

引用格式:孙阳,刘新,苏亚聪,等.基于夜间灯光数据估算安徽省县级尺度城镇化水平[J].地球信息科学学报,2020,22(9):1837-1847. [Sun Y, Liu X, Su Y C, et al. County urbanization level estimated from nighttime light data in Anhui province[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(9):1837-1847.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190515

基于夜间灯光数据估算安徽省县级尺度城镇化水平

孙 阳¹,刘 新^{1*},苏亚聪¹,徐 爽¹,纪 兵³,张志杰²

1. 山东科技大学测绘科学与工程学院, 青岛 266590; 2. 复旦大学公共卫生学院, 上海 200032;
3. 海军工程大学导航工程系, 武汉 430033

County Urbanization Level Estimated from Nighttime Light Data in Anhui Province

SUN Yang¹, LIU Xin^{1*}, SU Yacong¹, XU Shuang¹, JI Bing³, ZHANG Zhijie²

1. College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
2. School of Public Health, Fudan University, Shanghai 200032, China;
3. College of Navigation Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract: Urbanization is an important indicator of regional economic development and social progress. Studying urbanization level is of great significance to urban scientific development and efficient decision-making for government. The night light data contains information on human activities and economic and social development, which makes up for the uncertainties and lags of the index method. It can more intuitively reflect the level of urbanization and provide new ideas for urbanization research. Existing studies have used night light data to analyze the macro-scale urbanization level, but because the time ranges of the DMSP-OLS data and NPP-VIIRS data are short, the time scales of the two data are discontinuous, and the spatial resolution is inconsistent with the radiation resolution, so it is mainly focused on the use of a kind of night light data to study the level of urbanization, and the study time span is short. In addition, although studies have shown that there is a strong correlation between large-scale socio-economic activities and nighttime lighting conditions, at a smaller scale, this correlation is greatly affected by regional economic development and the resolution of light data. There are higher requirements for estimation accuracy, so it is necessary to use actual data to prove the rationality of using night light data to estimate county-level urbanization levels. This paper uses DMSP-OLS and NPP-VIIRS night light data to estimate the county-level urbanization level in Anhui Province from 2006 to 2015, and provides theoretical support for night light data in the study of long-term serial urbanization. First, calculate the average night light index of DMSP-OLS and NPP-VIIRS respectively, and take the NPP-VIIRS light index as the independent variable and the DMSP-OLS light index as the dependent variable. Fit and establish the corresponding relationship between the two types of lighting data, and obtain the DMSP-OLS average night light index of each district and county in Anhui Province from 2006 to 2015. Then urbanization indicators are selected from the four aspects of population, economy, social life and agricultural mechanization, using analytic hierarchy process to calculate the level of urbanization based on statistical data. Finally, the correlation and linear

收稿日期:2019-09-11;修回日期:2019-11-20.

基金项目:国家自然科学基金项目(41774001、41774021、41874091、81673239、81973102)。 [**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41774001, 41774021, 41874091, 81673239, 81973102.]

作者简介:孙 阳(1994—),男,硕士生,山东青岛人,主要研究方向为空间数据挖掘与应用。E-mail: 845559075@qq.com

*通讯作者:刘 新(1969—),女,博士后,副教授,山东泰安人,研究方向为空间数据挖掘与应用。E-mail: xinliu1969@126.com

regression analysis between light index and urbanization level based on statistical data is analyzed to show the consistency of time and space distribution of light intensity and urbanization level based on statistical data in all districts and counties of Anhui Province. The results show that the average nighttime light index highly correlates to urbanization level based on statistical data at the county level with the correlation coefficient of 0.91 ($P < 0.05$) and the coefficient of determination of linear regression of $R^2 = 0.82$. The spatial and temporal distribution of the light index and the urbanization level based on statistical data are basically the same. Spatially, the overall urbanization level in Anhui Province is unevenly distributed, showing a pattern of high in east and low in west; temporally, the urbanization level from 2006 to 2015 showed year by year. The urbanization level of developed urban areas such as Hefei City and Maanshan City is growing faster, while less developed areas such as Huoqiu County and Shou County are growing slowly.

Key words: nighttime light data; urbanization; analytic hierarchy process; correlation analysis; linear regression analysis

***Corresponding author:** LIU Xin, E-mail: xinliu1969@126.com

摘要: 城镇化是地区经济发展和社会进步的重要标志,研究城镇化水平对城镇科学发展和政府高效决策具有重要意义。夜间灯光数据包含了人类活动和经济社会发展等信息,弥补了指标法的不确定性和滞后性等不足,可以更加直观地反映城镇化水平,为城镇化研究提供了新的思路。现有的研究,已经有用夜间灯光数据分析宏观尺度的城镇化水平,但由于DMSP-OLS数据和NPP-VIIRS数据的时间范围均较短,且2种数据的时间尺度不连续,且空间分辨率和辐射分辨率不一致,因此目前主要集中于使用一种夜间灯光数据研究城镇化水平,且研究的时间跨度较短。此外,虽然已有研究表明,大尺度的社会经济活动与夜间光照情况有较强的相关关系,但在较小尺度下,这种相关性受地区经济发展以及灯光数据分辨率的影响较大,对估算精度有更高的要求,因此需要使用实际数据证明使用夜间灯光数据估算县级城镇化水平的合理性。本文使用DMSP_OLS和NPP_VIIRS夜间灯光数据,估算了2006—2015年安徽省县级尺度城镇化水平,为夜间灯光数据在长时间序列的城镇化研究中提供理论支撑。首先分别计算DMSP-OLS和NPP-VIIRS平均夜间灯光指数,以NPP-VIIRS灯光指数为自变量,以DMSP-OLS灯光指数为因变量,对2012年和2013年的2种灯光指数年数据进行曲线拟合,建立2种灯光数据的对应关系,得到2006—2015年安徽省各区县的DMSP-OLS平均夜间灯光指数;然后从人口、经济、社会生活和农业机械化4个方面选取城镇化指标,使用层次分析法计算基于统计数据的城镇化水平;最后将灯光指数与基于统计数据的城镇化水平进行相关性分析和线性回归分析,讨论了安徽省各区县灯光指数和基于统计数据的城镇化水平的时空分布的异同点,分析了同时使用两种灯光指数估算长时间序列城镇化水平的合理性。研究结果显示,灯光指数和基于统计数据的城镇化水平在县级尺度上具有高度相关性,相关系数为0.91 ($P < 0.05$),线性回归的拟合优度 $R^2 = 0.82$ 。灯光指数和基于统计数据的城镇化水平的时空分布基本一致,空间上,安徽省城镇化水平整体分布不均衡,呈现出东高西低的规律;时间上,2006—2015年城镇化水平呈现逐年增长的趋势,合肥市辖区、马鞍山市辖区等发达城区的城镇化水平增长速度较快,而霍丘县、寿县等经济欠发达地区增长较缓慢。

关键词: 夜间灯光数据;城镇化;层次分析法;相关性分析;线性回归分析

1 引言

城镇化是一个国家或地区的人口由农村向城镇转移、农村地区逐步演变为城镇地区的过程,同时也是人民生活方式、生产力水平和生活质量转变和提升的过程^[1]。近几十年来,我国经历了快速的城镇化进程,城镇数量和规模迅速增加,城镇化发展速度达到了前所未有的水平^[2]。城镇化是社会经济发展的必然趋势,研究城镇化水平对城镇科学发展和政府高效决策具有重要意义。

传统的城镇化评价方法使用的是社会经济统计数据,分为单一指标法和复合指标法2种^[3]。单

一指标法是指选择对城镇化表征意义最强且便于统计的单一指标来衡量某一地区的城镇化水平^[4]。单一指标法主要有2种:①人口城镇化率,即城镇人口占常住总人口的比例,该方法简单实用,直接反映了人口向城镇聚集的程度,是目前为止时空可比性最强的指标;②土地利用指标,即农业用地转变为城镇用地的比例^[5]。复合指标法是选取能反映城镇各方面特征的多个指标,并通过加权求和的方式计算出一个综合值,作为一个地区城镇化的水平^[6]。选取指标时,遵循代表性、系统性、独立性、可操作性和动态性等原则^[6]。

尽管基于统计数据的方法可以从多个方面全

方位评价城镇化水平,但在较小尺度的研究中,往往存在统计数据缺失的情况。遥感技术的发展,为城镇化的研究提供了新的思路。DMSP-OLS (Defense Meteorological Satellite Program Operational Linescan System)夜间灯光数据和 NPP-VIIRS(National Polar-Orbiting Partnership's Visible Infrared Imaging Radiometer Suite)夜间灯光数据,能够反映夜间城镇灯光甚至小规模居民地、车流等发出的低强度灯光,包含了人类活动和经济社会发展等信息,可以更加直观地反映城镇化水平^[7-8]。与传统的社会经济统计数据相比,夜间灯光数据具有时效性强、经济性好、综合性好等优点,在城镇化研究中具有很高的应用价值^[9]。直接应用灯光数据代替传统的统计数据来估算、分析城镇化动态发展,更加客观、简便。此外,对于缺乏统计数据的地区,同样可通过计算灯光指数来估算其城镇化水平。然而 DMSP-OLS 夜间灯光数据的时间范围是 1992—2013 年,而 NPP-VIIRS 夜间灯光数据的时间范围是 2012 年至今,2 种灯光数据在时间尺度上不连续,因此使用夜间灯光数据进行长时间序列的城镇化研究成为了一个难题。此外,虽然已有研究表明,大尺度的社会经济活动与夜间光照情况有较强的相关关系,但在较小尺度下,这种相关性受地区经济发展以及灯光数据分辨率的影响较大,对估算精度有更高的要求。

因此,本文同时使用 DMSP-OLS 和 NPP-VIIRS 夜间灯光数据,以 2006—2015 年安徽省县级尺度为例,估算城镇化水平。本文共进行了以下 4 部分研究:① 分别计算 DMSP-OLS 和 NPP-VIIRS 平均夜间灯光指数,然后以 NPP-VIIRS 灯光指数为自变量,以 DMSP-OLS 灯光指数为因变量,对 2012 年和 2013 年的 2 种灯光指数年数据进行曲线拟合,建立 2 种灯光数据的对应关系,得到 2006—2015 年安徽省各区县的平均夜间灯光指数;② 从人口、经济、社会生活和农业机械化 4 个方面选取城镇化指标,使用层次分析法计算基于统计数据的城镇化水平;③ 将灯光指数与基于统计数据的城镇化水平进行相关分析和线性回归分析,在县级尺度上分析这一方法的可行性;④ 将安徽省各区县灯光强度和基于统计数据的城镇化水平的时空分布进行对比,分析研究结果的合理性。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

安徽省位于中国大陆东部,地理位置 114°54'E—

119°37'E, 29°41'N—34°38'N, 地处长江、淮河中下游,长江三角洲腹地,东西宽约 450 km,南北长约 570 km,土地面积 13.94 万 km²,全省辖 16 个地级市,105 个县级行政区划单位(其中 43 个市辖区、7 个县级市、54 个县),安徽省的地理位置和行政区划如图 1 所示。



图 1 安徽省地理位置和行政区划

Fig. 1 Geographical location and administrative division of Anhui Province

据安徽统计年鉴的统计资料显示^[10],截至 2015 年底,安徽全省户籍人口 6949.1 万人,人口城镇化率 50.5%,自然增长率 6.98%;地区生产总值 22 005.6 亿元,其中:第一产业产值 2456.7 亿元,第二产业产值 11 342.3 亿元,第三产业产值 8206.6 亿元;全年固定资产投资 23 965.6 亿元,社会消费品零售总额 8908 亿元,常住居民人均可支配收入 18 363 元;全省有医疗卫生机构 24 936 个,医疗卫生机构床位 26.8 万张,有各类提供住宿的社会服务机构 1272 个,床位 15.5 万张。

2.2 数据来源

从美国国家海洋和大气管理局(<http://ngdc.noaa.gov/eog/download.html>) 获取 2006—2013 年 DMSP-OLS 夜间灯光数据和 2012—2015 年 NPP-VIIRS 夜间灯光数据。DMSP-OLS 数据采用 WGS1984 坐标系,空间分辨率为 1 km,时间分辨率为年,辐射分辨率为 6 bit,该数据消除了闪电、天然气燃烧、火光和渔船等短暂灯光的影响^[11];NPP-VIIRS 数据采用 WGS1984 坐标系,空间分辨率为

500 m,时间分辨率为月,辐射分辨率为12 bit,该数据并未消除火光、渔船灯光等短暂灯光的影响^[12]。

统计数据来源于统计年鉴。统计年鉴中的指标涵盖了人口、经济、社会生活和农业机械化等各个方面。统计年鉴中数据的时间范围是2006—2015年,空间范围为安徽省,时间分辨率为年,空间分辨率为县级。数据分为县域和市辖区二部分。县域数据来源为《中国县域统计年鉴》^[13]和《安徽统计年鉴》^[10],其中,《中国县域统计年鉴》中的县级指标有:年末总人口、人口密度、每万人城镇非私营单位就业人员数、每万人普通中学在校学生数、每万人小学在校学生数、每万人拥有卫生机构床位数、人均GDP、第二产业产值比重、第三产业产值比重、规模以上工业总产值、固定资产投资、居民储蓄存款余额、金融机构贷款余额等;《安徽统计年鉴》中的县级指标有:非农业人口、地方财政收入、地方财政支出、就业人员平均工资、社会消费品零售总额、农业机械总动力、排灌机械数、耕地面积等。市辖区数据来源为《中国城市统计年鉴》^[14],指标的空间范围是市辖区,《中国城市统计年鉴》中的指标涵盖了《中国县域统计年鉴》和《安徽统计年鉴》中的指标。

从国家基础地理信息中心获取安徽省县级行政边界数据。

2.3 数据预处理

首先对NPP-VIIRS数据进行去噪处理。由于NPP-VIIRS数据没有滤除火光、气体燃烧等短暂灯光的影响,存在大量的背景噪声,因此本文结合前

人已有的研究^[15],首先提取DMSP-OLS夜间灯光数据像元值非零区域作为掩膜,将掩膜以外的区域作为噪声部分,提取NPP-VIIRS夜间灯光数据;然后选择城镇中心区域夜间灯光强度最高值作为最大灯光强度阈值,对非城镇中心区域超过最大阈值的灯光强度直接赋值为该地市城区的最大灯光强度阈值。

然后对2006—2013年DMSP-OLS和2012—2015年NPP-VIIRS夜间灯光数据进行裁剪和投影变换处理。使用安徽省行政边界数据对两种夜间灯光数据进行裁剪,得到安徽省的夜间灯光数据。为避免影像网格形变带来的影响,将影像坐标系转换为兰伯特投影。图2为处理后的安徽省2013年DMSP-OLS夜间灯光数据和2013年12月NPP-VIIRS夜间灯光数据。

3 计算与分析方法

3.1 平均夜间灯光指数

平均夜间灯光指数(Average Nighttime Light Index, ANLI)^[16]计算公式为:

$$ANLI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DN_i \quad (1)$$

式中:ANLI为平均夜间灯光指数, DN_i 为区域内第*i*个像元的亮度值; n 为区域内像元总数。

DMSP-OLS数据的时间分辨率为年,而NPP-VIIRS时间分辨率为月,因此采用平均值法将NPP-VIIRS月数据转换为年平均数据。计算公式如下:

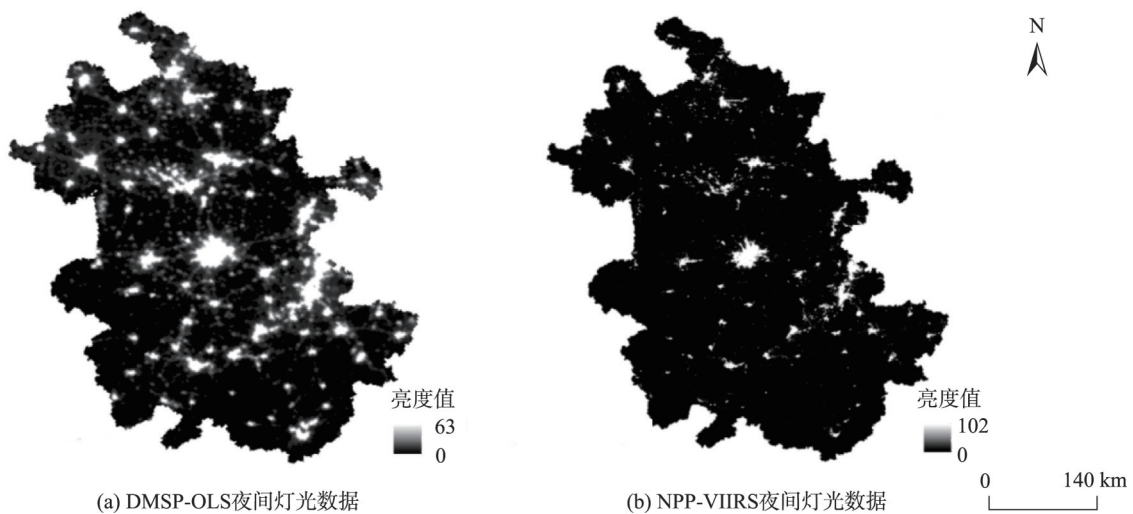


图2 安徽省2013年DMSP-OLS夜间灯光数据和2013年12月NPP-VIIRS夜间灯光数据

Fig. 2 DMSP-OLS nighttime light data in 2013(a) and NPP-VIIRS nighttime light data in December 2013(b) of Anhui Province

$$\overline{ANLI} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m ANLI_i \quad (2)$$

式中： \overline{ANLI} 为年平均灯光指数； $ANLI_i$ 为第*i*个月的灯光指数；*m*为月数且*m*=12。

首先按照式(1)计算得到2006—2013年的DMSP-OLS年平均夜间灯光指数，按照式(1)和式(2)计算得到2012—2015年的NPP-VIIRS年平均夜间灯光指数。然后以NPP-VIIRS灯光指数为自变量，以DMSP-OLS灯光指数为因变量，对2012年和2013年的2种灯光指数年数据进行曲线拟合，建立2种灯光数据的对应关系。拟合得到三次多项式 $y=0.018x^3-0.677x^2+9.183x+2.750$ ($F=3.252$ ，显著性检验 $P<0.001$ ， $R^2=0.957$)。拟合模型如图3所示。利用建立的拟合模型，将2012—2015年的NPP-VIIRS灯光指数转化为DMSP-OLS灯光指数。

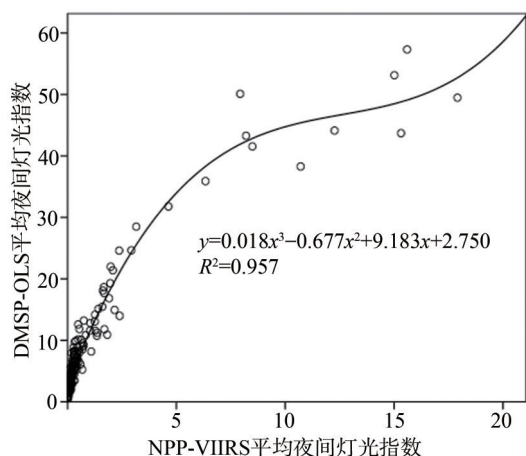


图3 NPP-VIIRS和DMSP-OLS平均夜间灯光指数的曲线拟合

Fig. 3 Curve fitting of NPP-VIIRS and DMSP-OLS average nighttime light index

3.2 基于统计数据的城镇化水平

3.2.1 城镇化指标的选取

采用复合指标法，从安徽省统计数据：人口、经济、社会生活和农业机械化4个方面，选择了19个能充分反映城镇化发展水平的指标。为了使不同地区之间的指标具有可比性，部分指标采用了统计数据的比重值、人均值和单位面积上的数值，如非农业人口比重(非农业人口数除以总人口数)、人均社会消费品零售总额(社会消费品零售总额除以总人口数)、单位耕地面积农业机械总动力(农业机械总动力除以耕地面积)和单位耕地面积排灌机械数(排灌机械数除以耕地面积)。根据独

立性和代表性原则，如果2个指标间相关性较高，则选取代表性高的指标。城镇化水平综合评价指标体系如表1所示。

3.2.2 层次分析法计算权重

层次分析法的主要求解步骤如下^[17]：

(1)对同一层次中各指标的相对重要性进行两两比较，并按1~9标度法量化各指标，分别构建准则层和指标层的判断矩阵；

(2)使用方根法计算各判断矩阵的最大特征值和特征向量；

(3)利用一致性指标、随机一致性指标和一致性比率做判断矩阵的一致性检验，若通过一致性检验，特征向量即为权向量，若没有通过一致性检验，返回步骤(1)；

(4)计算所有指标相对于总目标的权重。

层次分析法的具体计算步骤参照常建娥^[18]和邓雪等^[19]的相关文献。

基于统计数据的城镇化水平综合评价体系中19个指标的权重计算结果如表1所示。其中，非农业人口比重、人均GDP、每万人拥有卫生机构床位数所占权重较高，而金融机构贷款余额、人均社会消费品零售总额、就业人员平均工资、单位耕地面积排灌机械数所占权重较低。

3.2.3 计算基于统计数据的城镇化水平

首先对城镇化指标的原始数据按最大最小值法作标准化处理，计算公式为：

$$x^* = \frac{x - \min}{\max - \min} \quad (3)$$

式中： x^* 代表某指标的标准化值； x 代表该指标的原始数据； \max 代表该指标最大值； \min 代表该指标最小值。

然后，将所有指标进行加权求和，计算城镇化水平。计算公式为：

$$y = \sum_{i=1}^n w_i x_i^* \quad (4)$$

式中： y 为城镇化水平； w_i 为第*i*个指标的权重； x_i^* 为第*i*个指标的标准化值； n 为城镇化指标个数。

3.3 灯光指数与城镇化水平的相关性分析

3.3.1 相关系数计算

为了分析使用灯光指数估算城镇化水平的可行性，本文使用皮尔森相关系数对2006—2015年安徽省各区县的平均夜间灯光指数和基于统计数据的城镇化水平进行相关性分析，计算二者的相关系

表1 基于统计数据的城镇化水平综合评价指标体系

Tab. 1 Comprehensive evaluation index system of urbanization based on statistical data

| 准则层 | 指标层 | 权重 | 指标含义 |
|---------|-----------------|-------|--------------|
| 人口指标 | 非农业人口比重 | 0.152 | 代表人口城镇化水平 |
| | 人口密度 | 0.076 | 代表人口聚集程度 |
| | 每万人普通中学在校学生数 | 0.038 | 代表教育水平 |
| | 每万人小学在校学生数 | 0.038 | 代表教育水平 |
| | 每万人城镇非私营单位就业人员数 | 0.076 | 代表就业水平 |
| 经济指标 | 人均GDP | 0.130 | 代表经济发展水平 |
| | 第二产业产值占GDP比重 | 0.037 | 代表产业结构组成 |
| | 第三产业产值占GDP比重 | 0.071 | 代表产业结构组成 |
| | 规模以上工业总产值 | 0.037 | 代表经济发展水平 |
| | 固定资产投资 | 0.035 | 代表经济发展水平 |
| | 地方财政收入 | 0.035 | 代表政府提供公共服务能力 |
| | 地方财政支出 | 0.035 | 代表政府提供公共服务能力 |
| 社会生活指标 | 居民储蓄存款余额 | 0.036 | 代表居民经济状况 |
| | 金融机构贷款余额 | 0.011 | 代表居民消费状况 |
| | 人均社会消费品零售总额 | 0.019 | 代表居民消费状况 |
| | 每万人拥有卫生机构床位数 | 0.107 | 代表医疗卫生状况 |
| | 就业人员平均工资 | 0.019 | 代表政府财政实力 |
| 农业机械化指标 | 单位耕地面积农业机械总动力 | 0.032 | 代表农业机械化水平 |
| | 单位耕地面积排灌机械数 | 0.016 | 代表农业机械化水平 |

数。然后以平均夜间灯光指数为自变量,以基于统计数据的城镇化水平为因变量,建立线性回归模型,进一步分析灯光指数和基于统计数据的城镇化水平的关系。

3.3.2 时空分布分析

为了直观地分析灯光指数和基于统计数据的城镇化水平的空间分布的一致性,本文使用 ArcGIS 10.2 软件中的 Jenks 自然断裂分类法(组间方差最大、组内方差最小),指定字段为平均夜间灯光指数,选择专题图的颜色为黑白渐变色,指定类别数量为 5,将平均夜间灯光指数分为 5 组:极低(0.6038~4.3791)、低(5.0093~9.9088)、中(10.1598~19.2796)、高(24.5906~44.1288)、极高(49.4842~57.3241)。然后指定字段为基于统计数据的城镇化水平,用同样的方法将城镇化水平按高低分为 5 组:极低(0.1036~0.1349)、低(0.1352~0.1748)、中(0.1750~0.3034)、高(0.3396~0.4173)、极高(0.4963~0.7186)。根据以上分组,分别对 2013 年安徽省平均夜间灯光指数和基于统计数据的城镇化水平的空间分布进行展示,如图 4 所示。

为了分析安徽省县级城镇化水平和灯光指数的时间分布的一致性,本文分别从城镇化水平极

高、高、中、低、极低这 5 组中,每组各选择 2 个区县,分析这些地区 2006、2009、2012、2015 年的基于统计数据的城镇化水平和平均夜间灯光指数变化情况,如图 5 所示。

4 结果分析与讨论

4.1 灯光指数与基于统计数据的城镇化水平的相关性分析

对灯光指数与基于统计数据的城镇化水平进行相关性分析,二者的相关系数为 0.91,显著性检验 $P < 0.05$ 。线性回归分析结果如图 6 所示。回归方程 $y = 0.008x + 0.102$ ($F = 3561.996$, 显著性检验 $P < 0.05$, $R^2 = 0.82$)。

4.2 安徽省县级城镇化水平分析

灯光指数与基于统计数据的城镇化水平的空间分布结果如图 4 所示。通过对比发现,2 种方法计算结果的相同点是:安徽省城镇化水平的空间分布不均衡,整体呈现出东高西低的规律;城镇化水平高的区县较少,而城镇化水平低的区县较多。其中,城镇化水平极高的地区是合肥市辖区、芜湖市

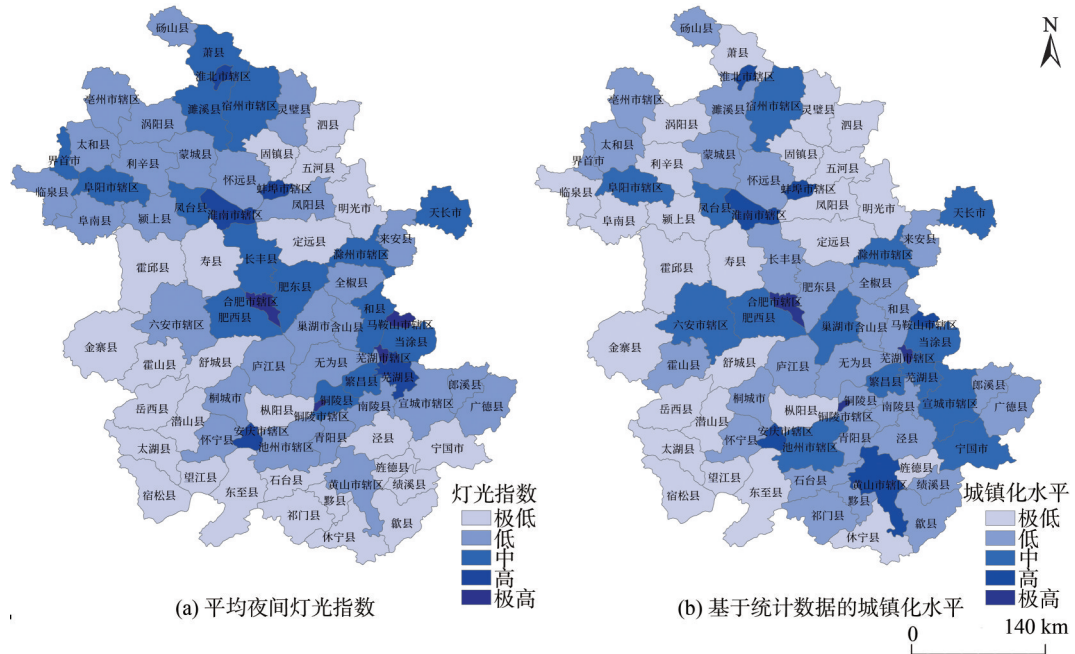


图4 2013年安徽省平均夜间灯光指数和基于统计数据的城镇化水平空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of average nighttime light index and urbanization level based on statistical data of Anhui Province in 2013

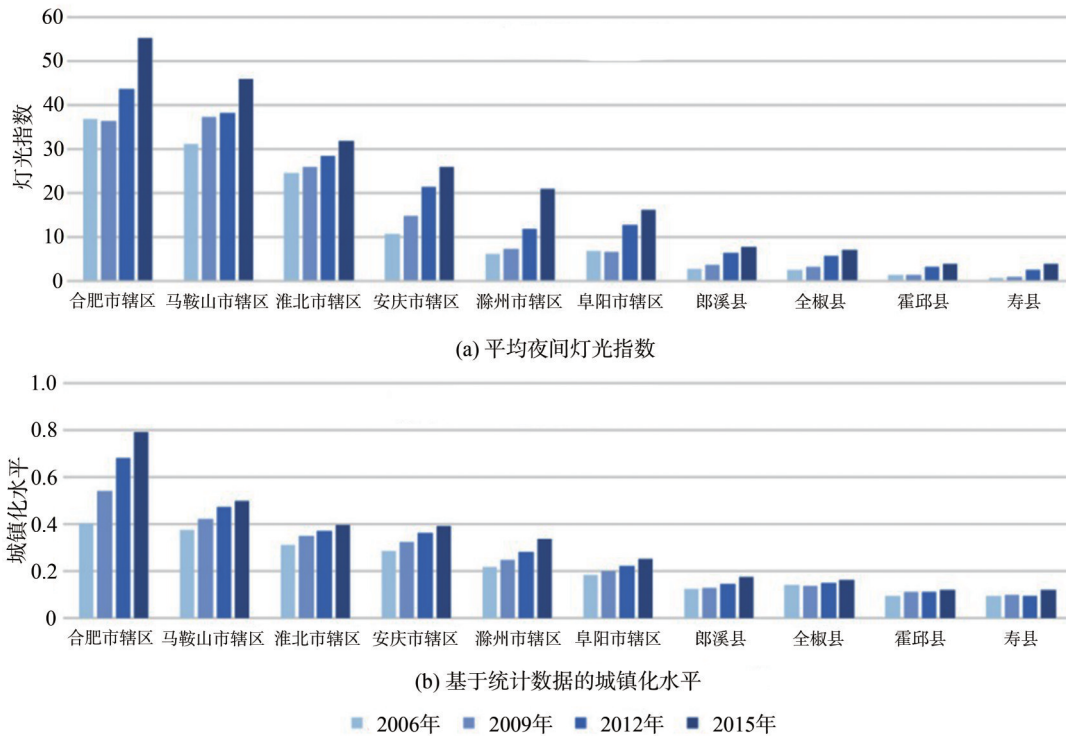


图5 2006—2015年安徽省部分区县平均夜间灯光指数和基于统计数据的城镇化水平

Fig. 5 Average nighttime light index and urbanization level based on statistical data of some districts and counties of Anhui Province from 2006 to 2015

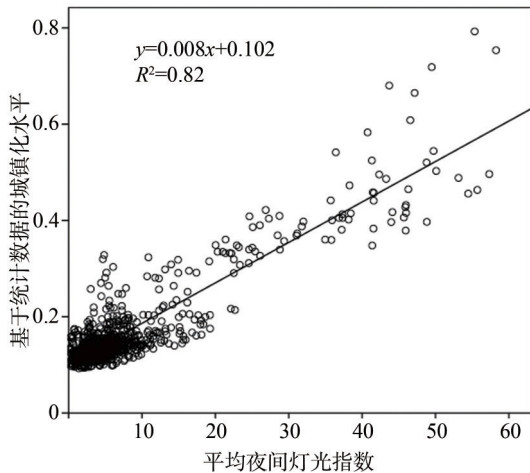


图6 平均夜间灯光指数和基于统计数据的城镇化水平的线性回归分析

Fig. 6 Linear regression analysis of average nighttime light index and urbanization level based on statistical data

辖区、铜陵市辖区；城镇化水平高的地区主要有淮南市辖区、马鞍山市辖区、蚌埠市辖区等、安庆市辖区等；城镇化水平中等的地区包括天长市、滁州市辖区、宿州市辖区等；城镇化水平较低的地区有庐江县、无为县、桐城市、蒙城县等；城镇化水平极低的地区主要分布在东北的五河县、泗县和西南的太湖县、岳西县、宿松县等地。此外，2种方法计算结果的不同点是：涡阳县、利辛县、濉溪县、萧县、临泉县、阜阳县、颍上县等西北地区，夜间灯光数据估算的城镇化水平高于统计数据计算的城镇化水平；石台县、祁门县、黟县、绩溪县、歙县、泾县、池州市辖区、黄山市辖区、宁国市等东南地区，夜间灯光数据估算的城镇化水平低于统计数据计算的城镇化水平。

灯光指数与基于统计数据的城镇化水平的时间分布结果如图5所示。通过对比发现，2种方法计算结果的相同点是：灯光指数和基于统计数据的城镇化水平均呈现逐年增长趋势，但各区县的增长速度不一致。其中，合肥市辖区、马鞍山市辖区等地区的城镇化水平增长速度较快，淮北市辖区、阜阳市辖区次之，而霍丘县、寿县等地区增长较缓慢。2种方法计算结果的不同点是：2009年夜间灯光数据估算的城镇化水平低于统计数据计算的城镇化水平。

4.3 讨论

(1)本研究的进展与意义。夜间灯光数据能够直观地反映人类社会活动和经济发展等信息，成为社会经济和城镇化研究的良好数据源，在宏观尺度

的城镇化研究中得到了广泛应用，如：城镇化水平评估^[20]、自然灾害受灾区域的监测与评估^[21]、城镇用地信息提取^[22]、GDP等社会经济参量的估算和预测^[23]、县级贫困评估^[24]、城镇消费潜力预测等^[25]。虽然利用夜间灯光数据估算城镇化水平的研究已经开展了很多，由于DMSP-OLS和NPP-VIIRS 2种灯光数据在时间尺度上不连续，且空间分辨率和辐射分辨率不一致，目前的研究主要使用单一的夜间灯光数据分析城镇化水平，且研究的时间跨度较短，鲜有同时使用2种灯光数据进行长时间序列的研究。如基于1992年和1996年的DMSP-OLS夜间灯光数据分别估算中国省级和县级尺度的城镇化水平，发现灯光指数和基于统计数据的城镇化水平有明显的正相关关系^[26]；基于2000、2004、2008、2012年的DMSP-OLS夜间灯光数据估算江西省11个地级市的城镇化水平，发现灯光指数和基于统计数据的城镇化水平有明显的正相关关系^[27]；基于2012年的NPP-VIIRS夜间灯光数据估算我国277个地级市的夜光总强度和平均强度，使用回归分析建立基于统计数据的城镇化指标和灯光强度的定量关系，发现夜间灯光强度与人口、国内生产总值、电力消耗和铺路面积4个城镇化指标之间存在较强的相关性^[28]；基于2013—2017年的NPP-VIIRS估算美国64个城市的城镇化水平，发现灯光强度和基于统计数据的城镇化水平有较强的正相关关系^[29]。

本文利用2012年和2013年的DMSP-OLS和NPP-VIIRS灯光数据，使用曲线拟合的方法，将2012—2015年的NPP-VIIRS灯光指数转化为DMSP-OLS灯光指数。然后使用皮尔森相关系数对1997—2015年各区县的平均夜间灯光指数和基于统计数据的城镇化水平进行相关性分析，以平均夜间灯光指数为自变量，以基于统计数据的城镇化水平为因变量，建立线性回归模型，在安徽省县级尺度上分析了使用夜间灯光数据估算城镇化水平的可行性，为夜间灯光数据在长时间序列的城镇化研究提供理论支撑。

(2)安徽省灯光指数和基于统计数据的城镇化水平的空间分布一致性。分析图5灯光指数和基于统计数据的城镇化水平空间分布图可以发现，灯光指数和基于统计数据的城镇化水平的空间分布基本一致，符合安徽2013年城镇化水平的实际分布情况。灯光指数极高的地区中，合肥作为安徽省的省会，是安徽的政治、经济、文化中心；芜湖市是皖南

区域中心城市,也是安徽沿江发展的重要阵地,有长江航运的天然优势,经济发展迅速;淮南市是皖北地区的老工业城市,资源丰富,交通发达,这些地区的城镇化水平极高。灯光指数高的地区中,马鞍山市和铜陵市等地区都是资源型城市,重工业发达,人均收入在安徽名列前茅,城镇化水平较高。灯光指数中等的地区,所辖腹地广阔,但缺乏中心城市的有效带动,城镇化水平中等。灯光指数较低的地区,农村众多,工业化水平落后,经济发展缓慢,城镇化水平偏低。灯光指数极低的地区,地处皖南山区,交通不便,资源开发不足,导致城镇化水平很低。涡阳县、利辛县、濉溪县、萧县、临泉县、阜阳县、颍上县等西北地区,虽然较为贫困,但煤炭资源丰富,采煤、热电力等工业较为发达,导致夜间灯光数据估算的城镇化水平偏高。石台县、祁门县、黟县、绩溪县、歙县、泾县、池州市辖区、黄山市辖区、宁国市等东南地区,地处皖南山区,地形复杂,对夜间灯光数据的辐射亮度产生了一定的影响,导致夜间灯光数据估算的城镇化水平低于统计数据估算的城镇化水平。

(3)安徽省灯光指数和基于统计数据的城镇化水平的分布一致性。分析图5基于统计数据的城镇化水平和夜间灯光指数的分布图可以发现,安徽省灯光指数和基于统计数据的城镇化水平的分布基本一致,符合安徽2006—2015年城镇化水平的实际发展规律。其中,合肥市等地区经济基础好,城镇化发展迅速,对应的灯光指数也迅速增加;滁州市等经济条件一般的地区,由于大城市带动了周边农村经济的发展,促进了资源的合理配置和产业结构优化,城镇化水平正在逐步提升,对应的灯光指数逐步增加;对于寿县等经济落后的地区,近年来政府出台了一系列促进城镇发展的政策和措施,加大扶持力度,使城镇化水平平稳增长,对应的灯光指数也有增长。除2009年的灯光指数偏低之外,其余年份的灯光指数与基于统计数据的城镇化水平具有一致性,都处于逐渐增长的趋势,说明本研究的结果是合理的。而2009年的灯光指数偏低,可能是由于OLS传感器在获取影像时并没有进行星上辐射校正,造成了同一个卫星传感器获取的连续不同年份的影像间像元DN值的异常波动。此外,由于DMSP-OLS夜间灯光数据受到自身空间分辨率的限制和灯光过饱和的影响,易造成个别区县的城镇化水平估算结果略有偏差。

(4)城镇化指标体系的不足。本文的城镇化指标体系是基于安徽省县级的统计年鉴数据,该地区统计年鉴中能反映城镇化水平的县级指标数量有限,缺少“每万人拥有医生数”、“每万人拥有科研人员数”和“水利现代化”、“农村的垃圾处理率”等县级指标。本文虽然充分利用了现有的统计指标进行评价,但若获取到更多相关指标,将使城镇化指标体系更加完善。

(5)使用夜间灯光数据估算城镇化水平的优势和不足。传统的基于统计数据的城镇化水平费时费力,而夜间灯光数据在县级尺度上与基于统计数据的城镇化水平具有很高的相关性,为县级城镇化水平的评估提供了新的思路。夜间灯光数据避免了指标法的不确定性和滞后性等因素,可以更加直观、简便、高效地评估城镇化水平。此外,对于统计系统较为薄弱的地区,统计数据误差较大甚至缺失,而夜间灯光可为这些地区城镇化水平的估算提供依据。虽然证明了夜光影像数据在城镇化水平评估中的可行性,但由于以下因素,该方法仍存在一定的不确定性。首先,目前广泛使用的两种夜间灯光数据中,DMSP-OLS夜间灯光数据虽然具有较长的时间跨度,但是却存在着辐射饱和、空间分辨率较低和多传感器数据不连续等问题,而NPP-VIIRS夜间灯光数据在辐射饱和、空间分辨率问题上有了显著的提升,但是却存在背景噪声、数据时间跨度较短等不足,这些问题会给研究的准确性带来一定的干扰,需要在数据校正过程中采取更多的措施;此外,本文使用曲线拟合的方法将两种数据进行了转换,但该过程会产生一定的误差,可能会影响实验结果。

5 结论

城镇化是国民经济和社会发展的动力,是扩大需求、拉动经济增长的关键,城镇化水平的评估对城镇发展和规划具有重要意义。夜间灯光数据包含了人类活动和经济社会发展等信息,可以更加直观地反映城镇化水平。使用夜间灯光数据估算城镇化水平,弥补了指标法的不确定性和滞后性等不足,为城镇化研究提供了新的思路。本文以安徽省县级尺度为例,研究了联合使用DMSP-OLS和NPP-VIIRS夜间灯光数据估算城镇化水平的可行性,为夜间灯光数据在长时间序列的城镇化研究中

提供理论支撑。

(1)计算平均夜间灯光指数。分别计算了安徽省75个县的DMSP-OLS和NPP-VIIRS平均夜间灯光指数,并使用曲线拟合的方法建立了NPP-VIIRS平均夜间灯光指数与DMSP-OLS平均夜间灯光指数间的对应关系,拟合得到三次多项式 $y=0.018x^3-0.677x^2+9.183x+2.750$ ($F=3.252$, 显著性检验 $P<0.001$, $R^2=0.957$)。

(2)计算基于统计数据的城镇化水平。从人口、经济、社会生活和农业机械化4个方面选取19个城镇化指标,使用层次分析法计算了各指标的权重。其中,非农业人口比重、人均GDP、每万人拥有卫生机构床位数所占权重较高(分别为0.152、0.130、0.107),而人均社会消费品零售总额、就业人员平均工资、单位耕地面积排灌机械数、金融机构贷款余额所占权重较低(分别为0.019、0.019、0.016、0.011)。基于以上计算结果,对各指标进行加权求和,计算了基于统计数据的安徽省县级城镇化水平。

(3)灯光指数与城镇化水平的相关性分析。灯光指数与城镇化水平在安徽省县级尺度上具有高度正相关性,相关系数为0.906,线性回归方程 $y=0.008x+0.102$ ($F=3561.996$, 显著性检验 $P<0.05$, $R^2=0.82$)。将安徽省县级灯光指数和基于统计数据的城镇化水平的空间分布和时间变化规律进行对比,分析了2种计算结果的异同。经过对比发现,安徽省县级灯光指数和基于统计数据的城镇化水平的空间分布基本一致,呈现东高西低的规律;时间变化基本一致,呈现逐年增加的趋势。

本文研究了同时使用2种灯光指数估算长时间序列的安徽省县级城镇化水平的合理性,为联合两种数据在省级、地市级和县级尺度上分析长时间序列的城市化进程提供了新的方法和思路,同时该方法也为联合使用2种夜间灯光数据估算人口、GDP、电力消耗量、碳排放量等社会经济因子提供借鉴。

参考文献(References):

- [1] Yang Y, Liu J, Lin Y, et al. The impact of urbanization on China's residential energy consumption[J]. *Structural Change and Economic Dynamics*, 2019,49:170-182.
- [2] 陈明星,陆大道,张华.中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析[J].*地理学报*,2009,64(4):387-398. [Chen M X, Lu D D, Zhang H. Comprehensive measurement of China's urbanization level and analysis of dynamic factors [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009,64(4):387-398.]
- [3] Han B J, Lan P F, Lu M. Study on comprehensive measurement of urbanization level in Changzhou[C]. 2015 4th International Conference on Sustainable Energy and Environmental Engineering, 2016.04. Atlantis Press.
- [4] 姜爱林.城镇化水平的五种测算方法分析[J].*中央财经大学学报*,2002(8):76-80. [Jiang A L. Analysis of five methods for calculating urbanization level[J]. *Journal of Central University of Finance and Economics*, 2002(8):76-80.]
- [5] 魏雯雯.城市化进程的评价方法研究[D].成都:四川师范大学,2011. [Wei W W. Research on evaluation method of urbanization process[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2011.]
- [6] Liu S W, Zhang P Y, Wang Z Y, et al. Measuring the sustainable urbanization potential of cities in Northeast China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016,26(5):549-567.
- [7] Ji G X, Tian L, Zhao J C, et al. Detecting spatiotemporal dynamics of PM_{2.5} emission data in China using DMSP-OLS nighttime stable light data[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,209:363-370.
- [8] Levin N, Kyba C C M, Zhang Q. Remote sensing of night lights-beyond DMSP[J]. *Remote Sensing*, 2019,11(12):7.
- [9] Wu K, Wang X N. Aligning pixel values of DMSP and VIIRS nighttime light images to evaluate urban dynamics [J]. *Remote Sensing*, 2019,11(12):18.
- [10] 安徽省统计局,国家统计局安徽调查总队.安徽统计年鉴2015[M].北京:中国统计出版社,2016. [Anhui provincial bureau of statistics, Anhui investigation team, National bureau of statistics. *Anhui statistical yearbook of 2015* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.]
- [11] Li C, Li G, Tao G F, et al. DMSP/OLS night-time light intensity as an innovative indicator of regional sustainable development[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019,40(4):1594-1602.
- [12] Chen X, Nordhaus W D. VIIRS nighttime lights in the estimation of cross-sectional and time-series GDP[J]. *Remote Sensing*, 2019,11(9):11.
- [13] 国家统计局农村社会经济调查司.中国县域统计年鉴(县市卷)2015[M].北京:中国统计出版社,2016. [Rural social and economic survey department of national bureau of statistics. *China county statistical yearbook (county and city volume) of 2015* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.]
- [14] 国家统计局城市社会经济调查司.中国城市统计年鉴2015[M].北京:中国统计出版社,2016. [Urban social and economic survey department of national bureau of statis-

- tics. China city statistical yearbook (county and city volume) of 2015[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.]
- [15] 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):1705-1724.
- [16] 胡艳兴. 基于夜间灯光数据的中国贫困空间识别研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2016. [Hu Y X. Research on China's poverty space recognition based on nighttime light data[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2016.]
- [17] Hu S S, Cheng X J, Zhou D M, et al. GIS-based flood risk assessment in suburban areas: a case study of the Fangshan District, Beijing[J]. *Natural Hazards*, 2017,87(3):1525-1543.
- [18] 常建娥, 蒋太立. 层次分析法确定权重的研究[J]. *武汉理工大学学报(信息与工程版)*, 2007(1):153-156. [Chang J E, Jiang T L. Research on determining weights by analytic hierarchy process[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Information and Management Engineering Edition)*, 2007(1):153-156.]
- [19] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. *数学的实践与认识*, 2012,42(7):93-100. [Deng X, Li J M, Zeng H J, et al. Analysis and application of weight calculation method of analytic hierarchy process[J]. *Practice and Understanding of Mathematics*, 2012,42(7):93-100.]
- [20] 陈晋, 卓莉, 史培军, 等. 基于DMSP/OLS数据的中国城市化过程研究—反映区域城市化水平的灯光指数的构建[J]. *遥感学报*, 2003,7(3):168-175,241. [Chen J, Zhuo L, Shi P J, et al. Research on China's urbanization process based on DMSP/OLS data—construction of light index reflecting regional urbanization level[J]. *Remote Sensing*, 2003,7(3):168-175,241.]
- [21] Kohiyama M, Hayashi H, Maki N, et al. Early damaged area estimation system using DMSP-OLS night-time imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(11):2015-2036.
- [22] 杨洋, 何春阳, 赵媛媛, 等. 利用DMSP/OLS稳定夜间灯光数据提取城镇用地信息的分层阈值法研究[J]. *中国图象图形学报*, 2011,16(4):666-673. [Yang Y, He C Y, Zhao Y Y, et al. Research on stratified threshold method for extracting urban land information using DMSP/OLS stable nighttime light data[J]. *Chinese Journal of Image and Graphics*, 2011,16(4):666-673.]
- [23] 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):3057-3081.
- [24] Yu B, Shi K, Hu Y, et al. Poverty evaluation using NPP-VIIRS nighttime light composite data at the county level in China[J]. *Ieee Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015,8(3):1217-1229.
- [25] Wang L, Fan H, Wang Y. Estimation of consumption potentiality using VIIRS night-time light data[J]. *PLoS One*, 2018(10):1-19.
- [26] 卓莉, 史培军, 陈晋, 等. 20世纪90年代中国城市时空变化特征——基于灯光指数CNLI方法的探讨[J]. *地理学报*, 2003,66(6):893-902. [Zhuo L, Shi P J, Chen J, et al. Application of compound night light index derived from DMSP/OLS data to urbanization analysis in China in the 1990s[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003,66(6):893-902.]
- [27] 杨洋, 官云兰, 汤耶磊, 等. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据的江西省城市化研究[J]. *江西科学*, 2017,35(4):622-628. [Yang Y, Guan Y L, Tang Y L, et al. The urbanization level research in Jiangxi province based on DMSP/OLS data [J]. *Jiangxi Science*, 2017,35(4):622-628.]
- [28] Ma T, Zhou C H, Pei T, et al. Responses of Suomi-NPP VIIRS-derived nighttime lights to socioeconomic activity in China's cities[J]. *Remote Sensing Letters*, 2014,5(2):165-174.
- [29] Xie Y, Weng Q, Fu P. Temporal variations of artificial nighttime lights and their implications for urbanization in the conterminous United States, 2013-2017[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019,225:160-174.