

doi: 10.6046/zrzyyg.2021118

引用格式: 布自强, 白林波, 张佳瑜. 基于夜光遥感的宁夏沿黄城市群时空演变[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(1): 169–176.
(Bu Z Q, Bai L B, Zhang J Y. Spatio-temporal evolution of Ningxia urban agglomeration along the Yellow River based on nighttime light remote sensing[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(1): 169–176.)

基于夜光遥感的宁夏沿黄城市群时空演变

布自强, 白林波, 张佳瑜

(宁夏大学地理科学与规划学院, 银川 750021)

摘要: 为分析宁夏沿黄城市群时空演变特征, 基于 1998—2018 年 5 期 DMSP/OLS 及 NPP/VIIRS 夜间灯光数据, 辅以相应年份的 Landsat 影像数据, 采用较高分辨率数据比较法提取出 20 a 间研究区 5 个年份的城市建成区范围, 从形态、规模、结构 3 个方面进行分析。结果表明: ①宁夏沿黄城市群在 1998—2018 年间迅速扩展, 其中, 2008—2013 年期间增量、增速都达到顶峰。②城市群内部形态更为紧凑, 破碎度不断降低, 建成区斑块更加集中; 分形维数不断降低, 几何形状趋于规则; 扩展以“内部填充”为主。③城市群重心向西南方向迁移, 趋近于城市群几何中心, 南部的城市发展速度加快。④城市群的首位度和基尼系数先降后升, 城市群各城市间差距先缩小而后又拉大。

关键词: 宁夏沿黄城市群; 夜间灯光数据; 建成区; 时空演变

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)01-0169-08

0 引言

基于遥感技术所得到的夜间灯光空间分布和灯光强度信息与人类活动密切相关, 将夜间灯光数据运用到城市扩展与城市群的研究具有广阔的发展前景^[1]。通过夜光数据能够高效率地区分城市建成区和乡村背景, 避免了由植被等光谱信息产生的光谱混淆, 有学者利用夜间灯光数据提取城市建成区, 研究城市及城市群的扩展^[2-5]。路春燕等^[2]在美国军事气象卫星 (defense meteorological satellite program, DMSP) 搭载的线性扫描业务系统 (operational linescan system, OLS) 和美国国家极地轨道合作卫星 (national polar-orbiting operational environmental satellite system preparatory project, NPP) 搭载的可见红外成像辐射仪 (visible infrared imaging radiometer suite, VIIRS) 所获取的夜间灯光遥感影像数据的基础上, 综合利用地理信息系统 (geographic information system, GIS) 研究了环渤海城市群 1992—2013 年的时空演变过程, 发现该城市群城市空间体系差距减小, 扩展呈中心城市圈层化特征; 李桂华等^[3]基于 NPP/VIIRS 夜间灯光数据, 利用景观格局指数对山

东半岛城市群 2012—2018 年的城市化发展特征进行定量分析, 认为该城市群城市化发展较快, 但空间差异性明显; 李德仁等^[4]利用位序-规模分布分析了“一带一路”城市发展特征, 其分析成果得到了较好的验证; Li 等^[5]在校正夜间灯光数据的基础上, 定量估测了叙利亚城镇因内战导致的夜间灯光的衰弱, 研究得到广泛关注与认可。可见, 夜光遥感技术为城市群时空演变与识别提供了一种极佳选择^[1], 为定量识别城市群的空间范围及演化提供了新的视角^[6]。

宁夏沿黄城市群位于我国“两横三纵”城市化战略格局中包昆通道纵轴的北部, 是宁夏经济社会发展的核心区域^[7], 颇具西部特色。研究选取该城市群为研究区域, 利用整合的 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 夜间灯光数据进行长时间序列的时空演变研究, 以期揭示其时空演变特征, 为宁夏沿黄城市群建设与发展规划提供一定参考。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

宁夏回族自治区位于我国西北地区黄河中上

收稿日期: 2021-04-20; 修订日期: 2021-07-08

基金项目: 宁夏自然科学基金项目“缓减热岛效应的旱区城市绿地景观构建研究”(编号: 2020AAC03053)、“宁夏沿黄经济区乡村聚落空间演变及其影响因素”(编号: 2021AAC03087)、宁夏高等学校科研项目“基于综合交通的沿黄经济区城市空间联系研究”(编号: NGY2020012)、国家自然科学基金项目“宁夏城镇民族混居社区稳定度评价及其机理研究”(编号: 41961028)和“旱寒灌区土地利用与土壤盐渍化风险互馈耦合关系研究——以银川平原为例”(编号: 42061047)共同资助。

第一作者: 布自强 (1998-), 男, 本科, 主要从事城市空间信息研究。Email: 13730100881@163.com。

通信作者: 张佳瑜 (1978-), 男, 讲师, 主要从事城市空间信息研究。Email: zhangjy@nxu.edu.cn。

游,范围在 $N36^{\circ}66' \sim 39^{\circ}27'$, $E104^{\circ}28' \sim 106^{\circ}89'$,与甘肃省、内蒙古自治区和陕西省毗邻。宁夏沿黄城市群包括宁夏沿黄河分布的银川市、石嘴山市全境以及吴忠市的利通区、青铜峡市,中卫市的沙坡头区、中宁县,面积占宁夏全区的 43%,集中了全区 57% 的人口、80% 的城镇和 90% 的城镇人口,创造了宁夏 90% 以上的国内生产总值(gross domestic product, GDP)和财政收入,已初具城市群雏形。

1.2 数据源及数据预处理

DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 这 2 种夜间灯光数据(表 1),均下载于美国国家海洋和大气管理局官网(<http://ngdc.noaa.gov>),辅助用的陆地卫星(Landsat)系列数据通过美国地质勘探局官网(<https://www.usgs.gov>)获取。

表 1 夜间灯光数据和 Landsat 系列数据

Tab. 1 Night light data and Landsat data

数据类型	数据名称	年份	分辨率/m
夜间灯光数据	DMSP/OLS	1998 年、2003 年、2008 年、2013 年	1 000
	NPP/VIIRS	2013 年、2018 年	430
Landsat 系列数据	TM	1998 年、2003 年、2008 年	30
	OLI	2013 年、2018 年	15

为避免影像网格形变带来的面积变化,2 种夜间灯光数据的坐标系均采用兰伯特等面积投影;为方便影像亮值像元的计算,将所有影像的网格重采样为 1 km,并完成研究区的裁剪等工作。将专题绘图仪(thematic mapper, TM)影像和陆地成像仪(operational land imager, OLI)影像进行辐射定标、大气校正等预处理,并进行数据的镶嵌、裁剪。

2 数据处理及研究方法

2.1 数据处理

DMSP/OLS 数据没有进行星上定标,不同传感

器之间的数据不具可比性,参考相关研究^[8-10],以鸡西市为不变目标区域进行校正。假设像元总体亮度值较高且分布较广的传感器 F16 的数据为标准传感器,用 SPSS 软件进行回归分析,得到分别用传感器 F12, F15 和 F18 的数据来模拟传感器 F16 数据的一元二次回归模型,进行传感器间校正。为了对 DMSP 数据进行连续性校正,并充分应用不同传感器独立获取的相同年份的夜间灯光影像,按照如下公式对传感器相互校正后的影像进行校正,即

$$DN = 0.5DN^a + 0.5DN^b, \quad (1)$$

式中 DN^a 和 DN^b 分别为校正后的同一年份不同传感器的影像像元灰度值(digital number, DN)值。

考虑到研究区 20 a 来城市化不断发展,假设同一像元前一年份的亮度值不应高于后一年份的亮度值,以像元亮度较为稳定的 2008 年 F16 数据为参考数据,进行连续性校正。公式为:

$$DN_n = \begin{cases} DN_{n-1} & DN_n < DN_{n-1} \\ DN_n & DN_n \geq DN_{n-1} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: DN_n 为后一年的数据; DN_{n-1} 为前一年的数据。由于 2013 年 F18 数据中部分像元亮度值大于 63,将这一部分像元的亮度值赋为 63,得到 DMSP/OLS 4 个年份校正后连续的数据集。

为解决 NPP/VIIRS 数据存在的极亮火光和大片水域导致的像元值异常,进行辐射校正处理。选取银川市城区最大的灯光值作为上限阈值,对于灯光影像中负值的像元赋值为 0。

由于 NPP/VIIRS 数据不存在标准的阈值区间,所以采用鹤岗市或鸡西市为目标区域进行回归建模的方法不适用于西部地区欠发达城市的数据校正。研究以宁夏沿黄城市群为目标区域进行校正(图 1),以校正后的研究区 2013 年 F18 数据为目标数据,与研究区内 2013 年的 NPP/VIIRS 数据进行一

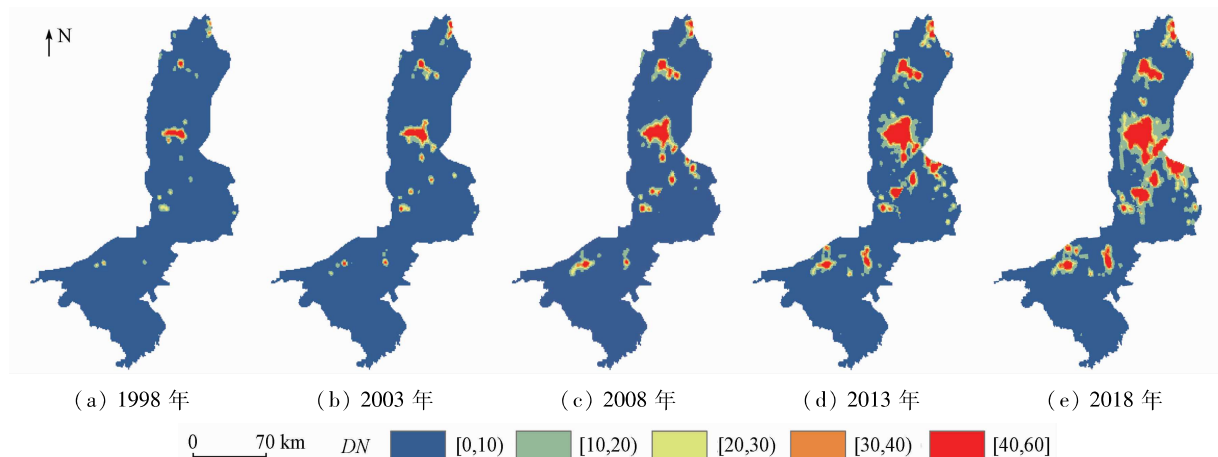


图 1 校正后的灯光影像数据集

Fig. 1 Corrected light image data set

元二次回归建模,得到用 NPP/VIIRS 数据模拟 DM-SP/OLS 数据的拟合函数,用该模型校正 2013 年和 2018 年的 NPP/VIIRS 数据。对于校正后数据中存在负值的像元赋值为 0,对 2018 年数据进行连续性校正,其像元的亮度值不小于 2013 年。从图 1 中可以看出,经过传感器间校正和年际校正后的影像有效削弱了像元值过饱和问题。

2.2 建成区提取

在整合的夜间灯光数据上提取出城市建成区,可以解决城市群演变分析只采用人口或 GDP 数据缺乏空间特征的问题。实际应用中存在夜间灯光数据空间分辨率过低等问题,导致小城市、县城以及小城镇等面积较小城区的数据准确性不高,通过较高分辨率的数据开展更加精细的定量化研究可以改善这一情况^[11]。

研究采取较高分辨率数据比较法提取城市建成区^[12],即先用 Landsat 系列数据辅以 Google Earth 影像通过目视解译进行城市建成区的提取,得到宁夏沿黄城市群各时期各城市建成区的矢量范围,以此范围为掩模,提取各时期宁夏沿黄城市群的城市建成区的夜间灯光数据(图 2)。

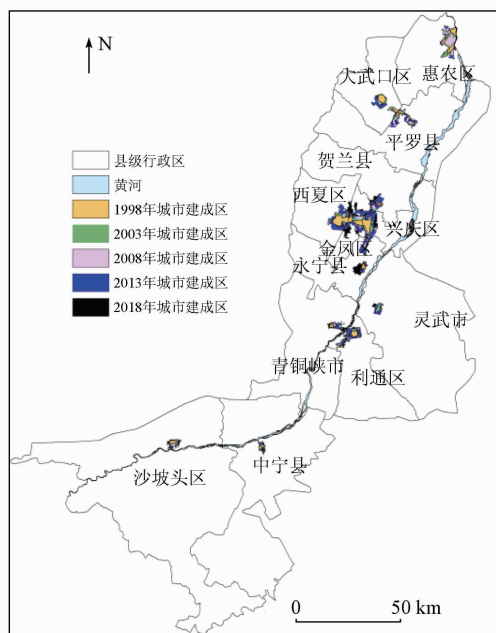


图 2 宁夏沿黄城市群建成区时空演变

Fig. 2 Spatiotemporal evolution of urban agglomerations built-up area along the Yellow River in Ningxia

2.3 分析方法

本研究主要采用夜间灯光增量、平均灯光亮度和灯光增速分析研究区城市群规模发展变化,并采用标准差椭圆、分形维数和破碎度来分析城市群的形态演变,最后,通过首位度和基尼系数 2 个指标来分析宁夏沿黄城市群结构演变规律。

1) 夜间灯光规模与 GDP、人口等传统城市群规

模测度有明显的相关性。一般而言,某区域的夜间灯光总量指数(总强度)和夜间平均灯光指数(灯光密度)可以反映该区域的人类活动强度^[13]。计算公式为:

$$TNLI = \sum_{i=1}^n DN_i, \quad (3)$$

$$ANLI = \frac{TNLI}{N}, \quad (4)$$

式中: DN_i 为区域内每个像元的亮度值; n 为区域内像元的数目; $TNLI$ 为区域内夜间灯光总量指数; $ANLI$ 为区域内夜间平均灯光指数。

在夜间灯光总量指数基础上计算城市群夜间灯光的增量和增速,进一步分析城市群规模的增长变化情况。计算公式为:

$$L = TNLI_{i+5} - TNLI_i, \quad (5)$$

$$s = \frac{TNLI_{i+5} - TNLI_i}{TNLI_i} \times 100\%, \quad (6)$$

式中: L 为夜光增量; s 为夜光增速; $TNLI_{i+5}$ 和 $TNLI_i$ 分别为前一时期和后一时期的区域内夜间灯光总量指数。

2) 标准差椭圆可以概括地理要素的空间特征,表现地理要素的分布中心、发现要素空间分布的方向性^[14]。通过研究标准差椭圆重心迁移分析城市群规模重心迁移变化的方向性特征,通过研究标准差椭圆的长短轴分布及其变化趋势从全局性空间的角度定量分析地理要素空间分布的展布性、方向性等特征。

3) 分形维数反映了复杂形体占有空间的有效性,是复杂形体不规则性的量度。分形维数可以用来描述城市群的空间形态特征^[15],计算公式为:

$$D = 2(\ln \frac{P}{4}) / \ln A, \quad (7)$$

式中: D 为城市群的分形维数; P 为城市建成区的周长; A 为城市建成区的面积。 D 取值范围为 1 ~ 2,越接近 1 表示城市群的形状越规则;反之,城市群的形态结构越复杂。

4) 破碎度指数可以表征城市群的分散程度,破碎度指数越高表明城市群内各城市建成区越分散^[16]。反之,城市群越聚集。计算公式为:

$$C = \frac{m}{A}, \quad (8)$$

式中: C 为破碎度指数; m 为某一时期城市群内城市建成区斑块总个数。

5) 夜间灯光总量指数与人类活动强度有着密切的关系^[17]。研究以夜间灯光总量指数来计算研究区城市群的首位度,以分析城市群的规模结构。计算公式为:

$$S = \frac{TNLI1}{TNLI2}, \quad (9)$$

式中: S 为某一年份城市群的首位度; $TNLI1$ 和 $TNLI2$ 分别为该年份排名第一、第二的城市夜间灯光总量指数。一般认为,当 S 大于 2 时,首位城市较为突出,具有较强的凝聚力; S 越小,首位城市越不突出,小于 1 时,城市群双核结构发展明显。

6) 城市基尼系数^[18-19]是由加拿大约克大学的马歇尔教授在研究不同规模城市的发育成长状况时提出。计算公式为:

$$G = \frac{T}{2TNLI}, \quad (10)$$

式中: G 为城市基尼系数; T 为城市群中各城市夜间灯光总体亮度指数之差的绝对值之和。 G 可以很准确地衡量城市群内各个城市之间的规模差异。 G 取值范围为 0~1,越接近于 0,城市群城市规模越分散;反之,越接近 1,城市群城市规模越集中。

3 结果与分析

3.1 宁夏沿黄城市群规模变化时空分析

3.1.1 灯光总量及平均值分析

研究区灯光总量指数和平均灯光指数如图 3 所示。城市群灯光总量指数和平均灯光指数均呈现稳定的上升趋势,灯光总量指数由 1998 年的 7 658 增长到 2018 年的 52 606,平均灯光指数则在 20 a 间由 30.93 增长到 57.98。表明 20 a 间研究区建成区规模不断扩展,社会经济活动强度明显增强。其中,银川市的灯光总量指数占研究区的一半以上,建成区规模超过其他 3 市的总和,并且银川市建成区扩展速度快,对整个城市群的发育及扩展起主导作用。城市群北部的石嘴山市为城市群第二大城市,灯光总量指数仅次于银川市,2018 年其灯光总量指数为

11 503,占到整个城市群 21.8%,而其夜间平均灯光指数在 5 个时期均低于其他 3 市。研究区南部的吴忠市和中卫市建成区面积较小,2018 年 2 市灯光总量指数之和仅为 9 154,城市规模小,对城市群的走向影响较小。

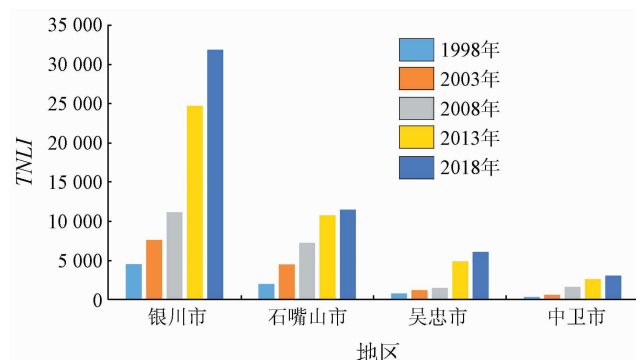


图 3 城市群各城市夜间灯光总量变化

Fig. 3 Change of total amount of nighttime light in cities of urban agglomeration

3.1.2 灯光增量及增速分析

根据研究区不同时期夜间灯光总量与平均值计算出研究区灯光增量和增速(表 2),城市群夜光增量先增加后减少,总体呈上升趋势,在 2008—2013 年增量和增速均达到最高,夜光增量为 21 525,远高于其他 3 个时期的增量。夜光增速达 99.79%,即宁夏沿黄城市群的规模在这一时期扩展了将近一倍,城市化迅速发展,而在 2013—2018 年这一时期的夜光增量和夜光增速均有所放缓。其中银川市灯光增加量最大,4 个时期的增加量均大于其他 3 市,且银川市灯光增速总体较高,在 2008—2013 年期间增速达到 121.57%,是银川市建成区规模扩展最快的时期。石嘴山市的夜间灯光规模在 1998—2003 年期间增长最快,是此时期扩展最快的城市。然而之后其灯光增速不断降低,由 125.59% 降低到 6.64%,灯光增量由 2 503 降低到 716,发展速度减缓。吴忠市和中卫市由于城市规模小,夜间灯光增量较少,夜间灯光增速没有明显规律,但其总体上发展较快,尤其是吴忠市在 2008—2013 年期间灯光增速为 225.20%,5 a 间城市规模扩展超 2 倍,发展速度较快。

表 2 研究区灯光增量和增速

Tab. 2 Light increment and growth rate

地区	增量				增速/%			
	1998—2003 年	2003—2008 年	2008—2013 年	2013—2018 年	1998—2003 年	2003—2008 年	2008—2013 年	2013—2018 年
银川市	3 082	3 559	13 594	7 173	67.87	46.69	121.57	28.95
石嘴山市	2 503	2 760	3 531	716	125.59	61.39	48.66	6.64
吴忠市	420	300	3 396	1 192	53.30	24.83	225.20	24.31
中卫市	273	1 015	1 004	430	81.25	166.67	61.82	16.36
城市群	6 278	7 634	21 525	9 511	81.98	54.78	99.79	22.07

3.2 宁夏沿黄城市群形态演变时空分析

3.2.1 标准差椭圆分析

研究区建成区标准差椭圆基本沿黄河呈东北—西南方向分布(图 4),从标准差椭圆的面积变化来看,经历了“收缩—扩张”的过程,2008 年是从“收缩”到“扩张”的时间转折点。1998—2008 年 10 a 间为城市群的“收缩”期间,是城市群填补内部空间,积累夜间灯光亮度总值的过程。2008 年以后由于城市群内部夜间灯光规模达到一定程度,转为向外扩张,提高城市群总体规模并加强城市间的协同合作。

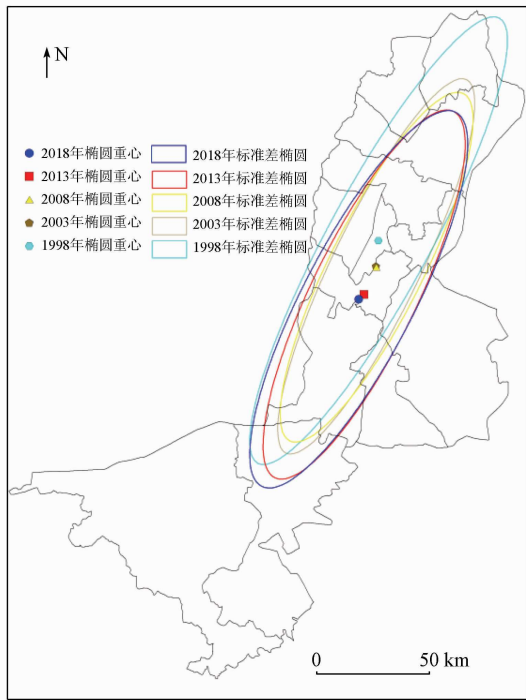


图 4 宁夏沿黄城市群标准差椭圆变迁

Fig.4 Standard deviation ellipse change of urban agglomerations along the Yellow River in Ningxia

建成区标准差椭圆的重心移动反映了城市群发展重心的转移。1998 年的重心分布在银川市金凤区,位于该城市群中部偏北的位置,体现了北部的银川市和石嘴山市的建成区在整个城市群占有举足轻重的地位;1998—2018 年间,重心逐渐沿黄河向西南方向转移,是因为南部的吴忠市和中卫市扩展速度较快,从而使得标准差椭圆的重心更偏向于城市群的几何重心,城市间规模的差异在缩小。

3.2.2 破碎度及基尼系数分析

研究区 5 个时期分形维数及破碎度指数如表 3 所示。研究区建成区的分形维数呈不断下降的趋势,1998—2018 年间城市群建成区的扩展是通过以内部填充为主、外部扩张为辅的方式。具体表现为各独立图斑的几何形状在扩展的同时趋于饱和。

表 3 研究区分形维数及破碎度

Tab.3 Fractal dimension and fragmentation

年份	面积/km ²	周长/km	图斑数/个	分形维数	破碎度
1998 年	113.32	244.98	25	1.74	0.22
2003 年	170.46	332.56	19	1.72	0.11
2008 年	266.19	395.98	16	1.65	0.06
2013 年	475.90	488.53	13	1.56	0.03
2018 年	573.54	531.70	10	1.54	0.02

20 a 间研究区建成区总面积由 113.32 km² 扩展到 573.54 km²,而建成区图斑个数由 1998 年的 25 个减少为 2018 年的 10 个,破碎度指数由 0.22 降到 0.02。城市群破碎度指数不断降低,城市群聚集度越来越高,意味着城市间耦合性增强。在城市化过程中,城市建成区的不同斑块相互连接而形成面积较大的斑块,邻近城市的建成区连接成较为广阔的城市建成区,如银川市的城市建成区在 2008—2013 年期间迅速扩展,与贺兰县、永宁县的城市建成区相连。

3.3 宁夏沿黄城市群结构演变时空分析

研究区各个时期首位度和基尼系数如图 5 所示。首位度在 1998—2008 年间为下降过程,2008—2018 年为上升过程,这是由于 1998—2008 年间石嘴山市发展速度较快,尤其是惠农区,除了建成区面积的扩展,夜间平均灯光指数有了很大的增幅(由 15 增长到 39,亮度平均值增长一倍有余)。大武口区与平罗县夜间灯光总量指数也增长了数倍,建成区范围极大扩张,平罗县建成区斑块连接为一体,形成较大的建成区规模。而银川市西夏区、金凤区、兴庆区在此期间发展速度相对缓慢,永宁县、贺兰县、灵武市虽然在 10 a 间也有成倍的增长,但其经济规模体量小,增长的总量有限。这一时期石嘴山市发展速度快于银川市,使得城市群的发展规模趋于均衡,首位度由 2.28 持续降到 1.54。

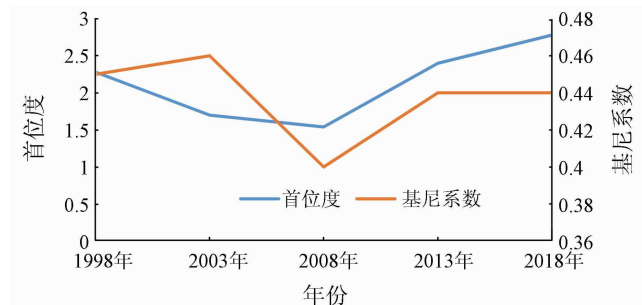


图 5 城市群首位度及基尼系数

Fig.5 Primacy and Gini coefficient of urban agglomeration

2008—2018 年 10 a 间,尤其是 2008—2013 年期间,银川市主城区扩展迅速,兴庆区不断向南北两侧扩展,最终突破行政区划界限与同样在扩展的永宁县和贺兰县的建成区相连,各区县之间联系更加密切^[15]。而这一时期石嘴山市扩展速度较为缓慢,

尤其是惠农区在 2013—2018 年扩展受限,而且平均灯光指数也达到了发展瓶颈。银川市发展速度快于石嘴山市,使得 2 市间经济差距拉大,研究区首位度由 1.54 增长到 2.78,银川市在城市群中的地位更加突出。

研究区 5 个时期的基尼系数均大于 0.4,各城市间发展差异较大,其中 2003—2008 年基尼系数稍有下降,由 0.46 降低到 0.40。在这个时间段内,银川市发展较缓,而石嘴山市、吴忠市、中卫市发展较快,城市间发展差距有所缩小,这与前面的首位度指数分析结果是一致的。其中,吴忠市在前 10 a 发展速度较慢,在 2008 年被中卫市超越,成为研究区排名最后的城市,在 2008 年后的 10 a 间,吴忠市的主城区利通区迅速发展,拉动吴忠市再次超越中卫市。但是吴忠市和中卫市的总体经济体量较小,对整个研究区的发育规模、形态、结构的影响较小。1998 年 2 市的灯光总量之和仅占城市群的 14.68%,到 2018 年这一数值上升为 17.40%,小城市在宁夏沿黄城市群所占的比重得到提升,城市群的总体结构有所优化。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文以宁夏沿黄城市群为研究区,选用时间序列较长的 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 数据,在将 2 类数据拟合的基础上,结合 Landsat 数据应用较高分辨率数据比较法进行城市建成区的提取,分别从规模、形态、结构来分析研究区 20 a 间的时空演变,结论如下:

1) 研究区在 1998—2018 年间迅速扩展,2008—2013 年期间无论从增量还是增速方面都达到了顶峰,其中以银川市各区县为扩展的主力军。

2) 研究区破碎度指数不断降低,即城市群的内部形态更为紧凑,建成区斑块更加集中;分形维数从 1.74 降低到 1.54,几何形状变得趋于规则,城市群扩展以“内部填充”方式为主。

3) 城市群发展重心不断向西南方向迁移,更加趋近于城市群的几何中心,城市群南部的吴忠市、中卫市地位得到上升,发展快于北部的石嘴山市。

4) 城市群的首位度和基尼系数经历了“下降—上升”的过程,基尼系数保持在 0.40 以上,银川市的发展先缓后快,在城市群中的地位相当突出。

4.2 讨论

本文在前人研究的基础上,根据城市群地理区域和发育过程研究的需要,分别以鸡西市为不

变目标区域和以宁夏沿黄城市群为目标区域进行校正,并建立了相关的夜光数据拟合体系;应用较高分辨率数据比较法提取城市建成区夜间灯光影像,较为成功地将整合后的夜间灯光数据应用于研究区各城市的建成区范围提取中,空间特性得到较强的利用,避免了因使用统计数据比较法带来的误差,使得分析结果更加精确、客观。不同城市建成区时空演变特征相似,可交叉验证,与相关研究基本吻合^[20],证明了本文数据提取的精度和分析的合理性。较为完整地应用夜间灯光数据进行了城市群时空演变研究,对应用夜间灯光遥感的其他研究有一定的借鉴意义。

同时,由于研究内容体系复杂,计算量大,在部分细节处理有待改进:①数据拟合精度有待提高。在进行 2 种夜光数据拟合的过程中,由于对部分数据进行了相互校正以及连续性校正等,导致校正后的数据与原始数据产生了一定的夜光强度误差。②无法对建成区提取结果进行有效的验证。为提高提取精度,采用较高分辨率数据比较法进行建成区提取,从而提取结果与统计数据不具有可比性,无法使提取结果得到有效验证,将在后续研究中寻找更好的方法。

参考文献 (References):

- [1] 余柏菡,王丛笑,宫文康,等. 夜间灯光遥感与城市问题研究: 数据、方法、应用和展望[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 342 - 364.
Yu B L, Wang C X, Gong W K, et al. Nighttime light remote sensing and urban studies: Data, methods, applications, and prospects [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 342 - 364.
- [2] 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. doi:10.6046/gtzyyg. 2019. 04. 28.
Lu C Y, Xu Y T, Lin X Q, et al. Study of spatio-temporal evolution of the circum-Bohai urban agglomeration based on DMSP/OLS nighttime light data [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019, 31(4): 218 - 226. doi:10.6046/gtzyyg. 2019. 04. 28.
- [3] 李桂华,范俊甫,周玉科,等. 基于 VIIRS 夜间灯光数据的山东半岛城市群发展特征研究[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(6): 1348 - 1359.
Li G H, Fan J F, Zhou Y K, et al. Development characteristics estimation of Shandong peninsula urban agglomeration using VIIRS night light data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(6): 1348 - 1359.
- [4] 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.
Li D R, Yu H R, Li X. The spatial-temporal pattern analysis of

- city development in countries along the Belt and Road Initiative based on nighttime light data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(6): 711–720.
- [5] Li X, Li D R, Xu H M, et al. Intercalibration between DMSP/OLS and VIIRS night-time light images to evaluate city light dynamics of Syria's major human settlement during Syrian civil war[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(21): 5934–5951.
- [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] 王重玲, 朱志玲, 王梅梅, 等. 宁夏沿黄经济区城市群人居环境与经济协调发展评价[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(2): 189–193.
- Wang C L, Zhu Z L, Wang M M, et al. Evaluation of coordinated development of settlement environment and economy in economic zone along the Yellow River in Ningxia[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(2): 189–193.
- [8] 曹子阳, 吴志峰, 米素娟, 等. DMSP/OLS 稳定夜间灯光影像在中国的分类校正方法[J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(2): 246–257.
- Cao Z Y, Wu Z F, Mi S J, et al. A method for classified correction of stable DMSP/OLS nighttime light imagery across China[J]. *Acta Geoinformatica Sinica*, 2020, 22(2): 246–257.
- [9] 李雪萍, 贡璐. DMSP/OLS 和 VIIRS/DNB 夜间灯光影像的校正及拟合[J]. *测绘通报*, 2019(7): 138–146.
- Li X P, Gong L. Correction and fitting of night light images of DMSP/OLS and VIIRS/DNB[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019(7): 138–146.
- [10] 张佰发, 苗长虹, 宋雅宁, 等. 一种 DMSP/OLS 稳定夜间灯光影像中国区域的校正方法[J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(8): 1679–1691.
- Zhang B F, Miao C H, Song Y N, et al. Correction of DMSP/OLS stable night light images in China[J]. *Acta Geoinformatica Sinica*, 2020, 22(8): 1679–1691.
- [11] 王晓慧, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 基于 DMSP/OLS 数据的中国大尺度城镇用地信息提取[J]. *国土资源遥感*, 2013, 25(3): 159–164. doi:10.6046/gtzyyg. 2013. 03. 26.
- Wang X H, Xiao P F, Feng X Z, et al. Extraction of large-scale urban area information in China using DMSP/OLS nighttime light data[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2013, 25(3): 159–164. doi:10.6046/gtzyyg. 2013. 03. 26.
- [12] 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.
- [13] 高宁, 盖迎春, 宋晓谕. 基于夜间灯光数据的西安市城市扩张及驱动因素研究[J]. *遥感技术与应用*, 2019, 34(1): 207–215.
- Gao N, Ge Y C, Song X Y. Study of urban expansion and driving factors in Xi'an City based on nighttime light data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, 34(1): 207–215.
- [14] 张文斌, 张志斌, 周翼, 等. 基于夜间灯光数据的兰西城市群时空演变特征[J]. *遥感信息*, 2020, 35(6): 38–43.
- Zhang W B, Zhang Z B, Zhou Y, et al. Temporal-spatial evolution characteristics of Lanxi urban agglomeration based on night light data[J]. *Remote Sensing Information*, 2020, 35(6): 38–43.
- [15] 张佳瑜, 白林波, 杨美玲. 银川市近30年城市扩展时空演变[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(5): 359–365.
- Zhang J Y, Bai L B, Yang M L. Spatial and temporal evolution of Yinchuan urban expansion in the last 30 years[J]. *Soil and Water Conservation Research*, 2019, 26(5): 359–365.
- [16] 李小妹, 严平, 刘保莉. 基于流域尺度的中国北方沙地空间分布特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(4): 104–111.
- Li X M, Yan P, Liu B L. Spatial distribution characteristics of sandy land in northern China based on watershed scale landscape pattern characteristics of aeolian-fluvial interactions at the scale of watersheds in Northern China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(4): 104–111.
- [17] 雷仲敏, 康俊杰. 城市首位度评价: 理论框架与实证分析[J]. *城市发展研究*, 2010, 17(4): 33–38.
- Lei Z M, Kang J J. Evaluation theory of urban primacy: Theoretical framework and empirical analysis[J]. *Urban Development Studies*, 2010, 17(4): 33–38.
- [18] 古恒宇, 沈体雁. 中国高学历人才的空间演化特征及驱动因素[J]. *地理学报*, 2021, 76(2): 326–340.
- Gu H Y, Shen T Y. Spatial evolution characteristics and driving forces of Chinese highly educated talents[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(2): 326–340.
- [19] Allison P D. Measures of inequality[J]. *American Sociological Review*, 1978, 43(6): 865–880.
- [20] 周瑞瑞. 宁夏沿黄城市群城镇化质量及时空格局演变特征研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2017.
- Zhou R R. A study on quality of urbanization and evolution of spatial-temporal patterns of urbanization on the city zone along the Yellow River in Ningxia[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2017.

Spatio-temporal evolution of Ningxia urban agglomeration along the Yellow River based on nighttime light remote sensing

BU Ziqiang, BAI Linbo, ZHANG Jiayu

(School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: This study analyzed the spatio-temporal evolutionary characteristics of the Ningxia urban agglomeration

along the Yellow River during 1998—2018 from the aspects of morphology, scale, and structure. To this end, the urban built – up area in the study area during the 20 years was extracted from five stages of DMSP/OLS and NPP/VIIRS nighttime light data using a high – resolution data comparison method. The results are as follows: ①The Ningxia urban agglomeration along the Yellow River expanded rapidly during 1998—2018, and the increment and growth rate peaked during 2008—2013. ②The constantly decreased fragmentation degree indicates that the inner morphology of the urban agglomeration became increasingly compact and the built – up patches were relatively concentrated. The fractal dimension continuously decreased, and the geometric shape of the urban agglomeration tended to be regular. Moreover, the urban agglomeration mainly expanded in the means of internal filling. ③The center of the urban agglomeration migrated to the southwest and approached its geometric center, and the urban development accelerated in the south. ④The primacy ratio and Gini coefficient of the urban agglomeration first decreased and then increased, indicating that the gap between cities in the urban agglomeration first narrowed and then widened.

Keywords: Ningxia urban agglomeration along the Yellow River; nighttime light data; built – up area; spatio – temporal evolution

(责任编辑: 陈 理)