

引用格式:Li Guihua,Fan Junfu,Zhou Yuke,*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.[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.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2020.6.1348

基于VIIRS夜间灯光数据的山东半岛城市群 发展特征研究

李桂华¹,范俊甫¹,周玉科²,张悦¹

(1.山东理工大学 建筑工程学院 测绘工程系,山东 淄博 255049;

2.中国科学院地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟院重点实验室,北京 100101)

摘要:NPP-VIIRS夜间灯光数据是在中大尺度上开展城市发展变化研究的稳定数据源。基于2012~2018年NPP-VIIRS夜间灯光数据,以山东半岛城市群为研究对象,采用参考比较法提取城市建成区图斑,选取9个景观格局指数对山东半岛城市群的城市化发展特征进行定量分析。结果表明:①整体上,域内斑块总面积以4.5%的速度增长,边缘总长度和边缘密度年均增长3.15%,斑块数量和密度增长较快(分别为1.95%和1.98%),表明山东半岛城市群整体城市面积增长迅速,城市范围持续扩张;②从不同指标变化趋势来看,各城市斑块总面积增长最快的是青岛市和东营市(分别为9.66%和6.01%);青岛市的斑块数量和密度增速最快(分别为9.54%和8.55%),日照市的斑块数量和密度均以3.65%的速率显著降低;景观形状指数整体增速缓慢;平均回旋半径在日照市具有较高的年均增长速度(5.99%);③从各城市发展特征的差异性来看,青岛市的平均斑块面积和回旋半径分别以0.56%和1.53%的速度降低,其他各指标均显著增加,表明青岛市出现了较多的新兴城镇,城区面积不断扩大;济南、日照和东营市的城区面积增长较快,斑块数量、景观形状指数等指标增长缓慢,城市发展以旧城区的扩张为主;潍坊、淄博和烟台市在2015年和2016年前后经历了新兴城镇出现,城镇融合的阶段,城市发展较快。总体而言,山东半岛城市群城市化发展较快,但空间差异性明显。

关键词:NPP-VIIRS;山东半岛城市群;参考比较法;景观格局指数

中图分类号:TP79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2020)06-1348-12

1 引言

城市作为人类活动的重要聚集地,推动了地区经济与社会的发展,是人类社会文明进步的产物^[1]。城市化指社会由乡村型社会向城市型社会的转变,其反映了国家在经济、社会、文化等领域的发展水平,其中城市范围的扩张是城市化进程研究的重要指标^[2]。城市范围的扩张推动了城市经济社会的快

速发展,同时也对城市的气候特征、生态环境以及可持续发展造成影响^[3-4]。监测城市发展过程中的空间格局变化特征,制定合理的城市扩展方向,成为城市化进程中降低风险的有效方式^[5-6]。

遥感技术具有观测范围广、信息获取和更新速度快、抗干扰能力强等特点,已被广泛用于城市扩展研究^[2,7]。夜间灯光遥感数据能在夜间探测到城市灯光、车流与居民地的低强度灯光,从而有效地

收稿日期:2019-08-31;修订日期:2020-09-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0503500),山东省自然科学基金项目(ZR2020MD0115、ZR2020MD018),国家自然科学基金项目(41601478),山东理工大学青年教师发展支持计划项目(4072-115016)。

作者简介:李桂华(1994—),女,山东聊城人,硕士研究生,主要从事GIS开发与城市遥感应用研究。E-mail:ligh_sdut@163.com

通讯作者:范俊甫(1985—),男,山东聊城人,博士,讲师,主要从事高性能GIS算法与城市环境遥感研究。E-mail:fanjf@sdu.edu.cn

表达人类活动以及城镇的空间格局、轮廓信息,成为城市建成区提取的重要数据^[8]。目前应用最为广泛的夜间灯光数据是DMSP-OLS (Defence Meteorological Satellite Program-Operational Linescan System,美国国防气象卫星项目一线扫描系统)年度稳定夜间灯光数据和NPP-VIIRS (National Polar-orbiting Partnership-Visible Infrared Imaging Radiometer Suit,美国国家极轨卫星一可见光红外成像辐射仪)月度/年度合成夜间灯光数据^[1]。我国也在2018年发射了搭载高灵敏度夜光相机的珞珈一号卫星,其空间分辨率达130 m,幅宽250 km,是国际首颗专业夜间灯光遥感卫星,能够采集全球范围的高精度、高分辨率夜间灯光遥感影像数据^[9-10],但由于卫星发射较晚,缺乏长时间序列的夜间灯光数据。NPP-VIIRS数据具有较高的辐射探测范围,没有灯光饱和问题,数据质量较高,时间序列较长,更适用于区域城市扩展空间格局演变规律的研究^[11]。

城市建成区提取的关键在于确定最佳分割阈值,目前基于夜间灯光数据获取最佳阈值的方法主要包括经验阈值法、突变检测法、参考比较法和高分辨率影像空间比较法^[12-15]。经验阈值法通过人为设定阈值进行分割,主观性太强,缺乏科学依据;突变检测法忽略城市发展的差异性,不适用于大尺度下多城镇的研究^[16-17];高分辨率影像空间比较法操作复杂,数据依赖性大,成本高^[18];参考比较法利用统计年鉴数据来确定最佳分割阈值,其中统计年鉴数据具有获取方便、精度高、使用便捷等特点,是一种相对高效的辅助资料^[5, 8]。

改革开放以来,山东半岛的城市化迅速发展,以胶济铁路沿线为轴线,形成了“济青”双核城市为发展中心的山东半岛城市群^[19]。山东半岛城市群是环渤海经济圈的重要组成部分,具有重要的研究价值。廖伟杰等^[19]国内对该区域的城市化过程进行了研究,发现山东半岛的城市综合空间紧凑度与人口规模成正比,以青岛、济南为发展的重心,向周边逐渐降低;李咪等^[20]基于统计数据获取山东半岛城市群建设用地的时空特征,分析了5类功能性用地的变化趋势;山东半岛城市群重视资源环境与社会经济的协调发展,资源与经济的耦合协调度得到有效的提高^[21];任亚平等^[22]基于统计数据,在城市级别上分析了山东半岛城市群的绿色城镇化水平及影响因素。上述研究多数基于统计数据,没有地理位置信息,缺乏长时间序列NPP-VIIRS灯光数

据对该区域城市化发展特征的研究。

鉴于目前对山东半岛城市群地理位置信息研究的缺乏,遥感监测技术以及NPP-VIIRS夜间灯光数据具有获取和更新速度快、抗干扰能力强、分辨率高、无灯光溢出、直观反映区域城市扩展空间格局等特点,选取2012~2018年的NPP-VIIRS夜间灯光数据,采用参考比较法获取最佳阈值,提取建成区面积。在此基础上,将合成年度数据与原始年度数据对比分析,并与Landsat 8数据支持向量机方法提取的结果进行比较,证实方法的准确性。最后利用景观格局分析法计算9个景观格局指数,分析整体及各城市的城市化发展特征,为决策者进一步优化城市发展方向提供有效的建议。

2 数据与方法

2.1 研究区域

选择山东半岛城市群(包括济南、青岛、烟台、威海、日照、东营、潍坊、淄博8个城市)作为研究区域。山东半岛城市群位于116°~123° E和35°~38.5° N之间,地处中国东部沿海地区,属于温带大陆性季风气候,气候适宜^[23]。山东半岛城市群是黄河中下游地区的重要出海口,是山东省重要的经济、社会与文化重心,是中国北方与华东地区的城市密集区之一,是环渤海城市群的重要组成部分,具有重要的经济、社会发展优势。“十三五”期间,山东半岛逐渐以济南和青岛为中心,形成了“济青”双核城市群,山东半岛城市群是华东地区典型城市群之一,其位于京津冀城市群与长三角城市群之间,是我国传统的制造业基地和出口外向型经济区域,具有重要的研究价值^[23-25]。

2.2 数据源

NPP-VIIRS夜间灯光数据下载自美国国家海洋与大气管理局官网。NPP-VIIRS数据的空间分辨率为15弧秒(约500 m),时间分辨率以月为单位,时间跨度为2012~2018年,空间坐标系为WGS_84。NPP-VIIRS月度产品包括“vcm”(VIIRS Cloud Mask)和“vcmsl”(VIIRS Cloud Mask Stray Light)两种。其中,“vcm”产品剔除了所有受杂散光影响的像元,数据精度较高,但由于夏季和中高纬度地区受杂散光影响严重,剔除之后导致大量的数据缺失,造成时空不连续;“vcmsl”产品基于杂散光修正方法^[26]对污染数据进行了校正,时空连续,但数据质量较低,且缺乏2012年和2013年夏季中高

纬度地区的数据^[27-28]。NPP-VIIRS 年度产品只有“vcm”系列,且剔除了杂散光、短暂光源和背景噪声的影响,具有较高的精确性,但只提供 2015 年和 2016 年两期数据。为此,2015~2016 年选用“vcm”年度产品,其他年份使用“vcm”月度产品数据合成年度数据产品,作为建成区提取的主要数据源,进行城市群发展特征的研究。

此外,采用国家基础地理信息中心^[29]提供的山东半岛城市群行政区划范围矢量数据,以及山东省统计局提供的统计年鉴数据^[30]。因 2018 年统计年鉴数据尚未出版,实验中 2018 年各城市的建成区面积采用线性拟合法计算得出,各城市建成区面积见表 1。

表 1 2012~2017 年山东半岛城市群各城市建成区面积(km²)

Table 1 Area of urban built-up areas in Shandong Peninsula Urban Agglomeration from 2012 to 2017(km²)

城市	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
济南	485.3	533.7	546.4	557	567.7	583.6	606
青岛	554.8	660.3	688.8	770.1	811	846.3	921
烟台	501.8	508.2	549	560.5	569.8	580.2	603.7
潍坊	399.7	417.9	434.5	451.6	459.8	470.2	488.5
威海	258.2	266.2	272.3	277.1	279.6	285	291
淄博	237.9	250	262.3	267	270.6	275.5	286
日照	95.8	97.1	99.6	100.8	103.7	107.1	108.4
东营	111	113	114.8	118.7	151.2	152.8	159.7

2.3 研究方法

首先进行数据预处理,包括数据去噪、数据插补以及基于月度数据合成年度数据,并进行投影转换,将处理后的影像投影转换为兰伯特等面积投影坐标系;然后,结合统计年鉴数据,采用参考比较法选定合适的阈值,提取城市建成区面积;最后,利用景观格局变化分析的方法,选取景观总面积、斑块数量等 9 个景观格局指标,通过 FRAGSTATS 4.2 软件分析山东半岛城市群的发展变化特征,流程图见图 1。

2.3.1 数据预处理

NPP-VIIRS 月度灯光数据剔除了云雾、月光等杂散光的影响,但保留了火灾、渔船、极光等短暂性光源以及背景噪声,因此,需要进行去噪处理来减少噪声对实验的干扰^[31]。中值滤波与低阈值相结合的方法具有较高的去噪精度^[32]。选用 5×5 栅格模板进行中值滤波处理,以此来消除短暂光源的影响。由于机场区域就有较高的灯光亮度值^[33],将机场作为最大阈值的采样点,获取灯光数据中机场区域的灯光像元值,并选取比最大灯光值略大的数值

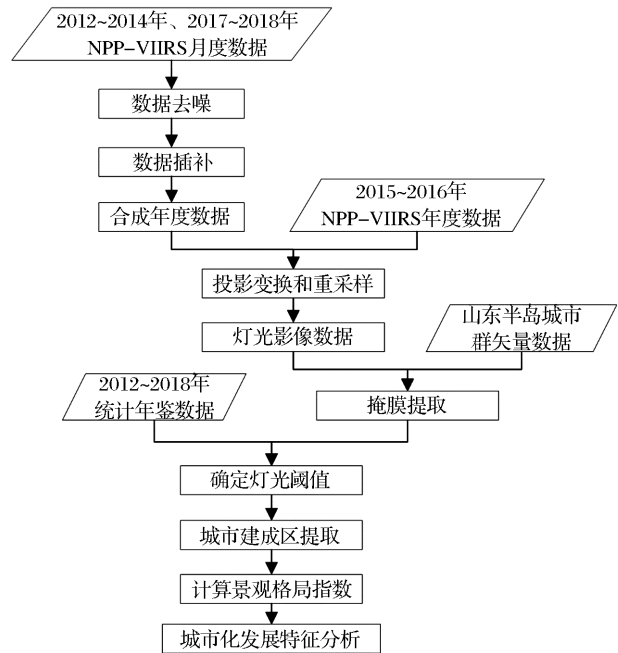


图 1 技术流程图

Fig.1 Flowchart of technology

作为研究区内的最大灯光阈值,将大于最大阈值的像元赋值为零,以此消除背景噪声。

受杂散光的影响,NPP-VIIRS 数据的“vcm”产品在夏季中高纬度地区具有严重的数值缺失,造成时空不连续^[28],需要进行数据插补。基于最小二乘法对缺失值进行插补处理,通过选取缺失月份及前、后各 6 个月份的数据作为输入数据集,用最小二乘法求解线性拟合函数,逐像元填充缺失像元。最后,通过求均值的方法,将去噪、插补处理后的月度数据合成年度数据。地理参考下的影像网格会随着纬度的变化而不同,为避免数据因纬度变化产生变形^[31],将 NPP-VIIRS 数据投影转换为兰伯特等面积投影。

为了验证数据插补及数据合成方法的精确性、可行性,以济南市为例,选取 2016 年的月度产品、年度产品作为数据源进行对比分析。实验首先基于 2016 年月度数据,采用最小二乘法数据插补、以及求取均值的合成方法,计算得到年度数据;然后将原始年度数据与合成的年度数据相减,得到两影像灯光亮度值的差值图(图 2)。

由图可得,济南市原始年度数据与合成年度数据灯光亮度值具有较高的一致性,亮度差值主要分布在 $[-0.5, 0.5]$ 之间,平均亮度差值为 0.05,即该数据插补与合成的方法具有较高的精确性。为进一步证实方法的有效性,实验根据上述两种年度数据,

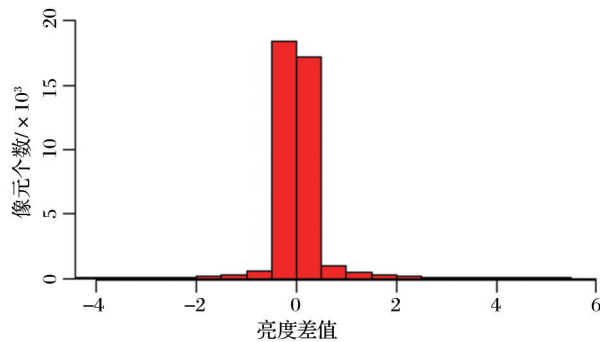


图 2 2016 年济南市原始年度数据与合成年数据亮度差值图

Fig.2 Brightness difference between original and synthetic annual data of Jinan city in 2016

分别提取建成区的面积,得到各数据建成区面积相对于统计年鉴数据的相对误差(表 2)。发现原始年度数据的相对误差为 0.02,合成年数据的相对误差为 0.11,说明合成年数据的精细程度不及原始年度数据,但误差较低,具有较高的适用性。综上所述,最小二乘数据插补及均值数据合成方法是一种有效、可行的方法。

表 2 2016 年济南市原始年度数据与合成年数据下建成区面积对比

Table 2 Comparison of urban built-up areas between annual data and annual data Synthesized by monthly data of Jinan city in 2016

数据	统计年鉴数据	原始年度数据	合成年数据
面积/km ²	567.7	567.81	568.36
绝对误差/km ²	0	0.11	0.66
相对误差/%	0	0.02	0.11

2.3.2 建成区提取

NPP-VIIRS 灯光数据已被用于城市扩张的研究中,其中建成区是城市扩展研究的重点区域,而确定建成区的最佳灯光阈值是夜间灯光数据应用在建成区提取的关键^[1]。在选取灯光阈值的方法中,参考比较法以历年统计年鉴数据中的城市建筑面积信息为依据,通过设定初始阈值、迭代比对来确定最佳阈值,并提取建成区^[13, 15, 34]。鉴于参考比较法更具科学依据、操作简便、且具有较高的精度^[35],本文采用参考比较法来提取建成区。该方法基于两种假设:①政府发布的统计年鉴数据能准确反映建成区的真实面积;②在上一个时期灯光数据中的城市建成区斑块能在下一时期影像中得到保留^[34]。采用参考比较法分别对各城市进行阈值分割以及建成区提取,得到淄博市历年最佳阈值组合及建成区面积提取误差结果(图 3)。

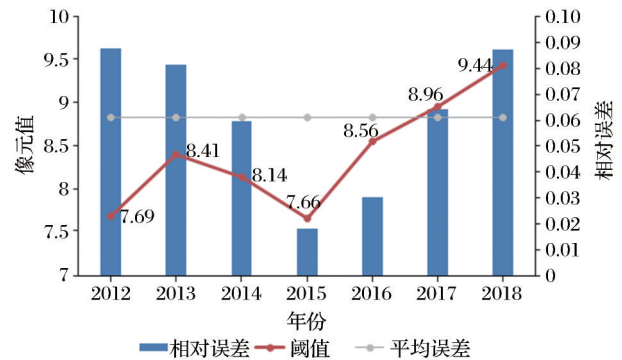


图 3 淄博市历年最佳阈值组合及建成区面积提取误差

Fig.3 Annual thresholding values and urban area extraction errors of Zibo city

淄博市历年最佳阈值组合及建成区面积提取误差结果表现为:提取结果的平均相对误差约为 0.061,标准偏差为 0.026,其中,2012 年与 2018 年的年误差最大(均为 0.087),2015 年的误差最小,仅为 0.018,建成区面积的提取误差较低,标准偏差更小,表明结果是精确、稳定、简单可行的。

进一步确定建成区提取方法的可靠性,并充分考虑影像数据的光谱、空间与纹理信息,本文基于 Landsat 8 影像数据,采用面向对象的影像分析技术^[36],使用支持向量机的分类方法^[37]提取淄博市张店区 2018 年的城市建筑区域,并与 NPP-VIIRS 数据的提取结果进行对比分析(图 4)。结果表明,Landsat 8 和 NPP-VIIRS 数据的提取结果在空间上具有较高的吻合性,灯光数据的提取结果更能直观

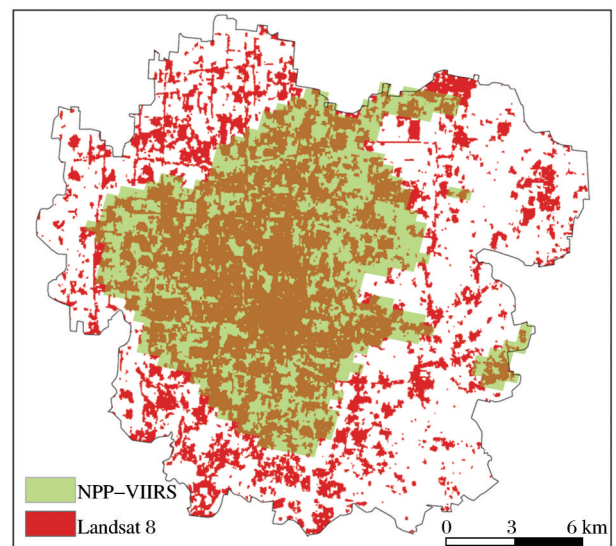


图 4 Landsat 8 和 NPP-VIIRS 数据提取 2018 年张店区城区结果对比

Fig.4 Extraction results comparison using Landsat8 and NPP-VIIRS data of Zhangdian district in 2018

地反映人类活动的密集区域。由于灯光扩散效应及数据分辨率的影响,灯光数据得到的城区范围精细化程度偏低,但对于大尺度下城市空间发展特征的研究,仍是一种有效的方法。

2.3.3 景观格局分析法

景观格局是指一系列大小不一、形状各异的景观斑块在空间中的排列,其变化既受各种干扰因素的共同作用,又影响着区域经济、社会与生态的发展^[16-17]。针对 NPP-VIIRS 灯光数据在山东半岛城市群的单一性特点,选择了 9 个景观格局指标(各指

标具体含义见表 3),分别是平均边缘密度(Edge Density, ED)、总边缘长度(Total Edge, TE)、斑块密度(Patch Density, PD)、平均斑块面积(Mean Patch Area, MPA)、斑块数量(Number of Patches, NP)、斑块总面积(Class Area, CA)、最大斑块指数(Largest Patch Index, LPI)、景观形状指数(Landscape Shape Index, LSI)和斑块平均回旋半径(Radius of Gyration, GYRATE)^[16]。使用 FRAGSTATS 4.2 版本软件计算山东半岛城市群整体、各城市两个层面的景观格局指标,并分析其发展变化特征。

表 3 各景观指数及其描述

Table 3 Landscape indices and their descriptive information

景观指数	缩写	公式	单位	描述信息
斑块数量	NP	$NP = n$	个	城镇斑块数量,该值与景观的破碎化程度成正比
斑块总面积	CA	$CA = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{10^4}$	hm ²	所有城镇斑块的面积
总边界长度	TE	$TE = \sum_{k=1}^m c_{ik}$	m	城镇斑块的所有边缘长度之和
平均边界密度	ED	$ED = \frac{TE}{TA} \times 10\ 000$	m/hm ²	单位面积上,城镇斑块的边缘长度。ED 值与景观破碎化程度成正比,实现不同景观之间的比较
斑块密度	PD	$PD = \frac{NP}{TA} \times 10\ 000$	个/hm ²	单位面积上的城镇斑块数量。PD 表示不同斑块之间相互影响的强度,反映景观整体的复杂程度
平均斑块面积	MPA	$MPA = \frac{TA}{NP \times 10\ 000}$	hm ²	城镇斑块的平均面积,反映了城镇斑块的破碎程度
最大斑块指数	LPI	$LPI = \frac{\max(A_1, \dots, A_n)}{TA} \times 100$	%	最大城镇斑块面积占总斑块面积的百分比
景观形状指数	LSI	$LSI = \frac{0.25 \times TE}{\sqrt{TA}}$		LSI 表示斑块边界的复杂性和不规则性,反映斑块的聚合或离散程度,LSI 值越大,斑块越离散
平均回旋半径	GYRATE	$GYRATE = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^z \frac{h_{ij}}{z}}{NP}$	m	斑块中各点到斑块中心的平均距离的平均值,用于表示斑块的扩展模式

注:表中 n 为城市群整体或各城市的建成区斑块个数, TA 为城市群整体或各城市的景观总面积,单位为 m², A_i 为第 i 个斑块的面积(其中 $i=1, 2, \dots, n$), c_{ik} 为包括景观边界、各斑块边缘线在内的总边缘长度, h_{ij} 表示第 j 个像元到第 i 个斑块中心的距离(其中 $i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, z$), z 为斑块含有的像元个数

3 结果分析

3.1 山东半岛城市群整体特征研究

基于参考比较法提取 8 个城市在不同年份的建成区范围,将各城市建成区影像数据镶嵌组合,形成山东半岛城市群整体的建成区范围,并在此基础上采用景观格局分析法进行统计分析,得到山东半岛城市群 2012~2018 年的景观格局指标变化趋势(图 5),MGA(Mean Growth Rate)为年均增长率。整体来看,山东半岛城市群建成区总面积的年均增长率达到 4.5%,呈现出明显增长的趋势(图 5(b)),表明山东半岛的城市面积增长迅速,城市范围持续扩张,经济发展水平不断提高。斑块数量和斑块密度描述景观的异质性,用于表示景观的破碎程度。

图 5(a)、5(d)显示山东半岛的斑块数量和斑块密度有相近的增长趋势(MGA 分别为 1.95% 和 1.98%),整体呈增长的趋势,2013~2016 年增长迅速,2017 年快速下降,到 2018 年有所回升,说明早期较多乡村向城市发展,形成新兴城镇,近两年部分城镇进行融合,各城区的规模得以扩大。同时,平均斑块面积(图 5(h))整体以 2.49% 的速度增长,在 2013~2016 年下降明显,之后迅速增加,说明山东半岛涌现出较多的城镇,近两年城镇融合,推动了城市的发展。最大斑块指数(图 5(c))以 6.63% 的速度逐年增长,反映出中心城区的建筑用地面积增长迅速,中心城区的范围快速扩张。图 5(e)、5(f)为斑块的边缘总长度和边缘密度,两指标变化趋势相近,

均以3.15%的速度稳步提升,仅在2017年有所降低,即山东半岛城市的景观破碎度增加,城镇数量增加,2017年出现了城镇融合现象。整体来说,景观形状指数(图5(g))和平均回旋半径(图5(i))均表现为

缓慢增长的趋势(MGA均为0.92%),但景观形状指数在2015年急剧下降,到2017年增加,平均回旋半径在2013年降低,2016年之后增加,表明山东半岛城市群表现为新兴城镇出现和城镇融合现象。

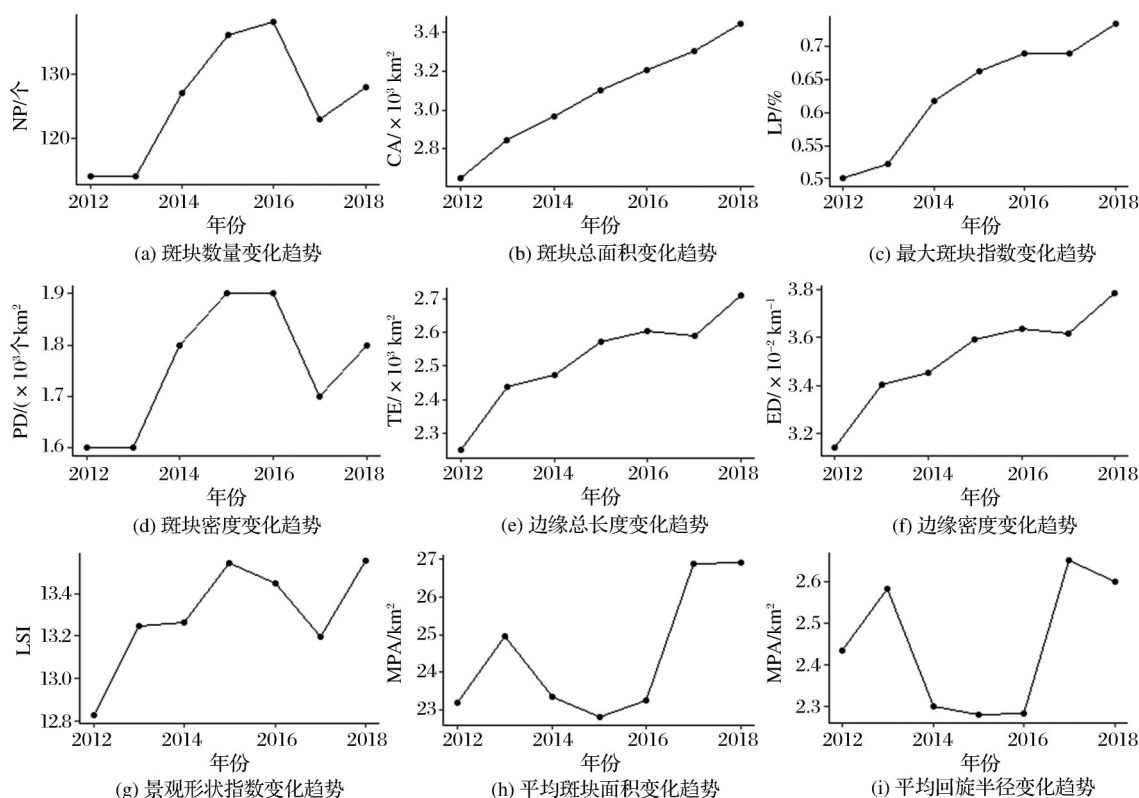


图5 山东半岛城市群景观格局指数变化趋势图

Fig.5 Changing trends in landscape pattern indices of Shandong Peninsula urban agglomeration

3.2 各城市发展特征分析

本节计算山东半岛城市群各城市的景观格局指数,探索2012~2018年各指标在8个城市的变化趋势,对比分析城市发展变化的差异性。根据各城市在城市扩张过程中表现出的不同发展特征,将其分为复合型、旧城区扩张型、新兴城镇出现-融合型和新兴城镇萌芽型4种类型。其中青岛市为复合型城市;旧城区扩张型城市包括济南、日照和东营市,新兴城镇出现-融合型城市包括潍坊、威海和淄博市;烟台市属于新兴城镇萌芽型城市。

3.2.1 复合型

青岛市各景观格局指数的变化趋势(图6(a))表现为:城区总面积以9.66%的速率快速增长,表明青岛市城市范围持续扩张,经济发展水平显著提高;斑块数量和密度分别以9.54%、8.55%的速度增长,即城市的斑块破碎程度增加,城镇数量增多,出现了较多的新兴城镇;最大斑块指数增长较快(MGA为8.55%),反映出青岛市的建筑用地面积

增加,中心城区范围明显扩张;斑块的边缘总长度和边缘密度均以7.75%的速度增长,平均斑块面积和回旋半径分别以0.56%和1.53%的速度降低,降幅平缓,说明新兴城镇的发展速率略高于中心城区的扩张速率。综上所述,表明青岛市城市发展迅速,出现了较多的新兴城镇,中心城区的面积也在不断扩大。结合青岛市城区面积扩张图(图6(b))可得,城市的发展重心位于青岛市的东南部沿海地区,沿海中心城市面积迅速扩张,同时沿海和内陆地区均出现了较多的新兴城镇,城市发展迅速,属于复合型城市。

3.3.2 旧城区扩张型

济南市的斑块总面积和最大斑块指数(图7(a))分别以3.76%和3.51%的速度增长,表明中心城区的面积快速增长,扩张明显,结合济南市在2012~2018年间的城区范围扩张图(图7(d)),得出济南市的发展重心主要分布在中部旧城区周边,向四周扩散,中心城市扩张明显;同时,平均回旋半径略有下

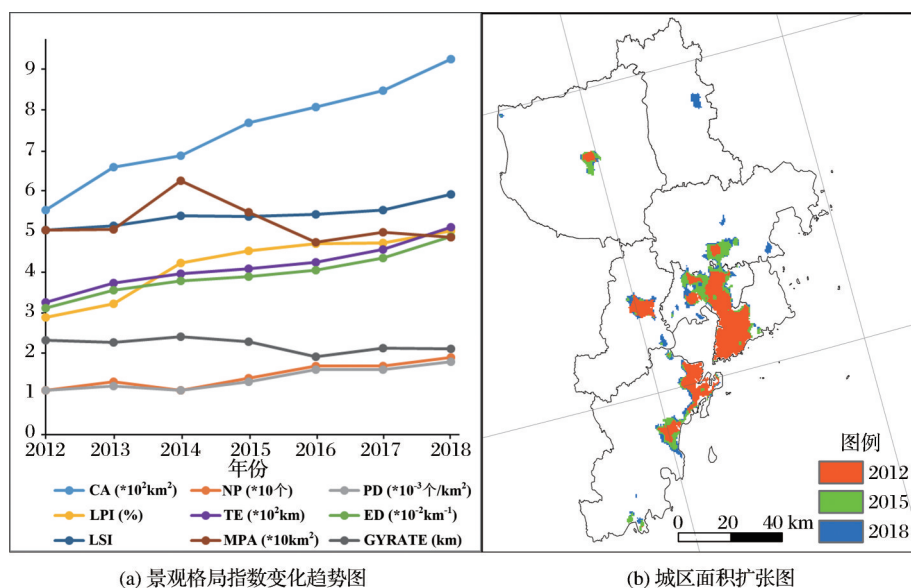


图6 青岛市景观格局指数变化趋势及建成区面积扩张

Fig.6 Changing trends in landscape pattern indices and expansion of built-up area in Qingdao city

降(MGA为 -0.52%),斑块数量、边缘长度以及景观形状指数等指标均增加,但增幅缓慢,反映了济南市出现了较少的新兴城镇,零星分布在济南市的北部,城市发展以旧城区扩张为主,属于典型的旧城区扩张型城市。

由图7(b)可得,日照市的平均回旋半径和平均斑块面积具有较高的年均增长速度(MGA均为 5.99%),变化趋势一致,2013年后有所降低,2016年后显著增长;与平均回旋半径和平均斑块面积的变化趋势相反,斑块数量和密度则以 3.65% 的速率显著降低,表现为2013年之后增加,2016年后显著降低,表明2013年城镇数量减少,城镇融合现象明显,到2016年城市发展主要以中心城市为主,新兴城镇较少;斑块总面积、最大斑块指数、边缘长度等指数均显著增加,表明日照市城市化的速度较快,新兴城镇较少,城市发展的重心在旧城区周边,分布在日照市的东部和东南部沿海地区(图7(e)),具有明显的沿海发展特征。

东营市的各景观指数均表现为增长的趋势(图7(c))。城区面积相对其他城市较小,但面积增幅较快(MGA为 6.01%),最大斑块指数以 18.68% 的速度显著增长,反映出东营市的建筑用地面积快速增长,中心城区明显扩张;城市的边缘总长度、边缘密度和斑块数量的变化趋势一致(MGA分别为 3.59% 、 3.59% 和 2.75%),增幅缓慢,并在2013年前后经历了先降低后增加的变化,表明城市在2013年部分新兴城镇融合,然后新兴了较少的新兴城镇,

城市发展的重心在东营市中部地区,以旧城区向周边扩张(图7(f))。

3.3.3 新兴城镇出现—融合型

从整体来说,潍坊市的各景观指数变化幅度较低(图8(a))。其中,景观形状指数增长幅度相对较高,为 5.39% ,反映出潍坊市的破碎程度有点提高,城镇数量增加;斑块数量和密度具有相近的变化趋势,即2016年之前显著增加,2016年之后快速下降,整体保持不变;相反,平均斑块面积2016年前后经历先降低后增加的趋势,整体以 4.04% 的速率增长,表明潍坊先出现新兴城镇,再进行城镇融合,整体城市的破碎程度增加,城区范围扩大,经济发展水平提高。潍坊市的城市面积扩张图(图8(d))反映出潍坊市发展的重心在中部地区,其他各区县也分散着较多的城镇,城市发展比较均衡。

淄博市的景观形状指数、边缘总长度和边缘密度、斑块密度等指标的变化趋势具有一定的相似性,即2014年有所降低,2015年缓慢增加,城市出现了新兴城镇,2016年和2017年降低,部分城镇融合,整体增长幅度较低;平均斑块面积的增幅相对较高(MGA为 3.14%),景观形状指数以 1.45% 的速度下降,其他各指数变化较低,表明城市的发展经历了新兴城镇出现、融合的阶段,城市的发展中心集中在淄博的中部地区(图8(e)),且城市的离散程度降低,经济发展相对较低。

与潍坊、淄博市的变化趋势相似,威海市的斑块数量、密度有着近乎一致的变化趋势,即在

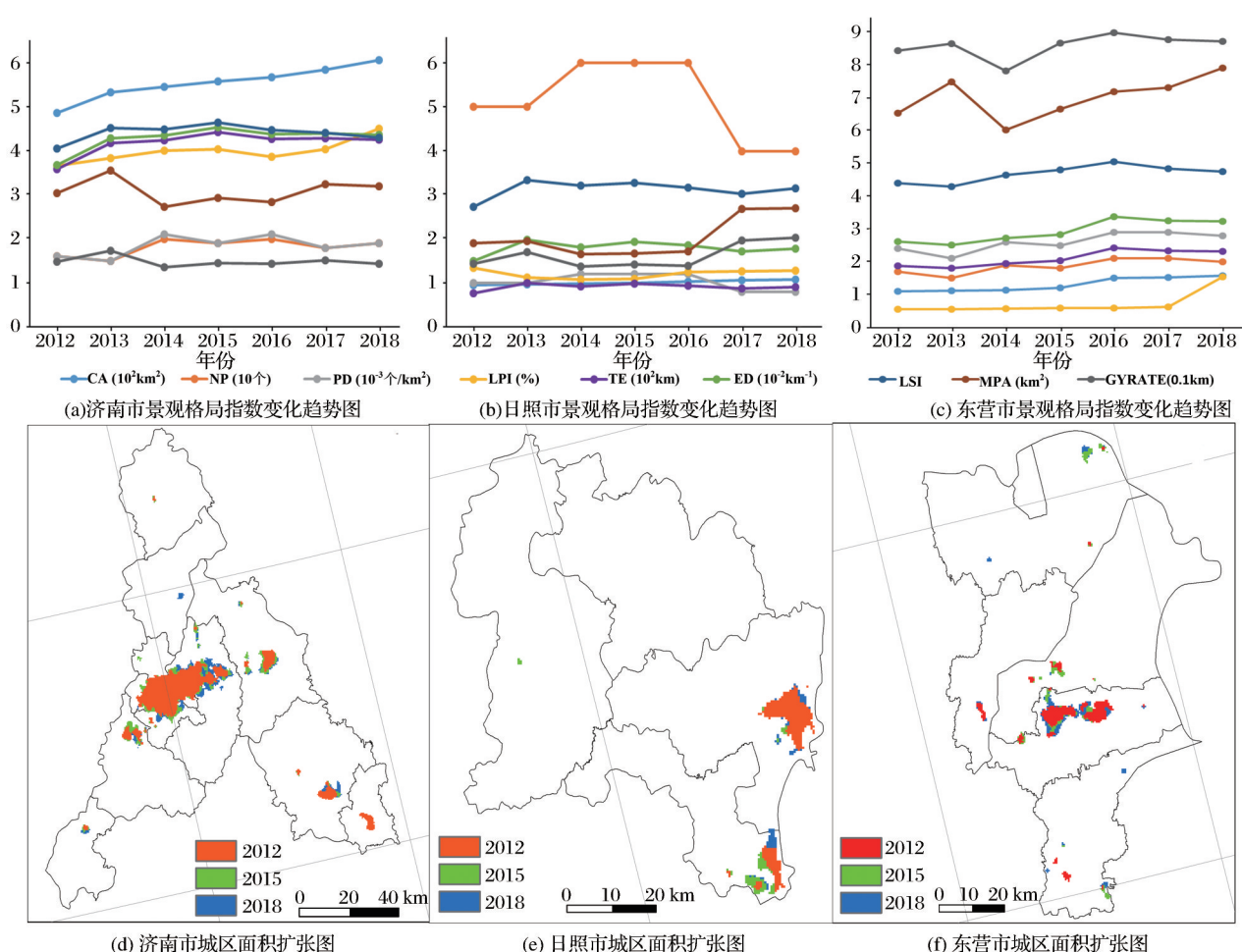


图7 旧城区扩张型城市景观格局指数变化趋势及建成区面积扩张

Fig.7 Changing trends in landscape pattern indices and expansion of built-up area in cities of expansion type of old urban

2012~2015年增加,2016年和2017年降低;景观形状指数、边缘总长度和边缘密度在2013~2014年有所降低,2015年前后先增加后降低,2017年之后显著增加;平均斑块面积和平均回旋半径均在2012~2015年降低,2016年后增加。综上所述,威海市出现了较多新兴城镇,部分城镇在发展的过程中进行了融合,城市化发展以城市的北部和东部沿海地区为发展的重心(图8(f))。

3.3.4 新兴城镇发展型

烟台市(图9(a))的斑块数量和密度有相似的变化趋势且增长幅度较快(MGA均为4.91%),边缘总长度和密度均以3.03%的速度增加,说明烟台市的新兴城镇数量增加,城市化进程加快;受斑块数量、总面积的影响,平均斑块面积和回旋半径均降低(MGA分别为-2.36%和-1.55%),说明烟台市新兴城镇的快速形成,城镇数量增加,城镇的破碎程度显著提高,城市发展迅速,属于典型的新兴城镇发展型城市。结合烟台市城区面积的扩张图(图

9(b))可得,烟台市发展的重心在北部沿海地区,且沿海出现了较多的新兴城镇,与景观格局指数的发展趋势具有较高的吻合度,城市化水平较高。

4 结论与讨论

4.1 结论

基于NPP-VIIRS夜间灯光遥感数据,采用参考比较法提取建成区域,并运用景观生态学中的景观指数方法对山东半岛城市群各城市的城镇空间特征进行分析,得到如下结论:

(1)整体来看,2012~2018年山东半岛城市群斑块总面积呈逐年递增的趋势(MGA为4.5%),斑块数量和斑块密度分别为1.95%和1.98%的速度增长,边缘总长度和边缘密度均以3.15%的速度增加,表明山东半岛城市群整体城区面积增长迅速,城市范围持续扩张,经济发展水平不断提高。

(2)从不同指标变化趋势来看,斑块总面积增长最快的是青岛和东营市,年均增长率分别为

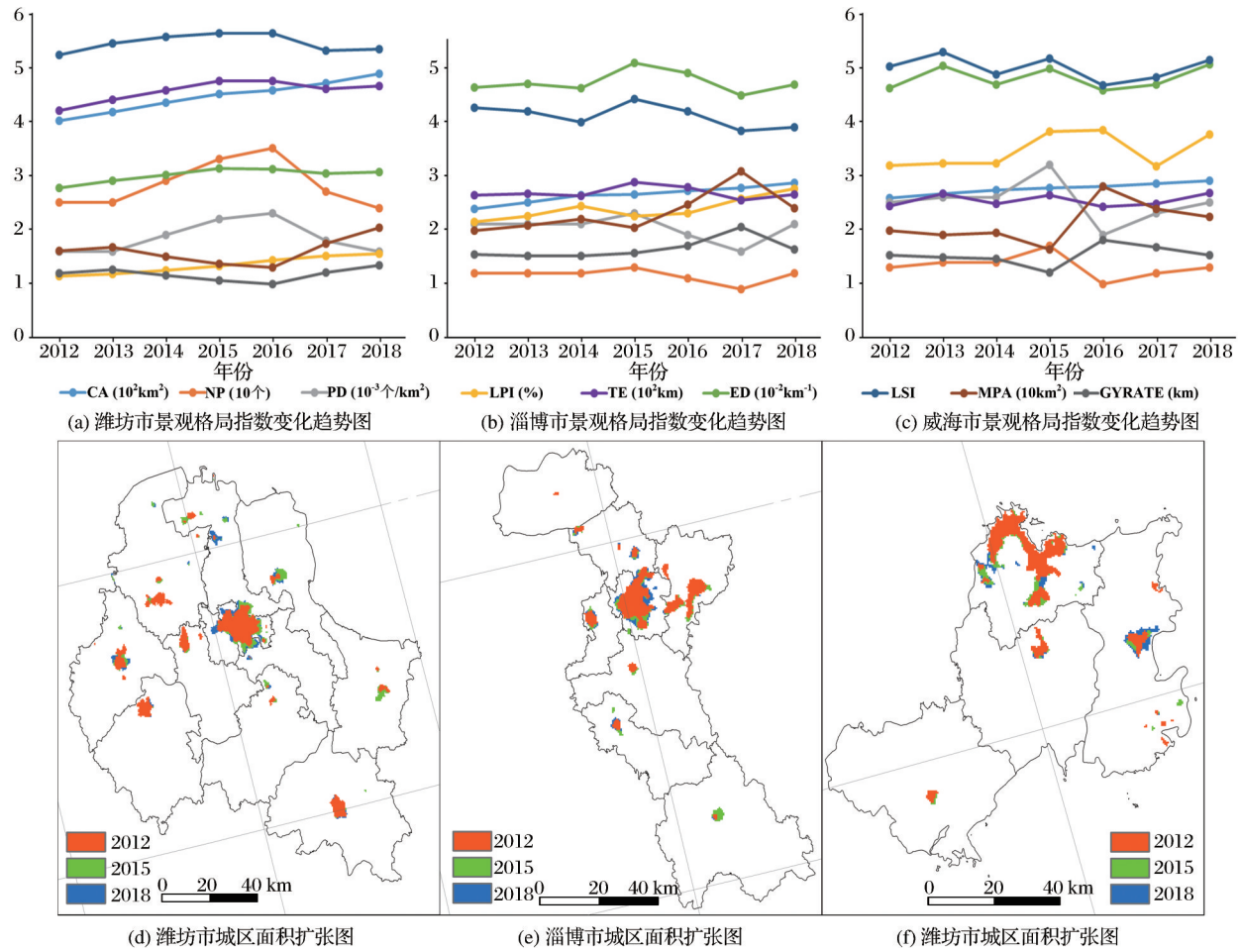


图8 新兴城镇出现一融合型城市景观格局指数变化趋势及建成区面积扩张

Fig.8 Changing trends in landscape pattern indices and expansion of built-up area in cities of emerging and integrated type of new towns

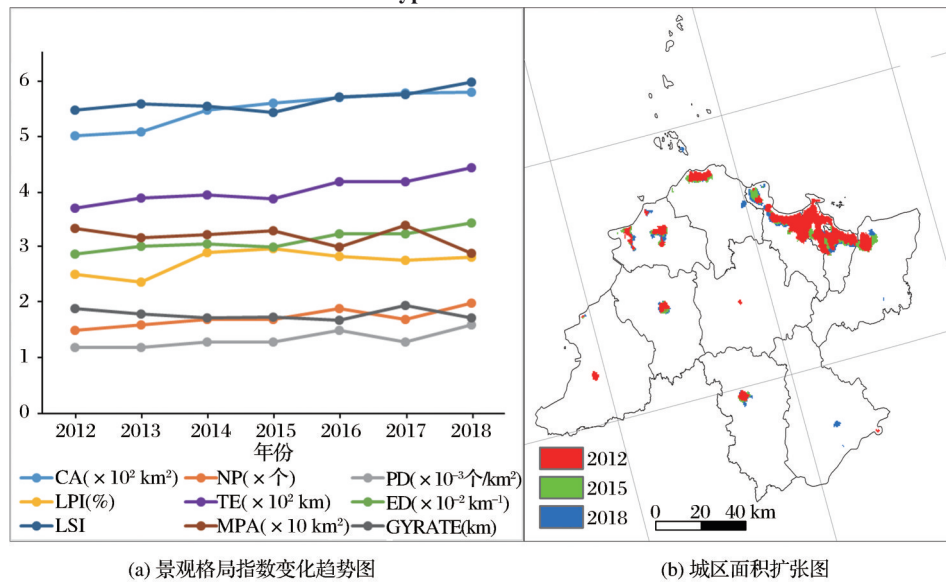


图9 烟台市景观格局指数变化趋势及建成区面积扩张

Fig.9 Changing trends in landscape pattern indices and expansion of built-up area in Yantai city

9.66%和6.01%,其余各市的增长速度位于[2%, 4%]之间,各城市均处于稳步增长阶段。青岛市的

斑块数量和密度增速最快(MGA分别为9.54%、8.55%),日照市的斑块数量和密度均以3.65%的速

率降低,降幅明显。景观形状指数整体增速缓慢,平均回旋半径在日照市具有较高的年均增长速度(MGA为5.99%)。

(3)从各城市发展特征的差异性来看,青岛市的平均斑块面积和回旋半径分别以0.56%和1.53%的速度降低,其他各指标均显著增加,表明青岛市各方面发展迅速,出现了较多的新兴城镇,城区面积不断扩大,为复合发展型城市。济南、日照和东营市的城区面积具有增长的趋势,斑块数量、景观形状指数等指标增长缓慢,反映了城市以旧城区为发展重心,逐渐向周边扩散,表现为旧城区扩张型城市的特征。新兴城镇出现—融合型城市包括潍坊、淄博和威海市,城市在2015、2016年前后经历了新兴城镇出现,城镇融合的阶段,城区面积增加。烟台市的斑块数量和密度均以4.91%的速度增长,边缘长度和密度均以3.03%的速度增加,平均斑块面积和回旋半径降低,说明烟台市出现较多的新兴城镇,城镇数量增加,属于新兴城镇发展型城市。

4.2 讨论

本文以山东半岛城市群作为研究区域,基于NPP-VIIRS夜间灯光数据,提取城市建成区的面积,选取9个景观格局指标进行城市扩张研究,分析整体及各城市的城市化发展特征,为决策者进一步优化城市发展方向提供了有效的建议。但实验结果与真实状况存在一定的误差,需要进行实验改进,主要包括以下3个方面:①针对原始灯光数据的时空缺失问题,本文采用的数据预处理方法具有一定误差,后期会选取时空协同、灰度预测模型、奇异谱分析、Hermite插值等多种插补方法,对比验证各方法的精确度;②基于参考比较法提取建成区面积,该方法受限于统计年鉴数据,本文2018年统计年鉴数据通过线性拟合计算而来,数据的准确性有待提高,统计年鉴数据出版后,会进行相应的更新处理;③由于NPP-VIIRS数据的时间序列较短,城市发展方向的研究结果缺乏一定的说服力,后期会结合其他影像数据,进行长时间序列的研究。

参考文献(References):

- [1] Xu Lihua. Spatial-temporal Evolution of Urban Expansion in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration based on NPP-VIIRS Data [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2019. [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.]
- [2] Chai Baohui, Li Peijun, Zhang Ruijie, *et al.* Urban Expansion Extraction Using Landsat Series Data and DMSP/OLS Night-time Light Data: A Case Study of Tianjin Area[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2016, 52(3): 475-485. [柴宝惠, 李培军, 张瑞洁, 等. 基于Landsat数据和DMSP/OLS夜间灯光数据的城市扩展提取: 以天津市为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2016, 52(3): 475-485.]
- [3] Small C. High Spatial Resolution Spectral Mixture Analysis of Urban Reflectance [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 88(1): 170-186.
- [4] Tan Minghong, Li Xiubin, Lv Changhe. Expansion of Construction Land in Large and Medium-Sized Cities in China in the 1990s and Its Occupation of Cultivated Land[J]. *Science in China, Ser.D*, 2004, 34(12): 1157-1165. [谈明洪, 李秀彬, 吕昌河. 20世纪90年代中国大中城市建设用地扩张及其对耕地的占用[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2004, 34(12): 1157-1165.]
- [5] Shu Song, Yu Bailang, Wu Jianping, *et al.* Methods for Deriving Urban Built-up Area Using Night-light Data: Assessment and Application [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26(2): 169-176. [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.]
- [6] Xue Dongqian, Wang Chuansheng. A Study on the Spatial Process for the Evolution of Urban Agglomerations and Optimal Land Use[J]. *Progress In Geography*, 2002, 21(2): 95-102. [薛东前, 王传胜. 城市群演化的空间过程及土地利用优化配置[J]. 地理科学进展, 2002, 21(2): 95-102.]
- [7] Long Xuanyao, Li Peijun. A Method of Urban Change Detection based on Image Segmentation[J]. *Geo-Information Science*, 2008, 10(1): 121-127. [龙玄耀, 李培军. 基于图像分割的城市变化检测[J]. 地球信息科学, 2008, 10(1): 121-127.]
- [8] Gan Bin, Yang Yun. The Study on Urban Built-up Change Information Extraction Method Using DMSP/OLS Data—A Case Study of Shaanxi Province[J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2014(3): 5-9. [甘斌, 杨耘. 基于DMSP/OLS数据的城市建成区变化信息提取方法——以陕西省为例[J]. 城市勘测, 2014(3): 5-9.]
- [9] Guo Han. LJ1-01 Scientific Experiment Satellite[J]. *Satellite Application*, 2018(7): 70. [郭晗. 珞珈一号科学试验卫星[J]. 卫星应用, 2018(7): 70.]
- [10] Zhong Liang, Liu Xiaosheng. Application Potential Analysis of LJ1-01 New Nighttime Light Data[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019(7): 132-137. [钟亮, 刘小生. 珞珈一号新型夜间灯光数据应用潜力分析[J]. 测绘通报, 2019(7): 132-137.]
- [11] Elvidge C D, Cinzano P, Pettit D R, *et al.* The Nightsat Mission Concept [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(12): 2645-2670. doi: 10.1080/01431160600981525.
- [12] Liu Zhifeng, He Chunyang, Zhang Qiaofeng, *et al.* Extracting the Dynamics of Urban Expansion in China Using DMSP-OLS Nighttime Light Data from 1992 to 2008[J]. *Landscape & Urban Planning*, 2012, 106(1): 62-72. doi: 10.1016/j.landurbplan.2012.02.013.
- [13] Li Jinggang, He Chunyang, Shi Peijun, *et al.* The Use of

- Multisource Satellite and Geospatial Data to Study the Ecological Effects of Urbanization: A Case of the Urban Agglomerations in Bohai Rim[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(1): 115-126.[李景刚, 何春阳, 史培军, 等. 基于DMSP/OLS灯光数据的快速城市化过程的生态效应评价研究——以环渤海城市群地区为例[J]. *遥感学报*, 2007, 11(1): 115-126.]
- [14] Yang Yang, He Chunyang, Zhao Yuanyuan, *et al.* Research on the Layered Threshold Method for Extracting Urban Land Using the DMSP/OLS Stable Nighttime Light Data[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, 16(4): 666-673.[杨洋, 何春阳, 赵媛媛, 等. 利用DMSP/OLS稳定夜间灯光数据提取城镇用地信息的分层阈值法研究[J]. *中国图象图形学报*, 2011, 16(4): 666-673.]
- [15] Yang Yang, Huang Qingxu, Zhang Liling. The Spatial-temporal Measurement on the Land Urbanization Level Using DMSP/OLS Nighttime Light Data——A Case Study of Bohai Rim[J]. *Economic Geography*, 2015, 35(2): 141-148, 168.[杨洋, 黄庆旭, 章立玲. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据的土地城镇化水平时空测度研究——以环渤海地区为例[J]. *经济地理*, 2015, 35(2): 141-148, 168.]
- [16] Fan J F, He H X, Hu T Y, *et al.* Estimation of Landscape Pattern Changes in BRICS from 1992 to 2013 Using DMSP-OLS NTL Images[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2019, 47(5): 725-735. doi: 10.1007/s12524-019-00963-1.
- [17] Fan Junfu, Ma Ting, Zhou Chenghu, *et al.* Changes in Spatial Patterns of Urban Landscape in Bohai Rim from 1992 to 2010 Using DMSP-OLS Data[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2013, 15(2): 280-288.[范俊甫, 马廷, 周成虎, 等. 1992~2010年基于DMSP-OLS图像的环渤海城市群空间格局变化分析[J]. *地球信息科学学报*, 2013, 15(2): 280-288.]
- [18] Mi Xiaonan, Bai Linyan, Tan Xuehang, *et al.* A New Method of Extracing Areas of Center City Regions based on DMSP/OLS Data[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2013, 15(2): 255-261, 279.[米晓楠, 白林燕, 谭雪航, 等. 基于DMSP/OLS数据的城市中心城区提取新方法[J]. *地球信息科学学报*, 2013, 15(2): 255-261, 279.]
- [19] Liao Weijie, Huang Xuli, Wan Yuanyuan. Spatial Compactness and Differentiation of Urban Agglomeration in Shandong Peninsula[J]. *Taiwan Agricultural Research*, 2018, 155(6): 78-83.[廖伟杰, 黄旭丽, 万媛媛. 山东半岛城市群空间紧凑度测度与空间分异特征[J]. *台湾农业探索*, 2018, 155(6): 78-83.]
- [20] Li Mi, Wang Chengxin, Ji Yu, *et al.* Spatio-temporal Characteristics and Changing Mechanism of Construction Land Structure in Shandong Peninsula Urban Agglomerations[J]. *World Regional Studies*, 2018, 27(4): 108-117.[李咪, 王成新, 姬宇, 等. 山东半岛城市群建设用地结构的时空特征及变化机理研究[J]. *世界地理研究*, 2018, 27(4): 108-117.]
- [21] Liu Yueqing, Sun Xihua, Li Cuiyan. The Harmonious Development of Social Economy, Resources and Environment——A Case Study of Shandong Peninsula City Group[J]. *Journal of Environmental Management College of China*, 2019, 29(2): 56-59.[刘曰庆, 孙希华, 李翠艳. 社会经济与资源环境的协调发展——以山东半岛城市群为例[J]. *中国环境管理干部学院学报*, 2019, 29(2): 56-59.]
- [22] Ren Yaping, Zhao Minghua, Xu Xin, *et al.* Evaluation of Green Urbanization Level and Influence Factors of Shandong Peninsula Urban Agglomeration[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47(16): 63-67.[任亚平, 赵明华, 徐鑫, 等. 山东半岛城市群绿色城镇化水平评价与影响因素分析[J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(16): 63-67.]
- [23] Liang Kai. Research on Urban Extension Pattern Evolution of Shandong Peninsula Urban Agglomeration[D]. Ji'nan: Shandong Normal University, 2015.[梁凯. 山东半岛城市群城镇空间扩展格局演化研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2015.]
- [24] Liu Fansheng. Research on Spatial Distribution of Shandong Peninsula Urban Agglomeration[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Finance and Economics, 2013.[刘凡胜. 山东半岛城市群空间布局研究[D]. 兰州: 兰州商学院, 2013.]
- [25] Zhao Shanshan. Ecological Suitability Evaluation of Shandong Peninsula Urban Agglomeration based on Grey Relation Analysis[D]. Shanghai: East China Normal University, 2010.[赵珊珊. 基于灰色关联分析的城市生态适宜度评价研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2010.]
- [26] Mills S, Weiss S, Liang C. VIIRS Day/night Band (DNB) Stray Light Characterization and Correction[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2013, 8866(11): 350-354. doi: 10.1117/12.2023107.
- [27] Shi Q, Xi S, Chang Y C, *et al.* Assessment of Straylight correction performance for the VIIRS Day/Night Band Using Dome-C and Greenland under Lunar Illumination[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(21): 1-19. doi: 10.1080/01431161.2017.1338786.
- [28] Chen Mulin, Cai Hongyan. Interpolation Methods Comparison of VIIRS/DNB Nighttime Light Monthly Composites: A Case Study of Beijing[J]. *Progress in Geography*, 2019, 38(1): 126-138.[陈慕琳, 蔡红艳. VIIRS/DNB夜间灯光月度产品插补方法对比——以北京为例[J]. *地理科学进展*, 2019, 38(1): 126-138.]
- [29] NGCC. National Geomatics Center of China [DB/OL], <http://www.ngcc.cn/ngcc/html/1//391/392/16114.html>, 2018-10-20, 2019-4-10.
- [30] Shandong Provincial Bureau of Statistics. Shandong Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistical and Publication Bureau, 2013-2018.[山东省统计局. 山东统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013-2018.]
- [31] Zhou Yi, Chen Ying, Liu Yang, *et al.* Generation and Verification of NPP-VIIRS Annual Nighttime Light Data[J]. *Remote Sensing Information*, 2019, 34(2): 62-68.[周翼, 陈英, 刘洋, 等. NPP-VIIRS年度夜间灯光数据的合成方法与验证[J]. *遥感信息*, 2019, 34(2): 62-68.]
- [32] Zhong Liang, Liu Xiaosheng, Yang Peng. Method for SNPP-VIIRS Nighttime Lights Images Denoising[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019(3): 21-26.[钟亮, 刘小生, 杨鹏. SNPP-VIIRS夜间灯光影像去噪方法研究[J]. *测绘通*

- 报, 2019(3): 21-26.]
- [33] Ma Ting, Zhou Chenghu, Tao Pei, *et al.* Responses of Suomi-NPP VIIRS-derived Nighttime Lights to Socioeconomic Activity in China's Cities[J]. *Remote Sensing Letters*, 2014, 5(2): 165-174. doi: 10.1080/2150704X.2014.890758.
- [34] He C Y, Li J G, Jing C, *et al.* The Urbanization Process of Bohai Rim in the 1990s by using DMSP/OLS Data[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2006, 16(2): 174-182. doi: 10.1007/s11442-006-0205-0.
- [35] Zhao Xiaowei, Meng Zhiguo, Zheng Xingming, *et al.* Research on Landscape Spatial Pattern Estimation of Cities in Northeast China Using Nighttime Luminosity Data[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, 44(4): 72-80.[赵晓伟, 孟治国, 郑兴明, 等. 夜间灯光数据的东三省城市群发展特征研究[J]. *测绘科学*, 2019, 44(4): 72-80.]
- [36] Tong Biao, Shen Wei. Object-oriented Landsat 8 Image of the City Proper Extraction Method Research[J]. *Journal of Liaoning Provincial College of Communications*, 2017, 19(2): 21-25.[佟彪, 沈伟. 面向对象的Landsat 8影像城市建成区提取方法研究[J]. *辽宁省交通高等专科学校学报*, 2017, 19(2): 21-25.]
- [37] Wang Xiaohui. Urban Expansion in China over the Past 30 Years Detected Using DMSP/OLS Nighttime Light Data [D]. Nanjing: Nanjing University, 2013.[王晓慧. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据的中国近30年城镇扩展研究[D]. 南京: 南京大学, 2013.]

Development Characteristics Estimation of Shandong Peninsula Urban Agglomeration Using VIIRS Night Light Data

Li Guihua¹, Fan Junfu¹, Zhou Yuke², Zhang Yue¹

(1.School of Civil and Architectural Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2.Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Nature Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: NPP-VIIRS night lighting data is a stable data source for the study of urban development and change on medium and large scale. Based on the night lighting data of NPP-VIIRS from 2012 to 2018, taking Shandong Peninsula urban agglomeration as the research object, extracting urban built-up area patches by reference comparison method and selecting nine landscape pattern indices to quantitatively analyze the urbanization development characteristics of Shandong Peninsula urban agglomeration. The results showed that: ① As a whole, the total area of patches in Shandong Peninsula increased at a rate of 4.5%, the total length and density of the edges increased by 3.15% annually, and the number and density of patches increased rapidly (1.95% and 1.98%, respectively), indicating that the overall urban area of Shandong Peninsula urban agglomeration increased rapidly and the urban area continued to expand. ② According to the changing trend of different indicators, qingdao and dongying cities (9.66% and 6.01% respectively) had the fastest growth in the total area of patches; qingdao had the fastest increase in the number and density of patches (9.54% and 8.55% respectively), and rizhao had a significant decrease in the number and density of patches at the rate of 3.65%; the overall growth rate of landscape shape index was slow; the average radius of gyration had a high annual growth rate in rizhao city (5.99%). ③ From the differences in the development characteristics of various cities, the average patch area and gyration radius of qingdao decreased by 0.56% and 1.53% respectively, while other indicators increased significantly, indicating that there were more emerging towns in qingdao and the urban area continued to expand. Urban areas in jinan, rizhao and dongying cities grew rapidly, and the number of patches, landscape shape index and other indicators grow slowly. The urban development of jinan, rizhao and dongying cities is dominated by the expansion of old urban areas. Around 2015 and 2016, weifang, zibo and yantai experienced the emergence of emerging towns and urban integration, with rapid urban development. Generally speaking, the urbanization of Shandong Peninsula urban agglomeration develops rapidly, but the spatial difference is obvious.

Key words: NPP-VIIRS; Shandong Peninsula Urban Agglomeration; Reference comparison method; Landscape pattern indices