引文格式:孟滢滢,周思赜,聂艳,等.POI和夜间灯光融合数据用于城乡结合部空间划定的研究——以武汉市为例[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(3):449-461.DOI:10.13203/j.whugis20220597

Citation:MENG Yingying,ZHOU Size,NIE Yan,et al.Spatial Delimitation of Urban-Rural Fringe Based on POI and Nighttime Light Data: A Case Study of Wuhan City[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(3):449-461.DOI:10.13203/j.whugis20220597

POI和夜间灯光融合数据用于城乡结合部空间划定的研究——以武汉市为例

孟滢滢[1] 周思赜[1] 聂 艳[2] 曾怀文[3] 于 婧[1]

1 湖北大学区域开发与环境响应湖北省重点实验室,湖北 武汉,430062

2 华中师范大学地理过程分析与模拟湖北省重点实验室,湖北 武汉,430079

3 深圳市城市空间规划建筑设计有限公司,广东 深圳,518039

摘 要:城乡结合部边界识别是城乡精细规划与治理的基础工作,对于土地可持续利用、城乡一体化等进程具有推动作用。以往城乡结合部划分存在数据源单一、获取困难、时空分辨率低的不足,基于电子地图的兴趣点(point of interest,POI)和国家极地轨道伙伴关系(national polar-orbiting partnership,NPP)卫星的夜间灯光融合数据,构建NPP &POI综合指数;结合城乡空间结构关系,提出了一种新的城乡结合部空间识别方法。以武汉市为例,采用断裂点分析法识别空间突变点,求得城乡结合部边界,利用土地利用结构信息熵、归一化植被指数(normalized difference vegetation index,NDVI)以及人口密度数据对划定结果进行验证和比较,并对典型区域进行了野外实地校核。结果表明,相较于单独采用POI、夜间灯光和人口密度数据,NPP &POI综合指数考虑了夜间灯光与POI中设施类型、光照强度和分辨率差异,其划分识别出的城乡结合部边界准确度更高、时效性更强;相较于土地利用、景观等数据,NPP &POI综合指数更能表征城乡发展活力,定量识别出城乡潜在中心区与多层结构对于城乡基础设施的配置、产业分工、生态职能划分等研究具有参考意义。NPP &POI综合指数在城乡空间上的二次突变规律证实了城乡结合部作为城市扩张过程中产生的地域实体客观存在,为城乡三元结构理论提供了实证支撑。

关键词:NPP &POI综合指数;城乡结合部;断裂点分析法;城乡空间结构;夜间灯光数据

中图分类号:P208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-03-28

DOI:10.13203/j.whugis20220597 **文章编号**:1671-8860(2025)03-0449-13

Spatial Delimitation of Urban-Rural Fringe Based on POI and Nighttime Light Data: A Case Study of Wuhan City

MENG Yingying[1] *ZHOU Size*[1] *NIE Yan*[2] *ZENG Huaiwen*[3] *YU Jing*[1]

1 Hubei Key Laboratory of Regional Development and Environmental Response, Hubei University, Wuhan 430062, China

2 Hubei Provincial Key Laboratory for Geographical Process Analysis and Simulation, Central China Normal University, Wuhan 430079, China

3 Shenzhen Urban Space Planning and Architectural Design Co. Ltd, Shenzhen 518039, China

Abstract: **Objectives**: The identification of urban-rural fringe boundaries is a fundamental task for fine urban and rural planning and governance, and it plays a vital role in promoting sustainable land use and urban-rural integration. The traditional methods for delineating urban-rural boundaries have many limitations, such as reliance on single data sources, difficulty in data acquisition, and low temporal and spatial resolution. **Methods**: This paper proposes a novel method for identifying urban-rural fringe boundaries, based on the fusion of points of interest (POI) from electronic map and nighttime light data of national polar-orbiting partnership (NPP) satellite, in conjunction with the spatial structure of urban and rural space. Taking Wuhan City as a case study, this paper employs break point analysis to identify spatial mutation points and de-

基金项目:教育部人文社会科学研究青年基金(20YJC630207)。

第一作者:孟滢滢,硕士,研究方向为国土空间规划。623173312@qq.com

通信作者:于婧,博士,教授。yjing@hubu.edu.cn

termine urban-rural fringe boundaries. The results are validated and compared using land use structure entropy, normalized difference vegetation index, and population density data, with field verification conducted in selected typical areas. **Results**: The results show that by considering differences in facility types, light intensity, and resolution in POI and nighttime light data, the NPP &POI composite index for boundary delineation offers higher accuracy and timeliness compared to the boundaries identified using POI, nighttime light, and population density data individually. NPP &POI data can more effectively reflect the vitality of urban-rural development compared to land use and landscape data. The quantitative identification of potential central areas and multi-layered structures in urban-rural settings is significant for research on urban-rural infrastructure allocation, industrial division, and ecological function distribution. **Conclusions**: The secondary mutation pattern of NPP &POI data in urban-rural spaces confirms the objective existence of urban-rural fringe areas as territorial entities emerging from urban expansion, providing empirical support for the urban-rural triad structure theory.

Key words: NPP &POI composite index; urban-rural fringe; break point analysis; structure of urban and rural space; nighttime light data

传统城乡二元体制遵循农村服务城市的原则,在推动中国经济腾飞、城市化等进程中发挥了重大作用,同时也导致了城市臃肿、乡村凋敝等问题[1]。随着城市化、郊区化的深入发展,城乡结合部土地利用矛盾尖锐、社会管理混乱,被认为是城乡结构中的"第三元",其范围划定成为城乡空间结构研究的难点[2]。城乡结合部空间范围的划定作为城乡精细规划与治理的先行环节,影响到城乡空间资源的有效发挥和城乡一体化持续健康的发展,科学选定数据源对提高划定结果准确性意义重大[3]。

早期城乡结合部空间界定多选取距城市核心区距离[4]、人口数量与比例[5]、通勤距离[6]等指标,如莱斯鲁姆将城市中心区向外延伸6~10 km的环形区域划定为城乡结合部[4],该类方法受行政边界限制较大,难以应用于不同发展程度和地域的城市。随着信息化的深入发展,土地利用、景观、人口空间分布数据集等大数据被广泛应用于空间定量研究中[7-8],该类方法虽然突破了行政边界的限制,但对社会经济发展状况解释度较低[9]。

夜间灯光影像能够客观、准确反映人类活动与区域发展差异,在土地城镇化水平测算[10]、建成区与城市群边界提取[11]等方面应用颇丰。然而,夜光遥感分辨率的限制可能会导致识别结果大于实际范围,仅在重庆市等超大城市有所实践[12]。另一方面,电子地图的兴趣点(point of interest,POI)密度分布情况能够从宏观与微观两个层面反映人类活动强度与社会经济发展水平,并与自然景观、土地利用格局等相关联[13]。研究证实,POI与夜光遥感空间耦合关系较好,在城市空间结构研究结果中表现出较强的一致性[14],将这两者结合应用于城乡结合部研究,不仅能突破传统统计数据中行政边界的限制,还能提供较高的时空分辨率,从而有效提高城乡结合部的边界识别准确性[15]。

本文以武汉市作为研究区,通过分析夜光遥感数据和POI与城乡结合部的空间分布关系,提出将POI和夜间灯光融合数据引入到城乡结合部空间识别中的方法。所提方法能够显著提高城乡结合部边界的划定准确性和时效性,为城乡空间结构研究和精细化治理提供新的数据支持和理论依据。

1 研究区概况和数据

1.1 研究区概况

武汉市是湖北省省会,下辖13个区,辖区面积8 569.55 km^2。截止2019年底,武汉市地区生产总值超过1.62万亿元,常住人口1 121.20万人,城镇化率达80.49%。随着城市化的推进,武汉市逐步构建起多中心、组团式的城市空间格局,城镇化空间发展不平衡,7个中心城区城镇化率均达90%以上,而周边城区城镇化率较低,如蔡甸区、黄陂区,城镇化率分别为40.63%、49.21%[16]。

1.2 数据来源与预处理

本文使用的3类数据包括:(1)夜间灯光数据,选用美国发射的Suomi国家极地轨道伙伴关系(national polar-orbiting partnership,NPP)卫星搭载的可见光红外成像辐射仪(visible infrared imaging radiometer suite,VIIRS)获取夜光影像,成像时间为2020年11月,分辨率为500 m。

(2)POI数据,通过Ospider软件从百度地图获取。(3)辅助数据,其中2010—2020年归一化植被指数(normalized difference vegetation index,NDVI)来源于美国国家航空航天局的MOD13Q1产品,分辨率为250 m;2020年土地利用数据来自第三次全国国土调查,人口数据来自《武汉统计年鉴》;2020年WorldPop数据集分辨率为100 m,来源于其官网(https://www.worldpop.org)。

对上述3类数据分别进行预处理:

1)夜间灯光数据预处理。选用的全球月度数据灯光产品已对云层反射、大气折射、极光、闪电和其他杂散光进行了剔除,并进行了星上辐射定标,仍需使用ENVI软件的中值滤波工具去除背景噪声。

2)POI数据预处理。百度地图POI原始数据存在数据冗余、分类庞杂的问题,鉴于研究需要,本文对原始数据进行了清洗和重分类,剔除了近似值、重复值和空值,选取与自然景观和城乡人口活动密切相关的文体类、商业类、产业类、公服类、居住类五大类POI数据作为研究对象,最终获得武汉市2021年4月有效POI数据345 861条(表1)。

表1 武汉市POI分类统计

Table 1 Statistics of POI Classification in Wuhan City

功能类别	一级行业分类	数量/条
文体类	旅游景点、休闲娱乐、运动健身、教育培训、文化传媒、自然地物	53 966
商业类	美食、酒店、购物、生活服务、丽人、汽车服务、金融	68 508
产业类	公司企业	70 204
公服类	医疗、交通设施、政府机构	33 640
居住类	房地产	119 543

3)土地利用数据处理。对第三次全国国土调查数据进行重分类,分为耕地、园地、林地、草地、工业用地、其他建设用地、水体和其他用地8个大类。将工业用地从建设用地中单独分出,作为指示城乡结合部的关键地类,遵循了农地城市流转由近郊农业用地→菜地→工业用地→居住用地填充→商业服务设施用地变化的一般变化规律[17]。

2 研究设计

2.1 研究方法

2.1.1 核密度分析法

核密度分析能够计算空间各类要素在其周围邻域的密度,连续模拟和可视化反映各类要素的空间分布情况。选用该方法对武汉市POI数据的相对集中度进行可视化表达,计算式为[18]:

$$P_i=\frac{1}{n\pi R^2}\times\sum_{j=1}^{n}K_j\left(1-\frac{D_{ij}^2}{R^2}\right)^2 \tag{1}$$

式中,P_i为空间任意点i的核密度计算值;R为核密度函数搜索半径;n为半径为R范围内研究对象点j的总数;K_j为点j的权重;D_{ij}点i、j两点的欧氏距离,$D_{ij}<R$。

2.1.2 NPP &POI综合指数

基于夜间灯光灰度值和POI核密度数值权重相同的理论,采用平均值法[19]构建NPP &POI综合指数,既能保留使用夜光遥感识别结果的连片优势,又能减轻其饱和、溢出效应。计算式为:

$$L_i=\sqrt{P_i\times \mathrm{NPP}_i} \tag{2}$$

式中,L_i为i点的NPP &POI综合指数;NPP_i为i点的NPP夜间灯光亮度值。

2.1.3 断裂点分析

断裂点理论是康维斯提出的关于城市与区域相互作用的理论,通过选取距离衰减最大值作为突变终止点,被广泛应用于城市吸引范围的确定[19],断裂点计算式为:

$$V_{ab}=X_{a(b+1)}-X_{ab} \tag{3}$$

$$\bar{V}=\frac{1}{n}\sum V_{ab} \tag{4}$$

$$Q_{ab}=\frac{V_{ab}}{\bar{v}} \tag{5}$$

$$Q_a=\max(Q_{ab}) \tag{6}$$

式中,V_{ab}为第a条剖面线上n区间的变化率;X_{ab}、$X_{a(b+1)}$分别为第a条剖面线上第b个、第$b+1$个序列特征值;$\bar{V}$为第a条剖面线上的平均变化率;Q_{ab}为第a条剖面线上n区间的距离变化值;Q_a为第a条剖面线上的最大距离变化值,即a方向上的断裂点。

2.1.4 土地利用结构信息熵模型

土地利用结构信息熵能够反映一定区域内土地利用结构的复杂性,熵值越大表明该研究区土地利用结构越复杂,土地类型越多样,反之亦然[20],计算式为:

$$W=-\sum_{i=1}^{m}x_i\ln x_i \tag{7}$$

式中,W为土地利用结构信息熵;m为样本区域内土地类型的数量;x_i为样本区域中某种土地利用类型占总面积的百分率。W数值越大,表明样本区域中土地利用结构越复杂,反之越简单。

2.2 城乡结合部空间划定标准

2.2.1 NPP &POI综合指数构建

基于POI与夜间灯光数据格式差异,本文采用核密度分析法将POI数据转化为栅格数据,并通过平均值法和模糊隶属度工具计算归一化的NPP &POI综合指数,以此划定城乡结合部边界。在POI核密度分析中,带宽值的选择对NPP &POI综合指数的计算结果影响显著[21]。本文总结前人研究经验,分别选用50 m、500 m、3 500 m作为核密度分析带宽值,对NPP &POI的空间形态进行了比较分析,结果如图1所示。

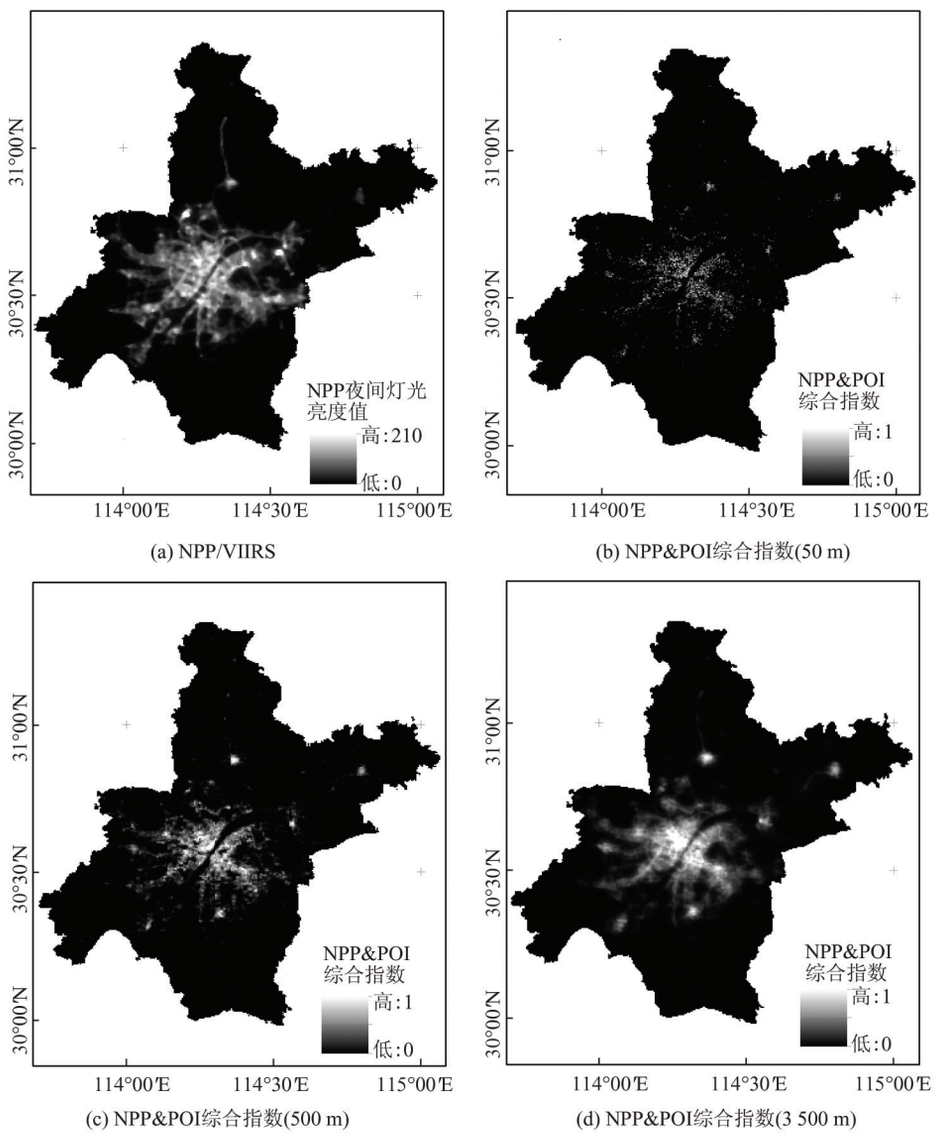


图1 不同带宽下武汉市NPP &POI处理效果对比

Fig. 1 Comparison of NPP &POI Processing Effects Under Different Search Distances in Wuhan City

由图1(a)可见,NPP/VIIRS受空间分辨率影响,在高度城市化地区亮度值显著较高,并沿交通干线向相邻空间蔓延,城乡之间边界模糊不清,出现饱和、溢出现象。不同带宽分析下的POI与NPP/VIIRS融合结果能够从不同程度对这一现象进行改善。由图1(b)~图1(d)可以看出,当带宽值为50 m时,NPP &POI呈现点状破碎分布特征,数据空间连续性差;当带宽值为3 500 m时,对NPP/VIIRS的饱和、溢出效应减轻程度较低,城乡空间局部细节特征难以凸显;当带宽值为500 m时,不仅能够显著减轻夜间灯光数据的饱和、溢出效应,还能综合设施类型与光照强度之间的差异,减轻道路沿线灯光值过强的问题,满足城乡结合部划定中平衡全域尺度和局部细节的需要。因此本文将500 m确定为POI核密度分析带宽值,生成NPP &POI综合指数如图1(c)所示。

为了对NPP &POI空间变化趋势进行研判,本文对其构建等值线,并依据人口重心模型计算

求得武汉市人口重心,以此为原点、以2°为间隔,向外引出180条剖面线,以500 m为间距生成要素节点,用于提取武汉市域内不同方向和距离上的图斑数值(图2)。

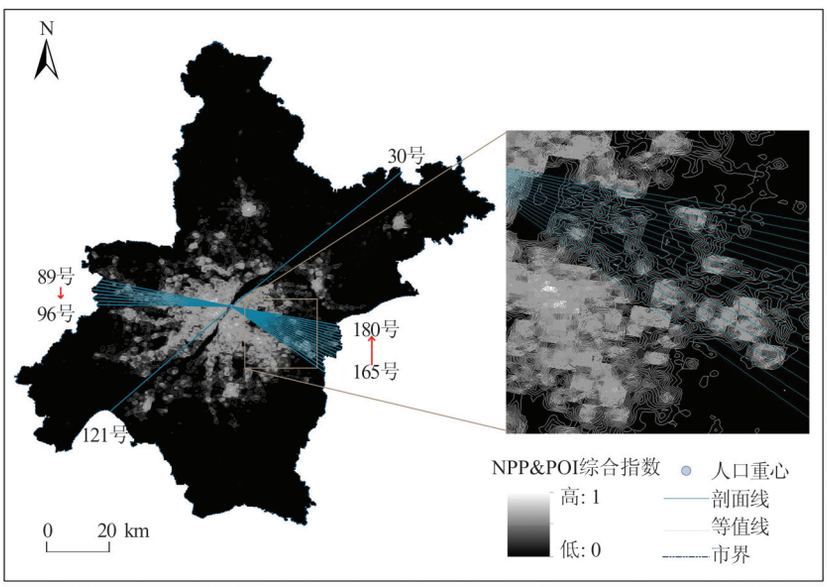


图2　NPP &POI剖面线与等值线示意图

Fig. 2　Schematic Diagram of NPP &POI Section Lines and Isolines

2.2.2　NPP &POI与城乡空间结构关系分析

城市核心区是开发强度最高的区域,提供经济、政治、文化等公共服务,且聚集大量人类活动与设施。城乡结合部则为城市核心区与乡村之间的过渡带,人类活动强度显著低于城市核心区,并在空间和功能上有所区别。随着与人口重心距离的增加,NPP &POI数值呈现迅速跌落的态势,在城市核心区与城乡结合部之间出现第一次突变(图3)。

城乡结合部在人口、经济、社会活动方面与城市联系十分紧密,应被视为城市建成区的一部分。对NPP &POI综合指数构建等值线后发现,城市核心区由于人类活动和各类服务设施集中,等值线之间的距离非常紧密,城乡结合部的等值线距离相对增大,并且NPP &POI数值波动较大,而到了乡村,等值线变得非常稀疏,NPP &POI数值迅速下降并趋近于0。由图3可以看出,随着与人口重心距离的增加,面积累积值大致经历3个变化阶段,即城市核心区的平缓增长、城乡结合部的波动增长和乡村的急剧提升,NPP &POI在城乡结合部与乡村之间出现第二次突变。

根据NPP &POI在城乡空间中的二次变化规律,本文将NPP &POI数值急剧衰减区域作为城乡结合部内边界,将NPP &POI等值线围合面积急剧提升区域作为城乡结合部外边界,将断裂点法计算得到的NPP &POI综合指数及其等值线变化拐点连接,即可得到城乡结合部空间范围。

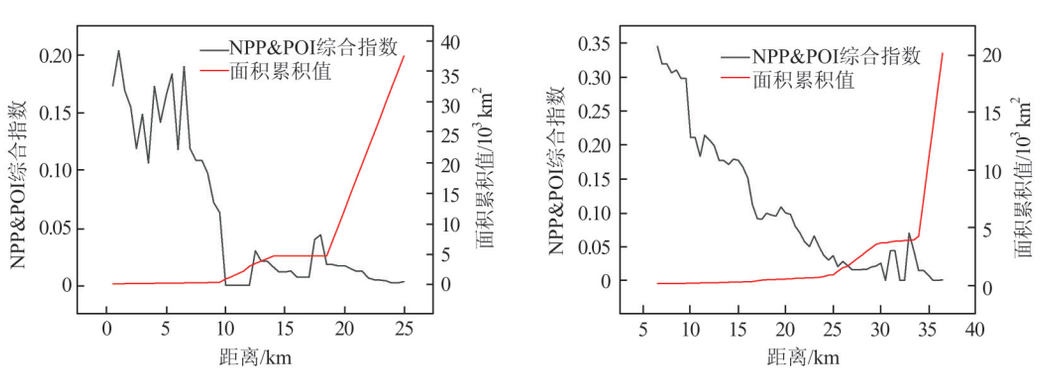


图3　NPP &POI及其等值面面积随距离变化图

Fig. 3　Variation of NPP &POI and the Isosurface Area with Distance

2.3 划定结果检验方法

一般来说,典型的城市核心区与乡村土地利用类型较为简单,土地利用结构信息熵较低;城市核心区建设用地连绵分布,NDVI较低,乡村以耕地、园地等农用地和林地等生态用地为主,NDVI较高[31]。城乡结合部是城市与乡村之间的过渡地带,在城市蔓延的过程中其自然下垫面受到不断的改造,NDVI为中等水平并处于降低趋势,土地利用结构紊乱度高。据此规律,本文在武汉市行政区划内建立3 km×3 km的格网,通过引出验证样带,对比分析城市核心区、城乡结合部、乡村土地利用结构信息熵与NDVI空间特征,检验划定结果准确性,并与人口密度数据进行比对分析。

3 研究结果

3.1 城乡结合部内边界识别结果

将NPP &POI综合指数在180个方向上的断裂点连接,得到武汉市城乡结合部内边界,断裂点计算结果见表2。研究发现,在自然、经济、政治等的影响下,不同方向上断裂点数值有所差异,但大都在0.1附近波动,本文将0.1作为城乡结合部内边界阈值,纠正个别方向上异常断裂点。武汉市NPP &POI总体上呈中间高、四周低的特征,城市核心区数值最高,在0.2~0.6之间波动,而到城乡结合部与乡村,数值急剧下降至0.1以下。在主体高值区外,散布7个高值集聚区(0.1~0.3),与《武汉市国土空间总体规划(2021—2035年)》中的副城、新城组群相符,识别为新城组团。武汉市城市核心区包括江岸区、江汉区、硚口区、汉阳区、武昌区、青山区和洪山区西部,新城组团位于宋家岗、阳逻、蔡甸、纸坊、纱帽、前川和郑城。

表2 不同剖面线上NPP &POI断裂点数值统计表

Table 2 Statistics of NPP &POI Breakpoint Values on Different Profile Lines

剖面线序号	NPP &POI综合指数断裂点平均值
1~30	0.109
31~60	0.095
61~90	0.105
91~120	0.103
121~150	0.097
151~180	0.114

3.2 城乡结合部空间范围划定与分析

将断裂点算法求得的NPP &POI等值线面积累积值拐点连接,得到城乡结合部外边界,对内外边界进行套合后,两条边界之间的部分为武汉市城乡结合部范围(图4)。

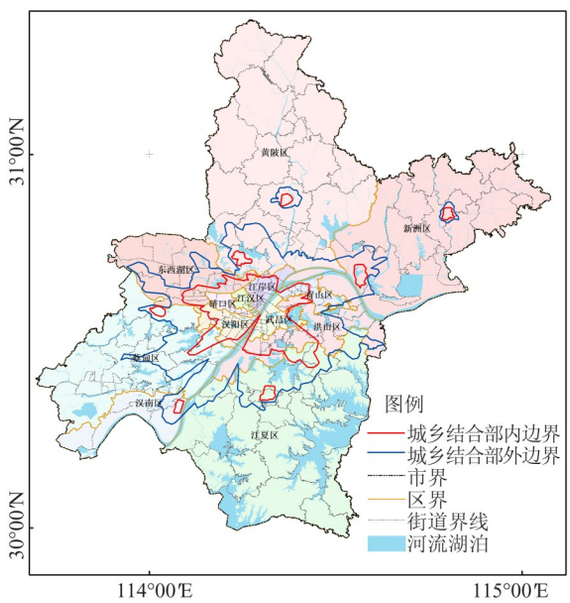


图4 武汉市城乡结合部边界

Fig. 4 Urban-Rural Fringe Boundary of Wuhan City

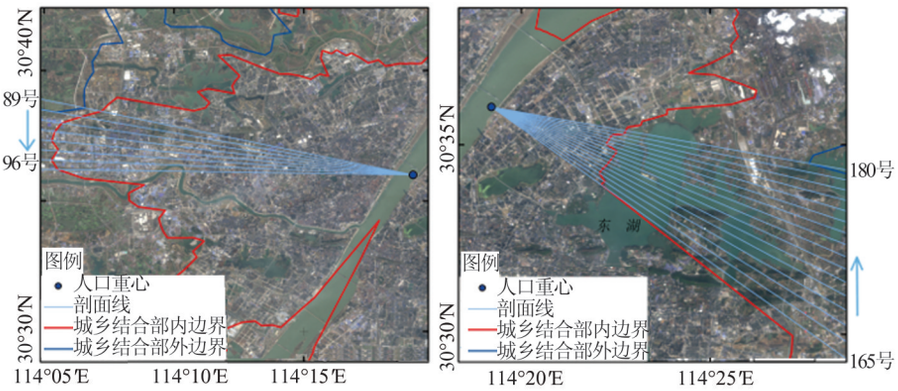
计算结果显示,大型湖泊显著影响武汉市城市扩张方向。以165~180号剖面线为例,距人口重心0~6 km内,NPP &POI综合指数为0.15~0.4,超过6 km后急剧下降;而以89~96号剖面线为例,6 km处NPP &POI综合指数维持在0.5,直到15~20 km才降至0.1。前者因为东湖阻隔导致城市建设受限,后者因为平原连绵、湖泊阻隔少,城市化推进较快。类似现象还出现在后官湖、知音湖等湖区,城乡结合部边界呈现凸向或凹进的特征(图5)。

武汉市城乡结合部面积为1 482.35 km^2,占武汉市总面积的17.30%,土地利用类型以建设用地、水域和耕地为主,分别占该区域总面积的40.75%、30.03%、14.60%,土地利用类型分布如图6所示。此外,武汉市城乡结合部受交通、经济、政策等作用,围绕武汉市城市核心区主体呈现"六轴两环"的带状式与跳跃式的分布特征,如图7所示。

3.3 城乡结合部识别结果验证

3.3.1 空间整体测算

分别对上文中划定的2020年武汉市城市核心区、城乡结合部、乡村的人口密度、土地利用结构信息熵和NDVI进行测算后显示,人口密度在



(a) 89~96号剖面线　(b) 165~180号剖面线

图 5　选定剖面线处遥感影像

Fig. 5　Remote Sensing Images at Section Lines

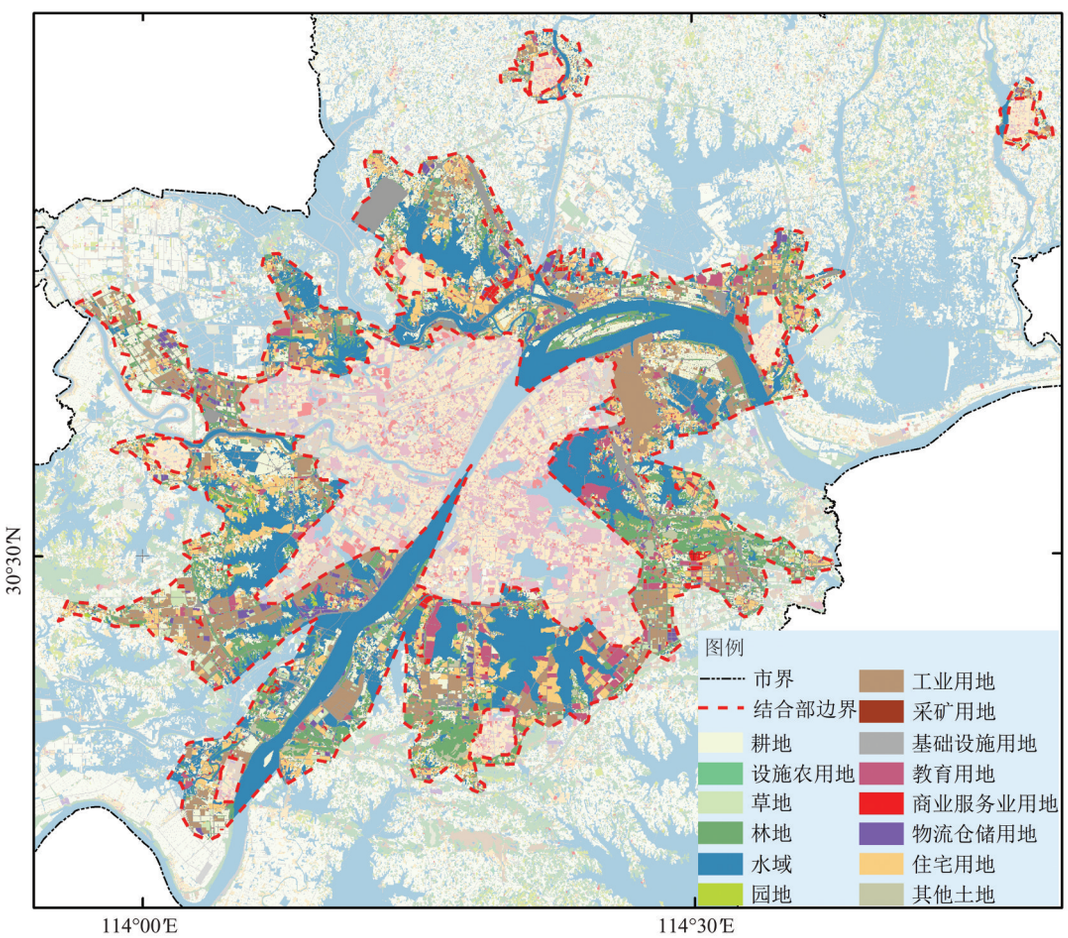


图 6　武汉市城乡结合部土地利用类型分布图

Fig. 6　Distribution Map of Land Use Types in Urban Rural Fringe of Wuhan City

城市核心区为 9 335.83 人/km^2，在城乡结合部为 2 556.28 人/km^2，在乡村为 827.84 人/km^2，人口密度呈现城市核心区→城乡结合部→乡村递减的规律。土地利用结构信息熵在城市核心区为 0.937，在城乡结合部为 1.630，在乡村为 1.418，符合城乡结合部高、城市核心区和乡村低的特征。

武汉市 2010－2020 年 NDVI 及其标准差测算结果见表 3。由表 3 可知，NDVI 呈现由城市→城乡结合部→乡村递增的特征，NDVI 标准差呈现城乡结合部高、城市核心区和乡村低的特征。城市核心区、乡村 NDVI 呈现递增的趋势，标准差较低，与城市绿色基础设施建设、乡村土地整治等活动关系密切；城乡结合部 NDVI 呈现递减的趋势，与城市空间扩张导致下垫面性质发生改变有关，标准差较高，符合城乡结合部高，城市核心区、乡村低的分布规律。

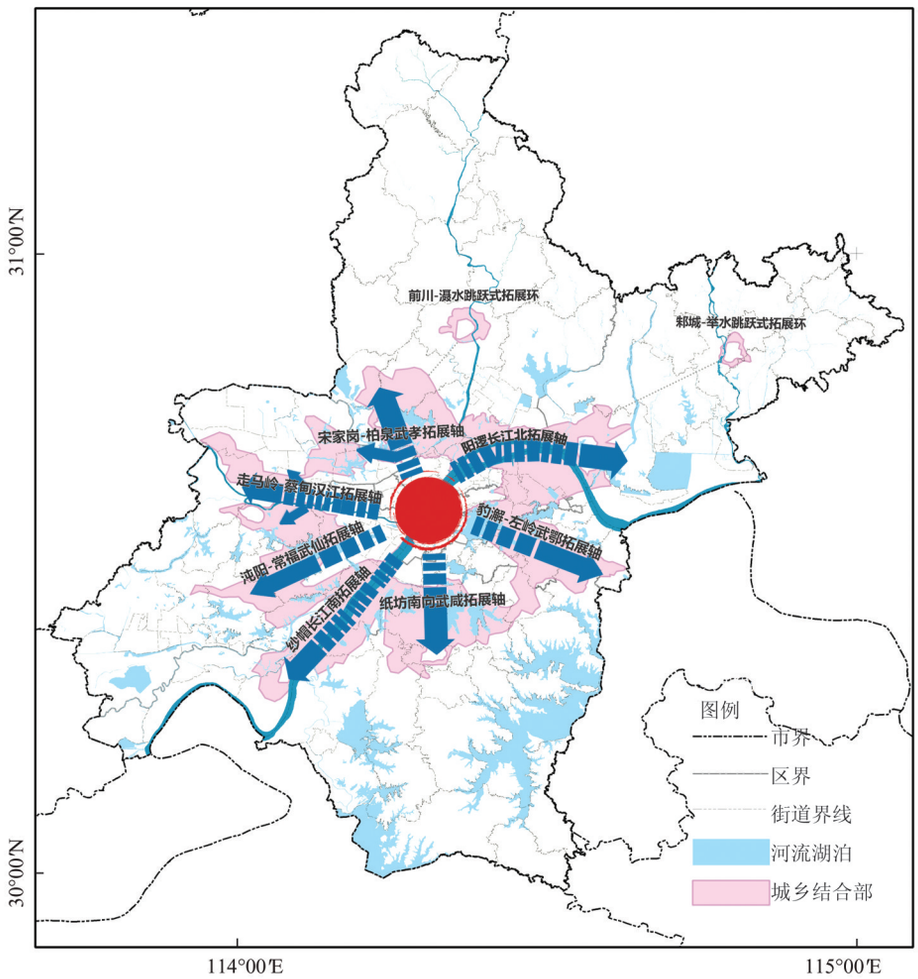


图7 武汉市城乡结合部空间形态

Fig. 7 Spatial Form in Urban-Rural Fringe of Wuhan City

表3 2010-2020年武汉市不同区域的NDVI分布情况

Table 3 Distribution of NDVI in Different Areas of Wuhan City from 2010 to 2020

年份	城市核心区		城乡结合部		乡村	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
2010	0.412	0.122	0.557	0.175	0.708	0.120
2011	0.418	0.102	0.576	0.176	0.721	0.124
2012	0.407	0.113	0.541	0.190	0.710	0.145
2013	0.410	0.110	0.535	0.196	0.691	0.151
2014	0.393	0.110	0.536	0.187	0.713	0.147
2015	0.394	0.103	0.547	0.193	0.710	0.155
2016	0.383	0.103	0.515	0.189	0.692	0.153
2017	0.386	0.100	0.541	0.188	0.719	0.148
2018	0.404	0.093	0.538	0.183	0.725	0.136
2019	0.410	0.094	0.501	0.183	0.694	0.144
2020	0.431	0.101	0.523	0.184	0.718	0.158
总变化量	0.019	−0.021	−0.034	0.009	0.010	0.038

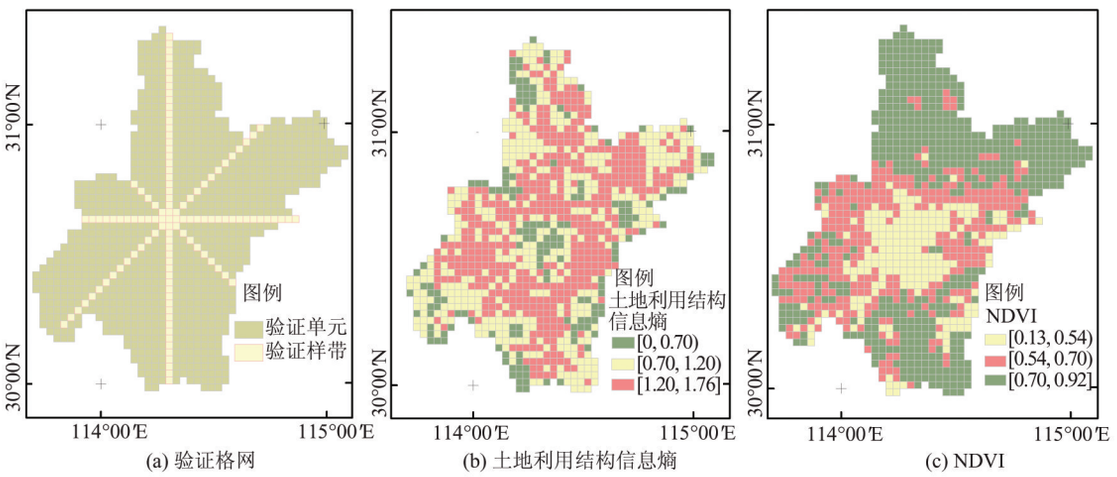
3.3.2 样带验证

为进一步对划定结果准确性进行验证,本文在武汉市行政区划内建立了3 km×3 km的验证格网并引出北-南、西-东、西北-东南、东北-西南4条验证样带,测算验证单元内的土地利用结构信息熵与NDVI数值(图8)。由图8可见,武汉市土地利用结构信息熵由自然断点法可分为[0.00,0.70)的低值区、[0.70,1.20)的中值区、[1.20,1.76]的高值区,NDVI由自然断点法分为[0.13,0.54)的低值区、[0.54,0.70)的中值区、[0.70,0.92]的高值区。通过检验样带内的土地利用结构信息熵与NDVI数值水平,分析其空间变化规律,可对划定结果的准确性进行检验。

检验样带的指标测算值和影像示例分别如图9、图10所示。由图9可以看出,北-南样带的20~25、33~38验证单元,西-东样带的4~5、18~22验证单元,西北-东南样带的4、11~13验证单元,东北-西南样带的7~9、18~19验证单元土地利用结构信息熵总体大于1.2,属于高值区,NDVI在0.5~0.7之间波动,属于中值区,为典型城乡结合部。

其中,北-南样带的1~19、39验证单元土地

利用结构信息熵有所波动，部分地区大于1.2，与耕地、园地、林地、草地大量交错分布有关，NDVI大于0.6，植被覆盖度高，验证单元40的土地利用结构信息熵较高，大于1.2，NDVI处于中值水平，在0.5～0.6之间，是由于该单元采矿用地连片分布，同时穿插有耕地、园地、林地等用地类型，但几乎没有住宅、商业用地分布，生活服务设施极为稀缺，NPP &POI数值低，它们仍属于乡村地区。西-东样带中，验证单元8受到湖泊分布影响，土地利用结构信息熵出现小幅上升；验证单元25为涨渡湖分布区，NDVI与土地利用结构信息熵急剧下降。



(a) 验证格网　(b) 土地利用结构信息熵　(c) NDVI

图 8　验证格网及其测算值

Fig. 8　Verification Grid and Its Measured Value

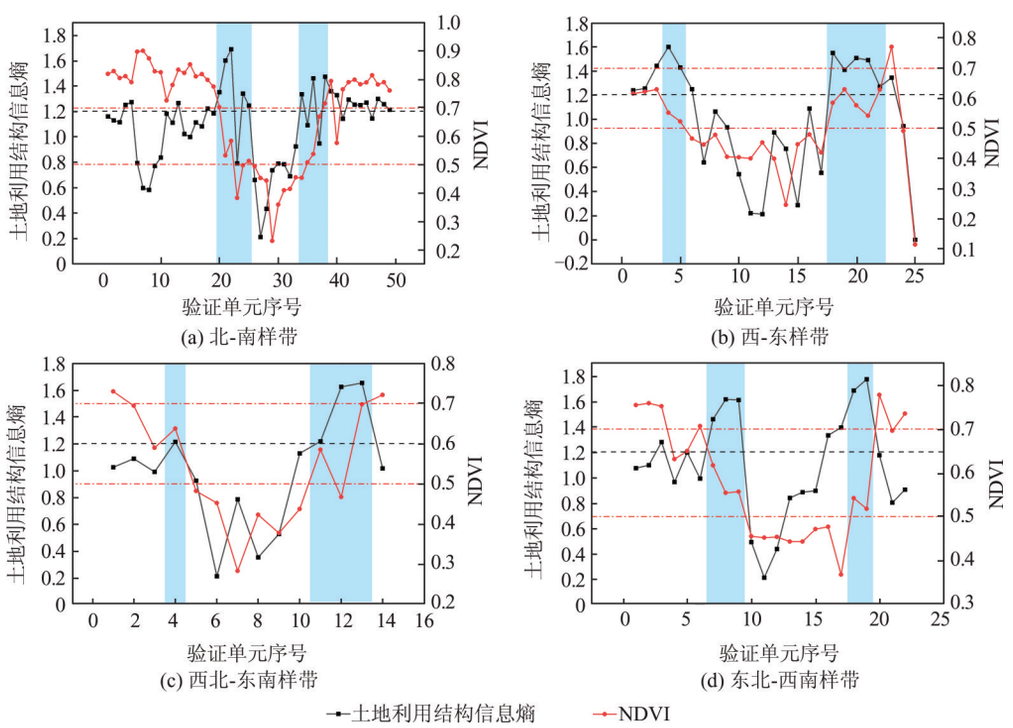


图 9　验证样带指标测算值

Fig. 9　Verification of the Transect Index Measurements

测算结果表明，4条验证样带中土地利用结构信息熵总体大于1.2，且NDVI处于0.5～0.7之间的区域与本文划分城乡结合部范围一致，土地利用信息熵小于1.3，且NDVI小于0.5、大于0.7的区域与前文划分的城市核心区、乡村的范围一致，符合土地利用结构信息熵从城乡结合部→乡村地区→城市核心区逐渐递减的规律，符合NDVI从乡村→城乡结合部→城市逐渐递增的规律。

3.4　比对分析

将划定结果与WorldPop人口密度分布对比分析发现，武汉市城乡结合部范围与人口密度趋势一致，但在边界上有所扩展（图11）。验证单元

A、B位于低密度区,属于乡村向城市过渡区;单元C为产业园区,虽人口密度低,但不属乡村;单元D位于中密度区,已开发为生态新城。结果表明,NPP &POI能准确区分低密度区的乡村与开发区、中密度区的城乡结合部与生态新城,识别精度高于人口密度数据。



(a) 北-南样带 (b) 西-东样带 (c) 西北-东南样带 (d) 东北-西南样带

图10 验证单元影像示例

Fig. 10 Examples of Validation Cell Images

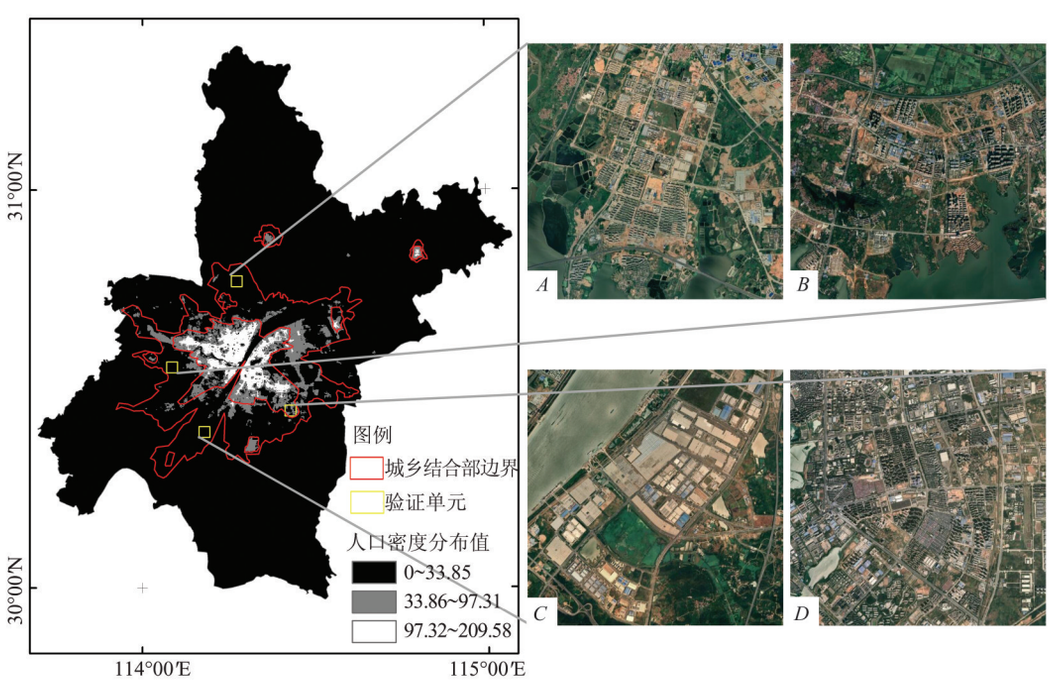


图11 武汉市城乡结合部边界与人口密度分布图

Fig. 11 Distribution Map of Boundary and Population Density in the Urban Rural Area of Wuhan City

3.5 野外实地校核

为考察划定结果的真实性,本次研究对武汉市江汉区、武昌区、江岸区、黄陂区、青山区、洪山区、江夏区等地进行了实地走访,挑选了部分典型区域进行对照分析(图12)。

图12中a、b分别位于江汉路与楚河汉街,区域内高楼密集、商业繁荣,符合城市核心区特征;c、d分别位于黄陂区青峰村和江夏区东方村,呈

现典型乡村景观，建筑低矮、人口密度低；e位于长江新城，近年来建设项目增多，商业设施围绕居民区提供服务；f位于黄陂区石道线，周边有改建的小学和仓储市场；g的贾岭村部分拆迁，正在建设公共卫生设施；h为光谷生物城，规划为生物产业新城，农业用地转为建设用地；i位于大桥新区邢远长村，已建成工业园区和高楼，部分区域仍为荒废菜园。实地考察显示，以上区域呈现多样化的土地利用类型，人口和植被密度介于城市核心区与乡村之间，符合城乡结合部特征。

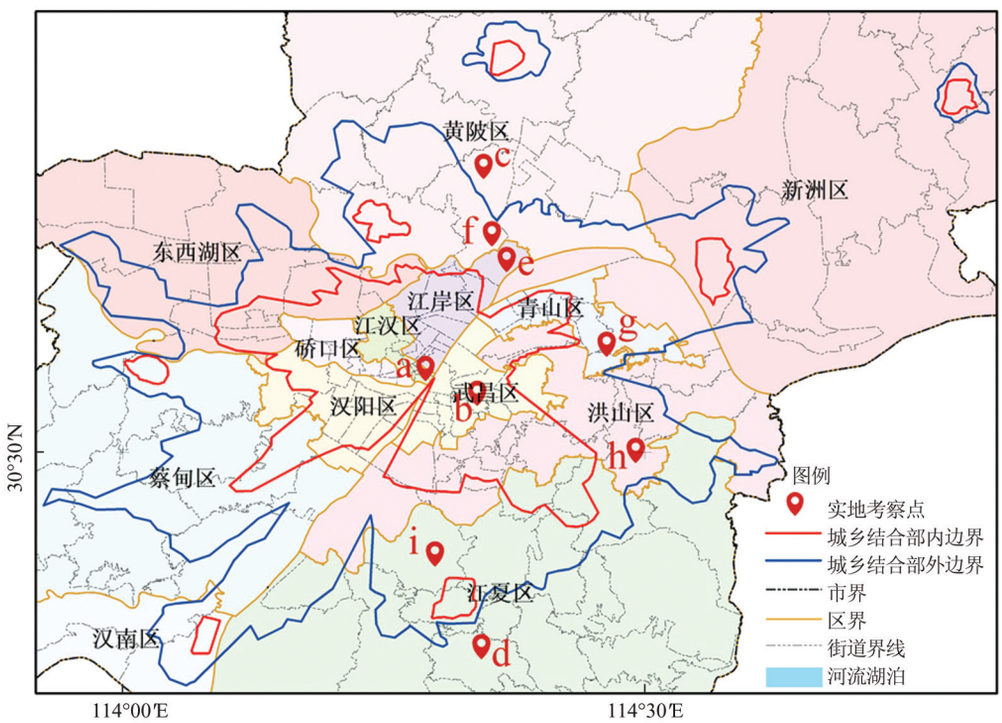


图 12　实地考察点位分布图

Fig. 12　Distribution Map of Site Investigation Points

4　结　语

准确划定城乡结合部空间范围，对于把握城乡空间结构、控制城市无序蔓延、促进城乡融合发展具有重要意义，与新一轮国土空间规划中破除壁垒、统筹城乡、生态建设等规划理念不谋而合。本文针对以往城乡结合部划分数据源选取单一、获取困难、识别结果时空分辨率低的问题，将POI和夜间灯光融合数据应用到城乡结合部空间划定中，识别出的结果在客观性、时效性、精度方面提升较大。主要结论如下：

1）NPP &POI综合指数有效结合了POI的微观优势与夜间灯光的宏观优势，减轻了夜光遥感的饱和、溢出效应，提高了划定精度和时效性，相较于单独使用POI、夜间灯光和人口密度数据具有更高的准确度。

2）NPP &POI能够定量识别出城乡潜在中心区与多层结构。武汉市城乡结合部面积为1 482.35 km²，占武汉市总面积的17.30%，呈现“六轴两环”的带状与跳跃式分布，识别结果为城市基础设施配置、产业分工和生态职能划分等提供了重要参考。

3）NPP &POI综合指数在城乡空间上的二次突变规律验证了城乡结合部作为城市扩张过程中的地域实体，具有空间连续性和要素过渡特征，为城乡三元与二元模式的讨论提供了实证支持。

本文仅以武汉市为例，对NPP &POI的城乡空间变化规律进行探讨，并划定其城乡结合部空间范围，未来数据丰富后将对不同面积、人口和经济发展状况的城市进行比较分析，探讨其普适性。NPP &POI虽然能对自然景观与人为景观进行区分，但在农用地、生态用地等自然区域内部数值极低，该类区域的空间从属关系还需要深度探讨。NPP &POI能够表征城乡发展活力，获取便利、更新周期短，如果采用机器学习等方法构建不同时点的城乡结合部空间范围，对于剖析城市扩张速度与方向、城市收缩等问题意义重大。

参 考 文 献

[1] 陈宏胜,李志刚,王兴平. 中央—地方视角下中国城乡二元结构的建构:“一五计划”到“十二五规划”中国城乡演变分析[J]. 国际城市规划,2016,31(6):62-67.
CHEN Hongsheng, LI Zhigang, WANG Xingping. The Construction of Urban-Rural Dual Structure from a Central-Local Government Perspective: Study on the Evolution of Urban and Rural China from the First Five-Year Plan to the Twelfth Five-Year Plan [J]. *Urban Planning International*, 2016, 31(6): 62-67.

[2] 刘玉,冯健. 城乡结合部农业地域功能实现程度及变化趋势:以北京为例[J]. 地理研究,2017,36(4):673-683.
LIU Yu, FENG Jian. Analysis on Execution and Change of Regional Function of Agriculture in Rural-Urban Fringe: A Case Study of Beijing[J]. *Geographical Research*, 2017, 36(4): 673-683.

[3] ZHONG S J, WANG M S, ZHU Y, et al. Urban Expansion and the Urban - Rural Income Gap: Empirical Evidence from China[J]. *Cities*, 2022, 129: 103831.

[4] BRYANT C, RUSSWURM L H. The Impact of Non-Farm Development on Agriculture: A Synthesis[J]. *Plan Canada*, 1979, 19(2): 122-139.

[5] GU C L, CHEN T, DING J H, et al. The Study of the Urban Fringes in Chinese Megalopolises[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1993, 48(4): 317-328.

[6] SHARP J S, CLARK J K. Between the Country and the Concrete: Rediscovering the Rural-Urban Fringe[J]. *City & Community*, 2008, 7(1): 61-79.

[7] 黄祥. 基于综合景观指数的城乡结合部边界划分[J]. 地理空间信息,2015,13(4):7-9.
HUANG Xiang. Urban-Rural Fringe Division Based on the Landscape Pattern Index[J]. *Geospatial Information*, 2015, 13(4): 7-9.

[8] 吴京航,桂志鹏,申力,等. 顾及格网属性分级与空间关联的人口空间化方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,47(9):1364-1375.
WU Jinghang, GUI Zhipeng, SHEN Li, et al. Population Spatialization by Considering Pixel-Level Attribute Grading and Spatial Association[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(9): 1364-1375.

[9] 厉飞,闫庆武,邹雅婧,等. 利用夜间灯光POI的城市建成区提取精度研究:以珞珈一号01星和NPP/VIIRS夜间灯光影像为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,46(6):825-835.
LI Fei, YAN Qingwu, ZOU Yajing, et al. 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 [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(6): 825-835.

[10] 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.
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.

[11] 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 Liang, ZHAO Qi, YANG Fan. Identification of Urban Agglomeration Boundary Based on POI and NPP/VIIRS Night Light Data[J]. *Progress in Geography*, 2019, 38(6): 840-850.

[12] 张志刚,张安明,郭欢欢. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据的城乡结合部空间识别研究:以重庆市主城区为例[J]. 地理与地理信息科学,2016,32(6):37-42.
ZHANG Zhigang, ZHANG Anming, GUO Huanhuan. Spatial Recognition of the Urban-Rural Fringe Based on DMSP/OLS Nighttime Light Data: A Case Study of the Main Urban Areas of Chongqing [J]. *Geography and Geo - Information Science*, 2016, 32(6): 37-42.

[13] YANG J M, LI X L, LI S M, et al. The Woody Plant Diversity and Landscape Pattern of Fine-Resolution Urban Forest Along a Distance Gradient from Points of Interest in Qingdao[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 122: 107326.

[14] HE X, ZHOU C S, ZHANG J, et al. Using Wavelet Transforms to Fuse Nighttime Light Data and POI Big Data to Extract Urban Built-up Areas[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(23): 3887.

[15] 李强,李小波,刘剑锋. 城乡结合部规划建设模式评析与土地利用导向设计[J]. 地域研究与开发,2015,34(5):143-147.
LI Qiang, LI Xiaobo, LIU Jianfeng. Analysis and Assessment of the Mode of Planning and Construction and Design of Land Use Guidance in Rural-Urban Continuum [J]. *Areal Research and Development*, 2015, 34(5): 143-147.

[16] 陈韦,肖志中,林建伟,等. 武汉从“多规合一”向空间规划改革的探索:基于武汉市新一轮城市总规

修编的思考[J]. 城市规划, 2018, 42(S2): 32-37.
CHEN Wei, XIAO Zhizhong, LIN Jianwei, et al. Wuhan's Exploration on Transformation from "Multi-Plan Integration" to Spatial Planning Reform: Reflections on the New Round of the City Master Plan of Wuhan[J]. *City Planning Review*, 2018, 42(S2): 32-37.

[17] 闵捷. 农地城市流转特征与时空规律研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007.
MIN Jie. Study on the Feature and Spatial-Temporal Regulation of Rural-Urban Land Conversion [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007.

[18] 杨喜平, 方志祥, 赵志远, 等. 顾及手机基站分布的核密度估计城市人群时空停留分布[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(1): 49-55.
YANG Xiping, FANG Zhixiang, ZHAO Zhiyuan, et al. Analyzing Space-Time Variation of Urban Human Stay Using Kernel Density Estimation by Considering Spatial Distribution of Mobile Phone Towers [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(1): 49-55.

[19] 张宁, 方琳娜, 周杰, 等. 北京城市边缘区空间扩展特征及驱动机制[J]. 地理研究, 2010, 29(3): 471-480.
ZHANG Ning, FANG Linna, ZHOU Jie, et al. The Study on Spatial Expansion and Its Driving Forces in the Urban Fringe of Beijing [J]. *Geographical Research*, 2010, 29(3): 471-480.

[20] 刘万增, 陆辰妮, 霍亮, 等. 最优信息熵约束的居民地点状要素选取方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(8): 1178-1185.
LIU Wanzeng, LU Chenni, HUO Liang, et al. Selection Method of Residential Point Features Constrained by Optimal Information Entropy [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(8): 1178-1185.

[21] PENG J, HU Y N, LIU Y X, et al. A New Approach for Urban-Rural Fringe Identification: Integrating Impervious Surface Area and Spatial Continuous Wavelet Transform[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 175: 72-79.