

基于夜间灯光数据的沈阳市建成区空间扩展分析

石铁矛¹,陈润卿¹,石羽²

(1.沈阳建筑大学建筑与规划学院,辽宁 沈阳 110168;2.沈阳建筑大学设计艺术学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要:近年来,夜间灯光数据凭借其便捷性被广泛应用于城市各类问题的研究。利用沈阳市多年的夜间灯光数据提取出建成区范围,分析了沈阳市建成区的空间扩展特征,运用偏相关性分析、密度分析等方法揭示了扩展方式所可能带来的城市问题。结果表明:建成区多年来呈现粗放式的发展,对绿地空间、建成区气候以及人口出行压力都会产生影响。基于该研究结果,对沈阳市建成区未来发展方式提出了相应的建议。

关键词:夜间灯光数据;沈阳市;城市空间扩展;城市问题

中图分类号:TU984 **文献标志码:**A

我国在过去的几十年中大力推进城市化进程,城市面积迅速增加。而近年来人们不得不承认,在此过程中城市空间的扩展蔓延给区域的土地资源承载力带来了巨大的压力,增加了城市生态安全的风险。传统的手动描边方法提取城市建成区边界费时费力,而遥感技术凭借快速、实时、周期性、成本低的优势为城市扩展监测提供了强有力的手段。因此,夜间灯光数据成为提取城市建成区边界的理想化的数据资源之一。

到目前为止,国内外学者利用夜间灯光数据进行了大量的研究,以国内为例,陈晋等^[1]利用该数据得出了我国城市化水平的灯光指数;毛卫华等^[2]综合使用 MODIS 和 DMSP/OLS 数据对浙江省城市自 2001 年以来的十年扩张情况进行了提取分析。在生态方面,苏永娟^[3]和曹子阳^[4]分别利用灯光数据研究了中国能源消费碳排放与 GDP、

PM2.5 浓度的相关性;孙钦珂等^[5]利用灯光数据分析了长江经济带城市用地空间的分异特征。由此可见,夜间灯光数据凭借其数据获取的便捷性和可用性,已经广泛应用于衡量城市化水平、观测城市形态变化、监测城市污染、分析大尺度用地特征等领域。而本研究主要通过夜间灯光数据提取沈阳市建成区的范围,分析沈阳市的空间扩展模式,之后将历年建成区的空间变化与地形、用地、降水、气温等因素进行相关性分析,以探究这种发展方式的主要成因以及可能造成的城市问题。

一、数据获取与研究方法

1. 数据获取与处理

原始夜间灯光数据可从资源环境数据云平台免费获取,将下载的数据通过投影栅格工具转换为 Lambert 等积投影,像元分辨率设置

为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$, 以沈阳市市域矢量边界为掩膜, 即可提取沈阳市历年的夜间灯光数据。

由于传感器自身的原因, 灯光影像在城市中心的灰度值会出现不超过 63 的饱和现象, 因此必须将原始影像进行校正。目前比较广泛使用的校正方法是构建一元二次模型进行影像校正, 张茹霞^[6]和杨迪^[7]的研究表明, 对于东北三省而言, 以 2007 年为基础构建一元二次模型的校正结果精度最高, 沈阳、长春、哈尔滨 3 个城市的建成区均与遥感影像一致。因此, 笔者采用该方法对其他年份数据进行了校正。数据校正之后, 采用徐杰佳等^[8]提出的比较法提取城市建成区范围, 设定一个初始阈值并逐步提高, 当像元面积与统计数据中的建成区面积差值最小时, 即为真实阈值。由此提取得到沈阳市历年的主城区建成区范围。

2. 研究方法

(1) 形态变化

城市空间的扩展是城市化在时空上的变化的具体反映^[9], 相较于以划分象限比较建成区的扩展过程, 根据面积和周长计算扩展速度、紧凑度等指标不仅所需数据易于获取, 还能够定量描述城市空间扩展过程。因此, 本研究选取扩展速度和景观指标等对沈阳市主城区的扩展过程进行分析。各个指标计算公式如下:

$$p = (P_2 - P_1) / P_1 \times 100\% \quad (1)$$

$$a = (A_2 - A_1) / A_1 \times 100\% \quad (2)$$

$$C = 4A / P^2 \quad (3)$$

$$BCI = 2\sqrt{A\pi} / P \quad (4)$$

$$S = 2\ln(P/4) / \ln A \quad (5)$$

式(1)~式(5)中: a 为面积增长率; p 为周长增长率; A_1 、 A_2 和 P_1 、 P_2 分别为主城区 1 年份和 2 年份的面积和周长; C 为建成区的圆度指数; S 为区域的分形维数, BCI 为紧凑度指标, A 为建成区面积, P 为建成区周长。

其中, 圆度即衡量城市外围轮廓形态的指标, 圆度值越大, 说明城市主城区的形状越接近圆形, 反之, 则呈现带状特征; 分形维数主要用于评价城区的填充能力与边界形状的

复杂程度, 数值越大, 说明城市以向外扩展为主, 反之, 则更加稳定; 紧凑度可以描述城市建成区的集聚程度, 数值越大代表集聚程度越高, 城市空间越紧凑。

(2) 扩展趋势

标准差椭圆可以概括要素的空间分布, 识别要素方向的趋势。它会根据要素的空间分布特征创建一个椭圆, 包括椭圆的中心, 椭圆长轴与短轴的数值以及椭圆的旋转方向。标准差椭圆式为

$$SDE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n}} \quad SDE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}{n}} \quad (6)$$

式中: x_i 和 y_i 为第 i 个点的坐标; n 为要素总个数; \bar{X} 和 \bar{Y} 为所有要素的均值中心, 均值中心的计算式为

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (7)$$

以上步骤在 ArcMAP 软件中进行处理。

二、沈阳市城区空间扩展态势分析

1. 提取结果

提取结果表明, 通过夜间灯光数据提取沈阳市建成区的范围不仅与卫星影像基本吻合(见图 1), 也避免了手动描边的主观性造成的形状误差等问题。这说明利用夜间灯光数据提取沈阳市建成区的轮廓进行研究是可行的。

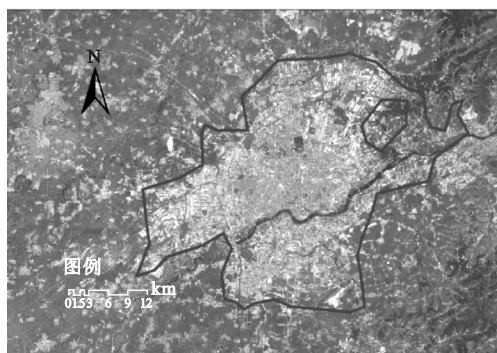


图 1 2016 年沈阳市建成区提取

通过夜间灯光数据所提取到的沈阳市建成区范围如图 2 所示, 可以看出 2000—2008 年主要是主城区向外扩张, 其中, 2000—2004 年沈阳市建成区面积增加了 29.12 km^2 ,

2004—2008 年沈阳市建成区面积增加了 255.88 km²。2008 年后逐渐发展了外围组团,最终主城区与周边组团连接成片。其中,

2008—2013 年沈阳市建成区面积增加了 198.35 km²,2013—2016 年沈阳市建成区面积增加了 97.19 km²。

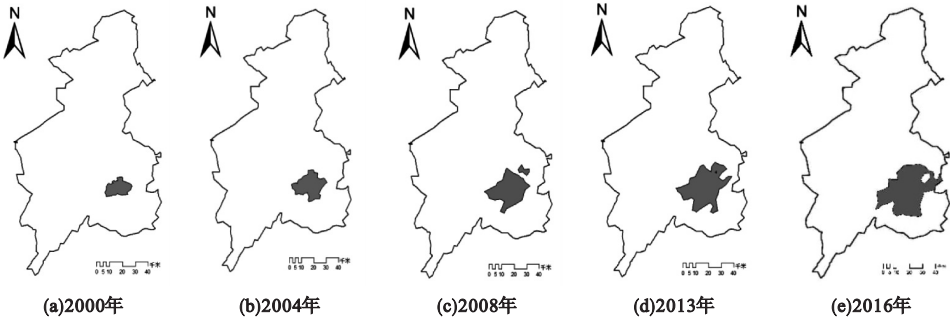


图 2 2000、2004、2008、2013、2016 年沈阳市建成区空间形态

2. 沈阳市空间扩展特征分析

基于前文提出的描述城市空间扩展的量化指标以及所提取到的沈阳市历年的建成区范围,对以上指标进行了计算统计,结果如表 1、表 2 所示。

表 1 建成区景观指标

年份	C	BCI	S
2000	0.22	0.42	1.02
2004	0.14	0.33	1.10
2008	0.12	0.30	1.12
2013	0.10	0.29	1.13
2016	0.11	0.29	1.12

表 2 建成区扩展速度

年份	P	a
2000—2004	31	10
2004—2008	44	70
2008—2013	22	33
2013—2016	10	38

从面积和周长的增长速度来看,沈阳市主城区的增长速度呈现间歇式的变化,2000—2004 年沈阳市建成区增幅较缓,2004—2013 年沈阳市建成区面积和周长增长迅速,2013—2016 年沈阳市建成区面积增加较快,周长变化较小。

从景观指标来看,2000 年沈阳市建成区的圆度最大集聚程度最高,2000 年后建成区呈现出较分散的发展方式,分形维数也在增加,说明建成区的形态变化以向外扩展为主,而到了 2016 年,新老城区近乎连片,无论是圆度、紧凑度还是分形维数,都趋于稳定。

沈阳市建成区扩展方向的变化如图 3 所示,以 2000 年的建成区情况为原点,可以发现沈阳市建成区的发展方向具有较强的阶段性和方向性。2000—2004 年,沈阳市建成区主要向西发展,均值中心向西移动了 292 m,2004—2008 年,建成区均值中心向东南移动了 192 m,2008—2013 年,建成区均值中心向东北移动了 600 m,2013 年后,建成区均值中心向东南移动了 900 m。

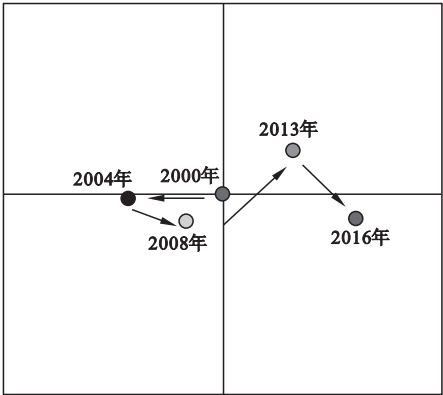


图 3 建成区均值中心变化趋势

三、沈阳市建成区空间发展因素分析

相关研究^[10-13]表明,地形、经济发展、人口数量和政策等是造成城市扩张的重要因素,本研究基于沈阳市的自然条件和社会经济等特点来分析沈阳市建成区快速发展的主要因素。

1. 自然环境因素

建设用地的选址主要受地形地貌的影响,平坦开阔的平原是最适宜城市建设也是

容易最先建设的区域。沈阳市东、北部为丘陵地带,向南逐渐开阔为冲积平原,地表平均高程 50 m。根据不同高程进行分类统计,如图 4 所示,沈阳市建成区在扩展过程中会优先侵占地势较低的农田,之后才会向更高地势的区域扩张。而坡度分析表明,2000 年建成区 99% 的地表坡度不超过 10°,2016 年建成区 98.1% 的地表坡度不超过 10°。因此,相较于高程而言,坡度才是影响沈阳市建成区空间扩展方向的直接因素之一(见图 5)。

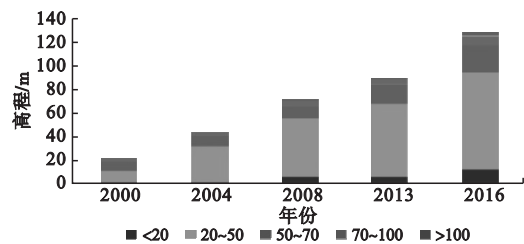


图4 沈阳市建成区历年高程范围变化

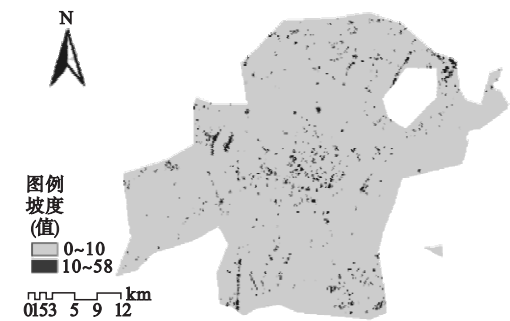


图5 2016年建成区坡度统计

根据提取到的建成区范围计算出标准差椭圆。如图 6 所示,沈阳市建成区历年的标准差椭圆大多位于浑河以北,这与沈阳市的山水环境密切相关。沈阳市老城区的空间位置背山面水,这种城市选址不仅有利于耕作、取水,还有利于避免地质灾害。此外,每个标

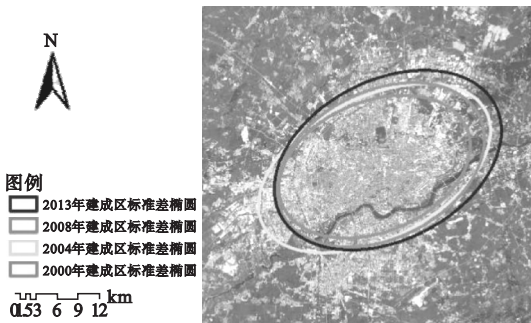


图6 建成区标准差椭圆变化趋势

准差椭圆长轴方向均指向东偏北、西偏南方向,与浑河的河道走向一致,符合滨河城市多沿河道发展的特点。因此,除地形之外,河流水系也是沈阳市形态与扩展方向的影响因素之一。

2. 社会经济因素

社会经济发展是支撑城市建设的重要因素之一,将主要社会经济指标与建成区面积和形态变化进行相关性分析,相关系数如表 3 所示,人口数量和产业结构与建成区面积有较高的相关性,并且两者还会影响城市的紧凑度和形态的复杂程度。就沈阳市 2000—2016 年的发展态势而言,人口数量越大,第二、第三产业比重越多,城市的空间形态就越复杂。

表3 社会经济指标与建成区形态相关系数

社会经济指标	AREA	C	BCI	S
固定资产投资	0.61	0.65	0.67	0.66
人口	0.96	0.80	0.82	0.78
第二、三产业产值	0.93	0.81	0.84	0.80
人均地区生产总值	0.92	0.84	0.86	0.83

相较于社会经济指标,政策规划对城市建成区空间扩展的影响可能表现得更加直观,具体可表现为战略方案的确定与实施对空间变化的影响。例如,2001 年,沈阳市政府确立的在高新区基础上建设浑南区的重大战略目标是将浑南区建设成“北方浦东”,自此,多条道路开始向浑南区方向延伸,形成了浑南区的基本骨架(见图 7、图 8)。加之 2004 年沈阳市获批举办“2006 世界园艺博览会”、2009 年获得全运会举办权等大事件^[14],



图7 2000年浑南区路网影像



图 8 2004 年浑南区路网影像

吸引了大量的政策与资金投入向浑南地区集聚,使得浑南区的建设发展日益迅速,建成的奥体中心也成为浑南区重要的地标建筑之一。2002 年,沈阳市做出了铁西区与沈阳经济技术开发区合署办公的重大决策,经过 3 年多的调整,铁西新区成功实施东搬西建战略,大量工业用地转移至城市边缘,至 2008 年,卫星影像和夜间灯光均能表现出显著的变化(见图 9、图 10)。沈北新区作为沈阳市新区建设的先导区,自 2002 年以来就在振兴老工业基地的战略背景下起步和成长,并于 2010—2013 年进入快速成长期,2016 年,蒲

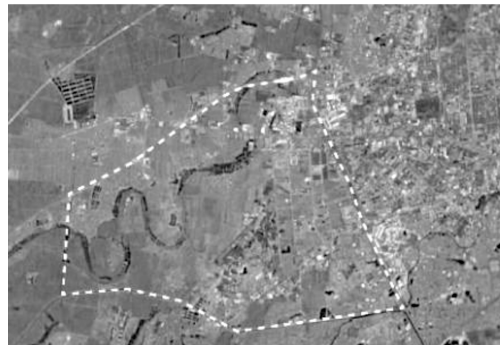


图 9 2000 年沈阳市建成区西部影像



图 10 2008 年沈阳市建成区西部影像

河新城已经有了较高的建成度(见图 11、图 12)。由此可见,政策和战略的制定与实施同样是推动沈阳市建成区向外扩展的驱动力之一,同时,由夜间灯光数据提取出的建成区范围的变化趋势与当地当时的政策、文献中的历史事件相吻合。

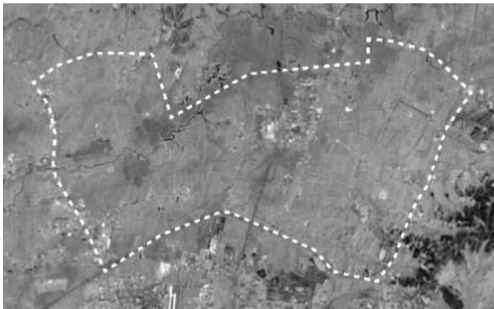


图 11 2002 年蒲河新城空间影像



图 12 2016 年蒲河新城空间影像

四、建成区扩展可能带来的问题

经研究发现,沈阳市近 15 年来的城市建设依旧是以向外扩展为主,对于内部填充的考虑还远远不够。这种扩展方式很可能已经为沈阳市带来了一些城市问题。

1. 沈阳市绿地空间的缺失

绿地空间是城市可持续发展之根脉,而人类文明的发展过程亦是生产生活空间持续膨胀的过程。将夜间灯光数据 DN 值与年 NDVI 进行相关性分析,其中,DN 值代表夜间灯光数据的灰度值,数值越大,代表灯光越亮,建成度越高;NDVI 即归一化植被指数,数值越大,植被覆盖程度越高。相关性分析结果表明,两者整体的负相关性较为显著(见图 13),两者相关系数为 0.77,DN 值越高的区域,建成度越高,相应的植被覆盖越

少,也就是说,建成区(高 DN 值区域)面积越多,相应的绿地面积就会越少。

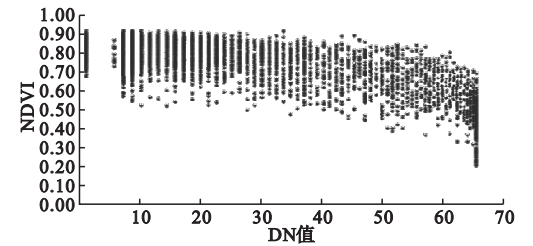


图 13 NDVI 与 DN 值相关性分析

为进一步验证这一结论,以从 2016 年的夜间灯光数据提取出的建成区面积为基准,分别利用历年 NDVI 值提取的绿地面积计算面积比和绿地分布的均值中心。结果表明,建成区面积增加的确会造成绿地面积的减少(见图 14),两者相关系数为 0.96。从方向上来看(见图 15),2000—2004 年,绿地空间均值中心向东移动了 551.52 m;2004—2008 年,绿地空间均值中心向东移动了 780 m;2008—2013 年,绿地空间均值中心向东南移动了 600 m;2013—2016 年,绿地空间均值中心向东北移动了 1 093 m。由于建成区内有一定数量的块状和带状绿地分布,因而绿地分布的方向变化与城市建成区的扩展方向并

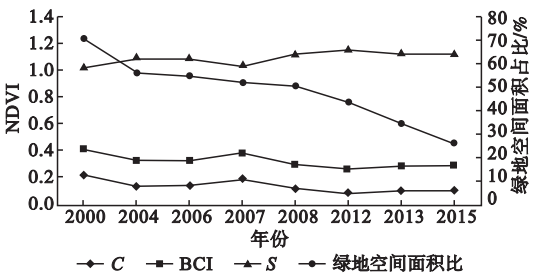


图 14 绿地空间占比与城市空间扩展指标变化趋势

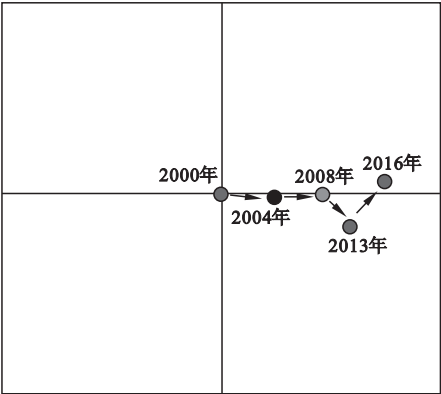


图 15 绿地空间均值中心变化趋势

不是完全相反,但是,从总体的方向上看,各个新区的相继建设大量蚕食了外围的自然绿地,导致绿地空间分布发生了变化。而从扩展方式上,经过对图 14 中数据进行相关性计算,发现绿地空间面积占比与圆度、紧凑度呈现正相关性,相关性系数分别为 0.73 和 0.78,而与分型维数呈负相关性,相关性系数为 0.73。这说明越粗放的扩展方式,绿地空间的占比下降就越快。

2. 城市气候发生改变

绿地空间对城市而言不仅能为市民提供游憩、康养、休闲的空间,同时在调节城市气候、减少极端天气等方面也发挥着重要的作用,城市无序扩张、植被减少可能会造成城市气候的改变。利用提取出的沈阳市历年建成区轮廓进行统计,2010 年和 2014 年,建成区的平均气温要高于市内自然区域的平均气温,平均降水也高于其他区域平均值。此外,历年气温与降水的变化趋势具有相似性(见图 16),将气温和降水两组数据进行相关性分析,得出相关系数为 0.73,说明两者存在着相互影响的关系。那么建成区的空间形态变化与气温和降水两者之间是否存在一定的联系?由于气温和降水可以相互影响,因此采用计算偏相关系数来对三者的关系进行进一步研究。

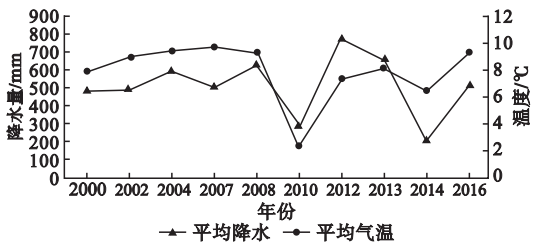


图 16 沈阳市历年年均气温与年均降水数据统计

简单相关系数的结果如表 4 所示,沈阳市建成区形态变化与建成区平均气温变化的相关性要强于与平均降水变化的相关性。其中,紧凑度与城市气温和降水的相关性更强,并且越是相对分散的建成区,城市气温与外围自然区域的气温差异就越小。但从一阶偏相关系数的计算结果(见表 5)可以发现,在控制城市形态的前提下,气温与降水的相关性最

明显。在控制气温的前提下,城市建成区形态变化并不会影响降水变化,但在控制降水不变的前提下,建成区城市形态的变化与气温的相关性又有所降低。因此,可以说明城市形态变化并不能决定城市建成区的气候变化,但它确实会影响城市气候的变化,并且对气温变化的影响程度要高于对降水的影响。

表 4 建成区景观指标与气候的相关系数

气候	C	BCI	S
气温	0.54	0.58	0.41
降水	0.50	0.52	0.39

表 5 建成区景观指标与气候的偏相关系数

气候	C	BCI	S
气温	0.29	0.33	0.20
降水	0.20	0.19	0.15

3. 沈阳市建成区的潜在出行压力巨大

十多年来,沈阳市呈现外延分散化的空间扩展模式,而当城市扩大到一定规模时,单中心的空间结构不仅会造成城区内部潜在的人口大量聚集和交通压力、同时外围市民的出行距离也会增加。本研究选取了 2016 年购物、餐饮、文化、体育、医疗、停车场、客运站等 POI 数据进行了核密度分析,POI 即兴趣点,它可以代表一个住宅、一个商店、一个广场、一处标志物,并显示其空间位置。因此,公共服务设施、商业设施、广场停车场的 POI 数据的分布情况能够反映出人口潜在的集聚程度。核密度分析的结果表明,虽然 2016 年沈阳市建成区的空间紧凑程度相较于 2000 年降低了 0.13,但主城区中心位置的 POI 核密度高达 8 611。以环路为边界进行统计(见表 6),沈阳市一环内 POI 密度达到 1 686,而三环外 POI 密度为 37。由图 17 可见,沈阳市建成区虽然呈现出“一主多副”的空间格局,但 POI 数据依然呈现单中心的分布方式,大量的公共服务、商业、休闲、娱乐、医疗等设施聚集在主城区中央。因此,人口和交通的潜在压力依旧集中在主城区中心,外围的新城片区并不能为市民提供便利的公共服务。

造成这一现象的原因一方面可能是由于

表 6 建成区 POI 核密度统计

范围	平均值	最大值
一环内	1 686	8 611
二环内	743	5 278
三环内	180	2 822
三环外	37	3 591

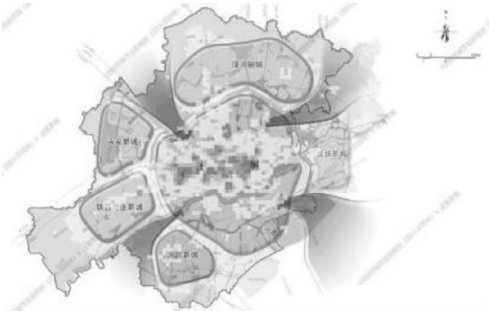


图 17 沈阳市 POI 数据核密度分析

城市外延式的扩展忽视了内部公共服务设施的填充,另一方面可能是由于新城与主城区距离过近,甚至连片,无法像卫星城镇一样起到疏散人口和交通的作用。这一点和北京有相似之处,北京市曾试图通过建设 8 个城市副中心的方式疏散主城区的压力,但由于中心引力太强,并没有起到显著的作用。

五、结 论

科学识别城市的扩展信息,准确掌握其空间变化特征及规律,对于优化城市空间、评估城市可持续发展具有重要意义。沈阳市的城市空间扩展具有阶段性特征,扩展的方向受到河流、地形以及政策因素的影响,而扩展的速度和规模都与经济发展水平密切相关。在这些自然和社会因素的引导下,沈阳市自 2000 年以来的城市扩展方式更倾向于外部扩张,这种粗放的发展方式带来了生态空间的大量缺失、城市气候变化等问题。沈阳市虽然试图通过以新城作为副中心的方式降低主城区人口集聚和交通压力,但目前从市域来看,这些新城依然难以降低主城中心强大的吸引力。因此,未来的城市建设应当以内部填充的方式为主,一方面通过集约用地以及内部详细设计的手段减少对生态空间的破坏,另一方面完善新城组团内的公共服务设施以增强其吸引力,缓解老城的压力。

参考文献:

[1] 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.

[2] 毛卫华,胡德勇,曹冉,等. 利用 MODIS 产品和 DMSP/OLS 夜间灯光数据监测城市扩张[J]. 地理研究,2013,32(7):1325-1335.

[3] 苏泳娴. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的中国能源消费碳排放研究[D]. 广州:中国科学院研究生院(广州地球化学研究所),2015.

[4] 曹子阳. 基于夜间灯光影像的 GDP 空间分布模拟研究及其与 PM_{2.5} 浓度的相关分析[D]. 广州:中国科学院研究生院(广州地球化学研究所),2016.

[5] 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.

[6] 张茹霞. 基于夜间灯光数据的我国东北三省城市格局时空演化研究[D]. 大连:辽宁师范大学,2019.

[7] 杨迪. 基于夜间灯光数据的东北三省市域尺度碳排放特征及其驱动机制[D]. 哈尔滨:哈尔滨师范大学,2019.

[8] 徐杰佳,臧淑英,那晓东. 东北三省城市空间格局演变研究[J/OL]. 冰川冻土,2019,6:1-14 [2019-11-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1072.P.20190613.1448.002.html>.

[9] 张巧英. 基于 DMSP/OLS 灯光数据的新一线城市空间扩展研究[J]. 测绘地理信息,2015,40(1):72-75.

[10] 郭德弘,王世杰. 兰州新区土地扩张及驱动力分析[J]. 测绘科学,2018,43(4):43-48.

[11] 施益强,朱晓铃,张辰臣. 厦门市城市扩展遥感动态监测及其驱动力分析[J]. 集美大学学报(自然科学版),2010,15(2):150-155.

[12] 周锐,李月辉,胡远满,等. 基于 GIS 的沈阳市城镇用地空间扩展特征分析[J]. 资源科学,2009,31(11):1947-1956.

[13] 张敏惠. 基于 DSR 模型的新和县城建设用地演变及驱动力分析[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2017.

[14] 王绮,修春亮,魏冶. 城市空间扩展的动力机制分析:以沈阳市为例[J]. 城市问题,2014(10):29-35.

Analysis of Spatial Expansion of Built-up Area in Shenyang Based on Nighttime Lighting Data

SHI Tiemao¹, CHEN Runqing¹, SHI Yu²

(1. School of Architecture and Urban Planning, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 2. School of Art and Design, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: In recent years, nighttime light data have been widely used in the study of various problems in cities due to its convenience. First of all, this paper uses the nighttime light data of Shenyang City to extract the scope of the built-up area, and then analyzes the spatial expansion characteristics of the built-up area in Shenyang City. Finally, it uses partial correlation analysis and density analysis to reveal the possible urban problems caused by the expansion mode. The results show that the built-up area has undergone extensive development for many years, which will have an impact on green space, built-up area climate, and population travel pressure. Based on the results of this study, the article finally proposes corresponding suggestions for the future development mode of the built-up area in Shenyang.

Key words: nighttime lighting data; Shenyang; urban spatial expansion; urban problems

(责任编辑:高旭 英文审校:林昊)