的条件下，区域从初始状态类型  $i$  在下一时刻转移为类型  $j$  的概率。例如  $P_{121}$  表示在邻域城市碳排放绩效类型为1的条件下，城市在  $t$  时刻碳排放绩效为类型2在  $t+1$  时刻转移为类型1的概率。空间滞后类型考虑了地理上与该区域邻近的单元，区域  $a$  的空间滞后值  $Lag_a$  是该区域周边地理单元观测值的加权平均，具体公式为：

$$Lag_a = \sum_{b=1}^n Y_b W_{ab} \quad (6)$$

表2 马尔科夫转移概率矩阵 M (k=4)

$t+1$	1	2	3	4
1	$P_{11}$	$P_{12}$	$P_{13}$	$P_{14}$
2	$P_{21}$	$P_{22}$	$P_{23}$	$P_{24}$
3	$P_{31}$	$P_{32}$	$P_{33}$	$P_{34}$
4	$P_{41}$	$P_{42}$	$P_{43}$	$P_{44}$

式中:  $Y_b$  为区域  $b$  的观测值;  $Lag_a$  为区域  $a$  的空间滞后值;  $n$  为城市总个数; 空间权重矩阵  $W_{ab}$  表示区  $a$  域和区域  $b$  的空间关系, 本文采用邻接原则定义空间关系, 即地区相邻值为 1, 否则为 0。同时, 由于统计数据缺失而形成的孤岛问题, 本文将与该城市距离最近的城市定义为邻接城市。

假设在长时间的转移后, 系统将出现一个稳定的状态, 也称为终极状态, 这意味着该状态将不受时间变化的影响, 处于平衡状态, 此刻对应的概率被称为终极状态概率或者平衡状态概率。结合极限的定义, 通过马尔科夫转移概率矩阵能够计算出终极状态。利用随机过程的平衡分布概率可以对预测马尔科夫过程在未来可能会出现的发展趋势提供重要信息。按照极限的定义有:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \pi(k) = \lim_{k \rightarrow \infty} \pi(k+1) = \pi \quad (7)$$

将式 (7) 代入马尔科夫预测模型的递推公式中可得:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \pi(k+1) = \lim_{k \rightarrow \infty} \pi(k)M \quad (8)$$

式中:  $\pi$  为马尔科夫过程演变的终极状态矩阵。若  $\pi$  满足  $\sum_{i=1}^n \pi_i = 1$ , 且  $0 \leq \pi_i \leq 1$ , 则  $\pi$  为传统马尔科夫过程的终极状态。相似地, 计算传统马尔科夫过程最终状态的方法也可以推广到空间马尔科夫链中, 根据该原理计算在不同空间滞后状态下, 马尔科夫过程的最终状态, 以此提供空间滞后对区域马尔科夫过程演变趋势影响的重要信息。

### 3 中国城市碳排放绩效时空演变特征

#### 3.1 中国城市碳排放绩效测算与时空分布

基于非期望产出的超效率SBM模型, 对中国1992—2013年283个城市的碳排放绩效进行测定, 求解各年份平均值, 并分析中国城市碳排放绩效的时空演变特征。

由图2可知, 整体上中国城市碳排放绩效仍处于较低的水平, 各年份平均碳排放绩效基本处在0.6以下, 由此可见, 中国经济发展过程中有着较大的技术进步和低碳减排的空间。其中, 中国碳排放绩效呈现波动并稳定上升的趋势, 1995—2002年中国碳排放绩效上升幅度最明显, 2002年达到峰值0.62, 随后呈现平稳下降的趋势, 但下降的幅度较小。基于对低碳城市建设的重视和节能减排的决心, 中国政府的一系列措施使碳排放效率在1995—2002年间有了明

**表3 空间马尔科夫转移概率矩阵 N (k=4)**  
**Tab. 3 Spatial Markov transition probability matrix (k=4)**

Lag	t+1	1	2	3	4
1	1	$P_{111}$	$P_{121}$	$P_{131}$	$P_{141}$
	2	$P_{211}$	$P_{221}$	$P_{231}$	$P_{241}$
	3	$P_{311}$	$P_{321}$	$P_{331}$	$P_{341}$
	4	$P_{411}$	$P_{421}$	$P_{431}$	$P_{441}$
2	1	$P_{112}$	$P_{122}$	$P_{132}$	$P_{142}$
	2	$P_{212}$	$P_{222}$	$P_{232}$	$P_{242}$
	3	$P_{312}$	$P_{322}$	$P_{332}$	$P_{342}$
	4	$P_{412}$	$P_{422}$	$P_{432}$	$P_{442}$
3	1	$P_{113}$	$P_{123}$	$P_{133}$	$P_{143}$
	2	$P_{213}$	$P_{223}$	$P_{233}$	$P_{243}$
	3	$P_{313}$	$P_{323}$	$P_{333}$	$P_{343}$
	4	$P_{413}$	$P_{423}$	$P_{433}$	$P_{443}$
4	1	$P_{114}$	$P_{124}$	$P_{134}$	$P_{144}$
	2	$P_{214}$	$P_{224}$	$P_{234}$	$P_{244}$
	3	$P_{314}$	$P_{324}$	$P_{334}$	$P_{344}$
	4	$P_{414}$	$P_{424}$	$P_{434}$	$P_{444}$

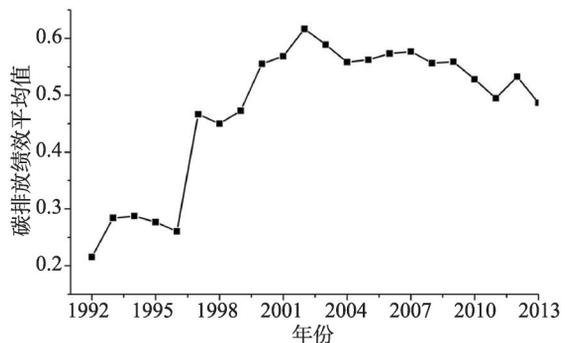


图2 1992—2013年中国城市碳排放绩效变化趋势

Fig. 2 The evolution trend of urban carbon emission performance

显的提高。但随着节能减排瓶颈的到来,中国碳排放绩效也出现停滞状态,急需新一轮的产业转型和能源结构调整提高碳排放绩效水平。箱型图(图3)展示了1992—2013年中国各城市碳排放绩效的分布特征变化,可知在研究期间中国城市整体碳排放绩效水平有较大提升。其中各城市碳排放均值的变化由低值集中,发展为向两端扩散、中值集中的分布形态。有较多碳排放处于低效率的城市随着技术的投入和产业的升级,其碳排放绩效有了较为明显的提升,但部分城市碳排放绩效依旧处于较低水平,国内碳排放绩效水平的差异性明显。

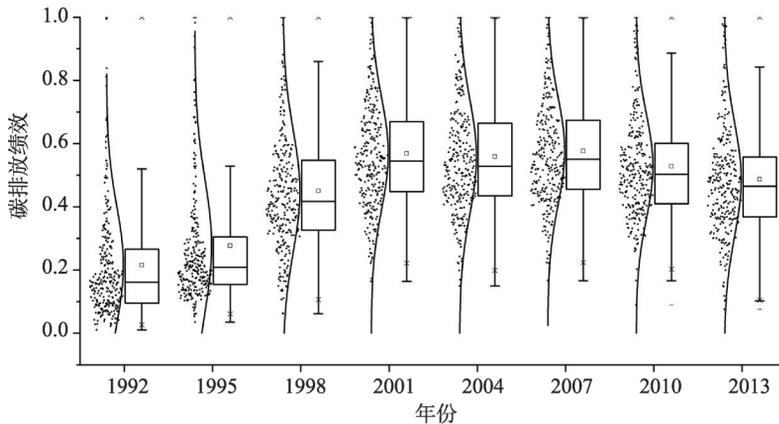


图3 1992-2013年中国城市碳排放绩效箱型图

Fig. 3 Urban carbon emission performance box chart of China in 1992-2013

为更好地了解中国城市碳排放绩效的空间演变特征,使用ArcGIS 10.3软件将全国城市碳排放绩效可视化,得到中国城市碳排放绩效空间分布图(图4)。从空间维度看,大多数城市的碳排放绩效在研究期间内均有较大的提升,其中1995—2000年提升尤为明显。自2000年以来,湖南、湖北、江西、浙江、江苏、安徽、山东和辽宁省等地区城市的碳排放绩效均有较大幅度提升,而陕西、山西、河北、广西和广东省的城市碳排放绩效提升幅度相对较低。值得注意的是,在2000—2005年期间黑龙江、吉林地区的城市碳排放绩效较高,随后出现一定程度的下滑;此外,陕西、河北、河南、广东省等地区在2010—2013年期间均出现下滑的趋势。至2013年,全国城市碳排放绩效空间格局呈现“南高北低”特征,南方地区城市碳排放绩效普遍高于北方地区,主要呈现以湖南、四川为核心,碳排放绩效逐渐向外降低的格局,黑龙江、吉林等地区为中国城市碳排放绩效高值副核心,华北平原和东部沿海地区的城市碳排放绩效相对较低。

### 3.2 中国城市碳排放绩效时空演变特征

为了深入分析中国城市碳排放绩效的时空演变特征,构建传统的马尔科夫转移概率矩阵和基于空间的马尔科夫转移概率矩阵。碳排放绩效被离散为低、较低、较高、高4种状态,并分别用 $k = 1, 2, 3, 4$ 表示。其中,从低值向高值转移定义为向上转移,由高值向低值转移定义为向下转移。表4为1992—2013年中国城市碳排放绩效类型传统的马尔科夫转移概率矩阵,根据计算结果可得:① 对角线的概率值均大于非对角线的概率值,说明中国城市碳排放绩效类型转移具有稳定性,维持原有状态的概率较大。② 中国城市碳排放绩效存在“俱乐部收敛”现象,碳排放绩效低和高的类型在下一阶段维持原有状态类型的概率最大,分别为74.37%和80.13%。③ 在相邻年份的城市碳排放绩效类型转移实现“跨越式”发展的概率较小,各状态类型实现跨等级转移的概率均小于6%。

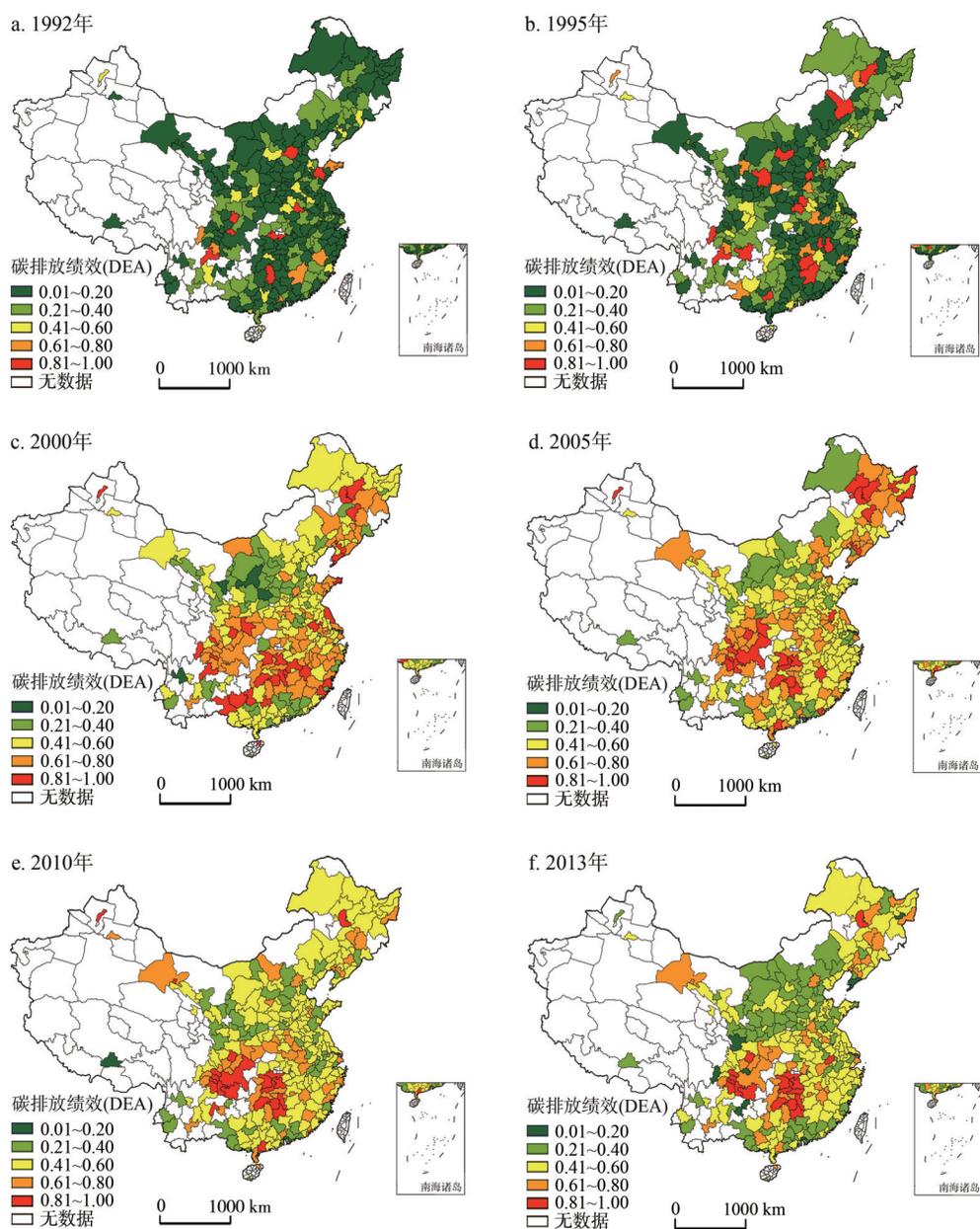


图4 1992—2013年中国城市碳排放绩效空间分布格局

Fig. 4 Spatial distribution pattern of urban carbon emission performance of China in 1992-2013

在传统的马尔科夫链转移概率矩阵中加入空间滞后条件，构建空间马尔科夫转移概率矩阵，通过对比分析在不同邻域背景下城市碳排放绩效的转移概率探讨邻域背景对城市碳排放绩效转移的影响。表5为1992—2013年中国城市碳排放绩效类型空间马尔科夫转移概率矩阵，根据计算结果可得：①地理背景在中国城市碳排放绩效转移过程中发挥重要作用。对比传统的马尔科夫转移概率矩阵，在不同的地理背景下，中国城市的碳排放绩效转移概率发生了明显的变化。②城市的碳排放绩效与区域碳排放绩效类型具有协同性。当邻域类型为1时，在 $t$ 时段处于碳排放绩效低的城市数量明显多于其他类型的城

市数量,当邻域类型为4时,在 $t$ 时段处于碳排放绩效高的城市数量亦明显大于其他类型的城市数量。③一般来说,与碳排放绩效低的区域为邻,该城市碳排放绩效类型向下转移的概率增大,当与碳排放绩效高的区域为邻时,该城市的碳排放绩效类型向上转移的概率将增大。例如,在碳排放绩效低的邻域条件下,  $P_{21t}(0.1565) > P_{21}(0.1029)$ ,  $P_{32t}(0.2330) > P_{32}(0.1793)$ ,而在碳排放绩效高的邻域条件下,  $P_{12t}(0.3272) > P_{12}(0.1776)$ ,  $P_{23t}(0.2089) > P_{23}(0.1928)$ (表5)。④空间马尔科夫转移概率矩阵在空间维度为“俱乐部收敛”现象提供了解释依据。受邻域类型溢出效应的影响,中国城市碳排放绩效类型转移容易在一定的地理空间范围内形成“俱乐部收敛”现象。在碳排放绩效低的区域,碳排放绩效状态类型向上转移的概率上升,向下转移的概率下降,因此该地理范围内碳排放绩效低的城市数量有增大的趋势,反之亦然。

在考虑邻域背景条件后,中国城市碳排放绩效的转移情况发生明显的改变,说明城市碳排放绩效的演变具有空间溢出效应。为验证空间滞后效应在统计学意义上是否显著,需要进行假设检验,假设城市的碳排放绩效类型的转移是相互独立的,与邻域状态类型无关,检验的公式为:

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

式中:  $k$ 为城市碳排放绩效状态类型数量,本文中 $k=4$ ;  $m_{ij}$ 为传统马尔科夫转移概率;  $m_{ij}(S)$ 表示邻域状态类型为 $S$ 的空间马尔科夫转移概率;  $n_{ij}(S)$ 表示邻域状态类型为 $S$ 的空间马尔科夫转移的城市个数;  $Q_b$ 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,自由度为36,在 $\alpha=0.005$ 的置信水平下,  $Q_b=109.15 > \chi^2(40)=66.77$ ,因此拒绝接受中国城市碳排放绩效的类型转移在空间上是相互独立的假设。

空间马尔科夫转移概率矩阵的结果表明,中国城市的碳排放绩效演变具有明显的空间溢出效应。主要表现为城市的碳排放绩效与区域碳排放绩效类型具有协同性,区域内部能源利用效率具有较强的空间关联性;同时中国城市碳排放绩效类型转移受邻域类型溢出效应的影响,容易在一定的地理空间范围内形成“俱乐部收敛”现象,地理背景在中国城市碳排放绩效转移过程中发挥重要作用。基于投入产出视角可知,区域碳排放绩效水平是期望产出和非期望产出共同作用的结果,受区域的经济活动主导(图1)。因此,区域碳排放绩效的空间溢出效应是区域经济活动空间溢出效应的具体表现。

表4 1992—2013年中国城市碳排放绩效类型马尔科夫转移概率矩阵

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

$t+1$	$n$	1	2	3	4
1	1514	0.7437	0.1777	0.0575	0.0211
2	1457	0.1030	0.6603	0.1929	0.0439
3	1472	0.0177	0.1793	0.6372	0.1658
4	1500	0.0133	0.0253	0.1600	0.8013

表5 1992—2013年中国城市碳排放绩效类型空间马尔科夫转移概率矩阵

Tab. 5 Spatial Markov matrix for carbon emission performance classes at the city level of China in 1992-2013

邻域类型	$t+1$	$n$	1	2	3	4
1	1	807	0.7720	0.1437	0.0595	0.0248
	2	313	0.1565	0.6006	0.1821	0.0607
	3	206	0.0388	0.2330	0.5631	0.1650
	4	176	0.0341	0.0455	0.1364	0.7841
2	1	470	0.7319	0.2000	0.0553	0.0128
	2	436	0.1124	0.6651	0.1789	0.0436
	3	321	0.0218	0.2274	0.5919	0.1589
	4	256	0.0430	0.0313	0.1953	0.7305
3	1	182	0.6923	0.2253	0.0495	0.0330
	2	440	0.0750	0.6841	0.2045	0.0364
	3	475	0.0147	0.1537	0.6505	0.1811
	4	371	0.0054	0.0296	0.2075	0.7574
4	1	55	0.6000	0.3273	0.0727	0.0000
	2	268	0.0709	0.6828	0.2090	0.0373
	3	470	0.0085	0.1489	0.6872	0.1553
	4	697	0.0014	0.0158	0.1277	0.8551

根据经济增长理论,区域的经济活动是资本、市场、技术和政策等多种因素共同作用的结果,各要素在特定的资本条件、技术水平和制度环境等地理背景下相互作用形成了区域经济发展模式<sup>[47]</sup>。在市场化 and 开放经济的条件下,统一市场的出现加深了各经济要素自由流动,开放经济使得区域可以学习其他地区尤其是邻近地区的先进技术,政策创新的边际效用递减促使政府间的制度学习与模仿,使得区域的经济发展模式在演化中不断趋于协同,经济活动存在空间溢出效应<sup>[47]</sup>。特别是信息化的发展和区域基础设施的不断完善,降低了区域间要素的流动成本,促进区域间的要素自由流动从而使得经济活动的空间溢出效应更加显著<sup>[48]</sup>。一方面,区域经济活动的空间溢出效应影响着产业结构、技术水平等经济活动指标,改变了区域的经济产出效率,使得区域经济活动的期望产出在演化中存在空间溢出效应;另一方面,《2010年世界发展指标》指出,中国工业部门的能源消耗占总能耗的70%,所带来的碳排放占排放总量的85%<sup>[49]</sup>,表明区域的经济活动具有强烈的能源依赖性。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和能源利用效率的协同转变<sup>[50]</sup>,使得经济活动的非期望产出碳排放同样趋于协同从而存在空间溢出效应。区域间的经济活动的空间溢出受到多种要素相互作用的影响,通过改变经济活动的期望产出和非期望产出影响区域的碳排放绩效,因此碳排放绩效的空间溢出效应是市场、技术和制度等多种地理要素共同作用的结果。

## 4 中国城市碳排放绩效预测

马尔科夫转移概率的极限分布为各种类型转移达到一种平衡状态下的分布,计算马尔科夫和空间马尔科夫的极限分布能够有效地预测中国碳排放绩效的长期演变和发展趋势。当 $k \rightarrow \infty$ 时,求得中国城市碳排放绩效的状态类型在 $k$ 次转移后的极限分布,在加入空间滞后条件后,可分析在每一类邻域背景下城市碳排放绩效状态类型的极限分布。

表6为中国城市碳排放绩效长期演变趋势的预测结果。在不考虑空间滞后的情况下,根据传统的马尔科夫转移概率矩阵求解极限分布并与初始状态对比,发现处于状态1、2、3的数量均在减少,而状态4的数量则有明显增加。这说明从长期来看,中国城市碳排放绩效类型将随时间推移而逐步由低级状态向高级状态转移,呈现由低至高依次递增的演变趋势,碳排放绩效逐步提高。在考虑空间滞后的条件下,中国城市碳排放绩效的演变趋势发生明显的变化。从长期来看,与碳排放绩效低的区域(类型1)为邻,将出现1、2、3、4这4种状态类型城市数量相当的局面。其中,碳排放绩效高的城市数量(27.13%)略多于其他类型的城市,整体进步的空间较大。而与碳排放绩效较高的区域(类型为3和4)为邻,城市碳排放绩效类型为3和4的数量(34.71%和30.93%,32.49%和40.54%)将远高于类型1和2。在该邻域背景下,碳排放绩效的“马太效应”现象将逐渐消失,并向高绩效区间集聚。

表6 1992—2013年中国城市碳排放绩效类型的演变趋势预测

Tab. 6 The evolution trend prediction for carbon emission performance classes at the city level of China in 1992-2013

状态类型		1	2	3	4	
不考虑空间滞后	初始状态	0.1484	0.3534	0.3004	0.1979	
	终极状态	0.1377	0.2512	0.2948	0.3162	
考虑空间滞后	终极状态	1	0.2521	0.2524	0.2242	0.2713
		2	0.1908	0.3184	0.2708	0.2201
		3	0.0851	0.2585	0.3471	0.3093
		4	0.0477	0.2220	0.3249	0.4054

总体而言,按目前的趋势发展,中国碳排放绩效长期的演变趋势较为乐观,碳排放绩效随时间的推移而逐步提升,碳排放绩效分布呈现向高值集中的趋势,各类型的城市数量由等级低至高(1→4)依次增加。不同邻域背景对城市碳排放绩效演变的影响具有异质性,与绩效低的区域为邻的城市,碳排放绩效提升的幅度较小,呈现4种状态类型数量相似分布。而与绩效较高的区域为邻的城市,碳排放绩效类型向3和4集聚,呈现整体提升的趋势。

## 5 结论与讨论

本文以1992—2013年中国主要地级市的面板数据为研究单元,将城市碳排放作为非期望产出,采用超效率SBM模型对城市碳排放绩效进行测定,并分别构建传统和基于空间马尔科夫链转移概率矩阵对中国城市碳排放绩效的空间溢出效应进行实证分析,得出城市碳排放绩效的时空动态演变特征,并预测其未来演变发展的趋势。主要结论为:

(1)从时空格局分布来看,基于碳排放折线图、箱型图和空间分布图,整体上中国城市碳排放绩效呈现波动中稳定上升的趋势,但是仍处于较低的水平,城市碳排放绩效仍具有较大的提升空间。各城市碳排放均值的变化由低值集中,发展为向两端扩散、中值集中的分布形态,城市间碳排放绩效水平的不均衡性尤为突出。空间上,全国城市碳排放绩效空间格局呈现“南高北低”特征,南方地区城市碳排放绩效普遍高于北方地区,主要呈现以湖南、四川为核心,碳排放绩效逐渐向外降低的格局。

(2)从时空演变特征来看,传统马尔科夫概率转移矩阵结果显示,中国城市碳排放绩效具有稳定性,且存在“俱乐部收敛”现象,在相邻年份较难实现跨越式发展,矩阵两端类型不变的概率最大。与空间马尔科夫转移概率矩阵进行对比显示,地理背景在中国城市碳排放绩效转移过程中发挥重要作用,在不同的地理背景下,中国城市的碳排放绩效转移概率发生了明显变化。某城市与碳排放绩效低的区域为邻时,该城市碳排放绩效类型向下转移的概率增大,当与碳排放绩效高的区域为邻时,该城市的碳排放绩效类型向上转移的概率将增大。空间马尔科夫转移概率矩阵在空间维度为“俱乐部收敛”现象提供了解释依据。受邻域类型溢出效应的影响,中国城市碳排放绩效容易在一定的地理空间范围内形成“俱乐部收敛”现象。

(3)从长期演变和发展趋势来看,中国碳排放绩效未来较为乐观,碳排放绩效随时间的推移而逐步提升,碳排放绩效分布呈现向高值集中的趋势,各类型的城市数量由等级低至高(1→4)依次增加。不同邻域背景对城市碳排放绩效演变的影响具有异质性,与绩效低的区域为邻的城市,碳排放绩效提升的幅度较小,呈现4种状态类型均匀分布。而与绩效较高的区域为邻的城市,碳排放绩效类型向3和4集聚,呈现整体提升的趋势。

从中国城市碳排放绩效的现状来看,沿海等经济活动发达地区的碳排放绩效仍低于中西部经济欠发达地区,由此可见,当前中国的经济发展仍为“高能耗、高排放、高增长”的三高模式<sup>[20]</sup>。虽然中国各级政府重视低碳减排,陆续出台了一系列政策措施,取得了较为积极的成果,但是中国仍处在经济发展与碳排放之间倒“U”型环境库兹涅兹曲线的上升区段<sup>[51]</sup>。中国城市碳排放绩效的演变趋势显示目前城市间碳排放绩效的不均衡性较强,部分城市的碳排放绩效仍然存在较大的提升潜力,因此中国经济现代化发展仍面临资源节约、节能减排的艰巨任务,未来中国应继续加大研发力度以提高城市碳排放绩效,实现国家节能减排的目标<sup>[52-53]</sup>。马尔科夫矩阵和空间马尔科夫矩阵结果表明中国城市碳排放绩效演化具有明显的空间依赖特征,城市的碳排放绩效与区域碳排放绩效类

型具有协同性。因此不同地理背景的邻域城市之间应该建立完善的经济合作联动机制,尤其是邻域类型为碳排放绩效高值地区的城市,应加强与高值地区的产业、技术、制度的交流,提升自身的碳排放绩效水平;同时政府应从区域和城市视角制定节能减排政策,根据城市自身经济发展水平提出相应的减排目标,并与区域其他城市联动在区域层面形成协同减排效应,从而在整体上实现中国建设低碳城市和发展低碳经济的目标<sup>[4]</sup>。

本文基于遥感数据核算全国1992—2013年283个地级以上城市的碳排放绩效,并测度城市碳排放绩效水平、空间溢出效应和未来演变发展的趋势,对中国建设低碳城市具有重要的政策意义,但仍存在不足之处。使用夜间灯光数据模拟反演城市碳排放量为城市尺度的碳排放研究提供了新的视角,但模拟数据仍具有一定的相对误差,同时现有的DMSP/OLS灯光影像数据仅公布至2013年,其继任产品VIIRS/DNB夜间灯光数据,由于两种传感器在光谱波段、分辨率和扫描幅宽等参数存在差异使得两种数据不匹配,本文并未解决两种数据的衔接问题,因此无法开展更具时效性的研究。近年来,随着中国发展进入新常态,经济发展态势改变较大,对碳排放绩效水平和演变趋势也会产生深远的影响,未来需要解决两种夜间灯光数据的衔接问题或拓展城市尺度的碳排放数据来源渠道以开展更具时效性的研究。另外,本文在建立投入产出指标体系时使用替代数据虽然出于数据的可获取性和便捷性考虑,但研究精度仍略显不足,例如使用电力消费替代能源投入,没有考虑不同城市的能源消费状况;使用年末从业人数替代劳动力投入,忽视了不同产业结构劳动力种类和质量的差别造成的影响,未来研究需要在数据全面性和精确性方面进一步细化。

## 参考文献(References)

- [1] Su Yongxian, Chen Xiuzhi, Ye Yuyao, et al. The characteristics and mechanisms of carbon emissions from energy consumption in China using DMSP/OLS night light imageries. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(11): 1513-1526. [苏泳娴, 陈修治, 叶玉瑶, 等. 基于夜间灯光数据的中国能源消费碳排放特征及机理. *地理学报*, 2013, 68(11): 1513-1526.]
- [2] Liu Q, Wang S, Zhang W, et al. Examining the effects of income inequality on CO<sub>2</sub> emissions: Evidence from non-spatial and spatial perspectives. *Applied Energy*, 2019, 236: 163-171.
- [3] Deng Jixiang, Liu Xiao, Wang Zheng. Characteristics analysis and factor decomposition based on the regional difference changes in China's CO<sub>2</sub> emission. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(2): 189-200. [邓吉祥, 刘晓, 王铮. 中国碳排放的区域差异及演变特征分析与因素分解. *自然资源学报*, 2014, 29(2): 189-200.]
- [4] Song Jiekun, Liang Lulu, Niu Danping, et al. Evaluation, influencing factors and promotion countermeasures of cities' carbon emissions efficiencies in Shandong province. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Social Sciences)*, 2018, 34(1): 15-21. [宋杰鲲, 梁璐璐, 牛丹平, 等. 山东省地市碳排放效率测度、影响因素与提升对策. *中国石油大学学报(社会科学版)*, 2018, 34(1): 15-21.]
- [5] Ishii S, Tabushi S, Aramaki T, et al. Impact of future urban form on the potential to reduce greenhouse gas emissions from residential, commercial and public buildings in Utsunomiya, Japan. *Energy Policy*, 2010, 38(9): 4888-4896.
- [6] Liu Zhu, Geng Yong, Xue Bing, et al. A calculation method of CO<sub>2</sub> emission from urban energy consumption. *Resources Science*, 2011, 33(7): 1325-1330. [刘竹, 耿涌, 薛冰, 等. 城市能源消费碳排放核算方法. *资源科学*, 2011, 33(7): 1325-1330.]
- [7] Zhao Rongqin, Huang Xianjin, Peng Buzhuo. Research on carbon cycle and carbon balance of Nanjing urban system. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(6): 758-770. [赵荣钦, 黄贤金, 彭补拙. 南京城市系统碳循环与碳平衡分析. *地理学报*, 2012, 67(6): 758-770.]
- [8] Xu Shichun, Xi Rong, He Zhengxia. Influential factors and policy implications of carbon emissions for energy consumption in China. *Resources Science*, 2012, 34(1): 2-12. [许士春, 习蓉, 何正霞. 中国能源消耗碳排放的影响因素分析及政策启示. *资源科学*, 2012, 34(1): 2-12.]
- [9] Xu Guoquan, Liu Zeyuan, Jiang Zhaohua. Decomposition model and empirical study of carbon emissions for China, 1995-2004. *China Population, Resources and Environment*, 2006, 16(6): 158-161. [徐国泉, 刘则渊, 姜照华. 中国碳排放的因素分解模型及实证分析: 1995—2004. *中国人口·资源与环境*, 2006, 16(6): 158-161.]

- [10] Ping W, Wu W, Zhu B, et al. Examining the impact factors of energy-related CO<sub>2</sub> emissions using the STIRPAT model in Guangdong Province, China. *Applied Energy*, 2013, 106(11): 65-71.
- [11] Zhao Rongqin, Huang Xianjin, Zhong Taiyang. Research on carbon emission intensity and carbon footprint of different industrial spaces in China. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(9): 1048-1057. [赵荣钦, 黄贤金, 钟太洋. 中国不同产业空间的碳排放强度与碳足迹分析. *地理学报*, 2010, 65(9): 1048-1057.]
- [12] Li Jian, Zhou Hui. Correlation analysis of carbon emission intensity and industrial structure in China. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(1): 7-14. [李健, 周慧. 中国碳排放强度与产业结构的关联分析. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(1): 7-14.]
- [13] Wang Qunwei, Zhou Peng, Zhou Dequn. Research on dynamic carbon dioxide emissions performance, regional disparity and affecting factors in China. *China Industrial Economics*, 2010(1): 45-54. [王群伟, 周鹏, 周德群. 我国二氧化碳排放绩效的动态变化、区域差异及影响因素. *中国工业经济*, 2010(1): 45-54.]
- [14] Mielnik O, Goldemberg J. Communication the evolution of the "carbonization index" in developing countries. *Energy Policy*, 1999, 27(5): 307-308.
- [15] Yamaji K, Matsushashi R, Nagata Y, et al. A study on economic measures for CO<sub>2</sub> reduction in Japan. *Energy Policy*, 1993, 21(2): 123-132.
- [16] Sun J W. The decrease of CO<sub>2</sub> emission intensity is decarbonization at national and global levels. *Energy Policy*, 2005, 33(8): 975-978.
- [17] Stretesky P B, Lynch M J. A cross-national study of the association between per capita carbon dioxide emissions and exports to the United States. *Social Science Research*, 2009, 38(1): 239-250.
- [18] Zhang Z, Qu J, Zeng J. A quantitative comparison and analysis on the assessment indicators of greenhouse gases emission. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18(4): 387-399.
- [19] Ang B W. Is the energy intensity a less useful indicator than the carbon factor in the study of climate change? *Energy Policy*, 1999, 27(15): 943-946.
- [20] Zha Jianping, Tang Fangfang. Research on static level, dynamic change and affecting factors of industrial carbon emissions performance: An empirical analysis based on Chinese provincial panel data. *Journal of Shanxi Finance and Economics University*, 2012(3): 71-80. [查建平, 唐方方. 中国工业碳排放绩效: 静态水平及动态变化: 基于中国省级面板数据的实证分析. *山西财经大学学报*, 2012(3): 71-80.]
- [21] Wang Shaojian, Liu Yanyan, Fang Chuanglin. Review of energy-related CO<sub>2</sub> emission in response to climate change. *Progress in Geography*, 2015, 34(2): 151-164. [王少剑, 刘艳艳, 方创琳. 能源消费CO<sub>2</sub>排放研究综述. *地理科学进展*, 2015, 34(2): 151-164.]
- [22] Ramanathan R. Combining indicators of energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions: A cross-country comparison. *International Journal of Global Energy Issues*, 2002, 17(3): 214-227.
- [23] Zhou P, Ang B W, Han J Y. Total factor carbon emission performance: A Malmquist index analysis. *Energy Economics*, 2010, 32(1): 194-201.
- [24] Wang B, Lu Y, Yang Y. Measuring and decomposing energy productivity of China's industries under carbon emission constraints. *Journal of Financial Research*, 2013(10): 128-141.
- [25] Meng M, Fu Y, Wang T, et al. Analysis of low-carbon economy efficiency of Chinese industrial sectors based on a RAM model with undesirable outputs. *Sustainability*, 2017, 9(3): 451.
- [26] Liu W B, Meng W, Li X X, et al. DEA models with undesirable inputs and outputs. *Annals of Operations Research*, 2010, 173(1): 177-194.
- [27] Wang Qunwei, Zhou Dequn, Zhou Peng. Regional carbon dioxide emission performance and its reduction potential based on environmental production technology: The case of main industrial provinces in China. *Studies in Science of Science*, 2011, 29(6): 868-875. [王群伟, 周德群, 周鹏. 区域二氧化碳排放绩效及减排潜力研究: 以我国主要工业省区为例. *科学学研究*, 2011, 29(6): 868-875.]
- [28] Du K, Huang L, Yu K. Sources of the potential CO<sub>2</sub> emission reduction in China: A nonparametric metafrontier approach. *Applied Energy*, 2014, 115(4): 491-501.
- [29] Wang Zhaofeng, Du Yaoyao. Performance of carbon emission in Hunan province based on three-stage SBM model. *Journal of Central South University of Forestry & Technology (Social Sciences)*, 2019, 13(1): 23-30. [王兆峰, 杜瑶瑶. 基于三阶段SBM模型的湖南省碳排放绩效评价. *中南林业科技大学学报(社会科学版)*, 2019, 13(1): 23-30.]
- [30] Choi Y, Ning Z, Zhou P. Efficiency and abatement costs of energy-related CO<sub>2</sub> emissions in China: A slacks-based efficiency measure. *Applied Energy*, 2012, 98: 198-208.
- [31] Li Tao. Measuring the win-win performance of China's carbon reduction and economic growth with energy constraint:

- A rang-adjusted measure of non-radial DEA. *China Economic Quarterly*, 2013, 12(2): 667-692. [李涛. 资源约束下中国碳减排与经济增长的双赢效率研究: 基于非径向DEA方法RAM模型的测度. *经济学(季刊)*, 2013, 12(2): 667-692.]
- [32] Shen C, Feng R, Yu B, et al. Industrial CO<sub>2</sub> emissions efficiency and its determinants in China: Analyzing differences across regions and industry sectors. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2018, 27(3): 1239-1254.
- [33] IEA. *World Energy Outlook 2012*. Paris: International Energy Agency (IEA), 2012.
- [34] Wang S, Liu X. China's city-level energy-related CO<sub>2</sub> emissions: Spatiotemporal patterns and driving forces. *Applied Energy*, 2017, 200: 204-214.
- [35] Wang Shaojian, Su Yongxian, Zhao Yabo. Regional inequality, spatial spillover effects and influencing factors of China's city-level energy-related carbon emissions. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(3): 414-428. [王少剑, 苏泳娴, 赵亚博. 中国城市能源消费碳排放的区域差异、空间溢出效应及影响因素. *地理学报*, 2018, 73(3): 414-428.]
- [36] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130(3): 498-509.
- [37] Wang Zhaofeng, Du Yaoyao. Spatial-temporal differences and influencing factors of carbon emission efficiency in Hunan province based on SBM-DEA model. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(5): 797-806. [王兆峰, 杜瑶瑶. 基于SBM-DEA模型湖南省碳排放效率时空差异及影响因素分析. *地理科学*, 2019, 39(5): 797-806.]
- [38] Zhou C, Shi C, Wang S, et al. Estimation of eco-efficiency and its influencing factors in Guangdong province based on Super-SBM and panel regression models. *Ecological Indicators*, 2018, 86: 67-80.
- [39] Wang J, Wang S, Li S, et al. Evaluating the energy-environment efficiency and its determinants in Guangdong using a slack-based measure with environmental undesirable outputs and panel data model. *Science of the Total Environment*, 2019, 663: 878-888.
- [40] Liu Xin, Li Shumin. An empirical analysis on the provincial energy efficiency in China based on SBM model of undesirable output. *Mathematics in Practice and Theory*, 2015, 45(2): 35-43. [刘心, 李淑敏. 基于非期望产出SBM模型的中国各省份能源效率的实证分析. *数学的实践与认识*, 2015, 45(2): 35-43.]
- [41] Zhang J, Zeng W, Wang J, et al. Regional low-carbon economy efficiency in China: Analysis based on the Super-SBM model with CO<sub>2</sub> emissions. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 163: 202-211.
- [42] Hong L, Fang K, Wei Y, et al. Regional environmental efficiency evaluation in China: Analysis based on the Super-SBM model with undesirable outputs. *Mathematical & Computer Modelling*, 2013, 58(5/6): 1018-1031.
- [43] Tone K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 2002, 143(1): 32-41.
- [44] 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.
- [45] Wei Y H D, Liao F H. Dynamics, space, and regional inequality in provincial China: A case study of Guangdong province. *Applied Geography*, 2012, 35(1/2): 71-83.
- [46] Rey S J. Spatial empirics for economic growth and convergence. *Geographical Analysis*, 2010, 33(3): 195-214.
- [47] 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.]
- [48] 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.]
- [49] World Bank. *World Development Indicators 2010*. Beijing: Chinese Financial & Economic Publishing House, 2010. [世界银行. 2010年世界发展指标. 北京: 中国财政经济出版社, 2010.]
- [50] Wang Shaojian, Huang Yongyuan. Spatial spillover effect and driving forces of carbon emission intensity at city level in China. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(6): 1131-1148. [王少剑, 黄永源. 中国城市碳排放强度的空间溢出效应及驱动因素探究. *地理学报*, 2019, 74(6): 1131-1148.]
- [51] Wei Xiahai, Yu Lingzheng. Space dependence, carbon emissions and economic growth: Reinterpret China's EKC hypothesis. *Probe*, 2011(1): 100-105. [魏下海, 余玲铮. 空间依赖、碳排放与经济增长: 重新解读中国的EKC假说. 探索, 2011(1): 100-105.]
- [52] Wang S, Liu X, Zhou C, et al. Examining the impacts of socioeconomic factors, urban form, and transportation networks on CO<sub>2</sub> emissions in China's megacities. *Applied Energy*, 2017, 185: 189-200.
- [53] Wang S, Li Q, Fang C, et al. The relationship between economic growth, energy consumption, and CO<sub>2</sub> emissions: Empirical evidence from China. *Science of The Total Environment*, 2016, 542(Part A): 360-371.

## Spatio-temporal evolution and trend prediction of urban carbon emission performance in China based on super-efficiency SBM model

WANG Shaojian<sup>1</sup>, GAO Shuang<sup>1</sup>, HUANG Yongyuan<sup>2</sup>, SHI Chenyi<sup>1</sup>

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Urbanization and Geo-simulation, School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Climate change caused by CO<sub>2</sub> emissions has become an environmental issue globally in recent years, and improving carbon emission performance is an important way to reduce carbon emissions. Although some scholars have discussed the carbon emission performance at the national scale and industry level, literature lacks studies at the city-level due to a limited availability of statistics on energy consumptions. In this study, based on China's city-level remote sensing carbon emissions from 1992 to 2013, we used the super-efficiency SBM model to measure the urban carbon emission performance, and the traditional Markov probability transfer matrix and spatial Markov probability transfer matrix are constructed to explore the spatio-temporal dynamic evolution characteristics of urban carbon emission performance in China for the first time and to predict its long-term evolution trend. The study shows that urban carbon emission performance in China presents a trend of steady increase in the fluctuation, but the overall level is still at a low level, so there is still a great improvement space in urban carbon emission performance, with huge potential for energy conservation and emission reduction. The spatial pattern of national urban carbon emission performance shows the characteristics of "high in the south and low in the north", and there is a significant difference in the level of carbon emission performance between cities. The spatial Markov probabilistic transfer matrix results show that the transfer of carbon emission performance type in Chinese cities is stable, thus it forms the "club convergence" phenomenon, and the geographical background plays an important role in the process of the transfer. From the perspective of long-term trend prediction, the future evolution of urban carbon emission performance in China is relatively optimistic. The carbon emission performance will gradually improve over time, and the distribution of carbon emission performance presents a trend of high concentration. Therefore, in the future, China should continue to strengthen research and development to improve the performance level of urban carbon emissions and achieve the national target of energy conservation and emission reduction. At the same time, neighboring cities with different geographical backgrounds should establish a sound linkage mechanism of economic cooperation to pursue coordinated development between economic growth, energy conservation and emission reduction, so as to realize low-carbon city construction and sustainable development.

**Keywords:** urban carbon emission performance; super-efficiency SBM model; spatial Markov chain; spatio-temporal evolution; trend prediction; China