

引用格式: 司文涛, 张宁慧, 叶海鹏, 等. 基于长时间序列夜间灯光数据的京津冀城市群城市化过程[J]. 资源科学, 2022, 44(10): 2114-2124. [Si W T, Zhang N H, Ye H P, et al. Urbanization in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in China based on long-term nighttime light data[J]. Resources Science, 2022, 44(10): 2114-2124.] DOI: 10.18402/resci.2022.10.13

基于长时间序列夜间灯光数据的京津冀城市群城市化过程

司文涛¹, 张宁慧^{2,3}, 叶海鹏⁴, 李宇^{2,3}

(1. 山东师范大学公共管理学院, 济南 250014; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 4. 清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘要:近几十年来,随着全球城市化进程的加快,城市群成为一种区域主流空间形态。城市群的城市化时空格局是城市可持续发展与管理研究的重要内容。本文以京津冀城市群为例,基于2000—2018年长时序夜间灯光数据,计算并筛选适合于该地区的夜间灯光(NTL)强度指标和动态阈值,在NTL遥感影像基础上提取城市区域,综合利用景观指标和标准差椭圆参数研究城市群城市化演进过程。研究表明:①京津冀城市群的城市化进程发生了显著的阶段性变化,其进程可划分为3个阶段:第一阶段为2000—2010年核心城市快速城市化阶段;第二阶段为2010—2015年核心城市及其周边卫星城市城市化波动发展阶段;第三阶段为2015年以后以中等城市为主的稳定城市化阶段。②京津冀城市群城市化的空间演化格局具有明显的东北—西南方向性。③京津冀城市群的城市化以北京、天津两个核心城市为快速扩张区,辅之小城市的低速扩张,从而实现区域间的协同发展。本文证实了长时序NTL数据能有效且低成本地监测区域尺度上的城市化进程,可为城市化过程的动态时空格局研究提供方法借鉴。

关键词:时空格局;夜间灯光数据;城市化;城市群;城市扩张;京津冀

DOI: 10.18402/resci.2022.10.13

1 引言

2020年,全球超过55%的人口居住在城市地区,到2050年这一数字预计将增长近13%^[1]。如何度量城市化空间格局是城市化研究的热点问题^[2-4]。在经济全球化和全球城市化的背景下,中心城市及其周边城市的空间景观和人口密度将不断扩大。当中心城市及其周边城市发展达到一定的空间尺度时,功能连通性和可达性强、空间组织高度集成化和紧凑化的城市将逐步连片形成城市群^[5,6],这些地区也是经济活动和技术创新最重要的地理单元^[7-10]。在世界范围内平均来看,与单一城市相比,城市群的城市化水平更加显著^[11-13]。因此,探索城市群城市化的时空格局和特征,对城市群的可持续发展和

科学管理具有重要意义。

根据城市夜间照明特征,从夜光遥感图像中能够有效识别城市群区域^[14]。1992年发射升空的国防气象卫星计划/业务线性扫描系统(DMSP/OLS)提供了全球夜间灯光(NTL)遥感数据^[15,16]。2013年,新型可见光红外成像辐射计套件传感器通过昼/夜波段(VIIRS/DNB),取代DMSP/OLS,成为了全球夜间灯光的监测卫星^[17]。与土地利用数据或统计数据相比,NTL图像不仅具有及时性、准确性和获取方便的特点,而且具有时间跨度长、覆盖范围广的优点^[18]。在关于城市化问题的研究上,采用NTL数据,能够弥补统计数据空间上不连续、更新周期长以及数据残缺的问题。NTL数据可以在像素尺

收稿日期 2022-06-15;修订日期:2022-09-28

基金项目 国家自然科学基金项目(41771182);国家地球系统科学数据共享平台项目(Y11J020)。

作者简介 司文涛,男,山东德州人,博士,讲师,研究方向为区域发展与规划。E-mail: siwentao@sdsu.edu.cn

通讯作者 李宇,男,河北保定人,博士,研究员,研究方向为城市资源利用与生态环境效应。E-mail: liy@igsnrr.ac.cn

2022年10月

度上对城市化问题进行研究。此外,NTL数据能够捕获城市地区稳定光源,直接反映出人类社会经济活动的强度^[19]。NTL指数强度可以作为衡量城市化水平的指标,例如经济发展程度和人类活动强度^[20]。因此,DMSP/OLS和VIIRS/DBN这两组数据在全球城市化时空动态数据分析中得到了广泛的应用^[22,23]。基于多时段DMSP/OLS和VIIRS/DBN的NTL数据,研究人员对中国^[24,25]、印度^[26]、日本^[27]、南美^[28]和全球^[29,30]等多个地区、多种尺度开展了城市化动态监测研究。例如,Georg等^[31]通过分析NTL图像空间参数发布了基于城市走廊特征的全球城市清单;Zhou等^[32]开发了一种基于分位数的全球城市区域划分方法,研究结果表明2013年城市区域占全球面积的0.53%;Chen等^[33]利用双向马尔可夫随机场模型和支持向量机分类器从DMSP/OLS数据提取城市区域。近年来,有大量利用NTL数据分析城市群发展的新研究。例如,Zou等^[34]利用DMSP/OLS数据对1992—2011年中国长江中游城市群的扩张进行了分析,得出在不同空间尺度和时间阶段上,扩张的方向和形式随城市建成区形态波动;Gao等^[35]利用DMSP/OLS的NTL数据集分析了1992—2015年中国3个主要城市群的演变模式,结果表明,各区域城市规模分布较为均匀;Peng等^[6]基于NTL数据识别分析了2000—2012年间,中国23个主要城市群的边界,并把它们分成3个等级:世界级、区域级和次区域级,证实NTL数据能够有效地探索城市群城市化的时空过程。

虽然NTL数据已经被广泛用于监测城市群动态变化的时空特征^[36-38],但由于缺乏连续性长时间序列的NTL观测数据,限制了进一步的研究。从两个产品的时间覆盖来看,现有的研究多集中在1992—2013年或者是2013年至今的城市化发展阶段^[28,32,39]。尽管VIIRS/DBN产品能够提供更高的空间和辐射分辨率^[40,41]和更宽的测量光发射动态范围^[42],但其观测时长限制了它在年际动态分析中的应用。除此之外,先前的研究成果主要是基于NTL数据来识别城区、不透水层和建成区^[22,43],忽略了光强特点和城市群内部特征等细节^[37]。

理解城市化时空格局的演变规律对区域规划具有重要意义,可为相关政策的制定提供科学依据,然而当前利用连续性长时间序列NTL影像对中

国城市群发展空间格局的研究较少。作为中国最大的城市群之一,京津冀城市群经历了快速城市化、城市人口大规模扩张和NTL强度迅速增长,可以作为城市群类型的典型代表。本文基于2000—2018年的NTL扩展时间序列数据,分析了京津冀城市群快速城市化的时空格局,以期制定可持续城市化战略提供理论依据。

本文研究的目标是:①通过利用2000—2018年NTL扩展时序数据扩展中国城市群研究的时间范围;②探讨京津冀城市群的时空动态演化。首先,计算NTL相关的4个指标,分析NTL数据与城市化程度之间的关系,并找出最相关的指标;在此基础上,确定每一景NTL图像最优阈值,从而提取每年的城市区域和非城市区域,并进一步分析阈值变化趋势;最后,对NTL数据提取的城市区域进行空间度量分析,以揭示城市区域的动态时空格局。

2 数据与方法

2.1 研究区

京津冀城市群总面积21.8万km²,位于113°27'E—119°50'E,36°05'N—42°05'N,是中国三大城市群之一,包括北京市、天津市两大直辖市和河北省的保定、石家庄、唐山、秦皇岛、张家口、承德、沧州、衡水、邢台和邯郸(图1)。2000—2018年,京津冀城市群常住人口由9026万人增至10757万人,总GDP由1240.6亿美元增至12826.7亿美元,占2018年的中国GDP总值的9.23%。京津冀城市群是中国城市化水平高、人口多、GDP总量大的经济中心之一,未来目标是成为中国最具创新性的城市区域。

2.2 数据收集与预处理

本文使用年尺度的长时间夜间灯光数据序列(2000—2018年)。该数据集由两种NTL产品:DMSP/OLS数据(2000—2012年)和NPP/VIIRS数据(2013—2018年)构成,采用经交叉传感器校准过的修正编码器模型,具有良好的精度(>85%)和时空一致性,图像的空间分辨率为500 m,该数据的详细信息见Chen等^[45]。灯光数据DN值代表NTL强度。为降低饱和效应,本数据集以nW/(cm²·sr)为单位。该数据集同时涵盖城市和农村地区。为保证数据的准确性,对瞬时强光进行了过滤,如森林火灾等事件引起的光强变化。

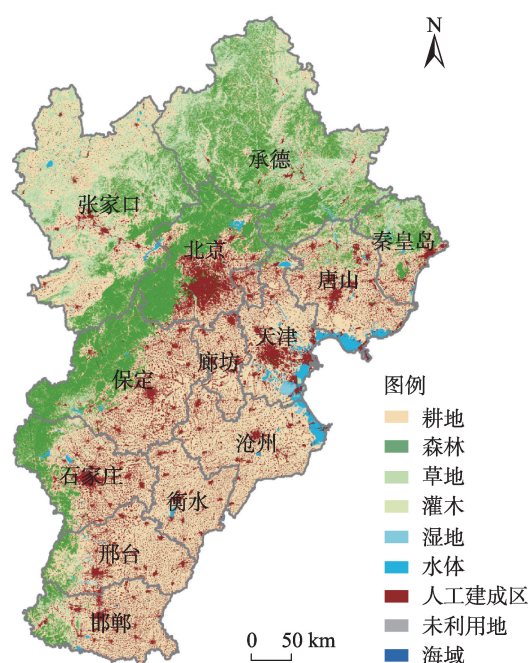


图1 京津冀城市群土地利用图

Figure 1 Land use map of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

土地利用数据应用欧洲航天局的土地覆盖数据(CCI-LC)。2000—2018年,欧空局监测了全球土地利用变化,并向公众提供了空间分辨率为300 m的土地覆盖数据。考虑到该全球土地利用数据集与其他6个数据集^[46]相比,具有较高的整体精度和一致性,本文利用其作为辅助数据,根据NTL影像选择提取城市区域的最佳阈值。所有遥感数据均被重新投影到等面积圆锥投影上,以确保面积统计的准确性。

城市社会经济数据由国家统计局网站(<http://www.stats.gov.cn/english/>)获取。

2.3 研究方法

首先,基于扩展时间序列NTL图像构建最优的NTL指标,从而准确评价京津冀城市群年度城市化水平。其次,利用土地利用辅助数据确定最优的NTL强度阈值,提取城市区域。最后,基于NTL的强度变化,分析城市群发展的演化模式。

2.3.1 构建最优夜间灯光指数

NTL强度和光照面积的变化可以反映不同城市化阶段的特征。作为评价城市发展的常用指标,NTL强度越大所对应的发展水平越高^[47]。与单一光照面积指数相比,综合考虑NTL强度和光照面积的

指数能够更为详细地反映快速城市化的时空格局,而且通过构建NTL最优指标能够克服统计数据的滞后性,所以NTL指标的构建是研究中的一个关键问题。为了获得最佳指标,本文从广泛应用于监测城市化和城市扩张过程的4个指标——光源面积 NTL_{LA} 、NTL平均强度 NTL_{AI} 、NTL总强度 NTL_{TI} 、复合NTL指数 $CNLI$ 入手^[44,48,49]。通过分析4个NTL指标与城市群经济、人口和土地利用的Pearson相关性,确定分析研究区时空格局的最优指标。

第一个指标为NTL强度大于 $0 \text{ Nw}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 的像元个数,即光源面积 NTL_{LA} 。

第二个指标为NTL平均强度, NTL_{AI} :

$$NTL_{AI} = \sum_{r=\min}^{\max} r \times \frac{n_r}{N} \quad (1)$$

式中: r 为单个像素的亮度; n_r 为亮度为 r 的像素数; N 为总像素数。

第三个指标是NTL总强度, NTL_{TI} :

$$NTL_{TI} = \sum_{r=\min}^{\max} r \times n_r \quad (2)$$

第四个指标是由Zhuo等^[50]提出的复合NTL指数($CNLI$):

$$CNLI = \sum_{r=\min}^{\max} \frac{r}{R_{\max}} \times \frac{n_r}{N} \quad (3)$$

式中: R_{\max} 为图像的最大亮度。

2.3.2 确定NTL图像动态阈值并提取城市区域

已有研究提出了许多城市区域提取的方法,如Markov随机场模型^[33]、全卷积网络^[50]、支持向量机等^[51]。本文选择动态阈值法有两个主要原因:①动态阈值法不会低估小型城市或高估大型城市面积;②阈值的变化可以在一定程度上反映研究区城市化水平的时空变化。

本文将NTL影像与CCI-LC土地利用数据相结合,确定动态阈值。如图2所示,通过对比土地利用数据中的像素面积和实际城市面积,计算出每个NTL图像的阈值。当两个区域的差值达到最小值时,所选择的像素亮度就为该图像的阈值。在图2中,初始的 NI_{\max} 和 NI_{\min} 分别代表了同一幅NTL图像的最大和最小强度; NT 、 NT_{low} 、 NT_{high} 分别代表阈值、小于阈值的最近值和大于阈值的最近值。 $S(NT)$ 为阈值 NT 提取的城市面积, $Area$ 为土地利用数据提取的实际城市面积, ΔS 为 $S(NT)$ 与 $Area$ 的差值。

2022年10月

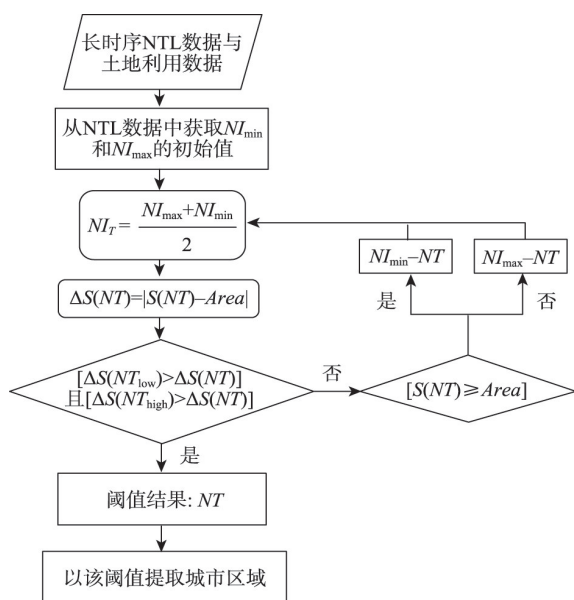


图2 NTL图像动态阈值计算流程图

Figure 2 Flowchart for calculating dynamic thresholds of nighttime light images

考虑到年际土地利用变化较小,以5年为周期绘制城区面积,该时间跨度被认为最适合监测城区扩张情况^[52]。

2.3.3 分析城市化动态演变格局

标准差椭圆(standard deviation ellipse, SDE)可以有效地度量空间变化的总体趋势和格局^[53]。SDE的变化可以反映一个离散的城市群区域在过去20年的演化格局,包括重心、分布范围、密度、方向和形状的变化。计算公式如下:

$$SDE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^z (x_i - \bar{X})^2}{z}}, SDE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^z (y_i - \bar{Y})^2}{z}} \quad (4)$$

式中: SDE_x 和 SDE_y 为椭圆圆心坐标; x_i 和 y_i 分别为城区斑块 i 的坐标; \bar{X} 和 \bar{Y} 为斑块的加权平均中心; z 为总斑块数。

椭圆的中心代表城市空间分布重心的相对位置,长轴和短轴的长度代表在这两个方向上的分散程度,椭圆的面积反映了城市区域的集中程度。

本文采用相对扩张率和凝聚力指数反映城市发展的强度和紧凑程度,计算公式如下:

$$R_t = \frac{A_t - A_{t-1}}{A_{t-1}} \times 100\% \quad (5)$$

$$C = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^z p_{ii}}{\sum_{i=1}^z p_{ii} \times \sqrt{a_{ii}}} \right) \times \left(1 - \frac{1}{\sqrt{z}} \right) \times 100 \quad (6)$$

式中: R_t 为第 t 年城市面积的相对扩张率; A_t 和 A_{t-1} 为第 t 年和第 $t-1$ 年阈值提取的城市面积; p_{ii} 、 a_{ii} 分别代表斑块 i 的周长和面积; C 为凝聚力指数,采用 FRAGSTATS v4.2 软件计算凝聚力指数。

3 结果与分析

3.1 NTL 指标强度变化

构建 Pearson 相关矩阵,通过比较 Pearson 相关系数(表1),得到描述城市化进程的最优 NTL 指标。表1显示,除光源面积 NTL_{LA} 外,其他3项指标与城市社会经济特征均存在显著正相关,表明这3项指标都能较好反映京津冀城市群的城市化程度和经济增长。其中, NTL_{AI} 与各项指标相关系数最大,是最优指标,因此选择 NTL_{AI} 作为进一步分析的指标。

从图3a可以看出,2000—2018年, NTL_{AI} 从不到

表1 4项NTL指标与城市社会经济特征之间Pearson相关系数

Table 1 Pearson correlation coefficients between the four nighttime light indicators and urban socioeconomic characteristics

NTL 指标	人口指标			土地利用指标		经济指标		
	人口密度	城市人口密度	城市人口比例	建设用地面积	城市建成区面积	GDP	人均GDP	非农产业GDP
NTL_{LA}	0.725	0.329	0.068	0.507	0.611	0.067	0.268*	0.088
	0.096	0.635	0.836	0.432	0.371	0.599	0.028	0.634
NTL_{AI}	0.851**	0.643**	0.379*	0.753*	0.803*	0.928**	0.896**	0.593**
	0.000	0.000	0.042	0.017	0.003	0.000	0.000	0.000
NTL_{PI}	0.793**	0.603	0.357	0.681*	0.763	0.855**	0.830**	0.477
	0.000	0.227	0.085	0.048	0.067	0.000	0.000	0.063
$CNLI$	0.809**	0.631**	0.436	0.648*	0.705**	0.830**	0.892*	0.482*
	0.000	0.000	0.129	0.043	0.000	0.000	0.028	0.023

注:每个指标的第一行为相关性系数,第二行为显著性系数。*表示在0.05水平显著相关,**表示在0.01水平显著相关。

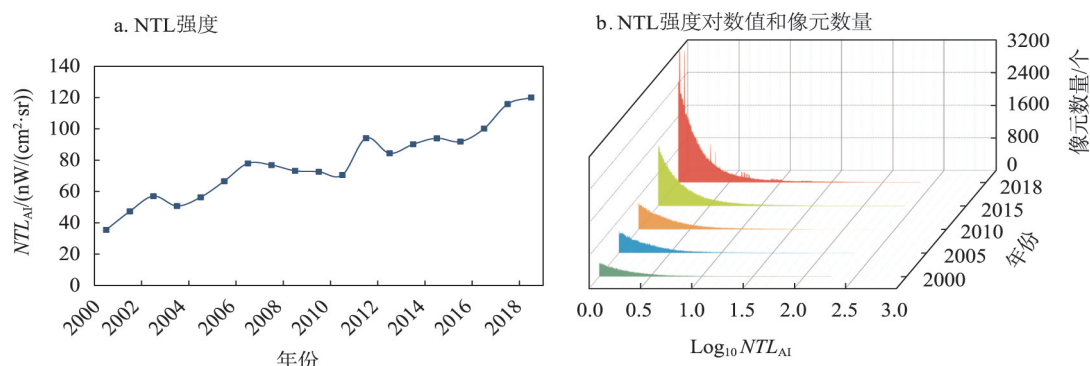


图3 2000—2018年京津冀城市群NTL强度和像元数量时间变化情况

Figure 3 Temporal variations in NTLAI and counts of pixels with different nighttime light intensity in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, 2000-2018

40 $\text{nW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 增长到 100 $\text{nW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 以上。图 3b 中的瀑布线显示了不同亮度下的像元数量分布。线条的走势表明在研究期间,京津冀城市群高亮度像素的相对数量相对较低。2015年以后,区域整体 NTL 像素亮度明显增强,低亮度像元的数量快速增加。这一现象是由于农村和郊区地区的快速发展造成的,虽然这些区域的 NTL 强度较低,但其空间分布广占比大。

3.2 NTL 动态阈值变化

本文计算了京津冀城市群年度动态 NTL 阈值,以准确提取城市区域。阈值大小可直接反映区域城市化水平和社会经济发展状况。一般来说,NTL 数据的阈值越高,城市群越发达^[54,55]。京津冀城市群的阈值由 2000 年的 1.92 $\text{nW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 提高到 2018 年的 2.92 $\text{nW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ (图 4)。阈值的持续增长表

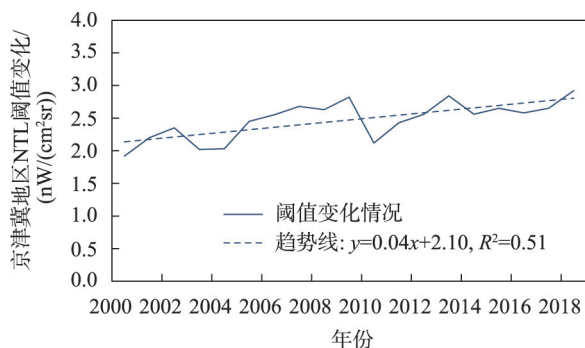


图4 2000—2018年京津冀城市群NTL 阈值动态变化及线性趋势线

Figure 4 Dynamics of nighttime light thresholds for extracting urban areas and linear trends in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, 2000-2018

明,近 20 年来,京津冀城市群的城市化水平不断提高,城市地区的最低亮度等级因此而增加。值得注意的是,阈值趋势线的斜率(0.04)显著低于长江三角洲城市群和粤港澳大湾区城市群的已有研究计算值^[56],与京津冀城市群的计算值差异不大,表明京津冀城市群的城市化发展落后于以上两个城市群。

3.3 城市化时空格局的 3 个阶段

综合 NTL_{AI} 、动态阈值指标有助于分析京津冀城市群快速城市化进程的时空格局。从城市扩张和区域发展的特点来划分,城市化进程可分为 3 个阶段,各年份指标数值见表 2。

第一阶段为 2000—2010 年的城市化快速发展,内部核心城市高速扩张,人类活动强度显著增加阶段。在此期间, NTL_{AI} 和动态阈值均基本呈现上升趋势,其中 NTL_{AI} 的增长较为显著,年均增长率为 13.42%。这可能是由于,中国提出的“十五”规划纲要指出要优先发展城市群核心城市,故京津冀地区的快速城市化进程主要发生在核心城市而非周边中小型城市,城市群内部的发展并不均衡。随着土地利用强度和人类活动的快速增长,以及人口从农村向核心城市迁移,京津冀城市群进入快速城市化阶段。快速的城市扩张和特大城市的城市化进程,促进了城市群核心区域的发展,城市之间的协同联系较弱。

第二阶段为 2010—2015 年的京津冀城市化水平波动上升阶段。 NTL_{AI} 和动态阈值分别由 2005 年的 66.59 和 8.18 增长至 91.86 和 8.86,增长率分别为 37.95%和 8.31%。结合城市扩张的空间格局和 NT-

2022年10月

表2 2000—2018年京津冀城市群 NTL_{Ai} 和动态阈值Table 2 NTL_{Ai} and dynamic thresholds in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, 2000-2018

年份	NTL_{Ai}		动态阈值	
	数值	年增长率/%	数值	年增长率/%
2000	35.52		6.40	
2001	47.29	33.13	7.34	14.6
2002	57.00	20.54	7.84	6.8
2003	50.74	-10.98	6.76	-13.8
2004	56.33	11.00	6.78	0.4
2005	66.59	18.21	8.18	20.6
2006	77.96	17.09	8.49	3.8
2007	76.88	-1.39	8.98	5.7
2008	73.21	-4.78	8.82	-1.8
2009	72.61	-0.82	9.40	6.7
2010	70.56	-2.83	7.08	-24.7
2011	94.07	33.32	8.09	14.2
2012	84.38	-10.30	8.53	5.5
2013	90.15	6.84	9.49	11.3
2014	94.00	4.27	8.55	-10.0
2015	91.86	-2.28	8.86	3.6
2016	100.12	8.99	8.62	-2.7
2017	115.84	15.70	8.86	2.7
2018	119.99	3.58	9.78	10.4

L_{Ai} 的变化来看,此期间京津冀地区的人类活动和城市扩展逐渐由核心城市向周边卫星城转移,这得益于政府出台了有助于周边地区发展的区域协调发展战略。由于卫星城的 NTL_{Ai} 相对较小,北京和天津仍然是京津冀城市发展的重心,因此这一阶段的阈值虽出现了波动,但整体仍呈现上升趋势。此时,城市群的扩张呈现以北京和天津为主,其他中小城市协调并进。

第三阶段为2015年以后的京津冀城市群中小型城市保持相对速度较低的稳定扩张阶段。 NTL_{Ai} 始终保持着正向年增长率,数值增长了28.13。动态阈值的增长较为波折,先下降后上升,总计上升了0.92。从图3很明显能够发现,2015年后,低亮度像元比高亮度像元增加得更快;从政策角度来看,“十三五”规划也明确要求要加快中等城市建设,优化城市群区域结构。这些信号表明,京津冀城市群的城市化主要集中在核心城市周边的中小城市而不是特大城市。在这一阶段,由于核心城市的“饱和状态”^[56],中等城市经历了空间规模较大但强度较

低的城市化过程。结果表明,由于周边城市的城市化发展相对缓慢,京津冀城市群的扩张速度、 NTL_{Ai} 和动态阈值仅仅是小幅增加。

综上所述,对于京津冀城市群而言,北京和天津是城市化发展的主要引擎,对整个区域具有辐射带动作用,即“先发展带后发展”实现京津冀空间协同发展。

3.4 城市区域面积变化

自2000年以来,京津冀地区的城市区域经历了高强度扩张。北京、天津这两个核心的特大城市像素亮度明显高于近郊或其他城市。作为经济活动和人类活动的中心,核心城市对区域发展的推动作用最为重要。高亮度像元的分布表明,京津冀城市群的核心城市由中心城区向城市郊区呈圆形扩展。总体上,京津冀城市群的NTL像元亮度呈饼状分布,从中心城市向外围迅速扩散,高亮度像元集中在北京和天津两个特大城市(图5)。

计算每个NTL图像的阈值后,从长时序夜间灯光影像提取城市区域。2000—2010年,城市群内城市区域的扩张速度逐渐下降,相对扩张速度从12%以上下降到5%以下,之后曲线维持在1%~5%(图6)。京津冀城市群的城市区域面积扩张以两个核心城市为主,从2000年的8800 km²增加到2018年的26000 km²,年均增长3.9%。城市扩张的时空格局表明,近20年来,京津冀城市群城市化进程发生了显著的阶段性变化。

3.5 京津冀地区城市化演化格局

本文通过计算凝聚力指数和标准差椭圆的5个参数(表3),揭示了京津冀城市群城市化的空间演化格局。京津冀城市群空间演化具有明显的东北—西南方向性。标准差椭圆的两个焦点,一个位于北京—天津地区的中间,另一个位于河北省省会石家庄。从两轴的扩张与收缩变化来看,由于受到来自西北—东南方向(北京、天津)的强烈推动力,短轴的扩张程度大于长轴。这表明区域演化的主要驱动力是短轴方向的两个特大城市的生长,而并非来自东北—西南方向的城市扩张。城市群内部是以中心城市的发展为主要推动力,实现各城市更平衡更充分的协同发展。

一方面,短轴扩张幅度远大于长轴;另一方面,

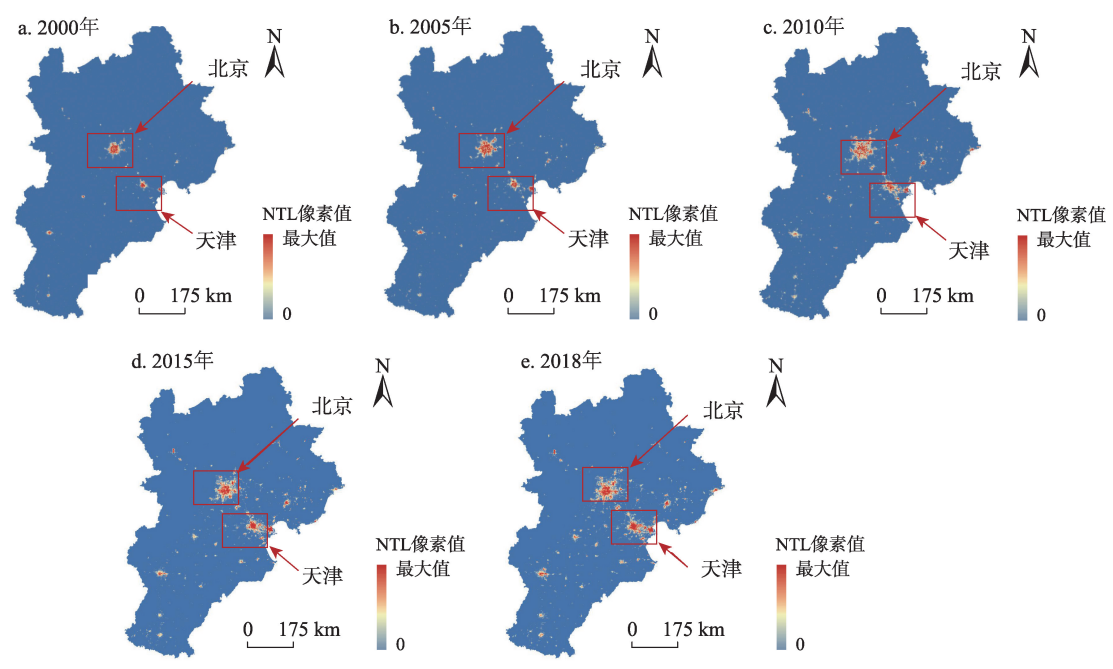


图5 2000—2018年京津冀城市群夜间灯光图像

Figure 5 Nighttime light images of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, 2000-2018
注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2016)1576号标准地图制作,底图边界无修改。

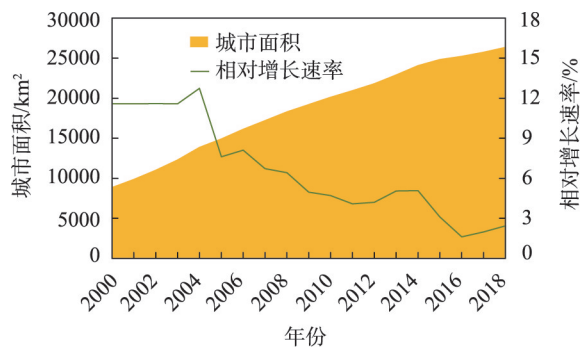


图6 2000—2018年京津冀城市群城市面积扩张及
相对增长率变化情况

Figure 6 Urban areas and relative expansion rates of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, 2000-2018

椭圆的旋转角从2000年的23.53减少到2018年的20.98。这两个参数的变化表明,在快速城市化进程下,城市群内部空间格局的方向也在逐渐变化。城市群凝聚力指数显示,近20年来城市群内区域聚合度仅仅略有增加,表明城市群内部城市间相互作用的增长并不显著。造成这一现象的原因是中小城市之间缺乏经济交流,从而制约了整个区域的凝聚力。

总体而言,这些综合参数的变化是城市快速扩张演变的主要表现形式,便于分析京津冀城市群城市化进程的时空格局,因此,从长时间序列NTL图像中提取的城市区域可以用较低成本实现城市群

表3 2000年、2005年、2010年、2015年和2018年京津冀城市群空间格局标准差椭圆参数和凝聚力指标

Table 3 Standard deviation ellipses parameters and cohesion indices of spatial patterns in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, 2000, 2005, 2010, 2015, and 2018

年份	重心纬度坐标	重心经度坐标	短轴长度/km	长轴长度/km	旋转角/°	凝聚力指数
2000	39°03'24"	116°15'21"	97.95	219.23	23.53	90.12
2005	38°59'06"	116°14'50"	98.02	217.88	23.00	90.80
2010	38°55'15"	116°16'04"	100.06	218.47	21.83	90.86
2015	38°53'00"	116°16'53"	101.96	220.62	20.72	89.91
2018	38°53'12"	116°18'30"	103.67	220.26	20.98	91.25

2022年10月

城市化的时空动态变化研究。

4 结论

基于2000—2018年长时间序列NTL影像,本文对京津冀地区快速城市化的时空格局进行了多尺度分析。得到如下结论:

(1)近20年来,京津冀地区城市化进程发生了显著的阶段性变化。综合 NTL_{AI} 和动态阈值指标,从城市扩张和区域发展的特点来划分,城市化进程可分为3个阶段:第一个阶段为2000—2010年特大城市的快速城市化, NTL_{AI} 和阈值均基本呈现上升趋势;第二阶段,2010—2015年,由于发展重心的转移,城市化水平呈现波动增长趋势,特大城市和周边中小型卫星城共同推动了京津冀城市群的城市化进程;第三阶段,从2015年开始,京津冀地区进入城市化发展的成熟阶段,城市化进程主要集中在核心城市周边的中小型城市而非特大城市。

(2)凝聚力指数和标准差椭圆分析的结果显示,京津冀地区城市化的空间演化格局具有明显的东北—西南方向性。

(3)北京和天津两个核心城市具有对城市群的强大推动力,能够辐射带动周边中小城市城市化进程,实现京津冀空间协同发展。

本文利用近实时、低成本、较高分辨率的长时序NTL影像分析京津冀地区城市化的时空格局,证实了NTL数据能够有效被用于研究区域尺度的城市化进程。NTL影像的运用为区域尺度城市化研究提供了新思路,并可为其他处于不同发展阶段地区的城市化研究提供科学参考。

参考文献(References):

- [1] Al-Ansari A M, Abd-El-Gawad W M, AboSerea S M, et al. The pattern of change in opioid and adjuvant prescriptions for cancer pain before and after referral to a comprehensive program in the palliative care center in Kuwait[J]. BMC palliative care, 2021, 20 (1): 1-12.
- [2] 王雨枫. 融合多源数据的城镇空间演化研究: 以京津冀为例[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(2): 152-157. [Wang Y F. Research on urban spatial evolution based on multi-source data: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(2): 152-157.]
- [3] Taubenbock H, Wurm M, Geiss C, et al. Urbanization between compactness and dispersion: Designing a spatial model for measuring 2D binary settlement landscape configurations[J]. International Journal of Digital Earth, 2019, 12(6): 679-698.
- [4] 毛蒋兴, 闫小培, 何邕健, 等. 快速城市化背景下开放式交通系统对土地利用空间格局的影响[J]. 资源科学, 2008, 30(12): 1880-1889. [Mao J X, Yan X P, He Y J, et al. Impacts of open transport system on changes in land use spatial distribution under rapid urbanization in Shenzhen City[J]. Resources Science, 2008, 30(12): 1880-1889.]
- [5] Fang C L, Yu D L. Urban agglomeration: An evolving concept of an emerging phenomenon[J]. Landscape and Urban Planning, 2017, 162: 126-136.
- [6] Peng J, Lin H X, Chen Y Q, et al. Spatiotemporal evolution of urban agglomerations in China during 2000-2012: A nighttime light approach[J]. Landscape Ecology, 2020, 35(2): 421-434.
- [7] Ma X, Chen Y, Li Z. The history, characteristics and prospects of regional urban cluster planning in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Region[J]. Urban Planning Forum, 2019, (6): 15-24.
- [8] 韩海彬, 牛可萌. 技术异质性下中国三大城市群工业土地利用效率评价[J]. 资源科学, 2021, 43(6): 1193-1207. [Han H B, Niu K M. Evaluation of industrial land use efficiency of China's three major urban agglomerations under technology heterogeneity[J]. Resources Science, 2021, 43(6): 1193-1207.]
- [9] Zheng Y T. Spatial pattern of China's urban agglomerations: Theoretical background, formation mechanisms, and latest progress of research of dispersed regional concentration[J]. Progress in Geography, 2020, 39(2): 339-352.
- [10] 郑晓舟, 郭晗, 卢山冰. 环境规制、要素区际流动与城市群产业结构调整[J]. 资源科学, 2021, 43(8): 1522-1533. [Zheng X Z, Guo H, Lu S B. Environmental regulation, interregional flow of elements, and adjustment of industrial structure in urban agglomerations[J]. Resources Science, 2021, 43(8): 1522-1533.]
- [11] 方创琳. 改革开放40年来中国城市化与城市群取得的重要进展与展望[J]. 经济地理, 2018, 38(9): 1-9. [Fang C L. Important progress and prospects of China's urbanization and urban agglomeration in the past 40 years of Reform and Opening-up[J]. Economic Geography, 2018, 38(9): 1-9.]
- [12] Han J, Gao M, Sun Y W. Research on the measurement and path of urban agglomeration growth effect[J]. Sustainability, 2019, DOI: 10.3390/su11195179.
- [13] 郑艳婷, 马金英, 戴荔珠, 等. 武汉城市群的区域性城市化特征及其动力机制[J]. 资源科学, 2016, 38(10): 1948-1961. [Zheng Y T, Ma J Y, Dai L Z, et al. Region-based urbanization and mechanism of Wuhan urban agglomeration[J]. Resources Science, 2016, 38(10): 1948-1961.]
- [14] Levin N, Kyba C C M, Zhang Q L, et al. Remote sensing of night

- lights: A review and an outlook for the future[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, DOI: 10.1016/j.rse.2019.111443.
- [15] Doll C N H, Muller J P, Elvidge C D. Night-time imagery as a tool for global mapping of socioeconomic parameters and greenhouse gas emissions[J]. *Ambio*, 2000, 29(3): 157–162.
- [16] Elvidge C D, Baugh K E, Hobson V R, et al. Satellite inventory of human settlements using nocturnal radiation emissions: A contribution for the global toolchest[J]. *Global Change Biology*, 1997, 3(5): 387–395.
- [17] Elvidge C D, Baugh K E, Zhizhin M N, et al. VIIRS night-time lights[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(1): 1–20.
- [18] Cao X, Hu Y, Zhu X L, et al. A simple self-adjusting model for correcting the blooming effects in DMSP-OLS nighttime light images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 224: 401–411.
- [19] 姜鲁光, 杨成, 刘晔. 基于夜间灯光数据的1992–2020年老挝经济社会发展时空变化[J]. *资源科学*, 2021, 43(12): 2381–2392. [Jiang L G, Yang C, Liu Y. Spatiotemporal changes of economic and social development in Laos based on nighttime light data, 1992–2020[J]. *Resources Science*, 2021, 43(12): 2381–2392.]
- [20] Zheng Z H, Chen Y B, Wu Z F, et al. The desaturation method of DMSP/OLS nighttime light data based on vector data: Taking the rapidly urbanized China as an example[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2019, 33(3): 431–453.
- [21] Wang X T, Sutton P C, Qi B X. Global mapping of GDP at 1 km² using VIIRS nighttime satellite imagery[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, DOI: 10.3390/IJGI8120580.
- [22] 高义, 王辉, 王培涛, 等. 基于人口普查与多源夜间灯光数据的海岸带人口空间化分析[J]. *资源科学*, 2013, 35(12): 2517–2523. [Gao Y, Wang H, Wang P T, et al. Population spatial processing for Chinese coastal zones based on census and multiple night light data[J]. *Resources Science*, 2013, 35(12): 2517–2523.]
- [23] Zhao M, Cheng C X, Zhou Y Y, et al. A global dataset of annual urban extents (1992–2020) from harmonized nighttime lights[J]. *Earth System Science Data*, 2022, 14(2): 517–534.
- [24] Zheng Y M, He Y R, Zhou Q, et al. Quantitative evaluation of urban expansion using NPP-VIIRS nighttime light and landsat spectral data[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, DOI.org/10.1016/j.scs.2021.103338.
- [25] Yang C S, Yu B L, Chen Z Q, et al. A spatial-socioeconomic urban development status curve from NPP-VIIRS nighttime light data[J]. *Remote Sensing*, 2019, DOI: 10.3390/rs11202398.
- [26] Stokes E C, Seto K C. Characterizing urban infrastructural transitions for the sustainable development goals using multi-temporal land, population, and nighttime light data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, DOI: 10.1016/j.rse.2019.111430.
- [27] Xie Y, Weng Q, Fu P. Temporal variations of artificial nighttime lights and their implications for urbanization in the conterminous United States, 2013–2017[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, DOI: 10.1016/j.rse.2019.111430.
- [28] Alvarez-Berrios N L, Pares-Ramos I K, Aide T M. Contrasting patterns of urban expansion in Colombia, Ecuador, Peru, and Bolivia between 1992 and 2009[J]. *Ambio*, 2013, 42(1): 29–40.
- [29] Chen Z Q, Yu B L, Yang C S, et al. An extended time series (2000–2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(3): 889–906.
- [30] Zhang Y T, Li X, Wang S J, et al. A global North-South division line for portraying urban development[J]. *IScience*, 2021, DOI: 10.1016/j.isci.2021.102729.
- [31] Georg I, Blaschke T, Taubenbock H. A global inventory of urban corridors based on perceptions and night-time light imagery[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2016, DOI: 10.3390/ijgi5120233.
- [32] Zhou Y, Li X, Asrar G R, et al. A global record of annual urban dynamics (1992–2013) from nighttime lights[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 219: 206–220.
- [33] Chen Z Q, Yu B L, Zhou Y Y, et al. Mapping global urban areas from 2000 to 2012 using time-series nighttime light data and MODIS products[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, 12(4): 1143–1153.
- [34] Zou Y H, Peng H Q, Liu G, et al. Monitoring urban clusters expansion in the middle reaches of the Yangtze River, China, using time-series nighttime light images[J]. *Remote Sensing*, 2017, DOI: 10.3390/rs9101007.
- [35] Gao B, Huang Q X, He C Y, et al. Similarities and differences of city-size distributions in three main urban agglomerations of China from 1992 to 2015: A comparative study based on nighttime light data[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(5): 533–545.
- [36] 邓昊键, 李恒凯, 熊永柱, 等. 近20年粤港澳大湾区城市群时空演化格局分析[J]. *世界地理研究*, 2020, 29(6): 1181–1189. [Deng H J, Li H K, Xiong Y Z, et al. Temporal-spatial evolution of urban agglomeration in Guangdong-Hongkong-Macao Greater Bay Area in recent 20 years[J]. *World Regional Studies*, 2020, 29(6): 1181–1189.]
- [37] Zhao M, Zhou Y Y, Li X C, et al. Applications of satellite remote sensing of nighttime light observations: Advances, challenges, and perspectives[J]. *Remote Sensing*, 2019, DOI: 10.3390/rs11171971.
- [38] Zheng Q M, Weng Q H, Wang K. Developing a new cross-sensor calibration model for DMSP-OLS and Suomi-NPP VIIRS night-light imageries[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote*

2022年10月

- Sensing, 2019, 153: 36–47.
- [39] 张梅, 黄贤金, 揣小伟, 等. 胡焕庸线两侧城镇建设用地变化及其碳排放差异[J]. 资源科学, 2019, 41(7): 1262–1273. [Zhang M, Huang X J, Chuai X W, et al. Urban construction lands and their carbon emission differences east and west of the Hu Huanyong Line[J]. Resources Science, 2019, 41(7): 1262–1273.].
- [40] Cao C Y, Zhang B, Shao X, et al. Mission-long recalibrated science quality Suomi NPP VIIRS radiometric dataset using advanced algorithms for time series studies[J]. Remote Sensing, 2021, DOI: 10.3390/rs13061075.
- [41] Hillger D, Kopp T J, Lee T, et al. First-light imagery from Suomi NPP VIIRS[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94(7): 1019–1029.
- [42] Miller S D, Straka III W, Mills S P, et al. Illuminating the capabilities of the Suomi national polar-orbiting partnership (NPP) visible infrared imaging radiometer suite (VIIRS) day/night band[J]. Remote Sensing, 2013, 5(12): 6717–6766.
- [43] He X, Zhou C S, Zhang J, et al. Using wavelet transforms to fuse nighttime light data and POI big data to extract urban built-up areas[J]. Remote Sensing, 2020, DOI: 10.3390/rs12233887.
- [44] 董鹤松, 李仁杰, 李建明, 等. 基于DMSP-OLS与NPP-VIIRS整合数据的中国三大城市群城市空间扩展时空格局[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(5): 1161–1174. [Dong H S, Li R J, Li J M, et al. Study on urban spatiotemporal expansion pattern of three first-class urban agglomerations in China derived from integrated DMSP-OLS and NPP-VIIRS nighttime light data[J]. Journal of Geo-Information Science, 2020, 22(5): 1161–1174.].
- [45] Chen Z Q, Yu B L, Yang C S, et al. An extended time series (2000–2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(3): 889–906.
- [46] Yang Y K, Xiao P F, Feng X Z, et al. Accuracy assessment of seven global land cover datasets over China[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 125: 156–173.
- [47] Zhao M, Cheng W M, Zhou C H, et al. Assessing spatiotemporal characteristics of urbanization dynamics in southeast Asia using time series of DMSP/OLS nighttime light data[J]. Remote Sensing, 2018, DOI: 10.3390/rs10010047.
- [48] 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, 241. [Chen J, Zhuo L, Shi P J, et al. The study on urbanization process in China based on DMSP/OLS data: Development of a light index for urbanization level estimation[J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 7(3): 168–175, 241.].
- [49] 卓莉, 史培军, 陈晋, 等. 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. [Zhuo L, Shi P J, Chen J, et al. Application of compound night light index derived from DMSP/OLS data to urbanization analysis in China in the 1990s[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(6): 893–902.].
- [50] He C, Liu Z, Gou S, et al. Detecting global urban expansion over the last three decades using a fully convolutional network[J]. Environmental Research Letters, 2019, DOI: 10.1088/1748-9326/aaf936.
- [51] Cao X, Chen J, Imura H, et al. A SVM-based method to extract urban areas from DMSP-OLS and spot VGT data[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(10): 2205–2209.
- [52] Shi L, Taubenboeck H, Zhang Z, et al. Urbanization in China from the end of 1980s until 2010: Spatial dynamics and patterns of growth using EO-data[J]. International Journal of Digital Earth, 2019, 12(1): 78–94.
- [53] Yu Z, Yao Y, Yang G, et al. Spatiotemporal patterns and characteristics of remotely sensed region heat islands during the rapid urbanization (1995–2015) of southern China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 674: 242–254.
- [54] Zhou Y, Smith S J, Elvidge C D, et al. A cluster-based method to map urban area from DMSP/OLS nightlights[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 147: 173–185.
- [55] Zhao M, Cheng W, Zhou C, et al. Assessing spatiotemporal characteristics of urbanization dynamics in Southeast Asia using time series of DMSP/OLS nighttime light data[J]. Remote Sensing, 2018, 10(1): 47.
- [56] Li Y, Ye H, Gao X, et al. Spatiotemporal patterns of urbanization in the three most developed urban agglomerations in China based on continuous nighttime light data (2000–2018)[J]. Remote Sensing, 2021, 13(12): 2245.

Urbanization in the Beijing–Tianjin–Hebei urban agglomeration in China based on long-term nighttime light data

SI Wentao¹, ZHANG Ninghui^{2,3}, YE Haipeng⁴, LI Yu^{2,3}

(1. School of Public Administration, Shandong Normal University, Jinan 250014, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In recent decades, as a result of the rapid urbanization globally, urban agglomerations have merged as an advanced spatial form of integrating cities. Investigating spatiotemporal patterns of urbanization in urban agglomerations is essential for urban sustainable development and management. In this study, remote sensing data, including extended time-series nighttime light (NTL) data and land-use images from 2000 to 2018, were used to examine the spatiotemporal patterns and evolution of urbanization over the last two decades in one of the most developed urban agglomerations in China: the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. A multi-metric-based approach was synthetically used to facilitate the analysis. This study first calculated NTL intensity indices and dynamic NTL intensity thresholds. Then urban area was extracted from NTL images. Landscape metrics and the standard deviation ellipse were used to evaluate urban evolution in the study area. The results suggest that : (1) The urbanization process in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration has undergone significant changes, and the process can be divided into three stages: rapid urbanization of the core cities from 2000 to 2010; fluctuating urbanization development of the core cities and their surrounding satellite cities from 2010 to 2015; and the stable urbanization stage with urbanization development mainly in medium-sized cities after 2015. (2) The spatial evolution of urbanization in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration has an obvious northeast to southwest orientation. (3) The urbanization of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration takes the two core cities of Beijing and Tianjin as the rapid expansion areas, complemented by the low-rate expansion of smaller cities, thus realizing a synergistic development of the region. This study confirmed that long time series NTL data can effectively and inexpensively monitor the urbanization process at the regional scale, and provides a methodological reference for the study of the dynamic spatial and temporal patterns of urbanization in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration.

Key words: spatiotemporal pattern; nighttime light data; urbanization; urban agglomeration; urban expansion; Beijing-Tianjin-Hebei region