引文格式：单治彬,李丹,肖薇薇,等. 基于夜光遥感数据的陕西省城市扩张时空变化研究[J]. 地理空间信息, 2026, 24(2):59-63. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2026.02.012

基于夜光遥感数据的陕西省城市扩张时空变化研究

单治彬[1,2]，李　丹[1]，肖薇薇[3]，张建东[1,2]
（1. 安康学院 经济与管理学院，陕西 安康 725000；2. 安康学院 陕南生态经济研究中心，陕西 安康 725000；
3. 安康学院 化学与环境学院，陕西 安康 725000）

摘　要：随着人口增长和经济持续发展，快速精准地获取城市建成区扩张信息，并对其时空特征进行深入分析，对于实现可持续发展具有重要意义。以2013年、2016年、2019、2022年4个时期的NPP/VIIRS夜间灯光数据为数据源，基于参考比较法提取城市建成区，分析陕西省城市扩张时空特征。结果表明：①2013—2022年陕西省建成区面积持续增长，增长速度整体呈现“先上升后缓慢下降”的趋势，各城市建成区不断向外扩展和延伸，呈现出不规则的扩展趋势。②在紧凑度和分形维数上，表现为城市以外部扩张为主，紧凑度水平整体较低，呈逐年降低的趋势，分形维数均值变化较小，研究区城市空间形态的形状比较规则，轮廓较为简单。③建成区标准差椭圆面积呈空间扩张趋势，中心移动速度逐渐减小，建成区扩张方向也出现一定的变化，在南北方向上有扩张态势，东西方向呈现出一定程度的收缩迹象，反映出陕西省南北经济发展不平衡。研究结果有助于更好地认识和理解陕西省城市化发展进程以及城市时空演变特征，为陕西省城市的健康、协调发展提供理论支撑。

关键词：夜间灯光数据；NPP/VIIRS；城市扩张；标准差椭圆
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）02-0059-05

Research on the Spatio-temporal Changes of Urban Expansion in Shaanxi Province Based on Nighttime Light Remote Sensing Data

SHAN Zhibin[1,2], LI Dan[1], XIAO Weiwei[3], ZHANG Jiandong[1,2]
(1. School of Economics and Management, Ankang University, Ankang 725000, China;
2. Ankang University Eco-economy Research Center, Ankang 725000, China;
3. School of Chemistry and Environment, Ankang University, Ankang 725000, China)

Abstract: With the growth of population and the continuous development of the economy, obtaining information on the expansion of urban built-up areas quickly and accurately and conducting in-depth analysis of their spatio-temporal characteristics are of great significance for achieving sustainable development. Taking NPP/VIIRS nighttime light data in 2013, 2016, 2019, and 2022 as the data sources, we used the reference comparison method to extract urban built-up areas, and analyzed the spatio-temporal characteristics of urban expansion in Shaanxi Province. The findings indicated that ①the built-up area of Shaanxi Province consistently expanded from 2013 to 2022, with an overall trend of “increasing initially followed by a gradual decline”. Urban built-up areas continuously expanded outwardly, exhibiting irregular patterns of growth. ②In terms of compactness and fractal dimension, the city primarily experienced external expansion, with a generally low level of compactness that was decreasing over time. The average fractal dimension showed minimal change, indicating that the urban spatial form in the study area has a regular shape and a simple outline for the urban built-up areas. ③The standard deviation ellipse area of built-up area demonstrated a trend of spatial expansion, with a gradual reduction in center movement speed. There were also shifts in expansion direction. Specifically, there has been an expansion towards the north-south axis and a noticeable contraction along the east-west axis, reflecting the uneven economic development between the north and south of Shaanxi Province. The research results are conducive to a better understanding of the urbanization development process and the spatio-temporal evolution characteristics of cities in Shaanxi Province, providing theoretical support for the healthy and coordinated development of cities in Shaanxi Province.

Key words: nighttime light data, NPP/VIIRS, urban expansion, standard deviational ellipse

利用遥感数据能精准地发现城市发展过程中的规律特征和问题[1-2]。我国在利用夜光遥感进行城市扩张分析方面已有深入研究[3-10]，研究方法多样且趋于成熟，但目前关于城市建成区演变的研究主要聚焦于东部较发达地区，针对中西部地区的城市扩张研究则相对较少[11-16]。基于此，本文以2013年、2016年、2019年、2022年4个时期的NPP/VIIRS为数据源，探究陕西省城市扩张时空特征，获取研究区城市建成区

项目来源：陕西省教育厅专项科研计划项目（23JK0273）；安康学院纵向科研项目（2022AYQN11）。
第一作者简介：单治彬（1993—），硕士，讲师，研究方向为生态遥感和地理信息，E-mail：zbshan_chd@126.com。

时空变化信息，对城市扩张变化进行分析，探究影响城市扩张的驱动因素，进而为陕西省城市的健康、协调发展提供有力支持，同时有助于国家战略的开展与实施。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陕西省地处中国西北部，地理位置优越，东邻山西和河南，西连宁夏和甘肃，南抵四川、重庆和湖北，北接内蒙古，如图1所示。总面积为205 624.3 km^2，下辖10个地级市。据统计，至2022年末，陕西省的常住人口数量达到3 956万人，城镇化率高达64.02%，GDP总量为32 772.7亿元，其GDP位列全国第14位。与其同时，陕西省内部地形和气候呈现出显著的差异，因其南北跨度较大。陕北地区属于中温带，坐落于黄土高原，属于中温带；关中地区则是平原区，气候温和，四季分明，属于暖温带；而陕南地区则属于北亚热带，位于秦巴山区，气候湿润，降水丰富。

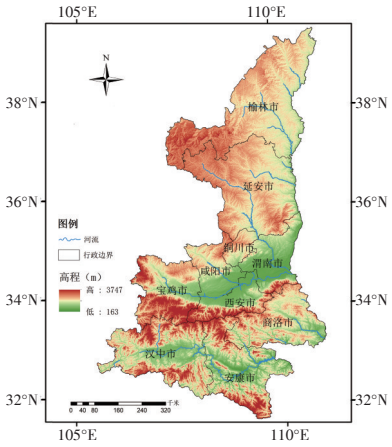


图1 研究区示意图

审图号：GS(2024)0650

1.2 数据来源及预处理

本研究选取了2013年、2016年、2019年和2022年的年度合成NPP/VIIRS夜光遥感数据，将年度数据均基于月度数据的合成处理得到，确保了数据的准确性和完整性，空间分辨率为500 m。该夜间灯光影像数据源自美国科罗拉多矿业学院佩恩研究所的地球观测小组，涵盖了从2012—2022年的广泛夜间灯光数据，此外，为了与夜光遥感数据进行对比分析，还从住房和城乡建设部所发布的《中国城市统计年鉴》中获取了陕西省历年的建成区面积数据。从国家基础地理信息中心获取陕西行政边界数据。

通过掩膜获取陕西省2013年、2016年、2019年和2022年的4期NPP/VIIRS夜间灯光数据，利用ArcGIS软件重采样工具，将已经进行投影后的NPP/VIIRS数据重采样至500×500 m。由于NPP/VIIRS为初步数据集，存在火点和背景噪声，为确保数据的可靠性和准确性[17]，对NPP/VIIRS数据进行 DN 值校正。

$$\mathrm{ZDN}_n=\begin{cases}DN_{n-1}, DN_n<DN_{n-1}\\ DN_n, DN_n\geqslant DN_{n-1}\end{cases} \tag{1}$$

式中，ZDN_n 为经过校正后，第 n 年灯光像元的亮度值；而 DN_n 则为第 n 年原始的灯光像元亮度值，同时，DN_{n-1} 则指的是前一年，即第 $n-1$ 年的灯光像元亮度值。

1.3 城市扩展指标

本研究通过计算建成区扩张面积、速度和强度来分析陕西省城市扩张的时间变化特征，采用紧凑度指数、分形维数、标准差椭圆分析探讨陕西省城市扩张的空间变化特征。

1.3.1 城市扩张速度

城市扩张速度的计算公式[18]为：

$$V=\frac{S_{N+T}-S_N}{T} \tag{2}$$

式中，V 为城市建成区的扩张速率，其中 S_N+T 表示在 N 年加上 T 年间隔后的城市建成区总面积，而 SN 则特指 N 年时的城市建成区面积；T 为的时间间隔是以年为单位进行计算的。

1.3.2 城市扩张强度

城市扩张强度指数UII（urbanization intensive index）用于衡量某一特定时期内城市增长的建成区面积在其土地总面积中所占据的比例，从而准确反映城市建成区扩张的强弱程度[19]。

$$\mathrm{UII}=\frac{S_{N+T}-S_N}{S}\times\frac{1}{T}\times 100\% \tag{3}$$

式中，UII为城市建成区的扩张强度；S 为研究区土地总面积，S_{N+T}、S_N、T 同式（2）。

1.3.3 紧凑度指数

紧凑度指数是评估城市建成区空间形态特征的重要指标，能够描述某一时期内城市建成区空间形态演变的规律[20]。其公式如下：

$$X=\frac{2\sqrt{\pi A}}{P} \tag{4}$$

式中，X 为城市用地紧凑度的衡量标准，反映了城市建成区的紧凑程度；A 为城市建成区的面积；P 为城市轮廓的周长。紧凑度指数 X 的取值范围在0~1之间，数值越趋近于0，表示城市用地布局越松散；而数值越趋近于1，则表明城市用地布局越紧凑。

1.3.4 分形维数

分形维数通常用来反映城市建成区形状的曲折性

和复杂程度[21]。通常认为 D 越接近1（$1<D<1.5$），城市建成区的轮廓范围是越简单的；城市建成区轮廓范围状态不稳定（$D=1.5$）；城市建成区轮廓范围较为复杂（$1.5<D<2$）。

$$D=\frac{2\ln(P/4)}{\ln A} \tag{5}$$

式中，D 为分形维数；A 为城市建成区面积；P 为周长。

1.3.5　标准差椭圆分析

用于分析空间点数据方向以及分布特性的是标准差椭圆。城市建成区空间分布的相对位置用标准差椭圆中心点表示，建成区空间分布范围的广度及其变化则用椭圆面积反映，城市发展的主要趋势用方位角表示，地理要素在主趋势方向上的集中影响程度用长半轴代表，次要方向上的集中影响程度用短半轴代表地理要素[22]。在标准差椭圆中，x 轴的标准差 σ_x 、y 轴标准差 σ_y 、中心点（ω，ω），以及方位角α的计算方法为：

$$\begin{cases}\overline{X}_\omega=\sum_{i=1}^{n}\omega_i x_i/\sum_{i=1}^{n}\omega_i\\ \overline{Y}_\omega=\sum_{i=1}^{n}\omega_i y_i/\sum_{i=1}^{n}\omega_i\end{cases} \tag{6}$$

$$\sigma_x=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\omega_i\tilde{x}_i\cos\alpha-\omega_i\tilde{y}_i\sin\alpha\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\omega_i^{\,2}}} \tag{7}$$

$$\sigma_y=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\omega_i\tilde{x}_i\cos\alpha+\omega_i\tilde{y}_i\sin\alpha\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\omega_i^{\,2}}} \tag{8}$$

$$\tan\alpha=\frac{\left(\sum_{i=1}^{n}\omega_i^{2\sim2}x_i-\sum_{i=1}^{n}\omega_i^{2\sim2}y_i\right)+\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n}\omega_i^{2\sim2}x_i-\sum_{i=1}^{n}\omega_i^{2\sim2}y_i\right)^2+4\sum_{i=1}^{n}\omega_i^{2\sim22\sim2}x_i\,y_i}}{2\sum_{i=1}^{n}\omega^2{}_i\bar{x}_i\bar{y}_i} \tag{9}$$

式中，x_i ，y_i 为每个点元素在平面坐标系中的坐标；ω_i 为权重；$\dot{X}$ 和 $\dot{Y}$ 为点坐标的算术平均数；$\tilde{x}_i$ 与 $\tilde{y}_i$ 为不同要素点距离平均中心坐标偏差。

2　陕西省城市扩张时空变化分析

2.1　提取城市建成区范围

参照2013—2022年《中国城市统计年鉴》，把其中的建成区面积当作辅助，由于需要获取灯光数据所对应的建成区数据，先确定每年的最佳阈值，利用这个最佳阈值，提取出的结果为城市建成区。提取得到陕西省2013年、2016年、2019年和2022年4个时期的建成区范围，如图2所示。

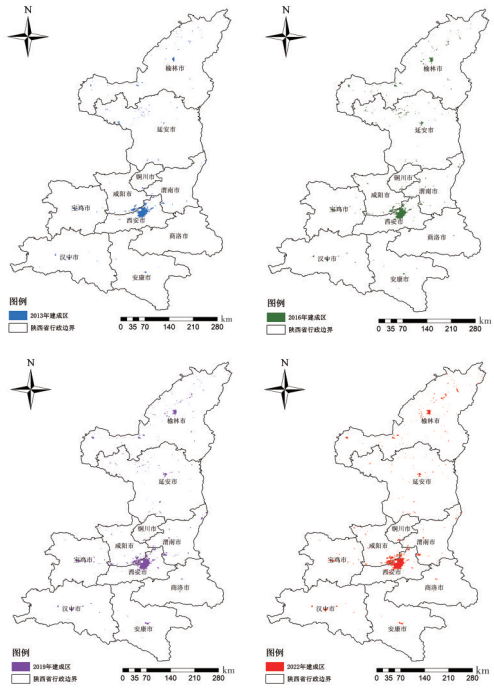


图2　2013—2022年陕西省建成区提取结果

审图号：GS(2024)0650

利用中国城市统计年鉴数据，将提取得到的陕西省2013—2022年4个时期的建成区面积进行精度验证，结果如表1所示。从整个研究时段来看，城市建成区面积绝对误差均在10 km²以内，2013年提取误差最大，但是其相对误差也小于1%。整体提取精度较高，可认为本文利用灯光遥感数据对建成区面积提取结果较为理想。

表1　2013—2022年陕西省城市建成区面积提取结果误差表/%

年份	提取面积/km²	统计年鉴数据/km²	绝对误差/km²	相对误差
2013	922.50	915.02	7.48	0.81
2016	1 121.50	1 127.35	−5.85	0.51
2019	1 362.50	1 357.51	4.99	0.37
2022	1 557.25	1 553.51	3.74	0.24

2.2　城市扩张时间特征分析

本研究对于陕西省城市建成区扩张的时间变化分析，主要聚焦于3个关键指标：建成区面积的增长量、其扩张的速率以及扩张的强度。

基于参考比较法提取2013年、2016年、2019年、2022年的4个时期的城市建成区面积，如表2所示。

表2　2013—2022年陕西省城市建成区面积变化计算

年份	建成区面积/km²	增长面积/km²	扩张速率/km²	扩张强度/%
2013	922.50	—	—	—
2016	1 121.50	199.00	66.34	0.29
2019	1 362.50	241.00	80.34	0.35
2022	1 557.25	194.75	64.34	0.28

通过对2013年、2016年、2019年和2022年这4个关键年份的陕西省城市建成区面积数据的分析，计算出了该省在研究期间的城市扩张速度和强度。结果显示陕西省在2013—2022年这一时间跨度内，城市建成区的扩张速率和强度呈现出先增后减的动态变化。其中峰值出现在2016—2019年。

对陕西省2013—2022年间的城市建成区数据进行空间叠加分析后，得到该区域城市用地扩张趋势，如图3所示。不仅揭示了陕西省内城市建成区的空间分布格局，还较为清晰地展现了各市向外扩张和延伸的显著趋势。以各市中心城区作为核心，其辐射效应显著，外延性特征明显。随着时间的推移，建成区的图斑数量持续增长，表示城市规模是在不断扩大。

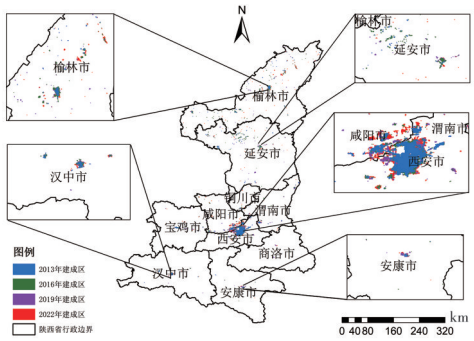


图3 2013—2022年陕西省建成区提取结果叠加示意图

审图号：GS(2024)0650

2.3 城市扩张空间特征分析

2.3.1 空间形态分析

表3为2013年、2016年、2019年和2022年研究区城市地紧凑度和分形维数，在研究期间，研究区城市空间形态紧凑度不断降低，表明城市建成区不断向外扩张。

表3 2013—2022年陕西省紧凑度与分形维数

指标	2013年	2016年	2019年	2022年
紧凑度	0.45	0.39	0.36	0.34
分形维数	1.390	1.398	1.402	1.406

2.3.2 城市建成区标准差椭圆分析

通过标准差椭圆分析得到如图4所示的椭圆中心点移动轨迹。2013—2022年间，东北方向移动的趋势是椭圆的中心点呈现走向，总共移动了20 089.13 m，近年来，椭圆中心点移动的距离逐渐减小，这也说明了陕西省城市建成区扩张趋于稳定。

由表4可知，2013—2022年间，标准差椭圆分布范围整体呈现增加趋势，面积共增加了67.23 km^2，呈空间扩张趋势。随着城市的经济发展与开发建设，城市建成区的面积逐年增加，建成区的扩张方向也出现一定的变化。具体为2013—2016年间椭圆长轴和短轴

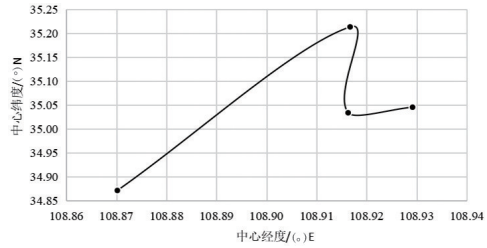


图4 椭圆中心点移动轨迹

表4 标准差椭圆分析

年份	椭圆面积/km^2	中心经度/E	中心纬度/N	短半轴/m	长半轴/m	方向角/(°)
2013	514.36	108.87	34.87	74 808.11	218 901.02	80.27
2016	616.87	108.91	35.21	78 393.55	250 527.91	76.78
2019	595.12	108.91	35.03	78 882.18	240 192.56	87.44
2022	581.59	108.93	35.05	73 812.77	250 864.64	98.55

的扩张最为明显，陕北地区榆林市和延安市的扩张为重要动力；2016—2019年间椭圆短轴方向小幅扩张，长轴方向缩小，方位角向东北方向偏移，主要是由于关中地区西安市和渭南市以及陕南地区汉中市和安康市的扩张引起的；2019—2022年间椭圆短轴方向明显缩小，长轴方向扩张，方位角向东南方向偏移，推动城市建成区面积演化的主要拉动力量为西安市的扩张。长轴和短轴的比值为3.14左右，说明在南北方向上，城市建成区表现出明显的扩张态势；而相对地，在东西方向上，则呈现出一定程度的收缩迹象。这不仅揭示了陕西省城市发展扩张的地理动态，更进一步反映了该省南北经济发展不平衡的现实状况。

2.4 城市扩张因素分析

本文在前人对城市扩张因素的研究基础上[21]，从《陕西省统计年鉴》中选择研究时间窗口内4个时期的地区生产总值（亿元）、年均城区人口总数（万人）以及市政公用设施建设固定资产投资（万元）3个指标，作为陕西省城市扩张的影响因子。利用SPSS软件分别对上述3个因子和提取得到的各行政区划内建成区面积进行相关性分析，结果如表5所示。

表5 陕西各市辖区建成区面积与影响因素的相关系数

行政区相关系数	地区生产总值	年均城区人口总数	市政公用设施建设固定资产投资
延安	0.870	0.980	−0.363
榆林	0.465	0.962	−0.930
西安	0.992	0.977	0.785
铜川	0.382	−0.533	−0.677
宝鸡	0.959	0.958	0.817
咸阳	0.456	0.784	0.550
渭南	0.710	0.753	−0.563
汉中	0.990	0.956	0.380
安康	0.829	0.973	−0.662
商洛	0.963	0.767	−0.770

由表5可知，建成区面积与地区生产总值的相关系数普遍较高，大部分均大于0.8，表明经济是影响

陕西省城市扩张的主要因素，其对城市建设和发展起到决定性作用。当经济高速增长时，对城市用地的需求增加，促使城市向外扩张，这种现象在2016—2022年的西安市建成区扩张最为明显；当经济增速降低、发展缓慢时，城市用地需求下降，导致经济因素对城区扩张的影响力减弱，此时城市建成区的扩张主要以内部改造为主。

3　结论与不足

3.1　结　论

分析2013—2022年陕西省城市扩张时空变化特征，得出以下结论：

1）2013—2022年陕西省建成区面积是持续增长的，其增长速度整体呈现出了“先上升，后缓慢下降”的趋势，西安市的经济发展和城市化发展速度最快，但其他市的发展速度也呈逐渐递增的趋势，各城市建成区在此期间不断地向外扩展和延伸，建成区图斑数量不断增加，同时也呈现出了较为不规则的扩展趋势。

2）2013—2022年陕西省建成区在紧凑度和分形维数上，表现为城市以外部扩张为主，紧凑度水平和不规则程度整体较低，呈逐年降低的趋势，分形维数均在1.39~1.41之间，分形维数均值变化较小，表明研究区城市空间形态城市建成区的形状规则，轮廓较为简单。

3）2013—2022年陕西省建成区标准差椭圆面积呈空间扩张趋势，中心移动速度逐渐变缓，建成区的扩张方向也显示出一定的变化。

3.2　不　足

1）仅采用了参考比较法，这一方法高度依赖于统计数据的准确性，统计数据的误差会影响到提取结果的精确性。

2）缺少对陕西省城市群建成区的景观格局分析，未来工作重点将侧重这些方面的研究。同时对于陕西省城市扩张的深层次动因和机制，需要进行更深入的研究。

参考文献

[1] 田赢. 基于NPP/VIIRS的云南省城市扩张时空演变与影响因素研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2023

[2] 鹿一凡,孙国栋,冯子元,等. 基于NPP-VIIRS夜光数据的北京市建成区提取和分析[J]. 科技资讯,2021,19(27):1-5

[3] 洪晗,肖金成,陈蕊. 中国式现代化背景下的新型城镇化:概念辨析、现实困境和突破路径[J].区域经济评论,2024,39(2):38-49

[4] 柴宝惠,李培军,张瑞洁,等. 基于Landsat数据和DMSP/OLS夜间灯光数据的城市扩展提取:以天津市为例[J]. 北京大学学报(自然科学版),2016,52(3):475-485

[5] 李德仁,李熙. 论夜光遥感数据挖掘[J]. 测绘学报,2015,44(6):591-601

[6] Xi L. Mapping Urban Extent Using Luojia 1-01 Nighttime Light Imagery[J]. Sensors,2018,18(11):3665

[7] Croft T A. Nighttime Images of the Earth from Space[J]. Scientific American,1978,239(1):78-86

[8] 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

[9] Paul C. Sutton A Scale-adjusted Measure of “Urban Sprawl” Using Mighttime Satellite Imagery[J]. Remote Sensing of Environment,2003,86(3):353-369

[10] 曹伟超,李建勇,张雪梅. 基于夜间灯光数据的城市建成区范围快速提取方法研究与应用:以四川省为例[J]. 测绘与空间地理信息,2020,43(10):60-62

[11] Milesi C,Elvidge D C,Nemani R R,et al.Assessing the Impact of Urban Land Development on Net Primary Productivity in the Southeastern United States[J]. Remote Sensing of Environment,2003,86(3):401-410

[12] 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,2003,17(3):168-175

[13] 李海江,刘耀林,谭荣辉,等. 一种新的基于高分辨率全色影像的城市建成区边界提取算法[J]. 测绘通报,2015(7):36-41

[14] Sharma,Ram C,Ryutaro T,et al. Global Mapping of Urban Built-up Areas of Year 2014 by Combining MODIS Multispectral Data with VIIRS Nighttime Light Data[J]. International Journal of Digital Earth,2016(9):1004-1020

[15] 朱凌一,王勇. 基于夜光遥感影像的苏南城市群建成区提取方法[J].地理空间信息,2023,21(10):44-48

[16] 陈颖彪,郑子豪,吴志峰,等. 夜间灯光遥感数据应用综述和展望[J]. 地理科学进展,2019,38(2):205-223

[17] 白贺庭,马明国,阎然,等. 基于夜间灯光数据的重庆市城市扩张研究[J]. 遥感技术与应用,2019,34(1):216-224

[18] 李爱民. 基于遥感影像的城市建成区扩张与用地规模研究[D]. 郑州:信息工程大学,2009

[19] 刘盛和,吴传钧,沈洪泉. 基于GIS的北京城市土地利用扩展模式[J]. 地理学报,2000,66(4):407-416

[20] 张家旗,陈爽,Damas W. 2002—2012年达累斯萨拉姆城市蔓延特征及影响因素[J]. 中国科学院大学学报,2018,35(5):663-673

[21] 陈龙胤. 基于DMSP/OLS夜间灯光影像的中国东部沿海地区城市扩张监测与分析[D]. 长春:东北师范大学,2014

[22] 张东.乌鲁木齐市夜间灯光分布及城市重心迁移特征研究[J]. 新疆师范大学学报(自然科学版),2021,40(2):29-34