

doi:10.16779/j.cnki.1003-5508.2018.03.003

森林变化检测方法比较

谢馨娴,岳彩荣*,霍鹏
(西南林业大学,云南昆明 650000)

摘要:近几十年来,多时相遥感影像处理和变化检测是遥感领域一个较为活跃的研究方向。森林是陆地上最大的生态系统,其变化对于全球生态环境、生物多样性和气候变化有重要影响。及时准确获取森林动态变化信息,对于碳源估测、实现森林资源可持续经营管理等具有重要意义。本文通过阅读大量国内外相关文献,对森林变化检测技术进行了系统的比较总结,将其归纳为6个大类,详细论述了各种方法的基本原理和特点并对其适用范围和优缺点进行了论述,以期对林业管理提供一定参考方法。

关键词:森林;变化检测;多时相影像;遥感技术

中图分类号:S771 文献标识码:A 文章编号:1003-5508(2018)03-0013-07

Comparison of Forest Change Detection Methods

XIE Xin-xian YUE Cai-rong* HUO Peng
(Southwest Forestry University, Kunming 650000, China)

Abstract: In recent decades, multi-temporal remote sensing image processing and change detection had been a relatively active research direction in the field of remote sensing. Forests belonged to the largest ecosystems on land and their changes had important implications for the global ecological environment, biodiversity and climate change. Obtaining timely and accurate information on forest dynamic changes would be of great significance for estimating carbon resources and achieving sustainable management of forest resources. In this paper, through a large number of related literature at home and abroad, the forest change detection technology had been systematically compared and summarized, and it was summarized into six major categories. A detailed discussion was made on the basic principles and characteristics of various methods and their application scope, advantages and disadvantages, aiming to provide a certain reference method for forest management.

Key words: Forest, Change detection, Multi-temporal images, Remote sensing

森林生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,它作为全球碳平衡的巨大贡献者,受到人们的关注和重视(FAO,2001)。因此有关森林信息的提取及动态变化的研究,对揭示生态系统环境的变化及植被恢复和重建布局等具有重要意义。

森林变化检测就是利用同一区域不同时相的各

种数据(例如遥感影像、地理数据、林业档案数据等),采用空间分析、统计分析、图像分析识别、数学模拟等多种方法,来提取森林变化信息,定量分析和确定森林变化的特征与过程,进而分析这些动态变化的特点与原因。

目前运用于森林变化检测的数据和方法很多。

收稿日期:2018-03-12

基金项目:国家自然科学基金项目(31260156)资助。

作者简介:谢馨娴(1994-),女,四川资阳人,在读硕士,从事资源环境遥感研究。e-mail:745437272@qq.com

*通讯作者:岳彩荣(1964-),男,教授,从事遥感与地理信息系统研究。e-mail:cryue@163.com

其中,由于遥感数据具有周期性获取、多尺度空间分辨率、多波段类型等特征,遥感数据已经成为森林动态变化监测的主要数据来源。下面就以遥感数据为基础,介绍几类常见的森林变化检测方法。

1 时间序列分析法

时间序列分析法是森林变化检测的常用方法。时间序列是指同一种现象在不同时间上的各个数值,按时间先后顺序排列而形成的序列。国内外很多学者对此进行了研究,如 Rogan^[1], Hamzah Tangki^[2], R. H. Fraser^[3]等按时间序列利用不同时期的单幅 TM 影像,进行森林植被覆盖度的变化监测,并做了相关的精度评价。沈文娟等^[4]以南方人工林分布区域广东省佛冈县为例,运用 Landsat 生态系统自适应处理系统(LEDAPS)预处理生成标准的地面反射率数据构建 Landsat 时间序列堆栈(LTSS),用 LandTrendr 算法监测人工林森林干扰与恢复的长时间序列变化,分析了连续 24a 森林干扰的年份变化、干扰量以及干扰持续的时间。

森林变化时间序列分析中,较为常见的是 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 时间序列分析^[5],即利用长时间序列的遥感数据,建立研究对象的 NDVI 时间变化曲线。把每个时期的 NDVI 值绘在时间轴上,形成一个 NDVI 时间序列曲线(图 1),其既可以是针对单个像元 NDVI 的曲线,也可以是针对区域平均 NDVI 的曲线。

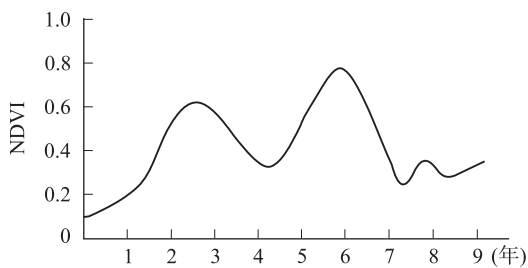


图 1 NDVI 时间序列曲线

时序变化分析就是对不同尺度时间段上的聚合数据进行分析,研究地表在不同时间段之间的差异和变化规律。森林变化主要体现在 NDVI 时间序列曲线的形状变化和数值变化上,一般采用数值分析、函数分析两种手段从 NDVI 时间序列曲线上提取森林变化信息。

数值分析:主要包括计算 NDVI 时间序列曲线

的差值、距平、异常度、方差、最大(小)值、平均值、条件概率等统计参数,或提取植被生长始末时间、生长峰值、生长期时段等关键物候信息,或提取曲线斜率、包络线等定量或定向的分析变化信息。其中,差值是最常用的指标,即对不同时间段的 NDVI 值进行差值计算,通过分析差值的大小、正负,进而判断植被的变化幅度和生长衰退趋势。例如:当 NDVI 的时间差值大小超过一定阈值时,认为该区域的森林发生变化(NDVI 值增加,植被生长;NDVI 值降低;植被减少或死亡)。

函数分析:主要采用拟合线性函数来反映植被覆盖变化趋势;或采用频谱分析对 NDVI 时间序列曲线进行分解,从而检测出森林变化或者土地覆盖变化以及地表植被生态系统的物候变化,进而分析植被长时序变化与气候、环境变化之间的关系^[6]。

综上,时间序列分析法不仅能定性识别森林变化,而且能定量提供森林干扰发生时间和干扰强度。

2 基于植被指数的变化检测

由于植被生长具有季节性规律,不同植被类型在不同季节的影像上会表现出明显的差异,因此,植被季相性的差异会影响森林变化检测的结果。利用植被指数来克服植被生长的季节性规律,是森林变化检测的常见手段,如上述提到的归一化植被指数 NDVI、此外还包括增强型植被指数 EVI、绿度植被指数 GVI、垂直植被指数 PVI、综合森林指数 IFI 等,均常用于森林变化检测。如采用同一像元在两时相的 PVI 和 GVI 构造变化矢量^[7]提取植被变化信息,最后对变化矢量强度进行阈值分割以确定变化像元,并根据每个变化像元的变化矢量方向角的分布情况确定该像元的变化类别。又如以小班为单位,利用棋盘分割法对遥感影像进行分割,获得以小班为单位的影像图斑,利用 NDVI 植被指数差值法,通过 ROC 曲线阈值法得到不同的阈值,区分出林地植被未变化、减少或增加的小班^[8]。

植被指数常选用近红外波段和红光波段作为组合,植被对这两个波段的光谱响应差别明显,这种差别随着树冠结构和植被覆盖的变化而变化,因而可以通过它们之间的比值、差值和线性变换等运算来增强和揭示植被信息^[9]。

应用植被指数监测植被变化针对性强,排除了

非植被信息的干扰,增强了植被在不同波谱段的光谱响应特性,同时抑制了传感器、光照、大气、和地形等因素引起的伪变化干扰,但同时也增强了随机噪声和相关噪声^[10]。

3 基于像元值对比的变化检测

基于像元值对比的变化检测,以遥感图像代数运算为基础来提取森林变化信息。即基于已正射校正好的两时相遥感影像,对两影像中的各波段灰度值进行差值、比值、回归等代数运算,进而确定地表的变化量。

3.1 差值法

图像差值法是森林变化检测技术中较为常见的一个方法。该方法是把不同时相、同一波段图像的对应该元值相减得到差值图像。对差值图像设定阈值得到图像的变化区域(公式1)。在差值图像中,没有变化的区域,其差值为0或接近0;有变化的区域,其差值可能为正或负。为了使图像差值不为负,常加一个常量C,或直接取差值的绝对值。差值图像的亮度值常近似于高斯分布,未发生变化的像元多集中在均值周围,而发生变化的像元主要分布在直方图的两翼^[11]。

$$\begin{cases} D = DN_{t_1} - DN_{t_2} + C \\ Y = \begin{cases} 1, & |D| > \theta \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中: D 为差值图像像素值; DN_{t_1} 和 DN_{t_2} 分别为 t_1 、 t_2 时相的图像像素值; C 为常数。 Y 为差值图像二值化结果; θ 为选取的阈值;1表示区域光谱发生了变化,0表示区域光谱未发生变化。

图像差值法具有简单直观、运算速度快、生成结果易于分析的特点。当地物类型较单一,色调纹理较均匀,变化特征较明显时,差值法对森林变化信息的提取效果较好。研究表明,图像差值法能更好地检测出植被在不同时段的变化,定量地反映植被覆盖的总体变化趋势,但不能揭示变化过程的详细信息以及不同植被覆盖类型之间的转换^[12]。此外,差值法也容易造成信息丢失或判断误差。

3.2 比值法

比值法是将两时相同一波段的对应像素值相比,得到比值图像,如公式(2)。在比值图像中,没有变化的区域,其比值结果等于1或接近于1;在变

化了的区域,其比值结果远大于或远小于1。

$$D = \frac{DN_{t_1}}{DN_{t_2}} \quad (2)$$

式中: D 为比值图像像素值; DN_{t_1} 和 DN_{t_2} 分别为 t_1 、 t_2 时相的图像像素值。

比值图像对图像的乘性噪声不是很敏感,能很好地抑制太阳高度角、阴影和地形的影响,且在一定程度上能够减少图像噪声和阴影等因素对检测结果的影响。

3.3 图像回归法

回归分析方法是先假设不同时期两幅影像线性相关,基于未发生变化区域的影像值,用一个时期的影像对另外一个时期的影像进行线性回归,使用回归方程得出的结果值与原图像值相减,得到的差值影像便是差异性的表现,如公式(3)。

$$\begin{cases} DN'_{t_2} = f(DN_{t_1}) \\ Y = DN_{t_2} - DN'_{t_2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: f 为根据 t_1 时期的森林数据对 t_2 时期的森林状况的回归。这种回归关系可以考虑为森林的正常生长,或者大气、季节、成像条件等外因带来的数据差异。

该方法解决了不同时相影像像元均值差异和方差差异,消除了由于大气条件、季节和太阳高度角等因素的不同所带来的影响;但不足之处就是建立高精度的回归关系往往比较困难,且计算量大。

3.4 变化向量分析法

变化向量分析法是在相对辐射归一化校正的基础上,将不同时相图像各波段之间的辐射变化,作为具有方向和大小的变化向量,对各波段的差异进行分析,确定变化的强度和方向特征。如李春干^[13]以资源三号和高分一号高空间分辨率卫星遥感图像和小班专题图为数据源,采用面向对象的变化向量分析法,基于马氏距离、欧氏距离和相对误差距离度量变化强度,通过目标函数确定最佳检测阈值,以小班为单元进行森林变化检测并进行了相关精度分析。

其原理是在多光谱空间内,把时相 t_1 到时相 t_2 的光谱变化作为具有方向和大小的变化向量,通过空间两点之间的距离求出变化向量(图2(a))。设时相 t_1 和时相 t_2 的像元灰度向量分别为 $B_1 = (B_{11}, B_{12}, B_{13}, \dots, B_{1k})^T$ 和 $B_2 = (B_{21}, B_{22}, B_{23}, \dots, B_{2k})^T$,则变化向量定义为

$$\Delta B = B_1 - B_2$$

式中： ΔB 包含两时像图像中的所有变化信息，变化方向由 ΔB 的向量方向决定。

变化强度为变化向量的模值。若采用欧式距离，则变化强度为：

$$\|\Delta B\| = \sqrt{(B_{11} - B_{21})^2 + (B_{12} - B_{22})^2 + \dots + (B_{1k} - B_{2k})^2} \quad (4)$$

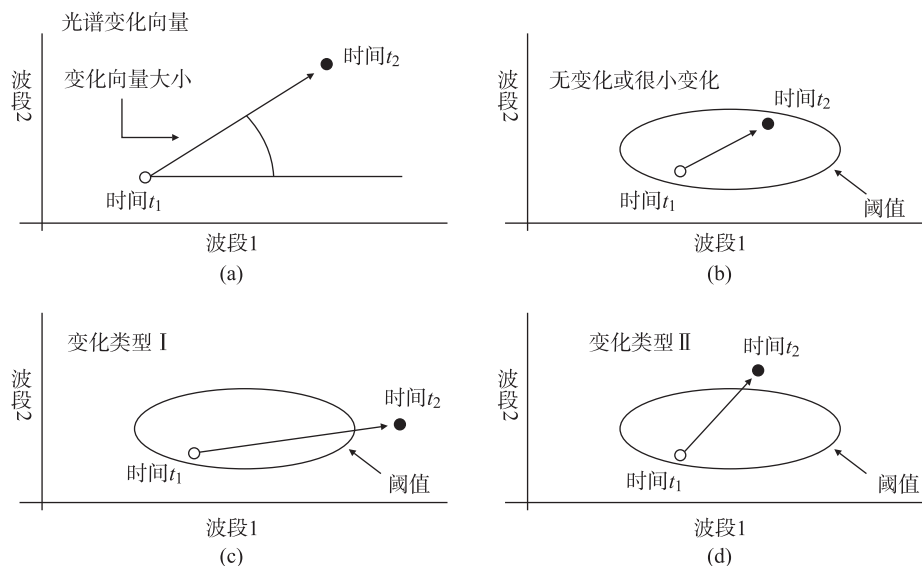


图2 二维空间变化向量分析原理图

在图2中，(a)是对变化向量的定义，根据 t_1 时刻影像的波段1和波段2的像素值可确定时间 t_1 点，根据 t_2 时刻影像的波段1和波段2的像素值可确定时间 t_2 点，从时间 t_1 点指向到时间 t_2 点的向量就是变化向量；(b)内的变化向量大小在阈值之内，因此该像素点对应于未变化区域；(c)与(d)的变化向量均大于阈值，对应于变化区域，但是变化向量的方向不同，对应着不同类型的变化。

变化向量分析法的优点是进行变化分析时可以运用大量的数据或者对所有数据进行处理，并且可以检测出变化类型的信息。但是，随着波段数的增加，变化类型的检测判断会比较困难，其适当阈值的确定也是该方法的难点。

综上，基于像元值对比的变化检测方法运算简单直观、处理速度快，技术核心和难点在于变化阈值的确定，并且不能确定发生变化的地物类型以及变化性质。在森林遥感变化检测中，通过代数运算的方法，可以较直观的了解森林的空间变化，如面积、蓄积量的变化等。此类算法主要适用于一些传统的中低分

$\|\Delta B\|$ 越大则表明两图像差异越大，发生变化的可能性就大。因此，可通过设定阈值来检测某区域是否发生了变化，根据 ΔB 的方向确定变化类型。如图2(b-d)所示，当一种地物随时间变化后其光谱向量也随之发生变化，如果光谱变化信息小于所设定的阈值，则判定其为未变化区；反之，如果光谱变化信息大于所设定的阈值，则判定其为变化区。

辨率遥感图像，是应用最广泛也是最低层次的变化检测方法^[14]。

4 基于图像变换的变化检测方法

由于多光谱图像存在一定程度上的相关性和冗余，可以对多光谱图像进行线性变换，使光谱空间坐标按一定规律旋转，产生一组新的组分图像，将原多波段中的有用信息集中到尽可能少的新组分中，以突出和提取变化信息。以下介绍两种线性变换方法，以及它们在森林变化监测中的应用。

4.1 基于主成分分析的变化检测

主成分分析 PCA (Principal Components Analysis) 又称 k-L (Karhunen - Loeve Transform) 变换。它是在统计特征基础上的多维线性正交变换，是去除相关、特征提取、数据压缩的有效方法^[15]。PCA 变换后通常选取变换后波段方差总和占原始数据总方差 85% 以上的波段为图像的主成分波段，剩余的波段剩下的多为“噪音”。这样，既能保留原始数据的绝大

部分信息,又达到减少变量、简化问题的目的^[16]。

基于 PCA 变换法的优点是:可以有效分离影像的信息和噪声,进而突出主要的地物目标。缺点是:算法复杂,操作困难,计算量大,并且变换后各波段没有明确的物理意义。主要应用于高光谱遥感数据。在变化检测时,根据 PCA 具体的实施策略操作方法不同,又可以分为以下几种:

4.1.1 主成分差异法

主成分差异法是将预处理后的多时相图像分别进行主成分变换,再对变换后的两时相图像进行差值计算,最后将前几个主成分差值重新进行波段组合,从组合中体现森林差异的一种方法。

经主成分变换后,两时相图像的主要信息集中在前几个主成分中,故前几个主成分所对应的差值就反映了原始图像中的变化信息。但是,虽然前几个主成分中涵盖了遥感图像的绝大部分信息,仍不能从单一主成分差值图中直接目视解译出森林动态变化信息,因此常在主成分差值后再将这些主成分差值进行波段组合以此来判断是否发生了动态变化。主成分差异法在显示变化区域方面效果较好,但比较笼统,变化的细节表现力不强^[17]。

4.1.2 差异主成分法

差异主成分法是将预处理后的多时相的图像按对应波段逐一进行差值计算,再对差值图像进行主成分变换。差值处理能滤除两幅影像的相同背景、噪声以及由于“同物异谱”现象所误提的碎斑,得到仅包括主要变化信息的差值图像。再根据主成分变换后差值图像的信息比例,选取前几个主成分来提取森林变化信息。与主成分差异法相比,它在提取变化细节上效果更为理想。

4.1.3 多波段主成分法

多波段主成分法是将预处理后的两时相图像按需求将波段重新组合成一幅新的图像,再对该图像进行主成分分析的一种方法。它根据主成分分析中各成分的信息比,选择主成分影像分析动态信息。这种方法能够分离信息、减少相关,具有突出不同地物目标的优点。

4.2 基于缨帽变换的变化检测

缨帽变换(Tasseled Cap),又称为 K-T(Kauth-Thomas Transformation)变换或穗帽变换。它是 Kauth 和 Thomas 在 1976 年提出的一种脱胎于主成分变换的线性变换方法。目前,缨帽变换主要用于 Landsat

卫星系列的传感器图像。遥感影像通过缨帽变换,可提取亮度(Brightness)、绿度(Greenness)和湿度(Wetness)图像。相对于主成分变换,缨帽变换减弱了土壤背景值对植物光谱的影响,突出了影像中的植被信息,这在森林变化检测方面起到了很大的作用。

基于缨帽变换检测森林动态变化的方法有很多。如可以直接对不同时期像的绿度指数进行差值获取变化信息,也可以利用缨帽变换的亮度、绿度、湿度指数进行彩色波段组合进行变化信息检测。如范应龙^[18]曾以热带森林复杂区域为研究对象,采用缨帽变换结合黑暗对象掩膜与局部直方图阈值提取等方法,获取缨帽变换的“衍生数据”:亮度、绿度、湿度指数组合以检测热带森林变化,获得较好结果。此外,还可以基于亮度、绿度、湿度指数的归一化线性组合,形成扰动指数 DI,公式如(5)。再对各期数据的扰动指数进行差值运算,从差值图上提取森林变化信息^[19]。此外,由于缨帽变换是一种特殊形式的主成分变换,因此基于主成分变换的各种变化检查法同样适用于缨帽变换。

$$\begin{cases} B_n = (B - B_\mu) / B_\sigma \\ G_n = (G - G_\mu) / G_\sigma \\ W_n = (W - W_\mu) / W_\sigma \\ DI = B_n - (G_n + W_n) \end{cases} \quad (5)$$

式中, B_n 、 G_n 、 W_n 分别为归一化后的亮度、绿度、湿度; B_μ 、 G_μ 、 W_μ 为森林的亮度、绿度、湿度的均值; B_σ 、 G_σ 、 W_σ 为森林的亮度、绿度、湿度的方差。

研究表明,多时相缨帽变换在短波红外与近红外波段对森林变化信息较为敏感,能有效地消除噪声等非目标信号,突出变化目标信号;多时相缨帽变换的差值不仅能检测出森林内部的细微变化,而且对小图斑变化检测优势明显,有利于变化信息的目标提取与解译。

5 基于特征级的变化检测

基于特征级的变化检测又叫图像空间特征的变化检测,其核心是提取影像特征。通过提取影像特征分析、比较这些特征来获取变化检测的结果^[20]。提取的影像特征有统计特征、纹理特征和空间结构特征。常见的统计特征有影像的均值、方差和矩特征等;纹理特征通常用 Gabor 滤波器和灰度共生矩阵(Grey Level Co-occurrence Matrix)来提取;空间结构

特征主要包含边缘、形状和轮廓特征等。由于遥感图像向着高空间分辨率的方向发展,使得一些具有空间结构和纹理细致的遥感图像在处理中容易破碎,所以基于特征级的检测变化的方法研究逐渐成为热点。

6 基于分类的变化检测方法

基于分类的变化检测方法通过分类手段提出特定的专题信息,进而来分析森林信息变化;主要包括两种模式:一是分类后比较法,另一种是多时相图像直接分类法,也称光谱/时相分类。

6.1 分类后比较法

分类后比较法首先选用合适的分类器对各时期遥感影像进行分类,然后对各时期的分类结果进行叠置分析,对比前、后时相分类图上每一个像元的类别属性,将前、后时相分类图上分别属于不同类别的像元标记为变化像元,以确定变化信息的特征,制作变化信息专题图。如任冲等^[21]以1988—2015年5期夏季 Landsat TM/OLI 遥感影像为主要数据源,结合辅助数据和外业实地样本点,以光谱特征和指数特征为特征变量,分别利用随机森林(RF)和参数优化支持向量机(POSVM)分类器对土地覆盖类型进行分类,然后基于分类后比较法进行森林资源动态变化监测并进行分析。

在分类后变化检测前,通常需要统一各时相影像的分类体系。由于分类器在不同应用条件下的分类精度是不同的,而分类精度会直接影响森林变化检测的准确性,因此这就需要根据具体情况对各时相影像采用不同的分类器,以期获得各期数据的精确分类;此外,还需要结合人工目视解译和野外核实方式进一步校正分类结果。

在森林变化检测中,分类后比较法对有林地、非林地未发生变化的部分的识别精度相对较高;对于植被波谱信息值相近的有林地与未成林地,它们之间的相互转化的区域判别精度相对较低;另外,林地与耕地之间的区分也存在一定的难度^[22]。

分类后比较法能规避多时相数据因获取季节不同和传感器不同所带来的数据不匹配问题,能直接获取变化的类型、位置和范围。但分类后比较法不能检测到地表类型的细微变化,而且要求建立合理的分类类别体系,若类别划分得不合适,则将无法得到理想的分类结果,也就无法检测变化。同时,由于分类

结果的可靠性严重影响变化信息的准确性,因此分类后比较法对分类精度要求较高。

6.2 多时相直接分类法

多时相直接分类法是把不同时相遥感影像看作同一时相不同波段的影像,用分类的方法检测出发生变化的类别^[23]。多时相直接分类法能够确定变化区域、获得变化类型,同时避免了区域面积过分估计、不合乎逻辑的变化类型和多次分类误差的累积,但该方法人为干预较多,效率较低。

目前随着遥感影像的分辨率不断提高,引入了面向对象分类^[24]的方法,通过对象的光谱、形状和纹理等特征分类进行变化检测,但该方法也有一定的弊端,其中所涉及的分割尺度、特征提取、变化阈值等问题一直是人们研究的热点,直接关系变化检测精度的高低。面向对象的变化检测方法可以避免传统方法所带来的弊端,目前大致可以分为两大类:一类是面向对象的分类后比较法^[25-27],另一类是通过遥感动态监测方法获取对应像斑的变化信息,建立变化类型转换矩阵对变化信息进行分类^[28-30]。目前,第一种方法用得比较多,后面用得比较少,但这两种方法产生的误差都是分类误差。这里主要介绍第一种方法——采用面向对象分类后比较法进行变化检测时,需要分割影像,获取均质性较高的对象,分析并提取对象的光谱、形状、纹理等特征,建立分类规则进行分类,然后比较分类结果,通过设定阈值来获取变化信息。影像分割时,通常采用多尺度分割算法,棋盘分割算法等,若是通过土地利用图和遥感影像配准叠加获得的像斑,则需再划分为子像斑,以保证像斑的均质性。

综上所述,介绍了森林变化检测中的几种常见方法。但是由于不同方法对变换光谱信号的敏感性不同,各种森林特征和背景环境的光谱响应不同;在实际应用中,通常需要多方法实验、改进现有方法,才能确定适合研究对象和数据的方法来检测森林变化。

参考文献:

- [1] Rogan J, Franklin J, Roberts D A. A comparison of methods for monitoring multi-temporal vegetation change using thematic mapper imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 1: 143 ~ 156.
- [2] Hamzah Tangki, Nick A. Chappell. Biomass variation across selectively logged forest within a 225 - km² region of Borneo and its prediction by Landsat TM[J]. Forest Ecology and Management, 2014, 256: 1960 ~ 1970.

- [3] Fraser R H, Olthof L, Pouliot D. Monitoring land cover change and ecological integrity in Canada's national parks[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113: 1397 ~ 1409.
- [4] 沈文娟, 李明诗. 基于长时间序列 Landsat 影像的南方人工林干扰与恢复制图分析[J]. *生态学报*, 2017, 37(5): 1438 ~ 1449.
- [5] 汤冬梅, 樊辉, 张瑶. Landsat 时序变化检测综述[J]. *地球信息科学学报*, 2017, 19(8): 1069 ~ 1079.
- [6] 赵英时, 等. 遥感应用分析原理与方法(M). 北京, 科学出版社, 2013, 273 ~ 276.
- [7] 余卉, 贾永红. 武汉市白沙洲大桥区植被变化遥感监测新方法[C]//2006 遥感科技论坛暨中国遥感应用协会 2006 年年会. 2006.
- [8] 刘俊. 基于 3S 技术的县级森林资源动态监测研究[D]. 南京林业大学, 2016.
- [9] 李世明, 王志慧, 韩学文, 等. 森林资源变化遥感监测技术研究进展[J]. *北京林业大学学报*, 2015, 03: 132 ~ 138.
- [10] 王莉莉. 基于遥感影像与矢量图的土地利用图斑变化检测方法研究[D]. 长安大学, 2007.
- [11] Singh A. Change detection in the tropical forest environment of northeastern India using Landsat. In: Eden M J, Parry J T. *Remote Sensing and Land Management*, 1986, 237 ~ 253.
- [12] Guo W Q, Yang T B, Dai J G, et al. Vegetation cover changes and their relationship to climate variation in the source region of the Yellow River, China, 1990 - 2000. *Int J Remote Sensing*, 2008, 29(7): 2085 ~ 2103.
- [13] 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.
- [14] 杜龙. 基于高分影像的林地动态变化检测研究[D]. 西安科技大学, 2016.
- [15] 郭云开, 周家香, 黄文华, 等. 卫星遥感技术及应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2016: 150 ~ 150.
- [16] 何晓群. 多元统计分析[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2008: 152 ~ 191.
- [17] 莫德林, 刘克江, 曹彬才, 等. 基于主成分分析的遥感图像变化检测[J]. *遥感与航空摄影*, 2013(5): 53 ~ 56.
- [18] 范应龙, 谭炳香. 两种热带森林覆盖变化检测方法比较研究[J]. *林业科学研究*, 2015, 28(3): 325 ~ 331.
- [19] 范应龙. 柬埔寨森林覆盖变化遥感监测研究[D]. 中国林业科学研究院, 2014: 51 ~ 53.
- [20] 张剑清, 余琼, 潘励. 基于 LBP/C 纹理的遥感影像居民地变化检测[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2016, 33(1): 7 ~ 11.
- [21] 任冲, 鞠洪波, 张怀清, 等. 天水市近 30 年林地动态变化遥感监测研究[J]. *林业科学研究*, 2017, 30(1): 25 ~ 33.
- [22] 周蔚. 基于 TM 的森林资源地类动态估计方法及应用[D]. 南京林业大学, 2010: 16 ~ 24.
- [23] 赵忠明, 孟瑜, 汪承义, 等. 遥感图像处理[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 213 ~ 214.
- [24] 容丽娜. 基于面向对象分类的高分辨率遥感影像变化检测研究[D]. 西安科技大学, 2017.
- [25] Su X, Wu W, Li H, et al. Land-Use and Land-Cover Change Detection Based on Object - Oriented Theory[C]// International Symposium on Image and Data Fusion. IEEE, 2015: 1 ~ 4.
- [26] Hazel G G. Object-level change detection in spectral imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience&Remote Sensing*, 2001, 39(3): 553 ~ 561.
- [27] Hong L. Classification of high resolution remote sensing image based on geo-ontology and conditional random fields[C]// Eighth International Symposium on Multispectral Image Processing and Pattern Recognition. 2016: 89210S.
- [28] Wang X. Object-oriented change detection approach for high-resolution remote sensing images based on multiscale fusion[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2013, 7(1): 073696.
- [29] Sun K, Li D, Sui H, et al. Object-Level Change Detection Based on High-Resolution Remote-Sensing Images and its Application in Japanese Earthquake on March 11, 2011 [J]. *Tourism Economics*, 2012, 1 - 7(16): 249 ~ 256.
- [30] 吴俊政, 严卫东, 倪维平, 等. 基于图像融合与多尺度分割的目标级变化检测[J]. *电光与控制*, 2013, 20(12): 51 ~ 55.