

近20年来中国能源消费碳排放时空格局动态

高长春¹, 刘贤赵^{1,2*}, 李朝奎², 张 勇¹, 余光辉¹, 宿 庆³, 田艳林¹

(1. 湖南科技大学建筑与城乡规划学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学地理空间信息技术国家地方联合工程实验室, 湖南 湘潭 411201; 3. 湖南科技大学生命科学学院, 湖南 湘潭 411201)

摘 要: CO₂等温室气体引起的全球气候变暖是对人类社会可持续发展的严峻挑战。基于IPCC提供的参考方法, 在对中国大陆30个省区(不含西藏)能源消费碳排放量估算的基础上, 运用ESTDA框架, 通过ESDA、LISA时间路径、时空跃迁和标准差椭圆等方法, 从时空耦合的角度分析了1995-2014年中国能源消费碳排放时空格局动态性。结果表明: ①近20年来中国省域碳排放具有显著的空间正相关性, 碳排放空间差异呈先缩小后扩大的趋势; ②LISA时间路径分析显示, 中国大部分省区的局部空间结构具有较强的稳定性, 1995-2001年和2002-2014年2个时段相对长度都小于平均长度的省区均为18个, 大部分南方省区在空间依赖方向上的波动性呈增强趋势, 而北方大多数省区则保持相对稳定; ③出现协同运动的省区由1995-2001年的13个下降到2002-2014年的10个, 表明中国碳排放空间格局具有一定的空间整合性, 但呈减弱趋势; ④中国省域碳排放的局部空间关联模式和集聚特征具有较强的稳定性, 表现为一定的路径依赖或空间锁定特征; ⑤碳排放重心在113.739°~114.324°E、34.475°~35.036°N之间变动, 整体上有向西北方向移动的趋势。中国碳排放空间分布呈东北—西南格局, 且有逐步向正北—正南转变的趋势。中国碳减排的重点是加快发展清洁能源与提高能效并重, 优化能源结构和促进各省区产业结构转型, 制定差异化的省域碳减排政策, 建立碳交易制度。

关键词: 碳排放; 时空动态; LISA时间路径; 标准差椭圆; 时空跃迁

1 引言

气候变暖是当前可持续发展面临的巨大挑战(荣培君等, 2016), 如何减少CO₂等温室气体已成为世界各国面临的共同问题。CO₂是温室气体最重要的组成部分(秦耀辰等, 2014), 气候变暖至少有66%以上是与人活动排放的CO₂相关(王少剑等, 2015)。因此, 减缓气候变暖的关键在于减少CO₂排放(简称碳排放, 下同)。据2012年国际能源署报道, 中国已于2007年成为世界上最大的碳排放国, 并且受工业化和城市化快速推进的影响, 碳排放量还可能更高。为此, 中国政府在2009年哥本哈根联

合国气候大会上, 承诺到2020年碳排放强度在2005年的基础上下降40%~45%, 这必将使中国面临巨大的国际减排压力。省区是中国碳减排的实施区, 也是碳减排配额分配的主体。因此, 此减排目标的实现不仅需要考虑国家层面的碳排放总量, 更应该从省域视角把握碳排放空间格局的时空动态特征以及省区间碳排放的空间依赖性和异质性, 以便制定符合中国省域碳排放自身特点的差异化减排策略。

基于此背景, 不少学者从不同视角、不同尺度, 采用不同方法对中国碳排放问题进行了大量研究, 并取得了丰硕成果。如谭丹等(2008)和张雷等

收稿日期: 2015-12; 修订日期: 2016-05。

基金项目: 教育部人文社会科学项目(14YJAZH050); 湖南省社会科学基金项目(14YBA170); 湖南省研究生科研创新基金项目(CX2016B542) [Foundation: Humanities and Social Science Project of the Ministry of Education, No.14YJAZH050; Social Science Foundation of Hunan Province, No.14YBA170; Hunan Provincial Innovation Foundation for Postgraduate, No.CX2016B542]。

作者简介: 高长春(1989-), 男, 河南周口人, 硕士生, 研究方向为RS与GIS应用及区域可持续发展, E-mail: changchungao@sina.cn。

通讯作者: 刘贤赵(1970-), 男, 湖南隆回人, 教授, 硕导, 研究方向为环境变化与可持续发展, E-mail: xianzhaoliu@sina.com。

引用格式: 高长春, 刘贤赵, 李朝奎, 等. 2016. 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, 35(6): 747-757. [Gao C C, Liu X Z, Li C K, et al. 2016. Spatiotemporal dynamics of carbon emissions by energy consumption in China from 1995 to 2014[J]. Progress in Geography, 35(6): 747-757.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.06.008

(2010)分析了中国东、中、西三大区域碳排放的差异性。汪宏韬(2010)、宋杰鲲(2012)、范丹(2013)和邓吉祥等(2014)采用LMDI指数分解法对中国不同尺度的碳排放进行了分析,认为经济发展是碳排放增加的最主要驱动因素;但Liu等(2010)认为各因素对中国省域碳排放的影响方向和程度均存在差异性。李波等(2011)和张彬等(2011)利用Kaya恒等式探讨了中国碳排放的主要驱动因素,并且根据这些因素进行模糊聚类,将中国分为四大区域。此外,渠慎宁等(2010)利用STIRPAT模型对中国碳排放峰值进行了预测。

尽管上述研究对中国能源消费碳排放问题做了大量探讨并取得了重要成果,但大多是将研究单元视为相互独立且均质的个体,忽略了研究单元碳排放的空间依赖性和异质性。近年来,已有不少学者(赵雲泰等, 2011; Chuai et al, 2012; Huang et al, 2013; 程叶青等, 2013)采用探索性空间数据分析(Exploratory Spatial Data Analysis, ESDA)方法从空间相关的视角对中国碳排放的空间分布格局和差异性进行了相关研究。例如,赵雲泰等(2011)采用空间自相关分析发现,中国碳排放强度的低值聚集区主要集中在东部和南部沿海地区,高值聚集区由西北地区逐渐向黄河中游及东北地区迁移。Huang等(2013)认为中国人均碳排放具有显著的空间依赖性,且使用经济权重能够加强相邻区域间的空间依赖性。Chuai等(2012)指出中国省域尺度碳排放的空间依赖性具有“极化”现象,高一高聚集区呈扩大趋势,而低—低聚集区则相反。由于ESDA仅能从空间维度分析碳排放的空间格局及区域差异,从而在一定程度上忽视了研究单元碳排放的时间维度(Goodchild et al, 2008)。而近年Rey等(2006)提出的探索性时空数据分析(Exploratory Time-space Data Analysis, ESTDA)能有效地将时间维度整合到空间数据分析中去,并从时空交互的角度探讨碳排放的时空格局问题。但目前鲜有从时空耦合的视角对中国碳排放空间格局动态性的研究,本文以中国大陆(除西藏以外)30个省区(含自治区、直辖市)为研究对象,基于ESTDA框架,运用ESDA、LISA时间路径、时空跃迁及标准差椭圆等分析方法,从时空耦合的视角研究中国能源消费碳排放空间格局的时空动态变化,以期制定中国“共同但有区别”的省域碳减排政策提供科学依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

计算30个省区1995-2014年碳排放量所用的8种化石能源(原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油和天然气)消费数据主要来自《中国能源统计年鉴》(1996-2015年)。其中,海南2002年和宁夏2000-2002年的化石能源消费数据统计不完整,作者根据其前后年份数据进行插值获取;重庆和四川的人口数据分别来源于《重庆统计年鉴》和《四川省统计年鉴》;矢量空间数据来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据共享平台(<http://www.geodata.cn>),原数据为县级行政区划数据,对其合并获得省级尺度数据。

2.2 研究方法

2.2.1 碳排放量计算方法

利用IPCC提供的参考方法估算中国30个省区1995-2014年化石能源消费的碳排放量,其计算公式为:

$$C = \sum_{i=1}^n E_i \times e_i \times P_i \times 44/12 \quad (1)$$

式中: C 表示某省化石能源消费产生的碳排放量; E_i 代表第 i 类化石能源的消费量; e_i 表示第 i 类化石能源的标准煤折算系数(见2013年《中国能源统计年鉴附录4》); P_i 表示第 i 类化石能源的碳排放系数,根据《IPCC2006国家温室气体清单指南》中提供的缺省值计算得到(赵敏等, 2009); n 为能源种类; $44/12$ 是 CO_2 与碳的分子量之比。由于无法获得重庆市在1997年之前的能源消费数据(因该市在1997年之前隶属于四川省),采用人口占比分配法(汪浩等, 2014)将计算获得的原四川省1995-1996年的碳排放量分摊到重庆市和四川省。

2.2.2 全局空间自相关与局部空间自相关

全局空间自相关能够反映空间关联程度的总体特征,可度量中国省域能源消费碳排放在整体上的空间依赖和差异程度,全局Moran's I 指数的表达式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

式中: n 为省区总数; y_i 和 y_j 分别为 i 省和 j 省的碳排

放量; \bar{y} 为所有省碳排放量的平均值; W_{ij} 为空间权重矩阵, 基于 Rook 邻接关系获得。考虑到海南省是一个孤立的岛屿, 在生成权重矩阵时定义其与广东、广西相邻。 I 值范围为 $[-1, 1]$, 其值为正且越趋向于 1 时, 表示碳排放呈正相关且总体空间差异越小, 也即碳排放较高(较低)的省域在空间上集聚; 其值等于 0, 则表示碳排放随机分布(不相关); 若其值为负且接近 -1, 则表示某省与其周边省区的碳排放具有显著的空间差异性。

局部 Moran's I 是全局 Moran's I 的分解形式, 可用于进一步度量某省区与其周边省区的空间关联模式及其空间差异程度, 其计算公式为:

$$I_i = Z_i \sum_j W_{ij} Z_j \quad (3)$$

式中: Z_i 和 Z_j 为 i 省和 j 省的标准化碳排放; W_{ij} 为空间权重矩阵。局部 Moran's I 与 Moran 散点图的 4 个象限均分别对应 4 种不同的局部关联类型, 即 HH(高一高)、HL(高一低)、LH(低一高)和 LL(低一低)。其中, HH(LL)表示相邻的省区间具有空间正相关关系, 即碳排放较高(或低)的省区具有空间集聚效应; HL(LH)表示相邻的省区间具有空间负相关关系, 即碳排放较高(低)的省区被碳排放较低(高)的省区所包围。

2.2.3 LISA 时间路径

LISA 时间路径是基于 LISA 坐标在 Moran 散点图中的时间迁移特性, 来刻画省域碳排放局部区域范围内的时空协同变化以及确定碳排放局部空间差异的时空动态性, 以实现省域单元碳排放值及其滞后随时间的成对移动, 从而使静态的局部空间依赖转化为动态的连续表达(Ye et al, 2013)。具体方法是, 每个省域单元的 LISA 坐标由碳排放量的标准化值及其空间滞后量组成, LISA 坐标在 2 个时间点的转移通过相应 2 个时间点的 LISA 坐标的移动来测度, 即 $[(y_{i,1}, yL_{i,1}), (y_{i,2}, yL_{i,2}), \dots, (y_{i,t}, yL_{i,t})]$ 。其中, $y_{i,t}$ 为 i 省在 t 年的碳排放量标准化值, $yL_{i,t}$ 为 i 省在 t 年的空间滞后量。LISA 时间路径的几何特征通常用相对长度(\tilde{F}_i)和弯曲度(Δ_i)表示, 二者的表达式分别为(Rey et al, 2010):

$$\tilde{F}_i = \frac{n \times \sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})}{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})} \quad (4)$$

$$\Delta_i = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})}{d(L_{i,t}, L_{i,T})} \quad (5)$$

式中: T 为年度间隔; $L_{i,t}$ 为 i 省在时间 t 的 LISA 坐标, 即 $(y_{i,t}, yL_{i,t})$; $d(L_{i,t}, L_{i,t+1})$ 为 i 省从时间 t 到 $t+1$ 的移动距离; 其他变量含义同前文。 \tilde{F}_i 大于 1, 表示 i 省具有更加动态的局部空间依赖关系和局部空间结构(或相对长度大于平均长度), 反之亦然。 Δ_i 越大, 表明 LISA 时间路径越弯曲, 即 i 省在方向上具有更加波动的碳排放增长过程和局部空间依赖演化过程, 也就是 i 省受局部结构的时空依赖效应(邻域空间效应)影响就越大; 反之, 则受到的影响越小, 碳排放稳定性越强。

2.2.4 LISA 时空跃迁

LISA 提供了从局部的视角揭示研究单元间的空间依赖性(Anselin, 1995), Rey(2001)在此基础上根据不同时段 Moran 散点图中各研究单元间局部空间关联类型的转移情况, 提出了时空跃迁(space-time transition)。

时空跃迁分为 4 种类型: 类型 I、类型 II、类型 III 和类型 IV。类型 I 表示仅省区自身发生跃迁, 包括 $HH_t \rightarrow LH_{t+1}$ 、 $HL_t \rightarrow LL_{t+1}$ 、 $LH_t \rightarrow HH_{t+1}$ 、 $LL_t \rightarrow HL_{t+1}$; 类型 II 表示仅省区的相邻省份发生跃迁, 包括 $HH_t \rightarrow HL_{t+1}$ 、 $HL_t \rightarrow HH_{t+1}$ 、 $LH_t \rightarrow LL_{t+1}$ 、 $LL_t \rightarrow LH_{t+1}$; 类型 III 表示省区自身及其相邻省份均发生跃迁, 包括 $HH_t \rightarrow LL_{t+1}$ 、 $HL_t \rightarrow LH_{t+1}$ 、 $LL_t \rightarrow HH_{t+1}$ 、 $LH_t \rightarrow HL_{t+1}$; 类型 IV 表示省区自身与相邻省份均保持稳定, 包括 $HH_t \rightarrow HH_{t+1}$ 、 $HL_t \rightarrow HL_{t+1}$ 、 $LL_t \rightarrow LL_{t+1}$ 、 $LH_t \rightarrow LH_{t+1}$ 。根据 Moran 散点时空跃迁 4 种类型的划分, Moran 散点图的空间稳定性可以表示为(Rey, 2001):

$$S_t = \frac{F_{0,t}}{n} \quad (6)$$

式中: $F_{0,t}$ 表示在 t 时间段内发生类型 IV 跃迁的省域数量; n 为所有可能发生跃迁的省区数量。 S_t 的取值范围是 $[0, 1]$, 其值越大, 表示空间稳定性越强; 反之亦然。

2.2.5 标准差椭圆分析

标准差椭圆(Standard Deviation Ellipse, SDE)是以中心、主轴(长轴)、辅轴(短轴)、方位角为基本参数, 定量描述研究对象空间分布整体特征及时空演变过程的空间统计方法(Lefever, 1926)。该方法以地理要素空间分布的重心为中心, 分别计算其在 x 方向和 y 方向上的标准差, 以确定其长轴和短轴。

SDE的空间分布范围表示地理要素空间分布的主体区域,重心表示地理要素空间分布的相对位置,方位角反映地理要素分布的主趋势方向(即正北方向沿顺时针旋转到椭圆长轴的角度),长轴和短轴分别表示地理要素在主趋势方向和次要方向上的离散程度。上述各参数的计算公式如下:

$$\text{重心: } (\bar{X}, \bar{Y}) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) \quad (7)$$

方位角:

$$\tan \theta = \left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{y}_i^2}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{y}_i^2 \right)^2 - 4 \sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{x}_i \tilde{y}_i}} \right) + \quad (8)$$

$$x \text{ 轴标准差: } \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \tilde{x}_i \cos \theta - w_i \tilde{y}_i \sin \theta)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}} \quad (9)$$

$$y \text{ 轴标准差: } \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \tilde{x}_i \sin \theta + w_i \tilde{y}_i \cos \theta)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}} \quad (10)$$

上述各式中: x_i, y_i 为研究区域各单元的中心坐标; w_i 为研究单元的权重; \bar{X}, \bar{Y} 为重心坐标; θ 为椭圆方位角,即正北方向顺时针旋转到椭圆长轴所形成的夹角; \tilde{x}_i, \tilde{y}_i 分别为各研究单元中心坐标到重心的坐标偏差; σ_x, σ_y 分别为沿 x 轴和 y 轴的标准差。

3 结果与分析

3.1 碳排放格局总体变化

图1显示,1995-2014年全局 Moran's I 指数均为正值,且均通过了 $P=0.05$ 的显著性检验,表明中国省域能源消费碳排放呈显著的空间正相关关系,即碳排放较高的省区和较低的省区在空间上均趋于相邻。从全局 Moran's I 指数随时间的变化趋势看,1995-2001年其值波动上升,到2001年达到最大值(0.2615),说明中国省域碳排放的空间趋同性不断增强;而在2002-2014年则波动下降,表明中国省域能源消费碳排放的空间差异呈逐步扩大的趋势。

3.2 LISA 时间路径变化

根据全局 Moran's I 指数的时间变化特征,选取1995-2001和2002-2014年2个时段进行LISA时间路径分析。

3.2.1 几何特征

由于LISA时间路径的几何特征可用于揭示中国省域碳排放局部空间结构的动态性及空间依赖方向上的波动性,本文采用自然断点法和手动分类法将1995-2001年LISA时间路径相对长度从低到高划分成4个等级,即低相对长度(0.361~0.622)、中等相对长度(0.623~1.000)、较高相对长度(1.001~1.297)和高相对长度(1.298~2.913);对2002-2014年LISA时间路径相对长度采用手动分类法^①进行分级,且分类等级和区间范围与1995-2001年保持一致。图2a显示,1995-2001年,山东、辽宁和湖南为高相对长度省份,说明其局部空间结构具有强烈的动态性;较高相对长度省区包括北京、黑龙江、吉

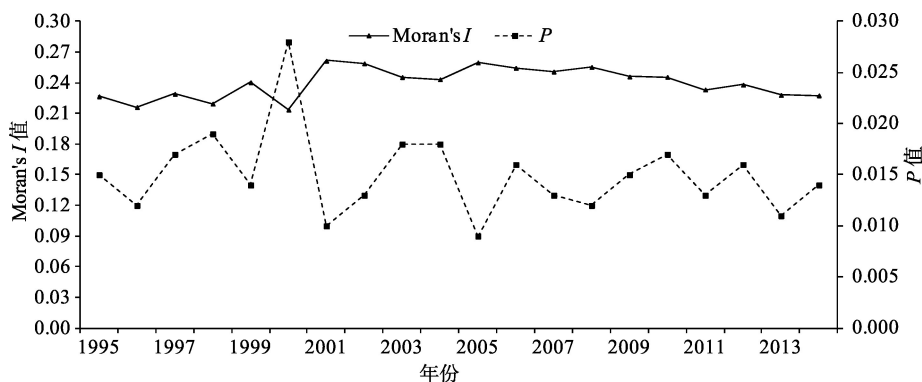


图1 1995-2014年中国碳排放全局 Moran's I 指数

Fig.1 Global Moran's I of China's carbon emission, 1995-2014

①2个时段所用分类方法不同,是因为2个时段相对长度范围不一样,导致采用相同分类方法得出的4个等级区间范围不一致,不具有可比性。因此,为使2个时段的4个等级具有可比性,对第2个时间段采用手动分类法,使得4个等级的区间范围与第1个时段保持一致。

林、山西、江苏、四川、重庆、湖北和广东,表明上述省区的局部空间结构具有较强的动态性;新疆、甘肃、青海、安徽、江西和广西等6省区为低相对长度,说明其局部空间结构的稳定性最强;其他省区则为中等相对长度,表明属于其具有较稳定的局部空间结构。而在2002-2014年,高相对长度的省区由1995-2001年的3个增加到了8个(图2b),说明强波动性的省区数量呈上升趋势,且这些省区主要分布在东北地区及华北平原,原因在于“振兴东北”和“中原崛起”战略的实施,为其的经济发展提供了政策保障,但同时带来很多环境问题。其中,黑龙江和吉林为东北老工业基地,以高碳排放的第二产业为主,受“振兴东北”战略的影响,碳排放量快速增加;河南经济发展较快,GDP总量已跃居第五位,碳排放量也于2014年跃居到第五位;山西和内蒙古的经济发展则高度依赖于煤炭资源。因此,由于政策原因导致上述省区的局部空间结构具有强烈的动态性。较高相对长度的省区数量呈下降趋势,原因在于受政策的影响,黑龙江、吉林和山西等省区由较高相对长度变为高相对长度。中等相对长度的省区数量虽然没有改变,但逐步向东南沿海迁移,说明东南沿海省区的局部空间结构趋于相对稳定,主要是因为东南沿海省区有着相似的碳排放水平。2个时段相对长度小于平均长度的省区均为18个,占全部省区比例的60%,说明整体上中国省域碳排放的局部空间结构具有较强的稳定性。

同样,采用自然断点法将1995-2001年LISA时间路径弯曲度从低到高划分为4个等级,低弯曲度(1.163~2.226)、中等弯曲度(2.226~3.607)、较高弯曲

度(3.608~6.575)和高弯曲度(6.576~31.121);对2002-2014年LISA时间路径弯曲度则采用手动分类法进行分级,且分类等级和区间范围与1995-2001年相一致。由图3知,1995-2001年,山东为高弯曲度省份,表明山东省具有最强波动性的碳排放增长和局部空间依赖变化过程;较高弯曲度的省区包括辽宁、湖北、广西及新疆,其碳排放增长和局部空间依赖变化波动性较强;东南沿海省区及西部地区的大部分省区均属于低弯曲度省区,具有波动性较弱的碳排放增长和局部空间依赖变化过程;其他省区为中等弯曲度。而在2002-2014年,安徽省取代1995-2001年的山东省成为弯曲度最大省份,云南省也为高弯曲度,在空间依赖方向上具有最强波动性的省区呈增加趋势;较高弯曲度的省区从1995-2001年的4个增加到了6个,分别为吉林、河南、浙江、重庆、湖南和贵州;中等弯曲度省区数量基本保持不变,而低弯曲度省区数量呈现下降趋势,即具有波动性较弱的碳排放增长和局部空间依赖变化过程的省区量在减少。从空间分布上看,中国南部地区绝大部分省区的弯曲度呈增加趋势,即在空间依赖方向上的波动性呈增强趋势,而中国北部的多数省区弯曲度等级处于相对稳定的态势,即在空间依赖方向上的波动性趋于相对稳定。

3.2.2 移动方向

LISA移动方向可以分析,中国碳排放空间格局变化空间整合性。根据各省区在2个时间点的LISA坐标计算可得到LISA移动方向,基于平均水平将其分成4种类型: $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 方向(高一高态势),表示省区自身及其相邻省区的碳排放均保持高增长

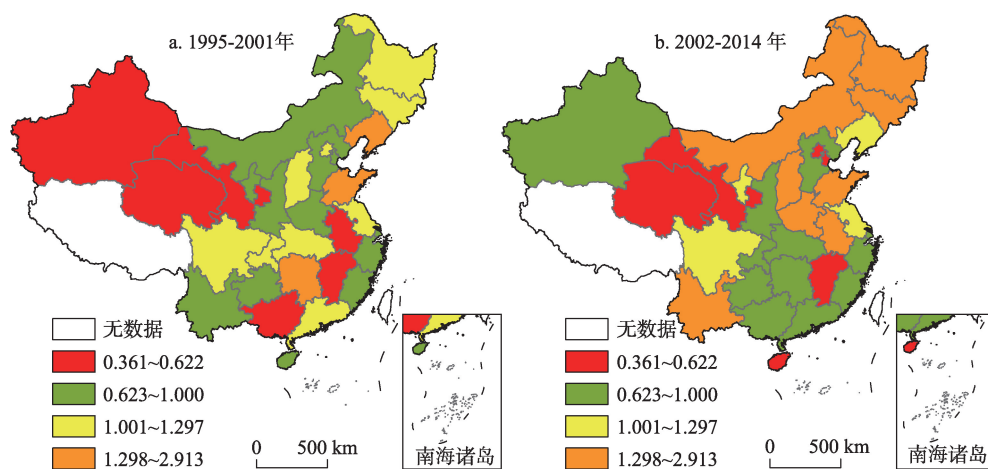


图2 LISA时间路径相对长度的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of relative length of the LISA time path

趋势;90°~180°方向(低—高态势),表示省区自身碳排放呈低增长趋势,而其相邻省区呈高增长趋势;180°~270°方向表示(低—低态势),即省区自身及其相邻省区的碳排放均呈低增长趋势;270°~360°方向(高—低态势),表示省区自身碳排放呈高增长趋势而其相邻省区则呈低增长态势。其中,0°~90°方向为协同高增长趋势,180°~270°方向是协同低增长趋势,这两种协同增长趋势表示省区及其相邻省区呈整合的空间动态性。

由图4知,1995-2001年,协同高增长的省区共有8个,分别为北京、上海、河北、山西、河南、内蒙古、福建和海南,呈协同高增长趋势;协同低增长的省区共有5个,分别为吉林、湖北、四川、甘肃和广西,呈协同低增长趋势。表明在1995-2001年时间段中国碳排放空间格局演化具有较弱的空间整合性。而在2002-2014年,协同高增长的省区仅为4

个,且均分布在西北内陆,原因是随着2000年西部大开发战略的实施,西北内陆省区的经济发展较快,化石能源消费量快速增加,导致碳排放增加较快;协同低增长的省区为6个,分别为北京、天津、重庆、河南、湖南和贵州。2个时段对比得出:协同高增长和协同低增长的省区从1995-2001年的13个下降到2002-2014年的10个,表明中国碳排放空间格局变化具有一定的空间整合性,且这种空间整合性呈减弱趋势。

3.3 LISA时空跃迁分析

上述LISA时间路径分析能够揭示各省域LISA坐标的变化大小及变化趋势,但无法反映Moran散点图中局部空间关联类型的相互转移。因此,作者进一步采用时空跃迁分析法探讨中国省域碳排放局部空间关联类型的转移特征。

由表1知,最普遍的跃迁是类型Ⅳ,发生该类型

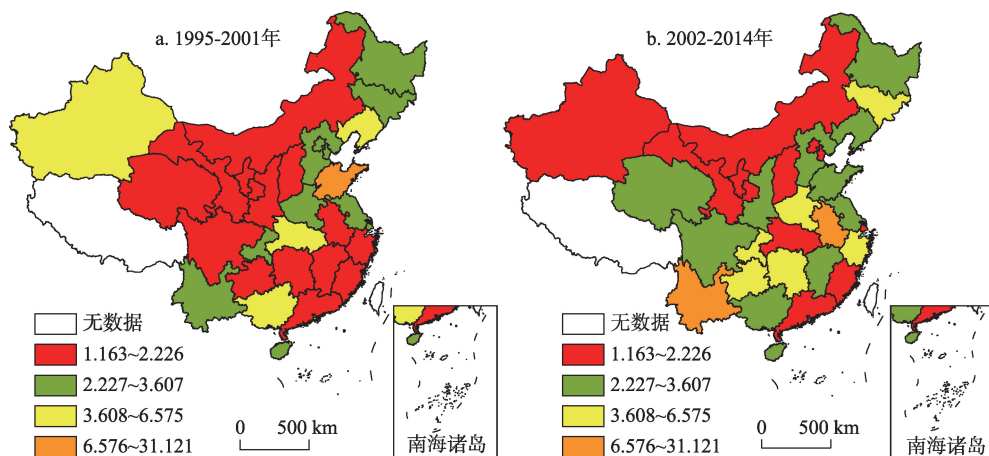


图3 LISA时间路径弯曲度的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of tortuosity of the LISA time path

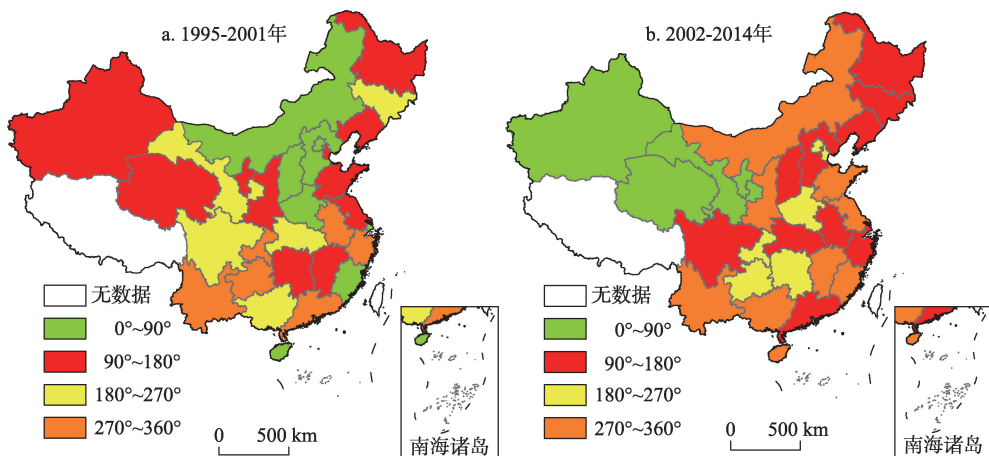


图4 LISA时间路径移动方向的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of movement direction of the LISA time path

跃迁的省区占全部省区的83.3%,即Moran散点图的空间稳定性为0.833,而类型Ⅲ发生跃迁的省域为0。此外,在1995-2014年2个时段中,仅省区自身或仅相邻省区发生跃迁(类型Ⅰ、类型Ⅱ)的省区数均为5个,且多数分布在中西部地区,说明东部省区碳排放局部空间关联结构的稳定性高于中西部省区。这表明中国省域碳排放的局部空间关联结构存在较强的稳定性,且东部省区高于中西部省区,说明省域碳排放时空跃迁具有一定的路径依赖或空间锁定特征。

3.4 标准差椭圆分析结果

为进一步揭示中国碳排放重心的迁移变化以及高碳排放省区的空间分布,采用SDE法进行互补分析。由表2和图5知,近20年来中国省域碳排放重心分布在113.739°~114.324°E,34.475°~35.036°N之间,并位于中国几何中心(103.50°E,36°N)的东南方向,表明中国东部和南部省域碳排放量较高。造成东部省域碳排放较高的原因主要有:一是东部省域经济总量大,占全国经济总量的一半以上,经济高速发展的同时伴随着化石能源的大量消耗;二是从产业结构上看,整体上东部省域第二产业比重超

过51%(刘占成等,2010),而第二产业属于高耗能、高碳排放产业。南部省域碳排放较高主要因为中国经济发达的省区绝大部分分布在南部,而经济发展是碳排放增加的最主要原因(许士春等,2012)。因此,无论从碳排放总量还是从经济实力上看,在制定减排政策时东部和南部省区都应承担更多的减排责任。从重心移动轨迹看,中国省域碳排放重心总体上向西北方向移动,近20年来移动距离为71.111 km,其中,1995-1997年,重心向西北方向迁移了14.878 km;1997-2000年,重心向东南方向迁移了19.249 km;2000-2003年,重心向西南方向移动了41.525 km;2003-2006年,重心向东北方向迁移21.759 km;2006-2012年,重心向西北方向迁移56.459 km;2012-2014年,重心向西北方向迁移了26.183 km。

从方位角 θ 的变化看,近20年来 θ 整体上呈波动减小的趋势,首先从1995年的31.217°增加到1997年的31.622°,然后持续减小到2012年的23.081°,最后增加到2014年的24.076°,表明近20年来中国碳排放的空间分布呈现出东北—西南格局,但这种格局整体上呈弱化的态势,逐步向正北—正南方向

表1 Moran散点图的时空跃迁矩阵

Tab.1 Spatiotemporal transition matrices of Moran scatterplots

时段		HH	LH	LL	HL
1995-2001年	HH	Ⅳ(冀晋辽苏浙皖鲁豫)	Ⅰ(吉)	Ⅲ	Ⅱ
	LH	Ⅰ(蒙沪)	Ⅳ(京津闽赣琼陕)	Ⅱ(渝)	Ⅲ
	LL	Ⅲ	Ⅱ	Ⅳ(桂贵滇甘青宁新)	Ⅰ
	HL	Ⅱ	Ⅲ	Ⅰ(湘)	Ⅳ(黑鄂粤川)
2002-2014年	HH	Ⅳ(冀晋蒙辽苏皖鲁豫)	Ⅰ	Ⅲ	Ⅱ
	LH	Ⅰ	Ⅳ(京津吉沪闽赣琼陕)	Ⅱ	Ⅲ
	LL	Ⅲ	Ⅱ(黑宁)	Ⅳ(湘桂渝贵滇甘青)	Ⅰ(新)
	HL	Ⅱ(浙)	Ⅲ	Ⅰ(川)	Ⅳ(鄂粤)

表2 中国省域碳排放标准差椭圆参数变化

Tab.2 Change of standard deviation ellipse model parameters of provinces in China

年份	重心坐标		重心迁移			长轴/km	短轴/km	方位角/°
	经度/°	纬度/°	方向	距离/km	速率/(km/a)			
1995	114.326	34.781				1115.813	828.860	31.217
1997	114.201	34.829	西北	14.878	7.439	1125.253	842.417	31.662
2000	114.324	34.707	东南	19.249	6.416	1106.473	852.441	28.085
2003	114.031	34.475	西南	41.525	13.842	1064.669	841.258	25.710
2006	114.226	34.493	东北	21.759	7.253	1072.872	822.912	25.655
2009	114.018	34.600	西北	25.990	8.663	1064.949	851.448	25.156
2012	113.940	34.913	西北	35.841	11.947	1068.673	898.957	23.081
2014	113.739	35.036	西北	26.183	13.092	1061.124	965.540	24.076

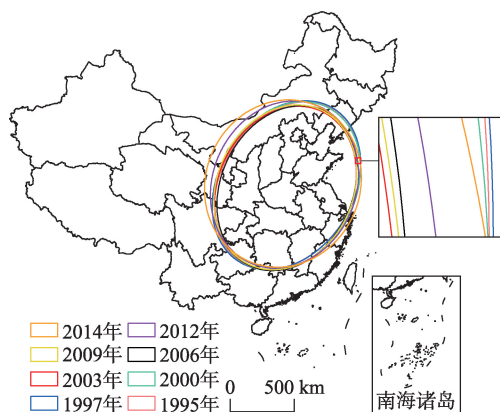


图5 中国省域碳排放标准差椭圆分布

Fig.5 Carbon emissions standard deviation ellipses of provinces in China

转变。

从主轴方向上看,主半轴标准差由1995年的1115.813 km降到2014年的1061.124 km,表明近20年中国省域碳排在主要方向上出现极化现象。其中1995-2006年主半轴标准差由1115.813 km降到1072.872 km,表明该时段省域碳排在东北—西南方向上出现极化现象,主要原因在于西部大开发战略和振兴东北老工业基地战略实施之前,西南地区省域经济基础薄弱,东北三省经济增长缓慢,而经济发展是碳排放增加的最主要因素(许士春等, 2012),由此导致碳排放差距也在增大;虽然2000年西部大开发战略和2003年振兴东北老工业基地战略的实施使上述省区经济有了较快的发展,但与其他省区的相对差距仍处于扩大阶段,进而导致碳排放差距也在扩大;2009-2012年主半轴标准差由1064.949 km升到1068.673 km,表明该时段省域碳排在东北—西南方向上出现分散,主要是由于经西部大开发战略和振兴东北老工业基地战略几年的实施,西南地区省域经济基础薄弱的状况有了很大改善,东北地区经济也取得较快的发展,能源消费量持续增加,导致碳排放量增速加快。另外,受2008年经济危机的影响,东部各省域经济发展速度有所放缓,能源消费碳排放的增速也呈下降趋势。从辅轴方向上看,辅半轴标准差由1995年的828.86 km升到2014年的965.540 km,表明近20年中国省域碳排在次要方向上出现极化。其中1997-2006年辅半轴标准差由842.417 km降到822.912 km,表明该时段省域碳排在西北—东南方向上出现极化,原因在于江苏、安徽等省域碳排

放量大幅增加,而甘肃、青海等省域的碳排放量增长缓慢;2009-2014年辅半轴标准差由851.448 km上升到965.540 km,表明该时段省域碳排在西北—东南方向上出现分散,主要是由于西北部新疆、内蒙古和陕西等省域碳排放量的快速增加所致。2009-2014年新疆、内蒙古的经济增长基本上仍以“高投入、高消耗、高排放”的粗放式增长为主,而且高度依赖于煤炭的消耗。据统计,新疆煤炭消费比重在65%以上(新疆维吾尔自治区统计局, 2015),内蒙古甚至高达80%以上(内蒙古自治区统计局, 2015),而煤炭又属于高碳排放能源,导致新疆和内蒙古的碳排放量快速增长。因此,在新疆和内蒙古积极调整能源消费结构,推进节能减排政策,发展低碳经济具有重要意义。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 1995-2014年全球Moran's I 指数均为正值,并随时间呈先升后降的趋势,且均通过5%显著性检验,表明中国省域碳排放具有显著的空间正相关关系,即碳排放较高或较低的省区在空间上均趋于相邻。

(2) LISA时间路径的相对长度分析表明,局部空间结构具有强波动性和强稳定性的省区数量均呈下降趋势。从整体上看,1995-2001年和2002-2014年2个时段相对长度小于平均长度的省区均为18个,说明大多数省区的局部空间结构具有较强的稳定性。弯曲度分析表明大部分南方省区的弯曲度呈增加趋势,即在空间依赖方向上的波动性呈增强趋势;而北方大多数省区的弯曲度等级处于相对稳定的态势,即在空间依赖方向上的波动性基本保持相对稳定。

(3) LISA时间路径的移动方向类型中,中国碳排放出现协同运动的省区由1995-2001年的13个下降到2002-2014年的10个,表明中国碳排放空间格局变化具有一定的空间整合性,但呈减弱趋势。1997-2001年,协同高增长的省区分别为北京、上海、河北、山西、河南、内蒙古、福建和海南,协同低增长的省区分别为吉林、湖北、四川、甘肃和广西。而2002-2014年,协同高增长的省区分布在西北内陆,协同低增长的省区分别为北京、天津、重庆、河南、湖南和贵州。

(4) 从 Moran 散点的时空跃迁分析看, 在 1995-2001 年和 2002-2014 年 2 个时段中, 类型Ⅳ跃迁的省区占全部省区的 83.3%, 即 Moran 散点图的空间稳定性均为 0.833, 且 2 个时段中均无发生类型Ⅲ跃迁的省区, 表明中国省域碳排放的局部空间关联模式存在较强的稳定性, 省区要改变自身的相对位置非常困难, 即具有一定的路径依赖或空间锁定特征。

(5) 近 20 年来, 中国碳排放重心在 $113.739^{\circ}\sim 114.324^{\circ}\text{E}$, $34.475^{\circ}\sim 35.036^{\circ}\text{N}$ 之间变动, 各年份碳排放重心均位于中国几何中心的东南方向, 但整体上碳排放重心有向西北方向移动的趋势, 表明虽然东部和南部省区的碳排放较高, 但近年来西北地区省域碳排放增速高于其他区域的省区。近 20 年, 中国碳排放的标准差椭圆总体上变化幅度不大, 基本上覆盖了绝大部分碳排放较高的省区, 省域碳排放的空间分布呈现出东北—西南格局, 且有逐步向正北—正南方向转变的态势。中国碳排放重心位于其几何重心的东南方向, 表明东部和南部沿海碳排放比重大, 在制定减排政策时应承担更多的减排责任。中国碳排放重心向西北方向移动与西部大开发战略的实施有密切相关。新疆、内蒙古、陕西等省域经济发展高度依赖煤炭资源, 而煤炭又属于高碳排放能源, 导致经济快速发展的同时释放大量的温室气体。

4.2 讨论

本文从时空融合的角度研究中国碳排放问题, 以期制定“共同但有区别”的碳减排政策提供可借鉴的依据。对于西部和中部省区应以优化产业结构为核心, 推广清洁能源, 逐步降低煤炭消费比重, 降低能源强度和优化能源消费结构, 促进经济增长方式的实质性转变; 对于东部省区应发展新能源、高新技术及高端服务业, 发展循环经济, 走低碳、节约型可持续发展之路。但是, 本文在碳排放的空间自相关分析中, 主要参考已有研究成果, 采用 Rook 邻接关系确定空间权重, 未考虑经济、贸易、科技水平和资本流动等因素对空间权重的影响。未来, 可以尝试使用经济权重、K 最邻近等多种方法确定空间权重矩阵, 用不同空间权重分析碳排放空间依赖格局变化, 以便相互验证研究结论的稳定性和科学性。此外, 受数据可获得性的限制, 本文只能以省区为研究对象进行分析, 空间尺度较大, 从而忽略了小尺度导致碳排放研究出现的波动

性和差异性。在未来的碳排放研究中关注尺度效应, 进行多尺度对比研究, 从而发现隐藏在尺度差异中的碳排放空间格局特征, 也是课题组今后主要的研究方向。

参考文献(References)

- 程叶青, 王哲野, 张守志, 等. 2013. 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, 68(10): 1418-1431. [Cheng Y Q, Wang Z Y, Zhang S Z, et al. 2013. Spatial econometric analysis of carbon emission intensity and its driving factors from energy consumption in China[J]. Acta Geographica Sinica, 68(10): 1418-1431.]
- 邓吉祥, 刘晓, 王铮. 2014. 中国碳排放的区域差异及演变特征分析与因素分解[J]. 自然资源学报, 29(2): 189-200. [Deng J X, Liu X, Wang Z. 2014. Characteristics analysis and factor decomposition based on the regional difference changes in China's CO₂ emission[J]. Journal of Natural Resources, 29(2): 189-200.]
- 范丹. 2013. 中国能源消费碳排放变化的驱动因素研究: 基于 LMDI-PDA 分解法[J]. 中国环境科学, 33(9): 1705-1713. [Fan D. 2013. Driving factors of carbon emissions from energy consumption in China: Based on LMDI-PDA method[J]. China Environmental Science, 33(9): 1705-1713.]
- 李波, 张俊飏, 李海鹏. 2011. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J]. 中国人口·资源与环境, 21(8): 80-86. [Li B, Zhang J B, Li H P. 2011. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China[J]. China Population, Resources and Environment, 21(8): 80-86.]
- 刘占成, 王安建, 于汶加, 等. 2010. 中国区域碳排放研究[J]. 地球学报, 31(5): 727-732. [Liu Z C, Wang A J, Yu W J, et al. 2010. Research on regional carbon emissions in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 31(5): 727-732.]
- 内蒙古自治区统计局. 2015. 内蒙古统计年鉴 2015[M]. 北京: 中国统计出版社. [Inner Mongolia Autonomous Region Bureau of Statistics. 2015. Inner Mongolia statistical yearbook 2015[M]. Beijing, China: China Statistics Press.]
- 秦耀辰, 荣培君, 杨群涛, 等. 2014. 城市化对碳排放影响研究进展[J]. 地理科学进展, 33(11): 1526-1534. [Qin Y C, Rong P J, Yang Q T, et al. 2014. Research progress of impact of urbanization on carbon emissions[J]. Progress in Geography, 33(11): 1526-1534.]
- 渠慎宁, 郭朝先. 2010. 基于 STIRPAT 模型的中国碳排放峰

- 值预测研究[J]. 中国人口·资源与环境, 20(12): 10-15.
- [Qu S N, Guo C X. 2010. Forecast of China's carbon emissions based on STIRPAT model[J]. *China Population, Resources and Environment*, 20(12): 10-15.]
- 荣培君, 杨群涛, 秦耀辰. 2016. 中国省域能源消耗碳排放安全评价[J]. 地理科学进展, 35(4): 487-495. [Rong P J, Yang Q T, Qin Y C. 2016. Energy-related carbon emission security at the provincial level in China[J]. *Progress in Geography*, 35(4): 487-495.]
- 宋杰鲲. 2012. 基于LMDI的山东省能源消费碳排放因素分解[J]. 资源科学, 34(1): 35-41. [Song J K. 2012. Factor decomposition of carbon emissions from energy consumption of Shandong Province based on LMDI[J]. *Resources Science*, 34(1): 35-41.]
- 谭丹, 黄贤金. 2008. 我国东、中、西部地区经济发展与碳排放的关联分析及比较[J]. 中国人口·资源与环境, 18(3): 54-57. [Tan D, Huang X J. 2008. Correlation analysis and comparison of the economic development and carbon emissions in the eastern, central and western part of China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 18 (3): 54-57.]
- 汪浩, 陈操操, 潘涛, 等. 2014. 县域尺度的京津冀都市圈CO₂排放时空演变特征[J]. 环境科学, 35(1): 385-393. [Wang H, Chen C C, Pan T, et al. 2014. County scale characteristics of CO₂ emission's spatial-temporal evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region[J]. *Environmental Science*, 35(1): 385-393.]
- 汪宏韬. 2010. 基于LMDI的上海市能源消费碳排放实证分析[J]. 中国人口·资源与环境, 20(5): 143-146. [Wang H T. 2010. Logarithmic mean divisia index model and the carbon emission mechanism of energy sector in Shanghai [J]. *China Population, Resources and Environment*, 20 (5): 143-146.]
- 王少剑, 刘艳艳, 方创琳. 2015. 能源消费CO₂排放研究综述[J]. 地理科学进展, 34(2): 151-164. [Wang S J, Liu Y Y, Fang C L. 2015. Review of energy-related CO₂ emission in response to climate change[J]. *Progress in Geography*, 34(2): 151-164.]
- 新疆维吾尔自治区统计局. 2015. 新疆统计年鉴2015[M]. 北京: 中国统计出版社. [Statistic Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region. 2015. *Xinjiang statistical yearbook 2015*[M]. Beijing, China: China Statistics Press.]
- 许士春, 习蓉, 何正霞. 2012. 中国能源消耗碳排放的影响因素分析及政策启示[J]. 资源科学, 34(1): 2-12. [Xu S C, Xi R, He Z X. 2012. Influential factors and policy implications of carbon emissions for energy consumption in China[J]. *Resources Science*, 34(1): 2-12.]
- 张彬, 姚娜, 刘学敏. 2011. 基于模糊聚类的中国分省碳排放初步研究[J]. 中国人口·资源与环境, 21(1): 53-56. [Zhang B, Yao N, Liu X M. 2011. Preliminary fuzzy clustering analysis on carbon emission in different provinces of China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 21(1): 53-56.]
- 张雷, 黄国浙, 李艳梅, 等. 2010. 中国碳排放区域格局变化与减排途径分析[J]. 资源科学, 32(2): 211-217. [Zhang L, Huang Y X, Li Y M, et al. 2010. An investigation on spatial changing pattern of CO₂ emissions in China[J]. *Resources Science*, 32(2): 211-217.]
- 赵敏, 张卫国, 俞立中. 2009. 上海市能源消费碳排放分析[J]. 环境科学研究, 22(8): 984-989. [Zhao M, Zhang W G, Yu L Z. 2009. Carbon emissions from energy consumption in Shanghai City[J]. *Research of Environmental Sciences*, 22(8): 984-989.]
- 赵云泰, 黄贤金, 钟太洋, 等. 2011. 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, 32(11): 3145-3152. [Zhao Y T, Huang X J, Zhong T Y, et al. 2011. Spatial pattern evolution of carbon emission intensity from energy consumption in China[J]. *Environmental Science*, 32(11): 3145-3152.]
- Anselin L. 1995. Local indicators of spatial association: LISA [J]. *Geographical Analysis*, 27(2): 93-115.
- Chuai X W, Huang X J, Wang W J, et al. 2012. Spatial econometric analysis of carbon emissions from energy consumption in China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 22(4): 630-642.
- Goodchild M F, Glennon A. 2008. Representation and computation of geographic dynamics[C]//Hornsby K S, Yuan M. Understanding dynamics of geographic domains. Boca Raton, FL: CRC Press: 13-30.
- Huang B, Meng L N. 2013. Convergence of per capita carbon dioxide emissions in urban China: A spatio-temporal perspective[J]. *Applied Geography*, 40: 21-29.
- Lefever D W. 1926. Measuring geographic concentration by means of the standard deviational ellipse[J]. *American Journal of Sociology*, 32(1): 88-94.
- Liu L C, Wang J N, Wu G, et al. 2010. China's regional carbon emissions change over 1997-2007[J]. *International Journal of Energy and Environment*, 1(1): 161-176.
- Rey S J. 2001. Spatial empirics for economic growth and convergence[J]. *Geographical Analysis*, 33(3): 195-214.
- Rey S J, Janikas M V. 2006. STARS: Space-time analysis of regional systems[J]. *Geographical Analysis*, 38(1): 67-86.
- Rey S J, Ye X Y. 2010. Comparative spatial dynamics of re-

gional systems[C]//Páez A, Gallo J, Buliung R N, et al. Progress in spatial analysis: Methods and applications. Berlin & Heidelberg, Germany: Springer: 441-463.

Ye X Y, Rey S J. 2013. A framework for exploratory space-time analysis of economic data[J]. The Annals of Regional Science, 50(1): 315-339.

Spatiotemporal dynamics of carbon emissions by energy consumption in China from 1995 to 2014

GAO Changchun¹, LIU Xianzhao^{1,2*}, LI Chaokui², ZHANG Yong¹, YU Guanghui¹,
SU Qing³, TIAN Yanlin¹

(1. College of Architecture and Urban Planning, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China; 2. National-Local Joint Engineering Laboratory of Geo-Spatial Information Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China; 3. College of Life Science, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China)

Abstract: Global warming due to greenhouse gases (such as CO₂) emissions posts serious challenges to the sustainable development of the human society. Based on the reference method provided by the Intergovernmental Panel on Climate Change, this study calculated the CO₂ emissions of energy consumption in 30 provinces of China (excluding Tibet) from 1995 to 2014. Using exploratory spatial data analysis (ESDA), LISA time path, spatiotemporal transitions, and standard deviation ellipse analysis methods, the authors analyzed the spatiotemporal dynamics of carbon emissions of energy consumption. The results show that: (1) there was a significant positive spatial correlation of carbon emissions of energy consumption in China's provinces during 1995-2014. The inter-provincial carbon emissions differences first decreased then increased; (2) by means of LISA time path analysis, this study found that the majority of the Chinese provinces had a stable spatial structure of carbon emissions. Eighteen provinces had shorter than average time path lengths in 1995-2001 and 2002-2014. The majority of the southern provinces showed a fluctuating spatial dependence with increasing amplitude over time, while most of the northern provinces showed a relatively stable trend; (3) according to the directional Moran scatter plot, the number of provinces that showed the same trend decreased from 13 in 1995-2001 to 10 in 2002-2014, indicating that the spatial coherence of carbon emissions change at the provincial level had weakened; (4) spatial correlation patterns and clustering of carbon emissions by energy consumption at the provincial level were relatively stable and showed certain degree of path-dependence or lock-in character; (5) carbon emissions gravity center was between 113.739°~114.324° E, 34.475°~35.036° N and was moving to the northwest. The spatial distribution of provincial emissions presented a northeast-southwest pattern, and had the tendency of shifting to a north-south pattern. The focus of carbon emission reduction in China is to accelerate the development of clean energy, improve energy efficiency, promote the optimization and upgrading of energy and industrial structures in all provinces, make differentiated carbon emission reduction policies for different provinces, and establish carbon trading market.

Key words: carbon emissions; spatiotemporal dynamics; LISA time path; standard deviation ellipse; spatiotemporal transitions