

基于 NPP-VIIRS 的中国电力消费估算

傅晨璇

(江西理工大学 土木与测绘工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要:针对夜间灯光数据用于估算城市电力消费量存在精度不足的问题,提出了波士顿夜光模型。选择国内 176 个城市为研究区域,以 2019 年 NPP-VIIRS 夜间灯光产品为数据源,将第三产业作为波士顿矩阵的分类依据,将研究区城市分为明星城市、金牛城市、问号城市和瘦狗城市 4 类,进而估算全社会电力消费量。估算结果表明,该模型较于传统灯光模型的估算精度更高。按照相对误差的大小,将全部城市划分为高精度、中精度和低精度城市 3 种类型,波士顿夜光模型的高精度和中精度城市数量多于传统灯光模型,而低精度城市数量则一样多。

关键词:夜间灯光数据;电力消费量;波士顿矩阵;回归模型

中图分类号: TP7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2023)16-0166-05

社会城镇化和工业化的高速发展加剧了能源消耗和二氧化碳排放,能源短缺和气候、变暖等环境问题愈发严峻^[1]。2020 年 9 月 22 日,习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话,“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和”,倡导绿色、环保低碳的生活方式,构建和谐包容、安全的绿色可持续发展城市^[2]。电力消耗是能源消耗中的重要组成部分,是反映区域经济运行状况的基本指标之一,准确并及时地获取电力消费信息对于提高能源效率、减少碳排放实现“双碳”目标具有重要意义。

传统估算电力消费量的方法大多是基于行政单位的统计数据,由于统计数据的时间滞后性和缺失性,限制了后续研究的实用性^[3]。近年来,随着遥感卫星技术的飞速发展,利用夜光遥感影像估算电力消费量已被证实是有效且便捷的方法^[4]。NPP-VIIRS 作为新一代夜间灯光数据,因其高分辨率以及不存在过饱和效应的特点,得到了广泛应用。张莉等^[5]采用 NPP-VIIRS 夜间灯光数据,在不依赖统计数据的情况下,利用基于灯光结构的 K-Means 算法对城市电力消费量进行估算;李博等^[6]利用夜光遥感数据、国内生产总值和人口统计数据结合改进通用矩阵,预测了长三角地区城市的用电量;李熙和薛翔宇^[7]将夜间灯光数据与电力消费统计数据相结合,估算了区域电力消费量。目前电力消费估算及其空间化大多以省级行政区为单位,以市级为单位的大尺度研究较少^[8]。经济功能不同的城市之间

能源消费模式也不同,这取决于城市以工业功能还是服务业功能为重心发展,因此需要从城市分类的角度探索新的方法来提高估算精度。本文选取国内 176 个城市作为研究区域,利用波士顿矩阵,将市辖区第三产业 GDP 增长率和相对市辖区第三产业 GDP 占比作为城市分类指标,分别构建线性模型,从而提高电力消费量的估算精度。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域

研究范围横跨华南、华中、华东和华北四大地理分区的 13 个省份和 3 个直辖市共计 176 个城市,其中包含广东、广西、湖北、湖南、河南、山东、安徽、江苏、浙江、江西、福建、山西和河北各省份的 21、14、12、13、16、15、16、13、11、11、9、11、11 个地级市。

1.2 数据来源与预处理

夜间灯光数据来自美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)网站提供的 2019 年 NPP-VIIRS 夜光遥感影像年产品。利用行政区域边界的矢量数据裁剪得到研究区灯光影像,为了减小影像的变形,将其重投影、重采样转换为分辨率为 500 m×500 m 的 Albers 等面积影像;统计数据包括研究区内各城市 2019 年全社会电力消费量(亿 kW·h)、市辖区第三产业 GDP(GDP of tertiary industry, GTI)以及市辖区第三产业 GDP 占比(proportion of tertiary industry, PTI)数据,分别来自 2018 年、2019 年《中国城市统计年鉴》,将其统一做标准化处理。

收稿日期: 2023-04-28

作者简介: 傅晨璇(1998—),女,江西新余人,江西理工大学土木与工程测绘学院,硕士研究生,研究方向为遥感技术与应用。

2 研究方法

2.1 传统灯光模型

利用 NPP-VIIRS 夜光遥感影像,计算统计研究区城市的夜间灯光总量(total nighttime light, TNL),计算公式为

$$TNL_k = \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

式中: TNL_k 为第 k 个城市的夜间灯光总量; x_i 为第 i 个像元的辐射亮度值; n 为区域内像元数。

构建 176 个城市全社会电力消费量与夜间灯光总量的线性模型,如图 1 所示。得到的 $P < 0.01$,拟合系数 $R^2 = 0.8018$,说明二者显著性相关。

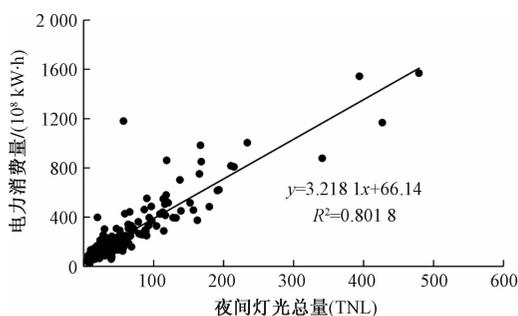


图 1 城市全社会电力消费量与灯光总量线性函数关系

2.2 波士顿夜光模型

2.2.1 波士顿矩阵基本原理

波士顿矩阵通过销售增长率与市场占有率两个评价指标^[9],利用分类指标和阈值将企业全部产品划分为明星、问题、瘦狗和金牛 4 种类型产品,如图 2 所示。明星产品是指高销售增长率同时在市场上占有率高的产品,这类产品的增长和获利都有极好的发展前景,可以加大投资优先供给,扩大经济规模和市场机会以支持其迅速发展;问号产品是指高销售增长率但是市场占有率较小的产品,市场营销上存在问题,应加大宣传力度,提高市场占有率;瘦狗产品是指销售增长率和市场占有率双低的产品,长期处于亏损状态,应及时淘汰将剩余资源向其他产品转移;金牛产品是指销售增长率低但市场占有率高的产品,这类产品销售量大,可为企业提供发展资金。

2.2.2 波士顿夜光模型

社会发展进程加快,经济增速、结构和增长动力的变化对电力消费结构也产生了巨大影响。受城镇化水平提高、现代服务业和用电设施发展的影响,第三产业用电占全社会电力消费量比例不断提升,2015 年我国产业结构由“二一三”型转变为“三

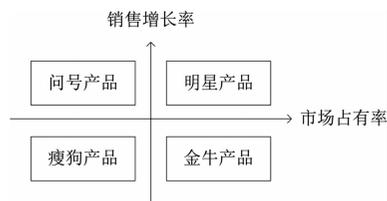


图 2 波士顿矩阵

二一”型^[10]。随着第三产业成为我国经济社会发展中的第一大产业,其对电力消费的影响也愈加显著^[9]。因此,将影响力较大的第三产业作为波士顿矩阵分类的主要依据,选择“市辖区第三产业 GDP 增长率(tertiary industry growth rate, TIGR)”和“相对市辖区第三产业 GDP 占比(relative proportion of tertiary industry, RPTI)”代替原波士顿矩阵的两大分类指标。将分类后的城市依次构建模型,来达到降低估算结果误差的目的。

统测计算 2019 年研究区内各城市市辖区第三产业 GDP 增长率以及相对市辖区第三产业 GDP 占比,计算公式为

$$TIGR = \frac{GLI_{2019} - GLI_{2018}}{GLI_{2018}} \times 100\% \quad (2)$$

$$RPTI = \frac{PTI_i}{PTI} \quad (3)$$

式中: TIGR 为市辖区第三产业 GDP 增长率; GLI_i 为第 i 个城市市辖区第三产业 GDP; RPTI 为相对市辖区第三产业 GDP 占比; PTI 为 176 个城市市辖区第三产业 GDP 占比的平均值; PTI_i 为第 i 个城市市辖区第三产业 GDP 占比。

根据计算,2019 年区域内城市第三产业 GDP 平均增长率为 18%,将其作为第三产业 GDP 增长率的阈值,选择 1 作为相对市辖区第三产业 GDP 增长率的阈值,4 类城市分类如图 4 所示。分类结果为:以北京、上海、厦门为代表的明星城市共 35 个,该类城市市辖区第三产业 GDP 增长率和相对市辖区第三产业 GDP 占比都较高,城市发展水平整体偏高且发展速度较快;以天津、广州、深圳为代表的金牛城市共有 45 个,特点是市辖区第三产业 GDP 增长率较低,相对市辖区第三产业 GDP 占比较高,城市发展已经较为成熟,发展水平较高但发展速率较为缓慢;以鹤壁、柳州、日照为代表的瘦狗城市共 55 个,该类城市市辖区第三产业 GDP 增长率和相对市辖区第三产业 GDP 占比都较低,城市发展水平整体偏低;以唐山、赣州、珠海为代表的问号城市共有 41 个,特点是市辖区第三产业 GDP 增长率较快,相对市辖区第三产业 GDP 占比较低,这类城市的城市发

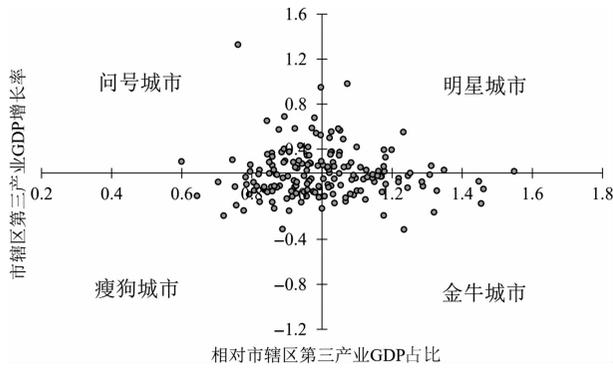


图 3 基于波士顿夜光模型的城市分类

展水平较低,但发展速率快。

分别构建 4 类城市夜间灯光总量与全社会电力消费量的线性模型,如图 4 所示。明星城市的电力消费量与夜间灯光总量的相关性最高,为 0.915 8;其次是金牛城市,相关性为 0.820 3;问号城市和瘦狗城市的相关性则偏低。

3 电力消费估算结果与误差分析

利用电力消费统计值与模型估算值之间的相对误差(relative error, RE)来评价模型精度,计算式公为

$$RE = \frac{|EPC_{pre} - EPC_{real}|}{EPC_{real}} \quad (4)$$

$$\overline{RE} = \frac{\sum_{i=1}^n RE_i}{n} \quad (5)$$

式中:RE 为相对误差; \overline{RE} 为平均相对误差; EPC_{pre} 为估算的电力消费量; EPC_{real} 为统计资料记录的电

力消费量; n 为同类型城市的数量。

3.1 传统灯光模型估算结果

对研究区域内 176 个城市的全社会电力消费量与夜间灯光总量建立线性模型,计算公式为

$$EPC_i = 3.218 1TNL_i + 66.14 \quad (6)$$

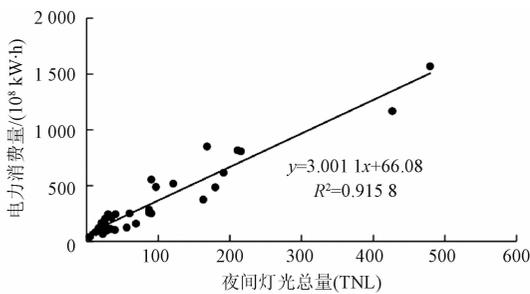
式中: EPC_i 为第 i 个城市的估算电力消费量; TNL_i 为第 i 个城市的夜间灯光总量。

根据式(6)估算出各城市的电力消费量,并计算其相对误差。传统灯光模型估算的电力消费量平均相对误差为 36.0%。上海、武汉的相对误差较小,分别为 4.04%、4.08%,这些城市往往是第三产业发展水平较高的城市;而一些第三产业发展相对落后、城市化水平较低的城市相对误差较大,如景德镇、朔州、亳州的相对误差均超过 100%。由此可见,传统灯光模型在估算城市电力消费量时,虽然电力消费与灯光总量的相关性高,但该模型对于经济发展水平有高低之分的城市估算精度有较大差异,经济发达、第三产业占比较高的城市估算精度高,而经济发展水平、第三产业占比较低的城市估算精度低。

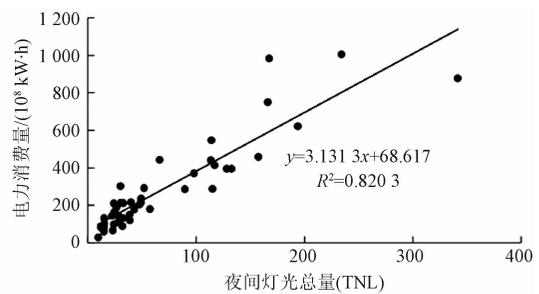
3.2 波士顿夜光模型结果

构建 4 类城市电力消费量与夜间灯光总量的波士顿夜光模型,计算公式为

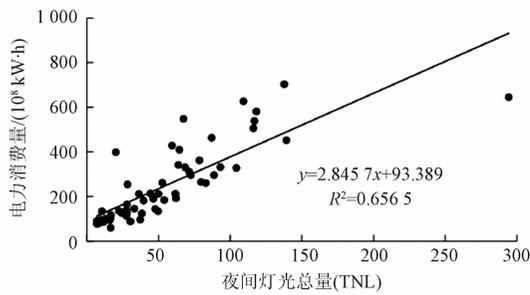
$$ECP_i = \begin{cases} 3.001 1TNL_i + 66.08, & \text{明星城市} \\ 3.131 3TNL_i + 68.62, & \text{金牛城市} \\ 2.845 07TNL_i + 93.38, & \text{瘦狗城市} \\ 3.996 6TNL_i + 26.10, & \text{问号城市} \end{cases} \quad (7)$$



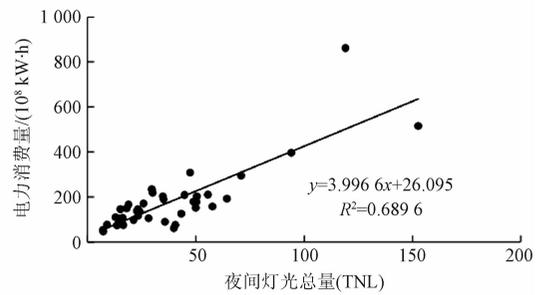
(a) 明星城市



(b) 金牛城市



(c) 瘦狗城市



(d) 问号城市

图 4 4 类城市电力消费量与灯光总量线性函数关系

根据式(7)分别估算统计明星、金牛、瘦狗、问号城市的电力消费量,并计算相对误差。4类城市的数量依次为35、45、55和41个。平均相对误差最小的是明星城市,仅为25.9%,金牛、瘦狗、问号3类城市的平均相对误差为27.3%、32.7%和32.5%。

3.3 估算结果对比

研究构建了两种模型估算电力消费量,一种是传统灯光模型,一种是波士顿夜光模型。为了更好地对比误差结果,将传统灯光模型的城市按照4类城市划分,分类统计相对误差,其估算对比结果如表1所示。将两种估算模型得到的相对误差结果进行分类,误差值低于25%的定为高精度结果,相对误差在25%~50%的定为中精度结果,而高于50%的定为低精度结果。分别统计3类估算结果的城市个数,并将两种估算方法做对比,结果如表2所示。

表1 平均相对误差结果对比

城市类型	城市数量	平均相对误差/%	
		传统灯光模型	波士顿夜光模型
明星城市	35	29.9	25.9
金牛城市	45	33.3	27.3
瘦狗城市	55	41.0	32.7
问号城市	41	36.9	32.5
平均相对误差	—	36.0	29.6

表2 三类精度城市数量结果对比

估算方法	高精度	中精度	低精度
传统灯光模型	95	50	31
波士顿夜光模型	102	43	31

由表1和表2可知,波士顿夜光模型估算结果平均相对误差更小,精度更高,并且模型的高精度城市和中精度城市均多于传统灯光模型,低精度城市则一样多。由此可见,前者模型精度明显优于后者。

在基于灯光数据的电力消费研究中,波士顿夜光模型运用统计学中的波士顿矩阵应用到城市分类中,将动态指标和静态指标相结合考虑,模拟估算结果比只考虑人口、GDP等社会经济因子动态指标更具有可靠性,有效降低了由于城市经济发展水平的差异性而造成的估算误差。同时利用夜光遥感数据,弥补了传统统计数据存在缺失的问题,能够体现电力消费空间上的异质性,更准确地表达人类经济活动。利用波士顿夜光模型进行城市的产业规划,预测该区域未来一段时期的主导产业,为

政府部门制定合理的能源分配政策以及绿色产业发展提供了一定的参考价值。

4 结语

以国内176个城市作为研究区域,建立了波士顿夜光模型。将第三产业作为主要分类依据,将所有城市分为明星城市、金牛城市、瘦狗城市、问号城市4类。估算结果表明,波士顿夜光模型的平均相对误差为29.6%,而传统夜光模型的平均相对误差为36.0%,整体精度有明显的提升。对比两种模型的估算结果,4类城市中,各类城市的平均相对误差均小于传统灯光模型,波士顿夜光模型的高精度城市和中精度城市数量均高于传统灯光模型,而低精度城市数量相同。显然,波士顿夜光模型的估算结果精度更高,效果更好,但仍存在一定的不足之处。电力消费量的增长受到多种因素的作用,除了城市经济发展水平、产业结构因素,还包括城市人口数量、居民富裕程度、社会科技水平和地理气候条件等因素,因此分类指标以及分类阈值存在多样化,所考虑到的分类因素缺乏全面性,需要结合实际情况适当调整和优化分类指标和阈值的选取。因此,如何更加全面地考虑影响因素从而提高电力消费估算精度,为社会能源的低碳可持续发展以及政府的决策提供参考,将是后续研究的重点。

参考文献

- [1] 王涛,冯志畅,罗健. 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[J]. 应用科学学报,2021,39(3):508-520.
- [2] 林伯强,杨梦琦. 碳中和背景下中国电力系统研究现状、挑战与发展方向[J]. 西安交通大学学报(社会科学版),2022,42(5):1-10.
- [3] 宋汝华,邹艳红. 基于夜间灯光数据的1995—2012年长江中游城市群电力耗能模拟分析[J]. 测绘与空间地理信息,2020,43(7):118-121.
- [4] HU T, HUANG X. A novel locally adaptive method for modeling the spatiotemporal dynamics of global electric power consumption based on DMSP-OLS nighttime stable light data[J]. Energy,2019,240:778-792.
- [5] 张莉,谢亚楠,屈辰阳. 基于K-Means城市分类算法的夜光遥感电力消费估算[J]. 国土资源遥感,2020,32(4):182-189.
- [6] 李博,徐敬海,梁英格. 基于夜光遥感的城市用电量预测研究[J]. 测绘与空间地理信息,2021,44(10):29-33.
- [7] 李熙,薛翔宇. 基于波士顿矩阵的夜光遥感电力消费估算方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2018,43(12):1994-2002.
- [8] LI S, CHENG L, LIU X. City type-oriented modeling electric power consumption in China using NPP-VIIRS night-

- time stable light data[J]. *Energy*, 2019, 189: 5360-5442.
- [9] 荀晓贤. 山东半岛蓝色经济区城市群发展的波士顿矩阵分析[J]. *江苏商论*, 2021 (7): 106-109.
- [10] 孙晓冰, 梁浩, 许昂. 基于修正后的波士顿矩阵的产业选择研究——以山东省绿色建筑产业为例[J]. *城市发展研究*, 2021, 28(1): 13-16.

Estimation of China's Electricity Consumption Based on NPP-VIIRS

FU Chenxuan

(School of Architectural and Surveying Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: Aiming at the problem of insufficient accuracy of night lighting data used to estimate urban power consumption, a Boston luminous model is proposed. 176 cities in mainland China was selected as the research area, the NPP-VIIRS night lighting products in 2019 were taken as the data source, the tertiary industry was taken as the classification basis of the Boston matrix, and the research area cities were divided into four categories which were star cities, Taurus cities, question mark cities and thin dog cities, and then the whole society electricity consumption was estimated. The estimation results show that this model is more accurate than the traditional lighting model. According to the size of the relative error, all cities are divided into three types which were high-precision, medium-precision and low-precision cities. The number of high-precision and medium-precision cities in the Boston luminous model is more than that of the traditional lighting model, while the number of low-precision cities is the same.

Keywords: nighttime light; electricity consumption; Boston matrix; regression model