

基于夜光数据的滇中城市建成区动态监测与时空格局演变

林之强^{1,2}, 彭双云^{1,2}, 洪亮^{1,2}, 许泉立^{1,2}, 周燕莲¹

(1. 云南师范大学 旅游与地理科学学院, 昆明 650500;

2. 云南省地理空间信息技术工程技术研究中心, 昆明 650500)

摘要:及时、准确地获取城市群各城市建成区空间信息, 监测城市扩张时空变化, 对于土地利用方式优化、生态文明建设具有重大意义。基于 DMSP/OLS 夜间灯光遥感数据, 采用“基于统计数据的比较法”, 提取 1993—2013 年滇中城市群的建成区信息, 探索 20 年间滇中城市群建成区的空间格局动态变化。结果表明: (1) 20 年间, 滇中城市群逐渐形成以昆明市为中心的“中心放射状”集聚形态。(2) 滇中城市建成区面积在 1993—2013 年增长了 8 倍, 特别是昆明市建成区的增长尤为显著。(3) 不同城市、不同阶段扩张速度与扩张强度存在明显差异: 2003 年之前, 滇中城市处于缓慢增长阶段, 2003 年之后进入快速增长阶段, 2008 年之后则增速变缓但呈稳定快速增长趋势。20 年间滇中城市群的扩张强度总体上呈现出“先降低—后升高—再降低”的趋势。

关键词:夜间灯光遥感; 滇中城市群; DMSP/OLS; 城市扩张; 时空分析

中图分类号: P237

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)01-0265-07

Dynamic Monitoring and Spatial-Temporal Pattern Evolution of Built-up Areas in Central Yunnan Based on Nighttime Light Data

LIN Zhiqiang^{1,2}, PENG Shuangyun^{1,2}, HONG Liang^{1,2}, XU Quanli^{1,2}, ZHOU Yanlian¹

(1. College of Tourism and Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;

2. Yunnan Geospatial Information Technology Engineering Technology Research Center, Kunming 650500, China)

Abstract: Timely and accurate acquisition of spatial information of urban built-up areas in urban agglomerations and monitoring of the spatiotemporal changes of urban expansion are of great significance to the optimization of land use methods and the construction of ecological civilization. Based on the DMSP/OLS night light remote sensing data and the comparison method based on statistical data, the built-up area information of central Yunnan urban agglomeration from 1993 to 2013 was extracted to explore the dynamic changes of the spatial pattern of the built-up area of central Yunnan urban agglomeration during the 20 years. The results show that: (1) in the past 20 years, the central Yunnan urban agglomeration had gradually formed a central radial cluster form centered on Kunming; (2) the area of urban built-up areas in central Yunnan had increased 8-fold from 1993 to 2013, especially the growth of built-up areas in Kunming; (3) there were obvious differences between different cities and different stages of expansion speed and expansion intensity: Before 2003, cities in central Yunnan were in a stage of slow growth trend. In the past 20 years, the expansion intensity of central Yunnan urban agglomeration had shown a trend of decreasing first—then increasing—then decreasing.

Keywords: night light remote sensing; central Yunnan urban agglomeration; DMSP/OLS; urban expansion; space-time analysis

收稿日期: 2020-02-28

修回日期: 2020-04-17

资助项目:国家自然科学基金“滇中快速城市化过程中土地利用与生态系统服务的动态耦合机制及优化调控模拟研究”(41971369); 国家自然科学基金“快速城市化背景下不透水表面格局与滇池流域水土流失的时空过程耦合效应研究”(41561086); 国家自然科学基金“基于地理景观层次模型和区域统计建模的高分辨率遥感影像多尺度场景分类”(41661082); 国家自然科学基金“城镇化进程中基于蚁群行为规则的滇池流域不透水表面扩张智能体建模与模拟”(41461038)

第一作者:林之强(1996—), 男, 云南马龙人, 硕士研究生, 主要从事遥感图像处理与夜光遥感数据应用研究。E-mail: 248972265@qq.com

通信作者:彭双云(1978—), 男, 云南马龙人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事遥感影像处理、地理信息系统、流域模拟的研究。E-mail: frankmei@126.com

改革开放以来,中国正在经历快速的城市化^[1]。尤其是在1993—2013年,滇中城市群地区城市建设和社会经济飞速发展,同时也面临着社会、经济和生态环境等带来的一系列城市问题。因此,为实现对城市建成区的可持续管理以及对区域环境影响的评估,找准城市群未来发展方向,从长时间序列上科学、准确的监测城市建成区动态变化及分析其空间格局演变将尤为重要。

遥感是快速、有效、经济、直接地获取城市建成区空间信息的重要手段。但常规的遥感影像(如 Landsat, MODIS 等)在城镇空间信息提取方面存在数据时序较差、解译过程复杂、费时费力等缺点。对比常规遥感卫星影像,DMSP/OLS 夜光数据具有以下优点:(1)易获取,可通过多种途径得到^[2-3];(2)良好的低光探测能力^[4-6],使得城市明显区别于夜间黑暗的乡村地区,适合大尺度建成区提取^[7];(3)一定的空间和时间分辨率,适合城市化进程的动态监测^[7];(4)影像同时具有空间信息和强度变化信息,适用于大尺度监测和识别城市扩展变化^[8]。基于上述夜光遥感数据的优点,国内外学者对城市化进行了大量研究。从研究方向看,主要以城市提取^[9-11]、城市扩张变化^[12-16]、城市空间格局分析^[17-19]为主;从研究区域看,主要集中在长三角城市群^[20-21]、长江中游城市群^[22-23]、珠三角城市群^[24-25]、环渤海城市群^[26-29]、京津冀城市群等^[30-31]。以上研究侧重于城市化水平较高的城市群地区,且空间格局分析多关注于城市的内部空间格局,对城市群整体空间格局的探索分析较为缺乏。城市群空间格局的分析有助于探索城市化带来的深远影响和辅助政府制定合理的城市规划与土地利用政策。

滇中城市群作为云南的核心,被赋予了“依托长江建设中国经济新支撑带的重要增长极”的历史使命,在此背景下,迫切需要基于夜光遥感数据对滇中城市群动态监测和空间格局演变进行探索,以揭示滇中城市化进程及其空间格局特征。

鉴于此,本文以滇中城市群为研究区,基于 DMSP/OLS 夜间灯光遥感影像数据和统计年鉴数据等,提取1993—2013年滇中每五年的城市建成区空间信息,构建城市扩张形态、扩张速率、扩张强度指数,定量分析滇中城市群20 a间的城市扩张时空过程及其空间特征,探索滇中城市群的空间格局动态演变特征及城市扩张时空变化规律,以期对滇中地区城镇发展、政策制定提供科学参考。

1 研究区与数据处理

1.1 研究区概况

滇中地区是云南发展的火车头,滇中兴,则云南兴。滇中城市群作为国家近年来重点培育的19个城市群之一,下辖昆明市、玉溪市、曲靖市、楚雄彝族自治州和红河哈尼族彝族自治州的蒙自市、个旧市、开远市、弥勒市、建水县、石屏县、泸西县,共计49个县,总国土面积为114 600 km²,占全省国土面积的29%,人口数2 300万,占全省44.02%,2015年生产总值为8 397.99亿元,占全省GDP总量的61.22%。滇中地区矿产、旅游、生物、土地资源丰富,地势起伏平缓,平均海拔约1 848 m,气候温和宜人,是最适宜居住的区域之一。

2011年5月27日,云南省人民政府批复实施《滇中城市群规划(2009—2030年)》。滇中城市群成为了云南开发前景最好的地区,亦是推动云南省以及西南地区区域合作的主体,在云南省新型城镇化道路、十三五规划、“两个一百年”奋斗目标中,滇中城市群具有决定性作用。

1.2 数据源

(1) 云南省行政边界矢量数据。数据来源于国家基础地理信息空间(<http://ngcc.sbsm.gov.cn/>),数据坐标系为WGS-84,比例尺1:400万。

(2) 城镇建成区面积统计数据。本研究采用的滇中各城市建成区面积统计数据有1993年、1998年、2003年、2008年、2013年共五期,统计年鉴来源于中国知网的云南省经济社会发展统计数据库(<http://data.cnki.net/Area/Home/Index/D25>)。

(3) DMSP/OLS 夜间灯光数据。NGDC 发布的第四版 DMSP/OLS 非辐射定标夜间平均灯光强度数据,影像参考椭球体为WGS-84,扫描带宽3 000 km,空间分辨率约为1 km,影像像元DN值范围为0~63。由于该数据分辨率较低且存在过饱和现象,需进行一系列校正处理,根据曹子阳^[32]的研究,选取F16卫星传感器的2006年辐射定标的夜间灯光影像作为本文的校正影像(网址http://ngdc.noaa.gov/eog/dmsp/download_radcal.hGoogle Earth)。根据研究内容,选取了1993—2013年的平均相隔5 a的F101993, F121998, F142003, F162008, F182013共5幅非辐射定标夜间灯光影像。

2 研究方法

2.1 数据预处理

DMSP/OLS 夜间灯光数据的预处理包含了重投

影、重采样、研究区域裁剪和原始影像相互校正、不连续校正两大部分:(1) 影像重投影、影像重采样与裁剪。将原始影像的投影坐标系转换为兰伯特等角圆锥投影(Lambert Conformal Conic),并将影像像元重采样为 1 km,裁剪研究区年际影像。(2) 相互校正与不连续校正。DMSP 卫星传感器在获取地表数据的过程中受到多种因素的影响(如大气层的吸收和散射、太阳高度角、地形起伏度、传感器校准等)^[33],导致不同传感器获取的同一年份的影像存在差异。同时,不同的 OLS 传感器在获取影像时并未进行星上辐射校正^[34],造成同一卫星传感器获取的连续不同年份影像间相同位置的亮值像元 DN 值的异常波动。

2.1.1 相互校正 根据曹子阳的研究^[32],选取中国黑龙江省社会经济发展较为稳定的鹤岗市作为不变区域标定区,采用不变参考区方法^[34]对夜间灯光影像相互校正。以 F162006 中定标区域的像元 DN 值为标准,将其他年份的影像与参考数据 F162006 作回归曲线估计计算得到回归方程模型参数。

$$DN_c = a \times DN^2 + b \times DN + c \tag{1}$$

式中: a, b, c 为二次回归模型参数; DN_c 与 DN 分别表示校正后与校正前影像的像元 DN 值。利用 SPSS 软件将待校正影像像元 DN 值与 F16 卫星传感器的 2006 年的辐射定标的夜间灯光影像像元 DN 值进行二次回归。SPSS 软件计算的二次回归模型参数见表 1。

表 1 二次回归模型校正参数

影像数据	sig	R^2	a	b	c
F101993	0.000	0.922	0.065	0.542	0.134
F121998	0.000	0.935	0.051	0.123	0.604
F142003	0.000	0.943	0.034	0.779	0.261
F162006	—	1	0	1	0
F162008	0.000	0.902	0.044	0.107	0.467
F182013	0.000	0.786	0.041	-0.483	0.835

2.1.2 不连续校正 经过相互校正后的夜间灯光影像仍然存在像元 DN 值异常问题,因此,还需要进行影像的不连续校正。假设前一年的夜间灯光影像数据的亮值像元在后一年灯光影像中同一位置的像元也应保持为亮值像元,前一年夜间灯光影像中的亮值像元 DN 值,应小于或等于后一年影像中同一位置的亮值像元 DN 值^[32],即满足公式 2。

$$DN_{(n,i)} = \begin{cases} DN_{(n,i)} & \text{其他} \\ DN_{(n-1,i)} & DN_{(n+1,i)} > 0 \text{ 且 } DN_{(n-1,i)} > DN_{(n+1,i)} \\ 0 & DN_{(n+1,i)} = 0 \end{cases} \tag{2}$$

式中: $DN_{(n-1,i)}, DN_{(n,i)}, DN_{(n+1,i)}$ 分别表示第 $n-1$ 年,第

n 年和第 $n+1$ 年通过相互校正和不连续校正后的夜间灯光影像的 i 像元的 DN 值。经过校正后的图像消除了像元 DN 值异常和“饱和”现象的问题(图 1)。

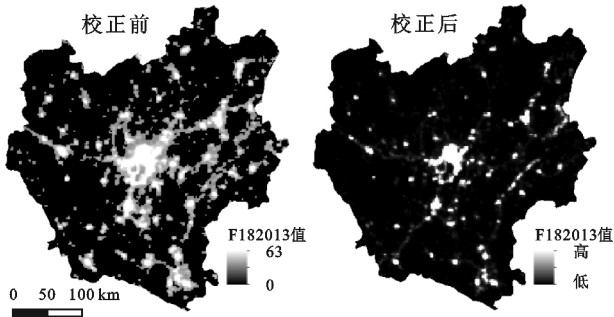


图 1 DMSP/OLS 夜光数据滇中区域校正前后

2.2 基于夜间灯光数据的城市建成区提取

基于 DMSP/OLS 夜光数据提取城镇建成区的方法主要有 4 种:城市轮廓突变检测法^[35]、经验阈值法^[36]、基于较高分辨率影像数据空间比较法^[37]、基于统计数据比较法^[38]。通过比较,本研究选取“基于统计数据比较法”作为滇中城市群的城镇信息提取方法。借助 ArcGIS 10.5 软件,运用二分迭代,快速获取阈值,获取每个城镇的地理空间结构及空间信息。二分法迭代快速计算获取阈值,算法如下^[39]。

$$DN_t = \text{int}[(DN_{\max} - DN_{\min}) / 2] \tag{3}$$

式中: DN_{\max} 和 DN_{\min} 分别为某年某地区灯光影像像元最大灰度值和像元最小灰度值; DN_t 为该区域灯光影像的潜在阈值。

将 DN_t 提取的城镇用地面积和统计资料的建成区面积进行比较,提取面积最接近统计年鉴值的则 DN_t 设置为最优阈值。同时利用高分辨率数据(Google Earth 影像)提取 1993 年、1998 年、2003 年、2008 年、2013 年的滇中城市群典型城镇边界,两者反复进行对比验证,进而互相精度校正,以获取最精确的提取结果。

利用最接近统计数据的阈值重分类(式 4)夜间灯光影像,进而重建滇中城市群城市空间信息,得到滇中城市群基于 DMSP/OLS 夜间灯光遥感数据提取的建成区空间分布图(图 2)。

$$\begin{cases} DN=0 & DN \leq DN_t & \text{未建成区} \\ DN=1 & DN \geq DN_t & \text{建成区} \end{cases} \tag{4}$$

式中: DN 为像元灰度值; DN_t 为最优阈值;0 代表未建成区,1 表示建成区。

2.3 城市扩张指数

为比较不同研究时段内城市扩张的快慢或强弱,采用城市扩张速率与城市扩张强度指数进行探究。针对所提取的建成区面积,可得面积增长率、城市扩张速率数学模型如下:

$$A_t=\frac{A_b-A_a}{A_a}=\frac{a}{A_a}\tag{5}$$

$$V_t=\frac{A_b-A_a}{t}=\frac{a}{t}\tag{6}$$

式中： A_t 为面积增长率； A_a, A_b 分别为前后年份提取的建成区面积； a 为增长面积； V_t 为扩张速率； t 为时间间隔。



图 2 1993 年、1998 年、2003 年、2008 年、2013 年夜间灯光数据建成区空间分布

城市扩展强度指数是城市扩张空间变化的一个重要指标,通过分析城市扩展强度指数可定量地比较城市扩张的程度及速度。城市扩张强度数学模型如下:

$$C_a=\frac{A_b-A_a}{A_a}\times\frac{1}{t}\times100\%\tag{7}$$

式中： A_a, A_b 分别为前后年份提取的建成区面积； t 为时间间隔； C_a 为扩张强度指数。

3 结果与分析

3.1 建成区提取精度评价

利用 1993 年、1998 年、2003 年、2008 年、2013 年滇中主要城市的统计数据中的建成区面积、Google Earth 影像数据以及利用 DMSP/OLS 夜间灯光遥感影像提取的各城市用地面积进行精度评价,三者相互比较两两计算绝对误差与相对误差(表 2)。 A_1 表示统计数据建成区面积, A_2 表示 Google Earth 影像面

积, A_3 表示夜间灯光影像提取的城市建成区面积。统计数据建成区面积 A_1 与 Google Earth 影像面积 A_2 的绝对误差为 C_1 ,相对误差为 R_1 ;统计数据建成区面积 A_1 与夜间灯光影像提取的城市建成区面积 A_3 的绝对误差为 C_2 ,相对误差为 R_2 ;Google Earth 影像面积 A_2 与夜间灯光影像提取的城市建成区面积 A_3 的绝对误差为 C_3 ,相对误差为 R_3 。

通过比较各城市统计数据中的建成区面积、Google Earth 影像数据提取面积以及 DMSP/OLS 夜间灯光遥感影像提取的各城市用地面积,结果表明: A_1A_2 绝对误差最大为 19.27 km²,相对误差最大为 8.55%, A_1A_3 绝对误差最大为-11.44 km²,相对误差最大为-4.44%, A_2A_3 绝对误差最大为-16.60 km²,相对误差最大为-8.58%,三者建成区面积两两之间相对误差均小于 10%,证明基于统计数据确定的最优阈值提取建成区面积其精度相对较高。

表 2 定量精度评价

年份	A_1/km^2	A_2/km^2	A_3/km^2	C_1/km^2	C_2/km^2	C_3/km^2	$R_1/\%$	$R_2/\%$	$R_3/\%$
1993	98.00	100.63	97.94	2.63	-0.06	-2.69	2.68	-0.06	-2.67
1998	131.74	143.00	132.80	11.26	1.06	-10.20	8.55	0.80	-7.13
2003	185.00	193.38	176.78	8.38	-8.22	-16.60	4.53	-4.44	-8.58
2008	349.03	332.47	337.59	-16.56	-11.44	5.12	-4.74	-3.28	1.54
2013	503.56	522.83	510.36	19.27	6.80	-12.47	3.83	1.35	-2.39

3.2 滇中城市群空间格局分析

3.2.1 滇中城市群城镇空间变化 经统计,1993—2013 年滇中建成区像元数在不断增加,1993 年滇中区域城镇建成区像元数为 324,2003 年滇中区域城镇建成区像元数为 1183,2013 年滇中区域城镇建成区像元数为 2484,20 a 的时间里,滇中地区城镇建成区像元数增加了 2 160 个,城镇面积扩张了近 8 倍。滇中地区原有的城镇面积在稳定增长,新兴中小城市 and 新兴城

镇在不断涌现,建成区图斑数不断增加,城市边界持续扩展。其中四大城市的影像亮值像元总数逐年增加,城区面积在不断扩张,城市化水平均呈上升态势,尤其滇中最大城市(昆明市)的提升幅度最大,其次是曲靖市、楚雄市,玉溪市的变化幅度相对较小。

3.2.2 滇中城市群空间格局 为进一步探索滇中 20 a 来形成的城市格局,本文将提取的 2013 年滇中城市群建成区与滇中地区主要公路叠加,发现滇中城市建

成区图斑的分布呈现出以公路为骨架廊道,错落分布于公路附近的格局。由图 3 可见,整个滇中建成区的分布格局以昆明市为核心,大致形成了“昆明—曲靖”、“昆明—楚雄”、“昆明—玉溪—蒙自”三条城市发展轴线,城市群表现为“中心放射型”。从结构布局上看,从 1993—2013 年,滇中区域形成了内外两个发展圈层,中心圈层为“昆明都市圈”,外部圈层为“曲靖—楚雄—蒙自经济圈”,滇中城市群便形成了“点—线—面”联动的空间格局。

以上结果与 2011 年云南省人民政府批复实施的《滇中城市群规划(2009—2030 年)》相符,规划中表明,滇中城市群将形成“一主四副,轴向对接,点阵联动”的空间格局。随着城市化进程,未来滇中城市发展增长极持续增加,将成长为更显著的放射型城市群。

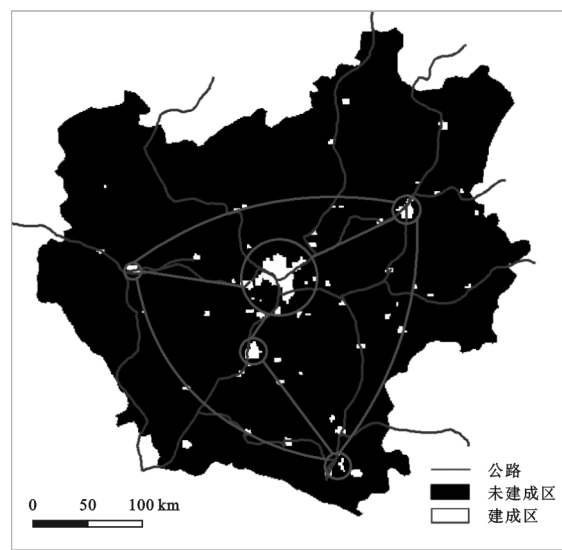


图 3 2013 年滇中城市群空间结构

3.3 滇中城市扩张分析

3.3.1 形态与方向变化 通过对滇中城市群的昆明市、曲靖市、楚雄市、玉溪市 1993 年、1998 年、2003 年、2008 年、2013 年共 5 期的建成区提取结果进行空间叠置分析,可发现(图 4)昆明市以主城区为中心向外不断扩张,主要扩张方向为市区东南方向的呈贡新区和市区东北方向的空港(长水机场);曲靖市区主要扩张方向为北方的沾益区;楚雄市区呈现为东南—西北向拉伸扩张形态;玉溪市以红塔区为中心,呈扇形扩张形态,主要的扩展方向为西南—东北。

3.3.2 面积变化 通过 DMSP/OLS 夜间灯光数据提取建成区面积变化统计,发现滇中城市建成区面积在 20 a 间增长了 8 倍,特别是昆明市区的增长变化尤为明显。20 a 间,滇中城区面积增长最多的城市为昆明市,其后依次为曲靖市、玉溪市、楚雄市。在 1993—2013 年,昆明市建成区面积增长了 412.42

km²,曲靖市建成区面积增长了 160.99 km²,玉溪市建成区面积增长了 74.78 km²,楚雄市建成区面积增长了 72.07 km²。除四大城市外,滇中其余较小城镇面积变化在此期间则较为稳定。

3.3.3 速率与强度变化 通过计算滇中城市扩张速率(表 3)可以发现:2003 年之前,滇中城市处于缓慢增长阶段,2003 年之后进入快速增长阶段,2008 年之后则增速变缓但呈稳定快速增长趋势。其中昆明市区扩张速率最快时为 35.44 km²/年,曲靖市扩张速率最快时为 20.29 km²/年;楚雄市与玉溪市相对较慢,楚雄市扩张速率最大为 7.17 km²/年,玉溪市扩张速率最快时为 6.71 km²/年。

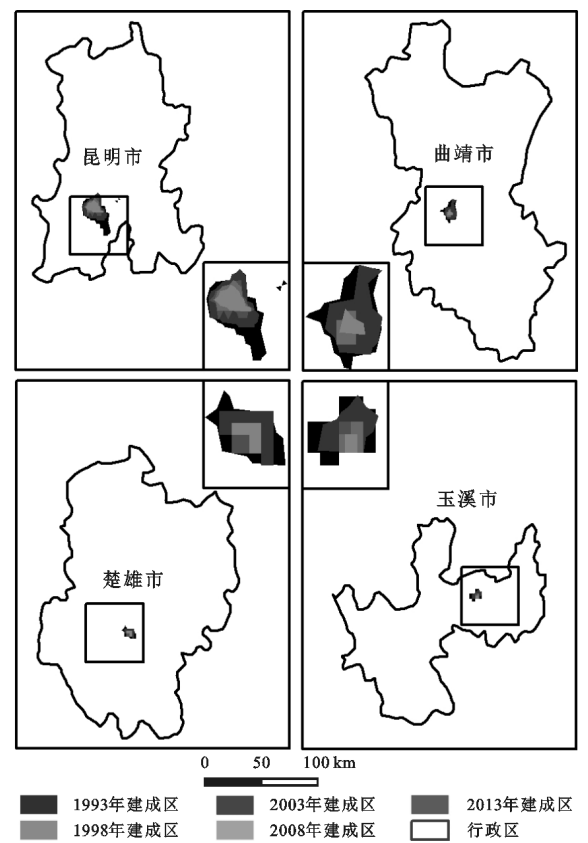


图 4 1993—2013 年滇中主要城市扩展形态

通过计算滇中城市扩张强度指数(表 3)发现:城市扩张强度可以看出 20 a 间滇中城市群的扩张强度总体趋势为“先降低—后升高—再降低”。其中曲靖市建成区空间扩张强度变化明显,2003 年前小幅度降低后开始上升,在 2003—2008 年达到峰值,随后进入降低阶段。昆明市、楚雄市、玉溪市的扩张强度较为稳定,峰值出现在 2003—2008 年。2003 年之前,玉溪市的扩张强度高于昆明市、曲靖市、楚雄市,而在 2003—2013 年,随着曲靖市的区位优势凸显,其城市扩张进程加快,城市扩张强度明显高于其他三市。

表 3 滇中城市扩张强度

城市	年份	A/km^2	a/km^2	$A_t/\%$	$V_t/(\text{km}^2 \cdot \text{a}^{-1})$	C_a
昆明市	1993	97.94	—	—	—	—
	1998	132.80	34.86	35.59	6.97	7.12
	2003	176.78	43.98	33.12	8.80	6.62
	2008	337.59	160.81	90.97	32.16	18.19
	2013	510.36	172.77	51.18	34.55	10.24
曲靖市	1993	16.55	—	—	—	—
	1998	23.84	7.29	44.05	1.46	8.81
	2003	25.84	2.00	8.39	0.40	1.68
	2008	127.30	101.46	392.65	20.29	78.53
	2013	177.54	50.24	39.47	10.05	7.89
楚雄市	1993	15.94	—	—	—	—
	1998	15.94	0.00	0.00	0.00	0.00
	2003	24.91	8.97	56.27	1.79	11.25
	2008	60.77	35.86	143.96	7.17	28.79
	2013	88.01	27.24	44.82	5.45	8.96
玉溪市	1993	5.98	—	—	—	—
	1998	15.95	9.97	166.72	1.99	33.34
	2003	19.94	3.99	25.02	0.80	5.00
	2008	53.47	33.53	168.15	6.71	33.63
	2013	80.76	27.29	51.04	5.46	10.21

4 结论

(1) DMSP/OLS 夜间灯光遥感影像适用于大尺度建成区提取。基于统计数据二分提取夜间灯光遥感影像中的城市建成区是可行的,且具有一定的可塑空间和运用潜力。

(2) 20 a 间,滇中城市群逐渐形成“中心放射状”集聚形态。至 2013 年,滇中城市群形成了以昆明市为中心,“昆明—曲靖”、“昆明—楚雄”、“昆明—玉溪—蒙自”三线为发展轴,全区内外为两个发展圈层,中心圈层是“昆明都市圈”,外部圈层是“曲靖—楚雄—蒙自经济圈”,整体“点—线—面”联动的空间格局。

(3) 滇中城市建成区面积在 1993—2013 年增长了 8 倍,特别是昆明市区的增长变化尤为明显。不同城市、不同时间间隔城市扩张速度与扩张强度存在明显差异。2003 年之前,滇中城市处于缓慢增长阶段,2003 年之后进入快速增长阶段,2008 年之后增速变缓呈稳定快速增长趋势。20 a 间滇中城市群的扩张强度总体趋势为“先降低—后升高—再降低”。

DMSP/OLS 夜间灯光遥感影像在城市建成区动态监测与时空格局演变分析方面具有不言而喻的优越性。夜间灯光数据是大尺度城市空间信息提取的理想数据,但也存在着空间分辨率较低的问题,对单个城市内部空间结构的表达具有一定的局限性,结合较高分辨率的数据可以完善此情况,今后需要在这方面做进一步的研究。我国未来在研制夜光卫星(如珞珈一号)时,可考虑采用 100 m 以内空间分辨率的传感器,逐步优化提高建成区提取精度。

参考文献:

[1] 顾朝林,徐海贤.改革开放二十年来中国城市地理学研究进展[J].地理科学,1999,19(4):320-331.

[2] 王鹤饶,郑新奇,袁涛. DMSP/OLS 数据应用研究综述[J].地理科学进展,2012,31(1):11-19.

[3] Fan J, Ma T, Zhou C, et al. Comparative estimation of urban development in China's cities using socioeconomic and DMSP/OLS night light data[J]. Remote Sensing, 2014,6(8):7840-7856.

[4] Elvidge C D, Baugh K E, Kihn E A, et al. Relation between satellite observed visible near infrared emissions, population, economic activity and electric power consumption [J]. International Journal of Remote Sensing, 1997,18(6):1373-1379.

[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] 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.

[7] 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.

[8] 钟洋,林爱文.长江中游城市群空间格局演变及优化研究:基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的方法[J].水土保持研究,2018,25(6):298-305.

[9] Zhang Q, Seto K C. Can night-time light data identify typologies of urbanization? A global assessment of successes and failures[J]. Remote Sensing, 2013,5(7):3476-3494.

[10] Yang Y, He C, Zhang Q, et al. Timely and accurate national-scale mapping of urban land in China using defense meteorological satellite program's operational line scan system nighttime stable light data[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2013,7(1):073535.

[11] Pandey B, Joshi P K, Seto K C. Monitoring urbanization dynamics in India using DMSP/OLS night time lights and SPOT-VGT data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013,23:49-61.

[12] Liu Z F, He C Y, Zhang Q F, 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.

[13] 卓莉,史培军,陈晋.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,2003,58(6):893-902.

[14] 卓莉,李强,史培军,等.基于夜间灯光数据的中国城市用地扩展类型[J].地理学报,2006,61(2):169-178.

[15] 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):94-97,9.

[16] 林中立,徐涵秋,黄绍霖.基于 DMSP/OLS 夜间灯光影像的中国东部沿海地区城市扩展动态监测[J].地球信

- 息科学学报,2019,21(7):1074-1085.
- [17] 聂艳,贾依晨,陈慧媛,等.基于 DMSP/OLS 数据的城市空间格局演变分析:以东北地区为例[J].湖北大学学报:自然科学版,2019,41(5):543-552.
- [18] 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):89-94,2.
- [19] 李靖业,龚健,杨建新,等.利用夜间灯光数据的武汉城市空间格局演化[J].遥感信息,2017,32(3):133-141.
- [20] 徐梦洁,陈黎,刘焕金,等.基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的长江三角洲地区城市化格局与过程研究[J].国土资源遥感,2011,90(3):106-112.
- [21] 孙钦珂,周亮,申如如,等.基于 DMSP/OLS 数据的长江经济带城市用地空间分异特征[J].遥感信息,2019,34(4):79-86.
- [22] 钟洋,胡碧松.夜间灯光数据的长江中游城市群空间格局演变[J].测绘科学,2018,43(9):68-75.
- [23] 张高华,谭力,钟鑫.基于 DMSP/OLS 长江中游城市群城区空间扩展与驱动力分析[J].智能城市,2018,4(2):1-3.
- [24] 丰佳佳.基于夜间灯光数据的珠三角城市群城镇化空间过程重建[J].亚热带资源与环境学报,2015,10(2):71-76.
- [25] 黄鸿健,王芳,解学通.基于灯光遥感数据的广东省 20 年城市化进程研究[J].城市学刊,2016,37(1):1-8.
- [26] 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.
- [27] He C Y, Li J G, Chen J, et al. The urbanization process of Bohai Rim in the 1990s by using DMSP/OLS data[J]. Journal of Geographical Sciences, 2006, 16(2):174-182.
- [28] 范俊甫,马廷,周成虎,等.1992—2010 年基于 DMSP-OLS 图像的环渤海城市群空间格局变化分析[J].地球信息科学学报,2013,15(2):280-288.
- [29] 路春燕,许燕婷,林晓晴,等.基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的环渤海城市群时空演变研究[J].国土资源遥感,2019,31(4):218-226.
- [30] 陈昕,彭建,刘焱序,等.基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的京津冀地区城市空间扩展与空间关联测度[J].地理研究,2018,37(5):898-909.
- [31] 周玉科.基于去饱和夜光数据的北京建成区时空动态分析[J].地理与地理信息科学,2020,36(1):52-57.
- [32] 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):1092-1102.
- [33] 张鹏强,余旭初,刘智,等.多时相遥感图像相对辐射校正[J].遥感学报,2006,10(3):339-344.
- [34] Elvidge C D, Ziskin D, Baugh K E, et al. A fifteen year record of global natural gas flaring derived from satellite data[J]. Energies, 2009,2(3):595-622.
- [35] Imhoff M L, Lawrence W T, Elvidge C D, et al. Using nighttime DMSP/OLS images of citylights to estimate the impact of urban land use on soil resources in the United States [J]. Remote Sensing of Environment, 1997,59(1):105-117.
- [36] 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.
- [37] Henderson M, Yeh E T, Gong P, et al. Validation of urban boundaries derived from global night-time satellite imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003,24(3):595-609.
- [38] 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.
- [39] 王云菲.基于 DMSP/OLS 夜间灯光遥感数据的中国西南地区城市化研究[D].昆明:云南大学,2016.

(上接第 264 页)

- [24] 叶艳妹,张晓滨,林琼,等.基于加权集覆盖模型的农村居民点空间布局优化:以流泗镇为例[J].经济地理,2017,37(5):140-148.
- [25] Long H L, Liu Y S, Wu X Q, et al. Spatio-temporal dynamic patterns of farmland and rural settlements in Su-Xi-Chang region: Implications for building a new countryside in coastal China [J]. Land Use Policy, 2009,26(2):322-333.
- [26] 付娇,黄银洲,唐菊.甘肃省经济与人口发展耦合研究[J].中国人口·资源与环境,2018,28(S1):49-53.
- [27] 王婧,方创琳,李裕瑞.中国城乡人口与建设用地的时空变化及其耦合特征研究[J].自然资源学报,2014,29(8):1271-1281.
- [28] 李裕瑞,刘彦随,龙花楼.中国农村人口与农村居民点用地的时空变化[J].自然资源学报,2010,25(10):1629-1638.
- [29] 冯雁云,赵宇鸾,薛朝浪,等.岩溶山区城镇建设用地区间拓展适宜性评价:以紫云县为例[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2019,37(5):1-8,65.
- [30] 王永明,王美霞,吴殿廷,等.贵州省乡村贫困空间格局与形成机制分析[J].地理科学,2017,37(2):217-227.
- [31] 国涓,唐焕文,孙平.投入产出弹性系数研究[J].辽宁工程技术大学学报,2006,25(5):754-757.
- [32] 朱泽.“民工潮”问题的现状、成因和对策[J].中国农村经济,1993(12):33-36.