DOI: 10.20103/j.stxb.202403310676

李沐森,钱雨果,郭辰萌,周伟奇,韩立建,王伟民.基于路网斑块的城市建成区制图新方法.生态学报,2024,44(24):10989-11003. Li M S, Qian Y G,Guo C M, Zhou W Q,Han L J, Wang W M.A new method of urban built-up area mapping based on road network patches.Acta Ecologica Sinica,2024,44(24):10989-11003.

基于路网斑块的城市建成区制图新方法

李沐森^{1,2},钱雨果^{1,2,*},郭辰前^{1,2},周伟奇^{1,2,3},韩立建^{1,2},王伟民^{4,5}

1 中国科学院生态环境研究中心,城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085

2 中国科学院大学,北京 100049

3 中国科学院生态环境研究中心,北京城市生态系统研究站,北京 100085

4 深圳市环境监测中心站,深圳 518049

5 广东大湾区区域生态环境变化与综合治理国家野外科学观测研究站,深圳 518049

摘要:城市生态学研究通常需要明确的城市边界,但现有研究中使用不同像元大小的遥感影像划分城市边界,缺乏统一的城市 制图单元,导致不同遥感数据源量化的城市边界缺乏可比性,限制了城市生态环境的分析与对比。因此,提出一种基于城市路 网斑块的建成区提取方法,通过统一制图单元提升城市边界提取结果的可比性。该方法基于路网和高分辨率影像分割出路网 斑块,结合多源遥感影像的信息提取城市建成区。结果表明,新方法显著修正了建成区提取结果的破碎化、边缘锯齿化和形状 不规则问题,可有效避免因数据源不同导致的不可比性。此外,新方法能够将建成区提取的总体精度提升 2%—4%。基于路网 单元的建成区提取方法能够更加准确和标准化地提取城市边界,为城市生态学研究提供了技术支撑。

关键词:建成区边界;路网斑块;景观格局;多源数据

A new method of urban built-up area mapping based on road network patches

LI Musen^{1,2}, QIAN Yuguo^{1,2,*}, GUO Chenmeng^{1,2}, ZHOU Weiqi^{1,2,3}, HAN Lijian^{1,2}, WANG Weimin^{4,5}

Sate Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environment, Chinese Academy of sciences, Beijing 100085, China
 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Beijing Urban Ecosystem Research Station, Research center for Eco-Environmental Sciences, Beijing 100085, China

4 Shenzhen Environmental Monitoring Center, Shenzhen 518049, China

5 National Field Scientific Observation and Research Station of Regional Ecological Environment Change and Comprehensive Management in Guangdong Greater Bay Area, Shenzhen 518049, China

Abstract: Urban ecology research plays a crucial role in understanding the intricate relationships between urban landscapes and their ecological effects. A fundamental requirement for this type of research is the establishment of clear and consistent urban boundaries. Previous studies commonly used remote sensing images to map these urban boundaries. Due to the varying pixel sizes of different types of images, significant discrepancies arise in how urban boundaries are delineated. This lack of a standardized mapping unit poses substantial challenges, as it diminishes the comparability of urban boundaries derived from different pixel sizes. Consequently, this inconsistency can affect analyses and comparative studies of urban ecological environments, undermining the robustness of findings in urban ecology. In response to these challenges, we propose a novel method for extracting built-up areas based on urban road networks. This innovative approach aims to enhance the comparability and accuracy of urban boundaries by establishing a unified mapping unit. The methodology begins with the

收稿日期:2023-03-31; 采用日期:2024-09-23

基金项目:国家重点研发计划(2022YFF1301101);国家自然科学基金(42261144742,42271102);国家野外站建设项目(SZDL2023000962)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: ygqian@ rcees.ac.cn

segmentation of road networks using high-resolution imagery. This segmentation is then complemented by integrating information from multiple remote sensing data sources, which enables more precise identification of urban built-up areas. The outcomes of this research indicate that the new method substantially improves extraction results by addressing common issues associated with built-up area delineation, such as fragmentation, jagged edges, and irregular shapes. These improvements are critical as they enhance the visual and analytical clarity of urban boundaries, making them easier for researchers and urban planners to use. Moreover, by standardizing the mapping units, the method effectively mitigates noncomparability issues that often arise from using diverse pixel sizes. Importantly, the overall accuracy of built-up area extraction is found to increase by 2% to 4% compared to traditional methods. The road network-based extraction technique not only refines the process of delineating urban boundaries but also strengthens the foundations of urban ecology research. With more accurately defined urban boundaries, researchers can conduct analyses that yield valuable insights into the interactions between urbanization and ecological processes. This has profound implications for urban planning, as it allows for better-informed decision-making and resource allocation. In summary, the proposed method represents a significant advancement in urban ecology research, promoting greater consistency, accuracy, and comparability in urban boundary delineation. This innovation not only enhances our understanding of urban ecological patterns, processes, functions, and services but also supports sustainable urban management practices, ultimately contributing to the resilience and sustainability of cities in an era of rapid urbanization.

Key Words: built-up area boundary; road network patch; landscape pattern; multi-source data

城市建成区是人类活动最集中、生态功能退化最严重、人与自然矛盾最突出的区域。随着全球城市化进程的加快,建成区的扩张不断侵占自然景观^[1-4],导致了许多环境问题^[5-6]。大量有关生态系统服务^[1]、热岛、空气污染、绿度的生态学研究在城市中展开^[7-11]。因此,准确量化城市建成区边界对城市生态学研究具有重要意义。

已有研究常用多光谱数据、夜间灯光数据和其它社会经济数据,基于像元提取建成区边界^[11-22]。然而不同的数据具有不同的分辨率,例如常用的多光谱数据分辨率有 Modis 的 500m、Landsat 的 30m、高分系列的 2m 和 10m 以及亚米级;而社会经济数据例如夜光数据分辨率有来源于 DMSP/OLS 的 1km,及 NPP/VIIRS 的 500m,POI 数据则为矢量。基于低分辨率数据提取的建成区常常出现锯齿状边界,并且容易与农村区域混 清;基于高分辨提取的建成区常导致建成区的破碎和不连续^[23-24]。基于 POI 核密度提取的建成区边界常与 实际情况相差较大^[25]。由此可见,利用不同空间分辨率遥感影像提取的建成区具有不同的制图单元大小,导 致提取的建成区边界缺乏可比性,对后续城市范围的认识和景观格局的分析造成影响。此外,有研究表明在 像元水平进行多数据的融合会导致空间匹配上的错误,提取到实际不存在的区域^[26],进一步扩大了建成区边 界与真实边界的差异。

为了解决以上问题,本文提出了一种基于路网斑块的城市建成区制图新方法。路网斑块是由城市道路形成的自然分割单元^[27-28],它不仅能准确地反映城市的实际形状,还提供了在路网斑块水平融合多源数据的可能性。本文基于路网斑块,利用不同种类的数据组合提取了建成区,并将这些结果分别与在像元水平上的提取结果进行对比。研究还通过引入景观格局指数对这些结果和真实建成区之间的差异进行评价,旨在为城市的规划管理和城市生态学研究提供边界支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

研究选取以"摊大饼"形式扩张的北京市^[29]和"多核心"发展模式的深圳市^[30]两个典型城市,以检测本 方法的通用性。北京是我国政治中心和文化中心,东与天津相连,其余均与河北省相邻,行政区面积为 16410km²(图1)。北京建城距今已有 3000 多年,改革开放以来北京城市化发展迅速,常住人口从 871.5 万人 增长到现在的 2184.3 万人,GDP 从 108.8 亿元增长到 43760.7 亿元。北京市的发展规划,经历了多次的修正, 从工业化到去工业化,从最初的"摊大饼"式发展到如今的构建"一核一主一副、两轴多点一区"的城市空间结构,生态问题逐步得到解决。

深圳是我国南部海滨城市,地处广东省南端,珠江口东岸,行政区面积为1997km²(图1)。深圳市是我国 改革开放之后,城市化速度最快、程度最高的城市。据深圳市统计年鉴记录,从1979年到2023年,深圳市常 住人口由31.41万人增长到1766.18万人,GDP从1.96亿元增长为32387.68亿元。与北京相比,深圳市建成 区比较分散,面积较小但人口更加集中,呈明显的多核心格局。然而由于国土空间有限,人口大量涌入,城市 发展与自然资源不足的矛盾突出。因此,精准的建成区数据可以为北京市及深圳市的城市生态学研究起到支 撑作用。



Fig.1 Study area

I. 廊坊市,II.天津市,III.珠海市,IV.香港特别行政区,V.澳门特别行政区

1.2 数据来源

24 期

研究中使用的数据主要有:(1)高分辨率遥感影像;(2)夜间灯光影像;(3)中等分辨率遥感影像;(4)矢量数据,包括高德地图 POI 矢量数据和 OSM 路网络数据(表1)。高分数据和路网数据用于路网斑块的分割,夜间灯光数据、中等分辨率遥感数据和 POI 数据用于提取建成区。

	Table 1	Data introductio	n			
数据	传感器	数据特征	年份	数据来源		
Data	Sensor	Data features	Year	Data sources		
高分辨率遥感影像 High resolution remote sensing image	GF—2	1m	2020	https://data.cresda.cn/#/2dMap		
夜间灯光影像 Nighttime light image	NPP/VIIRS	500m	2022	https://ngdc.noaa.gov/		
中等分辨率遥感影像 Medium resolution remote sensing image	Landsat-8 OLI Landsat-9 OLI	30m	2021 2022	https://www.gscloud.cn/		
兴趣点 Point of interest	—	矢量	2022	https://lbs.amap.com/		
路网 Road network	—	矢量	2020	https://www.openstreetmap.org/		

表1 数据介绍

中分数据选择夏季无云的影像(云量<5%)。所有数据均在 ArcMap 10.8 中按研究区进行剪裁,并转换成

WGS-1984 坐标系。计算过程在 ArcMap 平台中进行,在融合多源数据时将不同分辨率的栅格数据重采样为成常用的 30m 分辨率。

2 研究方法

基于路网斑块提取建成区分两步,第一步是利用路网和高分数据分割路网斑块,第二步是在斑块水平提 取建成区。研究基于夜间灯光数据、POI数据以及将多光谱、夜间灯光和 POI数据融合得到三种建成区提取 结果。接下来在像元水平上也分别按此数据组合提取建成区,用于与斑块水平的建成区提取结果进行对比。 其中基于夜光数据的建成区提取结果按照夜光数据的分辨率得出建成区范围(500m),基于 POI数据的建成 区提取结果得到建成区边界矢量,基于多源数据融合的建成区提取结果按照常用的 30m 分辨率得到建成区 范围。最后对这些结果进行精度验证和景观格局指数分析,评价基于路网斑块提取建成区方法的适用性。 2.1 结合路网和遥感影像的路网斑块分割

研究利用 OSM 路网矢量和高分遥感影像,结合面向对象的算法开展了路网斑块的提取。在路网与高分 影像空间配准的基础上,通过以下 4 个步骤划分了路网斑块:(1)加载所有等级的道路数据,利用 vector-based segmentation 算法,划分出最为精细的路网斑块;(2)通过 remove 算法去除小面积的破碎路网斑块,并将其合 并到相邻的大斑块中,得到初步的路网斑块;(3)通过 morphology 算法识别形状复杂的路网斑块,并提取复杂 斑块的枝杈;(4)通过 remove 算法将枝杈合并到相邻的路网斑块中,得到最终路网斑块结果(图 2)。



图 2 路网斑块的划分流程 Fig.2 Division process of road patches

所有的算法都在 Trimble eCognition 软件平台中完成,四个步骤的具体分析方法和参数如下:

(1) vector-based segmentation 算法以道路矢量来划分路网斑块,且保持与高分影像的像元对齐(图3),通 过将线矢量数据的栅格化,实现矢量数据与栅格数据的融合。该方法可以结合已有各个等级的道路数据,划 分出大小各异的斑块,为后面路网斑块的提取和优化奠定基础。

(2)在算法1提取的精细路网斑块的基础上,利用 remove 算法删除细碎的非路网斑块,且将细碎斑块合并到具有最大共同边界的相邻斑块中。本研究中,利用试错分析法,最终选择长宽比≥6的斑块、宽度<100m的斑块,以及面积小于 20hm²的斑块应用 remove,得到了初步的路网斑块结果(图 4,其中白色为目标斑块,红 色和空值为有待合并的细碎斑块)。



图 3 利用 vector-based segmentation 算法将矢量道路与栅格影 像融合







(3)针对所得到的初步划分结果存在形状不规整的问题(图 5),本研究利用 morphology 工具对初步的路 网斑块进行形态学处理。具体来说,利用 160m×160m 的正方形掩膜对每一个斑块进行分析,若斑块可以完全 包含掩膜则保留,若不能完全包含掩膜,则将不能包含掩膜的区域分离成临时斑块(图 5,紫色为临时斑块)。

(4)利用 remove 算法删除临时斑块,且将临时斑块合并到具有最大共同边界的相邻斑块中。得到了最终的路网斑块结果(图 6,其中白色为路网斑块,紫色为待合并的临时枝杈斑块)。



图 5 利用 morphology 工具对初步的路网斑块进行形态学处理 Fig.5 Morphology tool is used to deal with the preliminary road patches morphologically



图 6 利用 remove 算法删除临时斑块 Fig.6 Delete temporary plaque by remove algorithm

2.2 建成区提取

(1)基于夜光数据提取建成区

阈值法是一种利用夜间灯光亮度或相关城市指数提取建成区研究中经常使用的方法,该方法容易操作且 准确性较高^[31]。本文中在像元水平提取建成区时采用参考数据比较法确定提取建成区的阈值,参考数据在 下文给出。在斑块水平提取建成区时,先计算每个路网斑块的夜光亮度(DN)均值,然后按照每个斑块平均亮 度的大小对每个路网斑块排序,最后累加每个路网斑块的面积,直到与参考建成区面积差距最小。

(2) 基于 POI 数据提取建成区

在斑块水平提取建成区时,先计算每个路网斑块中 POI 的密度(POI 数量/斑块面积),以此作为该斑块 的 POI 数据特征。然后再利用上一步的统计方法对路网斑块排序,最后得到提取建成区的阈值。在像元水 平提取建成区时本文应用核密度估计法,该方法常被用于利用 POI 数据提取建成区的研究中^[32-33]。此方法 需要先对 POI 数据进行核密度分析以得到稳定的密度分布图,搜索半径影响核密度分析结果的稳定性^[34],不

$$POI_{i} = \frac{1}{n\pi R^{2}} \times \sum_{j=1}^{n} K_{j} \left(1 - \frac{D_{ij}^{2}}{R^{2}} \right)^{2}$$
(1)

式中, POI_i 为点 *i* 的核密度值; K_i 表示点 *j* 的权重; D_i 表示点 *i* 和 *j* 的欧氏距离; R 表示区域的带宽($D_i << R$); n 表示点 j 在区域中的数量。

$$\lim \frac{d(\Delta S_d^{1/2})}{dd} > r \tag{2}$$

式中, $\Delta S_{4}^{1/2}$ 为 POI 核密度等值线的值与与闭合等值线理论面积 S_{4} 的理论半径的增量; r为城市空间结构变化 的容许值。

(3)基于多源数据融合据提取建成区

夜光数据存在光溢出效应,利用夜光数据提取建成区容易造成边界部分的错分,已有的研究通过引入 NDVI 数据抑制边缘的亮度溢出^[35]。此外,许多研究者通过融合夜光数据和 POI 数据,增加对城市社会经济 信息和人类活动的描述^[17]。由于 NDVI、NTL 和 POI 密度值在数值上存在较大差异,本研究运用"几何均值 法"在斑块水平进行数据融合,提出基于路网斑块的 NDVI 和 POI 修正的夜光城市指数(NDVI and POI adjust NTL urban index based on patch, P-NPANUI)。几何均值法是一种被广泛使用的数据融合方法,可以有效消除 数据之间的极值影响,保留原始信息。经几何均值计算后,有效弥补了部分斑块数据缺失的问题。在斑块水 平提取建成区时,计算每个路网斑块的 P-NPANUI 指数,以此作为特征数据。然后再对所有的路网斑块按 P-NPANUI 指数大小进行排序,同样通过统计的方法寻找与参考数据面积差距最小的临界点,从而确定提取建 成区的最佳阈值。P-NPANUI 指数相关公式如下所示:

$$NDVI = \frac{B5 - B4}{B5 + B4}$$
(3)

$$P-NPANUI_{i} = \sqrt[3]{(1 - NDVI_{i}) \times NTL_{i} \times POI_{i}}$$
(4)

式中, P-NPANUI, 表示斑块 i 的指数值; NDVI, 表示斑块 i 的 NDVI 均值; NTL, 表示斑块 i 的亮度均值; POI, 表示 斑块 i 的兴趣点密度均值。

在像元水平提取建成区时,计算每个像元的 NPANUI 指数,然后利用参考数据比较法确定提取建成区的 阈值,相关公式如下所示:

$$NPANUI_{i} = \sqrt[3]{(1 - NDVI_{i}) \times NTL_{i} \times POI_{i}}$$
(5)

式中, NPANUI, 表示像元 i 的指数值; NDVI, 表示像元 i 的 NDVI 值; NTL, 表示像元 i 的亮度值; POI, 表示像元 i 的兴趣点核密度值。

2.3 参考边界提取

参考相关文献[36]和《城市(县城)和村镇建设统计报表制度》(2021版),本文对建成区从生物物理层面 和社会经济层面两方面定义。在生物物理层面,建成区指的是建设集中连片的地区。在社会经济层面,建成 区指的是人口集中、公共设施完善,能够满足城市多样化的城市功能和需求的区域。由于已有的公开数据存 在城市定义不全面和分辨率不一致的问题,本文选用目视判读人机交互的方式,手动绘制建成区边界。目视 判读是专业人员通过直接观察或借助其它辅助在遥感影像上获取特定目标地物信息的过程[37-38]。经人工绘 制的北京建成区面积为1461km²,深圳市建成区面积为961km²。

2.4 精度验证及景观指数分析

2.4.1 精度验证

混淆矩阵是表示分类为某一类点的个数与实际为该类别点的数量的比较阵列,基于混淆矩阵可以计算出 生产者精度、用户精度、总体精度和 Kappa 系数。用户精度又称错分精度,用于反映分类结果中分类正确的概 率;生产者精度又称漏分精度,用于反映已知地面类型被分类正确的概率;总体精度表示分类的结果与参考数据的总体一致程度;Kappa系数用于检验分类结果与实际结果的一致性,其系数越接近1则分类可信度越高。 2.4.2 景观指数分析

景观格局指数是反映景观结构组成和空间配置的定量指标,由于混淆矩阵难以验证提取结果的空间分布 特征,引入景观格局指数能够得到更全面而准确的评价结果。景观格局指数多达数百种,但许多指数的意义 相近^[39-40]。研究针对建成区这一景观,从建成区斑块的分布、形状和边界这三种角度选取了景观破碎度、周 长面积比、边缘密度和景观形状指数这几种指标来描述建成区的景观格局信息。

研究种所使用的景观格局指数均由 Fragstats 4 软件计算得出。计算公式由表 2 列出^[41-42]。

Table 2 Landscape pattern index description						
景观格局指数	描述	计算公式				
Landscape pattern index	Describe	Formula				
景观破碎度	景观破碎度表征景观被分割的破碎程度,反映景观空间	N_i				
Landscape fragmentation	结构的复杂性(单位:个/km ²)	$\overline{A_i}$				
周长面积比	是一类景观的自身周长和其面积之比,可以看作是对景	C_i				
Perimeter-Area Ratio(PARA)	观形状复杂程度的简单测度	$\overline{A_i}$				
边缘密度	用于揭示景观或类型被边界分割的程度(单位 m/ha)	$\frac{E}{2}$ × 100				
Edge density(ED)		A				
景观形状指数	八七星洞光刑亚华的有九田帝	0.25E				
Landscape shape index(LSI)	分析京观尖型形队的复杂性度	\sqrt{A}				

表 2 景观格局指数描述

*N*_{*i*} 表示景观类型为*i*的斑块数量;*A*_{*i*} 表示景观型为*i*的斑块面积;*C*_{*i*} 表示景观型为*i*的斑块周长;*E* 表示景观内斑块边界总长度;*A* 表示整 个景观的面积

3 结果与分析

3.1 路网斑块划分结果

经统计北京市路网斑块划分结果数量为 15219 个,平均面积为 0.88km²(图 7),斑块的分布呈现中心密度 高,四周密度降低的趋势。主要原因在于主城区外围存在大量的自然空间,这部分路网斑块稀疏,斑块面积 大。在延庆、怀柔、密云等地的城区出现斑块密度增大的现象,但很快降低。由此可知,北京市路网斑块在城 市化程度高的地区密度高,单位斑块面积小。城市化程度低的地区斑块密度低,单位斑块面积大,与北京市 "摊大饼"式的建设格局基本相符。

深圳路网斑块数量为4598个,平均面积约为0.43km²(图7)。从斑块的空间分布来看,深圳市南部斑块 数量最多,单个斑块面积小;中部与东部斑块密度相似,单个斑块面积稍大;西南斑块密度低,单个斑块面积较 大。城市化程度高的地区斑块数量多,城市化程度低的地区斑块数量少。斑块的空间分布基本符合深圳市 "多点多核心"的格局。

3.2 建成区提取结果及精度

北京市和深圳市建成区提取结果如图 8、图 9 所示。北京市的 NTL、P-NTL、POI、P-POI、NPANUI、P-NPANUI 结果阈值分别为 23.33、20.20、200、108.44、12.40 和 12.43,深圳阈值分别为 24.58、23.18、300、184.10、15.53 和 14.97。除基于 POI 数据的 Density-Graph 分析法划定的北京市和深圳市面积为 934km²和 766km²以外,其余结果面积均接近参考边界的面积。精度评价是验证结果重要步骤,实验采用混淆矩阵对精度进行评价。在研究区按照人工划分的城市和非城市两个区域分别选取 1000 个随机点,北京和深圳两地的精度在表 3、表 4 中列出。



图 7 北京和深圳路网斑块分割结果

Fig.7 Segmentation results of road patches in Beijing and Shenzhen

Table 3 Accuracy evaluation of extraction results in Beijing								
方法 Method			非建成区/% Non-built up area	建成区/% Built up area	总体精度/% Overall accuracy	卡帕系数 Kappa		
像元 Pixel	NTL	PA	98	81	88	0.77		
		UA	80	98				
斑块 Patch	P-NTL	PA	98	83	90	0.80		
		UA	83	98				
像元 Pixel	POI	PA	99	58	77	0.55		
		UA	66	99				
斑块 Patch	P-POI	PA	99	84	90	0.81		
		UA	83	99				
像元 Pixel	NPANUI	PA	99	86	92	0.84		
		UA	86	99				
斑块 Patch	P-NPANUI	PA	89	90	94	0.88		
		UA	99	99				

表 3 北京地区提取结果精度评估

PA:生产者精度 Producer's accuracy;UA:用户精度 User's accuracy;NTL:夜间灯光指数 Nighttime light index;P-NTL:基于斑块的夜间灯光指数 Nighttime light index base on patch;POI:兴趣点 Point of interest;P-POI:基于斑块的兴趣点密度估计 Density estimation based on patch;NPANUI: NDVI 和 POI 修正的夜光城市指数 NDVI and POI adjust NTL urban index;P-NPANUI:基于斑块的 NDVI 和 POI 修正的夜光城市指数 NDVI and POI adjust NTL urban index;P-NPANUI:基于斑块的 NDVI 和 POI 修正的夜光城市指数 NDVI and POI adjust NTL urban index;P-NPANUI:基于斑块的 NDVI 和 POI 修正的夜光城市指数 NDVI and POI adjust NTL urban index;P-NPANUI:基于斑块的 NDVI 和 POI 修正的夜光城市指数 NDVI and POI adjust NTL urban index;P-NPANUI:基于斑块的 NDVI 和 POI 修正的夜光城市指数 NDVI and POI adjust NTL urban index;P-NPANUI:基于斑块的 NDVI 和 POI 修正的夜光城市指数 NDVI and POI adjust NTL urban index;P-NPANUI:基于斑块的 NDVI 和 POI 修正的夜光城市指数 NDVI and POI adjust NTL urban index;P-NPANUI:基于斑块的 NDVI 和 POI 修正的夜光城市指数 NDVI and POI adjust NTL urban index;P-NPANUI:基于斑块的 NDVI 和 POI 修正的夜光城市指数 NDVI and POI adjust NTL urban index;P-NPANUI:基于斑块的 NDVI 和 POI 修正的夜光城市指数 NDVI and POI adjust NTL urban index;P-NPANUI:基于斑块的 NDVI 和 POI 修正的夜光城市指数 NDVI and POI adjust NTL urban index;P-NPANUI:基于斑皮的 NDVI 和 POI 修正的夜光城市指数 NDVI and POI adjust NTL urban index;P-NPANUI:基于斑块的 NDVI 和 POI 修正的夜光城市指数 NDVI and POI adjust NTL urban index;P-NPANUI:基于斑块的 NDVI 和 POI 修正的夜光城市指数 NDVI and POI adjust NTL urban index;P-NPANUI:基于斑皮比 NTL urban index;P-NPANUI NTL Urban ind

基于不同的数据组合,以路网斑块为制图单元提取的建成区精度水平更高(表 3、表 4)。北京地区 NTL 的精度水平比深圳略高,总体精度为 88%,Kappa 系数为 0.77。经路网斑块修正后,P-NTL 在两地精度水平均提升。北京地区总体精度达到 90%,Kappa 系数为 0.80。深圳地区总体精度和 Kappa 系数提升了 3%和 7%,达到了 89%和 0.79。POI 总体精度在北京为 77%,Kappa 系数只有 0.55,比深圳地区低了 7%和 13%。而使用

路网斑块修正后,两地精度水平提升明显。其中在 P-POI 北京总体精度提升了 13%,达到了 90%。Kappa 系 数提升了 26%,达到了 0.81,漏分精度也提高了 26%。P-POI 在深圳错分精度由 94%下降至 88%,但漏分精度 上升了14%,总体精度和Kappa系数均有上升,达到了88%和0.74。NPANUI总体精度在北京为92%,在深圳 为 91%, Kappa 系数分别为 0.84 和 0.81。经路网斑块修正后, P-NPANUI 在两地精度水平仍有一定提升。其 中北京总体精度、漏分精度和 Kappa 系数为 94%、90%和 0.88,分别提升了 2%、4%和 4%。深圳总体精度、错 分精度和 Kappa 系数为 93%、94%和 0.85,分别提升 2%、4%和 4%。错分精度北京保持不变,漏分精度在深圳 基本不变。P-NPANUI 在北京减少了遗漏,在深圳修正了错误,在两地均取得了最佳结果。

	Table	4 Accuracy evalu	ation of extraction r	esuits in Snenzne	n	
方法 Method			非建成区/% Non-built up area	建成区/% Built up area	总体精度/% Overall accuracy	卡帕系数 Kappa
像元 Pixel	NTL	PA	87	85	86	0.72
		UA	85	87		
斑块 Patch	P-NTL	PA	88	91	89	0.79
		UA	91	88		
像元 Pixel	POI	PA	95	73	84	0.68
		UA	87	94		
斑块 Patch	P-POI	PA	88	87	88	0.74
		UA	87	88		
像元 Pixel	NPANUI	PA	90	91	91	0.81
		UA	91	90		
斑块 Patch	P-NPANUI	PA	94	92	93	0.85
		UA	92	94		

表 4	深圳地区提取结果精度评估	

以路网斑块为制图单元提取建成区减少了漏分,填补了建成区内部的空洞,使建成区内更连续。对于夜 间灯光数据,由于城市内部某些区域在夜间缺乏照明,能观察到在 NTL 内部存在较多空洞(图 8、图 9)。经路 网斑块修正后, P-NTL 内部空洞明显减少, 内部更连续。对于 POI 数据, 核密度估计法寻找的阈值突变点会低 估建成区,造成大面积的遗漏。而将制图单元更换为路网斑块并利用参考比较法确定阈值后,P-POI 有效补 充了建成区的漏分(图8、图9)。

以路网斑块为制图单元提取建成区减弱了边界锯齿,使边界曲线变化更合理。如图 10,以像元为制图单 元提取的建成区(NTL)由于分辨率较低,建成区边界产生明显的锯齿。此外,核密度估计法提取的建成区结 果边界过于平滑,边缘细节简单,丢失了许多城市信息(图8、图9)。对于多源数据,NPANUI边界处有许多细 碎的小斑块(图8、图9),城市信息碎片化严重,边界曲线变化不合理(图11)。将制图单元变换为路网后,减 弱了边界锯齿,增加了边缘细节并使破碎的建成区斑块合并成整体,边界曲线变化趋于合理。

3.3 建成区景观格局分析

路网斑块对建成区提取结果的破碎化、边缘复杂程度和形状都具有明显的修正作用。北京和深圳两个城 市由于建成区建设格局不同,利用不同的数据组合提取建成区表现出了不同的景观格局水平(表5、表6)。 北京地区建成区提取结果的景观破碎度、边缘密度和景观形状指数均低于深圳地区,说明北京市建成区建设 格局较为简单,深圳市较为复杂,复合实际情况。以景观破碎度为例,在北京市,NTL、POI、NPANUI 提取的建 成区景观破碎度分别为 0.13、0.02 和 2.70, 与实际差距分别为 0.10、-0.01 和 2.67。在深圳市, 这三种结果景 观破碎度与实际的差距分别为-0.09、-0.23 和 1.05。将制图单元换作路网斑块后,在北京 P-NTL 和 P-NPANUI 的景观破碎度与实际差距缩小为 0.07 和 0, P-POI 不变。在深圳, P-NTL, P-POI 和 P-NPANUI 景观破



图 8 北京提取结果和参考边界对比



NTL:夜间灯光指数 Nighttime light index; P-NTL:基于斑块的夜间灯光指数 Nighttime light index base on patch; POI: 兴趣点 Point of interest; P-POI:基于斑块的兴趣点密度估计 Density estimation based on patch; NPANUI: NDVI 和 POI 修正的夜光城市指数 NDVI and POI adjust NTL urban index; P-NPANUI:基于斑块的 NDVI 和 POI 修正的夜光城市指数 NDVI and POI 修正的夜光城市指数 NDVI and POI adjust NTL urban index based on patch

碎度与实际差距缩小为 0.04、0.03 和 0.09。对于周长面积比、边缘密度和景观形状指数,路网斑块对 POI 和 NPANUI 的修正效果明显,对 NTL 的修正效果较弱。

在像元水平融合多源数据虽然能在一定程度上提高分类精度,但建成区提取结果在景观格局水平上与实际存在较大差异。以景观破碎度、边缘密度和景观形状指数为例,尽管 NPANUI 提取建成区总体精度和 Kappa 系数在两个研究区都在 90%左右,但这些景观格局指标与实际差别较大,盲目应用这些结果可能会导致一些问题。具体为北京分别与实际差距 2.67、0.75 和 2.39,深圳分别与实际差距 1.05、1.62 和 1.73。将制图单元换作路网斑块后,上述指标在北京和深圳两个研究区与实际差距分别缩小为 0、0.01、0.02 和 0.09、0.26、0.25,均比以像元为制图单元提取建成区的结果差距更小。



图 9 深圳提取结果和参考边界对比

Fig.9 Comparison between Shenzhen extraction results and reference boundary





- 4 讨论
- 4.1 基于斑块提取建成区的优势

本文提出了一种在斑块水平提取建成区的方法,为城市生态学研究提供了新的边界参考。路网斑块作为



图 11 NPANUI 和 P-NPANUI 对比

Fig.11	Comparison	between	NPANUI	and	P-NPANUI
黑色线伯	弋表路网斑块				

Table 5 Landscape pattern index of built-up area extracted by different methods in Beijing							
方法 Method		斑块数量 Number of plaques	周长/km Girth	景观破碎度 landscape fragmentation	周长面积比 Perimeter- Area Ratio	边缘密度 Edge density	景观形状指数 Landscape shape index
像元 Pixel	NTL	187	1688	0.13	1.15	1.02	5.78
斑块 Patch	P-NTL	145	1633	0.10	1.13	1.01	5.72
像元 Pixel	POI	20	375	0.02	0.40	0.29	3.44
斑块 Patch	P-POI	24	886	0.02	0.60	0.54	4.22
像元 Pixel	NPANUI	3963	2245	2.70	1.53	1.37	6.89
斑块 Patch	P-NPANUI	47	1047	0.03	0.71	0.63	4.52
参考边界 Reference boundary	_	46	875	0.03	0.58	0.62	4.50

表 6 深圳地区不同方法提取的建成区景观格局指数

Table 6 Landscape pattern index of built-up area extracted by different methods in Shenzhen							
方法 Method		斑块数量 Number of plaques	周长/km Girth	景观破碎度 landscape fragmentation	周长面积比 Perimeter- Area Ratio	边缘密度 Edge density	景观形状指数 Landscape shape index
像元 Pixel	NTL	171	886	0.18	0.92	4.01	7.31
斑块 Patch	P-NTL	298	948	0.31	0.99	4.04	7.35
像元 Pixel	POI	32	453	0.04	0.59	2.80	5.96
斑块 Patch	P-POI	293	856	0.30	0.89	3.97	7.26
像元 Pixel	NPANUI	1269	1108	1.32	1.15	5.44	8.89
斑块 Patch	P-NPANUI	348	936	0.36	0.98	4.10	7.41
参考边界 Reference boundary	_	255	671	0.27	0.70	3.84	7.16

一种新的计算单元,在提取建成区时可以使用单一数据也可以融合多源数据。与像元相比,基于路网斑块提取建成区结果受数据质量影响小,相同数据条件下能够提升结果的准确性,减少和真实建成区在空间分布上

的差异。与此同时,以往的研究由于使用的数据分辨率不同,提取结果边界不统一,空间分布与实际差别大。 本研究利用数据源的信息而非像元边界,通过判定路网斑块的城市属性确定建成区。基于斑块的建成区范围 极大的减小了锯齿状边界和混合像元的影响,统一了边界的提取范围,使之与真实情况更加相符。

另一方面,以路网斑块为制图单元提取的建成区对边界内的景观破碎度影响较小,有利于进行建成区内 景观格局及生态系统服务的研究。建成区这一景观是人类活动和自然相互作用的结果^[43],不同城市建成区 的形成有其历史、人文、社会和自然等原因。许多城市在经历"摊大饼"式发展后,现在转而期望构建城市总 体"多点多核心"格局的新发展目标。已有的研究只在精度水平上验证了结果,对景观格局的分析还不够深 入。本文基于景观格局分析发现在像元尺度提取建成区结果与实际差别较大,对建成区格局的模拟存在不 足,难以为其它生态学研究提供数据支撑。

总的来说,基于路网斑块的提取方法综合简单的阈值就可达到较高的精度,在不同格局的城市试验中对 建成区景观格局的模拟效果突出,且逻辑清楚避免了深度学习无法解释的黑箱也无需耗费时间训练和标定样 本数据。在未来进行大尺度研究时,所提方法利用简单的数据就能迅速得到高精度的结果,可用于城市群或 全国的生态学分析。

4.2 局限性和发展前景

本方法目前还存在一些局限性。首先,方法的准确性在一定程度上依赖路网斑块分割方法的性能。由于 建成区边缘路网相对稀疏,导致边缘斑块内部会包含一部分自然区域,影响结果的准确性。未来可以通过修 改分割规则使路网斑块分割结果更符合实际情况。其次,在城市内部某些区域,由于城市信息相对较少可能 造成遗漏。例如大型景区公园,封闭的单位和高档小区,这些区域夜间灯光亮度和 POI 数量较低。该区域具 有城市功能而未被分为建成区,未来可以通过分析这些区域的空间位置加以区分。

目前我国对建成区的界定标准主要参考国家统计局、住房和城乡建设部两部门的相关规定和制度。在统 计口径上城市(县城)建设统计中的城市建成区等同于国家统计局的城区^[44-45]。它们二者的区别在于国家 统计局以居(村)一级为最小划分单元,住房和城乡建设部以镇(乡)一级作为最小划分单元。在建成区或城 区统计上,实际上将上述行政管辖范围整体纳入或排除,与建成区实体存在一定差距^[45]。本文提出的方法可 结合 POI 数据(包含居(村)和镇(乡)政府点位信息),以路网斑块为制图单元建立统计上城乡的空间表征, 用于城市生态学的在综合维度的研究。

5 结论

本文基于路网斑块提出了一种在斑块尺度提取建成区的方法。并利用三种不同的数据组合提取了建成 区,比较了它们与像元尺度上提取建成区结果之间的差别。与基于像元的建成区提取方法相比,本文所提方 法可以减少边界锯齿和分辨率不统一的问题,提高提取结果的精度,并使结果在景观格局和空间细节上更接 近真实情况。本文所提方法具有较高的适用性和稳定性,既适用于格局不同的城市,也适用于不同类型的数 据组合。对于建成区内部,所提方法可以通过增加城市斑块填补内部空洞。对于建成区边缘,所提方法减少 了由数据局限性引起的景观破碎化。与多源数据相比,本文所提方法对单一数据源提取结果的精度提升幅度 较大,但使用多源数据协同提取结果精度更高。这表明基于路网斑块的方法使用单一数据就能获得高精度结 果,可以应对快速提取需求。而使用多源数据可以获得更精准的结果,适用于更细致的研究。总的来说,本文 所提方法是一种有效且实用的方法,它可以准确地提取出城市的建成区边界,为城市的生态规划与管理提供 有力的支持。

参考文献(References):

 ^[1] Zhou W Q, Jiao M, Yu W J, Wang J. Urban sprawl in a megaregion: a multiple spatial and temporal perspective. Ecological Indicators, 2019, 96: 54-66.

^[2] Lin Z X, Xu Y P, Wang Q, Luo S, Lu M, Yu Z H. River system changes under urban expansion: Insights from the Suzhou-Wuxi-Changzhou

metropolitan area, China. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024, 53: 101766.

- [3] 党雪薇,周亮,胡凤宁,袁博,唐建军.关中平原城市群扩张对生态用地的多尺度影响.生态学报,2022,42(7):3020-3032.
- [4] 李嘉艺, 孙璁, 郑曦. 基于适应性循环理论的区域生态风险时空演变评估——以长江三角洲城市群为例. 生态学报, 2021, 41(7): 2609-2621.
- [5] Bradfield A A, Nagy C M, Weckel M, Lahti D C, Habig B. Predictors of mammalian diversity in the New York metropolitan area. Frontiers in Ecology and Evolution, 2022, 10: 903211.
- [6] Wang J L, Zhou W Q, Pickett S T A, Yu W J, Li W F. A multiscale analysis of urbanization effects on ecosystem services supply in an urban megaregion. Science of the Total Environment, 2019, 662: 824-833.
- [7] 闫章美,周德成,张良侠.我国三大城市群地区城市和农业用地地表热环境效应对比研究.生态学报, 2021, 41(22): 8870-8881.
- [8] 王煜, 唐力, 朱海涛, 麦有全, 何伟彪, 王伟民, 刘凯, 苏红波. 基于多源遥感数据的城市热环境响应与归因分析——以深圳市为例. 生态学报, 2021, 41(22): 8771-8782.
- [9] 宿兴涛, 冯静, 安豪, 李亚云, 朱晓蕾. 2015—2021 年京津冀典型城市 PM_{2.5}和 O₃ 污染趋势变化分析. 大气科学, 2023, 47(5): 1641-1653.
- [10] 江原,郝媛媛,黄祎宸.基于夜间灯光数据的甘青宁城市扩展及其建成区植被变化特征.生态学报,2022,42(10):3974-3988.
- [11] 杨纯,蒋恬田,李欣,李小马.绿化覆盖率对城市绿地破碎度与地表温度的关系的影响. 生态环境学报, 2024, 33(2): 242-248.
- [12] Javed A, Cheng Q M, Peng H, Altan O, Saleem N. Review of spectral indices for urban remote sensing. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2021, 87(7): 513-524.
- [13] As-syakur A R, Adnyana I W S, Arthana I W, Nuarsa I W. Enhanced built-up and bareness index (EBBI) for mapping built-up and bare land in an urban area. Remote Sensing, 2012, 4(10): 2957-2970.
- [14] Sun Z C, Wang C Z, Guo H D, Shang R R. A modified normalized difference impervious surface index (MNDISI) for automatic urban mapping from landsat imagery. Remote Sensing, 2017, 9(9): 942.
- [15] You Y F, Wang S Y, Ma Y X, Chen G S, Wang B, Shen M, Liu W H. Building detection from VHR remote sensing imagery based on the morphological building index. Remote Sensing, 2018, 10(8): 1287-1287.
- [16] Zhang Q F, He C Y, Liu Z F. Studying urban development and change in the contiguous United States using two scaled measures derived from nighttime lights data and population census. GIScience & Remote Sensing, 2014, 51(1): 63-82.
- [17] Wang M C, Song Y L, Wang F Y, Meng Z G. Boundary extraction of urban built-up area based on luminance value correction of NTL image. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 7466-7477.
- [18] Jiang C, Miao Y H, Xi Z L. A new method of extracting built-up area based on multi-source remote sensing data: a case study of Baoding central city, China. Geocarto International, 2022, 37(20): 6072-6086.
- [19] Li F, Yan Q W, Zou Y J, Liu B L. Extraction accuracy of urban built-up area based on nighttime light data and POI: a case study of Luojia 1-01 and NPP/VIIRS nighttime light images. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(6): 825-835.
- [20] Wu Z T, Wei X D, He X J, Gao W J. Identifying urban built-up areas based on spatial coupling between nighttime light data and POI: a case study of Changchun. Buildings, 2023, 14(1): 19.
- [21] Li X M, Song Y S, Liu H, Hou X Y. Extraction of urban built-up areas using nighttime light (NTL) and multi-source data: a case study in Dalian city, China. Land, 2023, 12(2): 495.
- [22] Zhang J, Yuan X D, Lin H. The extraction of urban built-up areas by integrating night-time light and POI data—a case study of Kunming, China. IEEE Access, 2021, 9: 22417-22429.
- [23] Wang H B, Gong X S, Wang B B, Deng C, Cao Q. Urban development analysis using built-up area maps based on multiple high-resolution satellite data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 103: 102500.
- [24] Zhang Q, Huang X, Zhang G X. Urban area extraction by regional and line segment feature fusion and urban morphology analysis. Remote Sensing, 2017, 9(7): 663.
- [25] 许泽宁,高晓路.基于电子地图兴趣点的城市建成区边界识别方法.地理学报,2016,71(6):928-939.
- [26] Zhang J, Zhang X, Tan X P, Yuan X D. Extraction of urban built-up area based on deep learning and multi-sources data fusion-The application of an emerging technology in urban planning. Land, 2022, 11(8): 1212.
- [27] Kong L, He Z W, Chen Z S, Luo M L, Du Z, Zhu F Q, He L. Spatial distribution and morphological identification of regional urban settlements based on road intersections. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2021, 10(4): 201.
- [28] Lin Y Y, Hu X S, Lin M S, Qiu R, Lin J G, Li B Y. Spatial paradigms in road networks and their delimitation of urban boundaries based on KDE. ISPRS Int J Geo Inf, 2020, 9: 204.
- [29] 白光. 基于经济自组织的特大城市职住空间结构演化研究——以北京和东京为例[D]. 北京:北京交通大学, 2021.

- [30] 首都之窗.《北京城市总体规划(2016年-2035年)》.(2017-09-29)[2024-05-20]. https://www.beijing.gov.cn/gongkai/guihua/wngh/cqgh/201907/t20190701_100008.htm.
- [31] Milesi C, Elvidge C D, Nemani R R, Running S W. Assessing the impact of urban land development on net primary productivity in the southeastern United States. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(3): 401-410.
- [32] Xu Z N, Gao X L, Wang Z Q, Fan J. Big data-based evaluation of urban parks: a Chinese case study. Sustainability, 2019, 11(7): 2125.
- [33] He X, Zhang Z M, Yang Z J. Extraction of urban built-up area based on the fusion of night-time light data and point of interest data. Royal Society Open Science, 2021, 8(8): 210838.
- [34] Heidenreich N B, Schindler A, Sperlich S. Bandwidth selection for kernel density estimation: a review of fully automatic selectors. AStA Advances in Statistical Analysis, 2013, 97(4): 403-433.
- [35] Zhang Q L, Schaaf C, Seto K C. The vegetation adjusted NTL urban index: a new approach to reduce saturation and increase variation in nighttime luminosity. Remote Sensing of Environment, 2013, 129: 32-41.
- [36] Lossifova D, Doll C, Gasparatos A. Defining the urban. Taylor and Francis, 2017:288-291.
- [37] 彭凯锋,蒋卫国,侯鹏,凌子燕,牛振国,毛德华,黄卓.结合多源专题数据和目视解译的大区域密集湿地样本数据生产.遥感学报, 2024,28(2):334-345.
- [38] 魏慧, 吕昌河, 尹旭. 青藏高原耕地的空间分异及其影响因素. 地理科学, 2023, 43(3): 379-387.
- [39] 张林艳,夏既胜,叶万辉.景观格局分析指数选取刍论.云南地理环境研究,2008,20(5):38-43.
- [40] 何鹏, 张会儒. 常用景观指数的因子分析和筛选方法研究. 林业科学研究, 2009, 22(4): 470-474.
- [41] 朱凌一,王勇.基于夜光遥感影像的苏南城市群建成区提取方法.地理空间信息,2023,21(10):44-48.
- [42] 李志强. 城市内部景观动态及其对热岛效应影响——以深圳市为例[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- [43] 陈利顶,孙然好,刘海莲.城市景观格局演变的生态环境效应研究进展.生态学报,2013,33(4):1042-1050.
- [44] 林广思. 城市绿地统计问题及分析. 城市规划, 2013, 37(5): 80-84.
- [45] 王浩, 刘娅菲, 宁晓刚, 张翰超. 城区边界遥感提取研究进展. 测绘科学, 2019, 44(6): 159-165.