

奥 勇,毋冰龙,白召弟,等.基于类 NPP-VIIRS 夜间灯光数据的粤港澳大湾区城市建成区时空动态特征[J].地球科学与环境学报,2022,44(3):513-523.

AO Yong, WU Bing-long, BAI Zhao-di, et al. Temporal-spatial Changes of Urban Built-up Area Expansion in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China Based on NPP-VIIRS-like Night Light Data[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(3): 513-523.

DOI:10.19814/j.jese.2021.12040

· 庆祝西安地质调查中心组建六十周年专辑 ·

# 基于类 NPP-VIIRS 夜间灯光数据的粤港澳大湾区城市建成区时空动态特征

奥 勇<sup>1,2</sup>, 毋冰龙<sup>2,3</sup>, 白召弟<sup>2,3</sup>, 王晓峰<sup>1,2</sup>, 陈子娴<sup>4</sup>

(1. 长安大学 土地工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 陕西省土地整治重点实验室, 陕西 西安 710054;  
3. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 4. 西南大学 地理科学学院, 重庆 400715)

**摘 要:**随着人口增长与经济发展,快速准确地获取城市建成区扩张信息,并对其时空特征进行分析,对于今后城市可持续发展具有重要意义。基于 2000~2018 年类 NPP-VIIRS 夜间灯光数据的大尺度不透水面指数提取粤港澳大湾区城市不透水面,并基于统计数据比较法得到城市建成区,对粤港澳大湾区以及各城市的建成区扩张进行时空分析。结果表明:①类 NPP-VIIRS 夜间灯光数据实现了对城市建成区的高精度提取,可为城市长时间序列的时空变化监测提供新的数据基础;②粤港澳大湾区城市建成区由 2000 年的 1 279.00 km<sup>2</sup> 增加到 2018 年的 4 730.25 km<sup>2</sup>,广州、深圳、东莞的建成区扩张最为明显,分别增加了 793.50、812.75、1 027.50 km<sup>2</sup>;在空间上,粤港澳大湾区城市建成区扩张主要发生在各城市之间的交界地带,逐步形成了佛山—广州—东莞—深圳—香港大型城市群核心建成区,西部地区发展相对较慢;③粤港澳大湾区城市建成区重心 2000~2018 年由东莞转移到广州。总之,粤港澳大湾区城市建成区在 2000~2018 年扩张整体呈现由快变慢、东快西慢的特点。

**关键词:**城市建成区;夜间灯光数据;不透水面;比较法;时空特征;粤港澳大湾区

中图分类号:X22;TP75

文献标志码:A

文章编号:1672-6561(2022)03-0513-11

## Temporal-spatial Changes of Urban Built-up Area Expansion in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China Based on NPP-VIIRS-like Night Light Data

AO Yong<sup>1,2</sup>, WU Bing-long<sup>2,3</sup>, BAI Zhao-di<sup>2,3</sup>, WANG Xiao-feng<sup>1,2</sup>, CHEN Zi-xian<sup>4</sup>

(1. School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Land Reclamation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;  
3. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;  
4. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** With the growth of population and the development of economy, it is of great significance for the sustainable development of cities in the future to quickly and accurately obtain

收稿日期:2021-12-22;修回日期:2022-02-22 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家自然科学基金项目(31670549);陕西省土地整治重点实验室开放基金项目(2018-JC08);

自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室开放基金项目(SXDJ2019-8)

作者简介:奥 勇(1965-),男,陕西富平人,副教授,工学博士,E-mail:aoyong@chd.edu.cn.

the expansion information of urban built-up areas, and to analyze their temporal and spatial characteristics. Based on the large-scale impervious surface index (LISI) of NPP-VIIRS-like night light data from 2000 to 2018, the urban impervious surface in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area was extracted, and the urban built-up areas were obtained by statistical data comparison method, and the expansion of urban built-up areas in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area were analyzed in time and space. The results show that NPP-VIIRS-like night light data can extract the urban built-up area with high precision, which can provide a new data basis for monitoring the temporal and spatial changes of urban long-time series; the urban built-up area increases from 1 279.00 km<sup>2</sup> in 2000 to 4 730.25 km<sup>2</sup> in 2018. Guangzhou, Shenzhen and Dongguan have the most obvious urban built-up areas with an increase of 793.50, 812.75 and 1 027.50 km<sup>2</sup>, respectively. In space, the expansion of urban built-up area mainly occurs in the border areas between cities, gradually forming the core urban built-up area of Foshan-Guangzhou-Dongguan-Shenzhen-Hong Kong, and the development in the west is relatively slow. The gravity center of the urban built-up area transfers from Dongguan to Guangzhou during 2000—2018. The expansion of the urban built-up area shows the characteristics of fast-growing in 2000 and slow-growing in 2018, fast-growing in the east and slow-growing in the west of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area.

**Key words:** urban built-up area; night light data; impervious surface; comparison method; temporal-spatial characteristic; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

## 0 引 言

改革开放以来,中国城镇化进程加快,大批人口和资源涌向城市,特别是中国大型城市群的城市建成区增加尤为明显,与之对应的是耕地数量的急剧减少<sup>[1]</sup>。快速准确地获取城市建成区的信息,分析城市建成区扩张的时空演变特征,对于今后城市发展规划、合理利用土地资源以及保护生态环境具有重大意义<sup>[2]</sup>。粤港澳大湾区作为中国开放程度最高、经济活力最强的区域之一,与美国纽约湾区、旧金山湾区和日本东京湾区并称为世界四大湾区,其发展速度与潜力一直处于国内领先地位,但湾区内部发展不协调,东西发展差距日渐增大,因此,研究粤港澳大湾区内部的建成区扩张以及城市之间相互联系具有重要的现实意义<sup>[3]</sup>。

城市建成区的提取是城市扩张时空变化研究的重要部分,传统的城市建成区获取途径主要是通过查阅各地区统计年鉴等统计数据,缺少城市建成区的空间结构信息<sup>[4-5]</sup>。随着现代遥感技术的发展,通过遥感数据依据城市不透水面的概念提取城市不透水面,进而提取城市建成区成为主要技术手段。20 世纪 70 年代美国发射 Landsat 卫星以来,国内外学者通过遥感数据对城市扩张进行了大量的研究。黄

昕等研发了一套 1972~2019 年全球不透水面产品,并对各大洲及其代表性国家的城市扩展格局进行了分析<sup>[6]</sup>。Frimpong 等通过 Landsat 影像结合随机森林方法对加纳库马西的城市扩张进行了分析<sup>[7]</sup>。Taubenbock 等将面向对象和基于像元的分类方法应用于 Landsat 和 Terra SAR-X 数据提取城市扩张信息,对世界上 3 个特大城市进行了分析<sup>[8]</sup>。

传统的遥感数据通过提取城市不透水面进而提取建成区,但建成区作为城市发展的活跃地区,单纯通过不透水面很难反映建成区的社会与经济活跃程度;夜间灯光数据的亮度可以很好地反映城市扩张的水平,灯光的强弱反映了城市内部人类活动的活跃程度,因此,夜间灯光数据相较于 Landsat 影像提取的建成区更有实际意义<sup>[9]</sup>。Elvidge 等通过 DM-SP-OLS(Defense Meteorological Satellite Program-operational Linescan System)夜间灯光数据提取城市信息,对美国各城市扩张进行了分析<sup>[10]</sup>。刘源等通过 NPP-VIIRS(Npoess Preparatory Project-visible Infrared Imaging Radiometer)夜间灯光数据结合局部等值线树算法提取城市中心,对重庆市中心的发展状况进行了分析<sup>[11]</sup>。刘权毅等通过珞珈一号夜间灯光数据结合人类居住合成指数提取城市建成区信息,对武汉市城市建成区的扩张进行了分

析<sup>[12]</sup>。

以上研究在城市扩张方面进行了有益的探索,目前常用于城市扩张研究的夜光数据为 DMSP-OLS 和 NPP-VIIRS 夜间灯光数据。DMSP-OLS 夜间灯光数据仅有 1992~2013 年的数据,NPP-VIIRS 夜间灯光数据则是更新 2013 年之后的数据。两者之间存在不可比的情况,限制了夜间灯光数据的时间序列研究<sup>[13]</sup>。虽然有很多研究通过将 DMSP-OLS 与 NPP-VIIRS 夜间灯光数据进行整合,以得到连续的时间序列数据集,但是无法克服数据传感器不同造成的误差<sup>[14]</sup>。余柏蒨教授团队在 2021 年生产了 2000~2018 年类 NPP-VIIRS 夜间灯光数据集,该数据集具有跟 NPP-VIIRS 夜间灯光数据一致的参数属性,使得夜间灯光数据的长时间序列研究得以实现<sup>[15]</sup>。

本文以粤港澳大湾区为研究区域,通过 2000~2018 年 5 期类 NPP-VIIRS 夜间灯光数据,结合大尺度不透水面指数(Large-scale Impervious Surface Index, LISI)和统计数据比较法提取目标区域的城市建成区,进而对其建成区扩张的空间特征和时态变化特征进行分析,为粤港澳大湾区整体发展以及大湾区各城市的可持续发展提供科学依据。

# 1 研究数据与方法

## 1.1 研究区概况

粤港澳大湾区包括香港特别行政区,澳门特别行政区,广东省广州市、深圳市、珠海市、佛山市、惠州市、东莞市、中山市、江门市、肇庆市(图 1),总面积  $5.6\times 10^4\text{ km}^2$ ,2017 年末总人口约 7 000 万人,具有重要战略地位。粤港澳大湾区所处位置为珠江入海口,地势平坦,气候温和,水网密布,交通运输方便,且拥有大面积的耕地、林地和草地。

## 1.2 数据获取与预处理

### 1.2.1 数据获取

(1)类 NPP-VIIRS 夜间灯光数据集。类 NPP-VIIRS 夜间灯光数据来源于 Harvard Dataverse 平台,空间分辨率为 500 m。像元辐射值表征灯光强度,灯光辐射值的大小反映灯光的强弱,单位为  $\text{nW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ 。像元辐射 0 值及以下视为无光。

(2)MODIS 16 d 归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)产品。2000、2005、2010、2015、2018 年归一化植被指数数据来自美国 NASA 网站的 Terra 卫星 MOD13Q1 产品,空间分辨率为 250 m。

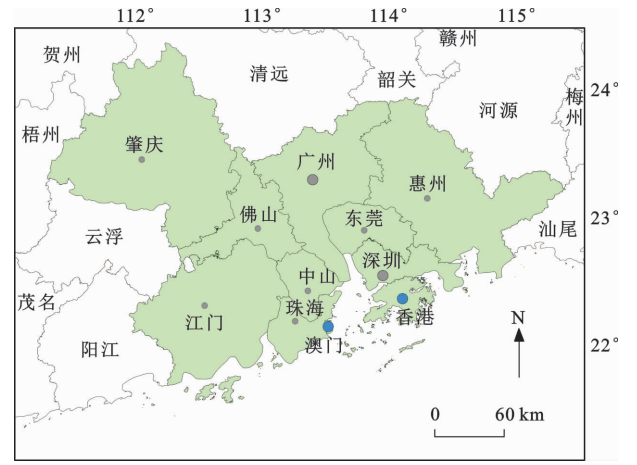


图 1 粤港澳大湾区区位图  
Fig. 1 Overview Map of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

(3)其他辅助数据。粤港澳大湾区行政区矢量数据来自地理空间数据云网站。广东统计年鉴、香港统计年刊、澳门建成区面积数据分别来自广东省统计局、香港特别行政区政府统计处、澳门特别行政区土地利用数据。

### 1.2.2 数据预处理

(1)类 NPP-VIIRS 夜间灯光数据由于杂散光影响导致亮度值过高或出现负值现象,且数值量化级别较高,但其数值大多数集中在 0~65。为了将所有数据源保持在 0 和 1 之间的相同范围内,对类 NPP-VIIRS 夜间灯光数据进行归一化。归一化计算公式为

$$D_{\text{nor}} = \frac{D - D_{\text{min}}}{D_{\text{max}} - D_{\text{min}}} \quad (1)$$

式中: $D_{\text{nor}}$ 表示归一化的类 NPP-VIIRS 数据值(范围为 0~1); $D$ 为该数据集某一像素的遥感影像像元亮度(DN); $D_{\text{min}}$ 和  $D_{\text{max}}$ 分别为类 NPP-VIIRS 数据的最小值和最大值。

(2)将归一化植被指数数据(MOD13Q1)重投影为 WGS\_1984 投影,并在重投影过程中将数据重采样到与夜间灯光数据空间分辨率一致。本研究通过最大值合成法得到年度归一化植被指数图,最大值合成法可进一步消除云、大气、太阳高度角、传感器灵敏度等因素的部分干扰<sup>[16-17]</sup>。归一化植被指数最大值( $I_{\text{max}}$ )计算公式为

$$I_{\text{max}} = \text{MAX}(N_1, N_2, \dots, N_n) \quad (2)$$

式中: $N_n$ 为归一化植被指数数据第  $n$  个像素的遥感影像像元亮度。

将得到的最大年度归一化植被指数图进行裁剪,得到粤港澳大湾区的年度归一化植被指数数据。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 大尺度不透水面指数

Guo 等提出的大尺度不透水面指数<sup>[18]</sup>结合了夜光数据和 MODIS NDVI 数据的优点。大尺度不透水面指数( $I_{LISI}$ )计算公式为

$$I_{LISI} = (1 - N) \sqrt{D_{nor}} \tag{3}$$

式中: $N$  为年度归一化植被指数。

#### 1.3.2 统计数据比较法

大尺度不透水面指数提取的结果仅为不透水面,需进一步处理得到城市建成区。本研究通过统计数据比较法并结合统计年鉴数据再次对大尺度不透水面指数进行处理,得到城市建成区面积。

#### 1.3.3 建成区验证

##### (1)建成区空间验证

本研究在 2018 年广州、东莞、香港、深圳 4 个核心城市的 Google Earth 影像中选取样本点,采用随机验证的方法对 4 个城市的建成区提取结果进行验证,以此来验证粤港澳大湾区建成区在空间位置上的提取精度。

##### (2)建成区数量验证

本研究采用与统计年鉴的建成区面积计算相对误差,对粤港澳大湾区的建成区提取结果进行数量验证。相对误差的计算公式为

$$E_{sta} = \frac{Q - Q'}{Q} \times 100\% \tag{4}$$

式中: $E_{sta}$  为相对误差; $Q$  为统计年鉴的建成区面积; $Q'$  表示建成区提取面积。

#### 1.3.4 建成区扩张的时间变化

##### (1)城市建成区扩张强度计算公式为

$$I_{UES} = \frac{\Delta S}{\Delta t S_{TA}} \times 100\% \tag{5}$$

式中: $I_{UES}$  为城市扩张强度指数; $S_{TA}$  为土地总面积; $\Delta S$  为两个时期建设用地面积差; $\Delta t$  为时间间隔。

##### (2)城市建成区扩张速度( $v_{UEI}$ )计算公式为

$$v_{UEI} = \frac{\Delta S}{\Delta t S_{BA}} \times 100\% \tag{6}$$

式中: $S_{BA}$  为基础建成区总面积。

## 2 结果分析

### 2.1 建成区提取精度验证

本研究在空间和数量两个方面对粤港澳大湾区建成区的精度进行验证。在空间上,验证结果如表 1 所示,4 个核心城市的 2018 年建成区提取结果的空间位置精度均在 85% 以上,东莞的精度达到了

94.51%。在数量上,验证结果如表 2 所示,最大误差为 6.06%,相较于陆永权等给出的提取精度最大误差(14%)<sup>[19]</sup>提高了 7% 以上;本研究逐个确定每个城市阈值相较于城市群整体提取建成区,提取精度更高。

表 1 城市建成区提取结果的空间位置验证结果

Table 1 Verification Results of Spatial Position for Extraction Result of Urban Built-up Area

城市	精度
广州	93.77%
东莞	94.51%
深圳	90.41%
香港	85.51%

### 2.2 建成区扩张的时间变化特征

图 2 为 2000~2018 年建成区面积及其变化直方图。从图 2 可以看出:粤港澳大湾区的建成区由 2000 年的 1 279.00 km<sup>2</sup> 增加到 2018 年的 4 730.25 km<sup>2</sup>,扩张了近 3.7 倍,2000~2005 年是建成区扩张最快的时期,广州、深圳、东莞是 2000~2005 年建成区增长的前三名,分别为 571.50、440.75、251.00 km<sup>2</sup>,其余城市的建成区也在这一时期快速扩张;2005~2010 年,东莞、广州、惠州、深圳建成区扩张迅速,惠州也是该时期唯一建成区增加大于 2000~2005 年的城市,其他城市建成区增加相对缓慢;2010~2015 年,广州、中山在这一时期建成区增加大于 2005~2010 年;2015~2018 年,广州建成区增加迅速减小,东莞是这个期间建成区增加最快的城市,增加量为 234.5 km<sup>2</sup>;其他城市在 2000~2018 年建成区扩张逐渐变慢。

图 3 为 2000~2018 年城市建成区扩张速度与扩张强度直方图。从图 3 可以看出:粤港澳大湾区在 2000~2018 年建成区扩张速度整体呈下降趋势,2000~2005 年扩张速度达到 127.37%,是扩张速度最快的时期,扩张强度则在 2000~2015 年呈下降趋势,2015~2018 年又缓慢回升;深圳、佛山、江门的扩张速度与扩张强度趋势一致,均是在 2000~2005 年达到最高,之后迅速降低,深圳在这一时期的扩张速度和扩张强度最大,扩张速度达到 386.15%,扩张强度为 5.72%;广州、肇庆和香港的扩张速度在 2000~2018 年变化相对较小,整体呈下降趋势,广州的扩张强度在 2000~2015 年稳定在 0.7% 左右,在 2015~2018 年降低到 0.31%,肇庆的扩张强度在 2000~2015 年稳定在 0.2% 左右,2015~2018 年降低到 0.09%,香港的扩张强度与扩张速度趋势一

表 2 城市建成区提取的数量验证结果

Table 2 Verification Results of Quantity Extracted from Urban Built-up Area

年份	粤港澳大湾区不同城市建成区提取的数量误差/%										
	东莞	佛山	广州	香港	惠州	江门	深圳	肇庆	中山	珠海	澳门
2000	0.00	1.97	0.05	-0.62	0.56	0.54	0.68	-1.25	0.86	-0.72	6.06
2005	0.27	-0.49	-0.27	-0.26	-0.17	-0.11	-0.05	-0.46	0.47	0.42	5.41
2010	0.23	-0.31	0.22	-0.13	0.09	-0.64	0.07	0.23	0.62	-0.72	5.41
2015	0.33	-0.10	0.13	0.13	0.13	-0.33	0.00	-0.49	0.21	-0.40	0.54
2018	0.18	0.16	-0.33	-0.12	0.43	-0.48	0.03	0.00	0.81	-0.23	0.54

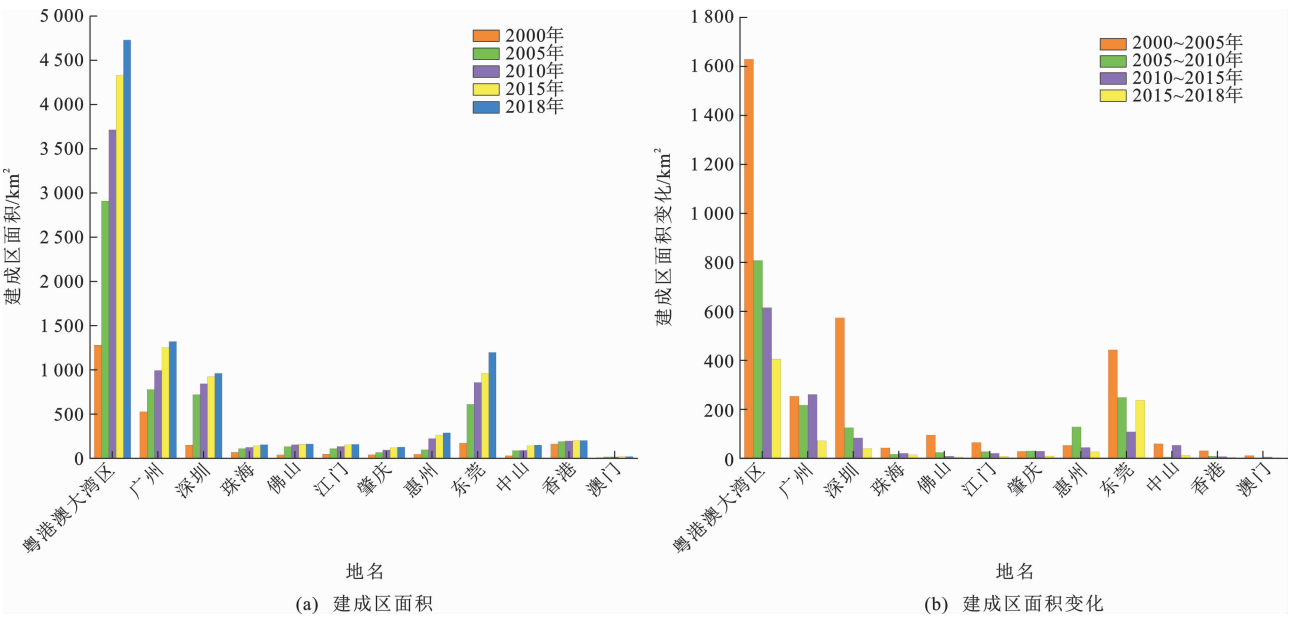


图 2 2000~2018 年城市建成区面积及其变化直方图

Fig. 2 Histograms of Urban Built-up Areas and Their Change from 2000 to 2018

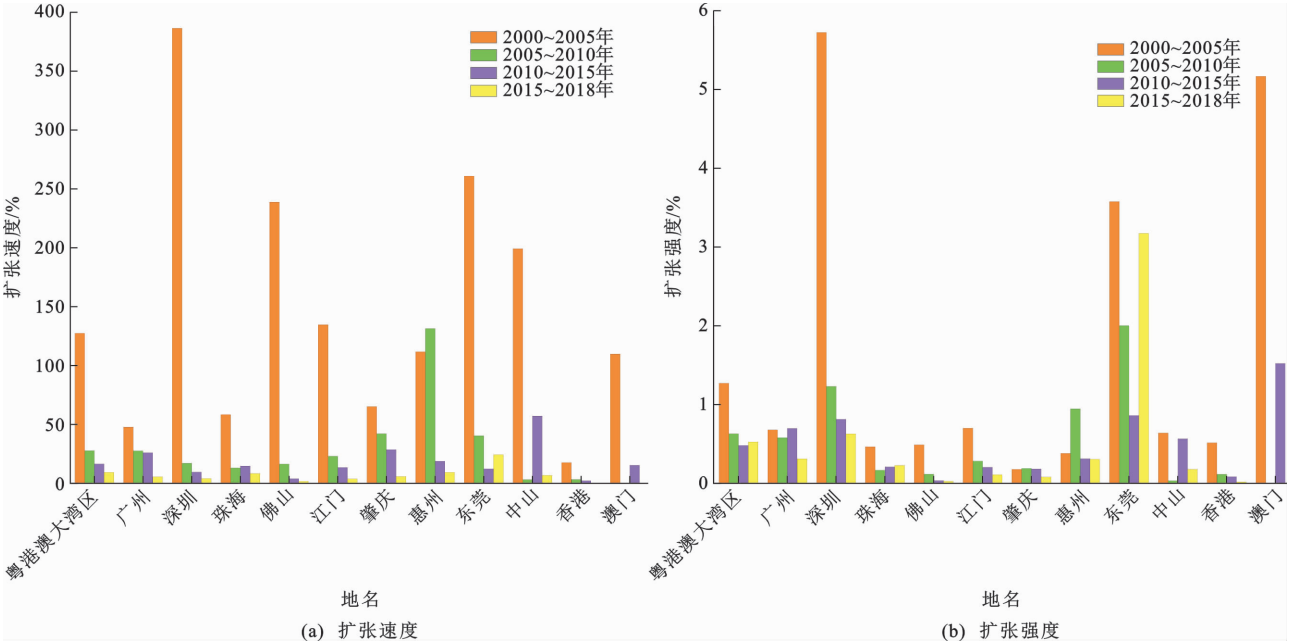


图 3 2000~2018 年城市建成区扩张速度与扩张强度直方图

Fig. 3 Histograms of Expansion Speed and Intensity of Urban Built-up Areas from 2000 to 2018

致;中山和澳门的扩张速度和扩张强度趋势一致,在2000~2010年呈下降趋势,2010~2015年呈上升趋势,2015~2018年再次下降;东莞的扩张速度与扩张强度均在2000~2015年呈下降趋势,2015~2018年呈上升趋势;惠州的扩张速度与扩张强度在2000~2010年呈上升趋势,2010~2018年迅速下降;珠海的扩张速度在2000~2010年呈下降趋势,2010~2015年出现小幅上升,2015~2018年再次下降,扩张强度在2000~2010年呈下降趋势,2010~2018年缓慢上升,基本维持在0.2%左右。

本文将扩张速度按照小于40%为低速发展阶段,40%~80%为中速发展阶段,大于80%为高速发展阶段进行划分。图4为2000~2018年城市建成区扩张速度空间分布。从图4可以看出:2000~2005年,粤港澳大湾区整体为快速发展阶段;深圳、佛山、江门、惠州、东莞、中山、澳门均为快速发展阶段,广州、珠海、肇庆为中速发展阶段,仅香港为慢速发展阶段;2005~2010年,除肇庆、惠州、东莞为中

速发展阶段外,其余城市均为慢速发展阶段;2010~2015年,除中山为中速发展阶段外,其余城市均为慢速发展阶段;2015~2018年,粤港澳大湾区所有城市均为慢速发展阶段。

2.3 建成区扩张的空间特征

图5为2000~2018年城市建成区提取结果。从图5可以看出,2000~2018年粤港澳大湾区的建成区随着城镇化进程不断增加,并且着重发展东部沿海地区,西部地区发展较缓慢。各城市的建成区扩张主要发生在城市之间的交界地带,城市之间的联系日渐增强。2000年粤港澳大湾区的建成区主要分布在广州、香港、澳门,其他城市建成区零散分布,2000~2005年粤港澳大湾区建成区迅速扩张,东部与西部发展差距增大,深圳、东莞建成区增加尤为明显,粤港澳大湾区东南部沿海城市联系逐渐加强,形成佛山—广州—东莞—深圳—香港核心城市建成区,西部城市建成区增加较为缓慢。2005~2010年粤港澳大湾区建成区总体缓慢增长。

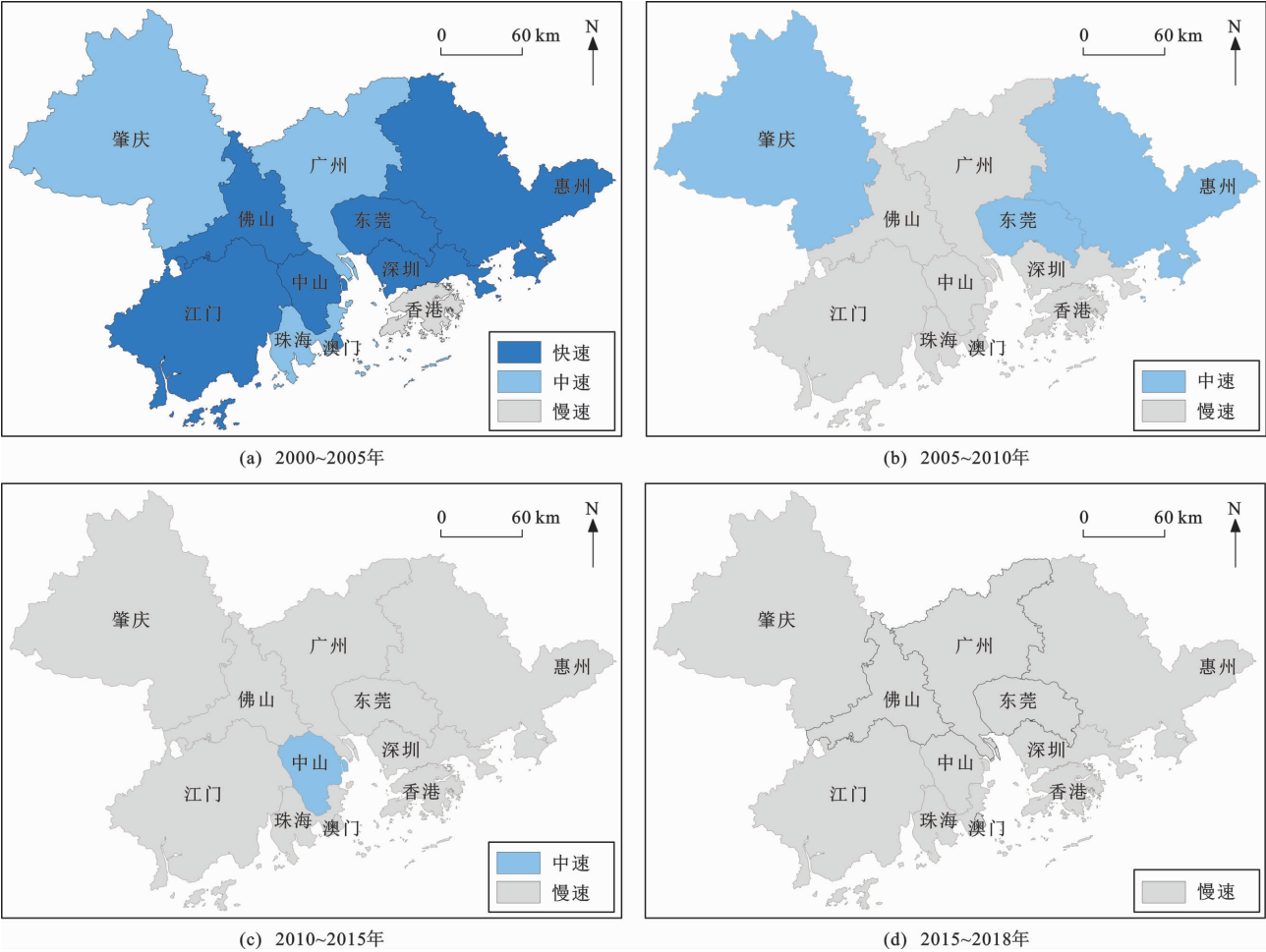


图 4 2000~2018 年城市建成区扩张速度空间分布

Fig. 4 Spatial Distributions of Expansion Speed of Urban Built-up Areas from 2000 to 2018



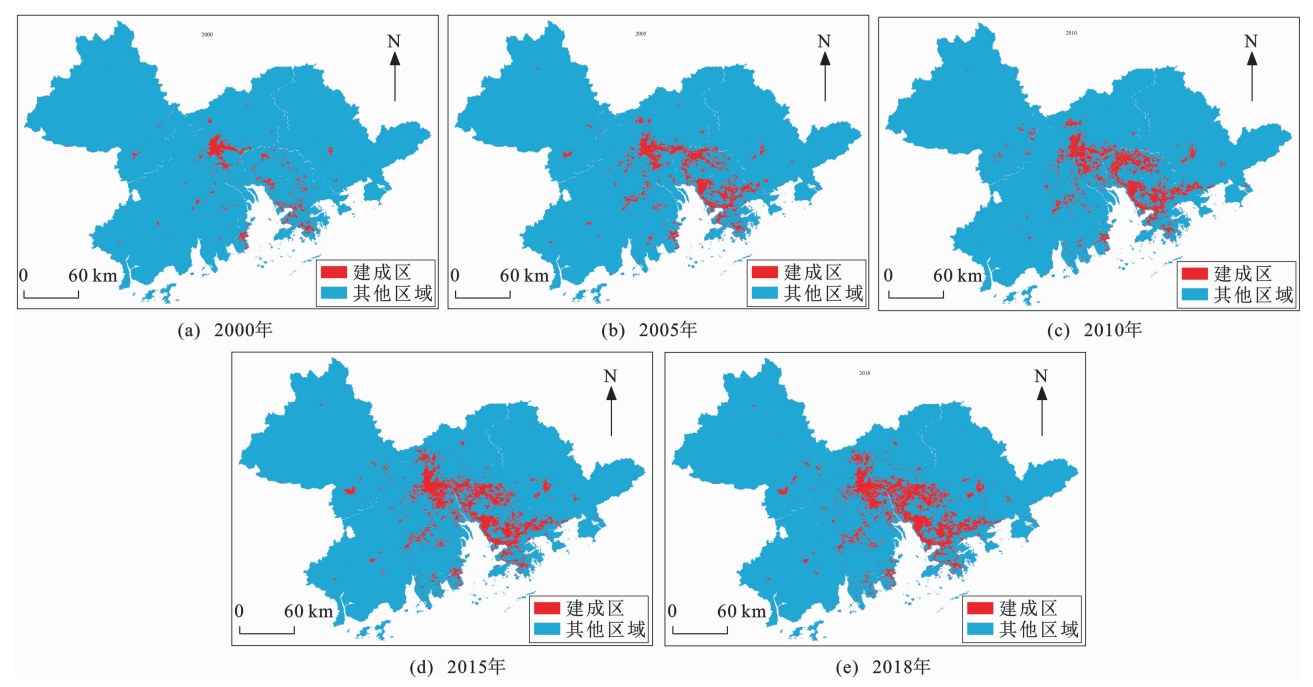


图 5 2000~2018 年城市建成区提取结果

Fig. 5 Maps of Extraction of Urban Built-up Areas from 2000 to 2018

2010~2018年东部建成区分布在原有基础上更加紧凑,联系更加紧密,西部城市出现了许多零散的建成区,并且这些零散的建成区逐渐相连。

图 6 为 2000~2018 年城市建成区提取结果叠加图。从图 6 可以看出,2000~2018 年粤港澳大湾区的东部与西部差距明显,东部建成区扩张明显高于西部。为了加强各城市间的联系,广州—佛山、深圳—香港核心城市建成区以东莞为桥梁形成了佛山—广州—东莞—深圳—香港核心城市建成区。2000~2005 年粤港澳大湾区的建成区扩张主要是粤港澳大湾区的东南方向,深圳和东莞的建成区扩张最为迅速,为广州和深圳建立更紧密联系奠定了基础,江门和中山建成区扩张主要发生在两市的交界处。2005~2010 年,东莞建成区扩张主要在广州和深圳的交界处,成为了两市联系的纽带;惠州建成区扩张在这一时期主要发生在与深圳的交界地带,加强了与深圳的联系。广州在 2000~2010 年主要发展南部区域和东部区域,2010~2018 年则主要向北部和西北部扩张。肇庆、珠海、澳门、香港在 2000~2018 年建成区则主要在原有基础上继续边缘式扩张;同时,佛山也在逐渐成为广州和中山—江门的桥梁,形成江门—中山—佛山—广州—东莞—深圳—香港大型城市群。

图 7 为 2000~2018 年城市建成区提取结果叠加图。从图 7 可以看出:粤港澳大湾区各城市 2000~2018 年建成区扩张的空间特征。佛山、广

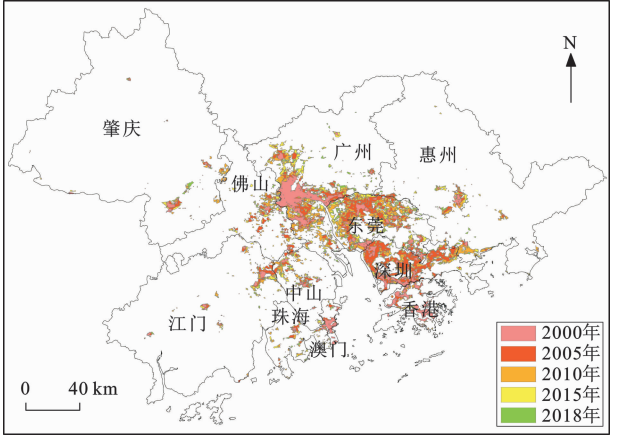


图 6 2000~2018 年城市建成区提取结果叠加图

Fig. 6 Overlay Map of Extraction of Urban Built-up Areas from 2000 to 2018

州、东莞、深圳、香港在 2000~2010 年快速扩张,并且建成区扩张主要发生在上述城市的交界地带,2010~2018 年则重点进行建成区内部优化,广州在 2015 年之后逐渐偏向西北方向扩张。江门、中山、珠海建成区在 2000~2018 年逐渐以中山为中心,建成区逐渐连片。惠州建成区扩张在 2000~2005 年主要发生在与深圳的交界地带以及主城区的西南方向,2005~2010 年建成区扩张在主城区附近以及主城区的西南和东部地区,2010~2018 年建成区则在原有基础上继续扩张。肇庆主要以主城区为基础向外扩张。澳门由于自身的地理条件限制,在 2000~2005 年建成区扩张后没有很大变化。

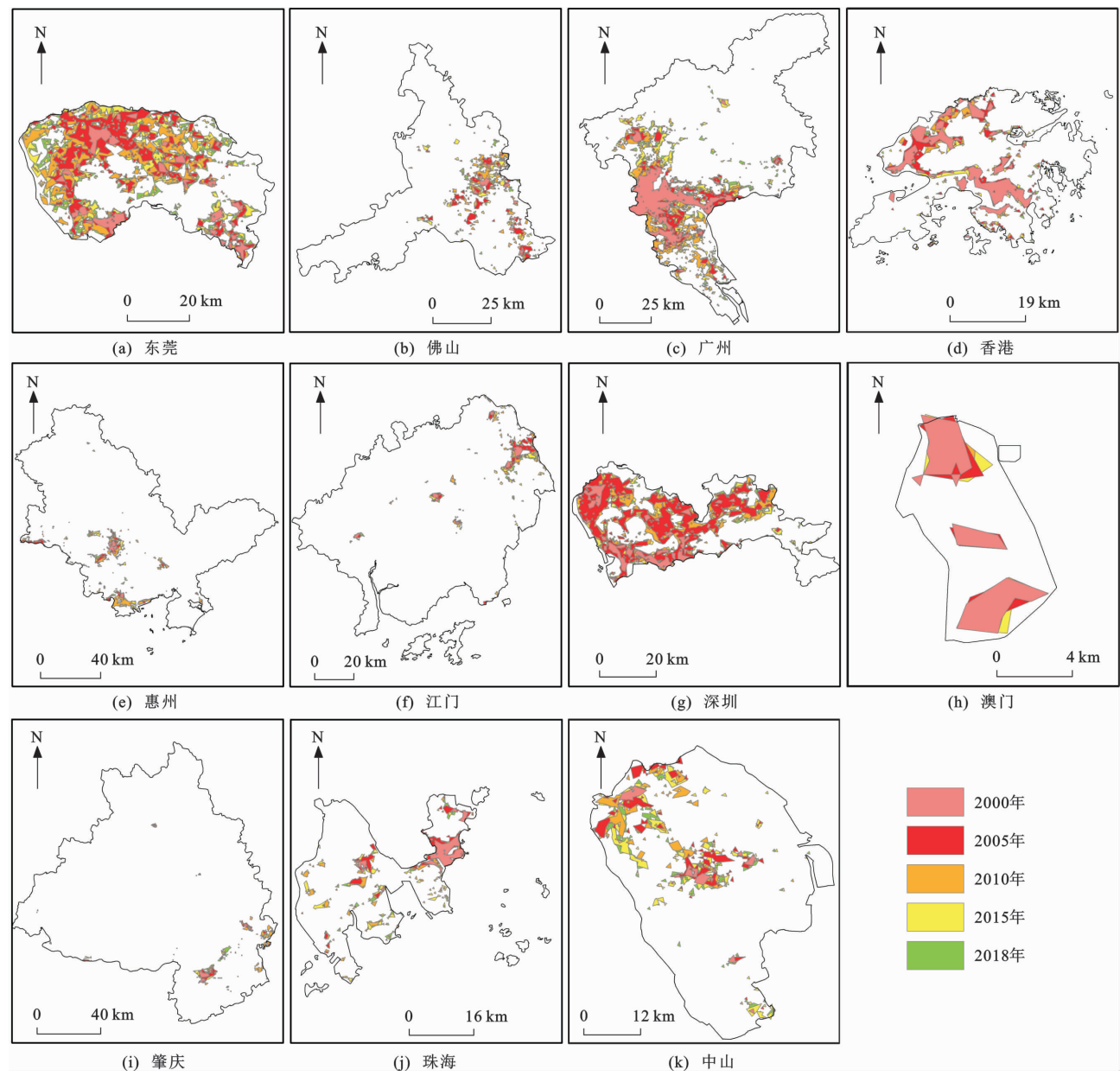


图 7 2000~2018 年 11 座城市建成区提取结果叠加图

Fig. 7 Overlay Maps of Extraction of Urban Built-up Areas of 11 Cities from 2000 to 2018

利用 ArcGIS 软件计算粤港澳大湾区的建成区重心偏移(图 8)。2000 年粤港澳大湾区的建成区重心在东莞,2000~2005 年重心向西北方向移动了 4.73 km,但并未离开东莞,这一时期东莞、深圳的建成区增长远高于其他地区。2005~2010 年建成区重心又再次向西北方向移动了 9.72 km,由东莞转移到了广州,2010~2015 年和 2015~2018 年分别向东南方向移动了 2.77 km 和 2.81 km,并未离开广州。

3 讨论

以往研究城市扩张大多是通过 DMSP-OLS 和

NPP-VIIRS 夜间灯光数据。由于 DMSP-OLS 和 NPP-VIIRS 夜间灯光数据来自不同的传感器,其空间分辨率和辐射分辨率都存在很大差异。虽然已有研究融合了 DMSP-OLS 和 NPP-VIIRS 夜间灯光数据,但仍不能完全解决两种数据的差异。类 NPP-VIIRS 夜间灯光数据主要是通过自编码器实现跨传感器校正 DMSP-OLS 和 NPP-VIIRS 夜间灯光数据,构建更长时间序列的夜间灯光数据集,且数据质量与 NPP-VIIRS 夜间灯光数据相一致,解决了上述问题<sup>[20-23]</sup>。关于夜间灯光数据的粤港澳大湾区城市扩张研究更多关注于大湾区整体或核心区域<sup>[24-25]</sup>。本研究通过类 NPP-VIIRS 夜间灯光数据



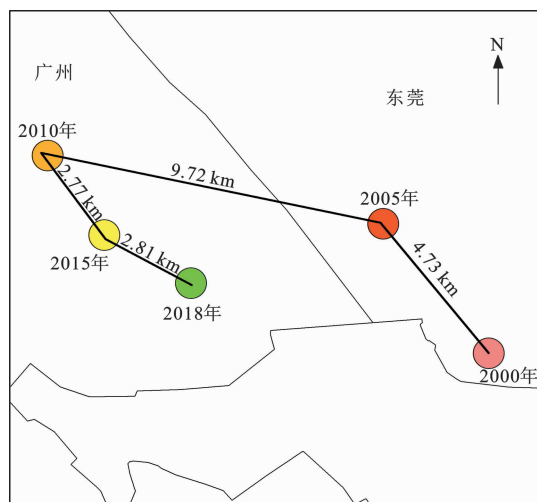


图8 2000~2018年城市建成区重心迁移示意图

Fig.8 Sketch Map of Gravity Center Shift of Urban Built-up Areas from 2000 to 2018

提取了粤港澳大湾区的各城市建成区,并且在空间和数量上对其进行验证,符合研究需要,可以为今后粤港澳大湾区城市建设提供一定的借鉴。本研究的部分成果与有关粤港澳大湾区建成区扩张研究成果<sup>[24-25]</sup>较为相似。

在建成区扩张的时空特征方面,本研究对粤港澳大湾区整体以及各城市建成区扩张的时空特征进行了全面分析,并探讨了粤港澳大湾区建成区重心的变化。研究表明:2000~2018年,粤港澳大湾区的建成区随着城镇化进程不断增加,并且着重发展东部沿海地区,在这期间各城市的建成区扩张主要发生在城市之间的交界地带,形成了佛山—广州—东莞—深圳—香港大型城市群;2000年中国加入世界贸易组织后,粤港澳大湾区作为中国对外经济开放的窗口,在全球生产、分工以及科技发展方面有了更多的机遇,这一时期经济的快速发展直接影响到城市建成区扩张,加之2004年《中华人民共和国土地管理法》的修正发布,使得房地产行业蓬勃发展,城市建成区的扩张速度进一步得到了提升,这与以往的研究<sup>[25-26]</sup>基本相近。粤港澳大湾区在2000~2018年建成区扩张速度整体呈下降趋势,扩张强度则是在2000~2015年呈下降趋势,2015~2018年又缓慢回升,以往的研究也有相似的结论<sup>[25-26]</sup>。综上所述,本研究可以为粤港澳大湾区以及各城市今后的城市空间规划与科学决策提供数据支撑。

2015年后,为了更好地实施“十三五”规划、《粤港澳大湾区发展规划纲要》,粤港澳大湾区城市建成区不再像之前“摊大饼”似的进行扩张。佛山—广州—东莞—深圳—香港以及珠海—澳门两个核心城

市区的建成区扩张速度与强度放缓,建成区扩张的重点由外延式、边缘式扩张转为了填充式扩张,对建成区的内部进行优化,未来这些城市应继续建成区内部的优化,提升已有建成区的价值,实现更高质量、更可持续的发展。西部地区城市应加快建成区建设;中山应发挥节点城市作用,将广州—佛山和珠海—澳门两个核心城市区连接,在未来形成澳门—珠海—中山—佛山—广州—东莞—深圳—香港大型城市群;惠州、江门和肇庆在原有建成区的基础上,重点发展与相邻城市交界地带的建设,更好地推进粤港澳大湾区城市一体化。粤港澳大湾区建城区的快速扩张使得更多的耕地、林地等转化为建设用地,植被覆盖的减少使得热岛效应进一步加剧,应在今后的发展中采取一定的国土资源规划措施,遏制城市建成区的无序扩张。在“绿水青山就是金山银山”理念指导下,粤港澳大湾区应积极推进城市绿化,保护城市边缘耕地、林地,构建生态屏障体系。

本研究仍存在以下不足:第一,类 NPP-VIIRS 夜间灯光数据空间分辨率为 500 m,无法对建成区内部细节进一步分析;第二,类 NPP-VIIRS 夜间灯光数据与真实 NPP-VIIRS 数据仍存在一定差距。因此,对类 NPP-VIIRS 夜间灯光数据进行优化是未来研究方向之一,同时夜间灯光数据提取城市建成区的方法也应进行提升。随着人工智能和深度学习的发展,运用相关算法训练得到城市建成区的识别模型,应是今后城市建成区提取研究的方向之一。

## 4 结 语

(1)通过对类 NPP-VIIRS 夜间灯光数据提取城市建成区,并在空间和数量两方面对其进行验证。结果表明:类 NPP-VIIRS 夜间灯光数据在克服 DMSP-OLS 与 NPP-VIIRS 夜间灯光数据两者差异的情况下,可以实现建成区的高精度提取,为城市长时间序列的时空变化监测提供新的数据基础。

(2)粤港澳大湾区在2000~2018年城市建成区面积不断增加,以广州、深圳、东莞建成区扩张尤为明显,但建成区扩张速度整体呈下降趋势,扩张强度则在2000~2015年呈下降趋势,2015~2018年又缓慢回升。城市用地空间越来越少是粤港澳大湾区建成区扩张下降的重要原因,2010~2018年建成区着重进行内部优化,城市群的内部交通设施不断完善。

(3)粤港澳大湾区城市建成区在2000~2018年随着城镇化进程不断增加,并且着重发展东部沿海

地区,建成区扩张主要发生在各城市之间的交界地带,逐步形成了佛山—广州—东莞—深圳—香港大型城市群核心建成区,西部地区零散的城市建成区逐渐相连。粤港澳大湾区城市建成区重心 2000~2018 年由东莞转移到广州。粤港澳大湾区在今后的城市发展中应鼓励东部城市带动西部城市发展,发挥中山的节点城市作用,在未来形成澳门—珠海—中山—佛山—广州—东莞—深圳—香港大型城市群,促进粤港澳大湾区一体化。

恰逢西安地质调查中心组建六十周年,特撰写此文表达我们的衷心祝贺!在长安大学地球科学与资源学院工作期间,我们长期在西北地区从事遥感、GIS 方面的研究,得到了西安地质调查中心遥感和地球化学室的大力支持和帮助。我目前所在的长安大学土地工程学院,与西安地质调查中心在土地领域的科学研究和人才培养等方面开展了很多富有成果的深入合作。祝愿西安地质调查中心在西北地区地质调查与科技创新中取得更大的成绩!

## 参考文献:

## References:

- [1] MORMILE D. China's Living Laboratory in Urbanization[J]. *Science*, 2008, 319: 740-743.
- [2] 杨 角. 中国绿色城镇化发展水平评价及实现路径研究[D]. 西安:西北大学, 2020.  
YANG Jiao. The Research on the Development Level Evaluation and Realization Path of Green Urbanization in China[D]. Xi'an: Northwest University, 2020.
- [3] 冯珊珊,樊风雷. 2006~2016 年粤港澳大湾区城市不透水面时空变化与驱动力分析[J]. *热带地理*, 2018, 38(4): 536-545.  
FENG Shan-shan, FAN Feng-lei. Spatial-temporal Changes of Impervious Surface in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area During 2006—2016[J]. *Tropical Geography*, 2018, 38(4): 536-545.
- [4] 何春阳,史培军,李景刚,等. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据和统计数据的中国大陆 20 世纪 90 年代城市化空间过程重建研究[J]. *科学通报*, 2006, 51(7): 856-861.  
HE Chun-yang, SHI Pei-jun, LI Jing-gang, et al. Restoring Urbanization Process in China in the 1990s by Using Non-radiance-calibrated DMSP/OLS Nighttime Light Imagery and Statistical Data[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(7): 856-861.
- [5] 谈明洪,吕昌河. 以建成区面积表征的中国城市规模分布[J]. *地理学报*, 2003, 58(2): 285-293.  
TAN Ming-hong, LV Chang-he. Distribution of China City Size Expressed by Urban Built-up Area[J]. *Acta*

- Geographica Sinica*, 2003, 58(2): 285-293.
- [6] 黄 昕,李家艺,杨 杰,等. Landsat 卫星观测下的 30 m 全球不透水面年度动态与城市扩张模式 (1972~2019) [J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(11): 1894-1906.  
HUANG Xin, LI Jia-yi, YANG Jie, et al. 30 m Global Impervious Surface Area Dynamics and Urban Expansion Pattern Observed by Landsat Satellites: From 1972 to 2019[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2021, 51(11): 1894-1906.
- [7] FRIMPONG B F, MOLKENTHIN F. Tracking Urban Expansion Using Random Forests for the Classification of Landsat Imagery (1986—2015) and Predicting Urban/Built-up Areas for 2025: A Study of the Kumasi Metropolis, Ghana[J]. *Land*, 2021, 10(1): 44.
- [8] TAUBENBOCK H, ESCH T, FELBIER A, et al. Monitoring Urbanization in Mega Cities from Space[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 117: 162-176.
- [9] XU T, MA T, ZHOU C H, et al. Characterizing Spatio-temporal Dynamics of Urbanization in China Using Time Series of DMSP/OLS Night Light Data[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(8): 7708-7731.
- [10] ELVIDGE C D, BAUGH K E, KIHN E A, et al. Mapping City Lights with Nighttime Data from the DMSP Operational Linescan System [J]. *Photogrammetry and Remote Sensing*, 1997, 63(6): 727-734.
- [11] 刘 源,李月臣. 基于夜间灯光数据的城市中心区域提取与分析:以重庆市主城区为例[J]. *中国资源综合利用*, 2019, 37(3): 160-164.  
LIU Yuan, LI Yue-chen. Urban Centers Extraction and Analysis Using Night Time Light Data: A Case Study of Main Urban Areas of Chongqing[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2019, 37(3): 160-164.
- [12] 刘权毅,詹庆明,李建松,等. 珞珈一号夜间灯光影像在建设用地区域提取中的应用:以武汉市为例[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(1): 30-39.  
LIU Quan-yi, ZHAN Qing-ming, LI Jian-song, et al. Extracting Built-up Areas Using Luojia-1A Nighttime Light Imageries in Wuhan, China[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(1): 30-39.
- [13] 余柏漠,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 Bai-mo, WANG Cong-xiao, GONG Wen-kang, et al. Nighttime Light Remote Sensing and Urban Studies: Data, Methods, Applications, and Prospects [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2021, 25(1): 342-364.

- [14] BAUER S E, WAGNER S E, BURCH J, et al. A Case-referent Study: Light at Night and Breast Cancer Risk in Georgia[J]. *International Journal of Health Geographics*, 2013, 12: 23-23.
- [15] 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: 889-906.
- [16] 王婷, 王鹏, 李雨鸿, 等. 辽宁省 NDVI 时空变化特征分析研究[J]. *环境科学与管理*, 2021, 46(1): 53-57.
- WANG Ting, WANG Peng, LI Yu-hong, et al. Temporal and Spatial Variation Analysis of NDVI in Liaoning Province[J]. *Environmental Science and Management*, 2021, 46(1): 53-57.
- [17] 王炜, 刘海新, 高叶鹏, 等. 基于地理探测器的太行山 NDVI 时空变化及其驱动力分析[J]. *江西农业学报*, 2021, 33(6): 98-104.
- WANG Wei, LIU Hai-xin, GAO Ye-peng, et al. Analysis of Spatiotemporal Changes and Driving Forces of NDVI in Taihang Mountain Based on Geographic Detector[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2021, 33(6): 98-104.
- [18] GUO W, LU D S, WU Y L, et al. Mapping Impervious Surface Distribution with Integration of SNNP VIIRS-DNB and MODIS NDVI Data[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(9): 12459-12477.
- [19] 陆永权, 洗宇阳, 刘桂林. 基于 1998~2017 年夜间灯光数据的粤港澳大湾区核心区城市建成区时空动态研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(9): 1147-1157.
- LU Yong-quan, XIAN Yu-yang, LIU Gui-lin. Spatial and Temporal Dynamics of Urban Build-up Area in the Core Area of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Based on Nighttime Lighting Data During 1998—2017[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(9): 1147-1157.
- [20] 郑莉莉, 邓楚雄, 王莹. 基于多源灯光数据的中原城市群城市扩张时空变化分析[J]. *河南大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(4): 401-411.
- ZHENG Li-li, DENG Chu-xiong, WANG Ying. Research on Spatial-temporal Changes of Urban Sprawl in Central Plains Urban Agglomeration Based on Multi-source Nighttime Light Data[J]. *Journal of Henan University (Natural Science)*, 2021, 51(4): 401-411.
- [21] 王彦开, 赵渺希, 荣丽华. 基于夜间灯光数据的呼包鄂城市群空间扩张特征及驱动力研究[J]. *地域研究与开发*, 2021, 40(3): 43-49.
- WANG Yan-kai, ZHAO Miao-xi, RONG Li-hua. Spatial Expansion Characteristics and Driving Forces of Hohhot-Baotou-Ordos Urban Agglomeration Based on Night Light Data[J]. *Areal Research and Development*, 2021, 40(3): 43-49.
- [22] 蓝斐芜, 付波霖, 何宏昌, 等. 基于多时相夜间灯光和光学遥感的广西城市格局时空动态变化[J]. *桂林理工大学学报*, 2021, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1375.n.20210304.1551.006.html>.
- LAN Fei-wu, FU Bo-lin, HE Hong-chang, et al. Spatiotemporal Dynamics of Urban Patterns in Guangxi Based on Multi-temporal Night-light and Optical Remote Sensing Data[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2021, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1375.n.20210304.1551.006.html>.
- [23] 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 He-song, LI Ren-jie, LI Jian-ming, et al. Study on Urban Spatiotemporal Expansion Pattern of Three First-class Urban Agglomerations in China Derived from Integrated DMSP-OLS and NPP-VIIRS Night-time Light Data[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2020, 22(5): 1161-1174.
- [24] 罗婧, 黄铁兰, 吴桂华, 等. 基于夜光遥感的粤港澳大湾区城市空间格局变化分析[J]. *智能城市*, 2020, 6(1): 1-3.
- LUO Jing, HUANG Tie-lan, WU Gui-hua, et al. Analysis of Urban Spatial Pattern Change in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Based on Luminous Remote Sensing[J]. *Intelligent City*, 2020, 6(1): 1-3.
- [25] 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 Hao-jian, LI Heng-kai, XIONG Yong-zhu, et al. Temporal-spatial Evolution of Urban Agglomeration in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area in Recent 20 Years[J]. *World Regional Studies*, 2020, 29(6): 1181-1189.
- [26] 卢吟咏. 粤港澳大湾区城市群建设用地演变特征与调控机制研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2019.
- LU Yin-yong. Expansion of Urban Agglomeration in Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area Based on Nighttime Light Data[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019.