

DOI:10.13203/j.whugis20180251



文章编号:1671-8860(2018)12-1885-14

多时相遥感影像变化检测方法综述

眭海刚^{1,2} 冯文卿¹ 李文卓¹ 孙开敏¹ 徐川²

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

2 地球空间信息技术协同创新中心,湖北 武汉,430079

摘要:遥感影像变化检测一直是国际遥感领域研究的热点和难点,尽管各国学者对变化检测问题进行了大量深入的研究,但是目前尚未出现一种普适性强、适用于所有情况的通用方法。随着遥感对地观测技术的快速发展和应用,变化检测技术体系也在不断地发展和演化。回顾了多时相遥感影像变化检测技术的发展历程,对多时相遥感影像变化检测方法的分类体系进行了归纳总结,从变化检测预处理、变化检测方法、精度评价3个方面详细总结了变化检测研究的最新进展,并指出了变化检测面临的核心困难及可能的应对措施,以期推动遥感影像变化检测研究更加深入的发展。

关键词:遥感影像;多时相数据;高分辨率影像;信息提取;变化检测

中图分类号:P237

文献标志码:A

变化检测根据对同一物体或现象在不同时间的观测来确定其不同的处理过程^[1]。遥感影像变化检测是利用不同时期覆盖同一地表区域的多源遥感影像和相关地理空间数据,结合相应地物特性和遥感成像机理,采用图像、图形处理理论及数理模型方法,确定和分析该地域地物的变化,包括地物位置、范围的变化和地物性质、状态的变化^[2]。其研究的目的是找出感兴趣的变化信息,滤除作为干扰因素的不相干的变化信息^[3]。国际摄影测量与遥感学会(International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS)多年来一直为遥感影像变化检测研究设置单独的工作组,以致力于推动利用遥感技术手段进行多领域变化检测的发展。美国国家地理空间情报局(National Geospatial-Intelligence Agency, NGA)也将遥感影像变化检测与分析纳入其战略规划,NGA第六任局长Cardillo Robert曾指出,“一家公司如可开发出厉害的变化检测算法,将可通过商业出售从而成为新一代的行业巨头”。中国则将地理国情普查与监测(China Geography Census)作为一项重要战略需求,其任务是逐步建立和完善国家级地理国情动态监测信息系统,为政府、企业和个人提供科学可靠的空间信息服务。即便如此,在现有绝大多数变化检测

应用中,常用的方法仍然是目视解译和人工手动勾画,需要耗费大量人力及时间,处理效率低下。因此,自动的变化检测技术对发掘影像与数据潜能、保持地理空间数据的现势性具有重要意义,在国民经济和国防建设各方面发挥着日益重要的作用^[4]。

国内外学者从不同角度针对不同应用研究了大量的变化检测方法和理论模型,如代数法^[5]、分类法^[6]、面向对象法^[7-10]、时间序列分析法^[11-12]、可视化法^[13]等,这些自动及半自动的变化检测方法已广泛应用于土地利用/覆盖变化、森林和植被变化、灾害监测、地理信息更新、目标监视与跟踪、生态环境监测等领域^[14-16]。许多学者^[1,3,5,11,17-24]对变化检测方法和技术进行了综述,普遍认为变化检测是一个复杂的综合处理过程,现有的检测方法没有哪一种适合所有应用场景。在应用驱动下新的变化检测方法不断涌现,但能否从根本上解决上述难题值得怀疑;目前的综述文献对检测方法进行了分类整理,得出许多有用的结论,但是并未对变化检测理论和方法进行系统分析,也没有提出较为系统的解决方案。与其他遥感数据解译技术相比,变化检测聚焦处理和分析不同时相获取的覆盖同一地区的多幅遥感影像,其所处理的影像数据量更多,数据差异性更强,地物情况也更复杂^[22-24]。变化检测的通用流程主要涵盖数

收稿日期:2018-07-12

项目资助:国家自然科学基金(41771457);国家重点研发计划(2016YFB0502600)。

第一作者:眭海刚,博士,教授,研究方向为遥感、GIS、多传感器集成等。haigang_sui@263.net

据预处理、变化检测方法、阈值分割、精度评定等方面^[22-24]。总体来说,多年来研究学者对变化检测问题进行了大量深入的研究,但是目前尚未出现一种普适性强、适用于所有情况的方法。

本文在眭海刚等^[18]对多时相遥感影像变化检测方法分类的基础之上,对变化检测方法的发展历程进行了回顾,围绕检测的粒度、维度和时间序列3个方面,分析总结了目前主流变化检测方法的研究现状,并对其他的一些方法进行了归纳;最后指出了变化检测技术面临的挑战及可能的发展趋势。

1 变化检测的分类体系

目前提出的变化检测方法非常多,各国学者从不同的方面进行了较全面的总结分类,从不同的角度出发可归纳出不同类型的分类方法。本文在之前分类的基础上,按照检测数据时相、检测分析粒度、检测先验信息、检测空间维度、检测时间尺度等不同的检测单元角度,总结形成了图1所示的变化检测分类体系。从检测数据时相来分,遥感影像变化检测分为单时相分类比较法、两时相影像变化检测及时间序列变化检测;从检测分析粒度来分,主要分为像素/亚像素级变化检测、对象级变化检测及场景级变化检测;从检测先验信息来分,根据是否有先验数据可以分为监督变化检测及非监督变化检测,先验信息可以来源于训练好的模型、GIS矢量数据等;从检测的维度来分,可以分为二维变化检测和三维变化检测;从检测时间尺度来分,可以分为实时变化检测、准实时

变化检测和非实时变化检测。变化检测方法 with 检测的单元不一定是一一对应的关系,有些方法可能涉及到多个检测单元。

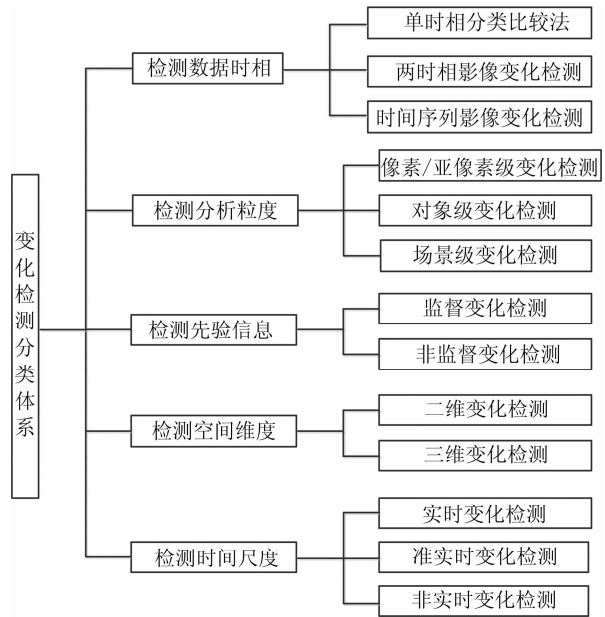


图1 变化检测的分类体系

Fig.1 Classification System of Change Detection

2 变化检测方法的发展历程

变化检测方法的演化史就是对地观测技术、信息技术(information technology, IT)、人工智能等的发展史,遥感影像分辨率的提高、IT技术的进化、人工智能的新崛起深深影响了变化检测方法的发展。本文总结了变化检测方法发展的时间脉络图,如图2所示,主要包括以下几个典型的发展阶段。

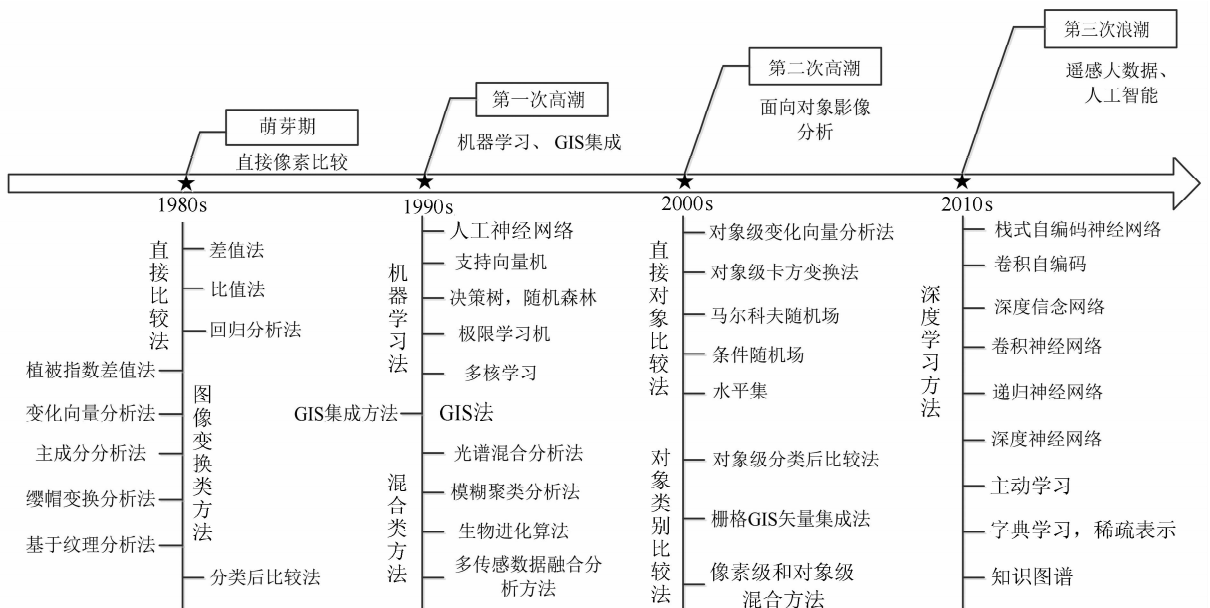


图2 变化检测方法发展的时间脉络图

Fig.2 The Development Timeline of Change Detection Approaches

1) 初始发展期(20 世纪 80 年代),主要以像元级统计方法为主。以独立的像元作为检测单元,主要针对中低分辨率遥感影像,通过逐像素地分析像元光谱差异提取变化信息,主要包括直接比较法、图像变换类方法、分类后比较法等^[20-24]。

2) 第一次高潮(20 世纪 90 年代),主要是机器学习带来了生机。随着支持向量机(supporting vector machine, SVM)^[25-27]、决策树(decision tree, DT)^[28-30]、随机森林(random forest, RF)^[31-33]、多核学习(multi-kernel learning, ML)^[34]、人工神经网络(artificial neural network, ANN)^[35-36]、极限学习机(extreme learning machine, ELM)^[37-38]等机器学习方法广泛应用于遥感影像分类中, GIS 等多种信息辅助分类也得到广泛应用^[39-40],这些理论和方法提高了影像变化检测的精度。

3) 第二次高潮(2000—2009 年),对象级变化检测引起了各种关注。伴随着高空间分辨率遥感影像的商业化,面向对象影像分析技术(object-based image analysis, OBIA)被引入高分辨率遥感影像分析中,变化检测的基本单元由像素逐渐过渡到对象。基于像素的直接比较法、分类后比较法、栅格 GIS 矢量集成法等较成熟的方法,慢慢地也被引入面向对象的高分辨率遥感影像变化检测中。此外,顾及邻域像素空间关系的方法,如水平集(level set)^[41-42]、马尔科夫随机场(Markov random field, MRF)^[43-44]、条件随机场(conditional random field, CRF)^[45-46]等方法引入到对象级变化检测中,将光谱和空间信息进行有效结合,降低了对对象级变化检测的不确定性。

4) 第三次浪潮(2010 年以后),大数据和人工智能使变化检测进入新的热潮。随着遥感大数据和人工智能的发展,深度学习的方法迅速被引入遥感影像变化检测领域。作为一种高分辨率遥感数据特征挖掘的有效手段,深度学习的方法为高分影像数据的分类与变化检测提供了一条新的途径。同时,大数据时代新思维新模式必将对遥感影像变化检测方法产生重大影响,尽管目前尚未见到相关报道和研究成果。

3 变化检测预处理

遥感固有的尺度问题使遥感影像变化检测面临的首要任务就是选择数据源。目前,变化检测可用的数据来源多种多样,包括航天/航空不同传感器、不同空间尺度的影像数据以及历史的 GIS

矢量等数据。在数据的时相上,有单时相影像、两时相影像以及时间序列影像;在光谱的波段上,有全色影像、彩色影像、多光谱影像以及高光谱影像;在数据的类型上,有影像对影像的变化检测,非影像数据与影像数据对比的变化检测^[18,47]。一般来说,在影像数据选取时,使用相同传感器、在每年的相近日期、相似的气候条件和气象条件下拍摄得到数据,采用相同的预处理方法,最大限度地消除几何和辐射差异引起的非显著变化是不同时相选择数据源的基本原则^[18,47]。

几何配准误差是变化检测最主要的误差来源之一。如果不能得到较高的影像配准精度,将会出现大量的伪变化区域,因此许多变化检测方法,特别是像素级变化检测方法,都要求参与变化检测的多时相影像已完成高精度的配准^[18,48-50]。但对于不少特征级的变化检测方法,如面向对象法,由于对提取出的特性或目标进行比较时可采用顾及配准误差的缓冲区分析法,从而避免了过于苛刻的高精确配准要求^[18]。此外,鉴于配准对变化检测的影响,可将影像配准与变化检测同步进行,充分利用未变化地物目标作为图像配准的依据,将影像配准与变化检测整体解求,从而克服传统方法配准误差的传递和累积,以提高变化检测的精度^[18,51]。

辐射校正是预处理的另一个重要环节。不同时期的光学遥感影像,如拍摄季节与日期不同、太阳高度角不同、成像角度不同、气象条件不同等,都会造成影像辐射值不同,显著地影响变化检测结果的精度,所以通常在变化检测之前需要进行辐射校正^[52]。常用的辐射校正方法包括绝对辐射校正和相对辐射校正两种类型^[18]。但绝对辐射校正需要大量的成像及其他参数,因此相对辐射校正是一种更经常采用的方法。相对辐射校正方法将一幅影像作为参考影像,调整另一幅影像的辐射特性,使之与参考影像一致,主要包括图像回归法、伪不变特征法、二元线性回归分析、直方图匹配法等^[53-54]。其中前 3 种方法多为基于线性模型的方法,即假设影像间的辐射差异整体上有某种线性一致性。但实际情况下,不同类型的传感器获取的影像辐射差异通常并不满足线性模型假设;线性模型亦未考虑辐射信息的二维分布特征,而该特征对变化检测尤为重要;又因参与变化检测的影像间辐射差异主要反映在低频部分,因此针对影像低频信息进行顾及二维分布的相对辐射校正方法常用于变化检测中^[53]。需要注意的是,尽管辐射校正多时相遥感影像变化分析中

非常重要,但并非所有的变化检测方法都需要辐射校正,比如分类后变化检测方法是没必要进行辐射校正的^[18]。

4 目前主流的变化检测方法

本文重点从变化检测分析的粒度单元上,总结了像素级、对象级和场景级变化检测3个方面的热点方法。首先从像素级的角度出发,着重总结了基于深度学习的变化检测新方法;从对象级变化检测策略的选择上,对当前面向对象变化检测主流方法的特点进行了新的归纳;考虑到高分辨率遥感影像场景变化分析也已经成为变化检测一个新的发展方向,本文对场景变化分析方法也进行了总结。然后,从变化检测的空间和时间维度两个方面,重点对三维变化检测方法及时序列变化检测方法进行了归纳总结。最后,对变化检测混合类方法,包括基于过程的混合方法和基于结果的混合方法两个方面,进行了相应的总结分析。

4.1 基于深度学习的变化检测方法

2012年,在ImageNet挑战赛中,深度学习的方法夺得第一,此后,基于深度学习的变化检测研究如火如荼^[55-60]。深度学习能够自动、多层次地提取复杂地物的抽象特征已被证明是一种有效的特征学习手段。深度网络提取出的抽象特征对噪声有很强的鲁棒性,能够处理同源或者异源的多时相遥感影像数据。传统变化检测方法结果的精度对差异图的依赖很大,但生成差异图的过程会损失很多信息,导致检测结果精度不稳定;深度学习网络端对端的结构,使得我们能够直接从多时相遥感影像中获得变化检测结果。经过数年的发展,众多学者提出了不少基于深度神经网络的变化检测方法,例如深度信念网络(deep belief networks, DBN)^[59]、栈式自编码神经网络(stacked auto-encoders, SAE)^[56]、卷积自编码(convolutional auto-encoders, CAE)^[60]、PCANet^[55]等。深度学习技术的发展,尤其是卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)^[58]、递归神经网络(recurrent neural networks, RNN)^[59]和深度神经网络(deep neural networks, DNN)^[57],为像素级变化检测方法注入了新的旺盛生命力。

深度神经网络的训练是基于反向传播算法的有监督训练,因此,在利用深度神经网络处理遥感图像变化检测问题时,如何有效获取训练样本是一个值得研究的问题。虽然已经有大量的研究工

作将深度学习应用在多时相遥感影像的变化检测研究上,但对于高分辨率遥感影像的变化检测而言,地物有更加丰富的空间/形状特征,如何将深度学习应用于高分辨率遥感影像中,提取并学习有效的特征,减少伪变化,进一步提高变化检测精度,是未来主要的研究方向。

4.2 基于面向对象影像分析的变化检测方法

随着Hay和Niemann^[61]提出了“影像对象”的概念,各种基于影像分割结果进行影像分析的方法也逐渐出现。影像对象较之单个像素包含了地物更多的整体信息,基于对象的影像分析方法更接近于人眼识别图像过程。但是一直到分形网络演化算法(fractal net evolution approach, FNEA)^[62]提出后,对象级影像分析方法才获得广泛关注,现已成为一种有效的高空间分辨率影像分析方法。而部分学者认为,即使是中低分辨率影像,采取对象级分析方法,也普遍优于像素级方法^[63]。现在,已经有相当多的学者进行了对象级的变化检测方法研究,普遍获得了较像素级变化检测方法更优的检测精度^[64-67]。

根据变化检测策略的不同,对象级变化检测方法大致可以分为直接对象变化检测^[68-69]、同步分割后对象变化检测^[70-71]、分类后变化检测^[72-74]几个类型。直接对象变化检测方法的核心是对多时相影像分别分割提取影像对象,然后直接对比不同时相的影像对象,通过对比对象几何特征如长度、面积及形状或者光谱纹理特征^[75-76]得到结果。该类方法的影像对象的获取策略可分为两种,一是只分割一期影像,另外一期影像通过直接叠加分割结果进行变化检测^[75];二是对不同时相影像分别做分割,通过对比相同位置上的对象进行变化检测。虽然顾及了所有对象,但是该方法由于分割结果的不同难以进行对象分析,且要求分割方法能真正意义上把对象分割开来,变化检测精度严重依赖分割结果^[76]。同步分割后对象变化检测方法的思想是多时相数据相互叠加同时参与分割提取影像对象,获取在多时相影像上形状、大小、位置上一致的分割对象。这种方法受多时相数据配准精度的影响较大,且由于分割时同时使用来自多时相影像的特征参数,异质性增大,分割结果往往存在过分割和边界破碎对象现象,需要一定的后处理补充^[77-78]。分类后变化检测方法是经典的方法,对不同时相影像分别进行独立面向对象影像分类,然后再进行对象所属类别、几何形状及空间上下文信息^[77]等对比分析,获取变化区域及变化轨迹。

区别于像素级方法,对象级变化检测最重要的一个环节就是影像分割,众多学者提出了各种分割方法^[78],但是这些方法仍然各自有特定的适用场景和条件。在未来的对象级变化检测研究中,影像分割技术仍然是需要进一步深入研究的内容。另外,当前流行的影像分割方法普遍需要尺度参数,由于尺度参数的设置非常重要又很困难,设置的任何单一尺度参数都可能造成某些地物的“过分割”或“欠分割”,因此需要加强最优尺度、自适应尺度乃至全尺度分割方法的理论研究^[79]。此外,随着人工智能技术的快速发展,利用卷积神经网络辅助完成影像自适应多尺度分割也是一个研究趋势^[80]。

4.3 场景变化分析方法

近年来,高分辨率遥感场景识别也已经成为遥感影像分析的一个新的发展方向。视觉词袋模型(bag-of-visual-words, BOVW)是一种能够获取遥感场景主题地物统计特征的有效且稳健的特征编码方式^[81-82]。它能够提供中层次特征表达来跨越影像低层次特征和人类高层次概念之间的巨大语义鸿沟。场景变化分析(scene change detection)^[83-84]就是在语义层次分析多时相对应场景的语义类别是否发生变化以及发生了何种变化。由于地物变化有其规律性,基于语义的场景变化检测大有潜力。相比场景识别,场景变化检测研究一直没有得到重视。这主要是因为自然影像场景间并不存在明显的时空关联性,时空自然场景分析没有应用目标^[85-88]。但是对于遥感影像场景研究来说,多时相高分辨率遥感影像内的场景是具有对应性的,遥感场景类别的变化反映出该区域语义层次的土地利用变化。相比较在低层次分析道路变化、建筑物变化和植被变化,在语义层次分析居民区变化和工业区变化更能够为城市研究提供符合人类语义概念的信息。由于遥感影像场景内部地物分布的多样性,很难直接从影像的像素级底层特征直接进行场景语义解译,存在“语义鸿沟”问题^[89-92]。近年来,随着各种数据库的积累、开源地理信息的极大丰富、大数据技术的快速发展,相信这一问题会在未来得到解决。

除了场景识别本身的难题,场景变化分析还存在其独特的研究难题。遥感影像场景中往往包含大量不同的主题地物(例如建筑物、植被、道路等),但是场景内部地物的变化并不能直接导致场景类型的变化^[83-84]。一个工业区遥感场景可以包含多种地物类型,如建筑物、道路、硬化地面、植被和空地等。在传统的面向像素或者面向对象的

变化检测中,可以检测出厂房进行了翻新,厂区内栽植了新的植被,空置地上修建了新的建筑、开辟了新的道路等地物变化。但是,这些场景内部地物的变化并不能代表着这一工厂区变化成为了住宅区或者商业区。由此可以看出,低层次地物变化与高层次场景语义变化之间也存在“时空语义鸿沟”问题^[83-84]。

4.4 三维变化检测方法

当前较为成熟的二维变化检测方法大都应用于中低分辨率遥感影像,当然高分辨率二维变化检测方法也有部分较为成功的应用^[62]。随着影像分辨率的提高,成像视角的不同将导致更为严重的透视形变,二维变化检测中要求的严格像素级配准难以实现,而且二维变化检测缺乏在三维空间中的感知能力,即二维变化检测仅能检测平面上的变化,对高度上的变化则无能为力,如建筑物的监测、滑坡灾害或者矿山开采中的土方量测量等。对于此类应用,三维变化检测的优势不言而喻,但三维变化检测面临的最大问题是三维数据获取的高成本及高难度。如传统航空机载激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)^[93-96]可获取地物的高程信息,但耗费大量的人力物力,点云后处理同样面临着诸多问题;影像密集匹配技术亦提供了新的获取三维信息的手段,但不可避免地存在误匹配^[97-99]。由于三维变化检测增加了新的数据维度,因此还将面临三维数据本身的不确定性问题^[99],以及三维信息和二维影像的异质数据间的融合问题。

根据三维变化检测中三维信息使用的不同,三维变化检测方法大致可以分为几何信息直接比较的方法^[100-105]和几何信息与光谱信息相结合的方法^[106-108]。几何信息直接比较的方法中较为常用的方法包括两种。一种是直接利用高度进行差值变化检测方法,如利用从点云数据中获取的数字表面模型(digital surface model, DSM)直接进行差分获取高度上的变化,可适用于较大的场景变化检测需求。但由于其方法本质上还是二维的,因此高程的变化阈值难以确定,亦受高程数据的基准影响,对错误配准及误匹配敏感,检测结果中虚警率较高^[100-103]。另一种是计算三维物体表面欧氏距离的三维变化检测以及利用三维数据进行反投影计算差异的变化检测方法,它们都要求三维数据本身的准确性较高,且计算都较为复杂,较难实现^[104-105];三维几何信息与光谱信息相结合的方法又可分为特征融合变化检测方法以及分类后变化检测方法,前者通过融合算法同时利用

三维信息和光谱特征来获取变化,亦可融入其他数据源,但方法中不恰当的参数可能会导致错误累加传递到最终结果^[106],后者则直接利用分类后的对象标签进行变化检测分析^[107-108],虽然引入三维信息的分类可以极大地提高分类或对象检测精度,但检测结果高度依赖分类方法的准确性,对训练样本的采集及特征设计要求很高。

近年来,无人机低空遥感技术特别是倾斜摄影测量技术迅速发展,具有低成本、灵活、安全、高时效及高空间分辨率的特点。特别是低空无人机通常在云层下面飞行,弥补了卫星遥感和航空摄影经常受云层遮挡无法获取地面影像的不足,能快速提供目标区域高时间分辨率数据,有效弥补卫星遥感、航空遥感在现势性上的不足。通过高重叠度覆盖目标区并利用影像密集匹配技术获取目标区地物的高程信息,将影像密集匹配点云/三维信息,与二维影像结合进行三维变化检测,可提高变化检测结果的精度和可靠性^[109]。三维变化检测技术的发展能辅助许多现存的或新的应用场景,对于三维变化检测的需求在更多的领域中正在不断增长。

4.5 时间序列变化检测方法

时间序列变化检测方法主要针对长时间序列遥感影像的时间趋势分析。相比两时相影像的变化检测方法,时间趋势分析对遥感影像时间分辨率要求比较高,更聚焦于中低空间分辨率图像,如 AVHRR (advanced very-high-resolution radiometer) 和 MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer)。使用这些影像,空间细节的损失使得自动分类的精度非常低,因而时间序列分析通常只用于大面积目标的变化分析,如植被变化、土地覆盖变化等^[110]。定量参数如归一化植被指数、土地覆盖面积等常作为度量的变量用于时间序列影像变化检测中。

时间序列变化检测方法可以分解为若干个两时相影像单独变化检测处理再进行集成,也可以作为一个整体采用时间序列分析法描述事物随时间发展变化的数量规律性。赵忠明等^[11]对遥感时间序列影像变化检测研究进行了系统总结,并评述了当前遥感时间序列影像变化检测的相关研究进展和应用状况,重点介绍了基于经验模态分解的遥感时间序列影像异常信息检测方法和基于隐马尔科夫模型的土地利用/覆盖变化检测方法,以期能够为相关研究提供参考。Liu 等^[111]将时间序列变化分为长期趋势变动、季节变动、周期波动和不规则变动,广泛使用趋势图直接预测法、移

动平均法、回归法和时间序列谐波分析法等研究时变规律。利用遥感影像变化检测技术研究地表的变化规律和变化趋势时,需要长期的变化监测影像。主要是通过比较各种变化检测指标的年际曲线或生长期曲线的差异获取变化信息。目前,标准主成分分析和变化向量分析方法是基于遥感数据时间序列曲线进行土地覆盖变化分析的较为常用的两种方法。Zhou 等^[112]提出了利用多时相分类影像构造土地覆盖类型变化轨迹,并在此基础上对各种变化轨迹根据其驱动力分类的轨迹分类方法。动态贝叶斯网络利用时序动态数据产生可靠概率推理,可以实现遥感影像变化检测从静态到动态分析。欧阳赞等^[113]利用北京 3 个时期的 TM 影像,研究了动态贝叶斯网络用于多时相遥感变化检测的理论和方法。

构成时间序列影像数据的另一关注点是遥感视频数据,虽然传统的视频检测主要基于通常的地面视频监视,多应用于银行、交通和生产车间。但随着遥感技术的快速发展,越来越多的航空和卫星平台的视频获取渐成现实,因此基于遥感视频的实时变化检测越来越重要。视频监视序列影像时间采样率高、数据量非常大,相邻两帧影像变形大,成像较模糊,给变化检测带来了新的挑战。尽管可以借鉴传统地面视频影像处理中的光流技术、Kalman 滤波跟踪、背景建模等技术^[114-116],但在广阔范围内对地目标及过程进行动态监测技术仍需深入研究。

4.6 混合方法

混合方法是指综合运用上述方法中的两种或两种以上方法进行变化检测处理,包括两方面内容。一是在检测的不同阶段和步骤中使用不同的检测方法进行处理,即基于过程的混合方法;二是分别使用不同的变化检测方法对各自的结果进行综合分析,即基于结果的混合方法^[117]。混合法的优势在于综合多种方法的优点获得更好的变化检测结果,然而对于特定的应用,怎样选择混合方法,怎样协调多种方法的检测结果是十分困难的,这些问题可能导致算法复杂,效率降低。基于过程的混合变化检测法常见的组合为分类法与面向对象法混合、分类法和代数法混合等。Li 等^[118]通过监督分类、边缘检测和多项式拟合等步骤检测提取遥感影像上的特定目标,再进行目标级的形状比较,获取变化检测结果,对湖泊变化、长期气候变迁和洪水变化检测效果显著。Warner^[119]将变化矢量分析的结果再进行监督分类,直接获取不同的变化类型;Michener 等^[120]利用多时相

SPOT 数据检测洪水淹没的植被区域,发现基于植被指数的分类法比单独的分类法检测精度高。基于结果的混合变化检测方法一般使用决策级的融合策略如投票法、模糊逻辑法等^[121-123]。目前的混合方法通常将像素、目标和类别进行综合比较,一般能够提高变化检测的准确度。不过大部分方法只是特征和模型数量上的加减,混合处理环节割裂,综合决策分析的权重不易选取,造成混合法算法复杂,而且效果并不显著。混合方法理论上是一种很好的方法,然而给定应用很难选择方法和过程的组合,这些原因限制了混合法的广泛使用。

5 精度评价

精度评估对于理解变化检测结果和最终决策是十分重要的。变化检测的精度依赖许多因素,如精确的几何和辐射校正、地面真值数据的获取、地面景观的复杂性、变化检测方法、分析者的知识与经验、时间与成本限制等^[3,24]。本文根据变化检测的精度评估层次,可将变化检测的误差矩阵分为简单变化检测误差矩阵和分类变化检测误差矩阵。误差矩阵和 Kappa 系数评价方法^[124]是最成熟、最常用的变化检测精度评估方法。近年来,一些新的方法也被用来对土地覆盖变化检测结果进行分析与评价。Nemmour 等^[125]提出了模糊逻辑误差矩阵和接受操作特性的变化检测精度评估方法。Morissette^[126]利用精度评价曲线分析了基于遥感数据的变化检测结果。Lowell^[127]发展了一种基于面积的土地覆盖变化检测精度评价方法。Liu 等^[111]提出了根据检测变化在时间上前因后果的合理性对变化检测结果进行评估的方法。Biging 等^[128]在专著中重点探讨了土地覆盖变化检测的精度评价的方法,详细分析了影响评价精度的各种数据处理要素,介绍了建立误差矩阵的样点选取方法,对各种评价方法的适用性进行了分析,并举例说明了各种评价方法的实际应用。

总体而言,目前变化检测的精度评估主要是基于像素级的,误差矩阵是最常用、最成熟的精度评估方法;对长时间序列影像变化检测的精度评估需要加强研究,特别是对缺乏变化真值情况下的精度评估技术有待从新的角度考虑;缺乏特征级的精度评估方法,面向对象变化检测法与其他变化检测方法的精度评估研究几乎是空白,有待深入研究。

6 结 语

由于遥感影像变化检测本质上是一个不完备的信息反演问题,面临着许多实际待解决的问题,需要综合利用多源信息、先验信息及智能化的方法共同解决这一难题。从当前变化检测的研究现状来说,可选的变化检测方法种类非常多,不同方法适合不同的情况。理想的变化检测解决方案应该是能够提供一个集成多源数据、整体处理、智能化方法和先验知识指导的灵活框架。随着遥感技术、IT 技术、人工智能、大数据等的不断发展和应用领域的拓展,变化检测的自动化、实时化和在轨化智能处理的需求日渐显现,变化检测技术需要解决影像全自动配准、特征自动提取、目标自动解译、影像自动融合和数据自动清理等关键性难题,还要解决从时空大数据库中自动进行数据挖掘和知识自动发现等问题,以构建智能化的变化检测系统。

参 考 文 献

- [1] Ashbindu S. Review Article Digital Change Detection Techniques Using Remotely-Sensed Data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 10(6):989-1 003
- [2] Bruzzone L, Bovolo F. A Novel Framework for the Design of Change-Detection Systems for Very-High-Resolution Remote Sensing Images[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013, 101(3):609-630
- [3] Radke R J, Andra S, Alkofahi O, et al. Image Change Detection Algorithms: A Systematic Survey [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(3):294-307
- [4] Li Deren. Change Detection from Remote Sensing Images [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2003, 28(s1):7-12(李德仁. 利用遥感影像进行变化检测[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2003, 28(s1):7-12)
- [5] Vol N. Change Analysis in the United Arab Emirates; An Investigation of Techniques [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1999, 65(4):475-484
- [6] Munyati C. Wetland Change Detection on the Kafue Flats, Zambia, by Classification of a Multi-temporal Remote Sensing Image Dataset [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(9):1 787-1 806

- [7] Li Liang, Shu Ning, Wang Yan. Segment-Based Remote Sensing Image Change Detection Using Normalized Mutual Information[J]. *Remote Sensing Information(Theoretical Research)*, 2011, 6:18-22 (李亮,舒宁,王琰.利用归一化互信息进行基于像斑的遥感影像变化检测[J].遥感信息(理论研究),2011,6:18-22)
- [8] Desclée B, Bogaert P, Defourny P. Forest Change Detection by Statistical Object-Based Method [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102(1):1-11
- [9] Wang Wenjie, Zhao Zhongming, Zhu Haiqing. Object-Oriented Multi-feature Fusion Change Detection Method for High Resolution Remote Sensing Image [C]. The 17th International Conference on Geoinformatics, Fairfax, VA, USA, 2009
- [10] Li Liang, Shu Ning, Wang Kai, et al. Change Detection Method for Remote Sensing Images Based on Multi-features Fusion [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(9):945-953 (李亮,舒宁,王凯,等.融合多特征的遥感影像变化检测方法[J].测绘学报,2014,43(9):945-953)
- [11] Zhao Zhongming, Meng Yu, Yue Anzhi, et al. Review of Remotely Sensed Time Series Data for Change Detection[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5):110-112 (赵忠明,孟瑜,岳安志,等.遥感时间序列影像变化检测研究进展[J].遥感学报,2016,20(5):110-112)
- [12] Li Quan, Zhou Xingshe. Multivariate Time Series Anomaly Detection Method Based on KPCA [J]. *Computer Measurement and Control*, 2011, 19(4):822-825 (李权,周兴社.基于KPCA的多变量时间序列数据异常检测方法研究[J].计算机测量与控制,2011,19(4):822-825)
- [13] Asner G P, Keller M, Pereira R J, et al. Remote Sensing of Selective Logging in Amazonia [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(3):483-496
- [14] Chen Gang, Hay G J, Carvalho L M T, et al. Object-Based Change Detection [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(14):443-457
- [15] Zanetti M, Bruzzone L. A Theoretical Framework for Change Detection Based on a Compound Multi-class Statistical Model of the Difference Image[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 99:1-15
- [16] Bovolo F, Bruzzone L. An Adaptive Multiscale Random Field Technique for Unsupervised Change Detection in VHR Multitemporal Images[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Cape Town, South Africa, 2009
- [17] Zhou Qiming. Review on Change Detection Using Multi-temporal Remotely Sensed Imagery [J]. *Geomatics World*, 2011, 9(2):28-33 (周启鸣.多时相遥感影像变化检测综述[J].地理信息世界,2011,9(2):28-33)
- [18] Sui Haigang, Zhou Qiming, Gong Jianya, et al. Processing of Multi-temporal Data and Change Detection [M]//Li Z L, Chen J, Baltsavias E. Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. London: Taylor and Francis Group, 2008: 227-247
- [19] Li Deren. Remotely Sensed Images and GIS Data Fusion for Automatic Change Detection [J]. *International Journal of Image and Data Fusion*, 2010, 1(1):99-108
- [20] Hussain M, Chen D, Cheng A, et al. Change Detection from Remotely Sensed Images: From Pixel-Based to Object-Based Approaches [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 80(2):91-106
- [21] Karantzalos K. Recent Advances on 2D and 3D Change Detection in Urban Environments from Remote Sensing Data [J]. *Computational Approaches for Urban Environments*, 2015, 13:237-272
- [22] Zhang Liangpei, Wu Chen. Advance and Future Development of Change Detection for Multi-temporal Remote Sensing Imagery [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10):1447-1459 (张良培,武辰.多时相遥感影像变化检测的现状与展望[J].测绘学报,2017,46(10):1447-1459)
- [23] Coppin P, Jonckheere I, Nackaerts K, et al. Review Article Digital Change Detection Methods in Ecosystem Monitoring: A Review [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(9):1565-1596
- [24] Lu D, Mausel P, Brondizio E, et al. Change Detection Techniques [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(12):2365-2401
- [25] Cao G, Li Y, Liu Y, et al. Automatic Change Detection in High-Resolution Remote-Sensing Images by Means of Level Set Evolution and Support Vector Machine Classification [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(16):2556-2570
- [26] Li P J, Xu H Q. Land-Cover Change Detection U-

- ing One-Class Support Vector Machine [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2010, 76(3):255-263
- [27] Yang Z, Qin Q, Zhang Q. Change Detection in High Spatial Resolution Images Based on Support Vector Machine[C]. *IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Denver, USA, 2006
- [28] Huang X, Xie Y, Wei J, et al. Automatic Recognition of Desertification Information Based on the Pattern of Change Detection-CART Decision Tree [J]. *Journal of Catastrophology*, 2017, 32(1):36-42
- [29] Zhang Z, Li A N, Lei G, et al. Change Detection of Remote Sensing Images Based on Multiscale Segmentation and Decision Tree Algorithm over Mountainous Area; A Case Study in Panxi Region, Sichuan Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(24):7 222-7 232
- [30] Im J, Jensen J R. A Change Detection Model Based on Neighborhood Correlation Image Analysis and Decision Tree Classification [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 99(3):326-340
- [31] Molinier M, Oleg A, Teemu M, et al. Clear-Cut Mapping in Landsat8 Images with a Change Detection Method Based on the Random Forest Algorithm [C]. *International Workshop on the Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images*, Annecy, France, 2015
- [32] Seo D K, Yong H K, Yang D E, et al. Generation of Radiometric, Phenological Normalized Image Based on Random Forest Regression for Change Detection [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(11):1 163-1 174
- [33] Liu D, Song K, Townshend J R G, et al. Using Local Transition Probability Models in Markov Random Fields for Forest Change Detection [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(5):2 222-2 231
- [34] Jia L, Li M, Zhang P, et al. SAR Image Change Detection Based on Multiple Kernel k -Means Clustering with Local-Neighborhood Information [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(6):856-860
- [35] Lv H, Lu H, Mou L. Learning a Transferable Change Rule from a Recurrent Neural Network for Land Cover Change Detection [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(6):506-528
- [36] Wang Q, Shi W, Atkinson P M, et al. Land Cover Change Detection at Subpixel Resolution with a Hopfield Neural Network [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(3):1 339-1 352
- [37] Jia L, Li M, Zhang P, et al. SAR Image Change Detection Based on Correlation Kernel and Multi-stage Extreme Learning Machine [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(10):5 993-6 006
- [38] Chang N B, Han M, Yao W, et al. Change Detection of Land Use and Land Cover in an Urban Region with SPOT-5 Images and Partial Lanczos Extreme Learning Machine [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2010, 4(1):2 816-2 832
- [39] Pijanowski B C, Brown D G, Shellito B A, et al. Using Neural Networks and GIS to Forecast Land Use Changes: A Land Transformation Model [J]. *Computers Environment and Urban Systems*, 2002, 26(6):553-575
- [40] Chen Xiuwan. Using Remote Sensing and GIS to Analyze Land Cover Change and Its Impacts on Regional Sustainable Development [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(1):107-124
- [41] Hao M, Shi W, Zhang H, et al. Unsupervised Change Detection with Expectation-Maximization-Based Level Set[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 11(1): 210-214
- [42] Cao G, Liu Y, Shang Y. Automatic Change Detection in Remote Sensing Images Using Level Set Method with Neighborhood Constraints[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, 8(1): 083 678
- [43] Bruzzone L, Prieto D. Automatic Analysis of the Difference Image for Unsupervised Change Detection[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(3):1 171-1 182
- [44] Hao M, Zhang H, Shi W, et al. Unsupervised Change Detection Using Fuzzy-Means and MRF from Remotely Sensed Images[J]. *Remote Sensing Letters*, 2013, 4(12):1 185-1 194
- [45] Zhou L, Cao G, Li Y, et al. Change Detection Based on Conditional Random Field with Region Connection Constraints in High-Resolution Remote Sensing Images[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(8):3 478-3 488
- [46] Cao G, Zhou L, Li Y. A New Change-Detection Method in High-Resolution Remote Sensing Images

- Based on a Conditional Random Field Model[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(5):1 173-1 189
- [47] Tong Guofeng, Li Yong, Ding Weili, et al. Review of Remote Sensing Image Change Detection [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2015, 20(12): 1 561-1 571(佟国峰, 李勇, 丁伟利, 等. 遥感影像变化检测算法综述[J]. *中国图象图形学报*, 2015, 20(12):1 561-1 571)
- [48] Stow D A, Chen D M. Sensitivity of Multi-temporal NOAA AVHRR Data of an Urbanizing Region to Land-Use/Land-Cover Changes and Misregistration [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(2):297-307
- [49] Chen G, Zhao K, Powers R. Assessment of the Image Misregistration Effects on Object-Based Change Detection[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 87(19):19-27
- [50] Bovolo F, Bruzzone L. A Theoretical Framework for Unsupervised Change Detection Based on Change Vector Analysis in the Polar Domain[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(1):218-236
- [51] Zhang Xiaodong, Li Deren, Gong Jianya, et al. A Change Detection Method of Integrating Remote Sensing and GIS [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(3):266-269(张晓东, 李德仁, 龚健雅, 等. 遥感影像与GIS分析相结合的变化检测方法[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2006, 31(3):266-269)
- [52] Paolini L, Grings F, Sobrino J A, et al. Radiometric Correction Effects in Landsat Multi-date/Multi-sensor Change Detection Studies [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(4):685-704
- [53] Li Wenzhuo, Sun Kaimin, Zhang Hongya. Algorithm for Relative Radiometric Consistency Process of Remote Sensing Images Based on Object-Oriented Smoothing and Contourlet Transforms [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, 8(1):083607
- [54] Zhang P Q, Xu-Chu Y, Liu Z, et al. A Study on Relative Radiometric Correction of Multi-temporal Remote Sensing Images [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(3):339-344
- [55] Gao F, Dong J Y, Li B, et al. Automatic Change Detection in Synthetic Aperture Radar Images Based on PCANet [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 13(12): 1 792-1 796
- [56] Geng J, Wang H Y, Fan J C, et al. Change Detection of SAR Images Based on Supervised Contractive Auto-encoders and Fuzzy Clustering [C]. 2017 International Workshop on Remote Sensing with Intelligent Processing (RSIP), Shanghai, China, 2017
- [57] Gong M, Zhao J, Liu J, et al. Change Detection in Synthetic Aperture Radar Images Based on Deep Neural Networks[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2016, 27(1): 125-138
- [58] Zhang H, Gong M G, Zhang P Z, et al. Feature-Level Change Detection Using Deep Representation and Feature Change Analysis for Multispectral Imagery [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(11):1 666-1 670
- [59] Gong M G, Zhan T, Zhang P Z, et al. Superpixel-Based Difference Representation Learning for Change Detection in Multispectral Remote Sensing Images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(5):2 658-2 673
- [60] Su L Z, Gong M G, Zhang P Z, et al. Deep Learning and Mapping Based Ternary Change Detection for Information Unbalanced Images [J]. *Pattern Recognition*, 2017, 66(C):213-228
- [61] Hay G J, Niemann K O. Visualizing 3-D Texture : A Three-Dimensional Structure Approach to Model Forest Texture [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1994, 20(2):90-101
- [62] Baatz M, Schäpe A. An Optimization Approach for High Quality Multi-scale Image Segmentation[C]. Beiträge Zum AGIT-Symposium, Karlsruhe, Germany, 2000
- [63] Pei Huan, Sun Tianjiao, Wang Xiaoyan. Object-Oriented Land Use/Cover Classification Based on Texture Features of Landsat8 OLI Image [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(2):248-255 (裴欢, 孙天娇, 王晓妍. 基于 Landsat8 OLI 影像纹理特征的面面向对象土地利用/覆盖分类[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(2):248-255)
- [64] Cai S, Liu D. A Comparison of Object-Based and Contextual Pixel-Based Classifications Using High and Medium Spatial Resolution Images [J]. *Remote Sensing Letters*, 2013, 4(10):998-1 007
- [65] Zhang P, Lv Z, Shi W. Object-Based Spatial Feature for Classification of very High Resolution Remote Sensing Images [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(6):1 572-1 576

- [66] Mahmoudi F T, Samadzadegan F, Reinartz P. Context Aware Modification on the Object Based Image Analysis [J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2015, 43(4):709-717
- [67] Roelfsema C. High Spatial Resolution Remote Sensing for Environmental Monitoring and Management Preface [J]. *Spatial Science*, 2008, 53(1): 43-47
- [68] Zhou W, Troy A, Grove M. Object-Based Land Cover Classification and Change Analysis in the Baltimore Metropolitan Area Using Multitemporal High Resolution Remote Sensing Data [J]. *Sensors*, 2008, 8(3):1 613-1 636
- [69] Lefebvre A, Corpetti T, Hubert-Moy L. Object-Oriented Approach and Texture Analysis for Change Detection in very High Resolution Images [C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Boston, USA, 2009
- [70] Chant T D, Kelly M, Huang B. Individual Object Change Detection for Monitoring the Impact of a Forest Pathogen on a Hardwood Forest [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2009, 75(8):1 005-1 013
- [71] Stow D. Handbook of Applied Spatial Analysis [M]. New York: Springer, 2010
- [72] Huang J, Shen S. Land Use Change Detection Using High Spatial Resolution Remotely Sensed Image and GIS Data [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2012, 29(1):49-52
- [73] Zhang P, Ruan B, Chao J. An Object-Based Basic Farmland Change Detection Using High Spatial Resolution Image and GIS Data of Land Use Planning [J]. *Key Engineering Materials*, 2012, 500: 492-499
- [74] Toure S, Stow D, Shih H, et al. An Object-Based Temporal Inversion Approach to Urban Land Use Change Analysis [J]. *Remote Sensing Letters*, 2016, 7(5):503-512
- [75] Chen Q, Chen Y. Multi-feature Object-Based Change Detection Using Self-Adaptive Weight Change Vector Analysis [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(7):549-568
- [76] Duro D C, Franklin S E, Dubé M G. A Comparison of Pixel-Based and Object-Based Image Analysis with Selected Machine Learning Algorithms for the Classification of Agricultural Landscapes Using SPOT-5 HRG Imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 118(6):259-272
- [77] Wang R S M, Roberts S A, Efford N D. Object-Based Approach to Integrate Remotely Sensed Data with Geodata Within a GIS Context for Land-Use Classification at Urban-Rural Fringe Area [J]. *Proceedings of SPIE—the International Society for Optical Engineering*, 1997, 3 222:362-370
- [78] Chen Yangyang, Ming Dongping, Xu Lu, et al. An Overview of Quantitative Experimental Methods for Segmentation Evaluation of High Spatial Remote Sensing Images [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2017, 19(6): 818-830 (陈扬洋, 明冬萍, 徐录, 等. 高空间分辨率遥感影像分割定量实验评价方法综述 [J]. *地球信息科学学报*, 2017, 19(6):818-830)
- [79] Gong J Y, Sui H G, Sun K M, et al. Object-Level Change Detection Based on Full-Scale Image Segmentation and Its Application to Wenchuan Earthquake [J]. *Science in China*, 2008, 51(2):110-122
- [80] Basaeed E, Bhaskar H, Hill P, et al. A Supervised Hierarchical Segmentation of Remote-Sensing Images Using a Committee of Multi-scale Convolutional Neural Networks [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(7):1 671-1 691
- [81] Zhao B, Zhong Y, Zhang L. A Spectral-Structural Bag-of-Features Scene Classifier for very High Spatial Resolution Remote Sensing Imagery [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 116:73-85
- [82] Zhu Q, Zhong Y, Zhao B, et al. Bag-of-Visual-Words Scene Classifier with Local and Global Features for High Spatial Resolution Remote Sensing Imagery [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 13(6):747-751
- [83] Wu C, Zhang L, Du B. Kernel Slow Feature Analysis for Scene Change Detection [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017 (99):1-18
- [84] Wu C, Zhang L, Zhang L. A Scene Change Detection Framework for Multi-temporal very High Resolution Remote Sensing Images [J]. *Signal Processing*, 2016, 124(C):184-197
- [85] Cheng G, Li Z, Yao X, et al. Remote Sensing Image Scene Classification Using Bag of Convolutional Features [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(10):1 735-1 739
- [86] Hu F, Xia G S, Hu J, et al. Transferring Deep Convolutional Neural Networks for the Scene Classification of High-Resolution Remote Sensing

- Imagery[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(11):14 680-14 707
- [87] Zou Q, Ni L, Zhang T, et al. Deep Learning Based Feature Selection for Remote Sensing Scene Classification [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(11):2 321-2 325
- [88] Guan H, Li J, Yu Y, et al. DEM Generation from LiDAR Data in Wooded Mountain Areas by Cross-Section-Plane Analysis[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(3):927-948
- [89] Zhao L J, Tang P, Huo L Z. Land-Use Scene Classification Using a Concentric Circle-Structured Multiscale Bag-of-Visual-Words Model [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 7(12):4 620-4 631
- [90] Lin W, Liu Y, Feng J. Bag of Visual Words Model with Deep Spatial Features for Geographical Scene Classification [J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2017(2):1-14
- [91] Zhu Q, Zhong Y, Zhang L, et al. Scene Classification Based on the Fully Sparse Semantic Topic Model[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017(99):1-14
- [92] Zhao W, Du S. Scene Classification Using Multiscale Deeply Described Visual Words[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(17):4 119-4 131
- [93] Gehrke S, Morin K, Downey M, et al. Semi-global Matching: An Alternative to LiDAR for DSM Generation [C]. The 2010 Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission, Calgary, Canada, 2010
- [94] Westoby M, Brasington J, Glasser N, et al. 'Structure-from-Motion' Photogrammetry: A Low-Cost, Effective Tool for Geoscience Applications [J]. *Geomorphology*, 2012,179: 300-314
- [95] Stal C, Tack F, de Maeyer P, et al. Airborne Photogrammetry and LiDAR for DSM Extraction and 3D Change Detection over an Urban Area—A Comparative Study [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34: 1 087-1 110
- [96] White J C, Wulder M A, Vastaranta M, et al. The Utility of Image-Based Point Clouds for Forest Inventory: A Comparison with Airborne Laser Scanning [J]. *Forests*, 2013, 4: 518-536
- [97] Shorter N, Kasparis T. Automatic Vegetation Identification and Building Detection from a Single Nadir Aerial Image [J]. *Remote Sensing*, 2009, 1(4):731-757
- [98] Chen L C, Lin L J. Detection of Building Changes from Aerial Images and Light Detection and Ranging (LiDAR) Data [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2012, 4(12):2 785-2 802
- [99] Liu Z, Gong P, Shi P, et al. Automated Building Change Detection Using UltraCamD Images and Existing CAD Data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(6):1 505-1 517
- [100] Hermosilla T, Ruiz L A, Recio J A, et al. Evaluation of Automatic Building Detection Approaches Combining High Resolution Images and LiDAR Data [J]. *Remote Sensing*, 2011, 3(6):1 188-1 210
- [101] Awrangjeb M, Ravanbakhsh M, Fraser C S. Automatic Detection of Residential Buildings Using LiDAR Data and Multispectral Imagery [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, 65(5):457-467
- [102] Huertas A, Nevatia R. Detecting Changes in Aerial Views of Man-Made Structures [J]. *Image and Vision Computing*, 2000, 18(8):583-596
- [103] Gonzalez J, Ambrosio I, Arevalo V. Automatic Urban Change Detection from the IRS-1D PAN[C]. Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas, IEEE/ISPRS Joint Workshop, Rome, Italy, 2001
- [104] Rowe N C, Grewe L L. Change Detection for Linear Features in Aerial Photographs Using Edge-Finding [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(7):1 608-1 612
- [105] Liu Jiahang. A Method Study on Automatic Recognition and Classification of Earthquake-Caused Building Damage in Cities Using Remote Sensing [D]. Beijing: Institute of Geology, China Seismology Bureau, 2003(柳稼航. 利用遥感技术进行城市建筑物震害的自动识别与分类方法研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2003)
- [106] Gu Wenjun, Zhao Zhongming, Wang Linjuan. The Detection of the Changed Building in City Based on Change Detection Technology [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2004, 40(1):198-200 (顾文俊, 赵忠明, 王苓涓. 基于变化检测技术的城区建筑变化目标提取[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(1):198-200)
- [107] Liu Zhen, Gong Peng, Shi Peijun, et al. Study on Change Detection Automatically Based on Similarity Calibration [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(5):537-543 (刘臻, 宫鹏, 史培军, 等. 基于相似

- 度验证的自动变化探测研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5):537-543)
- [108] Geng Zhong. Research on Artificial Object Changing Detection Techniques of Single-band Oriented High Resolution Remote Sensing Image [J]. *Geomatics World*, 2007, 5(6):36-41 (耿忠. 面向单波段高分辨率遥感影像的人工目标变化检测技术研究[J]. 地理信息世界, 2007, 5(6):36-41)
- [109] Li W, Sun K, Li D, et al. A New Approach to Performing Bundle Adjustment for Time Series UAV Images 3D Building Change Detection [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(6):625-633
- [110] Benoit M, Eric F L. Land-Cover-Change Trajectories in Southern Cameroon [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2000, 90(3):467-494
- [111] Liu H, Zhou Q. Accuracy Analysis of Remote Sensing Change Detection by Rule-Based Rationality Evaluation with Post-Classification Comparison [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(5):1037-1050
- [112] Zhou Q, Sun B. Spatial Pattern Analysis of Water-Driven Land Cover Change in Aridzone, Northwest of China[M]// *Advances in Earth Observation of Global Change*. Netherlands: Springer, 2010:17-26
- [113] Ouyang Yun, Ma Jianwen, Dai Qin. Study on Dynamic Bayesian Networks for Multi-temporal Remote Sensing Change Detection [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(4):440-448(欧阳赟, 马建文, 戴芹. 多时相遥感变化检测的动态贝叶斯网络研究[J]. 遥感学报, 2006, 10(4):440-448)
- [114] Vaduva C, Gavati I, Datcu M. Latent Dirichlet Allocation for Spatial Analysis of Satellite Images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(5):2770-2786
- [115] Salmon B P, Kleynhans W, Bergh F V D, et al. Land Cover Change Detection Using the Internal Covariance Matrix of the Extended Kalman Filter over Multiple Spectral Bands [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 6(3):1079-1085
- [116] Li J, Narayanan R M. A Shape-Based Approach to Change Detection of Lakes Using Time Series Remote Sensing Images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(11):2466-2477
- [117] Du P, Liu S, Gamba P, et al. Fusion of Difference Images for Change Detection over Urban Areas [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2012, 5(4):1076-1086
- [118] Li J, Narayanan R M. A Shape-Based Approach to Change Detection of Lakes Using Time Series Remote Sensing Images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(11):2466-2477
- [119] Warner T. Hyperspherical Direction Cosine Change Vector Analysis[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(6):201-215
- [120] Michener W K, Houhouis P F. Detection of Vegetation Changes Associated with Extensive Flooding in a Forested Ecosystem [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1998, 63(12):1363-1374
- [121] Feng Wenqing, Zhang Yongjun. Object-Oriented Change Detection for Remote Sensing Images Based on Multi-scale Fusion [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(10):142-151(冯文卿, 张永军. 利用多尺度融合进行面向对象的遥感影像变化检测[J]. 测绘学报, 2015, 44(10):142-151)
- [122] Feng Wenqing, Sui Haigang, Tu Jihui, et al. Remote Sensing Image Change Detection Based on the Combination of Pixel-Level and Object-Level Analysis [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(9):147-155(冯文卿, 眭海刚, 涂继辉, 等. 联合像素级和对象级分析的遥感影像变化检测[J]. 测绘学报, 2017, 46(9):147-155)
- [123] Quan Jicheng, Liu Yichao, Xue Feng. Detection Method of Remote Sensing Image Change Detection Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation[J]. *The Modern Electronic Technology*, 2013, 36(8):112-113(全吉成, 刘一超, 薛峰. 基于模糊综合评判的遥感图像变化检测方法[J]. 现代电子技术, 2013, 36(8):112-113)
- [124] Gong Peng, Mu Lan. Error Detection Through Consistency Checking [J]. *Geographic Information Sciences*, 2000, 6(2):188-193
- [125] Nemmour H, Chibani Y. Fuzzy Neural Network Architecture for Change Detection in Remotely Sensed Imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(4):705-717
- [126] Morisette J T. Accuracy Assessment Curves for Satellite-Based Change Detection [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2000, 66(7):875-880

[127] Lowell K. An Area-Based Accuracy Assessment Methodology for Digital Change Maps [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22 (17): 3 571-3 596

[128] Biging G S, Colby D R, Congalton R G. Sampling Systems for Change Detection Accuracy Assessment [M]. Chelsea, Michigan: Ann Arbor Press, 1999

Review of Change Detection Methods for Multi-temporal Remote Sensing Imagery

SUI Haigang^{1,2} FENG Wenqing¹ LI Wenzhuo¹ SUN Kaimin¹ XU Chuan²

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China

Abstract: Change detection for remote sensing imagery is the process to determine difference of the same object or phenomenon at different times. Real-time automatic change detection technology is of great significance for excavating potential of image data and maintaining the current situation of geospatial data. With the development of remote-sensing earth observation technology, varieties of remote-sensing sensors for different tasks have emerged. Change detection is also diversified with the coming up of multi-resolution remote-sensing data, with advanced theories and techniques developed for continuously different sensors. This paper reviews the development of multi-temporal remote sensing image change detection technologies and summarizes the classification system of multi-temporal remote sensing image change detection. And the latest developments in change detection research are summarized from three aspects: pre-processing, change detection strategies and accuracy assessment. This paper also points out the challenges that change detection is facing and possible countermeasures, in the hope of deepening the research into change detection technology for remote sensing images.

Key words: remote sensing imagery; multi-temporal data; high-resolution image; information extraction; change detection

First author: SUI Haigang, PhD, professor, majors in remote sensing, GIS and multi-sensor integration. E-mail: haigang_sui@263.net

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41771457; the National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFB0502600.