

引用格式:陈斌,王宏志,徐新良,等.武汉市主城区用地结构遥感监测及动态变化[J].地球信息科学学报,2019,21(2):293-303. [Chen B, Wang H Z, Xu X L, et al. Remote sensing monitoring and dynamic change of urban land cover structure of main urban region in Wuhan[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(2):293-303.] DOI:10.12082/dqxxkx.2019.180470.

武汉市主城区用地结构遥感监测及动态变化

陈斌¹,王宏志¹,徐新良^{2*},陈德超³,武新梅⁴,付阳阳¹

1. 华中师范大学城市与环境科学学院,地理过程分析与模拟湖北省重点实验室,武汉 430079;2. 中国科学院地理科学与资源研究所,资源与环境信息系统国家重点实验室,北京 100101;3. 苏州科技大学环境科学与工程学院,江苏省环境科学与工程重点实验室,苏州 215009;4. 浙江农林大学信息工程学院,杭州 311300

Remote Sensing Monitoring and Dynamic Change of Urban Land Cover Structure of Main Urban Region in Wuhan

CHEN Bin¹, WANG Hongzhi¹, XU Xinliang^{2*}, CHEN Dechao³, WU Xinmei⁴, FU Yangyang¹

1. College of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Hubei Province Key Laboratory for Analysis and Simulation of Geographical Process, Wuhan 430079, China; 2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy Sciences, Beijing 100101, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Key Laboratory of Environmental Science and Engineering of Jiangsu Province, Suzhou 215009, China; 4. School of Information Engineering, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China

Abstract: The land use structure and its spatio-temporal evolution characteristics within cities can not only reflect the level of urban economic development, but also predict the future development space and development potential of the city and even directly affect the suitability of the urban human settlement environment. There are significant differences in the internal land use structure of cities in different stages of development and different regions. In this paper, we used object-oriented multi-scale segmentation algorithm to carry out long-term remote sensing monitoring on the internal land cover structure of Wuhan main urban area based on the Landsat TM/OLI remote sensing images of 1990, 2000, 2010 and 2018. Then, the land use patterns in Wuhan were monitored, and the characteristics of land use structure changes during the 1990, 2000, 2010 and 2018 were further discussed. The research shows that: the internal land-use structure in the main urban area of Wuhan city is dominated by impervious surface, vegetation, and waterbody during the recent 28 years. The land use change pattern mainly reflects the transformation of vegetation and waterbody into impervious surface. From 1990 to 2018, impervious surface is the main type of land use in the study area, which increased from 329.73 km² in 1990 to 466.69 km² in 2018, which increased by 136.96 km². The vegetation and waterbody area decreased from 332.74 km², 318.26 km² in 1990 to 320.46 km², 196.39 km² in 2018 respectively, which decreased by 12.28 km²

收稿日期:2018-09-15;修回日期:2018-11-26.

基金项目:中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA20010302);华中师范大学研究生教育创新资助项目(2018CX ZZ001)。

[**Foundation items:** The Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences, No.XDA20010302; Innovation Projects of Graduate Education of Central China Normal University, No.2018CXZZ001.]

作者简介:陈斌(1992-),男,安徽桐城人,硕士生,研究方向为深度学习算法及土地利用/土地覆被变化遥感监测与评估。

E-mail: giscb@foxmail.com

*通讯作者:徐新良(1972-),男,山东青岛人,博士,研究员,博士生导师,研究方向为土地利用/土地覆被变化与陆地生态系统综合监测与评估。E-mail: xuxl@reis.ac.cn

and 121.87 km² respectively; bare land area is too small, and its change is not as significant as the first three types of land changes. This study can provide reference for urban functional land mapping, urban land efficiency analysis and comprehensive evaluation of urban ecological environment quality.

Key words: land cover structure; spatial-temporal evolution; remote sensing monitoring; impervious surface; mapping

***Corresponding author:** XU Xinliang, E-mail: xuxl@lreis.ac.cn

摘要:城市内部用地结构及其时空演变特征不仅能一定程度上反映出城市社会经济发展水平、预示城市未来发展空间和发展潜力,而且还会直接影响城市人居环境的适宜性,不同地区和不同发展阶段城市内部用地结构存在明显差异。本文基于武汉市1990、2000、2010和2018年4期Landsat TM/OLI遥感影像,采用面向对象多尺度分割算法对武汉市主城区内部用地结构进行了长时间序列遥感监测研究,并在此基础上分析了城市用地结构的时空演变特征。研究表明:1990–2018年武汉市主城区用地结构类型以不透水层、植被和水体为主,用地结构演变模式主要表现为植被和水体向不透水层的转化。主城区内部不透水层面积由1990年的329.73 km²增加至2018年466.69 km²,增加了136.96 km²;植被和水体面积则由1990年的332.74 km²、318.26 km²减少到2018年的320.46 km²、196.39 km²,分别减少了12.28 km²、121.87 km²;裸土地面积较小,整体变化不如前3种用地类型显著。本研究可为城市功能用地制图、城市用地效率分析以及城市生态环境质量综合评价提供参考。

关键词:用地结构;时空演变;遥感监测;不透水层;制图

1 引言

城市土地利用及覆被变化是人类活动对城市用地结构影响最直观的表现形式之一,对于城市经济发展和生态环境保护具有重要的基础性作用^[1–5]。城市主城区作为城市经济和环境发展的主体部分,其内部用地结构不仅能够影响城市生态系统服务功能^[6],而且还会直接影响城市人居环境的适宜性。已有研究表明,城市中绿地和水体面积大小对城市生态系统服务功能具有重要影响,当城市中绿地斑块面积大于5 km²时,地表辐射温度下降明显^[7],而当流域内城市不透水地表占比大于25%时,将会导致城市环境严重退化^[8]。因此,探讨城市化发展背景下的城市内部用地结构及其演变特征,对于提升城市土地资源利用效率、构建适宜的人居环境和促进整个城市经济快速协调发展具有重要意义。

当前,众多学者基于卫星数据开展了区域用地遥感监测和城市扩张的研究,不同学者分别从城市群、海岸带、流域以及市级行政区划单元下对区域用地结构进行了遥感监测研究。例如,匡文慧等^[9]对2000–2008年京津唐城市群不透水地表进行遥感监测研究,发现城市不透水层增长呈现显著的时空差异;侯西勇等^[9]对中国海岸带用地结构进行遥感制图研究,发现不同用地类型制图精度差异较大;宋明明等^[10]选用多期Landsat影像,对秦淮河流域近30年不透水层景观格局变化进行分析,发现流域内

不透水层增加显著;金晶等^[11]利用线性光谱混合模型对上海市不透水层进行遥感监测,发现从2002–2008年上海市城市不透水层向中心城区外围扩张趋势明显。从研究尺度上来看,现有研究多集中以较大空间范围和较短时间序列的区域性遥感监测研究为主,对区域土地利用/土地覆被结构遥感监测研究也多集中在2015年以前。从研究对象上来看,多以发达城市群、东部沿海城市和典型流域为主,对中部城市武汉市用地结构开展长时序和系统性遥感监测研究尚较缺乏。

近年来,有学者基于遥感数据对武汉市用地结构开展了监测研究。例如,常变蓉等^[12]采用多期Landsat遥感影像,对武汉市建设用地扩张时空分异特征进行了研究;张扬等^[13]基于2002、2009和2015年3期Landsat影像,借助线性光谱混合模型对武汉市城市不透水层进行提取,发现主城区不透水层比例明显高于新区;黄靖等^[14]利用2003–2008年的MODIS数据,对武汉市植被覆盖变化进行遥感监测,发现武汉市植被覆盖总体呈上升趋势;淡永利等^[15]基于2000、2005和2010年3期Landsat TM数据,对2000–2010年武汉市湖泊时空变化特征进行了分析,发现武汉市各个湖泊均有不同程度的萎缩。但已有研究也多集中以武汉市城市不透水层、湖泊、建设用地和植被等单一用地类型为主,而针对城市的主体部分——城市主城区内部用地结构开展长时间序列、多时段和系统性遥感监测研究尚不多见。

武汉市作为长江中游城市群的核心城市之一,其内部用地结构时空演变特征与长江经济带发展紧密相关。本研究在参照国内外已有利用3S技术对城市用地结构进行遥感监测研究的基础上,基于Landsat TM/OLI遥感数据,借助面向对象多尺度分割算法,对长江中游城市群的核心城市——武汉市主城区内部用地结构进行了多时相遥感监测研究,并在此基础上进一步分析了1990–2018年来用地结构的格局及其动态变化过程,以期能为武汉市主城区内部用地结构调整,构建适宜的人居环境和城市规划建设提供科学依据与理论参考。

2 研究区概况及数据源

2.1 研究区概况

武汉市($29^{\circ}58'N$ – $31^{\circ}22'N$, $113^{\circ}41'E$ – $115^{\circ}05'E$)位于江汉平原东部的长江中下游平原,东临鄂州、西接孝感、南连咸宁、北通黄冈,长江和汉江贯穿而过,“两江三镇”形成了武汉最基本的地理分布格局(图1)。武汉市现辖13个区,包括7个中心城区和6个远郊城区,本研究选取7个中心城区(洪山区、江岸区、硚口区、江汉区、汉阳区、武昌区和青山区)作为研究区域。根据中国科学院资源环境数据中心(<http://www.resdc.cn/>)全国土地利用数据库提供的1:10万土地现状数据统计得知,武汉市主城区耕地总面积 320.89 km^2 ,林地总面积 28.31 km^2 ,草地总面积 15.95 km^2 ,水域总面积 303.32 km^2 ,建设用地 310.92 km^2 ,其他用地 7.7 km^2 ,分别占研究区总面积的32.51%、2.86%、1.62%、30.73%、31.49%和0.79%。本研究区属于亚热带季风湿润性气候,气

候温暖而湿润,全年平均气温在 18.1°C ,年均降水量 $900\sim 1400\text{ mm}$,地势整体呈现西高东低态势,除西南部分山地丘陵外,地貌类型主要以平原为主。

武汉市作为长江中游城市群的重要核心城市之一,近年来由于城市经济快速发展和城市人口急剧增加,城市内部用地结构也相应发生很大程度变化,城市内部大量植被和水体被不透水层取代,使城区内部用地结构严重失调,城市人居环境质量不断下降,这些问题均使得武汉市主城区内部用地结构格局亟待调整和改善。

2.2 数据来源和数据预处理

本文选取武汉主城区1990年9月2日、2000年9月13日、2010年6月21日和2018年4月8日共4期Landsat TM/OLI遥感影像作为基础研究数据(来源于美国地质勘探局官网, <https://earthexplorer.usgs.gov/>)。4期影像选取原则均要求在卫星过境时天空晴朗无云或者云量较少,同时选取与遥感影像成像时间尽可能接近的历史谷歌影像和1990、2000、2010和2015年4期土地利用现状数据(来源于中国科学院资源环境数据中心, <http://www.resdc.cn/>)作为后期监测结果验证数据。数据预处理主要包括:①对4期影像进行辐射定标、大气/几何校正、配准等预处理工作;②再利用研究区矢量边界裁剪影像得到研究区范围。

2.3 样本数据集的建立

本研究将武汉市主城区用地结构类型划分成4类:不透水层、植被、水体和裸土地。考虑到选取的样本数据集是否准确且具有代表性,将直接影响到最终遥感监测分类精度高低,故借助历史谷歌影像和多期土地利用现状数据,通过目视解译方法,按照分亮度分区域的样本选取原则,在标准真彩色合成的Landsat遥感影像基础上分别选取上述4种用地类型训练样本影像斑块各50个,其中选取的部分样本案例如表1所示。

3 研究方法

本研究基于面向对象的多尺度分割算法实现了对研究区用地结构类型的遥感监测研究。多尺度分割算法其实质就是通过设定不同分割特征参数,将遥感影像分割成特征信息相同或者相近的且大小和形状各异的影像斑块,然后借助规则用地结

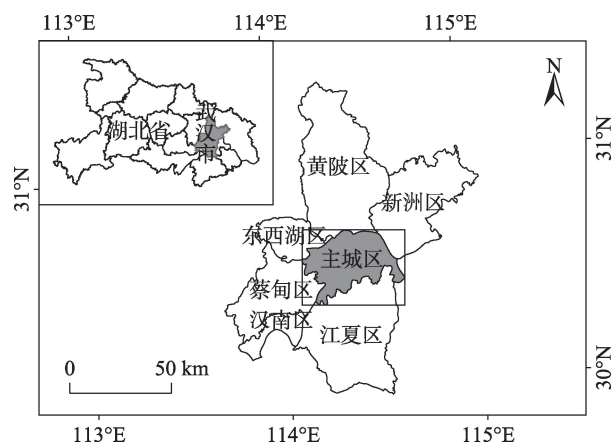
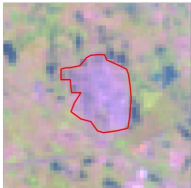
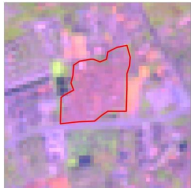
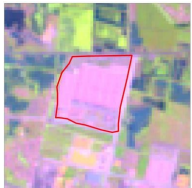


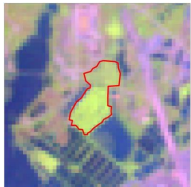
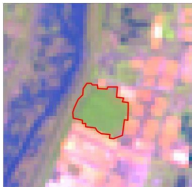
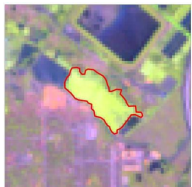



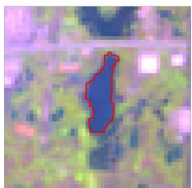


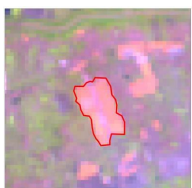
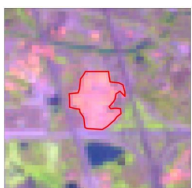


图1 研究区范围

Fig. 1 Location of the study area

表1 典型地类训练样本
Tab. 1 The training sample of typical objects

序号	地物类型	地物样本			
A	不透水层				
B	植 被				
C	水 体				
D	裸土地				

构类型分类算法获取不同用地类型分割后影像斑块的特征信息,再通过计算相同用地类型的分类特征信息建立起遥感影像分类规则体系,从而实现了研究区各用地结构类型的监测分类,最终在多时间序列用地结构类型分类结果的基础上,对研究区用地结构变化幅度、用地结构动态度以及用地类型转移方向和转移量进行深入探讨。本研究具体技术流程如图2所示。

3.1 用地结构变化幅度

用地结构变化幅度是用来描述不同用地结构类型在不同时间段内面积变化的一项量化指标,它能直观反映出研究区不同用地类型面积及结构的变化情况,其数学计算公式如下:

$$\Delta U = U_b - U_a \tag{1}$$

$$K = \frac{U_b - U_a}{T} \tag{2}$$

式中: ΔU 表示研究区1990–2018年某一用地类型的总变化幅度; U_a 和 U_b 表示前后2个时间节点某一用地类型面积; K 表示研究区用地类型的年变化幅度; T 表示前后2个时间点间隔的年限。根据公式计算

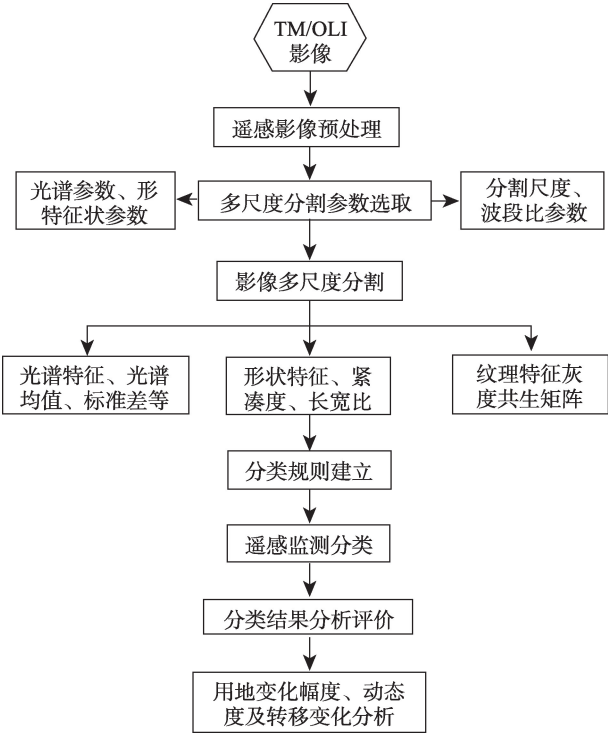


图2 算法分类技术流程

Fig. 2 The technology flow chart of algorithm classification

得到武汉市主城区 1990、2000、2010 和 2018 年各用地结构类型变化幅度。

3.2 用地结构动态度

用地结构动态度是用来描述土地利用格局动态变化的一项量化指标,它不仅可以用来监测研究区用地结构类型的整体变化情况,而且还能对研究区未来土地利用格局进行预测^[16-18]。本研究采用单一土地利用度对武汉市主城区用地结构变化进行分析,具体计算公式如下:

$$K' = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (3)$$

式中: K' 表示前后 2 个时间节点内某一用地类型变化的动态度; U_a 和 U_b 表示前后 2 个时间节点某一用地类型面积; T 表示前后 2 个时间点间隔的年限。

3.3 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵是用来表示各类型用地之间的转移方向和转化量的主要方法,它能直观反映出土地利用变化的结构特征和转移方向^[19]。具体计算公式如下:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: S_{ij} 表示研究区第*i*类用地向第*j*类转化的面积;*i*前一时期用地类型;*j*表示后一时期用地类型;*n*为用地类型数量。

3.4 遥感影像多尺度分割

基于面向对象方法遥感分类研究中,卫星影像分割尺度选取是否合理将会直接影响到最终分类精度高低,因此在执行分类操作之前需对影像进行多尺度分割。面向对象多尺度分割是一种自下而上的区域分割生长方法^[20-21],在分割时根据分割尺度、紧凑度、光谱均值、灰度比值和标标准差等对象特征大小,将研究区域分割成大小不同的影像斑块。若分割尺度设置过大,影像斑块中同质区域便会分割的过于零碎,不能真正反映出地表像元真实结构分布;若分割尺度设置过小,影像斑块中异质区域便难以区分开。因此在面向对象遥感分类中,如何设置科学合理的分割参数就显得尤为重要。而多尺度分割实质就是一个不断调整影像分割参数大小,将同质或者异质性差异最小的区域像元进行生长合并,直至最终找到异质性满足预先设定目标阈值的过

程。异质性*d*是通过合并后影像斑块的形状及光谱特征差异加权计算得到,计算公式如下:

$$d = w_1 \cdot l_{\text{color}} + (1 - w_1) \cdot l_{\text{shape}} \quad (5)$$

式中: l_{color} 代表影像斑块之间的光谱特征差异; l_{shape} 表示分割后影像斑块的形状特征差异; w_1 为光谱特征差异的权重大小。

光谱差异性指数是由各影像斑块的光谱特征差异计算得到^[22],计算公式如下:

$$l_{\text{color}} = \sum_1^c w_c \cdot (n_m \cdot \sigma_m - (n_1 \cdot \sigma_1 + n_2 \cdot \sigma_2)) \quad (6)$$

式中:*c*代表影像的波段数量; w_c 为不同波段的权重大小; n_m 表示合并后影像斑块中的像元个数; σ_m 为相邻影像斑块合并后的标准方差; n_1 、 n_2 分别表示两相邻影像斑块合并前各自所包含像元数量; σ_1 、 σ_2 分别代表 2 个相邻影像斑块或像元合并之前的标准方差。

形状差异性指数是由分割后影像斑块的紧凑度和光滑度加权计算得到^[20],计算公式如下:

$$l_{\text{shape}} = w_2 \cdot l_{\text{com}} + (1 - w_2) \cdot l_{\text{smooth}} \quad (7)$$

式中: w_2 为影像斑块紧凑度权重大小; l_{com} 表示影像斑块紧凑度差异性; l_{smooth} 为影像斑块的光滑程度差异性。

分割后影像紧凑度差异性计算公式如下^[23]:

$$l_{\text{com}} = \sqrt{n_m} \cdot S_m - (\sqrt{n_1} \cdot S_1 + \sqrt{n_2} \cdot S_2) \quad (8)$$

式中: n_m 为合并后影像斑块中的像元数量; n_1 、 n_2 为两相邻区域斑块合并前的所包含的像元数量; S_m 为合并后影像斑块区域的边界总长度; S_1 、 S_2 分别表示两相邻斑块合并之前的边界长度大小。

分割后影像斑块单元的光滑程度差异性是由合并前后斑块所含像元数量、实际边长及其外接矩形长度计算得到^[23]:

$$l_{\text{smooth}} = n_m \cdot S_m / L_m - (n_1 \cdot S_1 / L_1 + n_2 \cdot S_2 / L_2) \quad (9)$$

式中: n_m 表示合并后影像斑块中所含像元个数; n_1 、 n_2 分别表示两相邻影像斑块合并前的像元个数; S_m 为合并后对象区域的实际边界长度; S_1 、 S_2 、 S_m 分别为合并前后两相邻影像斑块单元的边界长度; L_m 为包含合并后影像区域范围的矩形边界长度; L_1 、 L_2 、 L_m 分布表示两相邻区域斑块合并前后的外接矩形边界长度。

若首次分割尺度设置过大影像分割过于零碎,则需要对同质斑块像元进行合并。寻找区域内邻近斑块合并后异质性小于预先所设定阈值的像元,若满足要求就将临近 2 个像元进行合并,否则就将

找到的像元设为目标像元再次进行寻找,直至最终找到可以跟目标像元合并的像元。若首次分割尺度设置过小,影像斑块的异质性过大,则需要进行二次分割,循环往复,直至分割后影像斑块异质性达到预先设定合理阈值范围,停止分割^[21]。本研究首先根据研究区地物分类特征对遥感影像进行多尺度分割,分割结果如图3所示;然后根据分割后影像斑块的异质性阈值范围和历史谷歌影像进行目视解译验证,研究最终选取分割尺度参数为30,形状因子权重和紧凑度因子权重参数分别为0.4和0.6,除近红外波段权值设为2,其余各个波段权值大小均设定为1。

3.5 面向对象最邻近分类

传统基于像元分类是预先设定遥感影像的多个波段分布服从多维正态分布,然后以此来构造遥感分类判别函数。它实质是根据未知像元与已知像元似然度大小,将未知区域像元划分到与它似然度最大的区域之中^[24]。与基于像元分类方法不同,面向对象分类方法是将多尺度分割后得到的影像

斑块视为分类对象,它不再局限于单一像元^[25]。本研究采用最邻近分类方法对分割后影像斑块进行分类研究,最邻近分类属于遥感影像监督分类方法中的一种,它主要根据训练样本区域内的样本对象特征,计算目标对象为中心的周围未分类对象特征与训练样本特征对象的中心距离,如果满足距离样本对象的特征中心最近,则将其划分到该类别当中。在使用最邻近分类方法进行遥感分类研究时,并不是参与分类的样本特征越多越好,因为分类特征过多会导致特征信息冗余,使分类效率降低,甚至会影响最终分类精度。最邻近距离分类方法多适用于地物斑块特征不够明显和地物特征空间无法详细描叙分类场景。

4 结果与分析

4.1 武汉市主城区土地利用监测结果及精度评价

根据研究区土地利用结构特征,将研究区用地结构类型划分成:不透水层、植被、水体和裸土地4种类型,借助面向对象遥感分类方法对武汉市主

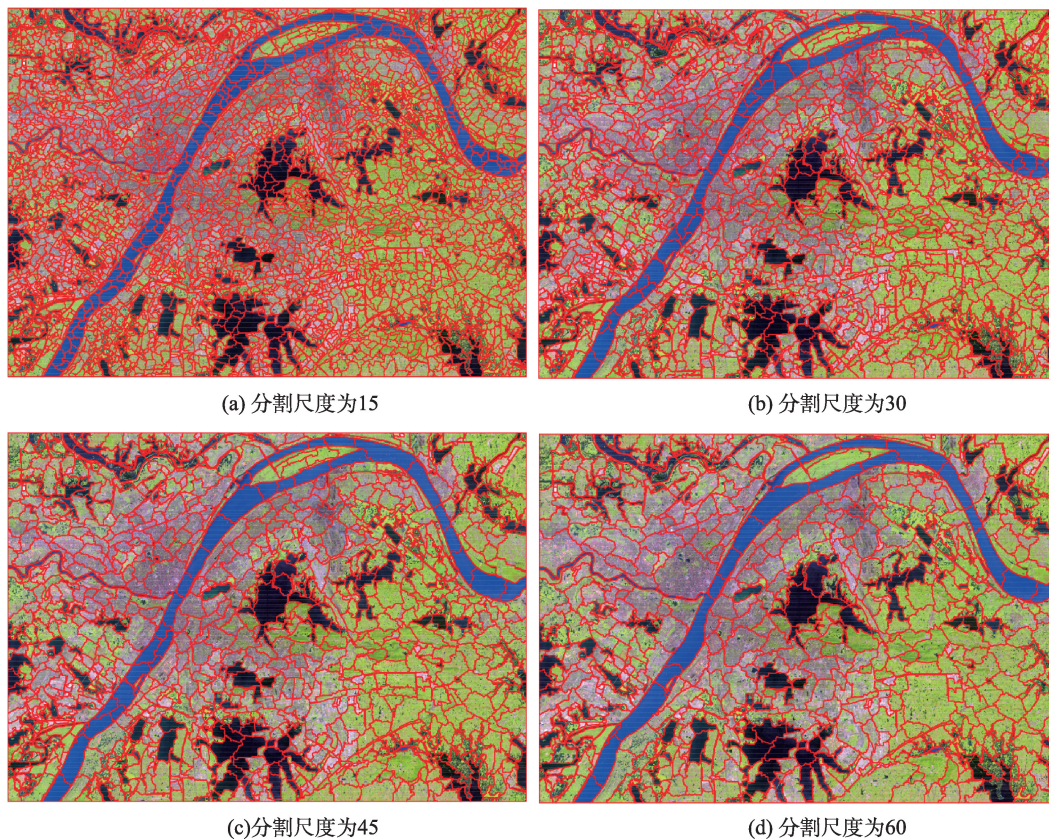


图3 遥感影像多尺度分割结果

Fig. 3 The result of Multi-scale segmentation remote sensing images

城区内部用地类型进行监测提取,最终得到研究区4期用地结构类型分布图(图4)。

本研究采用随机抽样方法对分类结果进行精度验证^[26],借助ArcGIS 10.1软件中Creat Random Points工具在研究区4期遥感影像中分别生产500个随机样本点,借助研究区历史谷歌影像和1990、2000、2010和2015年4期土地利用现状数据,通过目视解译人机交互模式对武汉市主城区4期用地结构监测结果进行精度验证(表2)。由结果可知,基于面向对象多尺度分割方法得到的武汉市4期用地结构分类结果总体分类精度均保持在90%以上,且Kappa系数均大于0.85,除1990年和2010年裸土地用户精度

低于80%,其余用地结构类型用户精度和生产者精度均在80%以上,且不同时期各用地类型生产者精度均达到90%以上。整体来看,除2010年裸土地生产者精度高于水体外,其他时段内不透水层、植被和水体的分类精度均要高于裸土地,主要是由于研究区内裸土地面积总体较少,且多分布在滩涂和其他地类交错分布区附近,同时裸土光谱特征与不透水层较为接近,故分类精度整体低于其他3种类型用地。

4.2 武汉市主城区用地类型现状及变化幅度

由武汉市主城区用地类型及变化幅度统计结果(表3)可知,武汉市主城区总面积为987.89 km²,

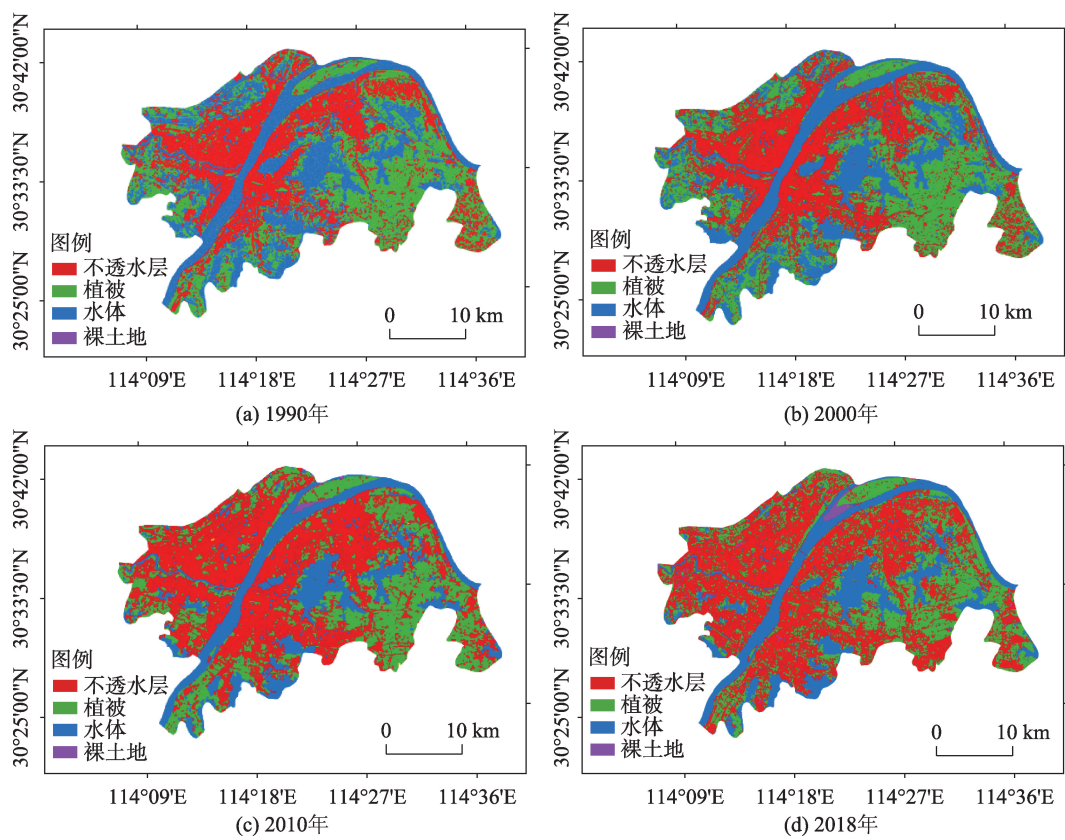


图4 1990–2018年武汉市主城区用地结构空间格局
Fig. 4 Spatial pattern of land cover in urban area of Wuhan from 1990 to 2018

表2 1990–2018年武汉市主城区土地利用类型精度评价

Tab. 2 Accuracy evaluation of land use types in urban area of Wuhan from 1990 to 2018

年份	用户精度/%				生产者精度/%				总体精度/%	Kappa系数
	不透水层	植被	水体	裸土地	不透水层	植被	水体	裸土地		
1990	95.52	93.86	95.36	78.69	92.75	93.04	92.90	92.31	92.83	0.9012
2000	94.50	96.41	95.17	83.58	91.96	93.06	97.18	90.32	93.70	0.9138
2010	93.62	92.10	95.71	79.66	94.28	92.68	91.78	92.16	92.82	0.9011
2018	93.60	94.93	91.53	83.54	90.70	92.96	92.31	91.67	91.74	0.8882

其中不透水层、植被和水体是研究区3种主要用地类型,三者面积占研究区总面积的95%以上。1990–2018年武汉市主城区内部土地利用格局发生不同程度变化,1990–2018年城市不透水层面积持续增长。其中,2000–2010年城市不透水层面积增长幅度最为显著,变化总幅度为62.74 km²,年变化幅度也达到

了6.27 km²;2010–2018年城市不透水层面积年变化幅度最大,达到7.2 km²,这可能与湖北政府自2004年后提出加快“武汉城市圈”实施4个一体化方案完善5个一体化建设有关,而余下3种用地结构类型中,除植被面积在1990–2000年增加外,其他时间段内3种用地类型面积均呈下降态势。

表3 1990–2018年武汉市主城区内部土地利用现状及变化面积
Tab. 3 Area of land-use status and land-use change in Wuhan city from 1990 to 2018 (km²)

用地类型	1990年	1990–2000年		2000年	2000–2010年		2010年	2010–2018年		2018年
		$\Delta U1$	K1		$\Delta U2$	K2		$\Delta U3$	K3	
不透水层	329.73	16.59	1.66	346.32	62.74	6.27	409.06	57.63	7.20	466.69
植被	332.74	25.98	2.60	358.72	-13.53	-1.35	345.19	-24.73	-3.09	320.46
水体	318.26	-42.95	-4.30	276.31	-48.28	-4.82	228.03	-31.64	-3.96	196.39
裸土地	7.16	-0.62	-0.06	6.54	-0.93	-0.09	5.61	-1.26	-0.16	4.35

注: $\Delta U1$ 、 $\Delta U2$ 、 $\Delta U3$ 表示3个时间段各用地类型的总变化幅度; $K1$ 、 $K2$ 、 $K3$ 表示用地类型在3个时间段内的年变化幅度。

4.3 武汉市主城区用地结构动态变化

由研究区4种用地结构类型变化动态度(图5)结果可知,1990–2018年武汉市主城区除不透水层土地利用动态度为1.43%大于0外,其他3种用地类型动态度均小于0,分别为-1.37%、-0.13%和-2.46%。其中1990–2000年用地结构动态度最大的用地类型是植被,为0.78%,其次为不透水层和水体,分别为0.48%和-1.32%,土地利用动态度最小的是裸土地,仅为-2.41%;2000–2010年用地结构动态度最大的是不透水层,大小为1.76%,其次为植被和水体,分别为-0.37%和-1.74%,土地利用动态度最小的是裸土地,仅为-2.73%;2010–2018年用地结构动态度最大的仍然是不透水层,大小为1.71%,其次为植被和水体,分别为-0.90%和-1.73%,土地利用动态度最小的是裸土地,仅为-5.47%。由此可见,不透水层是研究区土地利用动态变化的主体部分,而其

他3类用地动态度在不同时间阶段内虽有差异,但整体动态变化均不如不透水层显著。

4.4 武汉市主城区用地类型转移分析

研究区不同时间段内不同用地结构类型变化存在明显差异,本文选取研究区土地利用转移面积较高的8种转移类型进行了分析讨论。据统计得到武汉市主城区用地类型转移矩阵(表4)和用地类型概率转移矩阵(表5),由结果可知,1990–2018年的研究区不透水层–不透水层转移矩阵概率最高,达到了73.02%,其次为水体和植被,转移概率也分别达到了53.89%和50.08%。其中,2000–2010年不透水层自身转移矩阵概率最高,达到了75.86%;1990–2000年植被自身转移概率最高,为71.08%;2010–2018年水体自身转移概率最高,为89.92%。1990–2018年转出类型中,植被–不透水层的转移概率最高,达到了42.87%,其次为水体–不透水层、不透水层–植被,转移概率分别为26.79%、25.99%。综上所述,1990–2018年研究区不透水层面积不断增加,且多表现为植被和水体向不透水层转入得用地结构变化模式,其中不同时间段内植被向不透水层转入的面积整体均要高于水体和裸土地。

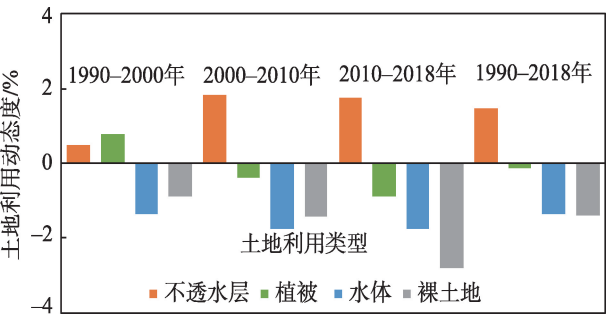


图5 1990–2018年武汉市主城区内部土地利用变动态度

Fig. 5 Land-use dynamics degree of build up area of Wuhan from 1990 to 2018

5 结论与讨论

本研究结合多时相遥感数据,对武汉市主城区用地结构类型及其动态变化进行遥感监测研究,并

表4 1990–2018年武汉市主城区用地类型转移矩阵

Tab. 4 Area of land-use change in Wuhan city from 1990 to 2018 (km²)

变化类型	1990–2000年	2000–2010年	2010–2018年	1990–2018年
不透水层→不透水层	250.14	257.96	333.04	242.26
植被→植被	236.50	221.14	205.12	171.63
水体→水体	226.17	167.32	161.33	166.63
不透水层→植被	72.77	79.16	99.88	87.43
水体→植被	61.50	57.32	6.68	58.23
植被→不透水层	59.37	138.75	127.96	142.64
植被→水体	36.65	9.62	23.92	19.97
水体→不透水层	30.63	49.17	8.05	85.31

表5 1990–2018年武汉市主城区用地类型概率转移矩阵

Tab. 5 Area of probability land-use change in Wuhan city from 1990 to 2018 (%)

变化类型	1990–2000年	2000–2010年	2010–2018年	1990–2018年
不透水层→不透水层	74.37	75.86	74.65	72.03
植被→植被	71.08	59.70	57.32	50.08
水体→水体	71.01	60.72	89.92	53.89
不透水层→植被	21.64	23.28	22.39	25.99
水体→植被	19.31	20.80	3.72	18.28
植被→不透水层	17.85	37.46	35.76	42.87
植被→水体	11.02	2.60	6.69	6.03
水体→不透水层	9.62	17.84	4.49	26.79

进一步分析了1990–2018年研究区用地结构的演变特征,主要结论如下:

(1)2018年武汉市主城区用地结构类型主要以不透水层、植被和水体为主。其中,不透水层面积最大,为466.69 km²;其次是植被和水体,面积分别为320.46 km²和196.39 km²;而裸土地面积较少,仅有4.35 km²,它们分别占主城区总面积的47.24%,32.44%、19.88%和0.44%。

(2)从研究区用地结构现状和变化结果上来看,1990–2018年武汉市主城区用地结构格局发生了显著变化,其中不透水层面积呈现逐年扩张态势,它由1990年占主城区总面积的33.38%上升到2018年的47.24%;水体面积逐年递减,总面积由1990年占主城区总面积的32.23%下降到2018年的19.88%,减少了1/3以上;植被面积在1990–2000年虽然有所增加,但随后又不断减小,整体呈下降态势,面积由1990年占主城区总面积的32.68%下降到2018年32.43%,但整体变化不如植被明显;裸土地面积相对较少,变化不如前3类用地类型显著,面积总体上呈现下降态势。不透水层是城市经济快速发展下的必然产物,然而植被和水体在城市经济

社会发展过程中也发挥着不可或缺的生态保障功能,因此急需对城市内部不同用地类型面积动态变化进行合理有效管控。

(3)从研究区用地结构类型转移结果上来看,1990–2018年的3个时间段内(1990–2000年、2000–2010年、2010–2018年),不透水层的稳定性最高,3个时间段内自身转移概率均在74%以上,植被和水体稳定性次之,其中植被的稳定性整体上低于水体,且转移概率呈现下降态势,在2010–2018年达到最小值,仅为57.32%,水体的稳定性先减小后增加,转移矩阵概率在2010–2018年达到最大值,为89.92%,这可能与研究区自2010年后实施了严格的河流和湖泊保护措施有关。1990–2018年用地结构转出类型中,植被–不透水层的转移面积最大为242.26 km²,转移矩阵概率也达到了42.87%,其次为水体–不透水层,转移面积为171.63 km²,转移概率为26.79%,而裸土地–水体转移面积最小,仅有0.02 km²。

本研究利用面向对象方法在武汉市主城区用地结构遥感监测研究中取得了较好的分类精度,但这是建立在对研究区域相对熟悉、用地结构类型划分类别有限且遥感影像取得较为理想分割参数基

础之上的。然而,城市用地结构划分类型与遥感影之间的空间尺度匹配性高低以及影像分割参数选取是否合理,都将会直接影响到最终分类精度高,因此如何为研究区不同用地结构划分类型和不同数据源的遥感影像选取合适分割参数,还有待进一步探讨。同时,本研究借用了多时相遥感数据对武汉市主城区用地结构进行了动态监测研究,并未进一步建立用地结构演变特征与城市人居环境适宜程度之间的定量关系,如何将城市用地结构与城市人居环境适宜度、满意度以及地产价格等经济社会指标之间开展综合性和交叉性分析将是今后研究的重要方向。

参考文献(References):

- [1] 刘纪远,宁佳,匡文慧,等. 2010-2015年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J]. 地理学报,2018,73(5):789-802. [Liu J Y, Ning J, Kuang W H, et al. Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010-2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(5):789-802.]
- [2] Wulder M A, White J C, Goward S N, et al. Landsat continuity: Issues and opportunities for land cover monitoring[J]. Remote Sensing of Environment, 2008,112:955-969.
- [3] 陆大道,陈明星.关于“国家新型城镇化规划(2014-2020)”编制大背景的几点认识[J]. 地理学报,2015,70(2):179-185. [Lu D D, Chen M X. Several viewpoints on the background of compiling the "National New Urbanization Planning (2014-2020)"[J]. Acta Geographica Sinica, 2015,70(2):179-185.]
- [4] Mooney H A, Duraiappah A, Larigauderie A. Evolution of natural and social science interactions in global change research programs[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013,110(1): 3665-3672.
- [5] Lawler J J, Lewis J D, Nelson E, et al. Projected land-use change impacts on ecosystem services in the United States[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2014,111(20):7492-7497.
- [6] 匡文慧.区域尺度城市增长时空动态模型及其在京津唐都市圈应用[J]. 地理学报,2011,66(2):317-330. [Kuang W H. Simulating dynamic urban expansion at regional scale in Beijing-Tianjin-Tangshan Metropolitan Area[J]. Acta Geographica Sinica, 2011,66(2):317-330.]
- [7] 匡文慧,迟文峰,史文娇.中国与美国大都市区城市内部土地覆盖结构时空差异[J]. 地理学报,2014,69(7):883-895. [Kuang W H, Chi W F, Shi W J. Spatial-temporal characteristics of intra-urban land cover in the cities of China and USA from 1978 and 2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2014,69(7):883-895.]
- [8] 匡文慧,刘纪远,陆灯盛.京津唐城市群不透水地表增长格局以及水环境效应[J]. 地理学报,2011,66(11):1486-1496. [Kuang W H, Liu J Y, Lu D S. Pattern of impervious surface change and its effect on water environment in the Beijing-Tianjin-Tangshan metropolitan area[J]. Acta Geographica Sinica, 2011,66(11):1486-1496.]
- [9] 侯西勇,邸向红,侯婉,等.中国海岸带土地利用遥感制图及精度评价[J]. 地球信息科学学报,2018,20(10):1478-1488. [Hou X Y, Di X H, Hou W, et al. Accuracy evaluation of land use mapping using remotesensing techniques in Coastal Zone of China[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(10):1478-1488.]
- [10] 宋明明,都金康,郑文龙,等.秦淮河流域近30年不透水景观格局时空演变研究[J]. 地球信息科学学报,2017,19(2):238-247. [Song M M, Du J K, Zheng W L, et al. Quantifying the spatial-temporal changes of impervious surface landscape pattern from 1988 to 2015 in Qinhuai River Basin[J]. Journal of Geo-information Science, 2017, 19(2):238-247.]
- [11] 金晶,王斌,张立明.基于线性光谱混合分析的城市不透水层分布估算[J]. 复旦学报(自然科学版),2010,49(2):197-208,273-274. [Jin J, Wang B, Zhang L M. Estimating urban impervious surface distribution by linear spectral mixture analysis[J]. Journal of Fudan University(Natural Science), 2010,49(2):197-208,273-274.]
- [12] 常变蓉,李仁东.武汉市建设用地扩张遥感监测及空间分异分析[J]. 国土资源遥感,2017,29(3):118-123. [Chan B R, Li R D. A study of remote sensing monitoring and spatial variation of construction land expansion in Wuhan[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2017,29(3):118-123.]
- [13] 张扬,刘艳芳,刘以.武汉市不透水地表时空格局分析[J]. 地理科学,2017,37(12):1917-1924. [Zhang Y, Liu Y F, Liu Y. Spatial and temporal patterns analysis of impervious surface in Wuhan City[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017,37(12):1917-1924.]
- [14] 黄靖,夏智宏.基于MODIS遥感数据的武汉市植被覆盖变化监测分析[J]. 气象与环境科学,2009,32(2):16-20. [Huang J, Xia Z H. Analysis for monitoring vegetation coverage change of Wuhan based on remote sensing data of MODIS[J]. Meteorological and Environmental Science, 2009,32(2):16-20.]
- [15] 淡永利,王宏志,张欢,等. 2000-2010年武汉市中心城区湖泊景观变化[J]. 生态学报,2014,34(5):1311-1317. [Dan Y L, Wang H Z, Zhang H, et al. Lakes evolution of central Wuhan during 2000 to 2010[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(5):1311-1317.]
- [16] 李忠锋,王一谋,冯毓荪,等.基于RS与GIS的榆林地区土

- 地利用变化分析[J].水土保持学报,2003,17(2):97-99,140. [Li Z F, Wang Y M, Feng Y S, et al. Analysis of land use change in Yulin prefecture based on RS and GIS [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003,17(2): 97-99,140.]
- [17] 赵健,魏成阶,黄丽芳,等.土地利用动态变化的研究方法及其在海南岛的应用[J].地理研究,2001,20(6):723-730,774. [Zhao J, Wei C J, Huang L F. Research methods of land use changes and their applications in Hainan Island [J]. Geographical Research, 2001,20(6):723-730,774.]
- [18] 李丽娟,杨俊伟,姜德娟,等. 20世纪90年代无定河流域土地利用的时空变化[J].地理研究,2005,24(4):527-534,656. [Li L J, Yang J W, Jiang D J, et al. GIS based study on spatial temporal changes of land use in Wuding River Basin in the 1990s[J]. Geographical Research, 2005,24(4):527-534,656.]
- [19] 冯昕,杜世宏,张方利,等.基于多尺度融合的高分辨率影像城市用地分类[J].地理与地理信息科学,2013,29(3):43-47,127. [Feng X, Du S H, Zhang F L. Urban land classification of high resolution images based on multi-scale fusion[J]. Geography and Geo-Information Science, 2013,29(3):43-47,127.]
- [20] Benz U C, Hofmann P, Willhauck G, et al. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2003,58(3):239-258.
- [21] Walker J, Blaschke T. Object-based land-cover classification for the Phoenix metropolitan area: optimization vs. transportability[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008,29(7):2021-2040.
- [22] 王蕾,杨武年,任金铜,等. GF-2影像面向对象典型城区地物提取方法[J].测绘通报,2018(1):138-142. [Wang L, Yang W N, Ren J T, et al. Object-oriented extraction method of typical urban features based on GF-2 images[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(1):138-142.]
- [23] Tian J, Chen D M. Optimization in multi-scale segmentation of high-resolution satellite images for artificial feature recognition[J]. International Journal of Remote Sensing, 2007,28(20):4625-4644.
- [24] 陈斌,王宏志,李仁东.不同等级土壤遥感分类的尺度匹配性探讨[J].湖北大学学报(自然科学版),2018,40(4):429-436. [Chen B, Wang H Z, Li R D. The discussion of scale matching of different types of soil remote sensing classification[J]. Journal of Hubei University(Natural Science), 2018,40(4):429-436.]
- [25] 姚国红,张锦,王励.面向对象的高分辨率遥感影像地理要素提取[J].测绘科学,2012,37(6):53-55,61. [Yao G H, Zhang J, Wang L. Object-oriented feature extraction utilizing high resolution remote sensing imagery[J]. Science of Surveying and Mapping, 2012,37(6):53-55,61.]
- [26] Zhao Q M, Molenaar M, Tempfli K, et al. Quality assessment for geo-spatial objects derived from remotely sensed data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2005,26(14):2953-2974.