

引用格式: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.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190711

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

董鹤松¹,李仁杰^{1,2,3*},李建明¹,李 帅¹

1. 河北师范大学资源与环境科学学院,石家庄 050024; 2. 河北省环境演变与生态建设实验室,石家庄 050024;
3. 河北省环境变化遥感识别技术创新中心,石家庄 050024

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

DONG Hesong¹, LI Renjie^{1,2,3*}, LI Jianming¹, LI Shuai¹

1. School of Resources and Environment Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 2. Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Shijiazhuang 050024, China; 3. Hebei Innovation Center of Remote Sensing Technology for Environmental Change, Shijiazhuang 050024, China

Abstract: This study took Beijing-Tianjin-Hebei, the Yangtze River Delta, and the Pearl River Delta as study areas. Based on correlation analysis of overlapping years in 2012 and 2013, a power function model was used to transform NPP-VIIRS NTL data(2012—2017) to simulate DMSP-OLS NTL data. We generated a temporally consistent NTL dataset of study areas from 1992 to 2017 (consisting of 1992—2013 DMSP-OLS NTL data and 2014—2017 NPP-VIIRS NTL data). By referring to the statistical data of urban built-up area, the optimal threshold of nighttime light was determined to extract urban scope. Based on this method, urban scope with insufficient economic vitality contained in the statistical data was effectively stripped off, while those low-grade, high-vitality urban areas that did not belong to the statistical scope were identified, which innovated the perspective of data application. Results show that: ① The contribution of county-level towns and cities of the municipal level to the economic vitality in three first-class urban agglomerations was different. The Beijing-Tianjin-Hebei had a vast hinterland, and county-level towns were an important part of the regional economic vitality. As a whole, they had the largest contribution in three first-class urban agglomerations. In the early 1990s, some county-level towns in the Yangtze River Delta had strong economic vitality. After 2005, it was lower than the Beijing-Tianjin-Hebei with the process of transforming county into urban district. Affected by the socioeconomic development and the division of administrative units, the contribution of county-level towns to the urban scope in the Pearl River Delta was always the smallest in three urban agglomerations. ② There were differences in the imbalanced characteristics of urban spatial expansion in three first-class urban agglomerations.

收稿日期:2019-11-23;修回日期:2019-12-06.

基金项目:国家自然科学基金项目(41471127);河北师范大学在读研究生创新能力培养资助项目(CXZZSS2019074)。

[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41471127; Graduate Student Innovation Ability Cultivation Support Project of Hebei Normal University, No.CXZZSS2019074.]

作者简介:董鹤松(1995—),男,河北承德人,硕士生,主要从事地理时空数据挖掘与分析研究。E-mail: dhs_gis@163.com

*通讯作者:李仁杰(1975—),男,河北石家庄人,教授,博士生导师,主要从事GIS与旅游地理研究。E-mail: lrjgis@hebtu.edu.cn

The urban spatial expansion of the Beijing-Tianjin-Hebei was led by Beijing and Tianjin, which has formed a "dual-core" model. It has not yet formed a sophisticated urban system. The Yangtze River Delta and the Pearl River Delta had obvious urban agglomeration characteristics and stronger equilibrium. The path, direction, and distance of center of gravity migration reflected the different expansion intensity and behavioral model in three first-class urban agglomerations; ③ On the whole, urban spatial expansion pattern presented the characteristics of continuously expanding hot-spot regions and shrinking cold-spot regions. Specifically, hot-spot regions and cold-spot regions were relatively stable in the Beijing-Tianjin-Hebei, and the hot-spot regions had a strong centripetal agglomeration effect. The spatial patterns of the Yangtze River Delta and the Pearl River Delta has changed greatly and the regional core cities had a stronger driving role.

Key words: Nighttime light data; data integration; three first-class urban agglomerations; built-up area; spatiotemporal pattern; intensity of spatial expansion; center of gravity index; hotspot analysis

***Corresponding author:** LI Renjie, E-mail: lrjgis@hebtu.edu.cn

摘要:通过拟合最优幂函数模型,将NPP-VIIRS影像模拟为DMSP-OLS影像,构建了京津冀、长江三角洲(简称长三角)和珠江三角洲(简称珠三角)三大城市群1992—2017年长时间序列夜间灯光影像集。参考城市建成区统计数据确定夜间灯光最佳阈值提取城市范围,有效剥离统计数据中包含的经济活力不足的城市空间,识别出不属于统计范围的低等级、高活力城镇区,创新了数据应用视角。研究表明:①县级城镇和市级以上城市对三大城市群城市范围的贡献度不同。京津冀腹地广阔,县级城镇是区域经济活力的重要组成部分,整体上贡献度最大;1990s初期长三角部分县级城镇经济活力较强,大量撤县设市后县级城镇数量减少,逐渐在2005年后低于京津冀;珠三角受到社会经济发展条件和行政单元划分的影响,县级城镇对城市范围的贡献在3个城市群中始终最小。②三大城市群城市扩展非均衡性特征存在差异。京津冀城市扩展为京、津主导下的“双核”模式,非均衡性显著,尚未形成完善的城市规模体系;长三角和珠三角城市集聚特征明显,均衡性更强。重心迁移的路径、方向和距离反映各城市群不同的扩展强度和作用模式。③城市空间扩展格局整体均呈现热点区不断扩大、冷点区不断缩小的特征。其中京津冀热点和冷点区相对稳定,热点区向心集聚作用较强;长三角和珠三角空间格局变化较大,区域核心城市带动作用较强。

关键词:夜间灯光数据;数据整合;三大城市群;建成区;时空格局;扩展强度;重心指数;热点分析

1 引言

城市空间扩展特征对衡量区域城市化水平、人口集聚状况具有指示作用,城市空间快速扩展也会导致人口与资源、环境之间的矛盾加剧。因此,城市空间的扩展过程和格局研究对理解区域发展状况和人地关系具有重要意义。中国城市群作为新型城镇化的空间主体,是未来经济发展格局中最具活力和潜力的核心地区^[1]。作为中国城市群发展的典型代表,京津冀、长三角和珠三角三大城市群空间扩展时空格局的研究,对于理解中国城市群的发展特征具有重要价值。

不同视角下的城市群与城市空间研究往往采用不同数据源。例如,经济统计数据用于城市群经济发展特征与产业结构的研究,采用专利数据库开展城市群的创新与合作研究^[2];使用Landsat等遥感数据识别城市或城市群空间边界与扩展特征^[3-4];聚焦城市人本特征,精细刻画城市内部特征时,除高

分辨率光学遥感数据外,多源社会感知大数据^[5]被用于识别城市空间功能和主题语义^[6-7]、评价城市空间感知^[8]、评估城市活力等^[9]。

传统土地利用遥感获得的城市建成区仅从地表覆盖类型变化反映城市的扩展特征,无法反映城市实际功能和活力水平。夜间灯光数据和POI等均能有效指示人类活动特征,在城市空间的研究中开始广泛应用。综合利用夜间灯光、POI和社交媒体数据拟合的自然城市规模与政府统计数据差异明显,特别是城市功能的发展落后于城市形态发展速度^[10]。将夜间灯光、POI和社会经济统计数据结合,能突破行政边界限制,客观反映城市群辐射范围和内部社会经济联系强度^[11]。利用POI与夜间灯光数据提取的城市群边界面积接近,可以相互验证^[12]。

综上所述,在城市群空间扩展研究中,Landsat以及更高分辨率日间遥感数据适合刻画建成区形态,新型社会感知大数据则适用于反映城市实际发展程度和活力。POI等移动定位数据具有丰富的语

义,但用于城市空间研究只能追溯近10年左右的时间序列。夜间灯光数据与国民生产总值、人口分布、电力消耗等人类社会经济活动具有较高相关性^[13],开展10年以上时间跨度的城市群城市功能和活力的过程研究,夜间灯光数据是较好地选择。Croft等^[14-15]最早提出利用夜间灯光数据提取城市区域的想法;Henderson等^[16-18]通过设置动态阈值方法实现了全球范围夜光遥感城市制图;陈晋等^[19]、何春阳等^[20]最早将夜光遥感用于中国城市化过程研究。目前,基于夜间灯光数据研究城市及城市群空间演化逐渐在学术界成为共识^[21],涌现出针对京津冀、长三角、珠三角等城市群的丰富中国案例研究^[22-24]。

美国DMSP-OLS与NPP-VIIRS是目前应用最广泛的2种夜光遥感数据,其中DMSP-OLS空间分辨率约为1 km,存档数据丰富,但2013年已停止更新;NPP-VIIRS影像空间分辨率达到500 m,存档时间为2012年4月至今。另外,中国发布的珞珈一号夜光遥感卫星已经提供数据共享,空间分辨率达到130 m,但存档时间仅1年左右。因此,如果城市空间扩展研究中需要同时关注长时间序列和实效性,有效整合DMSP-OLS和NPP-VIIRS数据成为重要途径。Li等^[25]在评估叙利亚战争对城市夜间灯光的影响时,利用幂函数实现2种数据的整合研究;后续研究中,又有学者尝试使用地理加权回归^[26]、机器学习算法^[27]等构建2种数据重叠期像元DN值间的关系模型整合2种夜间灯光数据。

由于DMSP-OLS与NPP-VIIRS 2种灯光数据的数值差异,以及不同区域城市发展的多样性和空间非均衡性,直接应用已经发布的整合2种灯光数据的模拟数据集开展不同城市群的对比研究具有较大不确定性,需要根据区域特征和研究目的建立合适的拟合函数。因此,使用整合后的长时间夜间灯光数据开展城市群空间扩展的对比研究较少。

本文以京津冀、长三角和珠三角三大城市群为研究区,建立NPP-VIIRS影像模拟为DMSP-OLS影像的函数,形成研究区1992—2017年长时间跨度、具有可比性的整合数据集。选取1992、1995、2000、2005、2010、2015和2017年7期数据为研究时间节点,探究三大城市群空间扩展演变的过程与格局,以期从新的视角认识三大城市群发展特点,为区域发展政策制定提供参考。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

本文的研究区为京津冀、长三角和珠三角三大城市群。京津冀城市群包括北京、天津以及河北的石家庄、保定等13个城市;长三角城市群包括上海和安徽、浙江、江苏三省的26个城市;珠三角城市群包括广东的广州、深圳、珠海、东莞等9个城市。改革开放以来,凭借着优越的地理位置和国家政策支持,三大城市群已发展为中国综合实力最强的三大区域,是引领中国经济发展的重要力量。2017年,三大城市群人口占全国比重约为23%,经济份额占全国总量超过40%。鉴此,从夜间灯光视角出发分析1990s以来三大城市群空间扩展的时空格局对于认识城市群的发展规律具有重要的理论和实践意义。

2.2 数据来源

2.2.1 夜间灯光数据

夜间灯光数据使用第4版DMSP-OLS稳定灯光影像集和NPP-VIIRS月度影像,时间跨度分别为1992—2013年、2012—2017年。DMSP-OLS影像空间分辨率约1 km,没有进行在轨辐射校正^[28],像元仅以灰度值标度灯光强度,范围是[0, 63]。NPP-VIIRS影像空间分辨率约500 m,具有更强的探测能力,能探测到地球表层细微的反射光;为反映各年份已完成城市建设,本文选取各年12月影像代表该年份数据。

NPP-VIIRS与DMSP-OLS影像属性信息存在较大差异:①2种影像存在时间分辨率、空间分辨率和光谱分辨率的属性差异。②2种影像自身存在缺陷:DMSP-OLS影像集共由六代卫星获取,影像间的连续性不强,而且影像DN值最大为63,在发达城市中心区域存在灯光饱和效应;NPP-VIIRS影像的低值探测能力导致数据集存在偶然噪声。在整合2种影像时需要综合考虑上述问题,以取得最优拟合效果。

2.2.2 基础数据与统计数据

基础地理数据来源于全国地理信息资源目录服务系统(<http://www.webmap.cn>),比例尺为1:100万,整体现势性为2017年;城市建成区面积数据来源于对应年份的《中国城市统计年鉴》^[29],个别城市统计数值的缺失根据同一省份相邻地区建成区面积与区域夜间灯光DN总值的线性相关模型计算得到。

3 研究方法

3.1 DMSP-OLS与NPP-VIIRS影像整合方法

根据DMSP-OLS与NPP-VIIRS影像的属性差异和特点,设计如下整合方案:①统一空间分辨率和投影变换等影像预处理;②基于不变目标区域法的影像校正和降噪处理;③基于2种影像重叠年份的DN值相关性^[26-27],建立NPP-VIIRS拟合DMSP-OLS影像的最优函数关系,构建长时间序列夜间灯光影像集。

3.1.1 2种影像的数据预处理

考虑到3个城市群的地理区位和空间形状特征,将2种影像均投影到Albers等面积投影坐标系。然后,使用最近邻法将影像重采样为1 km×1 km空间分辨率,并调整2种影像的像元偏差,使2种影像达到空间匹配。最后,使用行政边界数据裁剪得到各期研究区影像。

3.1.2 2种影像的数据校正处理

选用不变目标区域法对DMSP-OLS影像进行相互校正。已有研究多选择发展稳定、灯光强度变化小的区域作为不变目标区域,以固定年份影像校正其他年份影像,这种方法在校正时间跨度大的影像时会受标准城市发展的影响,削弱城市灯光的年度变化。因此,本文使用基于标准传感器的校正方法^[30],以城市发展相对稳定的黑龙江省鸡西市作为不变区域,选用各传感器影像中累计DN值较高的F16传感器为标准传感器,建立一元二次回归模型:

$$DN_{\text{adjusted}} = a \times DN^2 + b \times DN + c \quad (1)$$

式中: DN 、 DN_{adjusted} 分别表示校正前后的影像DN值, a 、 b 表示回归系数, c 为常数项。首先以F16传感器影像为参考数据集,使用F16和F15传感器2004—2007年重合年份的鸡西市影像数据集,建立一元二次回归模型,利用该回归模型校正F15传感器中所有年份影像;然后,使用相同方法,以校正后的F15传感器影像为参考数据集校正F14传感器影像,依次类推完成各传感器影像相互校正,消除影像饱和效应。各传感器之间的校正参数见表1。

根据中国城市化发展持续性的基本特点,正常情况下,前一年传感器探测到的灯光不会在后一年消失,即影像DN值应随时间推移保持不变或逐渐增大;若出现像元值减小或降低为零的情况,可将其定义为异常像元。基于上述假设,以1992年DMSP-OLS影像为基准,使用栅格计算方法按照式(2)动态

表1 基于传感器的影像相互校正回归模型系数

Tab. 1 Regression model coefficients for images mutual correction based on sensors

数据集	a	b	c	R
F16→F15	-0.001 447	1.091	0.913	0.9309
F15→F14	-0.003 202	1.093	1.766	0.8646
F14→F12	0.003 413	0.628	2.717	0.9564
F12→F10	0.001 906	0.832	0.886	0.9171
F16→F18	0.004 262	0.673	0.766	0.8955

调整1993—2013年影像DN值。同时,为保持影像原来的值域,将DN值大于63的像元赋值为63。

$$DN_{n-1} = \begin{cases} DN_n & DN_{n-1} > DN_n \\ DN_{n-1} & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

对NPP-VIIRS影像降噪处理。本文根据Zhao等^[27]的研究成果,以0.3为经验阈值,去除NPP-VIIRS影像中的微小灯光,同时将DN值的负值像元赋值为0;以每期影像中北京、上海、广州3个首位城市的影像最大DN值为阈值,过滤掉偶然出现的异常极大值^[31]。

3.1.3 2种影像的数据整合

相关研究发现,DMSP-OLS与NPP-VIIRS影像在城市和乡村具有相似的灯光强度和分布模式^[25]。本研究利用2种影像在2012年和2013年的重叠影像,进行DN值相关分析,探索二者之间可能存在的相关关系,实现将NPP-VIIRS模拟为DMSP-OLS影像的操作。

(1)考虑到DMSP-OLS影像的饱和效应,以0~50 DN值范围为掩膜,统计DMSP-OLS影像每个DN值分布区域对应的NPP-VIIRS影像像元均值,对获得的96组DN值分别进行对数、线性、指数、幂函数以及二次多项式函数的相关分析。对比各函数拟合效果发现,幂函数模型的相关系数最高,2个年份 R^2 均大于0.9(图1),而且幂函数因变量随自变量增加而增大的趋势符合夜间灯光变化基本规律,满足研究需要。由于2012年幂函数 R^2 更高,标准误差更小,因此使用2012年拟合方程校正2012—2017年NPP-VIIRS影像,计算公式为:

$$Y = 18.34 \times X^{0.53} - 1.65 \quad (3)$$

式中: X 表示原始NPP-VIIRS影像DN值; Y 表示模拟后影像DN值。

(2)幂函数校正后的影像依然存在部分微弱灯光噪声,因此,采用高斯低通滤波模型进行窗口为13×13的高斯低通滤波,进一步对影像做降噪处理。

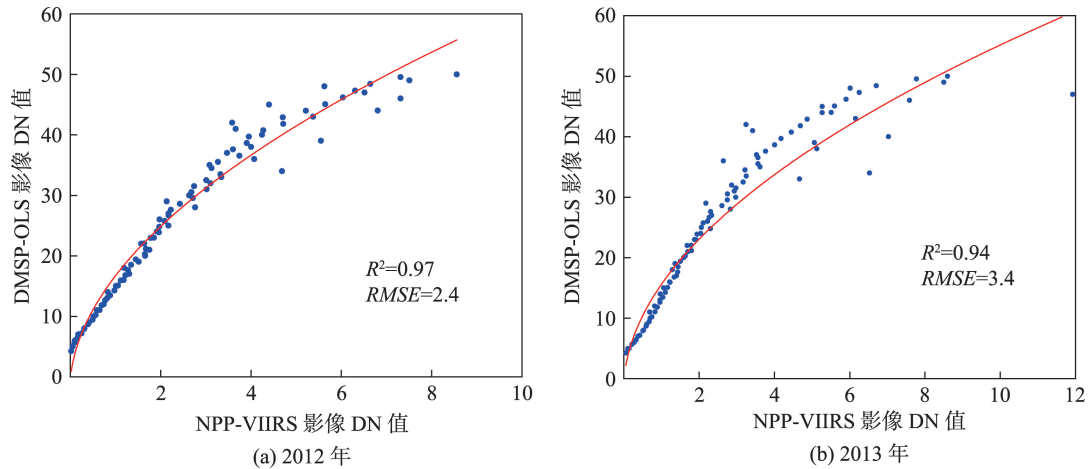


图1 2012年和2013年DMSP-OLS与NPP-VIIRS影像中对应区域DN均值的幂函数关系

Fig. 1 The power function relation between DMSP-OLS and average DN values in corresponding region of NPP-VIIRS for 2012, 2013

(3)以2013年DMSP-OLS影像为基准,使用式(2)对幂函数校正和滤波处理后的2014—2017年NPP-VIIRS影像进行时间序列校正。为保证像元值域统一,将校正后的NPP-VIIRS影像大于63的DN值赋值为63。

经过上述数据处理流程,整合形成了研究区1992—2017年长时序的夜间灯光影像总集。

3.2 城市空间范围提取及意义解读

政府统计部门每年发布城市建成区数据,指示区域内已成片开发建设、市政公用、公共设施基本具备的地区^[32]。已有研究证明,基于统计数据的空间比较法提取城市空间范围具有较高精确度,提取结果与行政管理部门认定的城市范围具有较高一致性^[33]。该方法按照二分法思路动态调整夜间灯光阈值,并将不同阈值提取的城市范围大小与统计值比较,寻找误差最小的阈值作为提取该城市该年份城市范围的最佳阈值。本研究采用基于统计数据的空间比较法确定提取城市范围的夜间灯光最佳阈值,获得三大城市群7个研究年份的城市空间范围。

需要明确的是,基于夜间灯光最佳阈值提取的城市范围,仅仅保证了与建成区统计数据的最佳耦合效果,但不能保证提取的空间形态与日间遥感影像提取的建成区保持最佳拟合。上述特征主要源于2种原因:①城市建成区的经济发展活力不均性,城乡过渡带的新建城区往往经济活动较弱,导致灯光强度低于阈值;②部分县级城镇,虽然统计部门未列入城市统计范围,但较高的发展活力表现出较强的灯光,超过设定阈值后被识别为城市区域。

因此,基于夜间灯光的城市范围提取结果,不仅能够在较大空间尺度上反映城市群发展的活力及其空间异质性特征,而且,可以有效剥离统计数据中城市经济活力不足的部分,并识别对应的非统计范围内高活力、低等级的城镇区域。这一结果,对于理解不同级别城市对城市群整体发展活力的贡献具有很好地指示作用,也能够更准确地识别不同城市群内部发展不均衡性的空间模式与特征,对于城市群发展具有参考意义。

3.3 城市空间扩展分析方法

(1) 扩展强度

城市扩展强度是一定时间跨度内城市空间范围的增长量占区域土地总面积的比重,能直观反映各空间单元城市空间发展速度,并适用于不同区域之间的比较。计算公式为:

$$EI = \frac{UL_{(t+\Delta t)} - UL_{(t)}}{TL \times \Delta t} \times 100 \quad (4)$$

式中: EI 表示城市空间扩展强度; $UL_{(t+\Delta t)}$ 和 $UL_{(t)}$ 分别表示年份 $(t+\Delta t)$ 和年份 t 的城市面积; Δt 为研究的时间跨度, TL 表示区域土地总面积。

(2) 重心指数

引入该指标判断各城市群全部城市斑块的空间重心分布及其时间演变趋势,有助于深入理解不同城市群内城市整体空间扩展的时空模式。

$$\bar{X}_\omega = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i x_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}, \quad \bar{Y}_\omega = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i y_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (5)$$

式中： (\bar{X}_o, \bar{Y}_o) 表示城市群重心； ω_i 表示各城市斑块空间权重； (x_i, y_i) 表示各城市斑块空间坐标。

(3) 热点分析(Getis-Ord G_i^*)

热点分析可探测城市扩展空间是否存在热点区和冷点区^[34],计算公式如下:

$$Z(G_i^*) = \frac{\sum_j W_{ij}(d)x_j}{\sum_j x_j} \quad (6)$$

对 $G_i^*(d)$ 计算结果作标准化处理:

$$Z(G_i^*) = [G_i^* - E(G)] / \sqrt{\text{Var}(G_i^*)} \quad (7)$$

式中： $W_{ij}(d)$ 为*i*和*j*城市的连接矩阵； x_i 和 x_j 分别指城市*i*和城市*j*的城市增长面积； $E(G)$ 和 $\text{Var}(G_i^*)$ 分别为 G_i^* 的数学期望和变异系数；若 $Z(G_i^*)$ 为正且通过显著性检验,表明位置*i*周围的价值相对较高,属于空间高值集聚(热点区),若 $Z(G_i^*)$ 为负且通过显著性检验,表明位置*i*周围的价值相对较低,属于空间低值集聚(冷点区)。

4 结果与分析

4.1 DMSP-OLS 与 NPP-VIIRS 影像整合结果评价

通过比较 NPP-VIIRS 影像模拟的 DMSP-OLS 影像与原始 DMSP-OLS 影像的相关程度,评估 2 种数据整合结果的精度和效果。3 个城市群部分区域影像 DN 值可视化如图 2 所示, NPP-VIIRS 影像模拟结果去除了大量零散低值灯光,削弱了建筑设施

间的灯光变化,使其与原始 DMSP-OLS 具有相似的影像特征和较高的空间分布一致性。一般来说,城市区域灯光值通常大于 30, DN 值小于 30 的区域是人类活动强度较小的区域,不会对城市范围提取结果产生较大影响^[35]。因此,选取 NPP-VIIRS 模拟影像 DN 值大于 30 的部分作为待评价区域,与原始 DMSP-OLS 影像对应区域 DN 值进行相关分析。选取 Pearson 相关系数(*r*)与标准误差(*RMSE*)定量计算影像 DN 值之间的相关关系(表 2)。

表 2 NPP-VIIRS 影像模拟前后与 DMSP-OLS 影像的相关分析

Tab. 2 Correlation analysis between DMSP-OLS and NPP-VIIRS

年份	校正前		校正后	
	<i>r</i>	<i>RMSE</i>	<i>r</i>	<i>RMSE</i>
2012	0.66	18.8	0.88	5.3
2013	0.67	18.1	0.85	6.1

相对于原始 NPP-VIIRS 影像,模拟 DMSP-OLS 与原始 DMSP-OLS 影像的相关性明显增强,标准误差明显下降。2012、2013 年 2 期模拟 DMSP-OLS 影像与原始 DMSP-OLS 影像的 Pearson 相关系数(*r*)分别达到 0.88 和 0.85,标准误差(*RMSE*)仅为 5.3 和 6.1。将 2012 年数据拟合的幂函数模型应用于 2013 年 NPP-VIIRS 影像,仍得到高质量模拟影像,因此 2 种数据整合的结果对城市空间扩展研究具有可行性。经过校

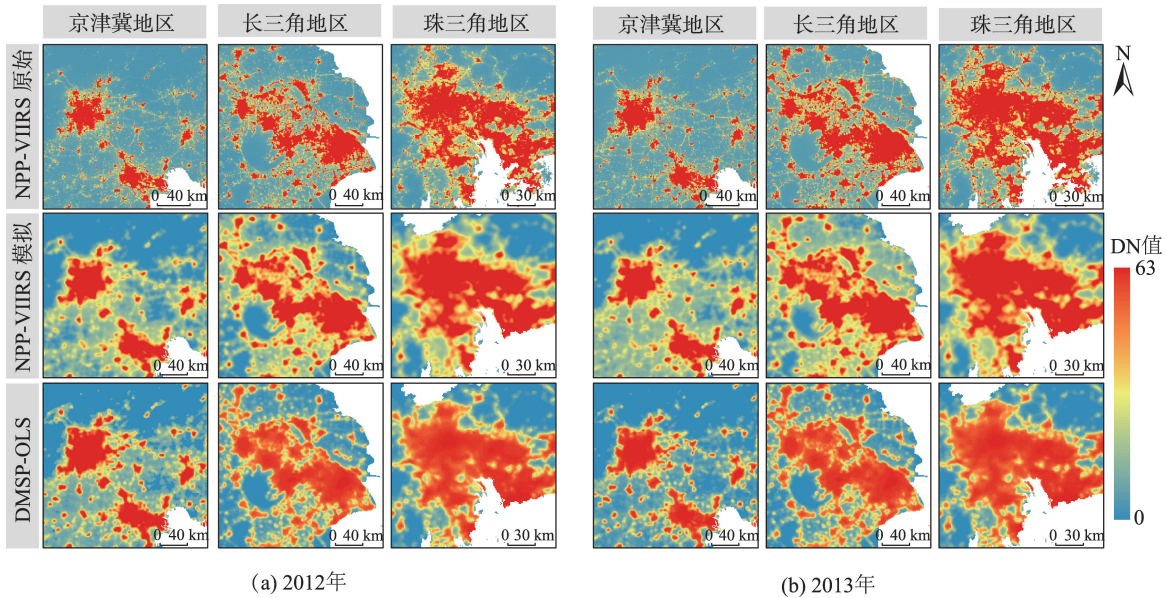


图 2 2012 年和 2013 年三大城市群典型区域 NPP-VIIRS 原始、NPP-VIIRS 模拟和 DMSP-OLS 影像对比
Fig. 2 Spatial pattern of DMSP-OLS and NPP-VIIRS simulated data for part of the Beijing-Tianjin-Hebei, part of the Yangtze River Delta, part of the Pearl River Delta in 2012, 2013

正、模拟形成的各年份夜间灯光影像如图3所示。

4.2 三大城市群城市扩展范围提取结果

4.2.1 城市范围提取结果的意义解读

本研究利用统计数据空间比较法确定夜间灯光最佳阈值提取城市范围,提取结果最大程度的耦合了政府发布城市建成区统计结果,不包括县级及以下的城镇。在不考虑提取结果是否位于行政管理设定的城市行政区范围情况下,基于2种数据整合

结果提取的三大城市群城市范围,与统计数据的总体偏差为4.28%。不同发展阶段的的城市扩展范围如图4所示。被识别为城市范围的斑块主要分布在行政定义城市的市辖区,但也有部分灯光强度超过阈值的城乡过渡带或县级城镇被识别为城市图斑。

从夜间灯光的数据特征看,基于灯光数据提取城市范围更多体现区域经济活力,与城市建成区具有较高一致性但也存在一定差异。已有基于POI和夜间灯光的实证研究也发现这一现象。从确定

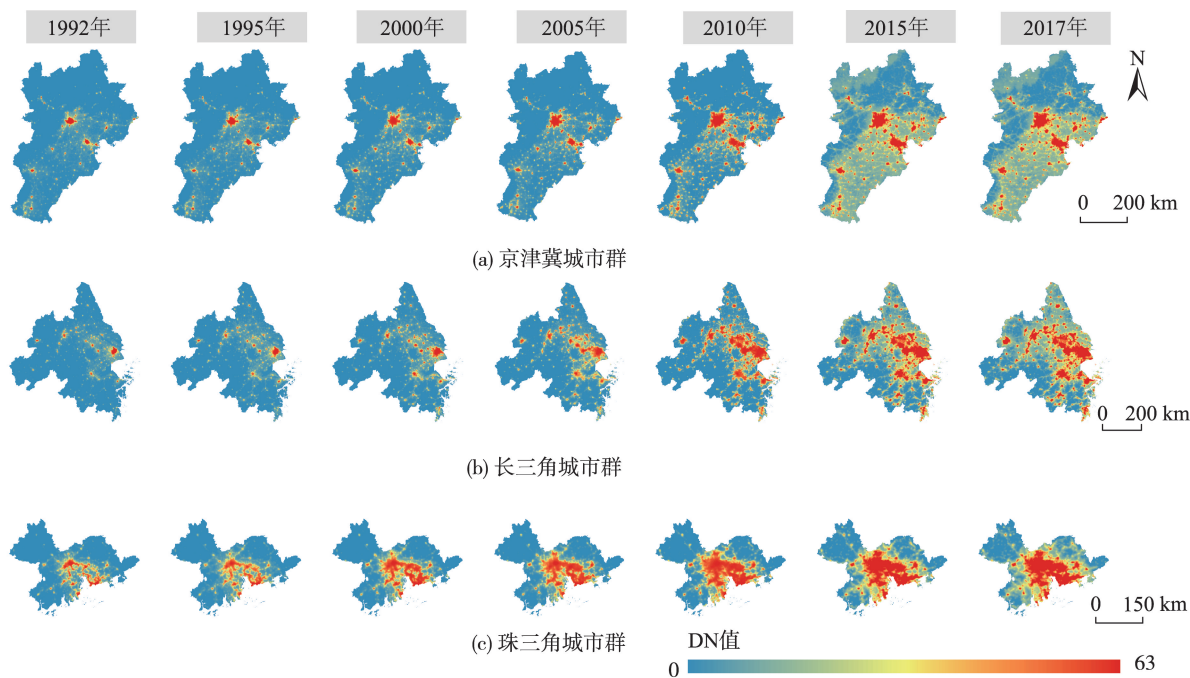


图3 1992—2017年校正、模拟后的各研究年份三大城市群夜间灯光影像

Fig. 3 Corrected and simulated nighttime light images in three first-class urban agglomerations from 1992 to 2017

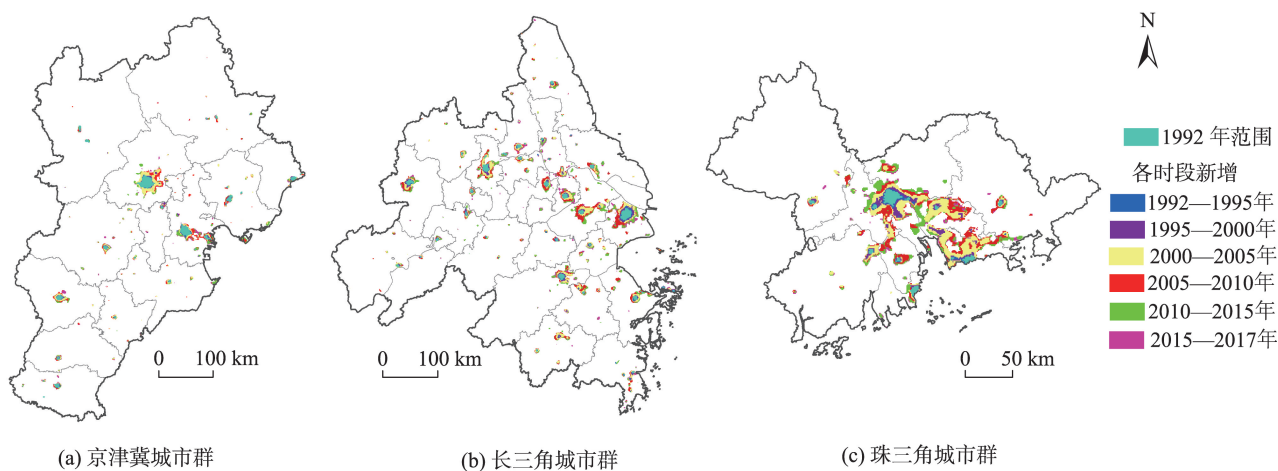


图4 1992—2017年三大城市群城市建成区提取结果

Fig. 4 Urban built-up area extraction results in three first-class urban agglomerations from 1992 to 2017

灯光提取阈值的方法原理看,不同的阈值参数的提取结果,其城市范围的意义不同。基于包括县级城镇的城市统计数据调整阈值,提取结果将包括经济活力较强、规模较大的县级及乡镇级的城镇,例如王利伟等^[34]针对转型期京津冀城市群空间扩展格局的研究成果。但受限于数据空间分辨率,规模较小的城镇将被忽略或存在较大的误差。

根据本研究确定的灯光阈值,夜间灯光数据提取的城市范围拟合目标是不含县级城镇的城市统计规模。因此,行政定义的城市中,部分经济活力不足的区域,因夜间灯光强度达不到阈值将不能被识别为城市,而部分经济活力较强的县级城镇反而达到提取的灯光阈值,则被识别为城市区域。

4.2.2 县级以下城镇对三大城市群城市范围的贡献分析

将灯光数据提取结果按照地市级统计单元,选择2种方式进行统计对比:①各地市统计包括所有县级以上行政区的灯光数据提取结果,这种方式寻求与统计数据的数值结果尽量一致;②各地市仅统计行政级别为市及以上行政区内的灯光数据提取结果,作为提取的城市范围,这种方式寻求与统计数据的统计单元保持一致。2种汇总方式与政府发布的统计年鉴数据比较的差异如表3所示。

如果寻求与统计数值结果的耦合性,按第一种方式统计结果分析。3个城市群的提取结果总体高于统计数据,总偏差为4.28%,整体偏差不大。其中,珠三角城市群提取的总体差值为6.59%,偏差最大,长三角差值为4.42%,京津冀差值最小,约为1.8%。结合研究区夜间灯光影像和社会经济发展状况分析,由于长三角和珠三角城市群经济发展水

平高,城市灯光强度大,影像饱和效应也最显著,在提取阈值时,提取出多数存在饱和效应的像元,导致实际提取面积稍高于统计数值;而京津冀城市群除北京、天津二大核心城市外,其余城市夜间灯光饱和效应相对较弱,使用阈值提取建成区时干扰小,提取误差也相对较小。

如果寻求与统计单元的一致性,应按第二种方式统计结果进行分析。3个城市群市级以上城市范围的提取结果总体低于全部的提取范围,总偏差约为2.76%,表中偏差为负值说明县级以下城镇被识别为城市的比重。京津冀、长三角和珠三角城市群县级城镇对城市范围的总体贡献率分别为4.07%、3.43%和0.31%,地域间差异显著,且不同时段差异明显。其中京津冀城市群腹地广阔,县级城镇是区域经济活力的重要组成部分,因而整体上对城市范围的贡献率最大,尽管县级城镇的贡献率在1992—1995有所下降,但之后呈持续增加的趋势;长三角城市群城市数量众多,县级城镇对城市范围的贡献率在1992和1995年分别为1.54%和1.83%,在3个城市群中最高,说明1990s初期长三角城市群部分县级城镇经济活力较强,但在2000年前后江苏、浙江和安徽大量撤县设市,使县级城镇数量减少,对城市范围贡献率增长较慢,在2005年后持续增加,但相对低于京津冀城市群;而受到社会经济发展条件和行政单元划分等因素的影响,珠三角城市群腹地较小,城市范围多分布在广州、东莞、佛山、深圳等珠江入海口处,空间聚集效应明显,县级城镇对城市范围的贡献在3个城市群中始终最小,同时在推动区域一体化的背景下也存在撤县设市或撤县设区的现象,虽然县级城镇对城市范围的贡献度表

表3 夜间灯光拟合城市空间规模与统计数据差值

Tab. 3 Urban scale and extraction error from integrated nighttime light data

(km², km², %, km², %)

年份	京津冀城市群					长三角城市群					珠三角城市群				
	统计	全部	差值	仅市	差值	统计	全部	差值	仅市	差值	统计	全部	差值	仅市	差值
1992	1389	1402	0.94	1390	-0.86	1398	1427	2.07	1405	-1.54	464	466	0.43	466	0.00
1995	1452	1464	0.83	1452	-0.82	1576	1643	4.25	1613	-1.83	543	617	13.63	617	0.00
2000	1582	1560	-1.39	1537	-1.47	2166	2174	0.37	2147	-1.24	1073	1086	1.21	1085	-0.09
2005	3032	3046	0.46	2956	-2.95	4959	5008	0.99	4859	-2.98	3111	3119	0.26	3118	-0.03
2010	3564	3770	5.78	3624	-3.87	6897	7225	4.76	6957	-3.71	4236	4532	6.99	4502	-0.66
2015	4231	4254	0.54	4039	-5.05	8096	8329	2.88	8006	-3.88	4809	5243	9.02	5238	-0.10
2017	4653	4765	2.41	4438	-6.86	8777	9560	8.92	9167	-4.11	5068	5514	8.80	5488	-0.47
合计	19 903	20 261	1.80	19 436	-4.07	33 869	35 366	4.42	34 154	-3.43	19 304	20 577	6.59	20 514	-0.31

注:“全部”,表示统计城市群中所有灯光数据识别的城市;“仅市”,表示只统计城市群中属于市级及以上的行政区内灯光数据识别的城市。

现出上升趋势,但依然保持在较低水平上。

4.3 三大城市群城市空间扩展时空演变

20世纪90年代后,中国社会经济进入快速增长期,三大城市群依托区位优势和政策支持,集聚大量优质产业要素,成为城市空间增长最显著的区域,城市规模不断扩大,夜间灯光亮度显著增加,城市人类活动更加活跃。根据中国城市化进程和夜间灯光数据提取结果的特征,将三大城市群的时空扩展分为3个阶段:1992—2000年低速增长阶段;2000—2010年高速扩展阶段;2010—2017年“新常态”平稳扩展阶段。

4.3.1 城市规模与扩展强度

如图5所示,1992—2017年,3个城市群的地级以上城市规模整体显著扩大,增幅明显。长三角城市群成为规模最大的城市群,规模由1427 km²增长到9560 km²,增幅达570%;珠三角城市群规模排第二位,由466 km²增长到5514 km²,增幅达1083%;京津冀城市群由1402 km²增长到4765 km²,增幅240%,增幅较小,2017年的规模也最小。总体来看,长三角在2000年以后基本保持了稳定的规模增速,珠三角和京津冀则是先在2000—2005年呈现高速规模增长,之后增幅回落,呈现稳定规模增加模式;2005年后珠三角城市群地市以上城市的规模超过了京津冀城市群。

图6显示,1992—2000阶段,中国处于计划经济向市场经济的转型期,政策影响下的城市化驱动力没有完全激发,城市空间扩展强度较低^[6],3个城市群的增长规模和扩展强度也整体较低。2000—2010年,工业化带动城市化迅速发展,城市建设用地高速

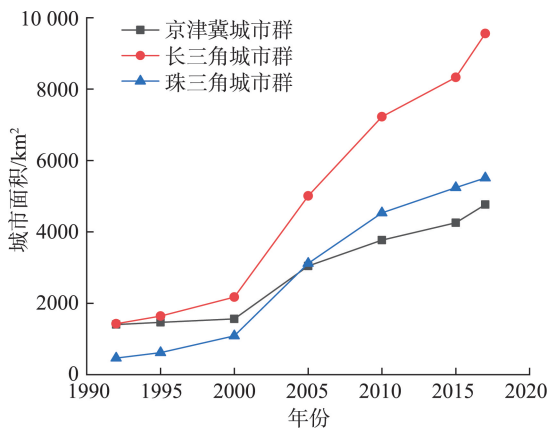


图5 1992—2017年三大城市群空间扩展规模变化
Fig. 5 Changes in urban spatial expansion scale of three first-class urban agglomerations from 1992 to 2017

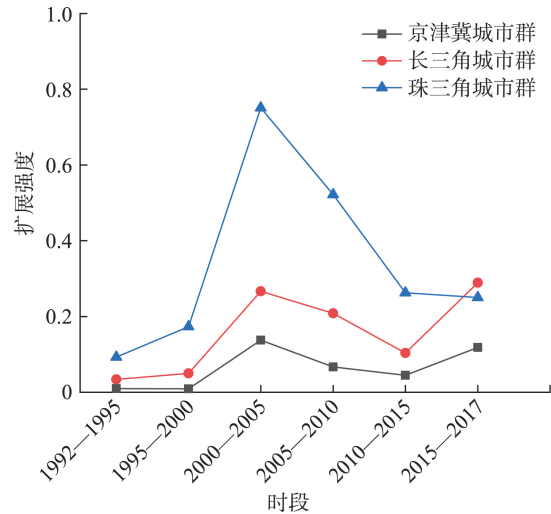


图6 1992—2017年三大城市群城市空间扩展强度变化
Fig. 6 Changes in urban spatial expansion intensity of three first-class urban agglomerations from 1992 to 2017

扩展,尤其是2000—2005年,土地城市化速度甚至高于人口城市化,成为城市建设“冒进式”增长阶段^[37]。2010年后,中国全面进入“新常态”时期,国家加大城市用地开发调控力度,城市建设逐步趋向合理化,珠三角城市群空间扩展强度快速回落,京津冀和长三角城市群则保持相对稳定的扩展强度。

4.3.2 城市空间的重心迁移

城市重心的迁移轨迹计算结果(图7)表明:京津冀城市群的北京、天津二大增长极的“虹吸效应”使其极化作用大于扩散作用,对其他城市带动能力弱,形成空间上紧凑的“京津唐”都市圈,北部张承及南部广大城市处于较为分散的发展状态。京津冀城市群各时段的城市重心始终位于北京、天津二大核心中间位置的廊坊永清县。1992—2000年和2010—2017年2个时段重心向南移动距离分别为3.5 km和9.4 km,反映出石家庄、保定等南部城市空间扩展对重心的拉动作用;而2000—2010年的重心迁移表现为东西摆动,表明该时段以北京市、天津市的空间扩展为主。

长三角城市群以上海为核心,形成苏锡常、南京都市圈、杭州湾等次级城市群,各城市间协作条件优越、等级体系明确。长三角城市重心移动轨迹位于宜兴市和苏州市,是上海及次级城市群共同拉动的结果。1992—2005年向东南再向南的迁移距离为24.7 km,表明杭州湾等南部城市空间扩展显著,对重心拉动作用明显;2005年后逐渐向东部、东北移动,证明上海和苏锡常对重心的拉力加强。

珠三角城市群以广州、深圳为核心,与东莞、佛

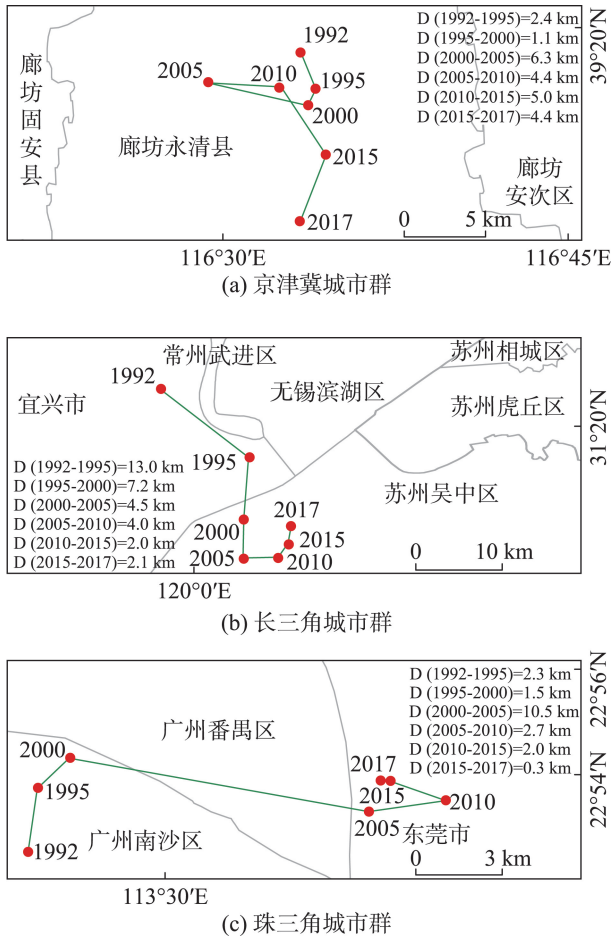


图7 1992—2017年三大城市群城市空间扩展重心变化轨迹
Fig. 7 Gravity center shift of urban spatial expansion in three first-class urban agglomerations from 1992 to 2017

山等城市共同构成经济技术联系最紧密的城市群体,各城市突破行政藩篱,形成城市连绵区,均衡性较强。城市重心迁移轨迹位于广州市、东莞市内。1992—2000年向东北方向移动3.8 km,表明以广州城市扩展为主的拉力作用;2000—2010年向东大幅移动13.2 km,显示出东莞、惠州等东部城市扩展剧烈,对重心形成较大拉力,2010年后重心向西北移动,但幅度较小。

4.3.3 城市空间扩展的时空格局

考虑到县域是中国经济发展的基本单位,也是承载城市空间扩展的重要单元。以县级统计单元计算三大城市群各时段城市斑块扩展数量的Getis-Ord G_i^* 指数,识别城市扩展空间热点和冷点区分布格局。计算结果使用自然断裂法对Z得分划分5个级别(图8)。结果表明:

(1)京津冀城市群空间扩展格局比较稳定。以北京、天津为核心,“京津唐”成为稳定热点区,并在

个别时段向廊坊、承德、张家口部分县区辐射,热点区Z得分具有波动变化特征;冷点区一部分出现在“石家庄—保定—衡水”三角形区域,基本对应冀中南贫困区,另一部分出现在环京津贫困带的张家口、承德和保定部分县区。从时间变化看,研究初期热点区出现在“京津唐”;随着社会经济不断发展,河北各市市辖区成为主要扩展区域,逐渐由冷点区发展为不显著或热点区。

(2)长三角城市群扩展格局变化较大。1992—2000年形成以上海、南京、合肥、杭州等省会城市为中心的热点区,但各省会城市之间存在明显冷点区,表明城市群特征尚不明显;2000—2010年,以上海为中心的城市扩展成为主导模式,上海、苏州核心城市辐射下的周边城镇快速发展使区域热点区扩大,Z得分较高说明集聚特征较强,冷点区增多;2010年后,众多中小城镇城市扩展使城市扩展集聚特征下降,热点区Z得分降低,热点区和不显著区增多,冷点区减少。安徽南部及苏北个别区县始终是城市扩展冷点区。

(3)珠三角城市群扩展空间格局变化不大。初期热点区出现在广州、东莞、深圳;2000年后表现出逐渐东移的趋势(与城市重心分析结果吻合),惠州部分区县成为热点区,热点区Z得分先增后降;江门、肇庆和惠州北部部分区县是城市扩展冷点区。

5 结论与讨论

通过对DMSP-OLS与NPP-VIIRS 2种影像数据的重叠年份,寻找最优的幂函数拟合模型,实现NPP-VIIRS影像模拟为DMSP-OLS影像,构建了三大城市群1992—2017年长时间序列夜间灯光影像集。对基于夜间灯光最佳阈值提取城市范围的方法和提取结果做出了全面解析,并创新了其应用视角。主要结论如下:

(1)利用统计数据空间比较法确定夜间灯光最佳阈值提取城市范围,其提取的结果是在最大程度上耦合统计数据的数值结果,更多体现区域经济活力,虽然与城市建成区具有较高一致性,不能保证提取结果的空间分布与统计数据的统计区域达到最佳拟合。

(2)依据不同级别统计数据获得最佳灯光数据阈值,提取结果的城市内涵也不相同。夜间灯光的城市提取结果,能在较大空间尺度上反映城市群发

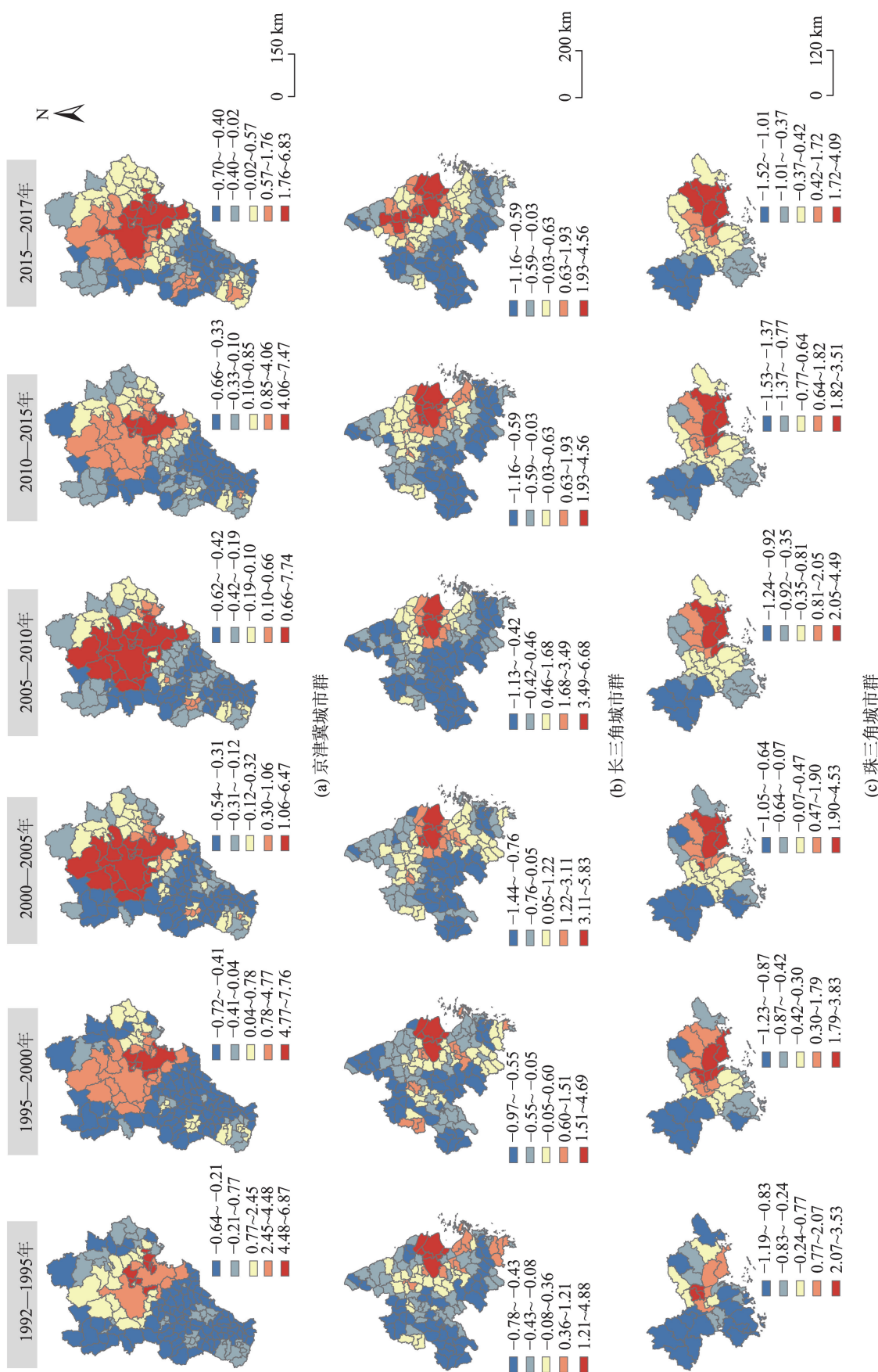


图 8 1992—2017年三大城市群扩展空间热点、冷点格局
Fig. 8 Hotspot analysis of urban spatial expansion in three first-class urban agglomerations from 1992 to 2017

展活力及其空间异质性;同时,可以有效剥离统计数据中包含的经济活力不足的城市空间,识别出不属于统计范围的低等级、高活力城镇区,精确识别城市群内部均衡性的空间模式。

(3)基于整合后的夜间灯光影像,使用行政市以上级别城市统计数据为参照的最优阈值,提取京津冀、长三角和珠三角三大城市群7个时间点48个城市扩展范围,分析、凝练三大城市群城市空间扩展特征及其时空格局。主要结论如下:

①有效区分县级城镇和市级以上城市在城市群发展中的贡献度。在寻求与统计单元一致性的情景下,3个城市群提取结果总体低于全部的提取范围,总偏差约为2.76%。京津冀城市群、长三角和珠三角城市群县级城镇对城市范围的总体贡献率分别为4.07%、3.43%和0.31%。其中京津冀城市群腹地广阔,县级城镇是区域经济活力的重要组成部分,整体上对城市范围的贡献率最大,除1992—1995有所下降外均保持增加的趋势;长三角城市群城市数量众多,1990s初期部分县级城镇经济活力较强,但2000年前后区域内各省市大量撤县设市,县级城镇数量减少,逐渐在2005年后低于京津冀城市群;珠三角城市群腹地较小,城市范围多分布在广州、东莞、佛山、深圳等珠江入海口处,空间聚集效应明显,县级城镇对城市范围的贡献在3个城市群中始终最小。

②3个城市群城市扩展的非均衡性呈现出不同的模式。京津冀城市群形成了北京、天津二大增长极城市,城市扩展为京、津主导下的“双核”模式,空间非均衡性显著,尚未形成完善的城市规模体系;长三角和珠三角城市群形态集聚特征明显,空间均衡性更强。重心迁移的路径、方向和距离也反映了3个城市群不同的扩展强度和作用模式,长三角整体重心迁移距离跨度最大,其次为珠三角,京津冀迁移幅度最小。

③城市空间扩展格局整体呈现热点区不断扩大、冷点区不断缩小特征。长三角和珠三角城市群空间格局变化较大,区域内核心城市的带动作用较强,而京津冀城市群热点和冷点区相对稳定。京津冀城市群热点区Z得分均值最大,表明其热点区向心集聚作用更强,长三角次之,珠三角城市群最小。

相对于日间光学遥感影像,夜间灯光影像在面向城市空间扩展的课题研究中表现出其自身的特

色和优势,利用其获取的城市空间范围兼有对城市群活力的指示作用,但当前DMSP-OLS与NPP-VIIRS二大主流夜间灯光数据的空间分辨率较低,难以对诸如城市形态、城市内部差异等城市特征进行细致探究。随着武汉大学李德仁院士团队主持研发的珞珈一号夜光遥感卫星发射并开放共享其产品数据,更高空间分辨率、更高质量的夜间灯光影像将为城市研究提供更多新的视角。

参考文献(References):

- [1] 方创琳,王振波,马海涛.中国城市群形成发育规律的理论认知与地理学贡献[J].地理学报,2018,73(4):651-665. [Fang C L, Wang Z B, Ma H T. The theoretical cognition of the development law of China's urban agglomeration and academic contribution[J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(4):651-665.]
- [2] 马双,曾刚.网络视角下中国十大城市群区域创新模式研究[J].地理科学,2019,39(6):905-911. [Ma S, Zeng G. Regional Innovation Models of China's Ten Major Urban Agglomerations from the Perspective of Network[J]. Scientia Geographica Sinica, 2019,39(6):905-911.]
- [3] 曹诗颂,胡德勇,赵文吉,等.不透水地表盖度视角下中美城市群空间结构对比——以“京津冀”与“波士华”为例[J].地理学报,2017,72(6):1017-1031. [Cao S S, Hu D Y, Zhao W J, et al. Spatial structure comparison of urban agglomerations between China and USA in a perspective of impervious surface coverage: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei and Boswash[J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(6):1017-1031.]
- [4] 刘飞,郑新奇,黄晴.基于空间分形特征的城市群实体空间识别方法[J].地理科学进展,2017,36(6):677-684. [Liu F, Zheng X Q, Huang Q. Identification of the physical space of urban systems based on fractal analysis[J]. Progress in Geography, 2017,36(6):677-684.]
- [5] Liu Y, Liu X, Gao S, et al. Social Sensing: A new approach to understanding our socioeconomic environments [J]. Annals of the Association of American Geographers, 2015,105(3):512-530.
- [6] Zhang X, Li W, Zhang F, et al. Identifying urban functional zones using public bicycle rental records and point-of-interest data[J]. Isprs International Journal of Geo Information, 2018,7(12):459.
- [7] Middel A, Lukasczyk J, Zakrzewski S, et al. Urban form and composition of street canyons: A human-centric big data and deep learning approach[J]. Landscape and Urban Planning, 2019,183:122-132.

- [8] Yao Y, Zhao T L, Yuan Z H, et al. A human-machine adversarial scoring framework for urban perception assessment using street-view images[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2019,33(12):2363-2384.
- [9] 毛炜圣,钟业喜.长江中游城市群城市活力水平空间格局及影响因素[J].*世界地理研究*,2020,29(1):86-95. [Mao W S, Zhong Y X. Spatial pattern and influencing factors of urban vitality in the middle reaches of the Yangtze River. *World Regional Studies*[J]. *World Regional Studies*, 2020,29(1):86-95.]
- [10] Long Y, Zhai W, Shen Y, et al. Understanding uneven urban expansion with natural cities using open data[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017,177:281-293.
- [11] 梁泽,黄姣,韦飞黎,等.基于夜光遥感影像与百度POI数据的中国城市群空间范围识别方法[J].*地理研究*,2020,39(1):92-102. [Liang Z, Huang J, Wei F L, et al. Identifying the spatial range of urban agglomerations in China based on night light remote sensing and POI data[J]. *Geographical Research*, 2020,39(1):92-102.]
- [12] 周亮,赵琪,杨帆.基于POI与NPP/VIIRS灯光数据的城市群边界定量识别[J].*地理科学进展*,2019,38(6):840-850. [Zhou L, Zhao Q, Yang F. Identification of urban agglomeration boundary based onPOI and NPP/VIIRS night light data[J]. *Progress in Geography*, 2019,38(6):840-850.]
- [13] 刘浩,马琳,李国平.1990s以来京津冀地区经济发展失衡格局的时空演化[J].*地理研究*,2016,35(3):471-481. [Liu H, Ma L, Li G P. Spatial-temporal evolution pattern of unbalanced economic development in Beijing-Tianjin-Hebei region since the 1990s[J]. *Geographical Research*, 2016,35(3):471-481.]
- [14] Croft T A. Nighttime images of the Earth from space[J]. *Scientific American*, 1978,239(1):86-98.
- [15] Croft T A. Burning Waste Gas in Oil Fields[J]. *Nature*, 1973,245(5425):375-376.
- [16] 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.
- [17] Small C, Pozzi F, Elvidge C D. Spatial analysis of global urban extent from DMSP-OLS night lights[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005,96(3-4):277-291.
- [18] Small C, Elvidge C D, Balk D, et al. Spatial scaling of stable night lights[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011,115(2):269-280.
- [19] 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(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(3):168-175,241.]
- [20] 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 C Y, Shi P J, Li J G, et al. Study on urbanization space process reconstruction in mainland China in the 1990s based on DMSP/OLS nighttime light and statistical data[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006,51(7):856-861.]
- [21] Levin, N, Kyba C C M, et al. Remote sensing of night lights: A review and an outlook for the future[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020,237:111443.
- [22] 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. [Chen X, Peng J, Liu Y X, et al. Measuring spatial expansion and correlations of cities in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration using DMSP/OLS nighttime light data[J]. *Geographical Research*, 2018,37(5):898-909.]
- [23] 许礼华.基于NPP-VIIRS数据长三角城市群城市扩张时空演变研究[D].上海:上海师范大学,2019. [Xu L H. Spatial-temporal evolution of urban expansion in the Yangtze River Delta urban agglomeration based on NPP-VIIRS data[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2019.]
- [24] 马瑞峰.珠三角城市群空间扩展格局及其驱动力因子分析——基于DMSP/OLS和NPP/VIIRS影像[J].*宝鸡文理学院学报(自然科学版)*,2018,38(3):68-75. [Ma R F. Analysis of the spatial expansion pattern and its driving factors of Pearl River Delta urban-metropolitan region on the basis of DMSP/OLS and NPP/VIIRS image[J]. *Journal of Baoji University of Arts and Sciences(Natural Science)*, 2018,38(3):68-75.]
- [25] Li X, Li D, Xu H, 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.
- [26] Zheng Q, Weng Q, Wang K, et al. Developing a new cross-sensor calibration model for DMSP-OLS and Suomi-NPP VIIRS night-light imageries[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019,153(7):36-47.
- [27] Zhao M, Zhou Y, Li X, et al. Building a Series of Consistent Night-Time Light Data (1992-2018) in Southeast Asia by Integrating DMSP-OLS and NPP-VIIRS[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020,58(3):1843-1856.

- [28] 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. [Cao Z Y, Wu Z F, Kuang Y Q, et al. Correction of DMSP/OLS Night-time Light Images and Its Application in China[J]. Journal of Geo-information Science, 2015,17(9):1092-1102.]
- [29] 国家统计局城市社会经济调查司.中国城市统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,1993-2018. [Cities Socioeconomic survey office National bureau of statistics. China city statistics yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 1993-2018.]
- [30] 张梦琪,何宗宜,樊勇.DMSP/OLS稳定夜间灯光影像的校正方法[J].测绘通报,2017(12):58-62,76. [Zhang M Q, He Z Y, Fan Y. Calibration for DMSP/OLS Stable Night-time Light Images[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(12):58-62,76.]
- [31] Kaifang S, Bailang Y, Yixiu H, et al. Evaluating the ability of NPP-VIIRS nighttime light data to estimate the gross domestic product and the electric power consumption of China at multiple scales: A comparison with DMSP-OLS data[J]. Remote Sensing, 2014,6(2):1705-1724.
- [32] 胡忆东,吴志华,熊伟,等.城市建成区界定方法研究——以武汉市为例[J].城市规划,2008(4):88-91,96. [Hu Y D, Wu Z H, Xiong W, et al. Study on the method of defining urban built-up areas: the case of Wuhan[J]. Urban Planning, 2008(4):88-91,96.]
- [33] 舒松,余柏菡,吴健平,等.基于夜间灯光数据的城市建成区提取方法评价与应用[J].遥感技术与应用,2011,26(2):169-176. [Shu S, Yu B L, Wu J P, et al. Methods for defining urban built-up area using night-light data: Assessment and application[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011,26(2):169-176.]
- [34] 王利伟,冯长春.转型期京津冀城市群空间扩展格局及其动力机制——基于夜间灯光数据方法[J].地理学报,2016,71(12):2155-2169. [Wang L W, Feng C C. Spatial expansion pattern and its driving dynamics of Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region: Based on nighttime light data[J]. Acta Geographica Sinica, 2016,71(12):2155-2169.]
- [35] 杨任飞.基于DMSP/OLS与NPP/VIIRS整合数据的城市群发育过程研究[D].重庆:西南大学,2018. [Yang R F. Integrating DMSP/OLS & NPP/VIIRS nighttime light data to the application research of urban agglomeration Growth Process: A case study of the main urban agglomerations of Yangtze river economic zone[D]. Chongqing: Southwest University, 2018.]
- [36] 刘纪远,张增祥,庄大方,等.20世纪90年代中国土地利用变化时空特征及其成因分析[J].地理研究,2003,22(1):1-12. [Liu J Y, Zhang Z X, Zhuang D F, et al. A study on the spatial-temporal dynamic changes of land use and driving forces analyses of China in the 1990s[J]. Geographical Research, 2003,22(1):1-12.]
- [37] 刘纪远,张增祥,徐新良,等.21世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析[J].地理学报,2009,64(12):1411-1420. [Liu J Y, Zhang Z X, Xu X L, et al. Spatial patterns and driving forces of land use change in China in the early 21st Century[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(12):1411-1420.]