



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2308364

引用格式:高星,郭忠元,王千,等.局地最佳阈值法的优化及城市建成区扩张时空特征:以白洋淀流域为例[J].科学技术与工程,2025,25(1):44-53.

Gao Xing, Guo Zhongyuan, Wang Qian, et al. Optimization of local-optimal threshold method and spatial and temporal characteristics of urban built-up area expansion: a case study of Baiyangdian Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(1): 44-53.

# 局地最佳阈值法的优化及城市建成区扩张 时空特征:以白洋淀流域为例

高星<sup>1,2,3,4</sup>, 郭忠元<sup>1</sup>, 王千<sup>5</sup>, 李桂君<sup>3</sup>, 申伟宁<sup>1\*</sup>

(1. 河北经贸大学公共管理学院, 石家庄 050061; 2. 河北经贸大学城乡融合发展协同创新中心, 石家庄 050061;  
3. 河北经贸大学城市可持续与创新发展研究中心, 石家庄 050061; 4. 河北省经济社会发展地理信息大数据平台,  
石家庄 050061; 5. 河北省自然资源利用规划院, 石家庄 050051)

**摘要** 科学提取城市建成区信息并探究其扩张的时空特征,对于城市规划和建设有重要的参考意义。在优化局地最佳阈值法的基础上,采用1990年、2000年、2010年、2020年4期PANNDAN夜间灯光数据和Landsat系列数据定量提取了白洋淀流域城市建成区信息,其后运用城市扩张指数和景观指数分析了白洋淀流域30年间城市建成区扩张的时空特征。结果表明:运用优化后的局地最佳阈值法成功提取了流域内城市各期建成区的数据,经验证该方法较优化前具有更优的适用性。研究期间白洋淀流域城市建成区扩张显著,增长率达154.48%;流域内35个城市的建成区呈现出较大的规模异质性。时序特征上,建成区扩张总体呈现加速趋势,流域内各城市的建成区扩张速度差距趋于增大;空间特征上,“正定—涿州”线左侧建成区扩张态势低于右侧区域;以莲池区、竞秀区、高碑店市等为代表的市辖区或县级市扩张态势较强。基于景观指数结果,建成区扩张过程呈现“分散-融合”的空间特征,建成区边界呈现“规整-复杂-规整”的演变特征。

**关键词** 城市建成区;局地最佳阈值法;夜间灯光;时空特征;白洋淀流域

中图分类号 P237;

文献标志码 A

## Optimization of Local-optimal Threshold Method and Spatial and Temporal Characteristics of Urban Built-up Area Expansion: A Case Study of Baiyangdian Basin

GAO Xing<sup>1,2,3,4</sup>, GUO Zhong-yuan<sup>1</sup>, WANG Qian<sup>5</sup>, LI Gui-jun<sup>3</sup>, SHEN Wei-ning<sup>1\*</sup>

(1. School of Public Administration, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang 050061, China;  
2. Hebei Collaborative Innovation Center for Urban-rural Integrated Development, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang 050061, China; 3. Center for Urban Sustainability and Innovation Development (CUSID), Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang 050061, China; 4. Hebei Province Economics and Social Development Geographic Information Big Data Platform, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang 050061, China;  
5. Hebei Institute of Natural Resources Utilization Planning, Shijiazhuang 050051, China)

**[Abstract]** The scientific extraction of urban built-up area information and the exploration of the spatial-temporal characteristics of urban expansion have significant relevance for urban planning and management. The local-optimal thresholding method was refined for the quantitative extraction of urban built-up area information within the Baiyangdian Basin, and the extraction process utilized PANNDAN nighttime light data and Landsat series data from four periods: 1990, 2000, 2010, and 2020. Subsequently, an analysis of the spatial-temporal characteristics of urban built-up area expansion in the basin over the past 30 years was conducted using the urban expansion index and landscape index. The results show the optimized local-optimal thresholding method is successfully used to extract the data of the built-up areas in the basin for all phases, and it is confirmed that the method exhibits enhanced applicability compared to its pre-optimization state. The urban built-up area in the Baiyangdian Basin experienced significant expansion throughout the study period, with a growth rate of 154.48%. The sizes of the built-up areas across the 35 cities in the basin exhibited high heterogeneity. Temporally, the expansion of urban built-up areas predominantly exhibited an accelerating trend, with a widening disparity in the pace of expansion among the cities within the basin. Spatially, the built-up ar-

收稿日期: 2023-10-26 修订日期: 2024-07-04

基金项目: 河北省社会科学基金(HB22GL030)

第一作者: 高星(1985—),男,汉族,河北井陘人,博士,副教授。研究方向:时空数据利用。E-mail:gaoxing\_85@126.com。

\*通信作者: 申伟宁(1985—),男,汉族,河北邢台人,博士,助理研究员。研究方向:区域高质量发展。E-mail:283588771@qq.com。

ea to the left of the Zhengding-Zhuozhou line was less developed than that to the right. Notable expansion trends were observed in municipal districts or county-level cities such as Lianchi District, Jingxiu District, and Gaobeidian City. Based on the results of the landscape index, the expansion of urban built-up areas in Baiyangdian Basin shows the spatial characteristics of “dispersion-fusion” during the study period, and the boundary of built-up areas showed the evolution characteristics of “regular-complex-regular”.

[**Keywords**] urban built-up area; local-optimal thresholding; nighttime light data; spatial-temporal features; Baiyangdian Basin

城市建成区是由人造不透水面和部分具有城市功能的绿地、水体等共同构成的核心城市领域,其空间扩张是城市化的主要特征之一<sup>[1]</sup>。改革开放后城市建成区的扩张契合了经济社会快速发展的内在需要<sup>[2]</sup>,但也带来热岛效应加剧和环境污染加重、城市空间失调等现实问题<sup>[3-5]</sup>,对城市经济发展、人居环境提升等产生多重影响。探究城市建成区扩张时空特征是全面了解城市发展进程的前提,对实现城市可持续发展有重要的参考意义<sup>[6]</sup>。

在城市建成区的识别方面,随着城乡景观的日益混合和城市边缘的低密度扩张,城乡的空间边界趋于模糊<sup>[6-7]</sup>。基于此,尽可能客观、简洁、科学地判定和提取城市建成区信息成为现实需要,同时也是探究其时空扩张特征的首要问题<sup>[8]</sup>。近年来,学界围绕该问题展开了一定研究,可将所用方法归纳为三类:第一类是基于传统光学遥感解译数据和研究者知识经验判读城市建成区,如依据解译后的地类数据直接划定。该类方法易于操作,但存在数据质量不稳定、主观性强和工作量大等弊端<sup>[6]</sup>。第二类是基于夜间灯光、多光谱遥感、人口空间化等数据,通过挖掘数据的数值、数量、密度和拓扑关系等属性,并利用各类聚类算法判定城市建成区<sup>[9-10]</sup>。该类方法有客观性强、结果精度高等优点,但存在应用范围有限、操作门槛较高等局限性<sup>[8]</sup>。第三类是利用兴趣点(point of interest, POI)、手机信令、车辆轨迹等时空大数据进行城市建成区判定提取。该类方法提取精度高,在研究中表现了一定的应用潜力,但囿于数据存量少等问题不适于长时序研究<sup>[11-12]</sup>。总体来看,现有的数据类型及利用方式为建成区判定提取提供了丰富的方法选择<sup>[10]</sup>。其中,能直观反映人口集聚和经济活力的夜间灯光数据被广泛用于城市建成区提取。

局地最佳阈值法(local-optimal thresholding)又称比较阈值法,属于上述第二类的一种,由 Henderson 等<sup>[13]</sup>于 2003 年提出。城市建成区的夜间灯光亮度远高于非建成区,且前后两者亮度之间存在阶梯性<sup>[14-15]</sup>。该方法的思路是以社会经济统计数据(研究中常用统计年鉴中的建成区面积)为辅助,通过对比辅助数据与某一亮度阈值之上的像元面积来选取最佳亮度阈值,判定超过该阈值的集聚像元为城市建成区像元<sup>[8,13]</sup>。该方法具有客观性强、稳定性好、提

取精度较高等优点,现已成为利用夜间灯光数据提取城市建成区的常用方法之一<sup>[8,14]</sup>。例如胡苗苗等<sup>[9]</sup>、Xu 等<sup>[16]</sup>和贺军亮等<sup>[17]</sup>分别用该方法提取了中原城市群、安徽省和郑州主城区的城市建成区,并进一步探究了各主体空间扩张的特征。然而,局地最佳阈值法被认为仅适用于中大型城市建成区的判别提取<sup>[8,18]</sup>。首先,该方法的适用性在很大程度上取决于辅助数据的可获取性,这在长时序分析和针对小型城市的研究中构成了显著的限制,因为小型城市的辅助数据通常存在难以收集或缺失的问题。其次,由于夜间灯光数据像元较大(DMSP/OLS 系列数据为 1 km; NPP/VIIRS 系列数据为 0.5 km),该方法在提取小型城市建成区方面的精度并不理想。当前,城市建成区研究日益精细化和多样化,这对基础数据提出更高要求。鉴于此,拓展局地最佳阈值法的适用范围并提高提取结果的精度,对该方法的操作过程进行优化调整具有现实意义和应用价值。

在城市建成区扩张时空特征方面,近年来国内外学者也开展了较多工作<sup>[19-20]</sup>。这些研究多基于遥感解译、夜间灯光、POI 及统计数据开展,综合运用数理统计分析、地理信息空间分析、景观格局指数、分形理论、紧凑度模型和重心模型等方法<sup>[11,19,21]</sup>,实现了对建成区扩张形态、结构、方位等空间特性的刻画和动态演变过程的数值复现,系统地揭示了目标研究区内城市建成区扩张的时空特征<sup>[8]</sup>。这为研究建成区时空特征识别部分的开展,提供了方法借鉴和思路指引。

综上所述,现从优化的局地最佳阈值法入手,综合利用夜间灯光和 Landsat 系列数据,定量提取白洋淀流域 35 个县(市、区)四期的城市建成区信息,其后利用城市扩张指数和景观格局指数,分析白洋淀流域建成区扩张的时空特征。相比于同类型的其他研究,调整局地最佳阈值法的操作流程,提高了其在小型城市建成区提取上的适用性和精确度。研究成果可为类似研究开展提供方法和思路借鉴,也可为白洋淀流域城市建成区的管理和发展提供参考。

## 1 研究区与数据

### 1.1 研究区域概况

白洋淀流域系指潞龙河、孝义河、唐河、府河、漕

河、瀑河、萍河、白沟引河(含南拒马河与白河)、赵王新河的干支流流经的河北省行政区域,共涉及保定市全域、张家口市、石家庄市、沧州市等辖属的 35 个县(市、区)。该流域位处华北平原西北部,总面积约 5.7 万 km<sup>2</sup>,西部地势高,为太行山区,主要有蔚县、涿鹿县、涞源县、涞水县和阜平县等;中部为平原区,主要有保定市及石家庄市辖属的部分县(市、区);东南为白洋淀区,是国家重点保护湿地和华北平原最大淡水湖泊,地理位置如图 1 所示。第七次人口普查结果显示流域总人口超千万,2022 年国内生产总值(gross domestic product, GDP)超 4 000 亿元。

白洋淀流域是以水系为联系组成的自然社会综合体,其涵盖的城市在地形、规模、经济、人口等方面具有显著的梯度差异,因而流域内不同城市建成区的时空演变也更具复杂性<sup>[22]</sup>。此外,该流域是雄安新区的水源涵养地和未来发展的空间腹地,新区建设势必对流域内其他城市发展产生影响。探究白洋淀流域城市建成区时空演变特征,对白洋淀流域及新区规划和建设具有参考意义。综上,选取白洋淀流域为研究区具有一定研究典型性和现实价值。

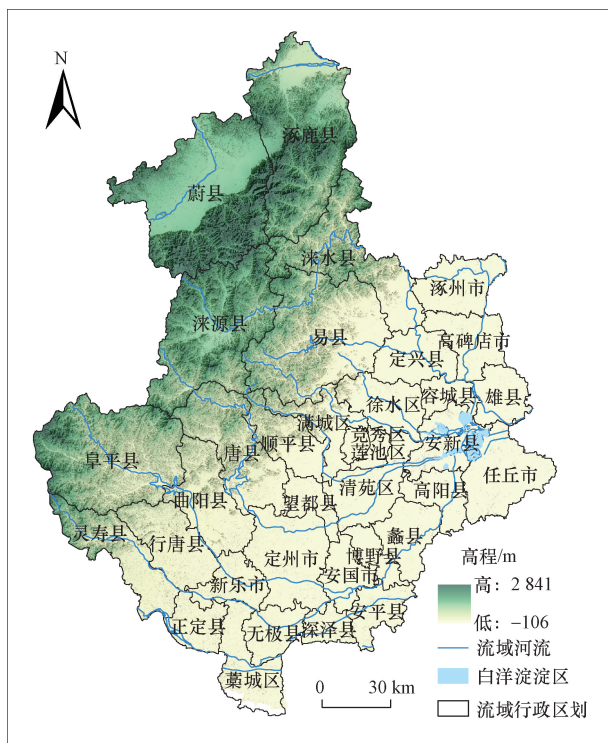


图 1 白洋淀流域地理位置

Fig. 1 Geographical location of Baiyangdian Basin

### 1.2 数据来源及预处理

夜间灯光数据具备较优的数据连续性、即时性和对人类聚居区的高度敏感性,因而被广泛应用于城市建成区提取<sup>[8,14]</sup>。研究所使用的中国长时间序

列逐年人造夜间灯光数据集(PANND)来自国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>),该系列数据在长时序的建成区识别方面优于传统的 DMS 和 NPP 夜间灯光数据<sup>[23]</sup>,数据分辨率为 1 km。借助 ArcGIS 10.7 软件平台进行投影转换等预处理。

Landsat 系列数据具备较优的分辨率(30 m)和数据连续性,被广泛用于长时序土地利用/覆被数据产品制备。研究所用 1990 年、2000 年、2010 年 Landsat 4-5/TM 和 2020 年的 Landsat 8/OL 遥感影像来自中科院地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>)。借助 ENVI 5.3 和 ArcGIS 10.7 软件平台进行投影、波段提取、影像合成、拼接镶嵌、裁剪等预处理,采用目视判读和人机交互解译的方式提取白洋淀流域建设用地数据,经检验四期数据精度均在 85% 以上,可用于研究使用。

精度对比中使用 Zhao 等<sup>[24]</sup>制备的 1992—2020 年全球数据集(Global Dataset of Annual Urban Extents, AUE\_NTL),下载于(<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.16602224.v1>)。该数据集基于夜光聚类算法制备,数据分辨率为 1 km。

研究所使用的社会统计数据来自《河北统计年鉴》及各市统计年鉴。

## 2 研究方法

### 2.1 优化的局地最佳阈值法

局地最佳阈值法基本思想:以夜间灯光数据为空间指引,以辅助数据(研究中常用统计年鉴中的建成区面积)为城市建成区面积控制量进行判定和提取<sup>[15]</sup>。具体操作:首先,设定一个初始灯光阈值,提取超过该阈值的夜间灯光像元并计算面积;其次,将该面积数值与辅助数据进行对比,不断调整阈值以使两者充分接近;最后,当两者面积充分接近时,认定为最佳阈值,并判定超过该阈值对应的灯光像元为城市建成区。操作流程可参考图 2(a)蓝色字体部分。

优化的局地最佳阈值法基本思想:以 Landsat 系列数据解译产品为夜间灯光的最佳阈值提供辅助数据,其后通过两类数据提取结果相互印证以确定最终的城市建成区范围。提取思路 and 具体操作如图 2 所示。

(1) Landsat 数据处理(I~III)。基于解译并二值化的地类数据,借助 ArcGIS 分割各斑块之间的拓扑连接关系,以避免后续操作中受到道路等要素联系造成的干扰。最后人工判读城市主体斑块。叠合卫星地图,选定明显为城市建成区主体的斑块,一般一个

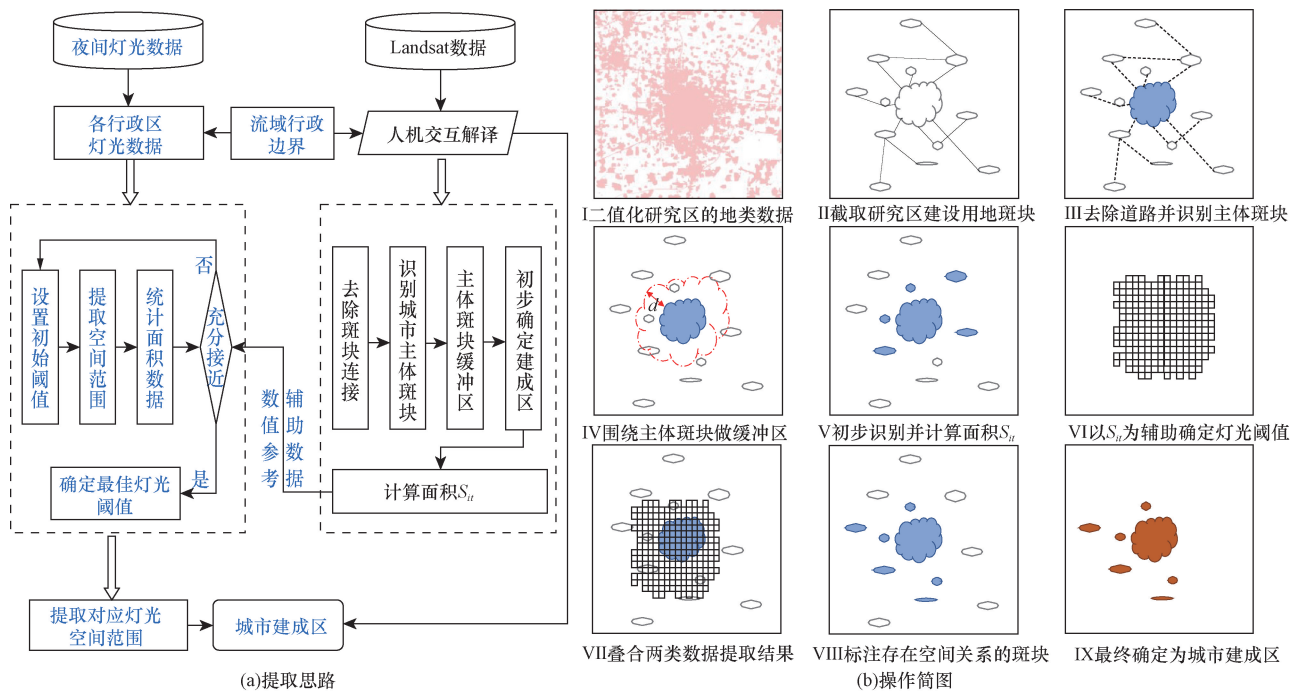


图2 提取思路及操作简图

Fig. 2 The brief extraction flow and sketch map

城市只有一个主体斑块,研究中发现如藁城区有明显双中心结构的城市,需要划定两个主体块。

(2)初步识别城市建成区(IV、V)。围绕主体斑块以距离 $d$ [以0 km为初始值,以0.5 km为单位量逐次递加,经实验 $d$ 为3 km时,城市面积 $S_{it}$ (第 $i$ 个城市在 $t$ 时间点的面积)与可搜集到的社会经济统计数据中的建成区面积数值最为相近]作为缓冲区,其后标注与缓冲区存在相交关系的斑块,初步认定其为城市建成区范围,并以该范围包含的建成区斑块计算城市面积 $S_{it}$ 。

(3)确定最佳阈值(VI)。以 $S_{it}$ 为数值参考,采用局地最佳阈值法的操作,以确定各研究单元在各期的最佳灯光提取阈值[操作思路可参考图2(a)蓝色字体部分]。其后以最佳灯光阈值提取各研究单元的夜间灯光空间范围,即提取夜间灯光数据中亮度值超过最佳灯光阈值的所有像元空间信息。

(4)确定城市建成区(VII~IX)。叠合提取的夜间灯光空间范围和二值化的解译数据,标注后者与前者存在空间相交关系的斑块(空间并集),填补这些斑块中城市绿地、水体等造成的斑块内空隙,认定这些斑块构成的区域为最终的城市建成区。

## 2.2 城市扩张指数分析法

扩张速度、扩张强度和扩张形态指数是城市扩张相关研究中常用的基础指标<sup>[3]</sup>。扩张速度指数(urbanization intensive index, UII)可以表示建成区面积在量上的变化,直观地显示建成区变化的动态

情况;扩张强度指数(expand intensity index, EII)在UII的基础上引入区域前一时期的面积数值,实现了对分析单元的扩张率校准,进而确保不同时期城市扩展情况及趋势的可比性;扩张形态指数( $Q$ )将两期UII对比,展现一段时间内城市建成区相较于自身的扩张信息。

(1)扩张速度指数(UII)。UII被用以描述建成区扩张的绝对速度和规模,可以较好地展现一段时间内建成区扩张的年度情况,计算公式为

$$UII = \frac{S_b - S_a}{\Delta t} \quad (1)$$

式(1)中: $S_a$ 、 $S_b$ 分别为研究对象前后两个时期的城市建成区面积,km<sup>2</sup>;  $\Delta t$ 为研究 $S_a$ 和 $S_b$ 时间跨度, a。

(2)扩张强度指数(EII)。EII被用以描述建成区扩张的相对速度和规模,方便动态分析不同时间节点相对自身前一个时间点规模的变化情况,计算公式为

$$EII = \frac{S_b - S_a}{S_a} \frac{1}{\Delta t} \times 100\% \quad (2)$$

(3)扩张形态指数( $Q$ )。 $Q$ 指一定时期内城市建成区的年增速与上一个时期年增速的比值,当 $Q \geq 1.2$ 时,为加速型扩张模式;当 $0 < Q \leq 0.8$ 时,为减速型扩张模式;当 $0.8 < Q < 1.2$ 时,为匀速型扩张模式。指数计算公式为

$$Q = \frac{UII_{t_1}}{UII_{t_0}} \quad (3)$$

式(3)中: $t_0$ 、 $t_1$ 分别表示研究时段。

运用上述指数,从流域整体和分县(市、区)两个维度分析流域城市建成区时空演变特征。

### 2.3 景观指数分析法

景观格局指数是景观生态研究中的常用指数,常被用来表征区域景观的时空特征<sup>[25]</sup>。景观指数之间具有关联性,通过计算和分析景观指数结果可了解城市空间变化中某些地理要素的时空特征。城市建成区作为典型的人造景观,具备独特的景观结构和功能,可以从景观生态视角探究城市建成区扩张规律<sup>[3]</sup>。借助 Fragstats 4.2 软件平台,采用斑块总数量(NP)、景观斑块密度(PD)、平均斑块面积(MPS)、最大斑块指数(LPI)、景观形状指数(LSI)五项指数,综合探讨流域城市建成区破碎化情况,进而分析研究流域城市建成区扩张时空演变特征。具体公式如表 1 所示。

表 1 景观指数<sup>[25]</sup>  
Table 1 Landscape index<sup>[25]</sup>

指数	公式	指数描述
NP	$NP = n$	即景观中某种斑块的总数量;取值范围 $NP \geq 1$ , 无上限
PD	$PD = \frac{\sum n_i}{A_i}$	在斑块级别上即每平方千米的斑块数;取值范围 $PD \geq 0$ , 无上限
MPS	$MPS = \frac{A_i}{n_i}$	在斑块级别上等于某一斑块类型的总面积除以该类型的斑块数目;取值范围 $MPS \geq 0$ , 无上限
LPI	$LPI = \frac{a_{\max}}{A} \times 100\%$	在斑块级别上为某一斑块类型中的最大斑块占据整个景观面积的比例;取值范围 $100 \geq LPI > 0$
LSI	$LSI = \frac{0.25E}{\sqrt{A}}$	在斑块级别上为景观中斑块边界的总长度除以景观总面积的平方根,再乘以正方形校正常数取值范围 $LSI \geq 0$ , 无上限

注:  $n$  为某种斑块的总数量;  $A$  为某种斑块的面积;  $a_{\max}$  为某斑块类型中的最大斑块面积;  $E$  为斑块边界的总长度。

## 3 结果与分析

### 3.1 城市建成区提取结果与分布特征分析

运用优化的局地最佳阈值法,最终提取到白洋淀流域四期城市建成区总面积 322.77、465.19、622.98 和 821.38  $\text{km}^2$ ,分别占白洋淀流域全域的 0.57%、0.81%、1.09% 和 1.44%,1990—2020 年间建成区增长率达 154.48%,城市空间呈现明显扩张趋势。提取结果(图 3)显示流域内各城市建成区规模异质性大,以 2020 年为例,面积较大的 6 个县(市、区)为莲池区、竞秀区、藁城区、任丘市、涿州区和高碑店市,占总城市建成区面积的 43.65%;而面积较小的阜平县、顺平县、行唐县、涞水县、博野县、

容城县 6 个县面积占总城市建成区面积的 6.21%,其他三期情况类似。分析流域四期城市建成区的空间分布情况,发现流域内“正定—涿州”线两侧城市建成区规模异质性大,左侧阜平、涞水、涞源、灵寿、曲阳、顺平、唐县、蔚县、行唐、易县和涿鹿共 11 个县行政面积占流域面积的 41.71%,而其 4 期城市建成区总面积与流域城市建成区面积的比值均低于 15%;左侧区域在城市建成区每 10 年增量稳定在 24  $\text{km}^2$  左右,而流域整体城市建成区每 10 年增量在提高,即左侧建成区扩张对总量的贡献度低于右侧。

### 3.2 城市建成区提取结果对比

提取到各期建成区数据后,为了解优化方法的精度,使用 AUE\_NTL 数据集、局地最佳阈值法提取结果与优化后的局地最佳阈值法提取结果进行对比,并以 2020 年遥感影像和统计数据进行精度验证。为方便制图表达,综合考虑城市规模及地形因素,仅以 2020 年流域内相对小型[图 4(b)阜平县(山区)]、中型[图 4(c)无极县(平原)]、大型[图 4(d)藁城区(平原)]城市为例重点展示。

如图 4 显示,AUE\_NTL 数据集在无极县、阜平县这样中小型建成区提取精度较差,且无法提取到行唐、望都、深泽等县城市建成区。局地最佳阈值法提取的建成区多为团块状且范围更大,易将建成区周围区域或区域内其他夜间灯光亮度高点纳入提取结果,这与传统方法的弊端和夜间灯光外溢性相关。优化的局地最佳阈值法克服了上述数据集和提取方法的弊端,可精细地刻画出城市建成区范围。

通过与遥感影像和建成区统计数据对比,发现优化的局地最佳阈值法提取结果在数值上往往低于统计数据。此外,需要说明的是,由于 1990 年和 2000 年流域内众多县(区、市)无可供参考的建成区面积(即辅助数据),故上述两个年份中无法使用传统的局地最佳阈值法,而其他年份也存在个别辅助数据缺失问题。

总体而言,相较局地最佳阈值法,优化后的局地最佳阈值法有更优的研究适用性,主要体现在两个方面:一是减小了夜间灯光数据因像元过大造成的误差,城市建成区边界刻画更为精细合理,使得该方法亦可用于小型城市研究;二是突破了部分城市长时序辅助数据缺失或难以获取的局限,拓展了该方法在长时序研究中的适用性。

### 3.3 城市建成区演变时空特征分析

将白洋淀流域城市建成区视为一个统一整体,计算不同时间段各指数数值(表 2)。前两期 UII

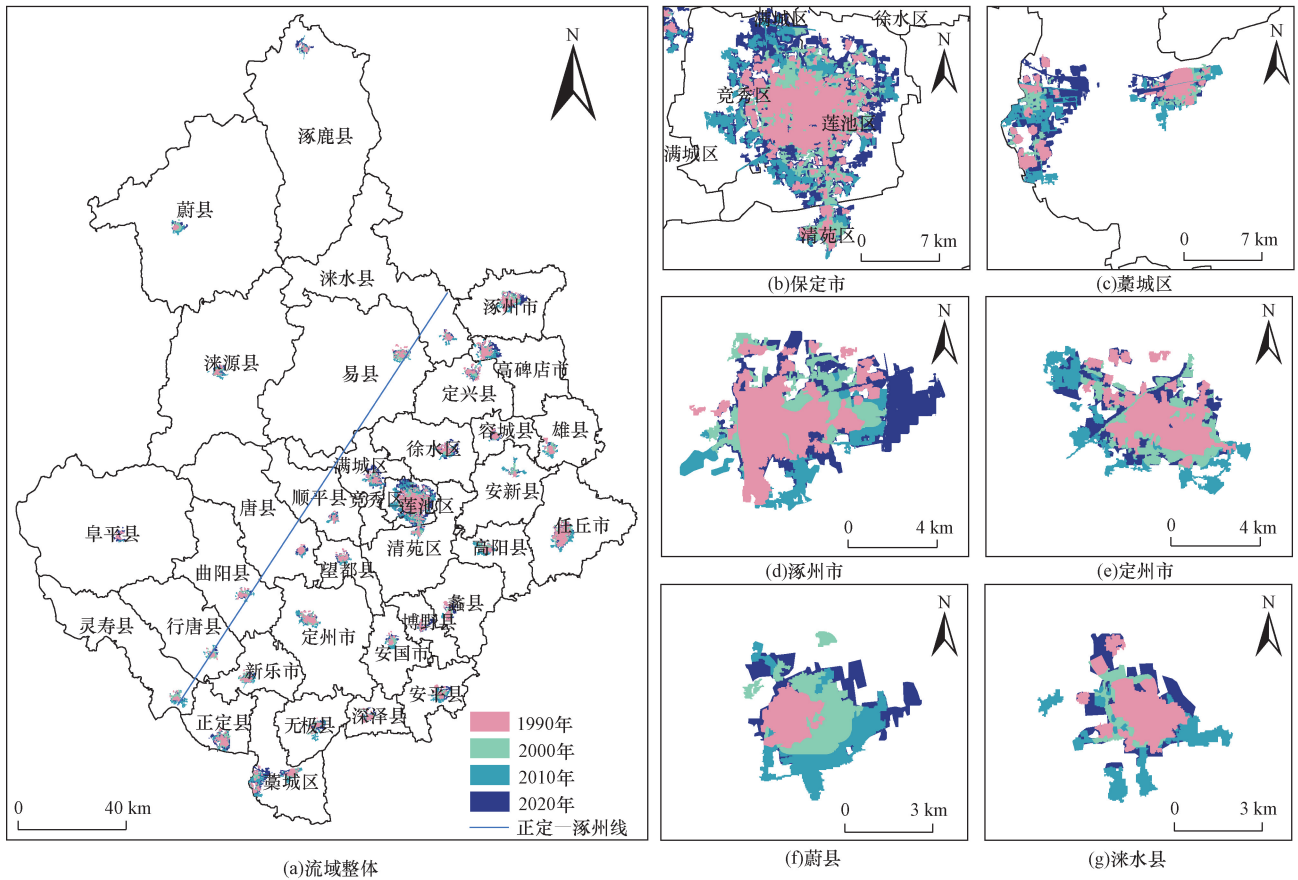


图3 白洋淀流域城市建成区提取结果

Fig. 3 Extraction results of the built-up areas in Baiyangdian Basin

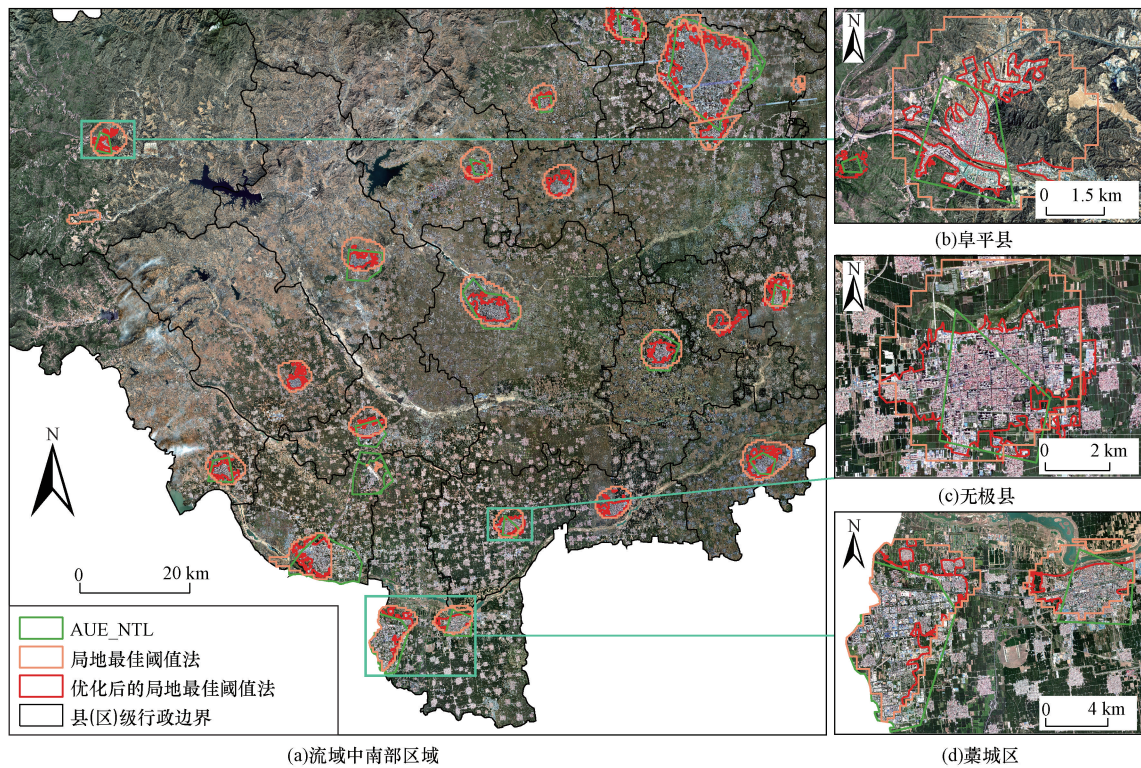


图4 优化后方法提取结果的精度验证

Fig. 4 The accuracy verification of the extraction results of the optimized method

表2 白洋淀流域城市建成区整体扩张指数  
Table 2 Overall expansion indices of the built-up areas in Baiyangdian Basin

流域整体	1990—2000年	2000—2010年	2010—2020年	1990—2020年
UII	14.24	15.78	19.84	16.62
EII/%	4.41	3.39	3.18	5.15
Q	—	1.11	1.26	—

注:扩张速度指数(UII);扩张强度指数(EII);扩张形态指数(Q),由于Q基于前后两期UII计算所得,故仅有2000—2010年和2010—2020年两期结果。

数值在15左右,2010—2020年间指数为19.84,即研究期内最后十年流域城市建成区扩张速度最快。相对1990年流域城市建成区而言,整个研究期内EII为5.15%,以十年为一期数值则分别为4.41%、3.39%和3.18%,即随着城市建成区的持续扩张,流域整体扩张强度有所下降。城市扩张形态指数方面可以计算两期数值,结果显示2000—2010年相比1990—2000年处于匀速型扩张模式,2010—2020年相比2000—2010年处于加速型扩张模式,这一结论与UII数值结果相互印证。

为更全面地分析和描述流域城市扩张的时空特征,分县(市、区)计算相关指数结果如图5所示。白洋淀流域各单元UII存在差异性,如图5(a)所示,1990—2000年、2000—2010年以及2010—2020年三期各单元UII分别位于0.03~1.74、0.03~2.43和0.02~3.92区间,1990—2020年时期内各单元UII位于0.11~2.48区间。计算三期UII标准差分别为0.31、0.49和0.81,反映出流域内各单元扩张速度总体差距趋于增大,显著的如莲池区、竞秀区、藁城区各期UII均较大,扩张速度快,而阜平县、行唐县、唐县等各期UII均较小,扩张速度慢。利用自然断点法将1990—2020年各单元的UII分为五类,如图5(b)所示,其中高指数和较高指数单元有竞秀区、莲池区、满城区和藁城区,处于区域中部和南部,共同点为市区组成部分,具有聚集特征。中指数区有正定县和徐水区,两者毗邻高指数和较高指数区,此外中指数单元还有涿州市、高碑店市、任丘市,三者是位于流域东北部和东部的县级市。低指数和较低指数区分布于流域中西部的大片区域,分别有16和9个县(市、区)。分析UII分布情况可以发现流域内城市扩张速度指数较高的多为市辖区或县级市,区域中心城市(保定市、石家庄)的市辖区相对于其他城市单元有较高的扩张速度。

EII结果如图5(c)所示,由于初始面积的引入,研究区内各单元各期EII情况复杂,同一单元不同时段指数变化较大。1990—2020年时间段各单元EII

值在3%~20%,利用自然断点法对1990—2020年流域各县区EII分类如图5(d)所示,可以观察各流域空间分布较分散。徐水区、安新县属高EII区,西部的灵寿县、蠡县、涞源县有较高EII,除徐水区外,该类城市初始面积较小,研究期内较小面积的城市扩张即可有较高EII。值得注意的是,行唐县、蔚县和安新县2000—2020年期间城市EII指数并不高,而1990—2000年期间EII指数均超10%,扩张强度阶段性明显。总体而言,西部山区县区强度指数均较高,这与各区县初始城市面积密切相关。EII与UII空间分布存在一定差异,但流域中部的曲阳县、唐县、顺平县、望都县和北部涞水县、容城县的上述两指数均低。

如图5(e)所示,对比两期城市扩张形态指数结果,可分为“加速-加速”“加速-匀速”“加速-减速”等九类。如图5(f)所示,其中“加速-加速”和“加速-匀速”类型有6个县(市、区),该类城市具有明显的扩张态势;“减速-减速”和“减速-匀速”类型有安国市、曲阳县和易县,此类城市建成区扩张态势趋缓。其余各类型数量相似,空间上北部相对南部扩张态势略强。

综合各项指数发现1990—2020年期间保定市的竞秀区、莲池区、徐水区和石家庄市周边的正定县、藁城区建成区扩张显著且具有较强的扩张趋势,反映了这两个行政中心城市是区域城市扩张的重要增长极和中心极,具有空间集聚和中心邻近性,在未来的发展中,应特别关注该类城市的建成区扩张。而位于西部太行山区的涿鹿县、蔚县、涞源县、涞水县、阜平县等,虽然在个别时间段有较高的扩张强度,但因地形、经济、人口等限制,初始建成区面积小且扩张速度较慢。

### 3.4 城市建成区演变的景观指数分析

将白洋淀流域1990年、2000年、2010年和2020年4期的城市建成区看作统一景观,计算结果如表3所示。研究期内流域城市建成区NP数值即斑块数量先增后减,反映出1990—2010年的20年间流域内城市快速扩张的同时出现新的“建成区增长核心”,并且新核心的新生速度超过了既有建成区合并的速度。2010—2020年期间随着城市建成区持续蔓延,城市周边的建成区斑块被合并或连接,斑块数量的减少表明城市从疏离向相邻的统一城市实体转移,这一特征在莲池区、竞秀区、高碑店市等相对较大的城市建成区上较为明显。NP特征也解释MSP的变化,2010年前MSP波动中小幅度上升,其间建成区面积虽然明显增加但新增长核的出现抵消了一部分MSP的增加;2010—2020年中MSP剧烈增

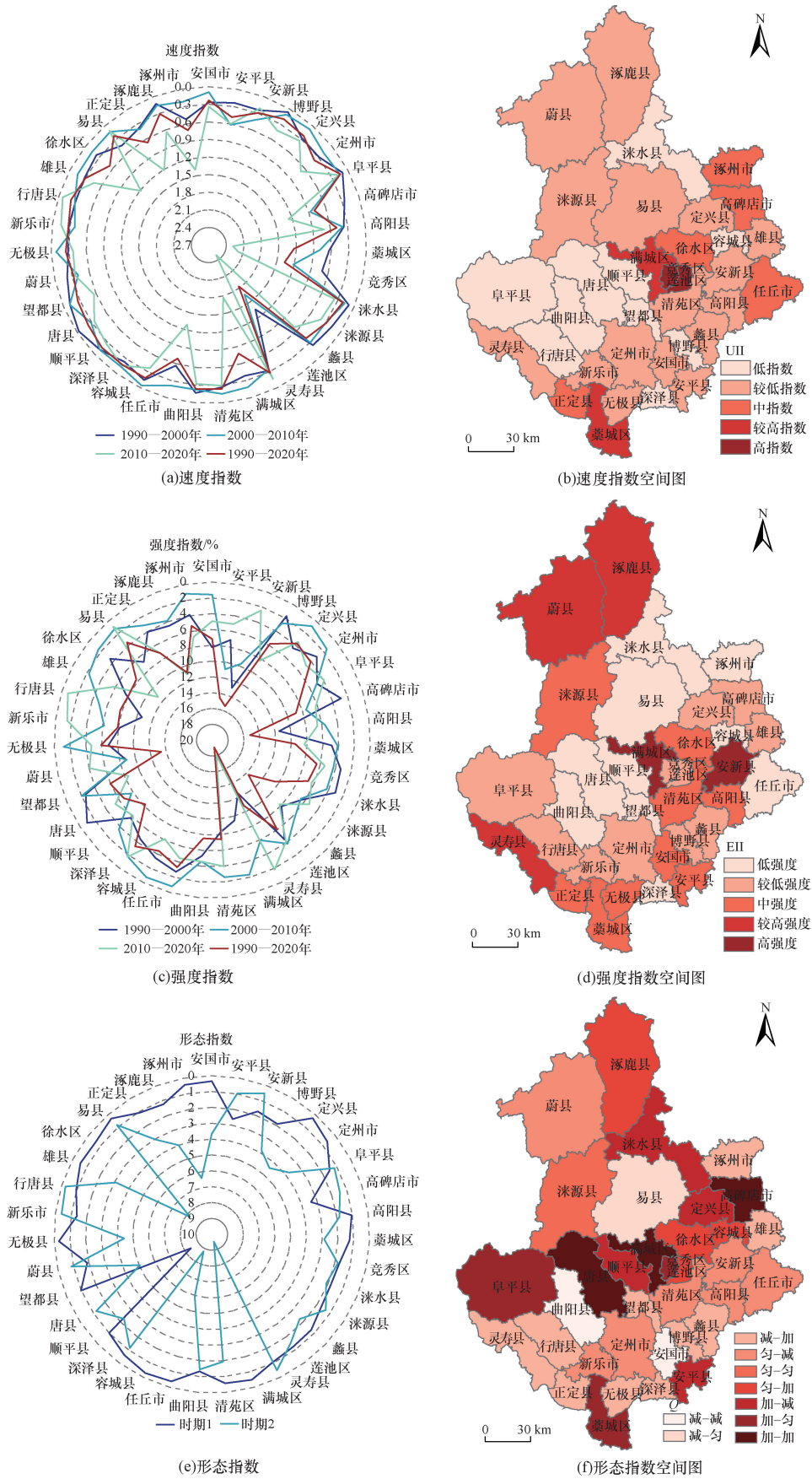


图5 白洋淀流域城市扩张指数  
Fig.5 Urban expansion indices of Baiyangdian Basin

表3 白洋淀流域各期城市建成区景观指数  
Table 3 Landscape index of cities in the Baiyangdian Basin in different stages

年份	NP	PD	LPI	LSI	MSP
1990	200	0.88	11.67	27.39	113.26
2000	288	0.90	12.39	28.17	111.65
2010	334	0.79	20.56	32.07	127.43
2020	301	0.41	21.97	26.71	183.87

长源于 NP 的减少和城市面积的快速增加。

PD 和 LPI 呈现相反的趋势,前者趋于缩小,且在 2010—2020 年期间数值变化剧烈,分析为相应时期 NP 及 MSP 的增加造成这一趋势,同时这一趋势也揭示流域各县区城市发展中相对自身布局更加紧凑。依据提取结果可知莲池区、竞秀区组成的保定市主城区即为 LPI 反映的最大斑块,2000—2010 年的较大增幅反映了该斑块的增长在整个流域中具有优势度。2010—2020 年有较小数值增幅,原因在于期间流域城市总面积的增长和保定市主城区的扩张存在一定抵消作用。LSI 指数先增后减,反映了城市建成区边界由规整到复杂再到规整的总体趋势。综合各指数情况可知:1990—2020 年期间,流域城市建成区景观破碎化程度先升后降,建成区扩张中呈现“分散-融合”的空间特征,建成区边界呈现“规整-复杂-规整”的演变特征。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

从优化的局地最佳阈值法入手,综合运用城市扩张指数、景观指数分析了白洋淀流域城市建成区扩张的时空特征,主要结论如下。

(1)结合夜间灯光和 Landsat 两类遥感数据的特性,对局地最佳阈值法操作流程进行了优化调整,其后运用优化的局地最佳阈值法提取了白洋淀流域 4 期的城市建成区信息。经验证,优化后的局地最佳阈值法有更高的城市建成区提取精度和研究范围适用性。

(2)白洋淀流域 4 期城市建成区总面积分别为 322.77、465.19、622.98 和 821.38 km<sup>2</sup>,增长率达 154.48%,建成区扩张显著。流域内 35 个城市的建成区规模异质性大,规模较大的 6 个县(市、区)城市建成区占流域内全部城市建成区域面积的 40% 以上。流域内“正定—涿州”线左右两侧行政区面积差距较小,但城市建成区的初始规模和扩张程度差距较大。

(3)时序特征上,白洋淀流域城市建成区扩张呈现阶段性特征,2010—2020 年期间城市扩张速度高于其他时段,流域总体呈现加速扩张特征,各单

元扩张速度差距趋于增大。空间特征上,“正定—涿州”线左侧城市建成区扩张速度低于右侧;围绕保定市区和流域外的石家庄市区,扩张的态势较强县(市、区)出现一定的中心邻近性;市辖区或县级市建成区扩张速度较高。流域内城市建成区在扩张中呈现“分散-融合”的空间特征,城市建成区边界呈现“规整-复杂-规整”的趋势。

### 4.2 讨论

夜间灯光数据记录了城市甚至更小规模人口聚集区、车流、火灾等发出的微弱光亮,对城市空间分布具有独特的指示作用<sup>[11-12]</sup>,学者们利用该类数据在城市建成区时空特征研究方面也有了丰富的成果<sup>[13]</sup>。通过引入 Landsat 系列数据,调整和优化了局地最佳阈值法的操作流程,突破了原方法在小型城市辅助数据可得性不足的限制,使得该方法在小型城市建成区提取上也具有了适用性。此外,多类数据结合的操作流程,也可降低某一类数据自身缺陷对研究结果的干扰,有助于提高提取精度<sup>[26-27]</sup>。但研究仍存在如下不足。

(1)城市建成区的判定和提取仍是值得深入讨论的问题。基于优化的局地最佳阈值法,仅以白洋淀流域为例进行了方法应用。但该方法一些操作细节和参数确定仍需更多探讨和实证,未来可从多尺度或其他典型研究区入手开展后续研究。

(2)仅对白洋淀流域内各城市建成区的时空特征进行了描述分析,对其演化机制关注仍不足。未来研究中可考虑寻求其他可用数据,探究目标研究区内城市建成区演化的驱动因素,以期更好了解城市建成区动态演化的内在机理。

### 参 考 文 献

- [1] Kuang W, Du G, Lu D, et al. Global observation of urban expansion and land-cover dynamics using satellite big-data[J]. Science Bulletin, 2021, 66(4): 297-300.
- [2] Zhou Y, Wu T, Wang Y. Urban expansion simulation and development-oriented zoning of rapidly urbanising areas: a case study of Hangzhou[J]. Science of the Total Environment, 2022, 807: 150813.
- [3] 杨婉清, 杨鹏, 孙晓, 等. 北京市景观格局演变及其对多种生态系统服务的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(16): 6487-6498. Yang Wanqing, Yang Peng, Sun Xiao, et al. Changes of landscape pattern and its impacts on multiple ecosystem services in Beijing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(16): 6487-6498.
- [4] 余瑞, 鲁珊, 郑志元, 等. 城市扩张对区域生态安全格局影响研究——以合肥市为例[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(26): 11327-11337. Yu Rui, Lu Shan, Zheng Zhiyuan, et al. Impact of urban expansion on regional ecological security pattern: a case study of Hefei City[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(26): 11327-11337.

- [5] Jiang H, Guo H, Sun Z, et al. Projections of urban built-up area expansion and urbanization sustainability in China's cities through 2030[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 367: 133086.
- [6] Xu Z, Jiao L, Lan T, et al. Mapping hierarchical urban boundaries for global urban settlements[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 103: 102480.
- [7] 徐智邦, 焦利民, 王玉. 1988—2018年中国城市实体地域与行政地域用地扩张对比[J]. *地理学报*, 2022, 77(10): 2514-2528.  
Xu Zhibang, Jiao Limin, Wang Yu. Comparison of urban land expansion between urban physical and administrative areas in China from 1988 to 2018[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(10): 2514-2528.
- [8] 余柏菡, 王丛笑, 宫文康, 等. 夜间灯光遥感与城市问题研究: 数据、方法、应用和展望[J]. *遥感学报*, 2021, 25(1): 342-364.  
Yu Boliang, Wang Congxiao, Gong Wenkang, et al. Nighttime light remote sensing and urban studies: data, methods, applications, and prospects[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25: 342-364.
- [9] 胡苗苗, 闫庆武, 李建辉. 基于 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 夜光影像的中原城市群城市扩张的时空演变及驱动力分析[J]. *自然资源遥感*, 2024, 36(1): 189-199.  
Hu Miaomiao, Yan Qingwu, Li Jianhui. Analyzing the spatio-temporal evolution of urban expansion in the Central Plains urban agglomeration and its driving force based on DMSP/OLS and NPP/VIIRS nighttime light images[J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2024, 36(1): 189-199.
- [10] 唐常春, 陈珈琪, 谢响霏, 等. 基于多源大数据的长株潭城市群城镇建成区综合集成识别与空间分异机制[J]. *经济地理*, 2024, 44(1): 66-76.  
Tang Changchun, Chen Jiaqi, Xie Yunfei, et al. Integrated identification and spatial differentiation mechanism of urban built-up area in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration based on the multi-source big data[J]. *Economic Geography*, 2024, 44(1): 66-76.
- [11] 司文涛, 张宁慧, 叶海鹏, 等. 基于长时间序列夜间灯光数据的京津冀城市群城市化过程[J]. *资源科学*, 2022, 44(10): 2114-2124.  
Si Wentao, Zhang Ninghui, Ye Haipeng, et al. Urbanization in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in China based on long-term nighttime light data[J]. *Resources Science*, 2022, 44(10): 2114-2124.
- [12] Liu J, Jiao L, Zhang B, et al. New indices to capture the evolution characteristics of urban expansion structure and form[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 122: 107302.
- [13] Henderson M, Yeh E, Gong P, et al. Validation of urban boundaries derived from global night-time satellite imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24: 595-609.
- [14] Zheng Q, Seto K C, Zhou Y, et al. Nighttime light remote sensing for urban applications: progress, challenges, and prospects[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023, 202: 125-141.
- [15] 郑沐辰, 许刚, 肖锐, 等. 城市夜间灯光强度空间衰减规律及应用[J]. *地理科学进展*, 2022, 41(7): 1251-1260.  
Zheng Muchen, Xu Gang, Xiao Rui, et al. Distance decay of nighttime lights from urban centers and its application[J]. *Progress in Geography*, 2022, 41(7): 1251-1260.
- [16] Xu Y, Hao S, Cui Y, et al. Analysis of the spatiotemporal expansion and pattern evolution of urban areas in Anhui Province, China, based on nighttime light data[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 157: 111283.
- [17] 贺军亮, 关子琼, 张振冉, 等. 郑州市主城区空间形态信息提取与特征分析[J]. *测绘科学*, 2022, 47(12): 105-111, 164.  
He Junliang, Guan Ziqiong, Zhang Zhenran, et al. Extraction and feature analysis of urban spatial pattern in downtown of Zhengzhou City[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2022, 47(12): 105-111, 164.
- [18] Huang X, Yang J, Li J, et al. Urban functional zone mapping by integrating high spatial resolution nighttime light and daytime multi-view imagery[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 175: 403-415.
- [19] Yang Y, Liu Y, Li Y, et al. Quantifying spatio-temporal patterns of urban expansion in Beijing during 1985—2013 with rural-urban development transformation[J]. *Land Use Policy*, 2018, 74: 220-230.
- [20] Xie H, Zhang Y, Duan K. Evolutionary overview of urban expansion based on bibliometric analysis in Web of Science from 1990 to 2019[J]. *Habitat International*, 2020, 95: 102100.
- [21] 徐涛, 于欢, 孔博, 等. 基于夜间灯光数据的川渝城市建成区时空动态[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(35): 15152-15159.  
Xu Tao, Yu Huan, Kong Bo, et al. Research on the temporal and spatial dynamics of Sichuan-Chongqing urban built-up area based on nighttime light data[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(35): 15152-15159.
- [22] 高星, 宋昭颖, 李晨曦, 等. 基于景观生态风险评价的白洋淀流域景观格局优化研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2023, 39(2): 174-183.  
Gao Xing, Song Zhaoying, Li Chenxi, et al. Landscape pattern optimization in Baiyangdian Basin based on landscape ecological risk assessment[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, 39(2): 174-183.
- [23] Zhang L, Ren Z, Chen B, et al. A prolonged artificial nighttime-light dataset of China (1984—2020)[J]. *Scientific Data*, 2024, 11(1): 414.
- [24] Zhao M, Cheng C, Zhou Y, et al. A global dataset of annual urban extents (1992—2020) from harmonized nighttime lights[J]. *Earth System Science Data*, 2022, 14(2): 517-534.
- [25] 郭建国. 景观生态学: 格局, 过程, 尺度与等级[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2007.  
Wu Jianguo. *Landscape ecology: pattern, process, scale and hierarchy*[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [26] Xue B, Xiao X, Li J, et al. Multi-source data-driven identification of urban functional areas: a case of Shenyang, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2023, 33(1): 21-35.
- [27] Li X, Song Y, Liu H, et al. Extraction of urban built-up areas using nighttime light (NTL) and multi-source data: a case study in Dalian City, China[J]. *Land*, 2023, 12(2): 495.