引文格式：贺鑫, 张飞, 韩奇笑, 等. 基于突变检测法的干旱区城市时空格局演变分析[J]. 地理空间信息, 2023, 21(8): 9-13. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2023.08.003

基于突变检测法的干旱区城市时空格局演变分析

贺　鑫[1]，张　飞[1,2,3*]，韩奇笑[1]，周　婷[1]，刘雪宁[1]，余欣茹[1]
（1. 新疆大学地理与遥感科学学院，新疆 乌鲁木齐 830017；2. 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830046；
3. 新疆大学智慧城市与环境建模自治区普通高校重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830017）

摘　要：夜间灯光数据一定程度上表征了人们夜间的活动强度，能综合地反映城市发展情况，基于夜间灯光数据的城市扩展研究已成为热点科学问题。本研究利用DMSP/OLS夜间灯光数据，以干旱区城市乌鲁木齐为研究靶区，借鉴突变检测法（Mutation Detection），确定了2001—2013年的建成区提取灯光阈值、城市建成区域以及城市重心，对城市扩展进行时间和空间尺度上的分析，并以总体分类精度（Overall Accuracy）和Kappa系数作为评价指标，最终对突变检测法的建成区提取效果进行评价。研究结果表明：①突变检测法下有时可能存在多个分割阈值，与实际建成区对比方能确定最佳分割阈值，且不同年份的最佳分割阈值不具有通用性。②乌鲁木齐市城区面积在2001—2013年整体上呈现出递增趋势，平均增长速度为22.92 km^2/a。③2001—2013年期间，乌鲁木齐市城市重心表现为西北-西南-东北方向转移，但均分布在新市区范围内，总体向西北方向转移。利用突变检测法的乌鲁木齐建成区提取总体分类精度平均值达到了81.07%，同时预测结果与统计数据也表现出较好的一致性。综上，主要探讨了乌鲁木齐市建成区的时空格局变化，可为今后进一步拓展研究干旱区城市发展提供重要的科学依据和理论方法。

关键词：突变检测法；城市建成区；DMSP/OLS；干旱区
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）08-0009-05

UrbanSpatio-temporal Patterns Evolution Analysisin Arid Areas Based on Mutation Detection Method

HE Xin[1], ZHANG Fei[1,2,3], HAN Qixiao[1], ZHOU Ting[1], LIU Xuening[1], YU Xinru[1]
(1. College of Geography and Remote Sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830017, China;
2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;
3. Key Laboratory of Smart City and Environmental Modeling of Higher Education Institute, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract: Night-light data,to some extent,representspeople's activity intensityand can comprehensively reflect the situation of urban development.Urban expansion research based on night-light data has become a hot scientific issue.In this study, taking Urumqi, an arid region, as the research target, we used DMSP/OLS night-light data to determine the threshold of light extraction, urban built-up area and urban center of gravity in built-up area from 2001 to 2013,and analyzed urban expansionon time and space scales. We used overall accuracy and Kappa coefficient as evaluation indexes to evaluate the extraction effect of built-up area by mutation detection method. Theresults show that①sometimes, there may be multiple segmentation thresholds under the mutation detection method, and the optimal segmentation threshold can be determined only by comparing with the actual built-up area, and the optimal segmentation threshold of different years is not universal.②The urban area of Urumqi showed an increasing trend from 2001 to 2013, with an average growth rate of 22.92 km²/a.③From 2001 to 2013, the urban center of Urumqi shifted from northwest to southwest to northeast, but all of them were distributed within the new urban area,and generally shifted to northwest.④The average accuracy of total classification of Urumqi built-up area extracted by mutation detection method is 81.07%, and the prediction results are consistent with the statistical data. To sum up, we mainly discussedthe spatio-temporal pattern changes of Urumqi built-up areas,which could-provide important scientific basis and theoretical methods for further research on urban development in arid areas.

Key words: mutation detection method, urban built-up area, DMSP/OLS, arid area

随着国家“一带一路”战略的全面推动实施，研究丝绸之路经济带沿线西部城市的发展和格局演变变得日益需要，而新疆维吾尔自治区作为“一带一路”建设的重要组成部分及核心区，乌鲁木齐市作为典型西部城市，是全区政治、经济、文化、科教和交通中心，具有十分重要的战略地位和研究意义。目前，虽

收稿日期：2022-01-27；修回日期：2022-05-07。
项目来源：国家大学生创新训练项目（XJU-SRT-21021）；中国科学院战略性先导科技专项资助项目（XDA20040400）。
第一作者简介：贺鑫（1999—），主要从事城市遥感研究工作，E-mail：remotesensinghexin@163.com。
通信作者：张飞（1980—），博士，教授，主要从事干旱区生态环境遥感应用研究，E-mail：zhangfei3s@163.com。

然夜间灯光数据在城市建成区、经济、人文等领域研究较为广泛，但干旱区城市的相关研究内容较少，干旱区城市灯光数据特性以及对城市发展的反映机制有待进一步考证。基于此，本文利用DMSP/OLS夜间灯光数据，根据突变检测法获取建成区最佳分割阈值，进行乌鲁木齐市建成区提取并统计建成区面积，然后分别研究时间尺度和空间尺度上的城市发展模式，最后利用相关指标评价建成区的提取精度，从而准确地把握干旱区城市夜间灯光数据特征，为利用夜光数据研究西部区域的人口活动、经济社会发展、市域社会治理等工作提供科学依据。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

乌鲁木齐市位于新疆维吾尔自治区北部（省会城市），是西北部重要的中心城市，86°37′33″~88°58′ 24″ E，42°45′32″ ~45°00′00″ N，经济实力雄厚，城市化水平较高，乌鲁木齐市下辖7个市辖区及一个县，分别是天山区、沙依巴克区、新市区（乌鲁木齐高新技术产业开发区）、水磨沟区、头屯河区（乌鲁木齐经济技术开发区）、达坂城区、米东区、乌鲁木齐县，总面积约1.38×10^4 km^2。截至2020年11月1日零时，乌鲁木齐市常住人口为4.05×10^6人，2020年，乌鲁木齐市实现地区生产总值（GDP）3.34×10^{11}元。随着社会经济的发展，乌鲁木齐城市规模不断扩大，城市聚集程度不断提高，乌鲁木齐市的建成区主要集中分布在市辖区范围内[1]。

1.2 数据来源及预处理

DMSP/OLS数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心（https：//www.resdc.cn/），该数据已经经过饱和校正及拟合。文中使用的DMSP/OLS数据涉及2001—2013年的年平均夜间灯光数据，灰度值范围在0~63，采集的是夜间灯光、火光等产生的辐射信号。DMSP/OLS传感器在夜间工作，能探测到城市灯光甚至小规模居民地、车流等发出的低强度灯光，并使之区别于黑暗的乡村背景[2]。因此，DMSP/OLS夜间灯光影像可作为人类活动的表征，成为了人类活动及城市发展监测研究的重要数据源。统计年鉴数据来源于CNKI全国年鉴和新疆地区年鉴数据库（http://epub.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=CYFD）中《乌鲁木齐统计年鉴》。

将2001—2013年的DMSP夜光数据GCS_Clarke_1866地理坐标系转换为WGS_1984地理坐标系，根据乌鲁木齐市边界矢量数据裁剪得到研究区域的灯光数据，然后利用高斯克吕格3°带投影转换为投影坐标系，像元大小重采样为1 000 m。

2 研究方法

2.1 突变检测法

Imhoff认为城市区域是一个完整的多边形斑块，在设定一个初始阈值并不断增大提取边界的分割阈值时，多边形斑块的周长会不断减小，当不断增大阈值到某一点后，城市多边形斑块区域不是继续沿着边缘缩小，而是从区域内部破碎，分裂为大量的面积较小的多边形斑块，代表城市区域的多边形周长会突然增加或保持不变。这个点即为提取该城市区域的阈值点[3-4]。以上述突变检测法，确定乌鲁木齐市稳定灯光数据的城市建成区分割阈值点。步长设置为1，在逐渐增大分割阈值的过程中，统计每个灰度值（阈值）对应的城市区域多边形斑块周长。

2.2 城市建成区提取

同一系列下的夜间灯光稳定数据的分割阈值不具有通用性，即某一年提取城市建成区的阈值并不能有效地应用于该系列下其他年份的数据的建成区提取。因此需要按照上述确定阈值的方法依次计算和判断得到2001—2013年乌鲁木齐市建成区最佳分割阈值。以最佳分割阈值从夜光数据的黑暗乡村背景中提取亮度值较大的城市建成区域[5]，即DN值大于阈值的像元，将划分为城镇用地。如公式1所示。

$$R(i,j)=\begin{cases}1, I(i,j)\geqslant \text{阈值}\\ 0, I(i,j)<\text{阈值}\end{cases} \tag{1}$$

式中，$I(i,j)$为影像上i行j列的像元灰度值；$R(i,j)$为影像二值化后的像元值，其中1为城市建成区域；0为非城市区域。

2.3 城市空间格局演变

本文以扩张速度、扩张强度[6]来表示乌鲁木齐市空间演变模式，以城市重心、城市重心转移距离、城市重心转移速度、城市重心偏移角度[7]来表达空间格局演变方向。

2.3.1 城市空间格局扩展模式

1）扩张速度。研究区域建成区面积的年平均增长率，代表城市建成区扩张的总体规模和趋势，公式如下：

$$M=\frac{R_2-R_1}{(t_2-t_1)\times R_1}\times100\% \tag{2}$$

式中，M为扩张速度；R_1为起始城市建成区面积；R_2终止城市建成区面积；t_1为时段开始年份；t_2为时段结束年份。M越大则表征建成区扩张速度越快。

2）扩张强度。某一时间段内城市建成区扩张面

积占该城市土地总面积比值，可以用来分析和阐述城市建成区的扩张状态(城市建成区扩张的强弱、快慢以及趋势)，公式如下：

$$I=\frac{R_2-R_1}{(t_2-t_1)\times \mathrm{A}}\times 100\% \tag{3}$$

式中，I 为城市扩张强度；R_1 为起始的城市建区总面积；R_2 为结束城市建成区总面积；t_1 为时段开始年份，t_2 为时段结束年份；A 为城市土地总面积；I 越大则表示城市扩张强度越大。

2.3.2　城市空间扩展演变方向

以城市重心、城市重心转移距离、城市重心转移速度、城市重心偏移角度4个指标来表征。

1）城市重心。城市重心可反映城市空间分布在二维平面空间上的位置。公式如下：

$$\begin{cases} X=(\sum_{i=1}^{n}X_i\times C_i)/\sum_{i=1}^{n}C_i \\ Y=(\sum_{i=1}^{n}Y_i\times C_i)/\sum_{i=1}^{n}C_i \end{cases} \tag{4}$$

式中，X、Y 分别为重心坐标的经度和纬度坐标值；(X_i，Y_i)为第 i 个像元的坐标；C_i 为像元 i 的属性值，本研究中为夜光数据 DN 值，n 为区域内的像元总数。

2）城市重心转移距离。重心转移距离，代表这一期间某一年的城市重心相对于之前某一年的偏移量。公式如下：

$$L=\sqrt{(X_i-X_j)^2+(Y_i-Y_j)^2} \tag{5}$$

式中，X_i 和 X_j 分别为两点的 X 坐标值；Y_i 和 Y_j 分别为两点的 Y 坐标值。

3）城市重心转移速度，重心转移速度，表示某一时间段内城市重心的转移速度快慢。公式如下：

$$V=L/T \tag{6}$$

式中，L 为上述城市重心转移距离；T 为这一时间段的时间间隔。

4）城市重心偏移角度[8]，重心偏移角度 α 是指建成区重心在某一研究时期内移动的方向与正东方向的夹角。

2.4　精度评定方法

混淆矩阵又称为误差矩阵，是表示精度评价的一种标准格式，本文中选用应用最为较广泛的总体分类精度（overall accuracy）和Kappa系数作为精度评价指标。总体分类精度是正确分类的像元的个数与研究区总像元个数之比，Kappa系数常用于一致性检验[9]。

$$P_0=Tr/\mathrm{N} \tag{7}$$

式中，P_0 为总体分类精度；Tr 为正确分类的像元个数；N 为研究区总像元个数。

$$P_e=(a_1\times b_1+a_2\times b_2+\cdots+a_c\times b_c)/N\times N \tag{8}$$

$$K=(P_0-P_e)/1-P_e \tag{9}$$

式中，$a_1, a_2, \cdots, a_c$ 分别为假设每一类的真实样本个数，而 $b_1, b_2, \cdots, b_c$ 分别为预测出来的每一类的样本个数，N 为总样本个数。

3　结果与分析

3.1　最佳分割阈值的选取

由图1可知，在不断增大分割阈值时，城市区域多边形周长逐渐减小，而其中当阈值增加到42和47时，周长开始增加。当阈值增大到48后，多边形周长开始迅速减小。根据Imhoff提出的突变检测法，灰度值42和47的点即是提取城市建成区的阈值点。由于存在两个分割阈值点，则分别以这2个阈值作为城市多边形区域边界值，分割得到乌鲁木齐市建成区斑块，如图2所示。

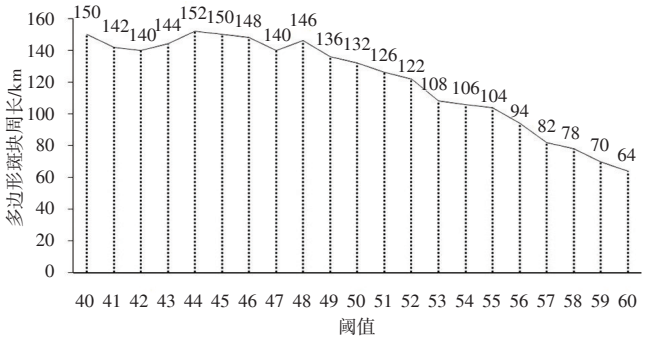


图1　不同分割阈值下的城市多边形区域周长变化

统计不同分割阈值下的建成区域多边形斑块的面积，以最接近实际建成区面积的阈值点作为最佳阈值点。其中，阈值42下的城市建成区面积为348 km^2，阈值为47时的城市建成区面积是280 km^2，而统计数据记录的城市建成区面积为236 km^2，显然阈值47对应的城区多边形斑块面积更加接近实际城市建成区面积，所以应选择47作为最佳分割阈值。

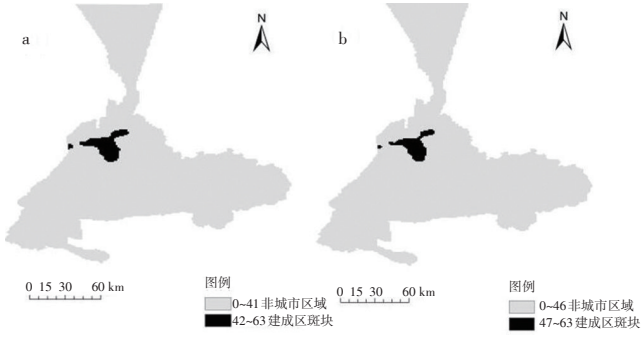


图2　不同分割阈值下的城市建成区斑块
（a.阈值为42，b.阈值为47）

依照上述过程，依次确定2001—2013年期间的乌鲁木齐市建成区最佳分割的阈值，得到表1，由表可知，最佳分割阈值分布在40~60之间，大部分的年份的最佳分割阈值都大于等于50，其中频数最大的最佳分割阈值为50，这也验证了经验阈值法选取50为建成区提取阈值的合理性，且不同年份的最佳分割阈值都一般不同，同一系列下的建成区提取阈值不具有通用性。

表1 历年城区提取最佳分割阈值

年份	最佳分割阈值	年份	最佳分割阈值
2001	50	2008	51
2002	54	2009	53
2003	43	2010	57
2004	55	2011	50
2005	47	2012	59
2006	50	2013	58
2007	54		

3.2 建成区扩张时空特征分析

以表1中2001—2013年城区提取最佳分割阈值为中断值，对夜间灯光数据进行重分类，影像上大于等于最佳分割阈值的部分为城市建成区域，统计2001—2013年的城市建成区面积，如图3所示。通过观察发现，这一期间乌鲁木齐城区面积总体上呈现增加的趋势，斜率为22.92，即平均增长速度为22.92 km^2/a，其中2003年和2011年的建成区面积属于异常高值，2007年为异常低值。

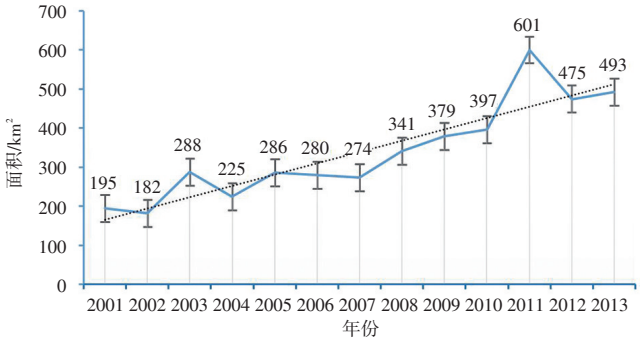


图3 2001—2013年乌鲁木齐市建成区面积变化

分析历年城市建成区的空间分布情况，发现2001年乌鲁木齐市建成区主要呈聚集式分布在天山区、沙依巴克区、水磨沟区以及新市区，2001—2004年期间建成区扩张范围较小，其中米东区扩展面积最大，2004—2006年间，米东区范围内的建成区继续向西扩张使得其与中心老城区连接起来，2006—2008年，新市区、米东区、头屯河区内建成区迅速扩张，形成了头屯河区–新市区–米东区的带状建成区，并开始往南向乌鲁木齐县延伸，2008—2010年主要表现为老城区的进一步扩张，2010—2013年建成区扩张面积最大，其中因为甘泉堡经济技术开发区的发展，米东区东北部出现了一个孤立的建成区斑块。在城市发展过程中建成区整体上表现为由中心向边缘“摊大饼”式扩张，逐渐向头屯河区、米东区两端扩展，由于地形等自然因素限制以及相关政策影响，城市建成区明显表现为往西北朝向的“T”形演变。城市扩张主要集中在中西部区域，而南部的达坂城区和乌鲁木齐县以及北部的米东区发展较为缓慢。

3.3 城市重心演变分析

本次研究计算了2001年、2005年、2010年以及2013年的城市重心，发现这4 a的城市重心均分布在新市区范围内，城市重心2001—2005年向西北方向转移，2005—2010年向西南方向转移，2010—2013年向东北方向转移，但就整体而言向西北方向转移。

然后依次计算2001—2005年、2005—2010年、2010—2013年的乌鲁木齐城市建成区扩张速度、扩张强度、重心转移距离、重心转移速度以及重心偏移角度，其中2001—2005年的城市扩张速度最快，达到了11.67%；2010—2013年的城市扩张强度最大，值为0.23%；3个时间段内城市重心都有明显的转移，其中2001—2005年的重心转移速度最快，速度为0.82 km/a；重心偏移角度情况与根据城市重心转移路线的判断是一致的。

3.4 建成区对比分析

本研究以统计年鉴确定的城市建成区作为标准，但是由于统计数据记录的是市辖区的建成区，因此需要利用市辖区范围矢量图对上述提取的建成区进行掩膜处理，提取出市辖区范围，统计各类像元个数，然后再进行对比。

表2 像元个数统计表

年份	乌鲁木齐市建成区	市辖区建成区	统计数据建成区
2001	195	195	167
2002	182	182	167
2003	288	287	169
2004	225	225	173
2005	286	286	176
2006	280	280	236
2007	274	274	259
2008	341	335	303
2009	379	362	339
2010	397	390	343
2011	601	577	384
2012	475	473	384
2013	493	485	391

由表2可知：2001—2007年间整个乌鲁木齐市建

成区面积与市辖区建成区面积基本一致，建成区主要集中分布在市辖区范围内，而2008—2013年随着乌鲁木齐县的发展，乌鲁木齐市总共的建成区面积略大于市辖区的建成区面积。同时由于灯光溢出效应的存在，通过灯光数据提取出的建成区面积普遍大于统计数据的建成区面积。

3.5　建成区提取精度评价

作者利用总体分类精度和kappa系数对建城区提取效果进行评价，如表3所示。

表3　建成区提取的精度评价

年份	Overall Accuracy/%	Kappa系数
2001	85.64	0.89
2002	91.76	0.92
2003	58.89	0.57
2004	76.89	0.76
2005	61.53	0.60
2006	84.29	0.83
2007	94.53	0.94
2008	90.45	0.90
2009	93.65	0.93
2010	87.95	0.87
2011	66.55	0.63
2012	81.18	0.79
2013	80.62	0.79

由表3可知，建成区提取的总体分类精度最小值为2005年的58.89%，最大值为2007年的94.53%，平均精度达到了81.07%。

Kappa计算结果范围为（-1，1），但通常Kappa是落在区间（0，1），可以表示5组不同级别的一致性：0.0~0.20极低的一致性（slight）、0.21~0.40一般的一致性（fair）、0.41~0.60中等的一致性（moderate）、0.61~0.80高度的一致性（substantial）和0.81~1几乎完全一致（almost perfect）。以此为标准可以判断根据灯光数据提取的建成区与通过统计年鉴确定的建成区至少具有中等的一致性，其中2001年、2002年、2006年、2007年、2008年、2009年、2010年在80%以上，几乎完全一致，利用突变检测法能够较准确地提取城市建成区。

4　结　论

本文基于2001—2013年乌鲁木齐市DMSP/OLS夜间灯光数据，确定了历年夜光数据建成区最佳分割阈值，并提取了城市建成区的分布范围以及城市重心，拥有较高的精度。研究得出以下结论：

1）基于突变检测算法可能得到多个满足要求的城区提取阈值，与实际建成区对比方能确定最佳分割阈值，且同一系列下灯光数据提取建成区的阈值不具有通用性，不同年份具有不同的最佳分割阈值。

2）乌鲁木齐市城区面积在2001—2013年整体上呈现出递增趋势，平均增长速度为22.92 km^2/a，这一期间城市重心整体向西北方向转移，其中2001—2005年转移速度最快，并且3个时间段内城市重心均分布在新市区范围内。

3）以统计年鉴为标准的精度评价表明，利用突变检测法的乌鲁木齐建成区提取总体分类精度平均值达到了81.07%，同时根据kappa系数结果，建成区提取的预测结果与统计数据至少具有中等的一致性，其中2001年、2002年、2006年、2007年、2008年、2009年、2010年具有一致性。

参考文献

[1] 段素素,郑江华,余丹林,等.“一带一路”典型绿洲城市扩张特征研究:以乌鲁木齐市为例[J].测绘科学,2020,45(8):188-198

[2] Elvidge C D,Cinzano P,Pettit D R,et al. The Nights at Mission Concept[J]. International Journal of Remote Sensing,2007,28(12): 2 645-2 670

[3] 吴凤敏,郑稚棚,梁均军,等.基于NPP/VIIRS数据的重庆市城市空间发展变化分析[J].地理空间信息,2021,19(5):45-50

[4] 李德仁,李熙.论夜光遥感数据挖掘[J].测绘学报,2015,12(12):42-43

[5] 李欣欣,何飞,王利.大连金普新区城镇空间拓展特征研究[J].地理空间信息,2018,16(1):27-31

[6] 米晓楠,白林燕,谭雪航,等.基于DMSP/OLS数据的城市中心城区提取新方法[J].地球信息科学学报,2013,15(2):255-261

[7] 万意,陈云浩,李京.基于DMSP/OLS数据的河南省城市空间格局及动态扩张分析[J].地理与地理信息科学,2019,35(1):89-94

[8] 彭媛媛,吴庆双.广州市建成区空间扩张与驱动因子研究[J].地理空间信息,2020,18(5):76-82

[9] 王敏,李景保,梁莉莉,等.基于夜间灯光数据的长沙市城市建成区提取结果对比分析[J].湖南师范大学自然科学学报,2021,44(4):45-52

[10] 舒松,余柏蒗,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