

DOI:10.12171/j.1000-1522.20210261

基于高空间分辨率时间序列影像的对象级 侵占林地地图斑快速检测

刘晓双^{1,2} 李才文^{1,2} 赵义兵^{1,2}

(1. 国家林业和草原局西北调查规划院, 陕西 西安 710048; 2. 旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要:【目的】为掌握森林资源动态变化情况,及时、快速、准确地发现侵占林地地块,并解决主流遥感变化检测方法对数据源和时相一致性要求高、人工干预多、过程繁琐等应用瓶颈,采用一种基于高空间分辨率时间序列影像的多尺度对象级分割和变化提取方法,对主流方法的分类和检测两个过程进行了融合和简化。【方法】以陕西省白水 County 为研究区,采用 GF-1 和 ZY-3 卫星数据源,将前后两期遥感影像波段拆分和重组形成时间序列影像,对时间序列影像进行多尺度面向对象的分割,通过分割结果的光谱变化值统计学抽样判断临界点并制定提取阈值,再利用 NDVI 变化值对结果进行优化。【结果】以人工目视解译结果作为参照,该方法的检测精度达 86.2%。在成功检出的侵占林地地图斑中,形状吻合较好或基本吻合的图斑占 48.8%。【结论】该方法能够实现侵占林地地图斑的快速检测,在检测效率、精度和适应性方面可满足大范围、多时相、混合数据源森林资源监测工作的实际应用需要。

关键词: 变化检测; 面向对象; 时间序列影像; NDVI; 林地地图斑

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2022)11-0060-10

引文格式: 刘晓双, 李才文, 赵义兵. 基于高空间分辨率时间序列影像的对象级侵占林地地图斑快速检测 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(11): 60-69. Liu Xiaoshuang, Li Caiwen, Zhao Yibing. Rapid detection of object-level invaded forest map patch based on high spatial resolution time series image [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(11): 60-69.

Rapid detection of object-level invaded forest map patch based on high spatial resolution time series image

Liu Xiaoshuang^{1,2} Li Caiwen^{1,2} Zhao Yibing^{1,2}

(1. Northwest Surveying and Planning Institute of National Forestry and Grassland Administration, Xi'an 710048, Shaanxi, China;

2. Key Laboratory of National Forestry Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

Abstract: [Objective] In order to know the dynamic changes of forest resources, detect the infringement of forest land promptly, quickly and accurately, and solve the application bottlenecks of mainstream remote sensing change detection methods such as high requirements of consistency for data source and data time, too much manual interventions and complicated process, this research used a multi-scale object-level segmentation and change extraction method based on high spatial resolution time-series images to merge and simplify the two processes of classification and detection in mainstream methods. [Method] Taking Baishui County in Shaanxi Province of northwestern China as the research area, using GF-1 and ZY-3 satellite data sources, the two remote sensing image bands were split and reorganized to form the time-series image, and the time-series image was segmented in a multi-scale object-oriented manner. The spectral change value of

收稿日期: 2021-07-14 修回日期: 2022-10-16

基金项目: 国家林草局自主研发项目计划(2020-LC-1-08)。

第一作者: 刘晓双, 高级工程师。主要研究方向: 森林资源监测。Email: 148442221@qq.com 地址: 710048 陕西省西安市碑林区金花南路 156 号国家林业和草原局西北调查规划院。

责任作者: 李才文, 高级工程师。主要研究方向: 森林资源监测。Email: 442409249@qq.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

the segmentation result was statistically sampled to determine the critical point and establish the extraction threshold, and then the NDVI change value was used to optimize the result. [Result] Taking the results of manual visual interpretation as a reference, the detection accuracy of this method was 86.2%. Among the classes that successfully detected invading forests, classes with good or almost consistent shapes accounted for 48.8%. [Conclusion] This method can realize the rapid detection of invaded forest classes, and can meet the practical application needs of large-scale, multi-temporal, and mixed image data source forest resource monitoring in terms of detection efficiency, accuracy and adaptability.

Key words: change detection; object-oriented; time series image; NDVI; woodland patch

经过近 10 年的探索,我国使用遥感技术进行森林资源监测逐步由试点走向了全面应用^[1-2]。目前全国范围的森林资源监测工作通过每年一次高空间分辨率遥感影像全覆盖,已经可以实现对森林资源的全面摸底和年度更新^[3]。及时发现破坏森林资源的行为是森林资源监测工作的重点之一,但侵占林地地块的提取仍然以人工目视解译为主,工作效率低,难以满足全国性森林资源监测的需要。为适应大范围、多数据源、混合时相遥感影像的森林资源监测工作,有必要探索一种高效、自动化、适应性强的侵占林地地图斑遥感快速检测方法。

目前遥感自动变化检测方法针对遥感影像的光谱、时间、空间分辨率特征和行业应用需求差异,发展出了多样的研究方法和理论模型,如像素级检测^[4-8]、面向对象检测^[9-12]、半监督和非监督变化检测^[13-16]、场景变化检测^[17-18]、三维变化检测^[19-22]、多时相检测^[23-27]等。而对于高空间分辨率遥感影像,受制于配准精度低、数据量大、光谱分辨率低等客观条件,变化提取难度较大。已有大量研究表明^[28-32],针对高空间分辨率遥感影像,对象级检测在信噪比、效率、精度等方面显著优于像素级检测,具有广泛的应用空间。目前主流的对象级检测方法以分类后比较法居多^[33-34],发展出了不同的应用方法和应用领域。如吴田军等^[35]利用对象级分类后比较的变化检测,实现了广东东莞市 5 年的土地覆盖变化分析。王崇阳等^[36]、史忠奎等^[37]等应用基于随机森林的分类后比较法,在森林覆被变化和新增建筑物提取方面取得了较好的应用效果。陈雪等^[38]探索了基于贝叶斯网络分类算法的分类后比较变化检测。综上,分类后比较法在变化类型全面性角度具有明显优势,但也存在一些应用瓶颈:一是分类误差的累积效应不可避免^[39]。前后两期分类误差均会不可避免地传导至后续变化检测过程中,造成双重误差。二是建立训练样本过程繁琐。由于分类精度对优质样本的严重依赖性^[40-41],为保证训练样本的纯粹,对同一地物往往需要分不同数据源、不同物候特征单独建立训练样本。三是特征参

数的适应性弱。特征参数及其隶属度只适用于单数据源、相似时相甚至特定区域,不具有普适性。四是检测精度难以控制^[42]。需要耗费大量时间用于优化两次分类精度,并且优化过程不具有可复制性,每做一次分类需要根据影像特征重新调整样本和制定隶属度判定规则。

本研究将主流对象级检测方法中分类和检测两个独立的过程进行融合和简化,采用基于高空间分辨率时间序列影像的对象级检测方法,将前后两期影像的光谱特征和变化差异特征融合在一幅影像中,避免了繁琐的分类过程及其附带的分类样本、特征参数、误差累积等问题,通过一次分割、一次提取即可快速得到变化区域。首先将前后两期影像进行波段拆分和重组,选取近红外、红、绿波段,融合成一幅兼具前后两期光谱特征的 6 波段时间序列影像。然后对时间序列影像执行面向对象的多尺度分割,以分割形成的对象为统计单元,计算每个对象中近红外、红、绿波段光谱统计值,根据光谱统计值的分布曲线,判断光谱变化临界点制定阈值,提取侵占林地地图斑。最后引入归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)对提取结果进行优化。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

选取陕西省白水縣为研究区,主要考虑 3 方面因素:一是自然地理环境应尽可能多地涵盖不同地貌特征,使试验条件具备全面性;二是应选择地物类别复杂、易混淆的地区,如林农交错区,具有一定的变化检测难度;三是在两期遥感影像拍摄时间间隔期侵占林地现象较多,使遥感影像变化提取具备充分的现实条件。

白水县位于陕西省东北部(109°16'~109°45'E, 35°04'~35°27'N),处于黄土高原沟壑区,是关中平原与陕北高原的过渡地带,沟壑纵横、地形破碎。全县总面积 986.6 km²,林地面积 412.6 km²。地势西北高东南低,地貌类型复杂,分为基岩中、低山区、山

前洪积扇裙、黄土原和河谷阶地 5 种类型。境内林地和农田交错分布,林农插花现象比较普遍。白水基础设施发展迅速,西延、蒲白、黄韩侯铁路横贯,榆蓝、荷凤高速穿境而过,G342、渭清公路、白洛公路、白宜公路、白澄公路、白铜公路纵横交错,且规划有渭南—黄陵城际铁路并设白水东站。县内城市建设日新月异,城市道路、生态区、住宅区、商贸

区、工业园区、旅游区等项目发展迅速。

1.2 数据来源及预处理

选取了覆盖白水县全域的 2018 年和 2019 年 2 个年度 2 m 级高空间分辨率遥感影像。受影像云量的影响,采用多景、多源拼接获取影像,影像时相涉及 4—10 月之间的不同月份,数据源涉及高分一号和资源三号 2 种。遥感影像具体信息见表 1。

表 1 遥感数据情况

Tab. 1 Remote sensing data situation

时段 Period	数据源 Data source	全色分辨率 Panchromatic resolution/m	多光谱分辨率 Multi-spectral resolution/m	轨道号 Track No.	拍摄日期 Shooting date
前期影像(2018年) Pre-image (year of 2018)	高分一号 GF-1	2.0	8.0	E109.8N35.5	2018-06-11
				E109.7N35.2	2018-06-11
				E109.4N35.2	2018-06-23
				E109.2N35.3	2018-07-05
				E110.1N35.2	2018-09-08
				E109.4N35.8	2018-10-15
后期影像(2019年) Post-image (year of 2019)	资源三号 ZY-3	2.1	5.8	034839_015136	2018-04-18
	高分一号 GF-1	2.0	8.0	E109.4N35.2	2019-07-30
				E109.8N35.2	2019-08-15

本研究的遥感影像预处理过程依次包括:正射校正、融合、镶嵌、裁剪。首先对多光谱数据和全色数据分别正射校正,中误差控制在 1 像元以内。再进行多光谱与全色的融合,生成高分辨率多通道影

像。然后对同期多景遥感影像进行镶嵌并经重采样统一分辨率为 2 m,形成覆盖县域范围的整幅影像。最后进行行政范围的裁剪,形成以白水县县界为边界范围的前后两期遥感影像,见图 1。

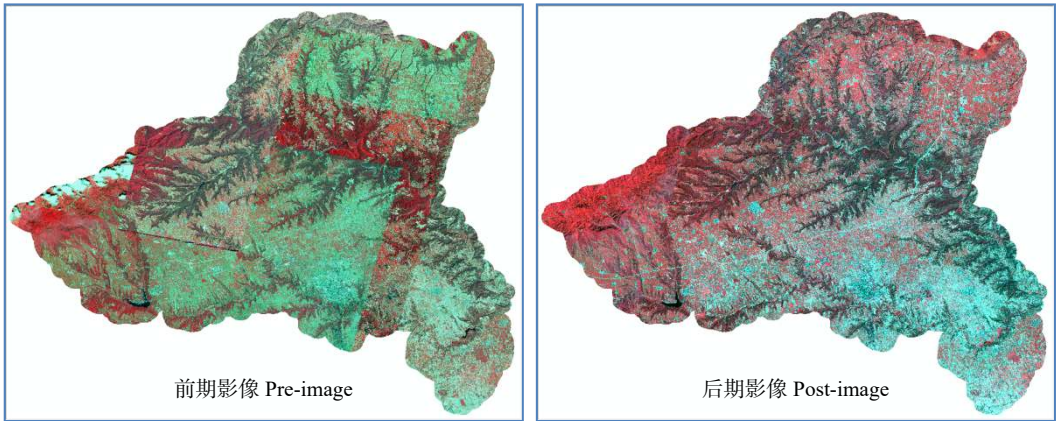


图 1 白水县前期、后期遥感影像预处理结果

Fig. 1 Preprocessing results of remote sensing images in Baishui County

2 研究方法

2.1 时间序列影像融合

为简化主流方法中对前后两期影像分别分类的流程,本研究将前后期影像进行波段拆分重组,融合为一幅多波段时间序列影像。多波段时间序列影像在更高的维度上诠释了地物特征,不光具有空间维度,还融入了时间维度,将两期影像的变化信息也融

入到了空间分布中,使静态的空间分布信息渗透了动态变化特征。

首先将前后两期影像的各个波段进行拆分,分别挑选前后两期影像的近红外、红、绿 3 个波段,进行波段重组。选择近红外、红、绿 3 个波段,是由于这 3 个波段可以有效诠释植被特征,对植被变化的反映较为敏感。通过波段重组,将前后两期影像整合为一幅兼具前后两期遥感影像特征的时间序列影

像, 合成后的时间序列影像包含 6 个波段, 各波段的排列方式和具体信息见表 2。

表 2 时间序列影像各波段信息

Tab. 2 Information of each band of time series image

波段序号 Band No.	时段 Period	波段名 Band name	波长范围 Wavelength range/nm
1	前期影像 Pre-image	近红外波段 Near infrared band	770 ~ 890
2	前期影像 Pre-image	红波段 Red band	630 ~ 690
3	前期影像 Pre-image	绿波段 Green band	520 ~ 590
4	后期影像 Post-image	近红外波段 Near infrared band	770 ~ 890
5	后期影像 Post-image	红波段 Red band	630 ~ 690
6	后期影像 Post-image	绿波段 Green band	520 ~ 590

2.2 多尺度面向对象分割

分割是将影像中的单个像元聚类为对象的过程, 为后续对象级分析和提取奠定重要的物质基础^[43]。本研究采用简译 V7.0 软件对 6 波段时间序列影像进行多尺度面向对象的分割。其算法的基本思想是基于区域生长原理, 进行自底向上区域生长聚类: 首先以单一像元作为起始, 分别与相邻像元进行光谱差异性度量, 对差异小的进行合并。当整副影像合并完成, 再以合并生成的对象为单位开始新一轮差异度合并, 差异度由对象的形状异质性和光谱异质性共同定义, 二者加权为 1。如此循环往复执行合并, 直到在规定差异度范围已无法进行对象合并为止。这种基于区域生长原理的聚类思想, 摆脱了“像元”这个单一尺度的束缚, 将地物放在其适宜的不同尺度上分析, 更符合人脑的认知习惯。

2.3 对象特征选取和阈值制定

2.3.1 光谱特征

侵占林地在遥感影像上最直观的特点是光谱亮度值的变化。工程建设或其他人为干扰造成林木和植被灭失, 植被对光谱的吸收作用也会随之消失, 导致光谱反射率大幅增强, 影像亮度值会经历由低到高的显著改变, 这种改变是变化检测最重要的切入点。

令 ΔS 为某对象后期影像光谱亮度的增加值; R 、 N 、 G 分别为红光、近红外、绿光波段的光谱亮度值; i 为该对象中的一个像元; n 为该对象中像元总个数。下标 post、pre 分别代表后期(2019 年)、前期(2018 年)。则光谱亮度增加值 ΔS 表示为:

$$\Delta S = \frac{\sum_{i=1}^n [(R_{\text{post}} + N_{\text{post}} + G_{\text{post}}) - (R_{\text{pre}} + N_{\text{pre}} + G_{\text{pre}})]}{n} \quad (1)$$

光谱亮度增加值 ΔS 反映了对象后期影像相对于前期影像光谱亮度值的增加幅度。 ΔS 为正值表明光谱亮度值正增长, 即光谱亮度增加; ΔS 为负值表明光谱亮度值负增长, 即光谱亮度减少。 ΔS 的绝对值越大, 表明该对象在前后期影像时间区间内发生地类改变的概率越大。

2.3.2 植被特征

很多研究已表明 NDVI 对植被变化有较强的敏感性, 是区分植被和非植被最简单有效的特征值。选取前后期遥感影像的 NDVI 变化值对植被特征的变化情况进行量化描述, 作为林地是否变化的另一个有力的判断依据。

令 S_{NDVI} 为某对象的 NDVI 变化值; R 、 N 分别为红光、近红外波段的亮度值; 则:

$$S_{\text{NDVI}} = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{R_{\text{post}} - N_{\text{post}}}{R_{\text{post}} + N_{\text{post}}} \right) - \left(\frac{R_{\text{pre}} - N_{\text{pre}}}{R_{\text{pre}} + N_{\text{pre}}} \right) \right] \quad (2)$$

S_{NDVI} 反映了对象前后期影像 NDVI 的变化幅度。 S_{NDVI} 的绝对值越大, 表明该对象在前后期影像时间区间内植被变化的概率越大。

2.3.3 阈值制定

阈值制定是将影像“二值化”^[44]的过程, 将影像分为变化和未变化两个灰度级, 是变化信息提取的核心过程。目前变化阈值大多是通过人机交互选择经验性数值来确定的, 需要反复试验和调整, 对操作人员的经验要求较高, 主观性较大。本研究采用算数运算法计算对象的光谱亮度变化值, 对光谱亮度变化值的分布规律进行分析, 寻找变化临界点作为阈值, 减少了人工反复试验的工作量, 同时避免了主观判断的盲目性。

用公式(1)计算出所有对象的光谱亮度增加值, 光谱亮度增加值越大的对象, 其发生人为开发活动破坏林地的可能性越大。由于人为开发活动不同于缓慢的、渐变的自然演替过程, 是破坏性的、突变的变化过程, 在光谱亮度增加值的分布上应呈现骤变的趋势, 因此只要找到光谱亮度增加值分布趋势线上骤变趋势发生的临界点, 即可视作判断林地是否发生破坏性变化的分界点。

利用等距离抽样寻找临界点作为变化检测阈值。首先将所有对象的光谱亮度增加值按从小到大的顺序排序并编号。令 x 为序号, $f(x)$ 为序号 x 对应的光谱亮度增加值。将排序后的所有对象等距分为 n 个区间段, 每个区间段等距取一个序号 x , x_i 为等距抽取的第 i 个 x , 因此抽取了 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 共 n 个 x 。

$f(x_i)$ 为等距抽取的第 i 个 x 对应的光谱亮度变化值, 令 $F(x_i, x_{i+1})$ 为相邻两个抽样点光谱亮度增

加值的差异, t 为阈值, 则

$$F(x_i, x_{i+1}) = f(x_{i+1}) - f(x_i) \quad (3)$$

$$t = \max[F(x_i, x_{i+1})] \quad (4)$$

3 结果与分析

3.1 分割结果评价

运用控制变量法调节分割参数, 进行不同尺度分割试验(图2), 最终确定颜色参数采用 0.7、平滑度参数采用 0.5、最大尺度参数采用 50。上述分割参数可适用于同等分辨率级别的其他遥感影像。采用上述参数执行多尺度面向对象的分割, 最终形成 291 117 个对象。对分割结果的评价通常要求同一地物尽可能少地出现欠分割和过分割现象。本研究采用时间序列影像作为分割对象, 分割结果兼具空间异质性和时间异质性, 因此对分割结果的评价需要着重关注变化区域能否作为一个或多个独立的对象与其他对象区分开来, 并且又不会过度分割即破碎

化。取该县 2018—2019 年期间 20 个建设项目的使用林地审批矢量化界线作为已知变化区域进行对照, 从欠分割和过分割 2 个角度对分割结果进行评价。欠分割的判断方法是, 变化区域能作为 1 个或多个独立对象与其他对象分割开则记为“否”, 反之记为“是”。过分割的判断方法是, 比较变化区域中对象的平均面积与所有对象的平均面积, $(\text{变化区域对象平均面积}/\text{所有对象的平均面积}) < 80\%$ 则记为“是”, 反之记为“否”。结果显示 20 个已知变化区域均不存在欠分割和过分割现象。

图3为其中一个已知变化区域的分割结果。前后期影像的变化区域(黄色区域)被分割为 11 块影像对象, 变化区域与非变化区域的分割界线清晰准确, 又不会过分破碎化。

3.2 阈值确定

用式(1)计算出 358 491 个对象的光谱亮度增加值, 并按从小到大的顺序排序并编号。进行等距抽

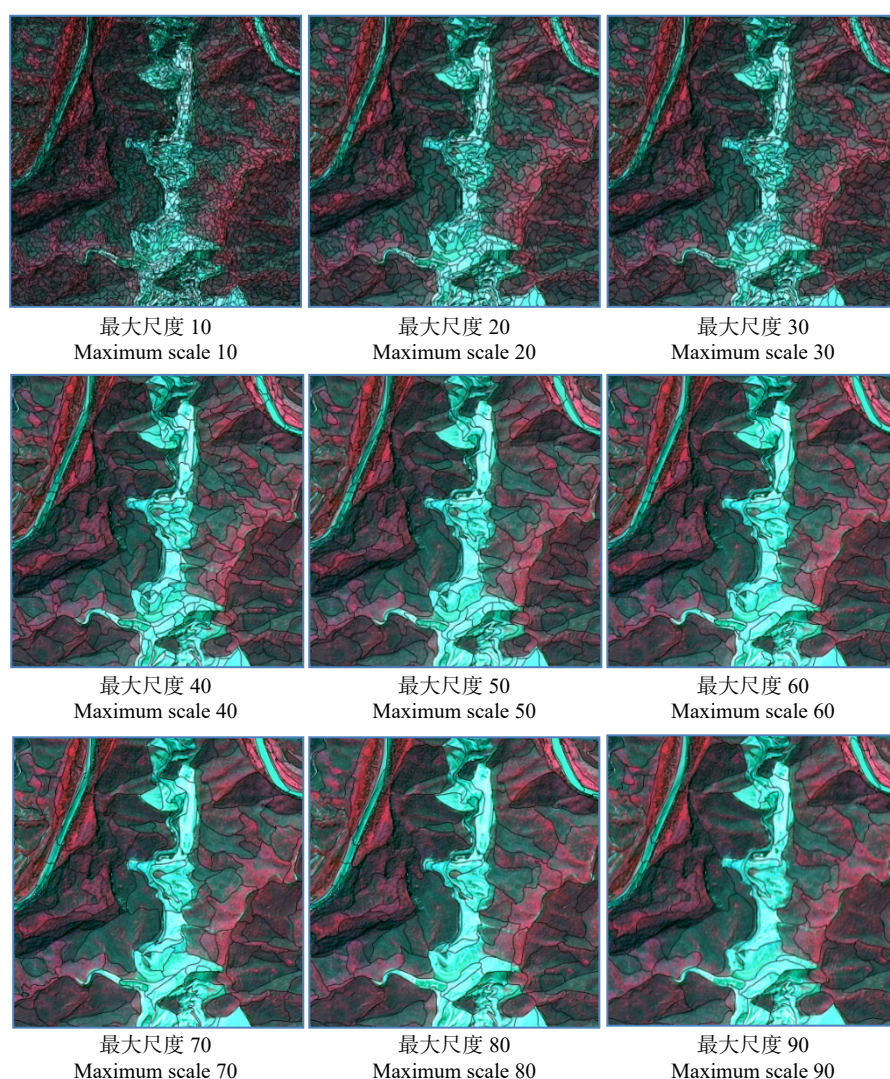


图2 不同最大尺度的分割试验效果

Fig. 2 Experimental results of segmentation at different maximum scales

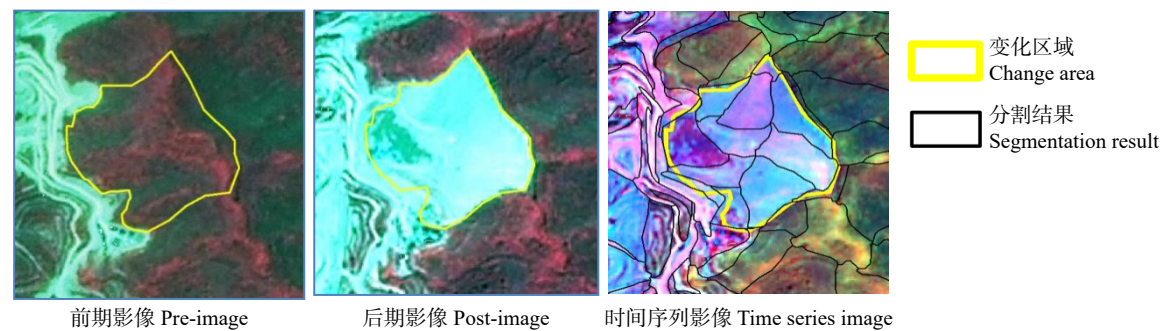


图 3 已知变化区域的分割结果

Fig. 3 Segmentation result of known change area

样时, x 的取值范围为 $[1, 358\ 491]$, n 取 100, 则每隔 3 585 抽取一个 $f(x)$ 。按式(3)、式(4)计算得到阈值 t 为 215, 取 $\Delta S \geq 215$ 作为变化检测阈值(图 4)。

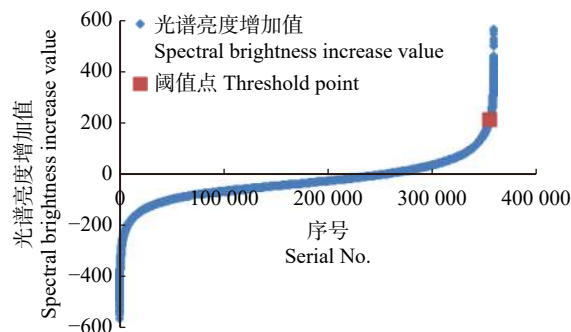


图 4 对象光谱亮度增加值曲线

Fig. 4 Curve of spectral brightness increase of object

利用 NDVI 的变化对提取结果进行进一步优化。由于提取目标是林地的逆向变化, 其直观表现是植被的破坏或灭失, 会造成 NDVI 的减小, 因此采

用 NDVI 变化值对提取结果进行过滤, 保留提取结果中 NDVI 减少的图斑, 排除 NDVI 增加和 NDVI 变化不大的图斑, 取 $S_{\text{NDVI}} < 0$ 作为提取阈值。

3.3 变化检测结果

用人工目视判读结果对本方法产生的变化检测结果进行评价, 从命中率和吻合度两方面检验本方法与人工目视判读的差异程度, 评价其在多大程度上可接近人工目视判读。人工目视判读按照《森林督查暨森林资源管理“一张图”年度更新技术规定》的要求, 在 1:10 000 比例尺下, 人工勾绘图斑与影像同名地物的偏移不得大于图上 0.5 mm。同时为避免遗漏, 采用一人判读一人补充的方式。

命中率即为生产者精度, 表示人工判读图斑中有多少能被自动检测出, 其反映了自动检测能否检出应检的图斑, 同时从相反的方面反映了自动检测产生遗漏的程度。本方法共检出 125 个人工判读图斑, 命中率达 86.2%, 漏检率为 13.8%, 具体见表 3。

表 3 变化检测 results 和精度评价

Tab. 3 Change detection results and accuracy evaluation

检测方法 Detection method	检测结果 Detection result	自动检测 Automatic detection		合计 Total	评价结果 Evaluation result	
		检出 Checked	未检出 Undetected		命中率(生产者精度) Correct rate (producer accuracy)	遗漏率 Omission rate
人工判读 Manual interpretation	检出 Checked	125	20	145	86.2%	13.8%
	未检出 Undetected	68				

对检出的 125 个图斑进行吻合度评价, 比较自动检测和人工判读在形状上的差异程度。吻合度需要引入面积差异度和位置偏离度 2 个指标来评价。面积差异度为自动检测与人工判读图斑面积之差的绝对值占人工判读图斑面积的比例; 位置偏离度为人工判读图斑与自动检测图斑二者几何中心的距离占人工判读图斑几何半径的比例。

将面积差异度和位置偏离度 2 个指标按各 50% 加权得到吻合度综合评价指标。然后按吻合较好、基本吻合、吻合一般和吻合较差 4 个等次分别制

定取值区间并统计各等次图斑个数, 见表 4。结果表明, 检出的 125 个图斑中, 综合评价结果为吻合较好或基本吻合的图斑共计 61 个, 占 48.8%。图 5 在综合评价结果的 4 个等次中分别挑选了一个图斑进行自动检测和人工判读的吻合度差异对比。

4 结论与讨论

为实现侵占林地图斑的快速检测, 本研究以陕西省白水县为研究区, 采用 ZY-3 和 GF-1 两种高空间分辨率遥感影像, 发展了一种基于时间序列影像

表 4 吻合度评价标准和评价结果

Tab. 4 Evaluation standard and evaluation results of coincidence degree

评价等次 Evaluation grade	面积差异度 Area difference		位置偏离度 Position deviation		综合评价 Comprehensive evaluation	
	标准 Standard	个数 Number	标准 Standard	个数 Number	标准 Standard	个数 Number
吻合较好 Good coincidence	(0, 10%]	33	(0, 10%]	35	(0, 10%]	33
基本吻合 Basically coincide	(10%, 20%]	25	(10%, 20%]	30	(10%, 20%]	28
一般吻合 Generally coincide	(20%, 40%]	23	(20%, 40%]	26	(20%, 40%]	21
吻合较差 Poor coincidence	(40%, 1]	44	(40%, 1]	34	(40%, 1]	43

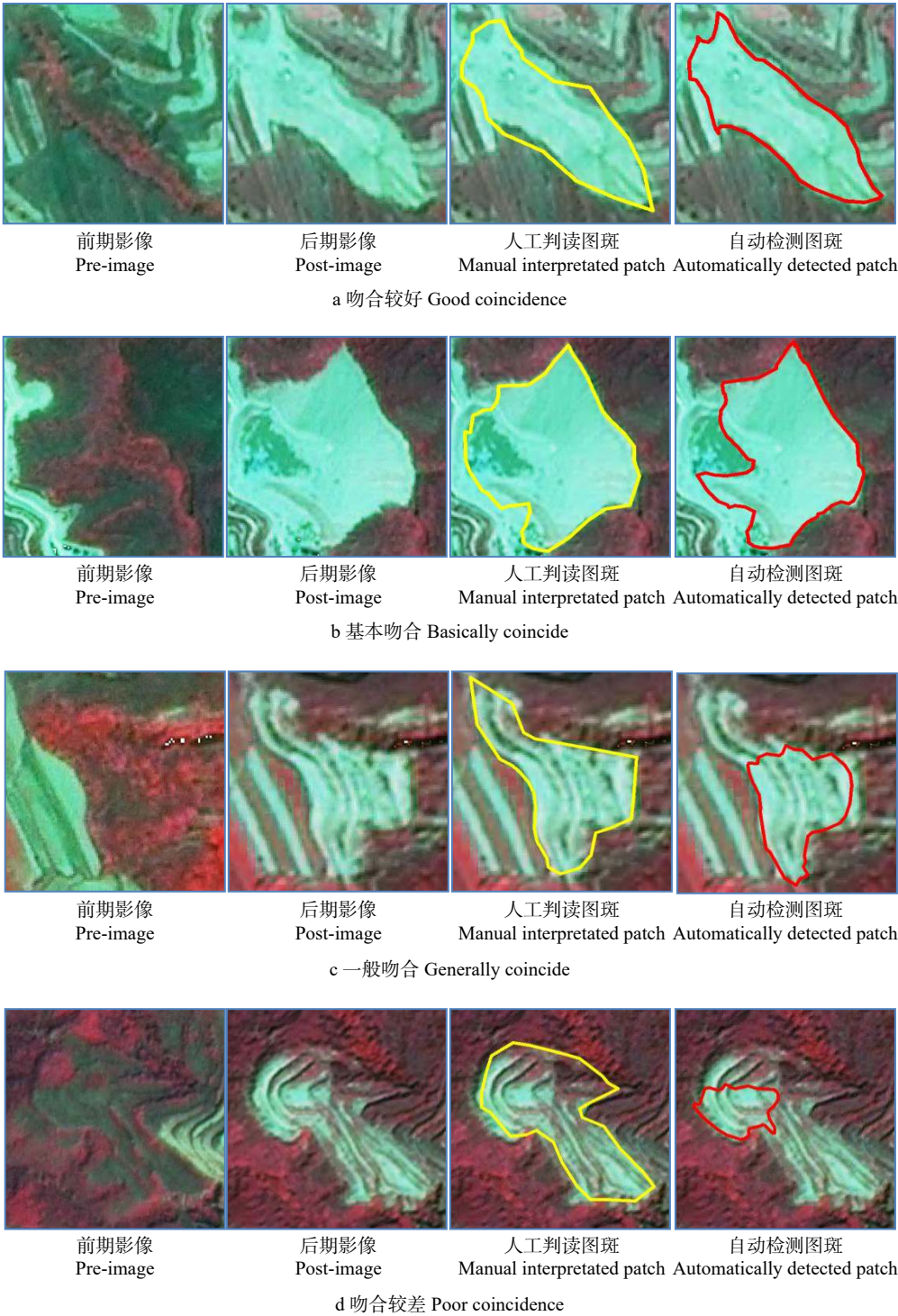


图 5 不同吻合度等次的自动检测效果

Fig. 5 Automatic detection effect of different degree of coincidence

的多尺度对象级分割和变化提取方法,并验证该方法的有效性。

本方法的核心在于对时间序列影像进行分割并提取,与分类后比较法相比,在如下方面体现出了其优越性:一,将不同时相的波段以相互叠加的形式融入影像,使时间异质性在空间域得以呈现,从信息含量和信息维度两方面拓展了待分割影像的内涵。二,时间序列影像最大程度地抑制了背景,增强了变化区域,可在有效分割地物的同时将变化区域作为独立的对象分割出来。三,对时间序列影像进行分割,可以避免对两期影像分别分割带来的无效信息激增和无变化区域的重复分割,从而消除了冗余,避免了检测结果破碎化。四,通过将两期影像划入同一个分割体系中,充分利用面向对象方法的优势,将两期空间配准误差消化在分割环节中,有效避免了配准误差造成的伪变化。

从应用效果来说,本方法采用基于时间序列影像的多尺度对象级检测,应用于高空间分辨率、大范围、多时相、混合数据源遥感影像具有较好的适应性。与主流的分类后比较法相比,本方法由于直接聚焦于变化区域的识别,避免了对前后两期影像分别分类的繁琐过程,无需进行训练样本和特征参数的反复调试,能够快速、高效地得到检测结果,在检测效率方面具有明显优势。同时,本方法提出了利用等距抽样确定光谱变化临界点制定阈值,相对于过程不可重复、知识不能有效积累的样本筛选和特征参数调试过程,本方法的检测结果不依赖于操作人员的主观经验判断,可做到标准统一、结果一致,适用于大范围的森林资源监测工作。

但本方法也存在一些局限性,首先,本方法仅适用于简单变化类型的提取,对于多种地类之间的复杂转化,仍需要依靠精细化分类来实现。其次,本方法对光谱变化明显的地物转化过程较敏感,而对于植被长势变化、植被演替这种缓慢而微弱的变化过程无法有效检测。第三,本方法的侧重点在于变化区域的识别,而对区分变化区域的具体变化类型方面仍显不足。针对上述局限性,在以后的研究中,应着重在变化类型的进一步细分方面寻找突破。本研究中,变化图斑的提取过程是基于面向对象的分割结果进行的,这为后续深入挖掘形状、纹理、相邻关系等特征奠定了研究基础。在下一步的研究中,需要将形状、纹理、相邻关系等作为切入点,从特征筛选、特征表达和特征提取方面进行研究,并在检测结果的进一步细分中加以应用,以期获得更精细化的提取结果,实现不同地物变化类型的自动区分。另外,有必要探索深度学习算法在变化信息提取方面

的应用,用机器学习替代人工解译将是未来人工智能时代变化检测领域的前沿研究方向。

参 考 文 献

- [1] 闫宏伟, 黄国胜, 曾伟生, 等. 全国森林资源一体化监测体系建设的思考[J]. 林业资源管理, 2011(6): 6–11.
Yan H W, Huang G S, Zeng W S, et al. Considerations on construction of the integrated forest resource monitoring system in China[J]. Forest Resources Management, 2011(6): 6–11.
- [2] 武红敢, 常原飞, 石木耀. 森林灾害的高分遥感辅助调查技术体系研究[J]. 林业资源管理, 2014(5): 43–50.
Wu H G, Chang Y F, Shi M Y. Study on technical system of forest disaster investigation aided by high spatial resolution remote sensing technology[J]. Forest Resources Management, 2014(5): 43–50.
- [3] 张煜星, 王雪军, 黄国胜, 等. 森林面积多阶遥感监测方法[J]. 林业科学, 2017, 53(7): 94–104.
Zhang Y X, Wang X J, Huang G S, et al. Forest area remote sensing monitoring using the multi-level sampling interpretation approach[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2017, 53(7): 94–104.
- [4] Hasanlou M, Seydi S T, Shah-Hosseini R. A sub-pixel multiple change detection approach for hyperspectral imagery[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2018, 44(6): 601–615.
- [5] Rokni K, Ahmad A, Solaimani K, et al. A new approach for surface water change detection: integration of pixel level image fusion and image classification techniques[J]. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 2015, 34(1): 226–234.
- [6] 马娜, 胡云锋, 庄大方, 等. 基于遥感和像元二分模型的内蒙古正蓝旗植被覆盖度格局和动态变化[J]. 地理科学, 2012, 32(2): 251–256.
Ma N, Hu Y F, Zhuang D F, et al. Vegetation coverage distribution and its changes in Plan Blue Banner based on remote sensing data and dimidiated pixel model[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(2): 251–256.
- [7] 高敏, 王肖霞, 杨风暴, 等. 面向 SAR 图像像素级变化检测的去模糊化处理方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(22): 277–283.
Gao M, Wang X X, Yang F B, et al. Deblurring processing method for pixel level change detection of SAR images[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(22): 277–283.
- [8] 张学, 童小华, 刘妙龙. 一种扩展的土地覆盖转换像元变化检测方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(5): 685–689.
Zhang X, Tong X H, Liu M L. An extended detection method for land cover transformation[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(5): 685–689.
- [9] Ardila J P, Bijker W, Tolpekin VA, et al. Multitemporal change detection of urban trees using localized region-based active contours in VHR images[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 124: 413–426.
- [10] Santosh C, Krishnaiah C, Praveen G D. Land use/land cover and change detection in Chikodi Taluk, Belagavi District, Karnataka

- using object based image classification[J]. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2019, 9(1): 1522–1527.
- [11] 赵敏, 赵银娣. 面向对象的多特征分级 CVA 遥感影像变化检测[J]. *遥感学报*, 2018, 22(1): 119–131.
- Zhao M, Zhao Y D. Object-oriented and multi-feature hierarchical change detection based on CVA for high-resolution remote sensing imagery[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(1): 119–131.
- [12] 李春干, 梁文海. 基于面向对象变化向量分析法的遥感影像森林变化检测[J]. *国土资源遥感*, 2017, 29(3): 77–84.
- Li C G, Liang W H. Forest change detection using remote sensing image based on object-oriented change vector analysis[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2017, 29(3): 77–84.
- [13] Volpi M, Tuia D, Bovolo F, et al. Supervised change detection in VHR images using contextual information and support vector machines[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 20(1): 77–85.
- [14] He P F, Zhao X W, Shi Y L, et al. Unsupervised change detection from remotely sensed images based on multi-scale saliency coarse-to-fine fusion[J/OL]. *Remote Sensing*, 2021, 13(4): 630 [2021–12–20]. <https://doi.org/10.3390/rs13040630>.
- [15] 庄会富, 邓喀中, 范洪冬. 纹理特征向量与最大化熵法相结合的 SAR 影像非监督变化检测[J]. *测绘学报*, 2016, 45(3): 339–346.
- Zhuang H F, Deng K Z, Fan H D. SAR images unsupervised change detection based on combination of texture feature vector with maximum entropy principle[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(3): 339–346.
- [16] 谢福鼎, 赫佳妮, 郑宏亮. 半监督离散势理论在遥感影像变化检测中的应用[J]. *测绘通报*, 2019(8): 54–58.
- Xie F D, He J N, Zheng H L. Application of semi-supervised discrete potential theory in remote sensing image change detection[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019(8): 54–58.
- [17] 张涵, 秦昆, 毕奇, 等. 注意力引导的三维卷积网络用于遥感场景变化检测[J]. *应用科学学报*, 2021, 39(2): 272–280.
- Zhang H, Qin K, Bi Q, et al. Attention guided 3D Conv Net for aerial scene change detection[J]. *Journal of Applied Sciences-Electronics and Information Engineering*, 2021, 39(2): 272–280.
- [18] 华夏, 王新晴, 王东, 等. 基于改进 SSD 的交通大场景多目标检测[J]. *光学学报*, 2018, 38(12): 221–231.
- Hua X, Wang X Q, Wang D, et al. Multi-objective detection of traffic scenes based on improved SSD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 221–231.
- [19] Mahmoudi F T, Hosseini S. Three-dimensional building change detection using object-based image analysis (case study: Tehran)[J]. *Applied Geomatics*, 2021(prepublish): 1–8.
- [20] Nagarajan, Khamaru, Witt D. UAS based 3D shoreline change detection of jupiter inlet lighthouse ONA after hurricane irma[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(24): 9140–9158.
- [21] 彭代锋, 张永军, 熊小东. 结合 LiDAR 点云和航空影像的建筑物三维变化检测[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2015, 40(4): 462–468.
- Peng D F, Zhang Y J, Xiong X D. 3D building change detection by combining LiDAR point clouds and aerial imagery[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(4): 462–468.
- [22] 李畅, 王欢, 李奇, 等. GIS 数据辅助灾区影像平面扫描密集匹配及其三维变化检测[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2014, 39(3): 295–299.
- Li C, Wang H, Li Q, et al. Multi-view plane sweep dense image matching and 3D change detection of geological disasters from remotely sensed stereo pairs with GIS-aided data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(3): 295–299.
- [23] Islam K, Jashimuddin M, Nath B, et al. Land use classification and change detection by using multi-temporal remotely sensed imagery: the case of Chunati wildlife sanctuary, Bangladesh[J]. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 2018, 21(1): 37–47.
- [24] Du P J, Liu S C, Xia J S. Information fusion techniques for change detection from multi-temporal remote sensing images[J]. *Information Fusion*, 2013, 14(1): 19–27.
- [25] 黄亮. 多时相遥感影像变化检测技术研究[J]. *测绘学报*, 2020, 49(6): 801.
- Huang L. Research on change detection technology in multi-temporal remote sensing images[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(6): 801.
- [26] 杜培军, 王欣, 蒙亚平, 等. 面向地理国情监测的变化检测与地表覆盖信息更新方法[J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(4): 857–866.
- Du P J, Wang X, Meng Y P, et al. Effective change detection approaches for geographic national condition monitoring and land cover map updating[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2020, 22(4): 857–866.
- [27] 赵金奇. 多时相极化 SAR 影像变化检测方法研究[J]. *测绘学报*, 2019, 48(4): 536.
- Zhao J Q. Research on change detection method in multi-temporal polarimetric SAR imagery[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(4): 536.
- [28] Philipp G, Michael F, Alishir K, et al. Object based change detection of Central Asian Tugai vegetation with very high spatial resolution satellite imagery[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 31(5): 110–121.
- [29] 张春霖, 吴蓉蓉, 李国君, 等. 面向对象的高空间分辨率遥感影像箱线图变化检测方法[J]. *国土资源遥感*, 2020, 32(2): 19–25.
- Zhang C L, Wu R R, Li G J, et al. High resolution remote sensing image object change detection based on box-plot method[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2020, 32(2): 19–25.
- [30] 魏晶昱, 毛学刚, 方本煜, 等. 基于 Landsat 8 OLI 辅助的亚米级遥感影像树种识别[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(11): 23–33.

- Wei J Y, Mao X G, Fang B Y, et al. Submeter remote sensing image recognition of trees based on Landsat 8 OLI support[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(11): 23–33.
- [31] 陈鹏, 吕鹏远, 宋蜜, 等. 高空间分辨率遥感影像下的违法用地变化检测[J]. 测绘通报, 2018(4): 108–111.
- Chen P, Lü P Y, Song M, et al. Change detection using high spatial resolution remote sensing images for illegal land use extraction[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(4): 108–111.
- [32] 祝锦霞, 王珂. 面向对象的高分辨率影像变化检测方法研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 184–189.
- Zhu J X, Wang K. Object-oriented change detection method using very high spatial resolution imagery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 184–189.
- [33] Zhou H P, Jiang H, Huang Q H. Landscape and water quality change detection in urban wetland: a post-classification comparison method with IKONOS data[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10: 1726–1731.
- [34] 庞博, 王浩, 宁晓刚. 基于稳定像元的决策树分类后比较法在林地变化检测中的应用[J]. 生态学杂志, 2018, 37(9): 2849–2855.
- Pang B, Wang H, Ning X G. Application of decision tree post-classification comparison based on stable pixels in forest-land change detection[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(9): 2849–2855.
- [35] 吴田军, 胡晓东, 夏列钢, 等. 基于对象级分类的土地覆盖动态变化及趋势分析[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(4): 600–606.
- Wu T J, Hu X D, Xia L G, et al. Analysis on dynamic change and tendency of land-cover based on object-oriented classification[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29(4): 600–606.
- [36] 王崇阳, 田昕. 基于 GF-1 PMS 数据的森林覆盖变化检测[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(1): 208–216.
- Wang C Y, Tian X. Forest cover change detection based on GF-1 PMS data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(1): 208–216.
- [37] 史忠奎, 李培军, 罗伦, 等. 基于形态学属性剖面和单类随机森林分类的道路区域新增建筑物提取方法[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2018, 54(1): 105–114.
- Shi Z K, Li P J, Luo L, et al. A method for extraction of newly-built buildings in road region using morphological attribute profiles and one-class random forest[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2018, 54(1): 105–114.
- [38] 陈雪, 马建文, 戴芹. 基于贝叶斯网络分类的遥感影像变化检测[J]. 遥感学报, 2005, 9(6): 667–672.
- Chen X, Ma J W, Dai Q. Remote sensing change detection based on bayesian networks classifications[J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(6): 667–672.
- [39] 刘巨峰, 刘勇, 蒋月, 等. 集成基于对象影像分析与贝叶斯软融合的土地覆被变化检测[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2020, 56(2): 196–204.
- Liu J F, Liu Y, Jiang Y, et al. Land cover change detection based on the object-based image analysis and Bayesian soft fusion method[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2020, 56(2): 196–204.
- [40] 连喜红, 祁元, 王宏伟, 等. 基于面向对象的青海湖环湖区居民地信息自动化提取[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(4): 775–785.
- Lian X H, Qi Y, Wang H W, et al. Automatic extraction of residential information based on object-oriented in the areas around the Qinghai Lake[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(4): 775–785.
- [41] 杨超, 郭国锋, 李清泉, 等. 植被遥感分类方法研究进展[J]. 地理与地理信息科学, 2018, 34(4): 24–32.
- Yang C, Wu G F, Li Q Q, et al. Research progress on remote sensing classification of vegetation[J]. Geography and Geo-Information Science, 2018, 34(4): 24–32.
- [42] 张丽云, 赵天忠, 夏朝宗, 等. 遥感变化检测技术在林业中的应用[J]. 世界林业研究, 2016, 29(2): 44–48.
- Zhang L Y, Zhao T Z, Xia C Z, et al. Application of change detection technologies of remote sensing to forestry[J]. World Forestry Research, 2016, 29(2): 44–48.
- [43] 李慧, 唐韵玮, 刘庆杰, 等. 一种改进的基于最小生成树的遥感影像多尺度分割方法[J]. 测绘学报, 2015, 44(7): 791–796.
- Li H, Tang Y W, Liu Q J, et al. An improved algorithm based on minimum spanning tree for multi-scale segmentation of remote sensing imagery[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(7): 791–796.
- [44] 经波, 宁文怡. 基于阈值分割与决策树的 SAR 影像水体信息提取[J]. 地理空间信息, 2021, 19(3): 46–49.
- Jing B, Ning W Y. Water body information extraction of SAR images based on threshold segmentation and decision tree[J]. Geospatial Information, 2021, 19(3): 46–49.

(责任编辑 孟 瑶
责任编委 惠刚盈)