

# 中国电力消费多尺度时空格局分析 —— 基于 DMSP-OLS 夜间灯光数据

王涛<sup>1,2</sup>, 冯志畅<sup>1</sup>, 罗健<sup>1</sup>, 孟庆涛<sup>1</sup>

1. 中电普瑞电力工程有限公司, 北京 102200

2. 北京市工贸技师学院 机电分院, 北京 100097

**摘要:** 对美国国防气象卫星计划 (defense meteorological satellite program, DMSP) 上的操作性线扫描系统 (operational linescan system, OLS) 所获取的夜间灯光数据进行校正, 结合省级电力消费量构建 2000—2013 年省级尺度电力消费模拟模型。模型的拟合优度为 0.714 9, 这表明模拟模型有效。在此基础上反演出市级、县级和栅格级电力消费量, 最后采用全局空间自相关和局部空间自相关分析多尺度电力消费时空演变格局。结果表明: 2000—2013 年中国电力消费呈现显著增长趋势。电力消费总量由 2000 年的 13 606.29 亿 kWh 增加为 2013 年的 53 423.39 亿 kWh。京津冀地区、长三角地区和珠三角地区是高电力消费聚集区域, 西部地区则呈现低电力消费聚集态势, 可见电力消费量分布呈现胡焕庸线特征。栅格、省级、市级和县级尺度电力消费量呈现出一致的分布趋势, 不同地区电力消费存在着差异性。市级尺度是模拟电力消费的有效行政单元。2013 年 12.9% 的省份、16.56% 的城市和 40.95% 的县域电力消费呈现出局域空间相关性。

**关键词:** 多尺度; 电力消费; 夜间灯光数据; 全局空间自相关; 局部空间自相关

**中图分类号:** F407.61

**文章编号:** 0255-8297(2021)03-0508-13

## Multiscale Analysis on Spatiotemporal Pattern of Electric Power Consumption in China——Based on DMSP-OLS Nighttime Light Data

WANG Tao<sup>1,2</sup>, FENG Zhichang<sup>1</sup>, LUO Jian<sup>1</sup>, MENG Qingtao<sup>1</sup>

1. C-EPRI Electrical Engineering Co., Ltd, Beijing 102200, China

2. Electrical and Mechanical Branch, Beijing Industry and  
Trade Technicians College, Beijing 100097, China

**Abstract:** In combination of the corrected operational linescan system on defense meteorological satellite program (DMSP-OLS) nighttime light data with provincial electric power consumptions, a provincial scale electric power consumption simulation model was structured for the years from 2000 to 2013. The fitting goodness of the model was tested to be 0.714 9, and this proved the effectiveness of the proposed model. On this basis, the electric power consumptions of prefectural, county and pixel scales were calculated, and the spatiotemporal pattern of multiscale electric power consumption was analyzed by global

收稿日期: 2019-10-16

通信作者: 王涛, 高工, 研究方向为电力消费。E-mail: 164098227@qq.com

spatial autocorrelation and local spatial autocorrelation. Computation results indicated that the electric power consumption in China showed a significant growth trend from 2000 to 2013. Total electric power consumption increased from 1 360.629 billion kWh in 2000 to 5 342.339 billion kWh in 2013. It is also found that the Beijing-Tianjin-Hebei region, the Yangtze River Delta and the Pearl River Delta were the high electric power consumption zones, while the western region presented low electric power consumption. This power consumption distribution showed the characteristics of Hu line. The power consumptions of all different scales presented a consistent spatial distribution trend, and there were differences of electric power consumption in different regions. Prefectural scale was an effective administrative unit to simulate electric power consumption. 12.9% of provinces, 16.56% of prefectural, and 40.95% of counties in 2013 showed local spatial correlation in electric power consumption.

**Keywords:** multiscale, electric power consumption, nighttime light data, global spatial autocorrelation, local spatial autocorrelation

电力消费是中国主要的能源消费,是经济运行状况的重要指向标,与经济增长情况密切相关<sup>[1]</sup>,因此电力消费的变化在一定程度上反映了中国宏观经济走向。当前中国经济发展已进入新常态,电力消费同样也进入了结构优化、区域分化阶段<sup>[2-3]</sup>。电力消费量是衡量地区电力消费状况的基本指标,但是目前缺乏更精细化尺度如市级、县级甚至栅格尺度电力消费量的空间分布特征,致使统计数据不能更准确地模拟电力消费量。因此,电力消费统计数据不能充分反映电力消费的空间分布状况,那么如何快速、有效、精准化地模拟区域电力消费量是亟需解决的现实问题。

随着卫星遥感技术的快速发展和广泛应用<sup>[4]</sup>,利用美国国防气象卫星计划(defense meteorological satellite program, DMSP)上的操作线性扫描系统(operational linescan system, OLS)所获取的夜间灯光数据构成了人类经济活动<sup>[5]</sup>、电力消费情况<sup>[6-7]</sup>的有效指标,也逐渐成为监测人类社会经济生活的理想客观数据源之一。从20世纪80年代以来,众多学者对DMSP-OLS数据在电力消费领域的研究展开了大量工作<sup>[8-10]</sup>。文献[11]对全球主要国家的电力消费和灯光之间的关系进行了分析,表明灯光与电力消费具有很强的线性相关性。文献[12]对印度1993—2002年的电力消费时空特征进行分析,表明印度夜间灯光与电力消费的相关系数为0.56,所提模型的模拟效果良好。文献[13]基于DMSP-OLS夜间灯光数据重构了1995—2008年中国县级尺度电力消费量,并对其进行时空特征分析。文献[14]对日本10个供电地区的电力消费和由此产生的碳排放进行了区域模拟,结果表明DMSP-OLS的辐射校准产品相比稳定灯光产品可以更好地模拟电力消费量。文献[15]基于夜间灯光数据对中国1994—2009年市级尺度电力消费进行空间分析,指出估算模型有助于体现电力消费的地区差异性。文献[16]基于DMSP-OLS夜间稳定灯光对全球电力消费情况进行探测,建立全球尺度的电力消费量模拟模型,表明全球高电力消费地区集中在欧洲、北美和亚洲。可以看出,多数研究均从国家、区域等单一尺度展开,而对多尺度分析电力消费时空演变格局的研究却较少。本文基于前人的研究成果,从省级尺度构建基于DMSP-OLS数据的电力消费模拟模型,进而反演出栅格、市级和县级尺度电力消费量,最后分析了多尺度电力消费时空格局,为政府电力调配和经济发展提供借鉴和参考。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 数据来源

DMSP-OLS遥感数据来源于美国国家海洋和大气管理局,包含了6代卫星传感器获

取的 F10-F18 数据; 省级电力消费统计数据则来源于《中国统计年鉴》(2001—2017)。

## 1.2 DMSP-OLS 数据校正

数据校正步骤如下:

**步骤 1** 将 DMSP-OLS 数据转换为 Lambert 等角圆锥投影, 并裁剪得出中国 DMSP-OLS 数据。

**步骤 2** 对裁剪出的数据进行相互校正。

**步骤 2-1** 选取影像数字化值 (digital number, DN) 年际变化较小的区域作为稳定的目标区域与其他年份进行比较, 并利用回归模型进行校正。

**步骤 2-2** 需要对同一年不同卫星获取的数据进行比较校正, 以获得稳定值。

**步骤 3** 采用后一期 DN 值始终大于前一期 DN 值的方法, 对 DMSP-OLS 数据进行时间序列连续校正。

通过以上步骤可以得到中国 1992—2013 年校正后的 DMSP-OLS 数据。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 模拟模型的构建

基于 DMSP-OLS 数据与电力消费数据存在显著的线性相关性, 本文建立电力消费估算模型, 其计算公式为

$$E_i = aDN_i + b \quad (1)$$

式中:  $E_i$  为估算的  $i$  像元电力消费;  $DN_i$  为  $i$  像元的 DN 值;  $a$  和  $b$  为回归系数。结合式 (1) 建立省级电力消费和 DN 值之间的线性回归关系, 如图 1 所示。

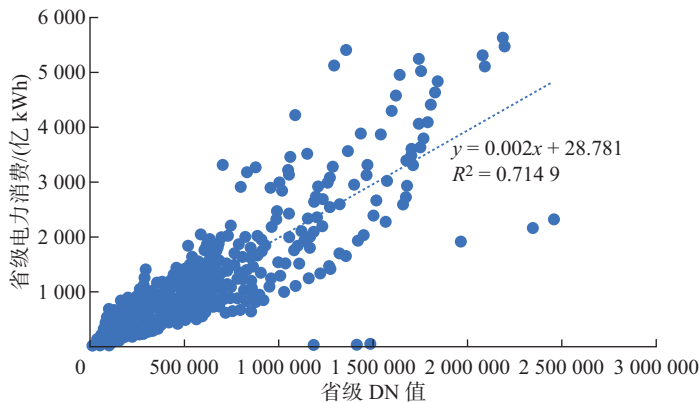


图 1 2000—2013 年省级电力消费与省级 DN 值回归关系

**Figure 1** Regression relationship between provincial electric power consumption and provincial DN value from 2000 to 2013

计算得出省级电力消费与 DN 值之间的线性回归关系式为

$$E_i = 0.002DN_i + 28.781 \quad (2)$$

估算模型的拟合优度  $R^2$  为 0.714 9, 表明拟合优度良好; 回归系数为正值, 表明两者之间存在着显著的正线性相关性。估算模型可以进行多尺度电力消费时空演变格局分析。鉴于省

级尺度模拟的电力消费量与统计消费量存在一定的数据差异性,可利用省级电力消费数据作为线性调整来纠正初步估算的栅格尺度电力消费量,进而生成省级电力消费栅格图(1 km × 1 km 空间分辨率),其计算公式为

$$K_i = \frac{E_i}{E_0} \tag{3}$$

$$E_{\text{grid}_i} = E_{\text{grid}_0} K_i \tag{4}$$

式中:  $K_i$  为  $i$  省的调整系数;  $E_i$  和  $E_0$  分别为  $i$  省电力消费的统计值和模拟值;  $E_{\text{grid}_i}$  和  $E_{\text{grid}_0}$  分别为  $i$  省调整后的电力消费栅格统计值和模拟值。

### 1.3.2 全局空间相关性

全局空间相关性的有效指数<sup>[17]</sup> Global Moran's  $I$  可以检验电力消费的空间分布特征,其计算公式为

$$I = \frac{S \sum_{k=1}^S \sum_{p=1}^S W_{kp} (x_k - \bar{x})(x_p - \bar{x})}{\left( \sum_{k=1}^S \sum_{p=1}^S W_{kp} \right) \sum_{k=1}^S (x_p - \bar{x})^2} \tag{5}$$

式中

$$\bar{x} = \frac{1}{S} \sum_{k=1}^S x_k \tag{6}$$

$$\begin{cases} W_{kp} = \frac{1}{d_{kp}}, & k \neq p \\ W_{kp} = 0, & k = p \end{cases} \tag{7}$$

式中:  $x_k$  为  $k$  地区电力消费量;  $x_p$  为  $p$  地区电力消费量;  $S$  为区域数;  $W$  为空间权重矩阵;  $d_{kp}$  为两地区之间的距离。 $I$  的取值范围为  $[-1, 1]$ 。 $I$  值越接近 1,表明空间属性值存在正相关;越接近 -1,表明空间属性值存在负相关。进一步对 Global Moran's  $I$  结果进行统计检验,计算公式为

$$Z(I) = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{Var}(I)}} \tag{8}$$

式中:  $\text{Var}(I)$  表示指数 Global Moran's  $I$  的方差,当  $Z(I)$  大于临界值 1.96 时,该空间具有显著相关性。

### 1.3.3 局部相关性

全局空间相关性指数 Moran's  $I$  是总体统计指标,反映了区域整体的空间聚集和分散程度,而进一步识别不同区域的空间属性<sup>[18]</sup>则需要局部空间自相关性指标。揭示不同空间区域的空间聚集程度和变化趋势,能够反映全局自相关的局部分布不稳定性,即空间异质性。本文主要使用局部 Moran's  $I_c$  指数度量和检验不同尺度碳排放的局部空间特征,公式为

$$I_c = \sum W_{kp} Z_k Z_p \tag{9}$$

式中:  $I_c$  表示局部 Moran's  $I$  指数,  $Z_k$  和  $Z_p$  分别为区域  $k$  和  $p$  标准化后的电力消费量,  $W_{kp}$  为行标准化后的空间权重,且  $\sum W_{kp} = 1$ 。进一步通过局部 Moran's  $I_c$  指数来区分局部集聚

模式，具体的集聚模式包括：H-H 集聚是指若  $I_c$  显著为正且  $Z_k > 0$ ，则电力消费量高的地区被电力消费量高的地区包围；L-L 集聚是指若  $I_c$  显著为正且  $Z_k < 0$ ，则电力消费量低的地区被电力消费量低的地区包围；L-H 集聚是指若  $I_c$  显著为负且  $Z_k < 0$ ，则电力消费量低的地区被电力消费量高的地区包围；H-L 集聚是指若  $I_c$  显著为负且  $Z_k > 0$ ，则电力消费量高的地区被电力消费量低的地区包围。

## 2 实证分析

### 2.1 多尺度电力消费时空变化

#### 2.1.1 栅格尺度

基于 1.3.1 节建立的模型可得出中国栅格尺度电力消费量如图 2 所示。可以看出，2000—2013 年中国电力消费呈现显著增长趋势，电力消费总量由 2000 年的 13 606.29 亿 kWh 增加为 2013 年的 53 423.39 亿 kWh。电力消费空间分布由星点状分布演变为网状分布特征，其中京津冀地区、长三角地区和珠三角地区是高电力消费聚集区域，而广大的西部地区则呈现低电力消费集聚态势。进一步研究可以发现，高电力消费区域主要集中在胡焕庸线的东南侧，而低电力消费区域则聚集在胡焕庸线的西北侧，呈现出与经济发展、人口密度相一致的“东密西疏”分布特征，表明电力消费具有胡焕庸线现象。

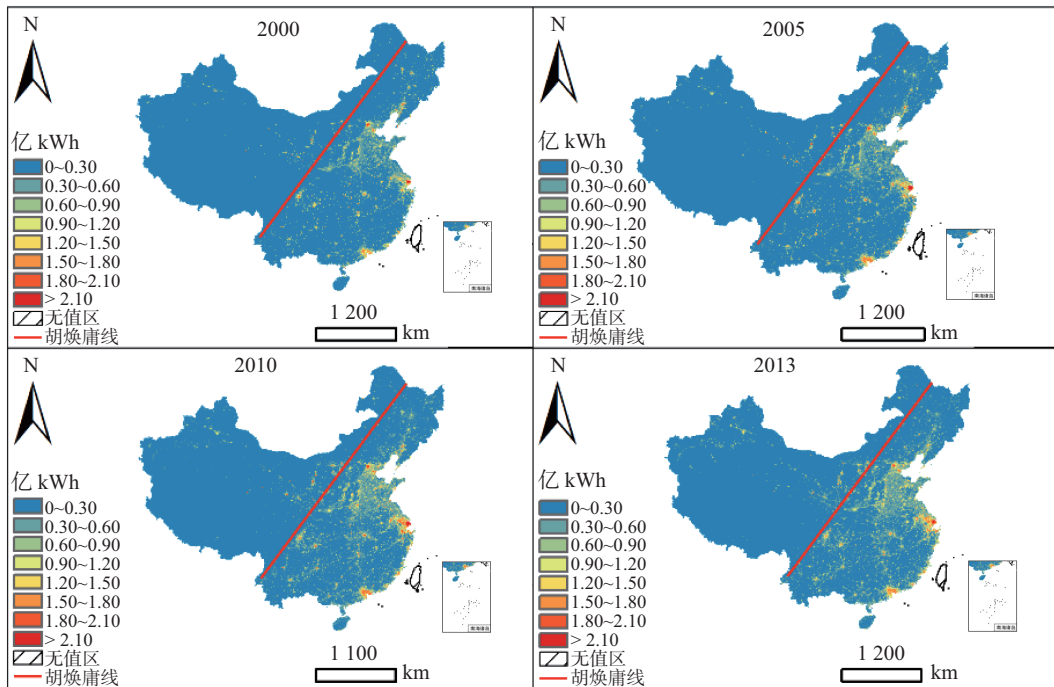


图 2 2000—2013 年间中国栅格尺度电力消费分布特征

Figure 2 Distribution characteristics of China’s electric power consumption at grid scale from 2000 to 2013

#### 2.1.2 省级尺度

采用自然断点法将中国 2000—2013 年间省级电力消费总量分为 5 类，其空间特征如图 3

所示。

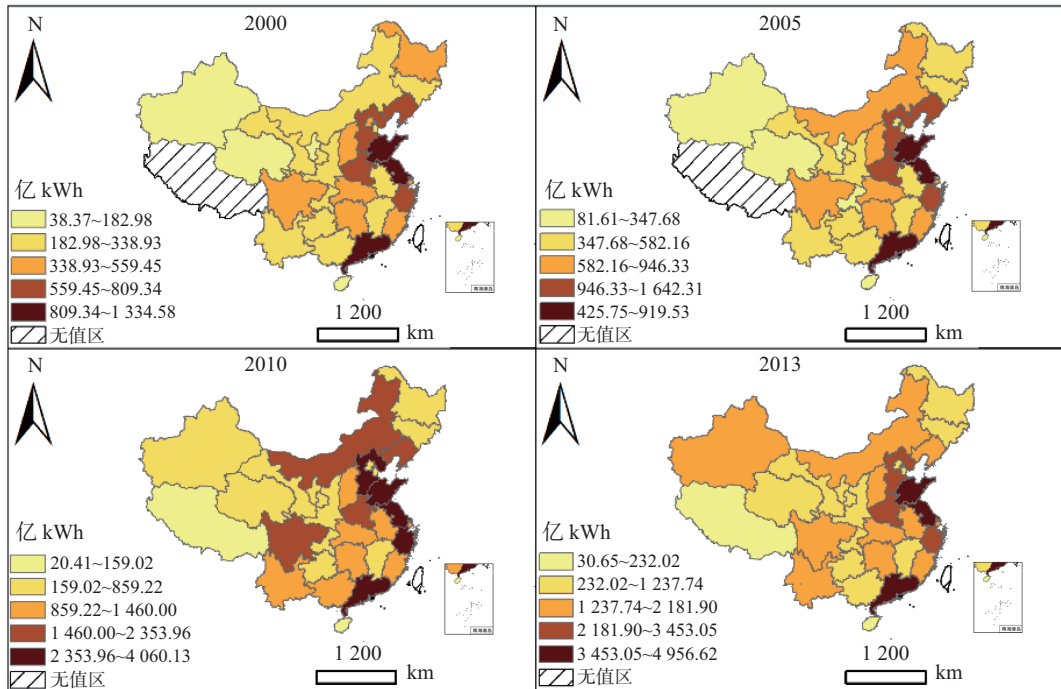


图3 2000—2013年间中国省级尺度电力消费分布特征

Figure 3 Distribution characteristics of China's electric power consumption at provincial scale from 2000 to 2013

从图3中可以看出:2000—2013年中国省份电力消费总量呈现扩大趋势,由2000年的38.37亿kWh增长为2013年的4 956.62亿kWh。2000年高电力消费省份为广东、山东和江苏,低电力消费省份为新疆、宁夏、青海、海南和西藏;2005年高电力消费省份为广东、江苏和山东,低电力消费省份在新疆、青海、宁夏、海南、西藏的基础上增加了重庆市;2010年高电力消费省份在山东、江苏和广东的基础上增加了河北和浙江,低电力消费省份减少为海南和西藏;2013年高电力消费省份仍为山东、江苏和广东,低电力消费省份仍为海南和西藏。总体来说,高电力消费省份为广东、山东和江苏,低电力消费省份分布在西藏,可以看出:省级电力消费分布特征呈现出由东部地区向西部地区阶梯式减少的趋势。

### 2.1.3 市级尺度

采用自然断点法将中国2000—2013年间市级电力消费总量分为5类,其空间特征如图4所示。

从图4中可以看出:2000—2013年城市电力消费总量呈现扩大趋势,电力消费最高值由2000年的23.78亿kWh增加为2013年的1 407.16亿kWh。2000年高电力消费城市主要分布在珠三角、长三角、京津冀三大城市群;东北的沈阳、哈尔滨等老工业基地;西南地区的成都和重庆;中部工业城市武汉,以及东部沿海的青岛和泉州。2013年高电力消费城市主要分布在长三角、京津冀、珠三角三大城市群;西南地区的成都和重庆;山东的潍坊和青岛;福建泉州;内蒙古鄂尔多斯;中部的武汉和郑州;东北的沈阳。低电力消费城市广泛分布于中国的西部地区,呈现东多西少的层级分布趋势。这与栅格尺度和省级尺度电力消费呈现出一致的

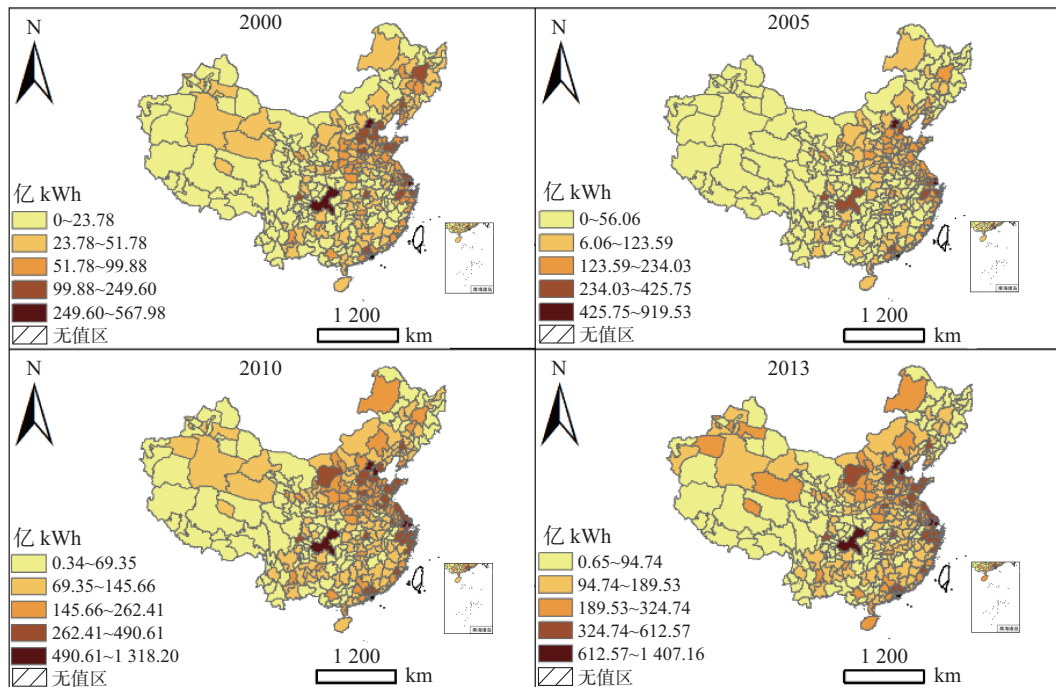


图4 2000—2013年间中国市级尺度电力消费分布特征

Figure 4 Distribution characteristics of China's electric power consumption at prefectural scale from 2000 to 2013

分布趋势,表明省份电力消费分布存在着城市之间的差异性。

#### 2.1.4 县级尺度

采用自然断点法将中国2000—2013年县级电力消费总量分为5类,其空间特征如图5所示,可以看出:2000—2013年县域电力消费总量呈现扩大趋势,电力消费最高值由2000年的3.28亿kWh增加为2013年的393.24亿kWh。2000年高电力消费县域主要分布在珠三角、上海、北京、浙江的萧山区、辽宁的海城市。2013年高电力消费县域主要分布在珠三角、长三角、内蒙古的乌审旗和北京市,而低电力消费县域主要分布在中国的西北、西南、内蒙古和东北大部分地区,呈现出由东部发达地区向西部经济较为落后地区层级降低趋势,这与栅格、省级和市级尺度电力消费呈现出一致的分布趋势,表明电力消费分布同样存在着县域之间的差异性。

## 2.2 多尺度电力消费全局空间相关性

多尺度电力消费全局空间相关性分析结果如表1所示,其中 $Z$ 为检验统计量, $P$ 值为拒绝域概率,可以看出:省级尺度 $Z$ 值小于1.96, $P$ 值均大于10%,表明在省级尺度上电力消费并不存在全局空间相关性;市级和县级尺度 $Z$ 值均大于2.58, $P$ 值均小于0.01,在1%水平上显著,表明中国市级和县级电力消费量具有显著的空间相关性,电力消费在市级和县级尺度上呈现聚集分布态势。总体来看,市级尺度电力消费的Moran's  $I$ 指数要大于县级尺度电力消费的 $I$ 指数,表明较小的空间尺度更具有空间集聚特征,其中市级尺度是模拟电力消费的有效行政单元。

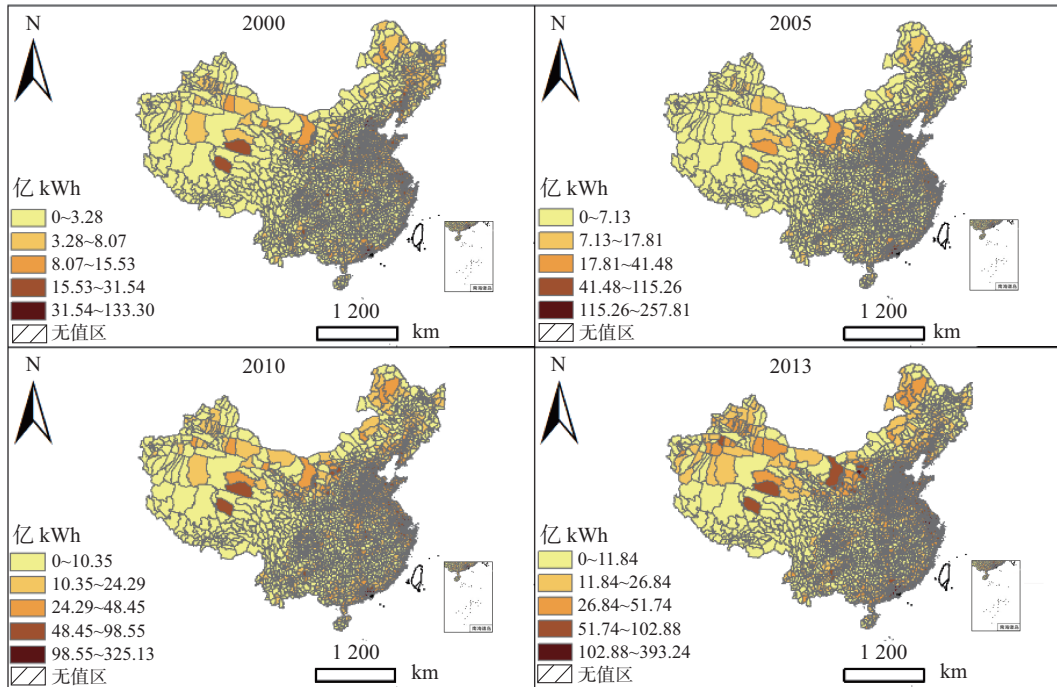


图5 2000—2013年间中国县级尺度电力消费分布特征

Figure 5 Distribution characteristics of China's electric power consumption at county scale from 2000 to 2013

表1 多尺度电力消费全局空间相关性分析

Table 1 Global spatial correlation analysis of multi-scale electric power consumption

年份	2000年	2005年	2010年	2013年
省级 <i>I</i>	0.044 5	0.042 3	0.085 0	0.061 4
省级 <i>Z</i>	0.981 1	0.962 3	1.388 8	1.113 5
省级 <i>P</i>	0.326 5	0.335 8	0.164 8	0.265 4
年份	2000年	2005年	2010年	2013年
市级 <i>I</i>	0.145 9	0.216 3	0.247 5	0.239 6
市级 <i>Z</i>	8.804 1	12.757 0	14.342 7	13.750 4
市级 <i>P</i>	0	0	0	0
年份	2000年	2005年	2010年	2013年
县级 <i>I</i>	0.149 4	0.177 8	0.200 0	0.192 3
县级 <i>Z</i>	67.343 9	80.279 8	89.646 5	86.197 0
县级 <i>P</i>	0	0	0	0



## 2.3 多尺度电力消费局部空间相关性

### 2.3.1 省级尺度

计算 2013 年中国省级电力消费的局部 Moran's  $I_c$  指数, 得到省级尺度电力消费的 LISA 集聚格局, 如图 6 所示。

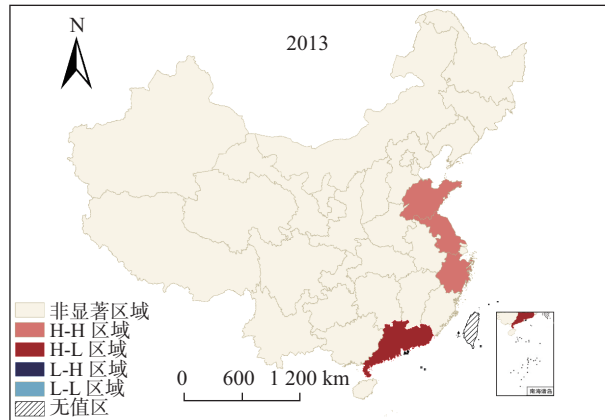


图 6 2013 年省级电力消费 LISA 分布图

Figure 6 LISA distribution map of provincial electric power consumption in 2013

2013 年 12.9% 的省份电力消费呈现出局域空间相关性。显著性空间类型主要表现为 HH 类型和 HL 类型。其中 HH 类型主要为东部地区的山东、江苏和浙江, 这 3 个省份与相邻省份呈现出高电力消费的趋同效应。如河北、河南、安徽等与这 3 个省份均为人口大省、重工业大省和经济发达省份, 经济发展、人民生活水平的提高直接导致电力消费量的增加。HL 类型为广东, 表明广东为高电力消费区域, 而周边的广西、湖南和江西等电力消费量远低于广东省, 表明广东省电力消费对周围区域具有显著溢出效应。由此可见高电力消费区域集中在中国的东南沿海地区, 这与现实相符。

### 2.3.2 市级尺度

计算 2013 年市级电力消费的局部 Moran's  $I_c$  指数, 得到市级尺度电力消费的 LISA 集聚格局, 如图 7 所示。

2013 年 16.56% 的城市电力消费呈现出局域空间相关性。显著性空间类型主要表现为正相关 HH 型和 LL 型, 负相关 HL 型和 LH 型。其中 HH 型城市有 42 个, 主要分布如下: 1) 环渤海湾地区的北京、天津, 河北的邢台、石家庄、沧州、保定、廊坊、唐山; 2) 山东的临沂、济宁、济南、青岛、潍坊、滨州、烟台; 3) 长三角的上海、苏州、南京、无锡、常州、镇江、泰州、南通、扬州、淮安、盐城、连云港、台州、金华、宁波、杭州、绍兴、嘉兴、湖州、温州、徐州; 4) 珠三角的深圳、佛山、广州、东莞和惠州。可以发现 HH 型城市主要分布在中国的东部沿海等经济发达、城镇化水平较高地区, 与周围的高电力消费城市呈现出趋同性。LL 型城市则主要分布如下: 1) 青海的黄南藏族自治州和果洛藏族自治州; 2) 甘肃的甘南藏族自治州; 3) 西藏的昌都地区和林芝地区; 4) 云南的迪庆藏族自治州。可以发现 LL 型城市主要聚集在中国西北经济较为落后地区, 这些城市与周边低电力消费城市呈现出趋同性。HL 型城市则分别为武汉、长沙、重庆和成都, 可以发现均分布在中国的中部和西南省会城市, 表明这 4 个城市本身为高电力消费城市, 而被低电力消费城市包围, 呈现出电力消费的溢出效应, 存

在省内电力消费分布的差异性。LH型城市则分布在浙江舟山、安徽马鞍山、山东莱芜和山西阳泉,呈现点状部分特征,表明这4个城市虽然为低电力消费城市,但被高电力消费城市包围,同样存在省内电力消费分布的差异性。

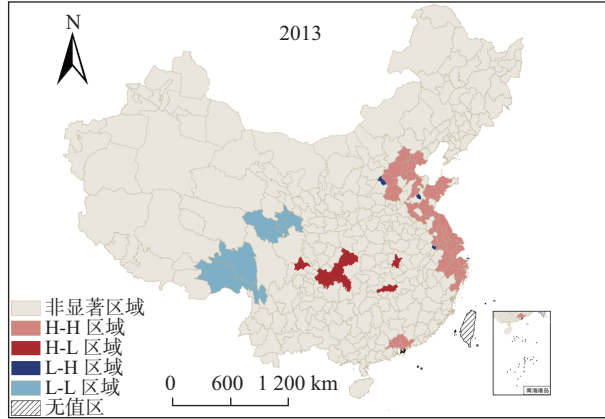


图7 2013年市级电力消费LISA分布图

Figure 7 LISA distribution map of prefectural electric power consumption in 2013

### 2.3.3 县级尺度

计算2013年县级电力消费的局部Moran's  $I_c$  指数,得到县级尺度电力消费的LISA集聚格局,如图8所示。

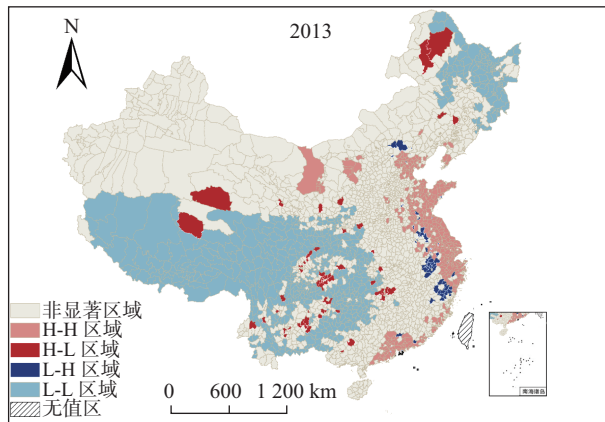


图8 2013年县级电力消费LISA图

Figure 8 LISA distribution map of county electric power consumption in 2013

2013年40.95%的县域电力消费呈现出局域空间相关性。显著性空间类型主要表现为正相关HH型和LL型,负相关HL型和LH型。HH类型县域有382个,主要分布如下:1)环渤海湾地区的北京、天津、河北、辽宁和山东;2)长三角地区、珠三角地区;3)东南沿海的福建;4)中部地区河南的永城市、中牟县、濮阳县、梁园区和安徽;5)西北地区的内蒙古、陕西的神木县、宁夏的利通区、青铜峡市、灵武市、永年县、西夏区、大武口区、兴庆区。可以发现HH类型区域主要集中在中国的东部沿海地区,呈现条带状分布趋势。LL类型县域有636

个,主要集中在中国的中西部广大地区,呈现连片状分布,包括:1)内蒙古的科尔沁右翼前旗;2)吉林、黑龙江、江西的永新县、莲花县;3)河南的卢氏县;4)湖北、湖南、广西、重庆、四川、贵州、云南、西藏等西部省份。HL类型县域有56个,呈现点状分布,主要包括:1)内蒙古的科尔沁区、牙克石市、鄂伦春自治旗;2)辽宁的昌图县;3)河南的灵宝市;4)湖北的潜江市和樊城区;5)湖南、广西的兴宾区和兴宁区;6)重庆、四川、贵州、云南、陕西的长安区和志丹县、青海的格尔木市和湟中县;7)宁夏的原州区。LH类型有102个,同样呈现点状分布,主要包括:1)北京、河北、辽宁的长海县、中山区;2)长三角围绕高碳地区的县域、中部的安徽、江西的婺源县、河南的台前县;3)围绕珠三角的部分县域;4)东部沿海的福建和山东。

## 2.4 讨论

总体来看,利用DMSP-OLS数据对电力消费进行拟合,可以得到较好的估计效果,与文献[10]的估计精度(70%左右)具有一致性。中国电力消费在持续增长的同时,也呈现出一定的区域差异性特征,这与文献[18]研究表明的区域电力发展不均衡具有一致性。文献[10]认为京津唐、沪宁杭、珠三角、山东半岛、辽中南地区和四川盆地为电力集中区域,而本研究进一步指出高电力消费区域主要集中在京津冀、长三角和珠三角这三大城市群,实现了多尺度高电力消费地区的精准识别。

## 3 结论及政策建议

### 3.1 结论

1) 本文采用校正后的DMSP-OLS夜间灯光数据,经过影像重投影、相互校正、年内融合、时间序列校正后,得到了1992—2013年全国DMSP-OLS数据集。在统计电力消费量的基础上构建多尺度电力消费模拟模型。模拟结果显示模型的拟合优度为0.7149,基于校正后的DMSP-OLS数据估算电力消费模拟精度良好,表明模型有效。

2) 2000—2013年中国电力消费呈现显著增长趋势。电力消费总量由2000年的13 606.29亿kWh增加为2013年的53 423.39亿kWh。京津冀地区、长三角地区和珠三角地区是高电力消费聚集区域,西部地区则呈现低电力消费集聚态势,电力消费量分布呈现胡焕庸线特征。

3) 多尺度电力消费总量均呈现扩大趋势。高电力消费省份为广东、山东和江苏。高电力消费城市主要分布在珠三角、长三角、京津冀三大城市群;西南的成都和重庆、中部的武汉、东部沿海的青岛和泉州。高电力消费县域主要分布在珠三角、长三角和北京。栅格、省级、市级和县级尺度电力消费量呈现出一致的分布趋势,不同地区电力消费存在着差异性。

4) 省级尺度上电力消费并不存在全局空间相关性;市级和县级电力消费量具有显著的空间相关性;市级尺度电力消费的Moran's指数要大于县级尺度电力消费的Moran's指数,市级尺度是模拟电力消费的有效行政单元。

5) 2013年12.9%的省份电力消费呈现出局域空间相关性。其中HH类型主要为东部地区的山东、江苏和浙江。16.5%的城市电力消费呈现出局域空间相关性。其中HH型城市有42个,主要为环渤海湾地区、长三角、珠三角。40.9%的县域电力消费呈现出局域空间相关性。HH类型县域有382个,主要集中在环渤海湾地区、长三角地区、珠三角地区;东南沿海的福建;中部地区河南、西北地区的内蒙古、陕西的神木县、宁夏。

### 3.2 政策建议

首先,本文构建的模拟模型可以快速、有效、精准化地利用卫星遥感数据对中国多尺度电

力消费量进行模拟和预测,为卫星大数据时代进行区域电力消费和经济监测分析提供了基础保证。政府部门应建立基于DMSP-OLS数据的“省级-市级-县级”多层级电力消费联动模拟监测系统,为存在地区差异的政府电力资源调配提供客观参考。

其次,随着中国遥感技术的进一步发展,未来基于夜间灯光数据开展电力消费模拟和预测的重点在于时效性更好的NPP-VIIRS数据的应用。建立月度、季度和年度卫星遥感数据与电力消费量之间的模拟模型,对中国省级、市级和县级以及栅格尺度进行电力消费的动态监测,为中国经济未来走势、电力资源合理配置提供科学决策和依据。

## 参考文献:

- [1] 孙祥栋,尹彦辉,郑艳婷. 区域经济异质视角下电力消费因素分解及“拐点”分析[J]. 技术经济, 2019, 38(7): 100-108.  
SUN X D, YIN Y H, ZHENG Y T. Electricity consumption decomposition and “inflection point” analysis considering heterogeneity of China’s regional economic growth [J]. Technology Economics, 2019, 38(7): 100-108. (in Chinese)
- [2] 单葆国,孙祥栋,李江涛,等. 经济新常态下中国电力需求增长研判[J]. 中国电力, 2017, 50(1): 19-24.  
SHAN B G, SUN X D, LI J T, et al. Analysis on the China’s electricity demand growth under the new economic norm[J]. Electric Power, 2017, 50(1): 19-24. (in Chinese)
- [3] 许长新,王豹,林剑婷. 电力与东道国经济发展的关系研究——基于“一带一路”倡议背景[J]. 资源开发与市场, 2018, 34(8): 1080-1085.  
XU C X, WANG B, LIN J T. Research on relationship between electricity and economic development of the host county—based on the “the belt and the road” [J]. Resource Development & Market, 2018, 34(8): 1080-1085. (in Chinese)
- [4] 周月敏,周翔. 中国高分辨率对地观测系统共性应用技术规范体系框架研究[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(9): 1298-1305.  
ZHOU Y M, ZHOU X. The system framework of technical standards for common applications in China high-resolution earth observation system [J]. Journal of Geo-information Science, 2018, 20(9): 1298-1305. (in Chinese)
- [5] 王庆华,肖宏伟. 中国电力消费对经济增长影响的空间溢出效应研究[J]. 宏观经济研究, 2018(2): 91-103.  
WANG Q H, XIAO H W. A study on the spatial spillover effect of electricity consumption on economic growth in China [J]. Macroeconomics, 2018(2): 91-103. (in Chinese)
- [6] ELVIDGE C D, BAUGH K E, DIETZ J B, et al. Radiance calibration of DMSP-OLS low-light imaging data of human settlements [J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 68(1): 77-88.
- [7] IMHOFF M L, LAWRENCE W T, STUTZER D C, et al. A technique for using composite DMSP/OLS “City Lights” satellite data to map urban area [J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 61(3): 361-370.
- [8] 马忠玉,肖宏伟. 基于卫星灯光数据的中国省域电力消费模拟研究[J]. 中国能源, 2017,39(1): 6-10.  
MA Z Y, XIAO H W. Simulation study of provincial electricity consumption based on satellite lighting data [J]. Energy of China, 2017, 39(1): 6-10. (in Chinese)
- [9] 李通,何春阳,杨洋,等. 1995—2008年中国大陆电力消费量时空动态[J]. 地理学报, 2011,66(10): 1403-1412.  
LI T, HE C Y, YANG Y, et al. Understanding electricity consumption changes in Chinese mainland from 1995 to 2008 by using DMSP/OLS stable nighttime light time series data [J]. ACTA Geographica Sinica, 2011, 66(10): 1403-1412. (in Chinese)
- [10] 李峰,孙广通,王秋玲,等. NPP-VIIRS夜间灯光数据的县级电力消费空间化研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(4): 8-11, 15, 18.  
LI F, SUN G T, WANG Q L, et al. Spatialization research of electricity consumptions at county level using NPP-VIIRS nighttime lights [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2018, 41(4): 8-11, 15, 18. (in Chinese)

- [11] ELVIDGE C D, BAUGH K E, KIHN E A, et al. Relation between satellite observed visible-near infrared emissions, population, economic activity and electric power consumption [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(6): 1373-1379.
- [12] CHAND T R K, BADARINATH K V S, ELVIDGE C D, et al. Spatial characterization of electrical power consumption patterns over India using temporal DMSP-OLS night-time satellite data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(3): 647-661.
- [13] HE C, MA Q, LI T, et al. Spatiotemporal dynamics of electric power consumption in Chinese Mainland from 1995 to 2008 modeled using DMSP/OLS stable nighttime lights data [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(1): 125-136.
- [14] LETU H, NAKAJIMA T Y, NISHIO F. Regional-scale estimation of electric power and power plant CO<sub>2</sub> emissions using defense meteorological satellite program operational linescan system nighttime satellite data [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2014, 1(5): 259-265.
- [15] CAO X, WANG J, CHEN J, et al. Spatialization of electricity consumption of China using saturation-corrected DMSP-OLS data [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 28: 193-200.
- [16] SHI K, CHEN Y, YU B, et al. Detecting spatiotemporal dynamics of global electric power consumption using DMSP-OLS nighttime stable light data [J]. *Applied Energy*, 2016, 184: 450-463.
- [17] ANSELIN L. Under the hood issues in the specification and interpretation of spatial regression models [J]. *Agricultural Economics*, 2002(27): 247-267.
- [18] 吕倩, 刘海滨. 京津冀县域尺度碳排放时空演变特征——基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据 [J]. *北京理工大学学报 (社会科学版)*, 2019, 21(6): 41-50.  
LÜ Q, LIU H B. Spatio-temporal evolution characteristics of county scale carbon emissions in Beijing-Tianjin-Hebei region—a study based on DMSP/OLS nighttime light data [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2019, 21(6): 41-50. (in Chinese)

(编辑: 管玉娟)