

# 基于夜间灯光数据的四川省碳排放时空差异性分析

王成霞

四川建筑职业技术学院

DOI:10.12238/eep.v8i5.2701

**[摘要]** 能源消耗碳排放是碳排放的重要组成部分,对生态环境保护具有重要意义。本文基于夜间灯光遥感影像数据,构建市级灯光指数并拟合四川省2000–2019年能源消耗碳排放量,结合全局Moran's I指数、LISA时间路径及标准差椭圆等方法,分析其时空分异特征。结果表明:四川省能源消耗碳排放量整体呈波动上升趋势;局部空间结构稳定性较强且空间整合性增强,但局部空间关联结构稳定性较弱(空间稳定性0.09);碳排放重心向东北方向移动,方位角不断增大,形成东北—西南向空间格局。本研究结果可为四川省制定差异化的碳排放管控策略提供科学依据。

**[关键词]** 四川省; 夜间灯光数据; 能源消耗; 碳排放; 时空差异性

中图分类号: U260.15+3 文献标识码: A

## Analysis of Spatiotemporal Differences in Carbon Emissions in Sichuan Province based on Nighttime Lighting Data

Chengxia Wang

Sichuan College of Architecture Technology

**[Abstract]** Carbon emissions from energy consumption are a crucial part of total carbon emissions and play a significant role in ecological and environmental protection. This paper utilizes nighttime light remote sensing image data to establish a municipal light index and estimate the energy consumption carbon emissions in Sichuan Province from 2000 to 2019. By applying methods including the global Moran's I index, LISA time path, and standard deviation ellipse, it analyzes the spatiotemporal differentiation characteristics of these emissions. The results indicate that the overall energy consumption carbon emissions in Sichuan Province have shown a fluctuating upward trend. The local spatial structure exhibits strong stability and improved spatial integration, yet the stability of the local spatial association structure is relatively weak (with a spatial stability of 0.09). The center of gravity of carbon emissions has shifted towards the northeast, and the azimuth angle has been continuously increasing, resulting in a northeast – southwest spatial pattern. The findings of this study can offer a scientific foundation for formulating differentiated carbon emission control strategies in Sichuan Province.

**[Key words]** Sichuan Province; Nighttime lighting data; energy consumption; Carbon emissions; Spatiotemporal differences

### 引言

中国地域广袤,不同地区在经济、社会发展、能源消耗结构及能耗统计数据 and 方式上存在较大差异,致使各省份能耗碳排放量精确估算困难<sup>[1]</sup>,故采用科学精确方法测量分析各地区能源消耗碳排放时空变化十分重要。目前能耗碳排放研究主要涉及核算、时空变化特征及影响因素等方面,核算方法有物料平衡算法、模型法、IPCC温室气体清单法及改进的IPCC法<sup>[2]</sup>,时空变化特征分析主要采用自相关法、位序-规模法则、热点分析和重心迁移分析等<sup>[3]</sup>。夜间灯光影像因与人类生活活动密切相关,

被学者用于联系碳排放量研究<sup>[4]</sup>,但基于夜间灯光数据核算碳排放的研究较少且处于起步阶段,LISA时间路径和LISA空间跃迁在碳排放研究中也较少运用。因此,本文根据夜间灯光数据和能耗数据估算四川省能源碳排放,并利用LISA时间路径和LISA空间跃迁分析其空间差异性,为四川省高质量低碳发展提供参考。

### 1 数据来源与预处理

#### 1.1 研究区概况

四川省位于长江上游,总面积48.6万平方公里,下辖21个地

级市和183个县。至2020年底,有7709.3万居民、8367.5万常住人口,其中少数民族568.8万。作为国内四大电子信息生产基地和三大动力装备生产基地,其工业系统完善,能源化工、食品饮料等五大产业营业收入达4.03万亿元,并建立省级以上企业技术中心1299个、省市级及以上科技创新示范企业78个。

### 1.2 数据来源及预处理

分别用到DMSP/OLS和VIIRS V2两种夜间灯光数据。第一个灯光数据来源于国家地理数据中心;第二个灯光数据来源于NOAA资助的地球观测组。数据预处理过程<sup>[5]</sup>如图1所示。



图1 夜间灯光数据预处理过程

EVI数据是属于MODIS MOD13A3的数据产品,包含了250m分辨率的16天合成植被指数。MODIS MOD13A3中除EVI数据以外,还有其它波段的影像数据,需利用MODIS TOOL工具将EVI波段单独提取出来,并将多幅MODIS合成为一幅,再将其裁剪为所需的研究区域,并将其合成为年度EVI数据。

所需的能源消耗数据来自四川省统计局不同年份的统计年鉴。

## 2 研究方法

### 2.1 能源消耗碳排放计算模型

采用折标煤系数的方法<sup>[6]</sup>,将各能源消费总量换算成标煤消费量后,再用标煤消费量与各自碳排放系数相乘,能源种类较多且所含热量不同,为方便对能源总量方面的研究,国内规定每千克含热7000大卡作为标准煤使用,另外还将各能源换算成城市标准煤吨,即折标煤系数。

### 2.2 夜间灯光数据与碳排放量拟合

将各个年份的DN总值和各个年份通过能源消耗数据,计算得到的碳排放量进行不同的函数拟合,分别是线性函数、指数函数、对数函数和幂函数,其中指数函数与对数函数为反函数。不同模型需要根据模型拟合优度进行选择。

### 2.3 全局Moran's I指数

全局空间自相关能够展示空间关联程度的总体特征,用于评估四川各省市州能耗碳排放量的总体空间依存性和差异性。

### 2.4 LISA时间路径

LISA时间路径<sup>[6]</sup>可以描述城市区域内的碳排放量在一定的时间和空间上的协调变化,并在一定程度上刻画了区域间的碳排放量的变化情况。利用城市作为研究单元,将非动态的局部空间依赖性转变为可持续的动态表达。LISA时间路径的几何特性可分为两类,一是LISA时间路径的曲率;二是LISA时间路径的长度。

### 2.5 LISA时空跃迁

LISA时间路径可以对各城市LISA坐标的变动幅度和趋势进行分析,但不能在莫兰散点图上体现出区域间的空间关系类型之间的转换。LISA时空跃迁通过局部视角探索单元之间的空间相互依存性,并利用莫兰散点图可以分析不同时段同一地区的空间关联变化。

### 2.6 标准差椭圆

标准差椭圆(SDE)<sup>[4]</sup>,其空间分布范围代表了某一地理要素空间分布的主要区域,而重心则代表了该地理要素空间分布的相对位置,其方位角可以反映出该地理要素分布的主趋势方向(正北方向沿顺时针旋转到椭圆长轴的角度),长轴和短轴分别代表该地理要素在主趋势方向上的离散程度。

## 3 结果分析

### 3.1 能源消费碳排放量变化

2000-2019年中,四川省整体能源消耗碳排放量呈现先上升后下降,再轻微上升的趋势。其中,排放量最高的是2014年,碳排放量达到了约21444.5万吨,排放最少的在2001年,排放量约为7214.5万吨;2002-2014和2019年,碳排放量呈现正增长趋势,2000-2001、2015-2018碳排放呈现负增长。其中,增长最快的是2003年,增长率为27%,降低最快的是2015年,增长率为-15%。

### 3.2 模型拟合及精度验证

由表1可以看出在这四种函数的拟合模型中,幂函数的拟合度最高,而且线性函数、对数函数、指数函数和幂函数的拟合优度分别为0.393, 0.729, 0.767, 0.941。因此由此可以得出幂函数拟合优度最高,相关性最强。利用均方根误差RMSE和平均相对误差MRE对幂函数模拟得到的结果进行精度检验。结果显示RMSE为97.7%,MRE为6.64%。因此,幂函数模型为最佳模型,选其构建市级灯光指数。

表1 函数模型方程

函数模型	方程	R <sup>2</sup>
线性函数	$Y=11092.480+0.260X$	0.393
指数函数	$Y=19957.232 \cdot e^{-(0.000120493 \cdot X)}$	0.767
对数函数	$Y=-15879.193+3496.354 \cdot \ln(X-4655.456)$	0.729
幂指数函数	$Y=1924.15+39193.96 \cdot (1/(1+e^{-(X-8353.90+0.0000897508/2)/2584.745}))) \cdot (1-1/(1+e^{-(X-8353.90-0.0000897508/2)/72290.297}))$	0.941

### 3.3 碳排放时空差异性分析

#### 3.3.1 全局Moran's I指数

2000-2019年全局Moran's I指数均为负值,且均通过了P=0.05的显著性检验,表明四川省市域能源消耗碳排放呈显著的空间负相关关系,相邻区域间碳排放量呈现高(低)的地方在空间区域上邻近区域低(高)。根据得到的全局Moran's I指数变化趋势来看(图2),2000-2011年Moran's I指数缓慢上升,到2011年Moran's I指数达到最大值(-0.051),说明四川省市域能源消耗碳排放的空间趋同性不断增强;在2015年Moran's I指数则大幅下降,表明四川省市域能源消耗碳排放的空间差异逐

步增大；到了2019年Moran's I指数回升，说明四川省市域能源消耗碳排放量在空间上的趋同性再次增强。

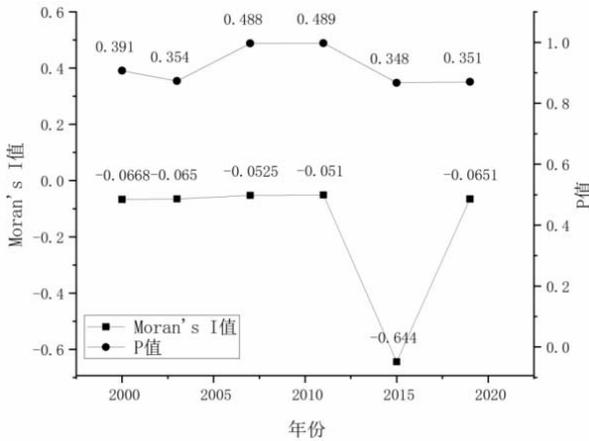


图2 2000-2019年四川省碳排放全局Moran's I指数

### 3.3.2 LISA时间路径

根据2000年至2019年的全局Moran's I指数，发现2015年存在明显的最低值，因此将该时间段分为两段，分别为2000-2015和2015-2019，并采用人工分类法<sup>[3]</sup>进行分类分级。

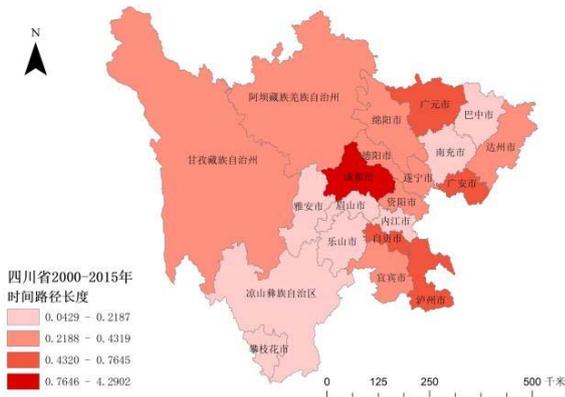


图3 2000-2015年时间路径长度分布图

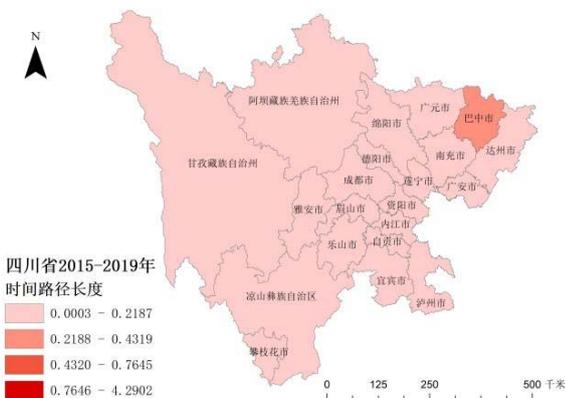


图4 2015-2019年时间路径长度分布

由图3和图4可知，2000-2015年，成都为高相对长度，局部空

间结构动态性强烈；广安、广元、自贡和泸州为较高相对长度，局部空间结构动态性较强；巴中、南充等8个城市为低相对长度，局部空间结构稳定性最强；其余城市为中等相对长度，局部空间结构较稳定。2015-2019年，高、较高及中等相对长度城市数量均下降，其中高相对长度城市为0个，中等相对长度城市仅巴中1个。2000-2015年95%的城市相对长度小于平均长度，2015-2019年该比例达100%，表明四川省市域能源消耗碳排放的局部空间结构整体稳定性较强。

据图5和图6得出，2000-2015年，成都市是唯一一高弯曲度城市，碳排放增长和局部空间依赖变化强波动性；广元、眉山、内江、自贡、泸州为较高弯曲度城市，波动性较强；巴中、达州、南充、绵阳、德阳、宜宾、凉山、攀枝花为低弯曲度城市，波动性较弱；其余为中等弯曲度城市。2015-2019年，巴中市弯曲度最大但未达高弯曲度，强波动性城市减少，较高弯曲度城市从5个减为1个，低弯曲度城市数量增加，其它弯曲度城市数量减少，这表明四川省碳排放增长较缓慢，局部空间依赖变化的城市数量有所增加。

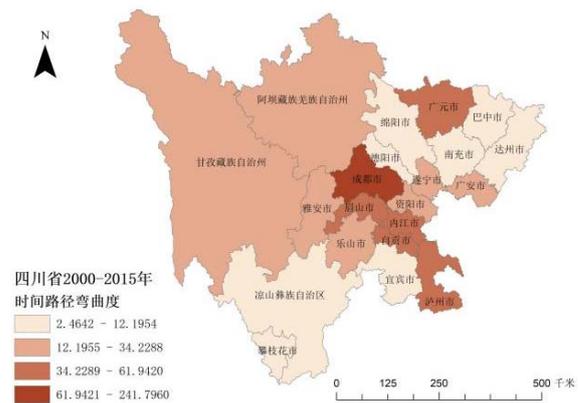


图5 2000-2015年时间路径弯曲度分布图

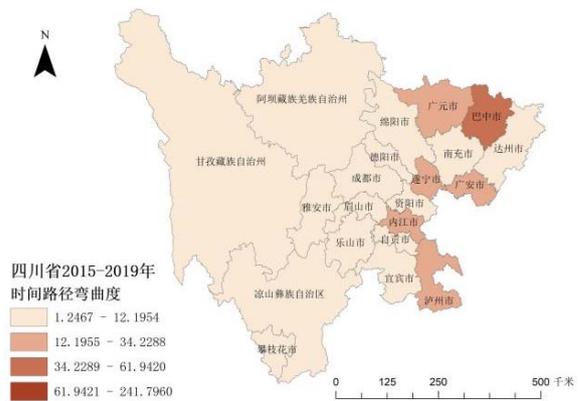


图6 2015-2019年时间路径弯曲度分布图

以正北方为基准，根据LISA移动方向分析，分析四川省碳排放空间格局变化的空间整合性。LISA移动方向可以根据各个城市在两个时段的LISA坐标计算得到，其结果可分为4种类型(如表2)。

表2 LISA移动方向趋势

方向	态势	趋势
0°~90°	高-高	城市自身及相邻城市的碳排放均呈高增长态势
90°~180°	低-高	城市自身碳排放呈低增长趋势, 而相邻城市却呈高增长趋势
180°~270°	低-低	城市自身及其相邻城市的碳排放均呈低增长趋势
270°~360°	高-低	城市自身碳排放呈高增长趋势, 而相邻城市则呈低增长态势

表3 Moran散点图的时空跃迁矩阵

时段		HH	LH	LL	HL
2000-2015年	HH	IV	I	III	II
	LH	I	IV	II	III
	LL	III	II	IV	I
	HL	II	III	I	IV
2015-2019年	HH	IV	I	III	II
	LH	I	IV (资阳)	II	III
	LL	III	II	IV (甘孜)	I
	HL	II	III	I	IV

根据LISA移动方向分析, 四川省碳排放空间格局变化的空间整合性表现为: 2000-2015年, 有6个城市为协同高增长(泸州、自贡、内江、乐山、眉山、资阳), 7个城市为协同低增长(广元、绵阳、德阳、阿坝、甘孜、凉山、攀枝花), 此时期市域能源消耗碳排放空间格局具备较强整合性; 2015-2019年, 协同高增长城市增至10个, 协同低增长城市减至4个, 该阶段空间格局变化呈现一定整合性, 并呈增长趋势。

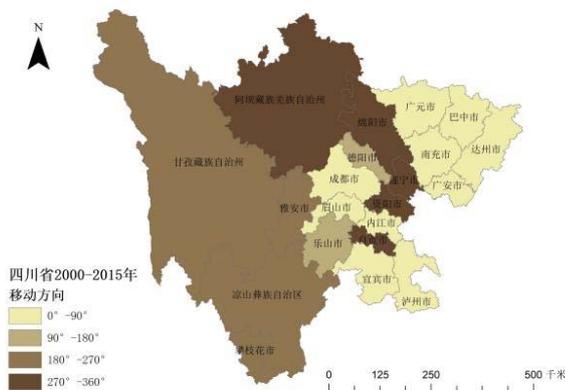


图7 2000-2015年时间路径移动方向分布图

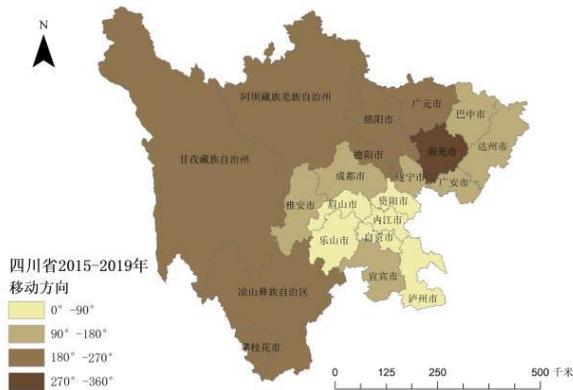


图8 2015-2019年时间路径移动方向分布图

### 3.3.3 LISA时空跃迁

根据表3, 可以看出四川省各市之间的相关性并不显著。在2000年至2015年和2015年至2019年两个时间段中, 只有甘孜藏族自治州和资阳在2015年至2019年之间发生了跃迁, 跃迁类型均为类型IV。另外, 根据Moran散点图的分析, 四川省市域之间关于能源消耗和碳排放的局部空间关联存在着很弱的稳定性, 其空间稳定性仅为0.09。

### 3.3.4 标准差椭圆

利用SDE方法对四川省各主要地区碳排放中心及空间分布特征的补充分析。由图9可知, 近20年市域能源消耗碳排放重心分布在103° 57' -104° 27' E, 30° 14' -30° 28' N之间, 多位于省几何中心(102.95° E, 30.18° N)东北方向, 表明东部和北部市域碳排放量较高。重心移动轨迹总体向东北偏移47.426km; 各时段具体为: 2000-2003年向东北迁移14.008km, 2003-2007年向西南移动3.492km, 2007-2011年向东北偏移17.705km, 2011-2015年向东南迁移37.597km, 2015-2019年向西北偏移21.719km。

在2000-2019年里, 方位角一直不断增大, 从2000年的32.719° 上升到2003年的35.569°, 2015年上升至43.012°, 最后2019年上升到44.003°, 其排放空间分布呈现出东北-西南格局, 这种格局在整体上有上升的态势。

自2000年至2019年, 四川省主半轴的标准差从241.111公里降至188.425公里, 在主轴方向上, 市域能源消耗碳排放出现了极化现象。然而, 在2000至2003年期间, 主半轴标准差由241.111公里下降至226.835公里, 市域能源消耗碳排放呈现出东北至西南方向的极化。2007年又上升至227.898公里, 市域能源消耗碳排放集中在东北至西南方向上出现分散现象。在辅轴方向上, 辅半轴的标准差自2000年以来一直在增长。在过去20年中, 辅半轴标准差从95.663公里上升至130.772公里, 四川省市域能源消耗碳排放集中在西北至东南方向上呈现出分散状态。

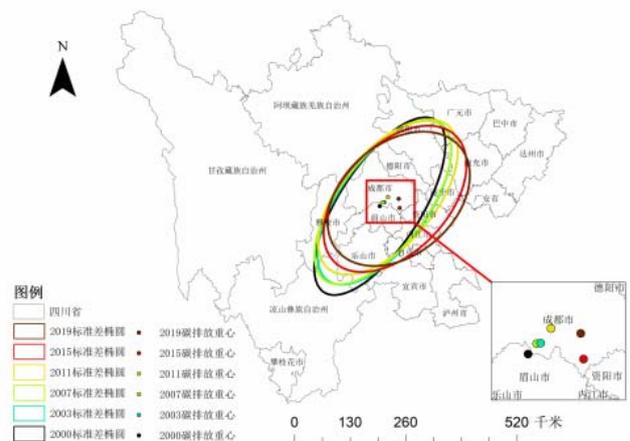


图9 四川省市域能源消耗碳排放标准差椭圆分布

#### 4 结论

基于夜间灯光遥感影像数据,从市级角度对四川省2000-2019年能源消耗碳排放量进行拟合,并运用多种方法分析其空间差异,得出以下结论:

2015-2019年强波动性与较高相对长度的城市数量下降。2000-2015年到2015-2019年,市域能源消耗碳排放放在局部空间结构稳定性较强,相对长度小于平均长度的城市占比超90%;最强波动性城市数量降低,较高与中等弯曲度城市数量减少,低弯曲度城市数量上升,空间格局变化具有空间整合性且呈增强趋势,市域间相关性不强,局部空间关联结构稳定性弱。

碳排放重心总体向东北移动,方位角不断增大,呈现东北—西南空间格局且不断增强。主轴方向上,2000-2019年主半轴标准差总体下降,市域能源消耗碳排放放在东北—西南方向分散;辅轴方向上,2000-2019年辅半轴标准差持续上升,市域能源消耗碳排放放在西北—东南方向分散。

#### [参考文献]

[1]苏泳娴,陈修治,叶玉瑶.基于夜间灯光数据的中国能源消费碳排放特征及机理[J].地理学报,2013,68(11):1513-1526.

[2]孙建卫,赵荣钦,黄贤金,等.1995-2005年中国碳排放核算及其因素分解研究[J].自然资源学报,2010,25(8):1284-1295.

[3]高长春,刘贤赵,李朝奎,等.近20年来中国能源消费碳排放时空格局动态[J].地理科学进展,2016,35(6):747-757.

[4]杨眉,王世新,周艺,等.DMSP/OLS夜间灯光数据应用研究综述[J].遥感技术与应用,2011,26(1):45-51.

[5]卓莉,张晓帆,郑璟,等.基于EVI指数的DMSP/OLS夜间灯光数据去饱和方法[J].地理学报,2015,70(8):1339-1350.

[6]胡艳兴,潘竟虎,王怡睿.基于ESDA-GWR的1997—2012年中国省域能源消费碳排放时空演变特征[J].环境科学学报,2015,35(06):1896-1906.

#### 作者简介:

王成霞(1996--),女,汉族,四川德阳人,硕士,助教,研究方向:基于GIS与遥感技术的生态环境污染评估与修复。