



基于波士顿矩阵的夜光遥感电力消费估算方法

李熙^{1,2} 薛翔宇¹

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

2 地球空间信息技术协同创新中心,湖北 武汉,430079

摘要:针对夜光遥感影像估算社会经济参数在局部区域精度不足的问题,提出了基于波士顿矩阵的灯光指数法。该方法在传统灯光指数法的基础上引入波士顿矩阵,将社会经济参数中的电力消费量作为研究对象,以2015年可见光红外成像辐射仪(visible infrared imaging radiometer, VIIRS)年产品为主要数据源,选择中国大陆区域182个城市作为研究区域,利用波士顿矩阵将全部城市分为4类:明星城市、现金牛城市、问题城市与瘦狗城市。结果显示,基于波士顿矩阵的灯光指数法的平均相对误差为34.04%,小于传统灯光指数法的平均相对误差41.69%;且分类后的各类城市,除明星城市外,基于波士顿矩阵的灯光指数法的平均相对误差均小于传统灯光指数法,而两种方法对于明星城市电力消费估算的结果相差不大;将估算结果按照相对误差的大小分为高精度、中等精度与低精度3种,基于波士顿矩阵的灯光指数法高精度与中等精度的估算结果比例均高于传统灯光指数法,而低精度结果的比例则低于传统灯光指数法。由此可见,基于波士顿矩阵法的灯光指数法对于电力消费量的估算结果优于传统灯光指数法。

关键词:夜光遥感;波士顿矩阵;灯光指数;电力消费

中图分类号:P237

文献标志码:A

电力消费量是一种重要的社会经济参数,是衡量一个地区经济、电力发展情况的基本指标之一。目前,中国正处于高速发展阶段,经济快速发展导致电力消费量逐年增加,供需关系发生变化,一些贫困地区的电力供应出现短缺,而部分发达地区则出现电力过剩的现象。无论是电力短缺或电力过剩都可能会引起电力投资的过度反应,不利于社会经济发展^[1]。因此,获取准确的电力消费信息,对于经济快速发展、政府科学决策具有重要意义。

国内外已有多名学者研究了电力消费的模拟或估算方法。Tso等^[2]利用多种统计数据,如人口、国内生产总值(gross domestic product, GDP)等,与电力消费量建立线性、决策树、神经网络等模型,用来估算与预测电力消费量。虽然模拟结果的精度很高,但传统统计方法费时费力,效率较低,等待统计数据更新耗时较长,无法快速获取电力消费信息,也无法为政府的决策提供及时的参考。近年来,遥感技术飞速发展,以其直观、客观等特点被广泛应用于农业、林业、气象等领域中。

由于夜光遥感卫星能够捕捉到城镇的夜间灯光,且夜间灯光与人类的活动紧密相连,因此夜光影像可以广泛应用于社会经济参数的估算^[3-4]。主要的夜光遥感数据源包括DMSP/OLS(defense meteorological satellite program/operational linescan system)与NPP/VIIRS(national polar-orbiting partnership/visible infrared imaging radiometer)两种。Welch等^[5]利用DMSP/OLS数据发现灯光面积与能源消耗之间存在相关关系,证明了夜光影像在行政区域尺度上估算能源消耗量的可行性。Elvidge等^[6]发现DMSP/OLS夜间灯光与电力消费量存在着对数相关关系。但由于受到DMSP/OLS传感器设计的限制,DN(digital number)值的范围为0~63,数据存在过饱和及像元溢出的问题,导致其在应用过程中存在一些局限性,尤其是在城市研究中。因此,对DMSP/OLS数据饱和校正的方法研究也成为了热点。Lu等^[7]利用归一化差分植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)与归一化的DMSP/OLS数据构建的人居指数HIS(hu-

man settlement index) 法很好地解决了数据的饱和问题, 也验证了饱和校正后的夜光数据与 GDP、人口等社会经济参数具有更高的相关性。He 等^[8]同样利用 NDVI 数据对 DMSP/OLS 数据进行饱和校正, 并证明了饱和校正后的 DMSP/OLS 与校正前对比, 与电力消费量的相关性更强, 在全国的尺度下, 平均相对误差为 28.92%。Shi 等^[9]使用 DMSP/OLS 数据对“一带一路”沿线国家的电力消费量进行估算, 估算的相对误差在-17.69%~2.64%之间。

DMSP/OLS 数据已于 2013 年停止提供, 而 NPP/VIIRS 数据在近年来的应用更加广泛。NPP/VIIRS 数据比 DMSP/OLS 空间分辨率更高, 光谱分辨率提高到 16 bit, 没有数据饱和与像元溢出等问题。Li 等^[10]分别对比了在省尺度和地级市域尺度下, DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 两种数据对社会经济参数的估算能力, 证明了 NPP/VIIRS 的估算精度明显高于 DMSP/OLS 数据。在电力消费估算方面, 现阶段 VIIRS 数据的应用少于 DMSP 数据, 研究方法多为线性模型与二次多项式模型^[11-12]。Shi 等^[13]通过建立线性模型, 研究了中国大陆范围内 NPP/VIIRS 估算电力消费的精度, 在省域尺度下, 平均相对误差为 20.8%。发达省域的估算平均误差较小, 如江苏省为 3.5%, 浙江省为 1.9%; 而一些欠发达的省域, 如贵州省、西藏自治区, 相对误差大于 100%。虽然整体的平均误差较低, 但由于研究区的经济状况、发展模式不同, 经济发达的地区估算精度高, 经济欠发达地区估算精度低的现象。因此, 需要考虑到研究区的发展状况, 将不同发展状态的研究区分开, 分别建立模型, 进而避免出现上述误差过大的情况。如何将发展状态不同的区域进行分类, 是一个待解决的问题。

波士顿矩阵是经济学研究中常用的方法, 通过销售增长率和相对市场占有率两个指标, 将企业的产品分作 4 类, 分别为明星产品、现金牛产品、问题产品与瘦狗产品, 不同类别的产品采用不同的发展战略, 从而达到企业利益最大化的目的。将波士顿矩阵引入城市的研究中, 可以将城市分类。施建刚等^[14]对比了依据行政区域、城市人口规模与波士顿矩阵 3 种城市分类方法。波士顿矩阵法可以同时考虑相对指标与绝对指标, 既客观地融合了城市群周边大环境的发展现状, 又能横向比较不同城市发展水平。波士顿矩阵又将静态指标与动态指标相结合, 能够展现在城市化进程中不同类别城市的发展速率与发展趋势, 因此得

到的分类结果更加科学可靠。

本文选择中国大陆区域 182 个城市作为研究对象, 引入波士顿矩阵, 利用城镇人口增长率与相对城镇人口比例两个指标, 按照城市化水平, 将研究区中的地级市分类, 分别对不同类别的地级市建立线性模型, 以达到降低估算的相对误差, 提高局部估算精度的目的。

1 电力消费与灯光总量研究区域与数据

1.1 研究区域

本文选择可以在统计年鉴中查到的 2015 年电力消费量记录、城镇人口比例与城镇人口增长率的中国 17 个省、自治区、直辖市的共 182 个城市作为研究区, 如图 1 所示。研究区中北京、天津、上海等直辖市和河北、黑龙江、吉林、辽宁、江苏、江西、安徽、山东、浙江、河南、湖北、湖南、广东、广西等省区的地级市个数分别为 3、3、3、11、8、7、13、12、12、16、17、11、18、10、14、21、9 个。

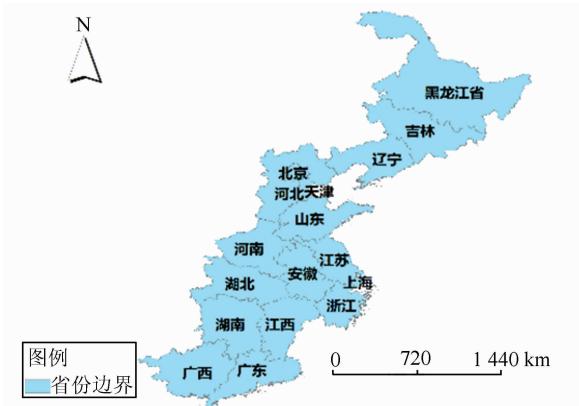


图 1 研究区域

Fig. 1 Study Area

1.2 夜光遥感影像

本文选择的夜光遥感影像是由美国国家海洋和大气管理局提供的 2015 年 VIIRS 年产品。VIIRS 是可见光红外辐射成像仪通过扫描式成像, 其数据可以用来测量云层与气溶胶的属性、海水颜色、海洋和地表温度等^[15]。VIIRS 共 22 个波段, 光谱范围为 0.3~14 μm, 其中 9 个可见光、近红外波段; 8 个短波红外、中波红外波段; 4 个热红外波段以及 1 个低照度环境下的可见光波段, 即 DNB 波段。该波段可捕捉到夜间灯光, 被广泛用于社会经济参量的估算与分析。2015 年的 VIIRS 年产品通过预处理, 去除了月光、杂散光、短暂灯光, 也消除了云和一些异常值的影响, 背景值

为0。与DMSP/OLS数据相比,VIIRS数据不存在过饱和现象,更适合社会经济参量的模拟与分析^[16]。

本文利用行政区域矢量数据裁剪得到研究区的VIIRS影像,并将其投影转换成分辨率为1 km的Albers等面积圆锥投影。研究区的VIIRS影像如图2所示。

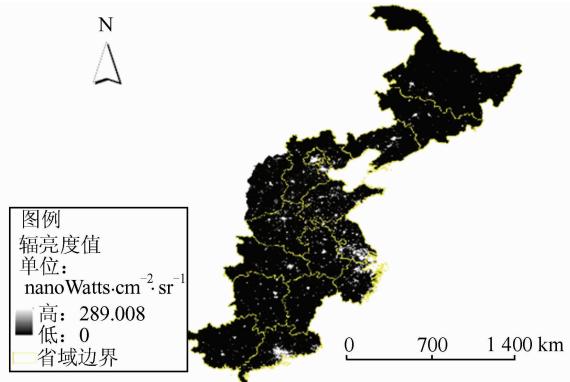


图2 研究区VIIRS夜光遥感影像

Fig. 2 VIIRS Nighttime Light Image for Study Areas

1.3 统计数据与辅助数据

选择的统计数据包括各地级市域2015年全社会电力消费数据(单位:亿kW·h)、城镇人口比例数据与城镇人口增长率数据,分别来源于17个省、自治区或直辖市的2016年统计年鉴与2015年统计年鉴。由于部分省区的统计年鉴中没有记录城镇人口比例(proportion of urban population, PUP)与城镇人口增长率(urban population growth rate, UPGR),需要单独进行计算,公式为:

$$PUP = \frac{P_{urban}}{P_{All}} \times 100\% \quad (1)$$

$$UPGR = \frac{P_{urban}^{2015} - P_{urban}^{2014}}{P_{urban}^{2014}} \times 100\% \quad (2)$$

式(1)、式(2)中,PUP为城镇人口比例; P_{urban} 为城镇人口数; P_{All} 为城市总人口数; UPGR为城镇人口增长率。

选择的辅助数据为国家基础地理信息中心提供的1:400万市级行政区域矢量数据,为便于研究,将其转换为Albers等面积圆锥投影,并通过裁剪得到研究区域的行政边界。

2 电力消费量与灯光总量研究方法

2.1 传统灯光指数

利用VIIRS影像,统计各个地级市的灯光总

量(nighttime light, NTL),计算式为:

$$NTL_n = \sum x_i \quad (3)$$

式中, x_i 为第 i 个像元的辐亮度值; n 为第 n 个地级市。

建立全部182个城市的电力消费量与灯光总量的线性模型,如图3所示。可以看出,在地级市的尺度上,电力消费与灯光总量的相关性较高。

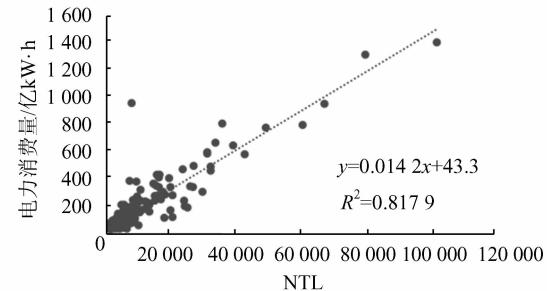


图3 城市的灯光总量与电力消费的相关关系

Fig. 3 Correlation Between NTL and Electric Power Consumption in Cities

2.2 波士顿矩阵与城市分类

2.2.1 波士顿矩阵基本原理

波士顿矩阵法又被称为市场增长率-相对市场份额矩阵法、四象限分析法等^[17]。该方法利用销售增长率和相对市场占有率两个指标,采用特定的阈值,将企业的全部产品分为4个不同的类型,如图4所示。明星产品是指高销售增长率、高市场占有率的产品,可以加大投资使其更迅速的发展;现金牛产品是指处于低增长率、高市场占有率阶段的产品,这类产品的销售量大,利润率高,可为企业提供资金;问题产品是指处于高增长率、低市场占有率阶段的产品,这类产品的发展潜力大,但可能在营销或管理上存在问题,应及时调整战略;而瘦狗产品又被称作衰退产品,是指处于低增长率、低市场占有率阶段的产品,这类产品的普遍特点是处于保本或亏损状态,应及时采取撤退战略^[18]。

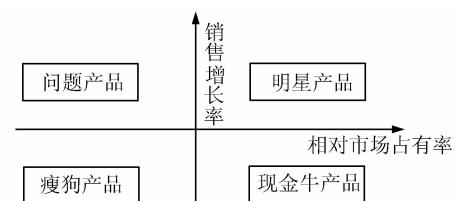


图4 波士顿矩阵

Fig. 4 The Boston Matrix

2.2.2 波士顿矩阵与城市

波士顿矩阵可以将企业中的不同产品分类,不同类别的产品采取不同的发展策略,以达到企

业利益最大化的目的。在基于夜光遥感影像的电力消费估算中,将城市的电力消费与灯光总量进行建模,一般而言,城市化程度高、经济发达地区估算精度高;而城市化程度低、经济欠发达地区估算精度较低,甚至出现很大的偏差。由此说明,城市化程度高与低的两类城市并不适合构建同一模型。改进的波士顿矩阵既将绝对指标与相对指标相结合,又同时考虑了动态指标与静态指标,分类结果比仅考虑人口或 GDP 等动态指标更加科学可靠。因此将其引入城市的研究中,将城市化程度不同的地级市进行分类。

衡量一个城市城市化进程的指标即为城镇人口占全部人口的比重。比重越高,城市化程度越高,经济水平越发达;反之,城镇人口所占比重越低,城市化程度越低,经济水平有待提高。参考裘丽岚^[19]对川渝城市群的研究指标,选择“城镇人口增长率”代替原波士顿矩阵中的“产品销售增长率”,“相对城镇人口比例”代替“相对市场占有率”,将全部城市分为明星城市、现金牛城市、问题城市与瘦狗城市 4 类。城镇人口增长率的计算见式(2),相对城镇人口比例(relative proportion of urban population, RPUP)为:

$$RPUP = \frac{PUP_i}{\overline{PUP}} \quad (4)$$

式中, PUP_i 为第 i 个地级市的城镇人口比例; \overline{PUP} 为 2015 年全国城镇人口比例。

统计测算 182 个城市 2015 年的城镇人口比例,并计算 2015 年各地级市的城镇人口增长率与相对城镇人口比例,如图 5 至图 7 所示,图中空值区为未查找到人口或全社会电力消费量数据记录的地区,如黑龙江省的大兴安岭地区等,文中暂不考虑。

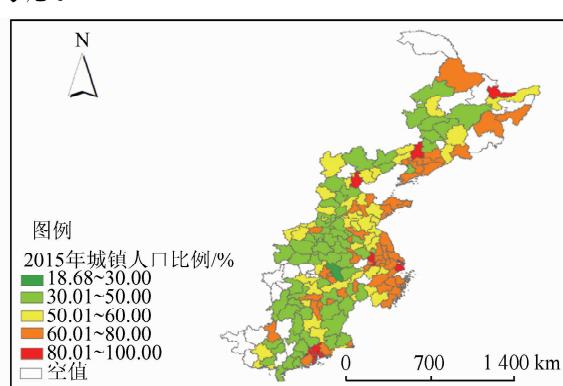


图 5 城镇人口比例

Fig. 5 Proportion of Urban Population

根据 2016 年中国统计年鉴,2015 年全国的城镇人口增长率为 2.9%,因此选择 2.9 作为城

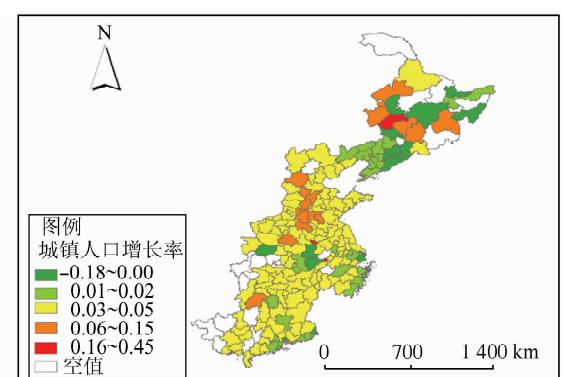


图 6 城镇人口增长率

Fig. 6 Growth Rate of Urban Population

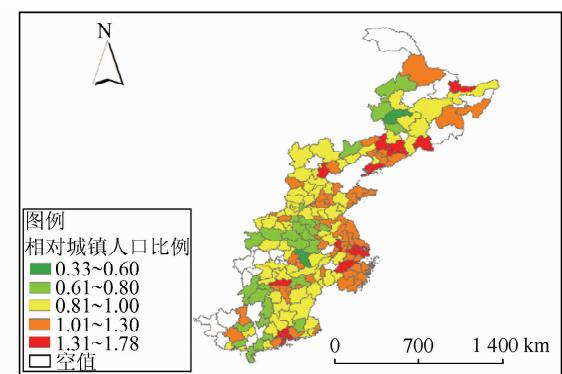


图 7 相对城镇人口比例

Fig. 7 Relative Proportion of Urban Population

镇人口增长率的阈值,选择 1 作为相对城镇人口比例的阈值。将 182 个城市按照波士顿矩阵分为 4 类,分别为明星城市(相对城镇人口比例大于 1,城镇人口增长率大于 2.9%)、现金牛城市(相对城镇人口比例大于 1,城镇人口增长率小于 2.9%)、问题城市(相对城镇人口比例小于 1,城镇人口增长率大于 2.9%)、瘦狗城市(相对城镇人口比例小于 1,城镇人口增长率小于 2.9%)。波士顿矩阵如图 8 所示。

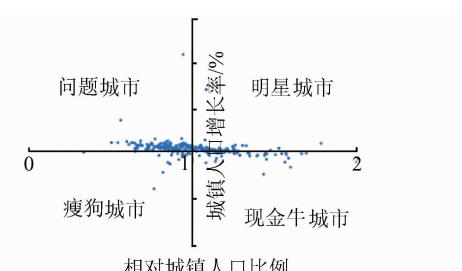


图 8 城市的波士顿矩阵

Fig. 8 Boston Matrix of the City

分类结果为:以深圳、武汉、长沙为代表共 26 个明星城市,该类城市的特点是相对城镇人口比例高,且城镇人口增长率也高,城市化程度较高,城市化进程仍在以较高的速率发展;以北京、上

海、天津为代表的共52个现金牛城市,特点是城镇人口比例高,但城镇人口增长率低,城市化程度高,但进展速率缓慢,已发展成为较成熟的城市;以保定、齐齐哈尔、洛阳为代表的共74个问题城市,特点是城镇人口增长率高,但相对城镇人口比例低,这类城市城市化程度较低,但发展速率快;以汕尾、韶关、黄冈为代表的30个瘦狗城市,特点是相对城镇人口比例低,城镇人口增长率也低,城

市化程度较低,且发展速率缓慢,人口外流,呈衰退型发展趋势。

将明星城市、现金牛城市、问题城市与瘦狗城市的NTL分别与相应的全社会电力消费量建立线性模型,如图9所示。现金牛城市的电力消费量与灯光指数的相关性最高;其次是明星城市;而问题城市与瘦狗城市的电力消费量与灯光指数的相关性不高。

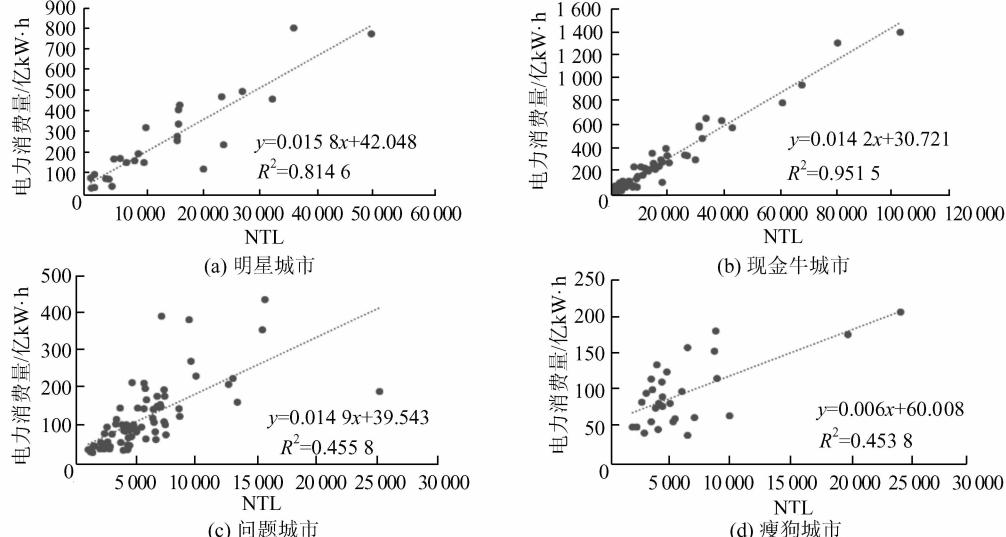


图9 4类城市的灯光总量与电力消费的相关关系

Fig. 9 Correlation Between NTL and Electric Power Consumption in Four Types of Cities

3 电力消费与灯光总量实验结果与分析

使用相对误差(relative error, RE)来评估电力消费估算结果,计算式为:

$$RE = \frac{|\text{EPC}_{\text{est}} - \text{EPC}_{\text{real}}|}{\text{EPC}_{\text{real}}} \times 100\% \quad (5)$$

$$\overline{RE} = \frac{\sum RE_i}{n} \quad (6)$$

式(5)、式(6)中,RE为相对误差; \overline{RE} 为平均相对误差; EPC_{est} 为估算得到的电力消费量; EPC_{real} 为真实电力消费量,即从统计年鉴中查找到的电力消费量; n 为属于同一类型的城巿的数目。

3.1 传统灯光数法电力消费量估算结果

对实验区内的182个城巿,建立灯光总量与电力消费的线性模型, $R^2=0.81$,计算式为:

$$\text{EPC}_i = 0.0142 \text{NTL}_i + 43.3 \quad (7)$$

式中, EPC_i 为第 i 个城市的实际电力消费量; NTL_i 为第 i 个城市的灯光总量。

根据式(5)与式(7)估算各个城市的电力消费量,并计算相对误差,结果如图10所示。182个

城市的估算结果的平均相对误差为41.69%;一些城市化程度高的大城市,如北京市的相对误差为5.54%,南京市的相对误差为1.28%,上海市的相对误差为6.97%;而一些城市化程度低的城市,如黑龙江省鸡西市、牡丹江市的相对误差均大于100%,且黑龙江省大部分城市的相对误差均大于75%。由此可见,虽然所有城市的电力消费与灯光总量的相关性高,但该线性模型对于经济发达城市与经济欠发达城市的估算精度有明显差异,经济发达城市的估算精度高,而经济欠发达城市的估算精度偏低。图10中,红色代表估算的相对误差大于75%的城市,大部分集中在黑龙江省、广西壮族自治区以及安徽省的亳州、宿州等城市化进程缓慢、经济欠发达的城市;浅绿色代表估算的相对误差小于25%的城市,深绿色代表估算误差小于10%的城市,而这两种颜色集中于我国的东南沿海地区以及中部城市化进程高、经济发达的地区。

3.2 基于波士顿矩阵的灯光指数法电力消费量估算结果

将182个不同类型的城巿分别建立灯光总量与电力消费的线性函数关系。明星城市、现金牛

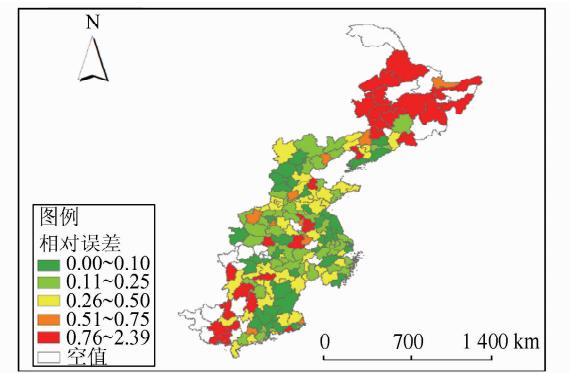


图 10 182 个城市的相对误差

Fig. 10 Relative Error of 182 Cities

城市、问题城市与瘦狗城市电力消费与灯光总和的线性模型为:

$$EPC_i = \begin{cases} 0.0158 NTL_i + 42.048, \text{ 明星城市} \\ 0.0142 NTL_i + 30.721, \text{ 现金牛城市} \\ 0.0149 NTL_i + 39.543, \text{ 问题城市} \\ 0.0060 NTL_i + 60.008, \text{ 瘦狗城市} \end{cases} \quad (8)$$

根据式(8)分别估算 4 个类型城市的电力消费量,并计算相对误差。现金牛城市的估算误差最小,52 个城市的相对平均误差为 24.24%;其次是 30 个瘦狗城市,平均相对误差为 33.16%;26 个明星城市以及 74 个问题城市的平均相对误差分别为 39.59% 与 39.34%。利用波士顿矩阵的灯光指数法估算 4 类城市的相对误差汇总情况如图 11 所示,可见,集中于东北部地区以及南部的广西壮族自治区内的高相对误差城市已有所减少。

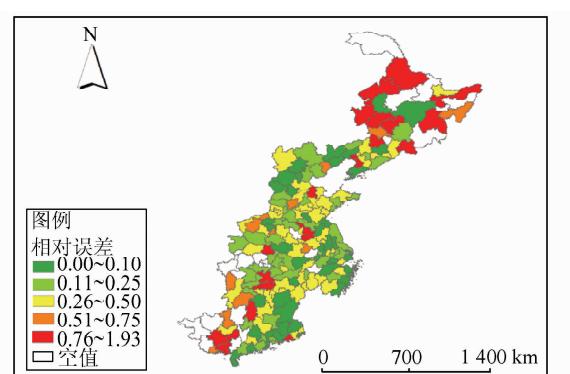


图 11 基于波士顿矩阵的灯光指数法相对误差

Fig. 11 Relative Error of Light Index Based on the Boston Matrix

3.3 估算结果对比

采用两种估算方法,方法一是将 182 个城市的灯光总量与电力消费量建立线性模型,记为传统灯光指数法;方法二是将 182 个城市按照波士顿矩阵原理分类后,再分别将灯光总量与电力消费量建模,记为基于波士顿矩阵的灯光指数法。

如表 1 所示的估算结果显示,后者估算精度更好。将传统灯光指数法中各城市的估算结果也按照波士顿矩阵原理分类,现金牛城市、明星城市、问题城市与瘦狗城市的平均相对误差分别为 30.64%、37.30%、47.12%、51.23%,182 个城市的平均相对误差为 41.69%。基于波士顿矩阵的灯光指数法估算结果中,4 类城市的平均相对误差分别为 24.24%、39.59%、39.34%、33.16%,182 个城市的平均相对误差为 34.04%。除了明星城市外,后者方法的估算误差普遍小于前者方法,而明星城市在两种估算方法中的估算误差相差不大。

表 1 两种研究方法平均相对误差对比

Tab. 1 Comparison of Average Relative Error Between the Two Methods

| 城市类型 | 城市个数 | 平均相对误差/% | |
|--------|------|----------|---------------|
| | | 传统灯光指数法 | 基于波士顿矩阵的灯光指数法 |
| 现金牛城市 | 52 | 30.64 | 24.24 |
| 明星城市 | 26 | 37.30 | 39.59 |
| 问题城市 | 74 | 47.12 | 39.34 |
| 瘦狗城市 | 30 | 51.23 | 33.16 |
| 平均相对误差 | — | 41.69 | 34.04 |

将估算结果的相对误差为 0%~25% 定义为高精度结果,25%~50% 定义为中等精度结果,而大于 50% 的估算误差定义为低精度结果。182 个城市的估算结果被分作 3 类,两种估算方法的优劣对比如表 2 所示。

表 2 两种研究方法精度对比/%

Tab. 2 Accuracy Comparison Between the Two Methods/%

| 估算方法 | 高精度 | 中等精度 | 低精度 |
|---------------|-------|-------|-------|
| 传统灯光指数法 | 47.03 | 27.57 | 25.41 |
| 基于波士顿矩阵的灯光指数法 | 50.00 | 29.89 | 20.11 |

将各个城市分别使用两种方法得到的相对误差作差值,记作 Dif 。计算式为:

$$Dif_i = RE1_i - RE2_i \quad (9)$$

式中, $RE1_i$ 为使用传统灯光指数法得到第 i 个城市的相对误差; $RE2_i$ 为使用基于波士顿矩阵的灯光指数法得到的相对误差。各城市的计算结果如图 12 所示,其中,蓝色代表基于波士顿矩阵的灯光指数法相较于传统灯光指数法的相对误差有所降低;黄色代表相对误差略微增加,增加幅度在 0~0.25 之间;而红色代表相对误差增加较多,幅度在 0.25~0.57 之间。经统计,182 个城市中,

有5个城市的相对误差增加幅度较大,分别为江西省萍乡市、河南省平顶山市、湖南省长沙市与岳阳市、广东省清远市;103个城市相对误差得到了减少,以东北地区的城市为例,其中,辽宁省铁岭市的相对误差降低了0.97,黑龙江省佳木斯市的相对误差降低了0.88,吉林省四平市的相对误差降低了0.43;而剩余的74个城市相对误差仅有小幅度的增加。

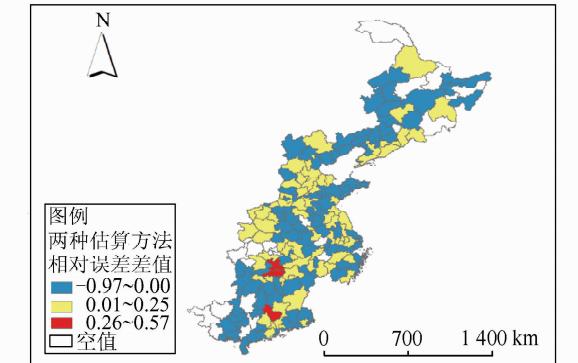


图 12 两种方法相对误差之差

Fig. 12 Difference in the Relative Error
Between the Two Methods

4 结语

本文以中国大陆区域的182个城市为实验区域,选择2015年VIIRS年产品为主要数据源,统计数据与行政区域为辅助数据,提出了将波士顿矩阵应用于电力消费估算的方法,即基于波士顿矩阵的灯光指数法。结果显示,对全部地级市进行建模估算后,基于波士顿矩阵的灯光指数法的平均相对误差为34.04%,而传统灯光指数法的平均相对误差为41.69%。选择城镇人口增长率和相对城镇人口比例两个指标,确定阈值分别为2.9与1,将182个城市按照波士顿矩阵原理分成4类。对比两种研究方法,4类城市除明星城市外,基于波士顿矩阵的灯光指数法的平均相对误差均小于传统灯光指数法,而对明星城市而言,两种方法的估算结果相差不大。将估算结果按照相对误差的大小分为高精度、中等精度与低精度3个等级,基于波士顿矩阵的灯光指数法的高精度与中等精度的结果比例均高于传统灯光指数法,而低精度结果所占比例小于传统灯光指数法。将两种方法得到的相对误差作差值,182个城市中,有103个城市的相对误差有所降低,74个城市的相对误差有小幅度增加,但变化不大,仅5个城市

的相对误差增加幅度较大,大于25%。显然,基于波士顿矩阵法的估算结果更优。

本文从提高估算电力消费精度的角度提出了基于波士顿矩阵的灯光指数法,但仍存在一定的不足之处。虽然基于波士顿矩阵的灯光指数法的估算精度整体优于传统的灯光指数法,但同样存在着20.11%的低精度估算结果与5个相对误差与传统灯光指数法相比有大幅度增加的城市。原因可能在于,在利用波士顿矩阵对城市分类时,虽然将相对指标与绝对指标相结合,但考虑的指标因素仍旧有限。影响一个城市的电力消费量的因素有很多,不仅包括经济实力、城市化水平,还有一些因素,如工业总产值、电力出厂价格指数、电力投资水平等。而本文则主要考虑了城市化与经济水平,工业生产总值等因素并未考虑在内,因此分类结果有待改进。李海斌等^[20]证明了波士顿矩阵有一定的局限性,存在着分析指标较少、指标分界点僵化等特点,需要结合实际情况进行必要的修正和补充。因此,如何改进波士顿矩阵,把各种影响因素考虑得更加全面,使得利用夜光遥感影像估算社会经济参数的精度得到进一步的提高,为社会的经济发展、政府的科学决策提供准确的参考,将是后续研究的重点。

参 考 文 献

- [1] Yuan Jiahai, Ding Wei, Hu Zhaoguang. Analysis on Cointegration and Co-movement of Electricity Consumption and Economic Growth in China[J]. *Power System Technology*, 2006, 30(9): 10-14(袁家海, 丁伟, 胡兆光. 电力消费与中国经济发展的协整与波动分析[J]. 电网技术, 2006, 30(9):10-14)
- [2] Tso G K F, Yau K K W. Predicting Electricity Energy Consumption: A Comparison of Regression Analysis, Decision Tree and Neural Networks[J]. *Energy*, 2007, 32(9):1 761-1 768
- [3] Li Deren, Li Xi. An Overview on Data Mining of Nighttime Light Remote Sensing[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(6):591-601(李德仁, 李熙. 论夜光遥感数据挖掘[J]. 测绘学报, 2015, 44(6):591-601)
- [4] Li Deren, Li Xi. Applications of Night-time Light Remote Sensing in Evaluating of Socioeconomic Development[J]. *Journal of Macro-Quality Research*, 2015, 3(4):1-8(李德仁, 李熙. 夜光遥感技术在评估经济社会发展中的应用? ——兼论其对“一带一

- 路”建设质量的保障[J]. 宏观质量研究, 2015, 3(4):1-8)
- [5] Welch R. Monitoring Urban Population and Energy Utilization Patterns from Satellite Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1980, 9(1):1-9
- [6] Elvidge C D, Baugh K E, Kihn E A, et al. Mapping City Lights with Nighttime Data from the DMSP Operational Linescan System[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1997, 63(6): 727-734
- [7] Lu D, Tian H, Zhou G, et al. Regional Mapping of Human Settlements in Southeastern China with Multisensor Remotely Sensed Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(9): 3 668-3 679
- [8] He C, Ma Q, Liu Z, et al. Modeling the Spatio-temporal Dynamics of Electric Power Consumption in Mainland China Using Saturation-Corrected DMSP/OLS Nighttime Stable Light Data[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2014, 7(12):993-1 014
- [9] Shi Kaifang, Yu Bailang, Huang Chang, et al. Exploring Spatiotemporal Patterns of Electric Power Consumption in Countries Along the Belt and Road [J]. *Energy*, 2018, 150: 847-859
- [10] Li X, Xu H, Chen X, et al. Potential of NPP-VIIRS Nighttime Light Imagery for Modeling the Regional Economy of China [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(6):3 057-3 081
- [11] Li Feng, Sun Guangtong, Wang Qiuling, 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(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)
- [12] He C, Li T, Yang Y, 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
- [13] Shi K, Yu B, Huang Y, et al. Evaluating the Ability of NPP-VIIRS Nighttime Light Data to Estimate the Gross Domestic Product and the Electric Power Consumption of China at Multiple Scales: A Comparison with DMSP-OLS Data [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(2):1 705-1 724
- [14] Shi Jiangang, Qiu Lilan. A Comparative Study of Urban Classification Methods in Urban Agglomerations—A Case Study of Urban Agglomerations in Chengdu Plain[J]. *The Urban Problems*, 2009(12): 19-22(施建刚, 裴丽岚. 城市群内城市分级方法比较研究——以成都平原城市群为例[J]. 城市问题, 2009(12):19-22)
- [15] Cao C, Xiong J, Blonski S, et al. Suomi NPP VIIRS Sensor Data Record Verification, Validation, and Long-term Performance Monitoring[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(20):11 664-11 678
- [16] Jing X, Shao X, Cao C, et al. Comparison Between the Suomi-NPP Day-Night Band and DMSP-OLS for Correlating Socio-Economic Variables at the Provincial Level in China[J]. *Remote Sensing*, 2015, 8(1):17
- [17] Wang Shuang. The Applications of the Boston Matrix[J]. *Enterprise Reform and Management*, 2001(8):30-31(王双. 波士顿矩阵的运用[J]. 企业改革与管理, 2001(8):30-31)
- [18] Zhao Jin. Applications of Boston Matrix Analysis in Practical Cases[J]. *Chinese High-tech Enterprises*, 2008(8):25(赵晋. 波士顿矩阵分析在实际案例中的运用[J]. 中国高新技术企业, 2008(8):25)
- [19] Qiu Lilan. Analysis of Strategic Development of Chuan-Yu Urban Agglomeration Based on Applied Rules of Boston Matrix[J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2010, 31(1): 74-80(裴丽岚. 基于波士顿矩阵及应用法则分析川渝城市群的战略发展[J]. 河北科技大学学报, 2010, 31(1):74-80)
- [20] Li Haibin, Wang Qionghai. Limitations, Modifications and Applications of Boston Matrix Analysis [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2009(33):199(李海斌, 王琼海. 波士顿矩阵分析法的局限、修正及应用[J]. 科技创新导报, 2009(33):199)

Estimation Method of Nighttime Light Images' Electric Power Consumption Based on the Boston Matrix

LI Xi^{1,2} XUE Xiangyu¹

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing,
Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China

Abstract: Aiming at the problem of inadequate accuracy of social and economic parameter estimation in local area by nighttime light images, a new light index method based on the Boston matrix is proposed. Based on the traditional light index method, this paper introduces the Boston matrix and establishes the linear model after classifying all the study areas. We choose the electric power consumption of social and economic parameters as the research object, with 2015 VIIRS product as the main data source, select a total of 182 prefecture-level cities in mainland China from the 17 provinces, autonomous regions and municipalities as research areas. By using the Boston matrix, all cities are divided into four categories: star city, cash cow city, problem city and thin-dog city, respectively. The results show that the average relative error of light index method based on the Boston matrix is 34.04%, which is less than 41.69% of the traditional light index method. In addition, the average relative error of the light index method based on the Boston matrix is smaller than that of the traditional light index method, except for the star cities. According to the relative error, the estimation results are divided into three types: high precision, medium precision and low precision. The proportion of the high and medium precision estimation results based on the Boston matrix is higher than that of the traditional light index method, while the proportion of the low-precision results is lower than that of the traditional light index method. It can be seen that the light index method based on the Boston matrix method is superior to the traditional light index method in the estimation of electric power consumption.

Key words: nighttime light; the Boston matrix; light index; electric power consumption

First author: LI Xi, PhD, associate professor, specializes in the remote sensing of nighttime light. E-mail: lixi@whu.edu.cn

Corresponding author: XUE Xiangyu, postgraduate. E-mail: xiangyuxue@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41771386; Headquarter Technology Project of State Grid Corporation of China, No. JYYKJXM(2017)011.