

引用格式:周小驰,刘咏梅,杨海娟. 西安市城市边缘区空间识别与边界划分[J].地球信息科学学报,2017,19(10):1327-1335. [Zhou X C, Liu Y M, Yang H J. 2017. Spatial recognition and boundary region division of urban fringe area in Xi'an City. Journal of Geo-information Science, 19(10):1327-1335.] DOI:10.3724/SP.J.1047.2017.01327

西安市城市边缘区空间识别与边界划分

周小驰,刘咏梅*,杨海娟

西北大学城市与环境学院,西安 710127

Spatial Recognition and Boundary Region Division of Urban Fringe Area in Xi'an City

ZHOU Xiaochi, LIU Yongmei* and YANG Haijuan

College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China

Abstract: As a preparatory section for urban development, urban fringe area is not only a transitional area for both urban and rural areas, but also the most unstable region for urban development. In general, the primary task of urban fringe region study is to execute the spatial recognition and boundary division of urban fringe area. With the increased development of Geographic Information Systems (GIS) and satellite imagery technique, the definition of urban fringe area is becoming increasingly convenient and feasible. Owing to the existing one-fold or relatively complicated problems in extracting research indexes, it is of great significance to select better discrimination parameters in demarcating urban fringe. Based on SPOT-5 and Landsat-5 TM remotely sensed images and other corresponding auxiliary data, this study firstly constructed an evaluation framework and the index system of urban fringe area from the perspectives of physics, landscape and population, using the impervious surface coverage and the degree of landscape disturbance as primary indicators, and the population density data as auxiliary indexes. Then, the spatial range of the urban fringe of Xi'an city in 2010 was further quantified in this study by performing the computation of information entropy and mutation detection methods. The final results obtained are as follows: (1) The selected indexes show distinctive spatial signatures. The extraction model of urban fringe, which is based on the variability characteristics of both urban and rural areas, is practicable. Besides, the selected indicators are more scientific and accurate, which is of great significance in this paper. (2) Xi'an city takes on a clear ring and wedged structure of urban core area, urban fringe area, and rural hinterland. The extension of urban fringe area is primarily promoted by traffic facilities and policy orientation. This study can provide theoretical support and scientific basis for other relevant researches on urban fringe area.

Key words: urban fringe area; spatial recognition; impervious surface coverage; degree of landscape disturbance; Xi'an

***Corresponding author:** LIU Yongmei, E-mail: liuym@nwu.edu.cn

摘要 城市边缘区研究的首要任务是对城市边缘区进行空间识别和边界划分。针对现有研究存在的指标选取过于单一或繁杂、水陆分离导致划分间断等问题,利用西安市 SPOT-5、Landsat TM 遥感影像和社会统计数据,分别从物理、景观、人口 3 个视

收稿日期 2017-04-19;修回日期:2017-08-04.

基金项目 科技部科技支撑计划项目“产业延伸类城郊型美丽乡村建设综合技术集成与示范”(2015BAL01B04)。

作者简介 周小驰(1993-),女,辽宁锦州人,硕士生,研究方向为城乡规划与 GIS 应用研究。

E-mail: zhouxiaochiecho@foxmail.com

*通讯作者 刘咏梅(1970-),女,陕西西安人,博士,副教授,研究方向为城乡规划与 GIS 应用研究。E-mail: liuym@nwu.edu.cn

角出发,选定不透水面盖度与景观絮乱度作为主要判别指标,人口密度作为辅助指标,构建城市边缘区识别指标体系。运用信息熵法和突变检测法,量化并可视化西安市城市边缘区的空间范围。结果表明:①所选取指标沿着城乡梯度表现出独特的空间信息,根据指标的城乡空间异质性特征可以识别出城市边缘区的空间范围,且方法更科学,界定结果更精确。②西安市呈现出明显的城市核心区、城市边缘区、农村腹地的圈层结构特征。道路牵引与政策调控对城市边缘区的空间分布有重要影响。本研究可为城市边缘区其他相关研究提供科学参考和依据。

关键词 城市边缘区;空间识别;不透水面盖度;景观絮乱度;西安

1 引言

城市边缘区(Urban Fringe)作为城市发展的预备地段,不仅是城市与乡村的过渡区域,也是城市发展、扩散和蔓延最具活力的地带^[1]。精确识别城市边缘区是城乡发展空间格局研究中最重要、的先决条件^[2],可为进一步研究城市边缘区空间演变规律、划定城市开发边界、优化城市空间布局奠定基础。最初西方学者依据与中心城市的距离或建成区外一定的范围来界定城市边缘区,洛斯乌姆(L.H.Russwurm)认为城市边缘区是位于城市地区与乡村腹地之间存在的约10 km左右的连续环状地带^[3]。日本学术界采用以人口为中心的各种界定指标划分中心城市和外围地区,如人口密度、人口流动比率(通勤率、通学率)等^[4]。但是距离、人口等指标随着城市化发展而不断更新变化,在不同时期和地域应用具有较大局限性。

遥感作为监测、管理、分析城市化进程及城市景观变化最为有效的信息源,可为城市边缘区范围的界定提供更为广阔和独特的视角。国内学者们应用遥感技术分别提取不同指标,如城市用地比率^[5]、土地利用动态度^[6]、土地利用综合指数^[7]等,对指标进行突变检测,根据突变点的空间分布划分出城市边缘区;或是应用信息熵原理,通过对景观絮乱度指标划分阈值来确定边缘区范围^[8-10]。这2种方法界定范围相对精确,基础数据易获取,然而使用单一指标表征城市边缘区具有局限性,难以全面刻画城市边缘区的复杂特征。另外,还有学者在人口统计、通达度、土地利用、经济社会等方面选取多个指标,构建指标体系来反应城市边缘区的圈层范围^[11-13]。但在建立繁杂的指标体系的同时,指标之间往往高度冗余,且完善的数据集不易获取。

鉴于现有研究普遍存在指标选取过于单一或繁杂等问题,本文以西安市为例,采用物理、景观、人口3个维度表达城市空间变异性,首次引入不透水面盖度作为界定城市边缘区的指标,结合信息熵法和突变检测法,对科学准确的城市边缘区界定方法进行有益探索。

2 研究区概况与数据源

2.1 研究区概况

西安市位于东经107°40′~109°49′,北纬33°42′~34°44′,地处关中平原,北濒渭河,南依秦岭,属暖温带半湿润季风气候,年平均气温13.3℃,年降水量604.2 mm。全市辖11区2县,面积10 108 km²。截止到2010年,户籍总人口达782.73万人,实现生产总值3241.69亿元。西安是中国西北地区规模最大、综合实力最强的城市,具有承东启西、连接南北的战略地位,区位优势得天独厚。作为国家西部大开发、关中城市群、丝绸之路经济带等多个经济区的核心中心或重要节点^[14],西安市社会经济和城市建设都取得了长足发展。1999-2009年,西安城市建成区面积由118 km²扩大到375 km²,城市框架10年间拉大了257 km²,城市发展方向和城镇布局以圈层蔓延模式沿多个交通轴线全面发展^[15]。研究区范围设为西安城7区:碑林区、莲湖区、雁塔区、未央区、灞桥区、新城区以及长安区秦岭以北地区(图1),离中心城区较远的阎良区等卫星城未在研究范围之内。

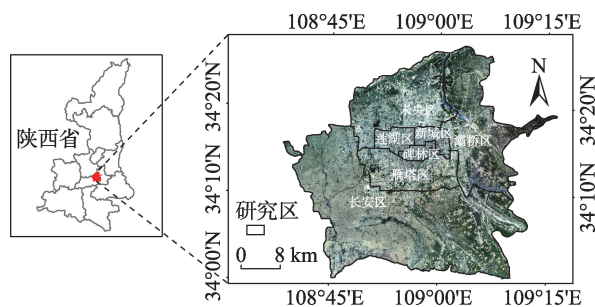


图1 研究区域

Fig. 1 The study area

2.2 数据源

本文采用的数据包括:

(1)2009年西安市SPOT-5 2.5 m 全色/10 m 多光谱影像数据。SPOT卫星影像色彩丰富,图形纹

理清晰易读,满足面向对象分类的要求。对获取的影像进行融合、镶嵌、配准和裁剪等预处理工作,融合后空间分辨率为2.5 m。

(2)2010年Landsat-5 TM 30 m多光谱影像,用于提取不透水面。Landsat影像数据具有丰富的光谱波段信息,光谱分辨率优于SPOT影像。对影像进行预处理,首先对图像进行辐射校正和几何校正,其次为了排除低反照率的水体对不透水面提取的干扰,采用改进的归一化水体指数MNDWI^[16]对水体提前进行掩膜处理。

(3)西安市街道、乡镇级行政界线矢量数据,社会人口数据来源自2010年全国第六次人口普查乡镇级数据。

3 研究方法

3.1 指标体系构建

城市边缘区作为一个社会经济多维体,仅用单一的社会经济统计数据或空间地理数据来量化城市格局具有片面性,应综合考虑沿城乡梯度表现出的差异性^[17],系统构建一套适用性强并涵盖大部分城市边缘区地域属性特征的划分指标。指标可归纳为以下3个维度:①人口统计度量(如人口密度、人口增长率、就业率、种族聚居情况等);②物理空间度量(如道路密度、建设用地占比、植被或不透水面比率等);③景观度量(如斑块密度、分形维数、景观复杂度等)。

一方面,城市化进程改变了城市景观格局,产生更多不透水面和人工景观,使城市边缘区建设用地斑破碎、土地利用混杂。另一方面,土地利用强度的增加直接带来了城市边缘区人口密度的提高,但是聚集程度较低,使城市边缘区的人口密度高于乡村而低于城区。综上分析,并全面考虑测度指标的客观性、适用性,在物理空间度量、景观度量中分别选取不透水面盖度及景观复杂度作为主要判别标准,人口度量中的人口密度作为辅助指标,对城市边缘区进行界定,技术路线如图2所示。

3.2 面向对象的土地利用分类

基于SPOT影像与行政界线矢量数据,并参照《土地利用现状分类》国家标准,设计了西安市土地利用分类系统,将土地利用类型划分为耕地(旱地、水浇地、水田)、水域(河流、湖泊、水库)、建设用地(城乡建设用地、交通用地、城市绿地)、未利用地

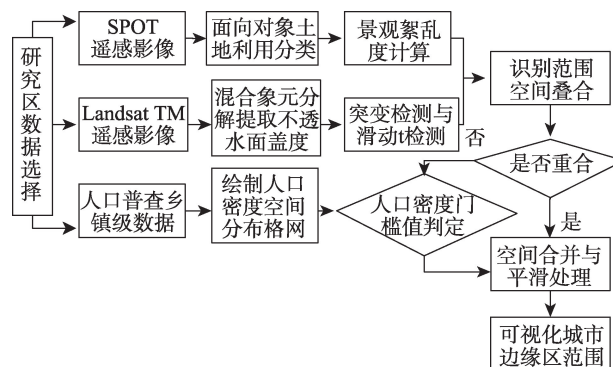


图2 城市边缘区提取技术路线图

Fig. 2 Technology route of urban fringe extraction

(裸地、沙地、河流滩涂)、草地、林地6大类。研究采用的面向对象土地利用分类主要基于eCognition软件来实现。面向对象分类能有效利用高空间分辨率数据的大量空间信息,适用于高分辨率影像的城乡空间土地利用信息提取。面向对象分类首先要选择合适的尺度对影像进行多尺度分割,多尺度分割参数分别设置为:分割尺度60,颜色权重0.7,形状参数0.3。然后,综合运用光谱、纹理、形状、位置等特征,采用最邻近分类器对研究区进行土地利用分类。本次研究利用Google Earth同期历史影像数据对分类进行精度校正,分类总体精度为89.40%, kappa系数为0.87,分类总体精度较高(图3)。

3.3 基于混合像元分解的不透水面提取

植被-不透水面-土壤(Vegetation-Impervious surface-Soil, V-I-S)模型^[18]和亚像元尺度下的混合

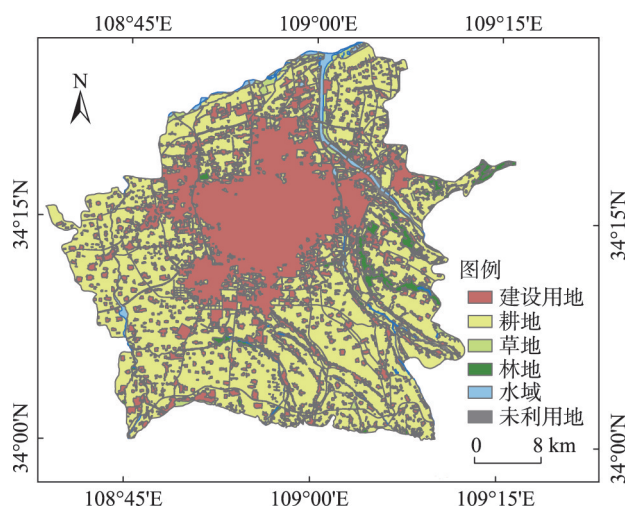


图3 基于面向对象分类的西安市土地利用图

Fig. 3 The land use distribution map of Xi'an based on the object-oriented classification

像元分解^[19]相结合是目前应用最为广泛的不透水面提取方法。V-I-S模型将城市描述为植被-不透水面-土壤3种不同光谱端元的线性混合,而混合像元分解过程即是求混合像元中这3种纯净光谱信息类别(即端元)所占比例的过程。首先,利用最大噪声分离变换方法对Landsat TM多光谱影像去除噪声并进行信息重组,保留前几个主成分的主要信息,达到降噪与降维效果。其次,对端元进行选择及确定。根据V-I-S模型,城市地表可用4种端元的线性混合模型进行表达,这4种端元分别是:高反照度(如混凝土、沙地、水泥道路)端元、低反照度(如沥青表面、瓦片)端元、植被和土壤。选取MNF变换后的前4个主成分生成像元纯净指数图像,利用 n 维可视化工具结合手动选点确定最终端元;再次,通过最小二乘法求解约束性的四端元线性光谱混合模型。对研究区图像进行混合像元分解,计算公式如下^[19]:

$$R_b = \sum_{i=1}^N f_i R_{i,b} + e_b \quad (1)$$

式中: $\sum_{i=1}^N f_i = 1$, $f_i \geq 0$ 。 R_b 为影像中波段 b 上的反射率; $R_{i,b}$ 为端元 i 在波段 b 上的反射率; f_i 为端元 i 所占的面积比率; N 为端元总数; e_b 为模型残差。输出结果是4种端元盖度的空间分布图。最后,根据高低反照度端元盖度的空间分布图,计算不透水面盖度。“纯净”的不透水面可以由低反照率端元和高反照率端元通过完全约束的线性混合模型得到,植被和土壤对不透水面估算几乎不起作用^[19-20]。当消除水体和阴影的影响后,不透水面盖度可以由低反照度端元和高反照度端元盖度相加得到。为了检验提取精度,利用SPOT-5高分辨率遥感影像进行精度评价。按照10像元 \times 10像元大小在不透水面结果图上随机布设180个验证样本,同时在SPOT影像上选择对应空间样本进行不透水面的数字化,样本内的不透水面组分由不透水面面积除以样本面积得到。通过计算不透水面结果图的估算盖度值与相应的实际不透水面真实值的均方根误差RMSE和决定系数 R^2 来定量不透水面估算精度。

3.4 突变检测与滑动 t 检测

突变理论是法国数学家Thom创立的一门研究非连续和突变现象的新兴数学学科,现已在数学、生物、水文、气象、社会科学和人文科学等研究领域得到广泛应用^[5]。滑动 t 检验是通过检验两随机样本平均值的显著差异性来检验突变的一种统计方

法。如果两段子序列的均值差异超过了一定的显著性水平,可以认为均值发生了质变,有突变发生。对于具有 n 个样本量的序列,人为设置某一时刻为基准点,基准点前后两段子序列 x_1 和 x_2 的样本长度分别为 n_1 和 n_2 ,两段子序列平均值分别为 \bar{x}_1 和 \bar{x}_2 ,方差分别为 s_1^2 和 s_2^2 。定义统计量^[21]:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (2)$$

其中,

$$S = \sqrt{\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (3)$$

方程遵从自由度 $\gamma = n_1 + n_2 - 2$ 的分布。根据 t 统计量曲线上的点是否超过 t_α 值来判断序列是否出现过突变,如果出现过突变,确定出突变点的位置。

4 城市边缘区识别

4.1 景观熵乱度指标的提取

信息熵是用来测度系统的复杂性与均衡性的物理量,将其引入土地利用景观格局研究,建立景观熵乱度公式^[8]:

$$W = - \sum_{i=1}^N X_i \ln X_i \quad (4)$$

式中: W 为景观熵乱度值; X_i 表示单位面积内某类用地占网格单元的比率; i 表示网格单元内用地类型的数量。

景观熵乱度能够揭示景观空间的同质性和异质性,量化城市景观的分散和破碎程度。单位面积内用地类型越多,土地利用斑块的异质性越高,景观熵乱度也就越大。城市区域与乡村地区多为大片的建成区或农用地,用地类型较为单一,景观熵乱度低。反观城市边缘区最大的特点是土地利用类型的多样性,这里各种用地类型交错,布局松散,景观熵乱度较高。因此,根据景观熵乱度的城乡空间差异可来判别城市边缘区范围。

为了更好地与Landsat-5 TM数据空间分辨率配合并突出圈层结构,使用300 m \times 300 m的网格作为景观熵乱度的空间网格单元。在ArcGIS上计算网格单元内建设用地、农用地(耕地、林地、草地)、水域和未利用地四类用地类型所占面积比重,基于式(4)计算各网格单元内的景观熵乱度值,得到西安市景观熵乱度熵值图(图4)。

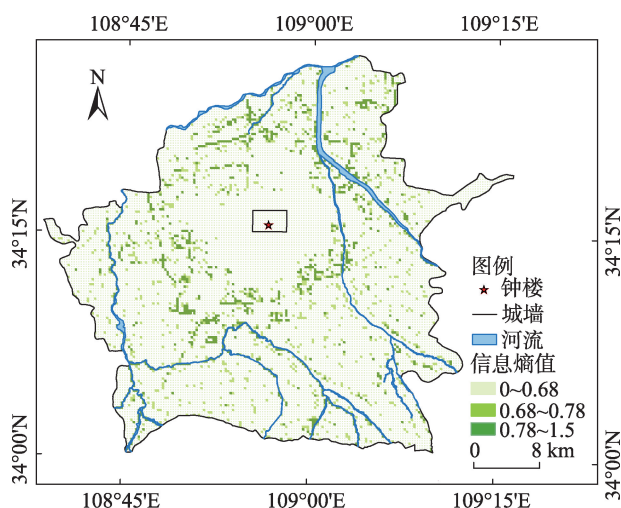


图4 基于300 m×300 m网格单元的景观熵度空间分布格局
Fig. 4 The spatial distribution of degree of landscape disturbance based on 300 m×300 m grid cell

由图4可看出,景观熵度存在较大的空间差异,显示了城市、乡村与边缘区在景观异质性上的区别。在城市建成区和大片农田区域,景观熵度较低,在0到0.5之间变化。城市边缘区和沿主要河道的区域具有比城市和乡村更高的值。经过多次试验,确定将围绕主城区的大量熵值在0.68及其以上的区域作为城市边缘区的范围。

4.2 不透水面盖度指标的提取

不透水面是衡量城市化的重要指标,通过分析城市不透水面的分布与变化,可以揭示城市景观格局的演变规律及变化梯度。亚像元尺度下的不透水面盖度(Impervious Surface Coverage, ISC)是从0~100%的连续变量^[22],使不透水面作为提取城市边缘区的显著指标成为可能。城市边缘区的不透水面盖度高于农村而低于城区,且随距城市中心距离变化而剧烈波动,而城区、乡村地区递变梯度则非常平缓。

以2010年8月5日的Landsat-5 TM影像为数据源,基于植被-不透水面-土壤模型的混合像元分解进行研究区的不透水面提取,并对提取精度进行检验,计算出均方根误差RMSE和决定系数 R^2 分别约为14.6%和0.865,不透水面盖度提取精度满足实际需求。图5为定量显示的西安市不透水面盖度的空间分布。可以看到,城市不透水面与建成区的空间分布基本一致,不透水面盖度的高值区分布在商业、交通和居民用地,低值区分布在农田和林地区域。

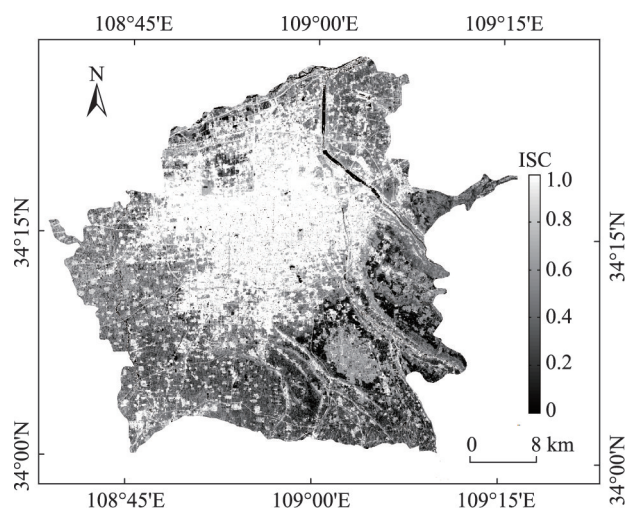


图5 西安市不透水面盖度的空间分布
Fig. 5 The location of impervious surface fraction

不透水面盖度空间分布图的空间分辨率为30 m,为了平滑由小尺度的局部变化而引起的部分噪声,需要将图像“粗粒化”,将不透水面盖度重采样至300 m,与景观熵度栅格尺度一致。

为提取不同方向上的突变点,以钟楼(市中心地标)为中心,5°为一间隔,提取72个方向上不透水面盖度的城市-农村梯度空间序列。应用突变检测方法,在MATLAB中对72条空间序列进行滑动t检测,结合各突变点和中心的距离,在每个空间序列上寻找2个突变点,分别是城市边缘区内边界突变点和外边界突变点,顺次连接突变点勾画出城市边缘区内、外边界。在描绘时为保证区域空间上的连续性、完整性,需排除异常突变点,并对结果进行适当的修正。

在研究过程中发现,无论是不透水面的突变点还是信息熵高值区都会在河谷处集中分布,为避免对提取结果的影响,需要比对遥感影像数据,通过目视判读河流的影响作用,以冯健^[4]提出的河流桥梁连接判断标准,从城乡划分角度把河流分为穿越城镇建成区的河流与起阻隔作用的河流。如果河流上有桥梁把两侧的建设用地连接起来,并且河流两侧的建设用地边缘到桥梁的距离符合“25 m、50 m或100 m连接距离”原则,则可认为河流是穿越城镇建成区的河流,否则判定为起阻隔作用的河流,被阻隔部分不能被认为是城市边缘区。以灞河为例,虽然河流上有桥梁连接,可以将河流的阻隔作用忽略掉,但是河流两侧的建设用地边缘到桥的距离远大于100 m,故判定为河流东岸不与建成区

连接,不能将其划入城市边缘区。

4.3 人口密度指标的确定

人口密度是考察城市作为一种聚集现象而存在的较为直接的指标^[23],能够较好地反映城市的经济社会活动强度。本研究将人口密度作为辅助指标,用阈值法对空间信息提取出的边界进行约束。相比于区县尺度,乡镇街道尺度数据更能揭示人口空间分布的细微特征。本文采用2010年第六次人口普查乡镇街道尺度的数据作为判定城市边缘区范围的指标。

首先,通过二值化分区密度制图实现人口密度数据的空间化。依据行政区划将研究区人口普查数据和街道矢量数据相关联作为人口数据的来源层,使用ArcGIS中的面积制表工具对SPOT高分辨率遥感影像识别出的建设用地进行计算,得到每一街道内的建设用地面积。将面积表格关联到街道矢量数据的要素类中,并计算所有街道内的人口密度(共79个),实现人口普查数据的街道人口分配到该街道建设用地面积上,进一步绘制西安市300 m分辨率的人口密度分布格网,最大限度地消除因城市外围地区未开发土地比例过大而造成的人口密度梯度虚高现象给研究结果带来的影响。其次,绘制人口密度等值线,确定城市边缘区人口密度的阈值范围,将确定的人口等值线作为人口密度指标的边界范围。图6为西安市7个区79个街道办的人口密度分布网格。经过反复调整、比对发现,人口密度5000人/km²以上的街道空间范围与城市内缘区接近,人口密度大于1000人/km²的街道空间范围与城市外缘区相近。因此,本文以人口密度5000人/km²作为判定城市边缘区的内边界的辅助指标,1000人/km²作为外边界的辅助指标。人口密度1000~5000人/km²反映了城市空间从中央商务区的高密度人口聚集区向边缘区人口的低密度蔓延的变化界线,符合西安作为发达地区的城镇化发展特征。

4.4 可视化城市边缘区范围

将不透水面盖度和景观絮乱度提取出的城市边缘区进行空间叠合操作(图7),可以看出用这2种指标提取出的城市边缘区总体格局较为一致。对于重合部分,可以直接划分为城市边缘区;对不重合区域,即只有一个指标被判定为边缘区的,则采用人口密度的门槛值进行筛选。如果满足1000~5000/km²人口密度的阈值,则判定为城市边缘

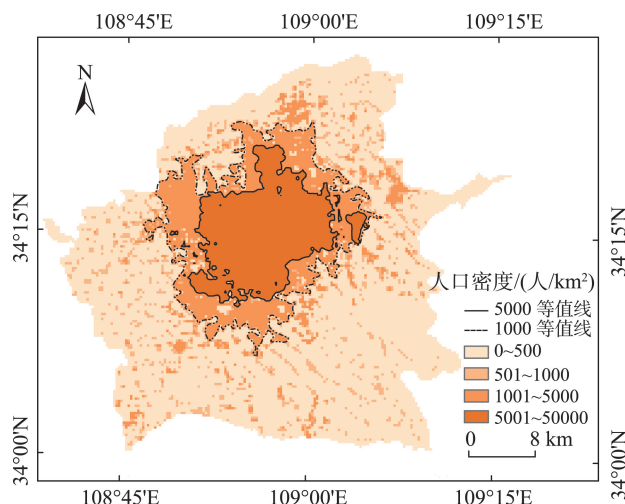


图6 第六次人口普查街道级西安市人口密度分布
Fig. 6 Distribution of population density of Xi'an

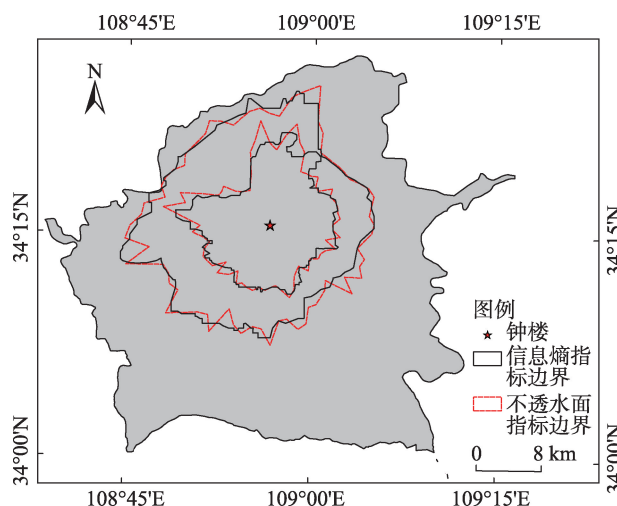


图7 2种指标获取的城市边缘区范围

Fig. 7 Urban fringe obtained using two indicators

区。最终平滑处理得到城市边缘区范围如图8所示。

从分布形态来看,城市边缘区主要分布在长安区、未央区、灞桥区等郊区,沿东、北、西北、西南方向延伸,说明道路牵引与政策调控(西咸一体化)对城市边缘区增长的贡献很大。中心城区、组团新城与西咸新区实现空间对接,西安与咸阳的跨越式发展使城市边缘区出现重叠与融合,说明本研究的提取结果符合西安市的实际发展规律。

内缘区由北顺时针为运动公园-辛家庙立交-长乐坡-等驾坡-南姜-鱼化寨-三桥-阁老门。外缘区由北顺时针为韩家湾-滨河西路-席王-神鹿坊-杜陵-凤林南路-斗门-王寺街道-六村堡。所界定的西安市城市边缘区基本分布在西安城市总体规划(2008-2020年)所明确的城区范围内:以绕城高

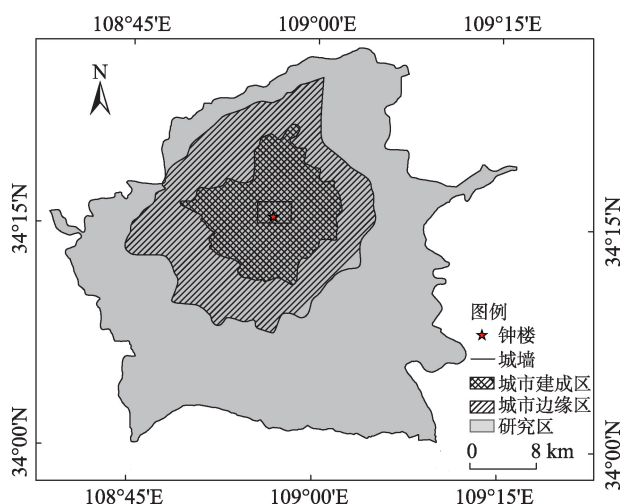


图8 西安市城市边缘区空间范围图

Fig. 8 Urban fringe in Xi'an

速为基本轮廓,东至灞河,西到绕城高速,南至长安(潏河),北到渭河,说明识别结果具有较高的可信度。

从获取的指标梯度变化可以解释整个研究区

的空间异质性(图9)。人口密度随着与中央商务区CBD距离的增加而递减,即负向的人口密度梯度。大型公寓楼和高密度住房地区是人口高密度的聚集区(图9(a),左一)。近郊区的高新区高新产业的发展提供较多的就业机会,促进该地区人口聚集(图9(a),左二)。城市边缘区作为城市扩展的前沿,为外来人口的主要承接区,人口低密度蔓延(图9(a),右二)。长安区的农村住宅区位于农村腹地,人口密度最低(图9(a),右一)。

不透水面盖度的最高值出现在老城区内,主要为老式住宅和商用楼宇(图9(b),左一);第二梯度下垫面为城南新式住宅、文化教育用地,由于建筑稀疏并增加了绿化面积,不透水面盖度显著下降(图9(b),左二);城市边缘区内,不透水面和透水面纵横交错,使得不透水面盖度出现突变(图9(b),右二);城市外围的农村地区以及水域的不透水面盖度最低(图9(b),右一)。

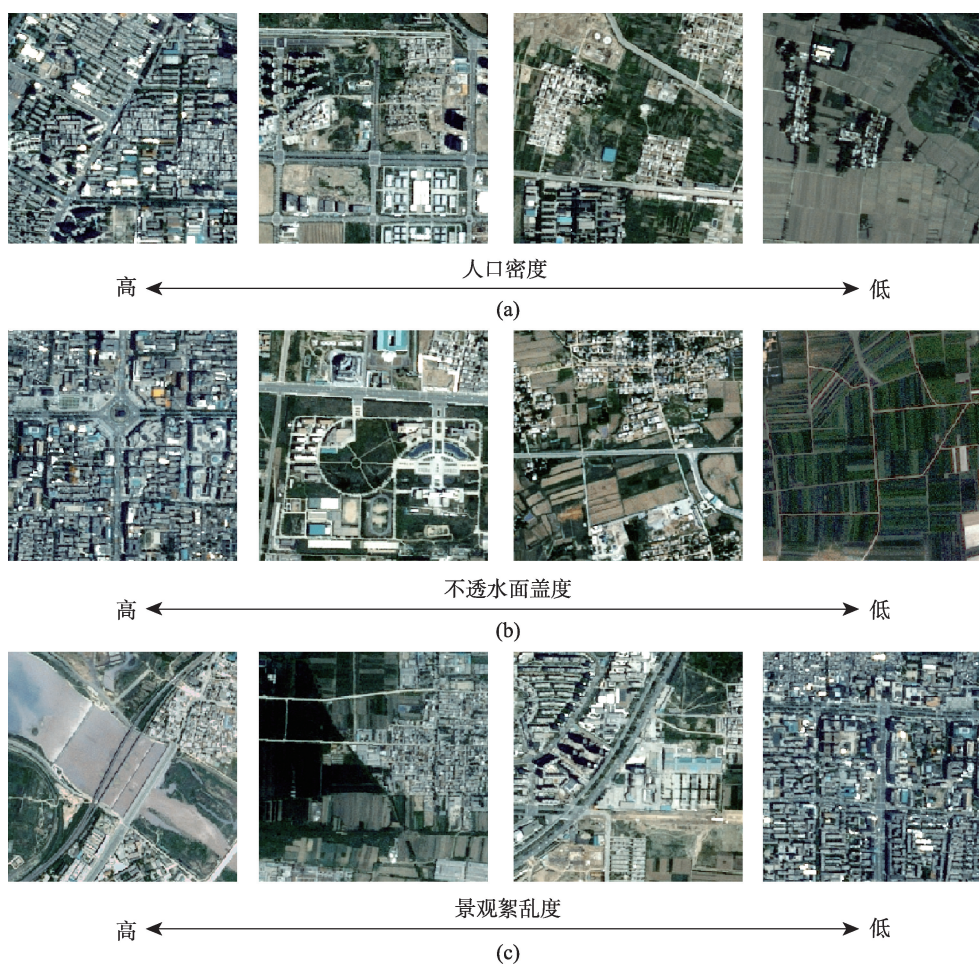


图9 各指标1 km²网格的梯度变化

Fig. 9 The gradients of each index of 1 km² grid

景观熵乱度是景观异质性的具体表现,城市边缘区和沿河道区域具有比城市和周围农村区域更高的信息熵值(图9(c),左一);城市边缘区的低密度住宅区,分布着大片的耕地和树林等开放空间,土地利用交错混杂,景观熵乱度较高(图9(c),左二);第三梯度位于生长期的城市新区,零散用地遍地开花,各种土地利用类型交错分布(图9(c),右二);在纯城市区域,景观完全被建设用地覆盖,信息熵值为0(图9(c),右一)。

5 结论与讨论

(1)人口密度、不透水面盖度和景观熵乱度分别反映城市社会活动、物理空间、景观格局的变异性,各指标的数值沿着城乡梯度表现出独特的空间信息。多维度指标的综合运用可对城市边缘区识别结果进行检验修正,使界定结果更趋于精确。研究表明,城市边缘区空间格局可以使用景观度量、物理度量和人口度量的组合来量化。

(2)基于突变检测和信息熵原理,使用3种指标量化并可视化出西安市涉及21个街道办事处、面积约378 km²的城市边缘区地域范围,主要分布在长安区、未央区、灞桥区等郊区。西安市呈现出明显的城市核心区、城市边缘区、农村腹地的圈层结构特征。合理确定城市边缘区,可为支持城乡统筹规划,优化城市空间布局提供参考依据。

(3)针对水陆分离导致划分间断的问题,可将河流桥梁连接判断标准引入到城市边缘区的空间识别上,判断河流是否起阻隔作用以排除水域的干扰,增强城市边缘区划分的严谨度。

(4)如何在人口、物理和景观指标的组合中获取最丰富的信息,减少度量之间的冗余度和相关性水平,可以作为新的研究方向进行深入细致地探讨。

参考文献(References):

- [1] 彭建,马晶,袁媛.城市边缘带识别研究进展与展望[J].地理科学进展,2014,33(8):1068-1077. [Peng J, Ma J, Yuan Y. Research progress and prospect on the identification of urban fringe[J]. Progress in Geography, 2014,33(8):1068-1077.]
- [2] Peng J, Zhao S, Liu Y, et al. Identifying the urban-rural fringe using wavelet transform and kernel density estimation: A case study in Beijing City, China[J]. Environmental Modelling & Software, 2016,83:286-302.
- [3] Bryant C, Russwurm L. The impact of nonagricultural development on agriculture: A synthesis[J]. Plan Canada, 1979,19(2):122-139.
- [4] 冯健,周一星,李伯衡,等.城乡划分与检测[M].北京:科学出版社,2012:13-90. [Feng J, Zhou Y X, Li B H, et al. Identification of urban and rural areas[M]. Beijing: Science Press, 2012:13-90.]
- [5] 章文波,方修琦,张兰生.利用遥感影像划分城乡过渡带方法的研究[J].遥感学报,1999,3(3):199-202. [Zhang W B, Fang X Q, Zhang L S. A study on the method of identifying the urban-rural fringe by TM images[J]. Journal of Remote Sensing, 1999,3(3):199-202.]
- [6] 赵华甫,朱玉环,吴克宁,等.基于动态指标的城乡交错带边界界定方法研究[J].中国土地科学,2012,26(9):60-65. [Zhao H F, Zhu Y H, Wu K N, et al. Study on the method for the demarcation of urban-rural fringe based on land use dynamic indicator[J]. China Land Sciences, 2012,26(9):60-65.]
- [7] 马晶,李全,应玮.基于小波变换的武汉市城乡边缘带识别[J].武汉大学学报·信息科学版,2016,41(2):235-241. [Ma J, Li Q, Ying W. Identification of a rural-urban fringe based on wavelet transform: A case study of Wuhan[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016,41(2):235-241.]
- [8] 程连生,赵红英.北京城市边缘带探讨[J].北京师范大学学报(自然科学版),1995,31(1):127-133. [Cheng L S, Zhao H Y. Discussion on the city's border area of Beijing[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 1995,31(1):127-133.]
- [9] 钱建平,周勇,杨信廷.基于遥感和信息熵的城乡结合部范围界定——以荆州市为例[J].长江流域资源与环境,2007,16(4):451-455. [Qian J P, Zhou Y, Yang X Y. Confirmation of urban fringe area based on remote sensing and message entropy: A case study of Jingzhou, Hubei Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007,16(4):451-455.]
- [10] 蔡栋,李满春,陈振杰,等.基于信息熵的城市边缘区的界定方法研究——以南京市为例[J].测绘科学,2010,35(3):106-109. [Cai D, Li M C, Chen Z J. A method of division of urban fringe based on message entropy: A case study in Nanjing city[J]. Science of Surveying and Mapping, 2010,35(3):106-109.]
- [11] 李世峰,白人朴.基于模糊综合评价的大城市边缘区地域特征属性的界定[J].中国农业大学学报,2005,10(3):99-104. [Li S F, Bai R P. Determination of zone feature in fringe of a big city based on fuzzy overall evaluation[J]. Journal of China Agricultural University, 2005,10(3):99-104.]

- [12] 袁家冬,孙振杰,张娜,等.基于“日常生活圈”的我国城市地域系统的重建[J].地理科学,2005,2(1):17-22. [Yuan J D, Sun Z J, Zhang N, et al. Reconstruction of urban region system in China based on daily life circle[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005,2(1):17-22.]
- [13] 陈佑启.试论城乡交错带及其特征与功能[J].经济地理, 1996,16(3):27-31. [Chen Y Q. Urban-rural ecotone and its characteristics and functions[J]. *Economic Geography*, 1996,16(3):27-31.]
- [14] 米瑞华,石英.城镇化背景下西安市城乡人口分布变动及其趋势预测[J].西北人口,2015(4):53-60. [Mi R H, Shi Y. Study on the distribution changes and trends prediction of urban and rural population of Xi'an city under the urbanization background[J]. *Northwest Population Journal*, 2015,4:53-60.]
- [15] 李建伟.空间扩张视角的大中城市新区生长机理研究[M].北京:科技出版社,2012:55-106. [Li J W. Study on the new urban district growth mechanism of large and medium-sized cities under the spatial expansion perspective [M]. Beijing: Science Press, 2012:55-106.]
- [16] 徐涵秋.利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J].遥感学报,2005,9(5):589-595. [Xu H Q. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI) (In Chinese) [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005,9(5):589-595.]
- [17] Vizzari M, Sigura M. Landscape sequences along the urban-rural-natural gradient: A novel geospatial approach for identification and analysis[J]. *Landscape & Urban Planning*, 2015,140:42-55.
- [18] Ridd M K. Exploring a VIS (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995,16(12):2165-2185.
- [19] Wu C, Murray A T. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003,84(4):493-505.
- [20] 岳文泽.基于遥感影像的城市景观格局及其热环境效应研究[D].上海:华东师范大学,2005:58-59. [Yue W Z. Study on urban landscape pattern and its thermal environment effect based on remote sensing image[D]. Shanghai: East China Normal University, 2005:58-59.]
- [21] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2007:63-64. [Wei F Y. Statistical diagnosis and prediction technique applied in modern climatology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007:63-64.]
- [22] 王浩,卢善龙,吴炳方,等.不透水面遥感提取及应用研究进展[J].地球科学进展,2013,28(3):327-336. [Wang H, Lu S L, Wu B F, et al. Advances in remote sensing of impervious surfaces extraction and its applications[J]. *Advances in Earth Science*, 2013,28(3):327-336.]
- [23] 国务院发展研究中心.城乡空间边界划分的国际经验及启示[J].中国发展观察,2010(7):54-57. [Development Research Center of the State Council. Urban and rural space border demarcation of international experience and enlightenment[J]. *China Development Observation*, 2010, 7:54-57.]