引文格式：李明海,刘扬楷,万丽娟. 武汉市中心城区城市空间格局研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(8):51-55. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.08.010

武汉市中心城区城市空间格局研究

李明海[1]，刘扬楷[2*]，万丽娟[3]
（1. 南雄市自然资源局，广东 韶关 512000；2. 翁源县自然资源信息中心，广东 韶关 512000；
3. 南雄市住房和城乡建设局，广东 韶关 512000）

摘　要：鉴于小范围尺度下利用夜间灯光数据城市建成区提取空间位置精度低，直接影响研究城市空间格局演变规律的准确性，通过构建改良VBANUI指数提取武汉市中心城区城市建成区，并从空间扩展、景观格局、重心迁移、风向玫瑰图全面分析1992—2022年武汉市中心城区城市扩张空间格局。研究结果表明，利用改良VBANUI指数提取建成区数量和空间位置精度高，实现建成区内部细节提取，1992-2012年中心城区以面状扩张发展为主，2012—2022年以面状扩张为主，点状零散扩张为辅。城市建成区由中环至外环发展，集约化程度不断提高，破碎度逐步降低，形成一体化发展格局。城市建成区重心朝着东南方向迁移，城市化进程总体先快速扩张后步入稳定扩张阶段。

关键词：夜间灯光数据；VBANUI指数；建成区；空间格局演化
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）08-0051-05

Research on Spatial Pattern of Wuhan Urban Center

LI Minghai[1], LIU Yangkai[2], WAN Lijuan[3]
(1. Nanxiong Bureau of Natural Resources, Shaoguan 512000, China;
2. Wengyuan County Natural Resources Information Center, Shaoguan 512000, China;
3. Nanxiong Bureau of Housing and Urban-Rural Development, Shaoguan 512000, China)

Abstract: In view of the low accuracy of extracting the spatial location of urban built-up areas by using nighttime light data in a small scale, we constructed an improved VBANUI index to extract the urban built-up areas of Wuhan urban center. We analyzed the spatial pattern of urban expansion in the Wuhan urban center from 1992 to 2022 comprehensively from the perspectives of spatial expansion, landscape pattern, shift of gravity, wind direction and rose map. The results show that the improved VBANUI index can extract the number and spatial location of built-up areas with high precision, and realize the extraction of internal details of built-up areas. From 1992 to 2012, the central urban area mainly developed in the form of planar expansion, and from 2012 to 2022 in the form of planar expansion, supplemented by point-like scattered expansion. The urban built-up area develops from the central ring to the outer ring, the degree of intensification increases and the degree of fragmentation decreases gradually, forming an integrated development pattern. The gravity center of urban built-up area migrates to the southeast, and the urbanization process expands rapidly first and then enters the stage of stable expansion.

Key words: nighttime light data, VBANUI index, built-up area, spatial pattern evolution

目前，基于DMSP/OLS和NPP/VIIRS夜间灯光数据城市扩张集中在大尺度层面[1-2]，在小尺度范围提取城市建成区效果不佳，空间和数量上准确性表现不佳，无法准确提取小范围尺度下的中心城区建成区范围，影响中心城区城市空间格局分析的准确性[3-10]。

本文利用Elvidge、邹进贵等[11]的校正理论完成夜间灯光数据校正，得到长时序可用夜间灯光数据集，构建改良VBANUI指数尝试从县级小尺度范围精确提取1992—2022年武汉市中心城区建成区范围。并在此基础上，从多角度定性定量分析武汉市中心城区近30 a来城市建成区扩张演变特征，为武汉市中心城区未来发展、政策制定提供一定参考。

1　研究区概况

根据武汉市自然资源和规划局相关文件将江岸区、江汉区、桥口区、汉阳区、武昌区、青山区、洪山区7个区划分为中心城区，见图1。

2　数据处理及研究方法

2.1　数据来源

数据来自NOAA National Centers for Environmental Information （NCEI） DMSP/OLS、NPP/VIIRS夜光数

第一作者简介：李明海（1994—），硕士，工程师，从事测绘遥感技术相关工作，E-mail：1428974496@qq.com。
通信作者：刘扬楷（1976—），本科，工程师，从事测绘遥感相关工作，E-mail：1010550144@qq.com。

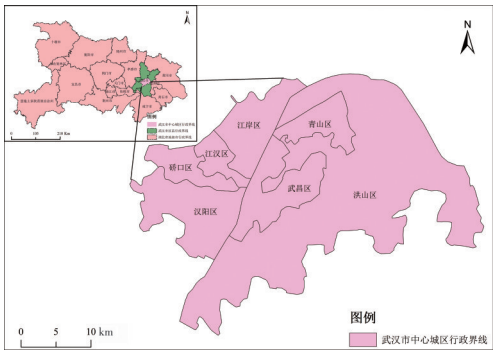


图1 武汉市中心城区范围

审图号：GS(2019)1822号

据、地理空间数据云（gscloud.cn）的Landsat系列数据以及来源于《中国城市统计年鉴》、《武汉市统计年鉴》等相关统计数据。

2.2 数据预处理

DMSP/OLS夜间灯光数据分辨率为1 000 m，数据灰度值为0~63，存在灯光饱和现象，现存数据1992—2013年。NPP/VIIRS夜间灯光数据分辨率500 m，不存在灯光饱和现象，但存在背景噪声、异常值等，现存数据2012年至今。因受到传感器本身性能、成像环境等因素的影响，需要对DMSP/OLS和NPP/VIIRS夜间灯光数据进行校正，才能构建长时序可用的夜间灯光数据。

1）DMSP/OLS数据预处理。首先投影转换，根据武汉市行政边界裁剪，其次采用邹进贵等人利用二次多项式校正模型完成相互校正，并依次完成连续性校正、去饱和校正。

2）NPP/VIIRS夜间灯光数据预处理。采用钟亮等[12]分时段去噪方法依次对2012—2022年NPP/VIIRS夜间灯光数据完成掩膜去噪，并去除极小值、异常像元。

3）DMSP/OLS和NPP/VIIRS夜间灯光数据拟合校正。利用校正后2013年的DMSP/OLS、NPP/VIIRS夜间灯光数据，采用关靖云等[13]方法构建相互校正模型，依次校正NPP/VIIRS夜间灯光数据，从而构建长时序1992—2022年武汉市具有连续性、可比性数据集。

4）Landsat数据预处理。主要去条带、波段合成、投影变换、裁剪。

2.3 研究方法

1）建成区提取方法。参考比较法和突变检测法提取建成区结果粗糙且无法识别城市建成区内部细节识别，为改善该问题，构建改进的VBANUI指数，结合K均值聚类法提取初步建成区范围，以初步建成区范围为基础结合Landsat数据利用支持向量机监督分类实现武汉市中心城区建成区精细提取。

$$\mathrm{VBANUI}=(1-\mathrm{NDVI})\ \mathrm{ODNO}\ (1+\mathrm{NDBI}) \tag{1}$$

$$\mathrm{NDVI}=\frac{R_{\mathrm{nir}}-R_{\mathrm{red}}}{R_{\mathrm{nir}}+R_{\mathrm{red}}} \tag{2}$$

$$\mathrm{NDBI}=\frac{R_{\mathrm{mir}}-R_{\mathrm{nir}}}{R_{\mathrm{mir}}+R_{\mathrm{nir}}} \tag{3}$$

式中，VBANUI为改良的城市灯光指数；NDBI为归一化建筑指数；NDVI为归一化植被指数；R_{nir}、R_{red}、R_{mir}分别为近红外波段、红光波段、中红外波段反射率。

2）武汉市中心城区空间格局研究方法。从扩张模式、景观格局演变、扩展方向3个角度研究武汉市中心城区空间格局。扩张模式包含扩张速度、强度2个方面，扩张速度（A）指城市建成区年均扩张面积，能直接体现城市扩张的快慢。

$$A=\frac{S_T-S_0}{T} \tag{4}$$

式中，S_T为末期建成区面积；S_0为起始建成区面积；T为研究年份间隔。

扩张强度（U）能体现不同时期城市建成区扩张强弱、快慢，更全面的分析城市建成区扩张趋势。

$$U=\frac{A}{\mathrm{Sum}} \tag{5}$$

式中，A为扩张速度；Sum为城市土地总面积。

景观格局演变分析主要有景观格局指数、空间统计特征比较等，本文选取景观格局指数紧凑度（C）和分形维数分析武汉市中心城区城市形态演变规律。紧凑度源自Satty提出“紧凑城市”概念，用于衡量建成区集聚成都和完整性的指标。

$$C=\frac{2\sqrt{\pi S}}{P} \tag{6}$$

式中，S和P分别为该年建成区的面积和周长；$C\in\{0,1\}$，越接近1，说明建成区结构越紧凑且接近圆形，反之则说明建成区结构松散且接近于长方形。

分形维数（F）起源于Mandelbrot1967年提出的分形和分维概念，用于体现空间形态，反映城市形态的复杂程度。

$$F=\frac{2\ln(P/4)}{\ln(S)} \tag{7}$$

式中，S和P分别为该年建成区的面积和周长；$F\in\{1,2\}$，当$F\in\{1,1.5\}$时，建成区轮廓比较简单；当$F=1.5$时，建成区轮廓不稳定；当$F\in\{1.5,2\}$时，建成区轮廓复杂，同时F逐渐增长，说明建成区扩张呈现向四周扩张趋势，反之说明呈现边缘填充趋势。

扩张方向包含建成区重心迁移、标准差椭圆和玫

瑰风向图3个方面。重心概念源自力学概念，最早应用于人口的分布。重心（X_t，Y_t）可以定量分析城市空间的扩张情况，代表城市发展的中心位置。

$$\begin{cases} X_t = \sum_{i=1}^{n} X_{ti} M_{ti} / \sum_{i=1}^{n} M_{ti} \\ Y_t = \sum_{i=1}^{n} Y_{ti} M_{ti} / \sum_{i=1}^{n} M_{ti} \end{cases} \tag{8}$$

$$D = \sqrt{\left(X_i - X_j\right)^2 - \left(Y_i - Y_j\right)^2} \tag{9}$$

式中，（X_{ti}，Y_{ti}）为第 t 年区域城市用地斑块经纬度坐标；M_{ti} 为第 t 年斑块面积权重；X_i、X_j 和 Y_i 和 Y_j 分别代表起始和末期的重心坐标。

标准差椭圆模型可以从全局视角定量揭示地理要素空间分布的中心性、方向性、空间形态等特征。玫瑰风向法即以研究区域初始年份建成区重心为圆心，以该点至研究区域最远距离设置为半径，以南北、东西方向作为横轴和纵轴，按照8个方位建立等分扇形，以此清晰分析城市建成区扩张方向。

3　结果与分析

根据图2步骤获得武汉市中心城区1992年、1997年、2002年、2007年、2012年、2017年城市建成区，从图2明显可知，武汉市中心城区城市建成范围持续增加，相较于前人做法，内部纹理清晰，细节提取到位，准确度高。

3.1　建成区提取精度验证

为验证改良VBANUI指数提取建成区准确性和可靠性，从数量和空间两方面对建成区提取结果进行精度验证，计算得出武汉市中心城区建成区相对误差见表1。

从表1可知，历年建成区提取相对误差低于1.5%，最低低至0.12%。结合前人提取结果，王博帅等[14]结合Landsat数据提取建成区最大误差率为13%，柴宝惠等[15]最大误差12.8%，与之对比侧面印证改良VBANUI指数提取建成区方法提取精度高。

表1　提取面积和统计面积相对误差表

年份	统计面积/km²	提取面积/km²	相对误差/%
1992年	217.71	214.65	1.43
1997年	248.68	246.49	0.89
2002年	299.83	296.81	1.02
2007年	347.21	345.35	0.54
2012年	414.28	415.78	−0.36
2017年	453.13	452.59	0.12
2022年	476.89	478.23	−0.28

空间误差运用总体精度和Kappa系数进行验证，借助Google Earth影像基于均匀分布和均匀代表性原则计算总体精度和Kappa系数，如表2所示。

表2　空间误差表

年份	总体精度/%	Kappa系数
1992年	93.28	0.92
1997年	93.36	0.93
2002年	93.98	0.89
2007年	96.58	0.91
2012年	93.22	0.88
2017年	93.63	0.85
2022年	94.89	0.86

结果表明，总体精度93%左右，Kappa系数>0.85，分类结果良好，充分表明改良VBANUI指数能准确、快速实现小范围尺度下城市建成区精细提取，为城市空间格局演变分析提供准确的基础数据，确保城市空间演变规律研究的准确性。

3.2　武汉市中心城区城市扩张动态分析

根据表3可知武汉市1992年、1997年、2002年、2007年、2012年、2017年、2022年中心城区城市建成区分别214.63、246.46、296.72、345.20、415.59、452.35、477.97 km²，从1992年的214.63 km²增加到

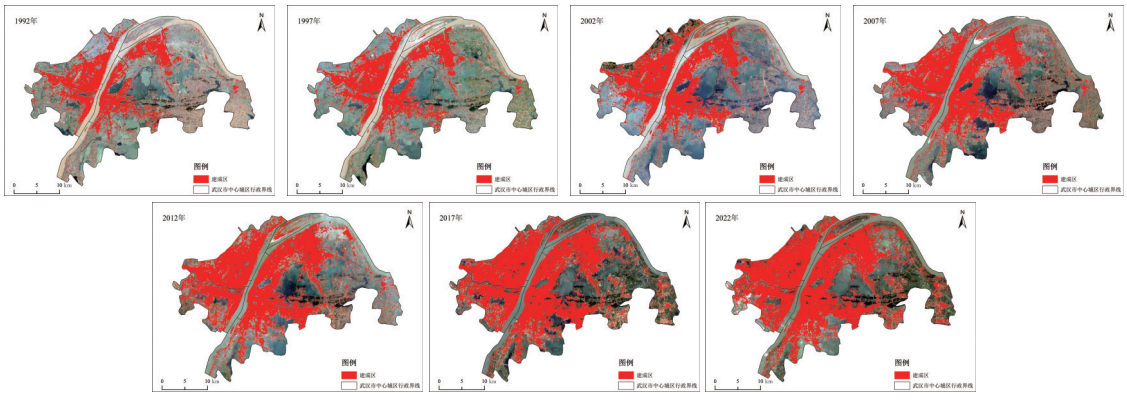


图2　武汉市中心城区城市建成区

审图号：GS(2019)1822号

表3 武汉市中心城区城市建成区面积表

区县	行政面积/km²	各年份建成区面积/km²						
		1992年	1997年	2002年	2007年	2012年	2017年	2022年
汉阳区	111.54	27.78	30.99	38.29	45.15	58.61	66.00	69.05
洪山区	573.28	44.94	57.93	83.81	110.36	155.04	179.28	199.53
江岸区	80.28	30.03	33.31	39.09	46.75	52.22	54.81	55.99
江汉区	28.29	18.59	21.93	24.28	25.31	26.12	26.38	26.52
硚口区	40.06	23.03	24.94	27.60	30.37	34.16	35.94	36.23
青山区	57.12	31.38	34.11	35.41	37.06	38.11	38.39	38.72
武昌区	64.58	38.88	43.25	48.23	50.19	51.31	51.56	51.93
中心城区	955.15	214.63	246.46	296.72	345.20	415.59	452.35	477.97

2022年的477.97 km²，增幅达到122.69%，整体呈现出前期快速扩张，后期扩张相对减弱的趋势。从各辖区来看，7个行政辖区建成区面积逐年增加，其中江汉区、青山区、硚口区城市建成区占比位居前列，洪山区行政面积最大，建成区面积也是最大，青山、武昌、汉阳区1992—2012年保持较快速扩张，2012年以后扩张逐渐减弱。

结合表4和表5可知，武汉市中心城区年均扩张速度1992—2012年保持不断增长的趋势，2012—2022年呈现下降趋势，扩张强度则稳中有降。1992—2012年汉阳、江岸、洪山区均保持高强度的增长趋势，2012—2022年逐渐减弱。江汉、硚口、青山、武昌区整体保持逐渐减弱的扩张趋势，这与行政各区行政辖区面积有关，江汉、硚口、青山、武昌4区城镇化率于2012年已经达到80%以上，且受制于辖区总面积，扩张空间有限，2012年以后扩张驱动力减弱。

表4 武汉市中心城区城市扩张速度表/(km²·a⁻¹)

区县	1992—1997年	1997—2002年	2002—2007年	2007—2012年	2012—2017年	2017—2022年
汉阳区	0.64	1.46	1.37	2.69	1.48	0.61
洪山区	2.60	5.18	5.31	8.94	4.85	4.05
江岸区	0.66	1.16	1.53	1.09	0.52	0.24
江汉区	0.67	0.47	0.21	0.16	0.05	0.03
硚口区	0.38	0.53	0.55	0.76	0.36	0.06
青山区	0.55	0.26	0.33	0.21	0.06	0.07
武昌区	0.87	1.00	0.39	0.22	0.05	0.07
中心城区	6.37	10.05	9.70	14.08	7.35	5.12

为更加直观地分析武汉市中心城区整体和各辖区扩张情况，利用ArcGIS空间分析方法绘制1992—2022年武汉市中心城区和各辖区城市建成区扩张图（图3）。结合图3可知，随着城市发展，武汉市中心城区在

表5 武汉市中心城区城市扩张强度表/%

区县	1992—1997年	1997—2002年	2002—2007年	2007—2012年	2012—2017年	2017—2022年
汉阳区	0.57	1.31	1.23	2.41	1.32	0.55
洪山区	0.45	0.90	0.93	1.56	0.85	0.71
江岸区	0.82	1.44	1.91	1.36	0.64	0.30
江汉区	2.36	1.67	0.73	0.57	0.18	0.10
硚口区	0.95	1.33	1.38	1.89	0.89	0.15
青山区	0.96	0.45	0.58	0.37	0.10	0.11
武昌区	1.35	1.54	0.61	0.35	0.08	0.11
中心城区	0.67	1.05	1.02	1.47	0.77	0.54

1992—2012年以面状发展模式为主，2012—2022年以面状发展模式为主加上点状内部填充发展模式为辅。主要在于西北部城区发展较早，于2012年城镇化率达到80%以上，发展模式受到辖区面积影响，转为点状内部填充发展。建成区面积不断增加，其中汉阳区面积变化明显，逐渐向西南方向延伸扩张，沿着墨水湖向三环线逐步扩张。洪山区城市面积也有较大的扩张，沿着汤逊湖扩张。而硚口、江汉、江岸、青山、武昌区面积变化不大，主要原因在于整体城镇化率高且行政面积有限，整体扩张驱动力减弱。具体而言，各区均从二环线朝着三环线扩张，武汉市中心城区土地集约程度不断提高，形成一体化发展格局。

3.3 武汉市中心城区城市景观格局演变分析

为探究武汉市中心城区结构组成和空间配置特征，计算得到分形维数和紧凑度，从表6可知，武汉市中心城区扩张向外延为主，结构形态紧凑，轮廓相对简单，整体表现为有序向外扩张。紧凑度在0.749~0.786之间，分布紧凑，说明武汉市中心城区聚集度高，区域一体化趋势明显，各区之间相互影响增强。分形维数变化不明显，维持在1.024~1.055之间，保持缓慢增长，说明武汉市中心城区主要以向四周扩张模式为主。

表6 1992—2022年武汉市中心城区形态特征值

年份	1992年	1997年	2002年	2007年	2012年	2017年	2022年
紧凑度	0.786	0.783	0.776	0.765	0.762	0.758	0.749
分形维数	1.024	1.030	1.033	1.039	1.044	1.052	1.055

3.4 武汉市中心城区城市重心迁移方向分析

结合图4和图5可知，武汉市中心城区城市重心逐步向东南方向移动，移动距离略有增加，1992—1997年朝着东北方向迁移移动，1997—2022年逐步朝着东南方向移动。这与化工新区的大规模开发以及洪

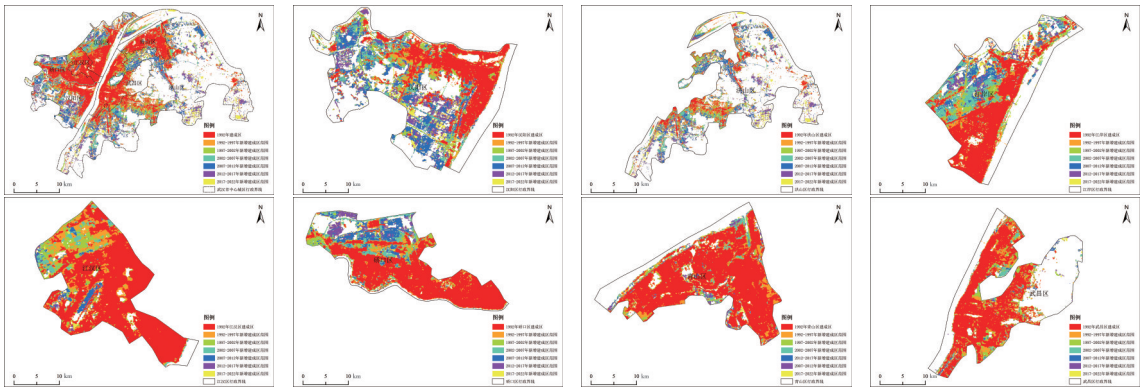


图3　武汉市中心城区城市建成区扩张图

审图号：GS(2019)1822号

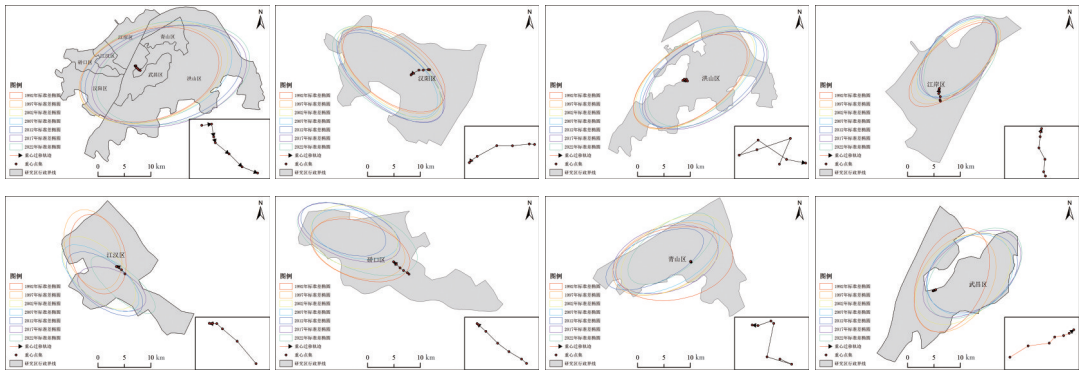


图4　武汉市中心城区城市建成区重心迁移和标准差椭圆图

审图号：GS(2019)1822号

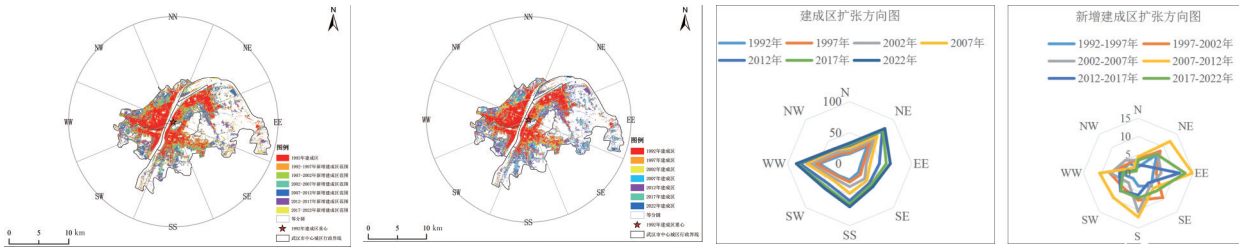


图5　武汉市中心城区城市建成区扩张方向风向玫瑰图

审图号：GS(2019)1822号

山区有着大量待开发土地有关，新工业园区建设及其产生的产业集聚效应，促使武汉市中心城区东南部的发展水平迅速增长，加上硚口、江汉、江岸、青山区待开发空间不足，促使重心朝着东南方向移动。同时迁移距离先增加后减弱，也说明武汉市中心城区城市化进程先快速增长后减弱，这与城镇化发展趋势是相互吻合。

4　结　语

本文利用改良VBANUI指数方法提取1992—2022年武汉中心城区建成区，验证了该方法在小尺度提取中兼具数量精度与空间位置精度，有效揭示扩张规律。主要结论：①建成区持续面状扩张；②景观格局由破碎化转向高度一体化，城市化进程趋稳，内部聚集增强；③城市重心向东南迁移，印证区域一体化发展。局限在于大范围应用受高分辨率遥感数据获取制约，未来拟采用高分系列及珞珈一号夜光数据弥补Landsat数据难以获取的问题。

参考文献

[1]　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

[2]　杨眉,王世新,周艺,等. DMSP/OLS夜间灯光数据应用研究综述[J]. 遥感技术与应用,2011,26(1):45-51

[3]　Croft, Thomas A. Nighttime Images of the Earth from Space[J]. Scientific American,1978,239(1):86-98

[4]　Imhoff M. Using Nighttime DMSP/OLS Images of City

（下转第67页）