

采用夜光遥感数据提取城市建成区的邻域极值法

孙立双¹ 韩耀辉¹ 谢志伟¹ 李如仁¹

¹ 沈阳建筑大学交通工程学院,辽宁 沈阳,110168

摘要:针对灯光溢出特性导致的采用夜光数据提取城市建成区精度低的问题,提出了采用邻域极值法的建成区提取方法。首先,应用一元二次回归模型对夜光数据进行相对辐射校正处理;然后,通过邻域极值滤波得到描述影像灰度值空间变化特征的极值影像;最后,采用极值搜索算法获取建成区边界影像,并利用二值分割法提取城市建成区。实验结果表明,所提方法的平均Kappa系数和阈值选取时间分别为0.85、37 s,较突变检测法和统计分析法分别提高了0.03、1 503 s和0.01、443 s。提取结果的空间形态更接近于参考数据,具有更好的提取效果和稳定性。

关键词:灯光溢出特性;夜光数据;邻域极值滤波;极值搜索算法;城市建成区

中图分类号:P237

文献标志码:A

随着城市化的加速,城市建成区逐渐扩大,快速、准确地提取城市建成区对城市管理和规划具有重要意义^[1-3]。目前,应用夜光影像提取城市建成区的方法主要有经验阈值法、聚类阈值法、统计分析法和突变检测法^[4]。经验阈值法是通过研究者的经验来判别阈值,其优点是操作简单、快捷,对数据的依赖性小,但需要人工选择阈值,具有很高的主观性^[5-6];聚类阈值法通过对影像进行空间聚类,借助统计数据确定建成区的空间覆盖区域,消除了人的主观性的影响,具有快速、有效、低成本的特点,但是提取的建成区精度偏低^[7-8];统计分析法通过对获得的各类信息进行评估和预测,该方法具有较高的精度,但存在人工工作量大和工作效率低的不足^[9];突变检测法通过不断增加阈值来分配城市与非城市区域土地覆盖的百分比,具有较高的客观性和提取精度^[10],在建成区提取研究中得到了较多的应用。但是突变检测法在提取建成区的过程中,仍然存在提取的建成区虚检率高、效率低和精度稳定性差等问题。

为了提高突变检测方法的建成区提取效果,本文对突变检测法的阈值选取过程进行了改进,提出了采用邻域极值法的城市建成区自动提取方法。该方法首先对夜光遥感数据进行投影转

换和相对辐射校正的预处理;然后,通过极值滤波获取邻域差值影像;最后,采用极值搜索获取边界,并依此分割出城市建成区。本文提出的建成区提取方法的技术路线图如图1所示。

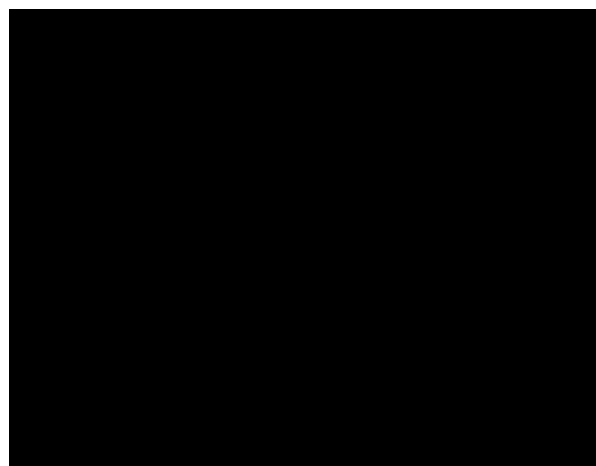


图1 采用邻域极值法提取城市建成区的技术路线图

Fig.1 Technical Roadmap of Urban BuiltUp Area Extracted by Neighborhood Extremum Method

1 数据源及预处理

本文选用的夜光遥感数据为美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)公布的DMSP/OLS(de

收稿日期:2020-01-06

项目资助:辽宁省教育厅科学研究项目(lnqn201917)。

第一作者:孙立双,博士,副教授,主要从事地理信息系统研究。645695280@qq.com

通讯作者:谢志伟,博士,讲师。zwxrs@sina.com

fense meteorological satellite program/ operational linescan system)数据,由于该数据具有时间序列长、稳定性强等优点,被广泛应用于城市建成区的提取^[11-14]。本文将DMSP/OLS数据投影转换为兰伯特等角圆锥投影,重采样分辨率设置为1 km。针对影像存在的灰度饱和问题,本文应用一元二次回归模型对影像像元灰度(DN)值进行饱和校正^[15-16]。首先,选取2007年F16卫星采集的影像数据作为参考数据,去除影像中不稳定的灯光像元。公式如下:

$$DN_b = \begin{cases} DN_c, DN_c < 63 \\ 63, DN_c \geq 63 \end{cases} \quad (1)$$

式中, DN 、 DN_b 分别代表校正前、后像元的灰度值; $DN_c = p \times DN^2 + q \times DN + m$, p 、 q 和 m 为回归系数。

然后,对同一卫星不同年份的DN值存在波动异常的问题,回归校正后的影像DN值进行相对校正^[17],公式为:

$$DN_{(n,i)} = \begin{cases} DN_{(n-1,i)}, DN_{(n-1,i)} > DN_{(n,i)} \\ DN_{(n,i)}, \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $DN_{(n-1,i)}$ 、 $DN_{(n,i)}$ 分别表示DMSP/OLS夜光影像上 i 像元在第 $n-1$ 年、第 n 年的灰度值。

2 邻域极值法提取城市建成区

邻域极值法是一种提取反映影像灰度值由高亮区到黑暗区渐变趋势的有效方法。本文通过邻域极值法获取分割建成区与非建成区的最佳边界,实现城市建成区的提取。采用夜光遥感数据提取城市建成区的邻域极值法在下文进行详细论述。

2.1 突变检测法提取城市建成区

突变检测法通过不断扩大二值分割阈值的数值来分析建成区斑块周长的变化规律,当建成区斑块的周长发生突变时,确定该时刻的二值分割阈值为最佳分割阈值,利用最佳分割阈值获得建成区^[18]。该方法人工干扰小,精度较高,是目前提取建成区中效果较好的方法。

突变检测法在提取建成区的过程中,存在提取的建成区空间覆盖区域普遍较参考数据偏大,提取工作效率低和精度稳定性低的问题。因此,本文受到突变检测法的启发,对其进行改进并提出了采用邻域极值法的城市建成区提取方法。

2.2 线性滤波法构建邻域差值图像

由于建成区区域灯光强度很高,非建成区灯

光强度几乎接近于零,由图2(a)所示的原始图。可知,建成区到非建成区灯光强度逐渐降低,呈现出一种梯度的变化,如图2(b)所示的灰度图。

图2 原始图像

Fig.2 Original Image

为了增强影像的灰度梯度变化特征,本文构建了极值滤波模板,如图3所示。滤波模板由目标像元和周围相邻的8个像元共同组成,采用极值滤波的方法计算出目标与相邻像元之间的灰度差。本文首先选用8个差值中的最大值替换模板中心的灰度值;然后进行滤波处理;最后对得到的差值数组进行图像转换,得到一幅反映建成区中心到非建成区扩散延伸过程中像元灰度值数值变化的邻域差值图像,如图4所示。

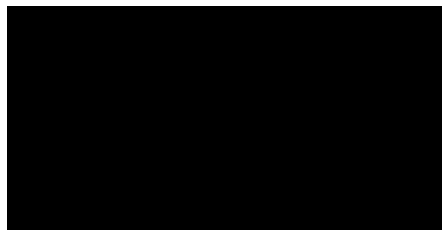


图3 滤波模板

Fig.3 Filter Template

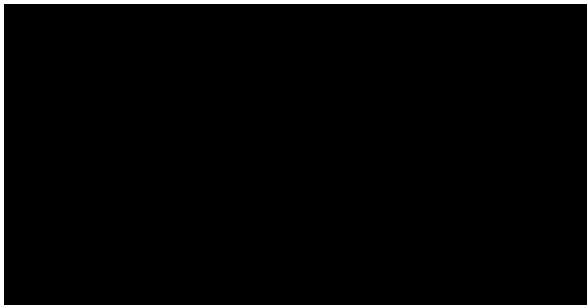


图4 邻域差值图像

Fig.4 Neighborhood Difference Image

图3中 d 、 $d1$ 、 $d2$ 、 $d3$ 、 $d4$ 、 $d5$ 、 $d6$ 、 $d7$ 和 $d8$ 分别表示滤波模板中的9个像元。图4中黑色部分表示影像相邻灰度值差值趋于稳定的位置,白色的区域表示邻域差值变化较大的位置。

2.3 极值搜索算法提取建成区边界

对邻域差值图像进行分析,可以发现在建成区与非建成区交界处的灰度值的变化波动较大,而类别相同的区域的变化波动较小,如图 5 所示。

图 5 邻域差值图像的灰度变化图

Fig.5 Grayscale Change Diagram of Neighborhood Difference Image

针对图 5(b)中灰度值渐变的特征,本文将影像灰度值从建成区向非建成区某一方向渐变过程中变化幅度较大点的位置作为城市建成区与非建成区分割点的位置。由于灯光差异性的影响,建成区边界位置的分割阈值点的大小是相异的。本文将这些阈值点联合起来组成的闭合环作为建成区的边界分割区域。对邻域差值图像应用极值公式(3)进行边界的提取,得到图像数组每一行的所有极值,并将非极值点赋值为 0。

$$DN_{(i,j-1)} < DN_{(i,j)} < DN_{(i,j+1)} \quad (3)$$

式中, $DN_{(i,j)}$ 代表第*i*行、第*j*列的像元灰度值;*i*、*j*分别代表数组的行数与列数。

本文将变化幅度较大的值提取出来,得到一幅边界极值图像,如图 6(a)所示,白色部分为边界位置。在图 6(b)中,折线峰点代表边界位置极值大小,黑色直线代表数值为 5。通过分析可以得到边界位置的极值均在 5 以上,故可以应用数值 5 为界去除其他干扰因素,得到建成区和非建成区的最佳边界,获得城市边界影像。

图 6 极值图像变化图

Fig.6 Change Diagram of Extremum Image

2.4 二值分割法提取建成区

图像分割算法能够使得同质性一致的像元

组成影像对象,将影像对象作为建成区提取的处理单元能够提高算法效率和精度。本文通过分形网络演化算法对城市建成区边界影像进行多尺度分割^[19],设置分割尺度为 1,紧致度为 0.5,形状因子为 0.1。对获得的影像对象进行二值分割,得到城市建成区边界影像对象和非城市建成区边界影像对象,分类结果如图 7 所示。城市建成区即为图 7 中绿色城市边界区域所包围的中部红色区域。

图 7 极值图像对象(红色区域表示非城市建成区边界区域,绿色区域表示城市建成区边界区域)

Fig.7 Object of Extremum Image(the Red Area Represents the Non-Urban Boundary Area, the Green Area Represents the Urban Boundary Area)

3 实验与分析

3.1 实验数据

本文选择 2000—2012 年的 DMSP/OLS 夜光稳定灯光数据作为实验数据,数据分别为 F14(2000—2002 年)、F15(2003—2006 年)、F16(2007—2009 年)和 F18(2010—2012 年),如图 8 所示。同时采用人工解译的方法提取与实验数据时相对应的 Landsat 数据的城市建成区,并将该城市建成区作为用于本文精度验证的参考数据^[20],参考建成区的面积如表 1 所示。

表 1 参考建成区面积

Tab.1 Areas of Reference Built-Up

年份	面积/km ²	年份	面积/km ²
2000	222	2007	483
2001	232	2008	488
2002	284	2009	394
2003	268	2010	677
2004	259	2011	587
2005	389	2012	777
2006	345		

3.2 实验分析

为验证校正模型的适应性,本文应用一元二次回归模型对 2000—2012 年沈阳市灯光数据进

行回归分析(以2007年卫星数据为参考数据),得到的相关参数如表2所示。相关系数 R^2 均在0.90

以上,符合回归模型的要求,故可以应用该模型对影像进行校正。

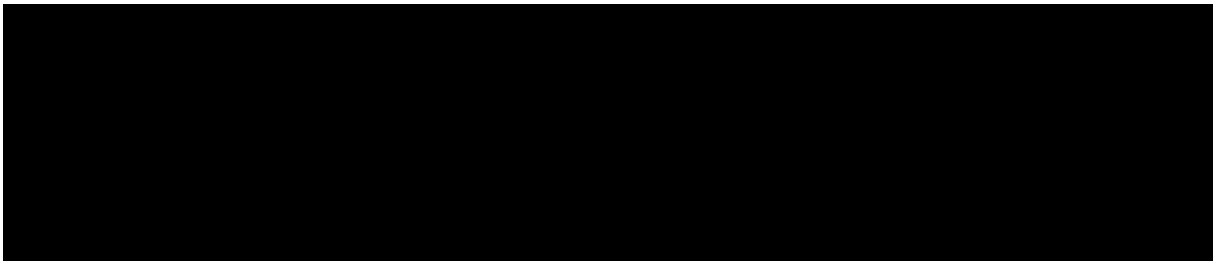


图8 原始图像
Fig.8 Original Images

表2 夜光数据一元二次回归相关参数					
Tab.2 The Unitary Quadratic Regression Parameters of Night Light Data					
卫星	年份	p	q	m	R^2
F14	2000	-0.019 7	2.336 6	-7.531 0	0.926 9
F14	2001	-0.014 4	1.951 7	-4.571 9	0.922 9
F14	2002	-0.016 2	2.007 3	-0.891 2	0.913 5
F15	2003	-0.018 1	2.122 0	-0.776 7	0.926 5
F15	2004	-0.013 9	1.880 3	-1.211 8	0.972 5
F15	2005	-0.014 9	1.950 9	-1.693 7	0.960 9
F15	2006	-0.010 3	1.702 0	-1.950 6	0.992 4
F16	2007	0.000 0	1.000 0	0.000 0	1.000 0
F16	2008	0.002 9	1.183 8	-0.352 6	0.992 5
F16	2009	0.001 7	0.869 6	0.426 8	0.967 9
F18	2010	0.013 4	0.045 1	4.253 7	0.978 4
F18	2011	0.001 3	0.867 1	0.023 4	0.948 9
F18	2012	0.009 0	0.314 7	3.102 5	0.950 6

应用邻域极值法对2000—2012年沈阳市夜光影像进行滤波处理,获取邻域差值图像,如图9所示。从图9中可知,差值图像亮度越大,表明灰度值变化的趋势越强。因此,将灰度值变化趋势较大的区域作为建成区与非建成区分割的边界区域。

为了验证本文方法的有效性,选用突变检测法和统计分析法与本文方法进行对比分析。统计分析法首先是通过选取45~62之间的18个灰度值作为二值分割的候选值;然后利用候选分割

阈值分别提取城市建成区;最后比较每个候选分割阈值提取建成区面积与政府提供的建成区面积的绝对差值,将绝对差值最小的候选阈值作为最佳二值分割阈值,并依据该阈值提取城市建成区。

本文分别计算统计分析法、突变检测法和邻域极值法等建成区提取方法结果的Kappa系数,通过比较每种方法结果的Kappa系数来检验精度。邻域极值法、突变检测法和统计分析法提取的建成区和参考建成区如图10所示,精度评定结果如表3所示。

通过图10可以清晰地观测到突变检测法提取的建成区虽然覆盖了人工解译获取的参考区,但是建成区提取的空间覆盖区域均大于参考建成区;统计分析法提取建成区虽然在参考数据的空间覆盖区域以内,但是提取的区域相对于参考建成区总体偏小,边界像元丢失严重;而邻域极值法提取的城市建成区空间覆盖区域基本接近参考建成区,很好地减弱了灯光溢出造成的建成区提取值高于参考值的情况和像元丢失问题,具有较好的提取效果和准确性。

通过表3可知,突变检测法和统计分析法的用户精度较高,但是提取的建成区生产精度和Kappa系数值波动较大,分割时间较长,不具有很好的应用效果;而应用邻域极值法提取的建成区的用户精度与生产精度在77%以上,总体精度在

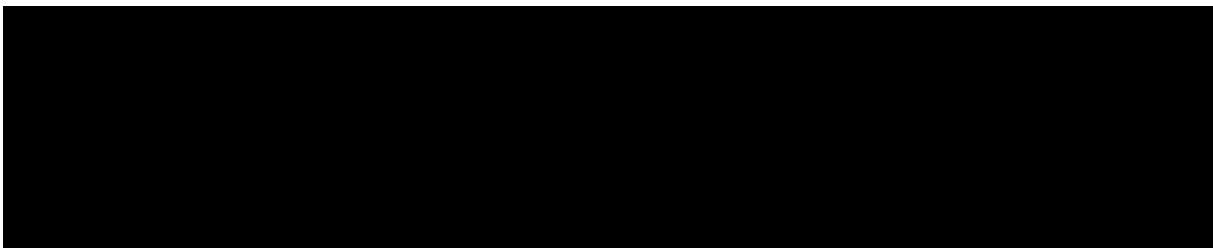


图9 邻域差值图像
Fig.9 Neighborhood Difference Images

图 10 邻域极值法、突变检测法和统计分析法提取的建成区和参考建成区
Fig.10 Built-Up Areas and Reference Built-Up Areas Extracted by Neighborhood Extremum Method,
Mutation Detection Method and Statistical Analysis Method

表 3 统计分析法、突变检测法与邻域极值法精度统计表
Tab.3 Accuracy Statistics of Statistical Analysis Method, Mutation Detection Method and Neighborhood Extremum
Method

统计精度	统计分析法				突变检测法				邻域极值法			
	2000 年	2004 年	2008 年	2012 年	2000 年	2004 年	2008 年	2012 年	2000 年	2004 年	2008 年	2012 年
用户精度/%	77	86	98	100	100	100	99	95	94	89	77	88
生产精度/%	72	98	76	54	59	62	83	93	81	79	95	90
总体精度	0.96	0.98	0.96	0.88	0.95	0.94	0.96	0.97	0.98	0.97	0.95	0.94
Kappa 系数	0.73	0.91	0.84	0.64	0.72	0.74	0.88	0.93	0.86	0.82	0.83	0.86
分割时间/s	1 525	1 546	1 526	1 529	480	500	478	485	36	35	37	35
提取面积/km ²	206	295	379	417	376	420	582	794	258	290	398	763

0.90 以上,Kappa 系数值均在 0.82 以上且波动较小,提取阈值所用时间均值分别较突变检测法和统计分析法提高了 443 s 和 1 503 s。因此,本文提出的方法相对于突变检测法和统计分析法具有更好的提取效果和稳定性。

4 结 语

本文提出了采用邻域极值法的城市建成区提取方法,该方法不仅改善了突变检测法在提取城市建成区过程中阈值选取所用时间过长的缺点,而且改善了由于灯光溢出造成建成区提取值较参考值过大的问题。本文方法能够快速、高效、低成本地更新城镇建成区数据,为 DMSP/OLS 夜光数据充分发挥其时效性和经济性起到积极的推动作用。本文方法在市域范围的小尺度城市建成区获得了较好的效果,但是否能够应用于更高级别行政辖区的大尺度城市建成区提取还需要进行验证。同时,邻域极值法对单个城市的建成区能够取得较好的效果,但尚未实现多个城市建成区的同时提取,这是本文进一步的改进方向。

参 考 文 献

[1] Li Deren, Yu Hanruo, Li Xi. The Spatial-Temporal Pattern Analysis of City Development in Countries Along the Belt and Road Initiative Based on Night-

time Light Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(6): 711-720 (李德仁,余涵若,李熙. 基于夜光遥感影像的“一带一路”沿线国家城市发展时空格局分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(6): 711-720)

[2] He Chunyang, Li Jinggang, Cheng Jin, et al. The Urbanization Model and Process in Bohai Sea Surrounding Area in the 1990s by Using DMSP/OLS Data[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(3): 409-417(何春阳,李景刚,陈晋,等. 基于夜间灯光数据的环渤海地区城市化过程[J]. 地理学报, 2005, 60(3): 409-417)

[3] Milesi C, Elvidge C D, 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

[4] Shu Song, Yu Bailang, Wu Jianping, et al. Methods for Deriving Urban Built-Up Area Using Night-Light Data: Assessment and Application[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26(2): 169-176(舒松,余柏浪,吴健平,等. 基于夜间灯光数据的城市建成区提取方法评价与应用[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(2): 169-176)

[5] Giuliano G, Small K A. Subcenters in the Los Angeles Region[J]. *Regional Science and Urban Economics*, 1991, 21(2): 163-182

[6] Wu Jiansheng, Chen Sha, Peng Jian. Assessment

- of Forest Damage Due to Ice Storm Using Image Thresholding Techniques: A Case Study of Yunnan Province[J]. *Progress in Geography*, 2013, 32(6): 913-923(吴健生,陈莎,彭建. 基于图像阈值法的森林雪灾损失遥感估测——以云南省为例[J]. 地理科学进展, 2013, 32(6): 913-923)
- [7] Zhou Jingui, Chen Yanhua, Ding Ge, et al. A Clustered Threshold Method for Extracting Urban Built-Up Area Using the DMSP/OLS Nighttime Light Images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(2): 196-201(邹进贵,陈艳华,丁鸽,等. 利用DMSP/OLS灯光影像提取城镇建成区的聚类阈值法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(2): 196-201)
- [8] Wang Yaxiong, Kang Feng, Li Wenbin, et al. Effective K-means Clustering Algorithm for Tree Trunk Identification[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(3): 230-237(王亚雄,康峰,李文彬,等. 面向立木识别的有效K-均值聚类算法研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 230-237)
- [9] He Chunyang, Shi Peijun, Li Jinggang, et al. Reconstruction of Urbanization Spatial Process in Mainland China in 1990s Based on DMSP/OLS Night Lighting Data and Statistics[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, (7): 856-861(何春阳,史培军,李景刚,等. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据和统计数据的中国大陆20世纪90年代城市化空间过程重建研究[J]. 科学通报, 2006(7): 856-861)
- [10] Huang Lu, Yang Yingbao, Zhu Qin. Expansion Research on the Area in Nanjing City Based on DMSP/OLS Data[J]. *Geospatial Information*, 2018, 16(1): 94-97(黄璐,杨英宝,朱琴. 基于DMSP/OLS数据的南京市建成区扩展研究[J]. 地理空间信息, 2018, 16(1): 94-97)
- [11] Li Xi, Xue Xiangyu. Estimation Method of Night-time Light Images Electric Power Consumption Based on the Boston Matrix[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 1 994-2 002(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): 1 994-2 002)
- [12] Cheng Xin, Shao Hua, Li Yang, et al. Evaluation Model of Urban Land Intensive Use Based on Night-time Light Remote Sensing Data[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(8): 262-268(程歆,邵华,李杨,等. 基于夜间灯光遥感数据的城市土地集约利用评价模型[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 262-268)
- [13] Shi Leijie, Huang Chang, Sun Haoran, et al. Research on Spatialtemporal Pattern of Yulin Economic Development Based on DMSP/OLS Nighttime Imagery[J]. *Journal of Geomatics*, 2018, 43(1): 89-92(石蕾洁,黄昌,孙浩然,等. 基于DMSP/OLS夜间灯光遥感的榆林经济发展时空模式研究[J]. 测绘地理信息, 2018, 43(1): 89-92)
- [14] Wu Jiansheng, Li Shuang, Zhang Xiwen. Research on Saturation Correction for Long-time Series of DMSP-OLS Nighttimelight Dataset in China[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(4): 621-632(吴健生,李双,张曦文. 中国DMSP-OLS长时间序列夜间灯光遥感数据饱和校正研究[J]. 遥感学报, 2018, 22(4): 621-632)
- [15] Liu Z, He C, Zhang Q, et al. Extracting the Dynamics of Urban Expansion in China Using DMSP/OLS Nighttime Light Data from 1992 to 2008[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 106(1): 62-72
- [16] Cao Ziyang, Wu Zhifeng, Kuang Yaoqiu, et al. Correction of DMSP/OLS Night-Time Light Images and Its Application in China[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2015, 17(9): 1 092-1 102(曹子阳,吴志峰,匡耀求,等. DMSP/OLS夜间灯光影像中国区域的校正及应用[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(9): 1 092-1 102)
- [17] Wu J, He S, Peng J, et al. Intercalibration of DMSP-OLS Night-Time Light Data by the Invariant Region Method[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(20): 7 356-7 368
- [18] 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
- [19] Wei Xingwang, Zhang Xuefeng, Xue Yun. Remote Sensing Image Segmentation Quality Assessment Based on Spectrum and Shape[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2018, 20(10): 1 489-1 499(韦兴旺,张雪锋,薛云. 基于光谱和形状的遥感图像分割质量评估方法[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(10): 1 489-1 499)
- [20] Li Yingli, Yan Huijie, Zhang Ningli, et al. Artificial Interpretation of Grassland Cover Information Based on High-Score Remote Sensing Image[J]. *Geomatics Technology and Equipment*, 2014, 16(1): 67-69(李英利,闫会杰,张宁丽,等. 基于高分遥感影像地表覆盖草地信息人工解译技术方法[J]. 测绘技术装备, 2014, 16(1): 67-69)

Neighborhood Extremum Method of Extracting Urban Built-Up Area Using Nighttime Lighting Data

SUN Lishuang¹ HAN Yaohui¹ XIE Zhiwei¹ LI Ruren¹

¹ School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China

Abstract: To address the problem of low accuracy in the urban built-up area extraction method using nighttime light data due to light spillover characteristics, the build-up area extraction method based on neighborhood extremum is proposed. Firstly, the one-dimensional quadratic regression is used to perform relative radiation correction for nighttime light data. Then, the extremum images describing the spatial variation characteristics of gray values are obtained by extremum neighborhood filtering. Finally, the extremum search algorithm was used to obtain the boundary images of built-up areas, and the binary segmentation method is used to extract urban built-up areas. The experimental results show that the means of Kappa coefficients and threshold selection times of our proposed method are 0.85 and 37 s, which are 0.03, 1 503 s and 0.01, 443 s higher than that of the mutation detection method and the statistical analysis method. The spatial morphology of the built-up area extraction results is closer to the reference data, which has better extraction effect and stability.

Key words: light spillover characteristics; nighttime lighting data; neighborhood extremum filtering; extremum search algorithm; urban built-up area

First author: SUN Lishuang, PhD, associate professor, specializes in geographic information system. E-mail: 645695280@qq.com

Corresponding author: XIE Zhiwei, PhD, lecturer. E-mail: zwxrs@sina.com

Foundation support: Liaoning Provincial Education Department Scientific Research Project(lnqn201917).

引文格式: SUN Lishuang, HAN Yaohui, XIE Zhiwei, et al. Neighborhood Extremum Method of Extracting Urban Built-Up Area Using Nighttime Lighting Data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(10): 1 619–1 625. DOI: 10.13203/j.whugis20190010(孙立双, 韩耀辉, 谢志伟, 等. 采用夜光遥感数据提取城市建成区的邻域极值法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(10): 1 619–1 625. DOI:10.13203/j.whugis20190010)