

引用格式: 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. [ Tang D M, Fan H, Zhang Y. 2017. Review on Landsat time series change detection methods. Journal of Geo-information Science, 19(8): 1069-1079. ] DOI:10.3724/SP.J.1047.2017.01069

# Landsat 时序变化检测综述

汤冬梅, 樊辉\*, 张瑶

1. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650091; 2. 云南省国际河流与跨境生态安全重点实验室, 昆明 650091

## Review on Landsat Time Series Change Detection Methods

TANG Dongmei, FAN Hui\* and ZHANG Yao

1. Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming, 650091, China; 2. Yunnan Key Laboratory of International Rivers and Transboundary Eco-Security, Kunming 650091, China

**Abstract:** Change detection based on Landsat time series has become one of the most popular methods of remote sensing change detection. This paper reviews the status of Landsat time series change detection, including comparison of change detection algorithms, Landsat time series construction and accuracy assessment of change detection results. Major problems and challenges of performing Landsat time series change detection are presented. Landsat time series change detection algorithms can roughly be classified into three categories, i.e., trajectory fitting methods, spectral-temporal trajectory methods, and model-based methods. These algorithms are mostly developed based on forest disturbance. Only few of them were used to detect changes in other land use/land cover types (e.g. urban expansion). Their applications in other fields need further verification. In particular, the comparative study of those different algorithms should be strengthened, which would provide better guidance for users to select optimal detection methods in specific fields. These indices commonly used for Landsat time series change detection can be divided into four groups, including spectral band, vegetation index, linear transformation and their combinations. It is often suggested to combine the advantages of various indices to detect different disturbance types. Although change detection methods based on Landsat time series have developed rapidly, many challenges remain. Upon now, the lack of consistent reference data set for accuracy assessment of Landsat time series change detection is the most serious challenge. Confronted with new challenges, new approaches are needed to calibrate the time series change detection algorithms.

**Key words:** Landsat images; time series data; change detection; detection indices

**\*Corresponding author:** FAN Hui, E-mail: fanhui@ynu.edu.cn

**摘要** 时序变化检测已成为当前 Landsat 数据主流的变化检测方法。本文从检测算法对比、时序数据构建和精度评价等方面对 Landsat 时序变化检测进行回顾和评述, 进而提出 Landsat 时序变化检测当前所存在的问题, 及其所面临的挑战。Landsat 时序变化检测算法可大致归纳为轨迹拟合法、光谱-时间轨迹法、基于模型的方法 3 大类, 这些算法大多基于森林扰动提出; 变化检测常用指标有波段型、植被指数型、线性变换型、组合型 4 大类, 每类指标的优势不同, 可综合多类指标以更全面地检测

收稿日期 2017-02-03; 修回日期: 2017-05-31.

基金项目 国家自然科学基金项目(41461017); 国家重点研发计划课题(2016YFA0601601); 云南省中青年学术技术带头人后备人才培养计划(2014HB005); 云南大学青年英才培育计划。

作者简介 汤冬梅(1991-), 女, 湖北襄阳人, 硕士生, 主要从事山地环境遥感研究。E-mail: Tangdongmei@126.com

\*通讯作者 樊辉(1972-), 男, 江西修水人, 博士, 研究员, 研究方向为山地环境遥感研究。E-mail: fanhui@ynu.edu.cn

不同扰动类型。尽管 Landsat 时序变化检测已取得长足发展,但仍然面临诸多挑战,其中最大挑战是缺少一致性的参考数据集进行变化检测精度评价。

**关键词** Landsat 影像;时序数据;变化检测;检测指标

## 1 引言

人类在 21 世纪面临的众多挑战大多数与自然和人为因素引起的地表景观与环境特征及空间组织结构变化密切相关<sup>[1]</sup>。监测、分析和应对这些变化是当前地球科学和环境科学领域以及国际研究的热点问题和核心主题<sup>[2-7]</sup>。遥感对地观测增强了人们获取宏观动态、实时数据的能力,为解决上述问题提供了重要数据支撑。

遥感变化检测是定量分析和确定地表变化特征与过程的有效方法。近几十年来,许多遥感变化检测方法被提出、应用、对比分析和评价<sup>[8-10]</sup>,这些变化检测方法可大致分为双时相变化检测和时序轨迹分析 2 大类<sup>[9]</sup>。前者一般要求使用周年期影像以消除植被季节变化和太阳高度角差异对变化检测结果的影响;后者利用遥感指标时间序列来规避最佳周年期影像难以选取的问题,以减弱物候对变化检测的影响。长期以来,时序轨迹分析方法应用主要基于 NOAA/AVHRR、MODIS 等高时间分辨率时序数据集。直到 2008 年美国地质调查局(USGS)向公众免费开放 Landsat 存档数据后<sup>[11]</sup>,基于 Landsat 时序数据的时序轨迹方法,又称 Landsat 时序变化检测方法,才开始被广泛应用<sup>[12-20]</sup>。Landsat 影像具有进行资源管理所需的最佳空间分辨率<sup>[21]</sup>,且连续记录地表变化时间最长<sup>[22-23]</sup>,能满足众多资源管理和生态保护需求。近年来,尽管 Landsat 时序变化检测方法取得了长足发展,但对其进行归纳总结、对比分析的研究并不多见。基于此,本文拟从 Landsat 时序变化检测算法对比、时序数据构建和精度评价等几个方面对 Landsat 时序变化检测方法进行回顾和评述,以期为该方法的应用和发展提供借鉴和参考。

## 2 Landsat 时序变化检测方法

根据变化检测所基于的前提假设和基本原理不同,Landsat 时序变化检测方法大致可分为 3 大类:① 轨迹拟合法,即预先假设变化类型的轨迹,再根据最小二乘法确定每个像元的变化轨迹符合哪种假定变化轨迹来决定变化类型;② 光谱-时间轨迹

法,即根据变化检测指标的光谱-时间轨迹特点,通过设定阈值或参数来确定每个像元的变化类型;③ 基于模型的方法,即通过设定时间变化模型进行变化检测。

### 2.1 轨迹拟合法

Kennedy 等<sup>[24]</sup>提出了基于轨迹的变化检测算法(Trajectory- Based Change Detection Algorithm, TBCD)。该算法前提是认为(recognition)土地覆被变化需经历一定的过程,这些过程会导致地物光谱具有独特的时间特征。其基本原理是变化检测时搜索每个像元完整的光谱时间轨迹,基于最小二乘法确定变化类型,如果其轨迹符合假设的扰动事件轨迹(如简单扰动、扰动和植被恢复、持续的植被恢复、植被恢复到稳定状态),则判定其已经历假定的变化过程。该方法已应用于美国西部针叶林扰动检测,能有效地识别出森林扰动的地点以及扰动强度和扰动后恢复速率,皆伐和择伐引起的森林扰动时间检测总体精度分别达到 91%和 74%<sup>[24]</sup>。Ahmed 等<sup>[25]</sup>利用该方法检测 1972-2004 年加拿大沿海温带森林的扰动历史,并研究其与当前冠层结构的关系,结果表明森林扰动检测总体精度达到 82.8%,平均制图精度和用户精度分别为 75.2%和 68.8%。Ahmed 等<sup>[26]</sup>进一步采用该方法提取每个像元的扰动类型和强度,将森林细分为成熟林和幼林,并结合激光雷达数据提取森林的冠层盖度和高度信息,提高了森林冠层信息提取精度,但容易遗漏掉一些细微扰动。

除了检测森林扰动和评估地上生物量信息,轨迹拟合方法也可被用于检测城市扩张。Xue 等<sup>[27]</sup>假设了 3 种土地利用变化轨迹(稳定的城市用地、植被转化为城市用地、水域转化为城市用地),利用轨迹拟合方法检测了北京地区 1999-2011 年的城市扩张轨迹,稳定和扩张的城市用地检测总体精度可达 83.3%,对应的 Kappa 系数为 0.80。

### 2.2 光谱-时间轨迹法

#### 2.2.1 植被变化追踪算法

植被变化追踪算法(Vegetation Change Tracker, VCT)是基于土地覆被变化过程中光谱-时间轨迹特点来判定扰动事件<sup>[14]</sup>。Huang 等<sup>[28]</sup>采用该算法

检测了美国东部7个州的森林的动态变化,发现其可以检测出绝大多数的森林扰动事件,包括大面积砍伐、火灾和城市扩张等,但很难检测出择伐、暴风雨等引起的森林扰动,其检测总体精度可达80%,制图精度仅为50%~70%,用户精度大多为70%~95%。在高异质景观区,该算法易将农用地误分为森林或森林扰动<sup>[14]</sup>。Stuev等<sup>[29]</sup>将该算法改进为VCTw,即利用冬季影像掩掉农用地,以提高森林扰动检测精度。改进后的VCTw算法更适合于异质性较高农用地和稀疏落叶林区景观。Zimmerman等<sup>[30]</sup>采用基于概率的抽样设计对VCTw算法进行精度评价,结果表明该算法检测的总体精度可达91%,证实了VCTw的优势。

植被变化追踪算法不仅可以检测森林扰动,也可用于研究地上生物量变化<sup>[31-32]</sup>,但该算法是否适用于非森林系统(如湿地系统等)变化检测,还有待进一步研究。

### 2.2.2 LandTrendr算法

LandTrendr (Landsat-based Detection of Trends in Disturbance and Recovery)算法是一种以同步检测出变化趋势和扰动事件为目标的算法<sup>[33]</sup>。该算法采用任意时间分割技术(Arbitrary Temporal Segmentation)分割光谱轨迹,用直线段来模拟时间轨迹的重要特征,分割出直线段端点的时间和光谱值为生成变化图提供所需的基本信息。与TBCD和VCT算法相比,其优势是可更全面检测出渐变和突变事件。例如,在美国普吉特海湾地区森林扰动事件检测中发现,除能检测出中高强度的扰动事件外,还能检测出35%左右的细微扰动,采用传统精度验证和out-of-bag精度验证表明,其制图精度在37%~93%之间,用户精度在49%~93%之间<sup>[34]</sup>。

Landtrendr算法的应用相当广泛,既可检测出由单一自然因素(干旱、虫害等)<sup>[35-37]</sup>和人为因素(如橡胶林的扩张等)<sup>[38]</sup>引起的森林扰动,又能检测出由混合因素引起的森林扰动<sup>[33,39-40]</sup>。此外,该算法还可以将Landsat时序数据与雷达数据相结合以检测森林生物量的动态变化<sup>[41]</sup>。

## 2.3 基于模型的方法

### 2.3.1 BFAST算法

BFAST (Breaks For Additive Season and Trend)算法由Verbesselt等<sup>[42]</sup>基于MODIS时序数据集提出。该算法通过整合迭代技术,将时间序列数据分解成趋势、季节性、噪声3个成分,以减弱噪声和季节

性趋势对变化检测结果的影响<sup>[42]</sup>。Devries等<sup>[43]</sup>将该算法应用于Landsat时序变化检测,可检测出小范围的森林扰动,其总体检测精度达到78%,制图精度和用户精度可达73%,但该算法不能检测扰动后的森林恢复和反复扰动事件。

### 2.3.2 CMFDA算法

CMFDA (The Continuous Monitoring of Forest Disturbance Algorithm)算法对预测图像和观测图像进行差分,进而根据变化次数来判识发生变化的像元。该算法充分利用Landsat时序数据中所有无云观测值进行变化轨迹模拟。若某像元连续变化3次,则判定为变化像元;若某像元连续发生1次或2次变化,则判定为可能变化。Zhu等<sup>[16]</sup>将该算法应用于萨凡纳河流域森林扰动检测,其检测结果的制图精度、用户精度和时间精度均达到90%以上。

### 2.3.3 CCDC算法

CCDC (Continuous Change Detection and Classification)算法基于所有可用Landsat影像,先根据各像元时序中15个无云观测值初始化模型,然后通过对比模型预测值和观测值之间的差异来检测变化<sup>[19]</sup>。若某像元时序中的观测值和预测值差异连续超过阈值3次就判定为变化。与CMFDA算法类似,该算法可以检测多种土地覆被变化,包括渐变(如植被生长和演替、虫害、异常气候等带来的变化)和突变。该算法还可应用于提高土地覆被分类精度。由于CCDC算法利用了全部可用的Landsat影像,其变化检测结果比仅利用准周年影像更全面,尤其是在渐变检测方面更为有效<sup>[20]</sup>。Zhu等<sup>[44]</sup>对比分析了简单线性趋势和CCDC算法在检测城市近郊绿度趋势的潜力,结果表明在检测绿度变化总趋势时,简单线性趋势方法比CCDC算法精度更高;但在检测土地覆被变化区域的绿度趋势时,CCDC算法能提供更为详细和更精确的信息(分别评估渐变和突变),其制图精度和用户精度分别为67.88%~85.19%和68%~97.30%。但是,缺少评价变化检测结果的参照数据是该算法面临的最大挑战<sup>[20]</sup>。

## 2.4 Landsat时序变化检测优势与局限性

表1总结了主要Landsat时序变化检测方法的优劣与局限性。TBCD、VCT、LandTrendr等算法在检测森林变化方面比传统方法更自动化,几何配准、物候、地物二向反射分布函数(BRDF)变化等噪声对这些算法的影响更小<sup>[14,24,33]</sup>。但这些方法仍然存在一定的局限性,如采用的影像多局限于受云或



雪影响较小的同一季节。虽然一些指标如森林综合得分(IFZ)<sup>[14]</sup>和扰动指数(DI)<sup>[12,16,45-46]</sup>可以减少物候和BRDF影响,但它们不适合应用于植被类型高度异质化区域。为解决影像受云污染导致的数据

缺失问题,Hilker等<sup>[12]</sup>融合MODIS和Landsat影像来检测加拿大地区森林扰动以提高检测的时间频率。CCDC算法<sup>[19]</sup>对高异质性区域不敏感,不需要对所有影像进行归一化处理,但其需要借助大量高

表1 主要Landsat时序变化检测方法的优势与局限性

Tab.1 The advantages and limitations of major Landsat time series change detection methods

变化检测技术	方法	适用范围	优势	局限性	例子
轨迹拟合法	TBCD	捕捉变化趋势和事件;检测森林扰动的的时间和地点,扰动强度和恢复速率;主要检测以年为步长的变化	自动化;不需要选取非森林样本;不需要特定的阈值;可以评估不连续的(森林扰动时间和强度)和连续的现象(扰动后的森林恢复);充分利用已有数据来设定假设轨迹和统计阈值,避免手工解译和人为干预	主要误差来源为时序数据中的配准误差;依赖Landsat影像的时间长度;效率低;只有当观测的曲线符合假设曲线时才起作用	自动分析森林扰动轨迹,检测总体精度为84%,Kappa系数为0.77。其中,皆伐检测总体精度为91%,Kappa系数为0.87;择伐检测总体精度为74%,Kappa系数为0.60 <sup>[24]</sup> 森林扰动时间检测的总体精度为83% <sup>[25-26]</sup> ;城市扩张检测的总体精度为83%,Kappa系数为0.80 <sup>[27]</sup>
	VCT	检测大多数突变的森林扰动事件(火灾和城市扩张)、非突变的森林扰动事件(择伐)	高度自动化;除非不同森林系统并存,很少或不需要微调;部分质量差的观测点对检测结果影响很小或没有影响;检测结果对相对大气纠正不甚敏感;效率高,分析12幅或更多影像的时序数据只需2-3小时	太多质量差的观测点连续出现会导致伪变化;不能检测出所有的森林扰动类型;现有参考数据集无法满足变化检测评价要求;应用于高异质化景观区域会出现问题	重建森林干扰的历史轨迹,扰动时间检测总体精度为77%-86%,Kappa为0.67-0.76 <sup>[14,48]</sup> 森林变化历史(植树造林、砍伐),检测结果总体精度为89%,Kappa系数为0.86 <sup>[31,49]</sup> 评估人工林生物量 <sup>[32]</sup> 、绘制森林扰动图,估计标准误差为0.8%时,整个研究区检测总体精度为91% <sup>[30]</sup>
基于模型的方法	LandTrendr	捕获森林扰动和恢复过程中的渐变和突变事件,主要检测以年为步长的变化	可以同时捕获变化趋势、渐变和突变事件;通过一系列的控制参数可减少时间分割过程中的过拟合问题	需要设计一系列的控制参数和滤波过程来降低时间分割过程中的过拟合现象,且捕捉理想的轨迹特征过程很复杂	检测森林扰动和恢复趋势,可以捕捉到大范围的扰动和恢复现象 <sup>[33,39]</sup> 、检测虫害的影响 <sup>[35]</sup> 、原始森林的变化 <sup>[40]</sup> 、预测地上生物量的动态趋势 <sup>[41]</sup> ,突变扰动检测总体精度为80% <sup>[34]</sup> ;森林扰动检测总体精度为86% <sup>[38]</sup>
	BFAST	可以检测季节变化;可以处理不同的遥感时序数据;可以应用于其它季节性或非季节性变化检测	不受噪声和季节性趋势的影响	不能检测扰动后的恢复和重复扰动过程	检测热带森林砍伐和退化,其总体精度为87% <sup>[43]</sup>
	CMFDA	检测年内和年际间的森林变化;检测自然扰动和人为扰动	全自动化;只要有新的观测数据就可连续检测森林扰动;当连续有3个清晰的观测点时,该算法很稳健;该方法可以降低坏条带来的问题;不仅可以检测人为的森林扰动,也可以检测自然因素导致的森林扰动;可以在30 m的空间分辨率和几周的时间分辨率上提供扰动发生的时间和位置图	该算法的效果取决于足够的观测数据,其效率与建立预测模型有关;该算法是基于检测时段只发生一次变化的假设,当检测时段发生多次变化时,该方法就不成立;检测变化的耗时比传统方法少	连续检测由人类干扰引起的森林扰动,其总体精度可达99% <sup>[16]</sup>
	CCDC	可模拟趋势、季节性变化、突变等,可检测多种土地覆被变化类型(物候变化、缓慢的年际变化、突变);可在任何给定的时间绘制出土地利用图	完全自动;可以检测多种类型的土地覆被变化;不需要经验性或全局性的阈值;该算法的运算速度取决于可用观测点的频率;不需要对每幅影像进行标准化处理;不受噪声的影响;不仅可以诊断出年内的趋势也可以诊断出年际趋势;可以应用于高异质化景观区域	该算法需要大量储存数据;计算成本高;需要很多高时间分辨率的清晰数据;该算法可能不适用于农业地区;不适合应用于年际变化较大的区域;无法检测到模型初始化期间的变化	连续检测土地覆被变化和分类 <sup>[19]</sup> ,其总体精度为90%分析绿度变化的趋势,其总体精度为87% <sup>[44]</sup> 连续检测缓慢变化包括年际和年内的变化 <sup>[20]</sup>

时间分辨率的无云观测值来提高模拟精度。若其检测时序中无云观测值的数量少于15个,则CCDC算法将无法初始化时序模型。

### 3 Landsat时序数据构建

#### 3.1 影像选择

如何合理选择影像以减少太阳高度角、物候等对Landsat时序变化检测结果的影响,是当前Landsat时序变化检测关注的主要问题。影像选择主要包括卫星过境时间和频率选择,取决于研究区已有影像的质量。有些地区(如美国),Landsat影像多且质量比较好,影像选择相对容易,可采用CCDC算法<sup>[16,19,43]</sup>基于所有可用Landsat影像来检测研究对象的季节和趋势变化。但在其他地区,特别是雨季比较长的热带地区,因受云覆盖影响,年内可用影像数量很少。例如,Landsat 轨道号129/044覆盖的区域在1988–2016年所有TM、ETM+、OLI影像的云盖量统计情况(图1)表明,可用影像(云盖<20%)年内分布极为不均匀,约80%可用影像集中在1、2、3、4、11、12月,其中约50%集中在2、3月,并且质量7影像占有所有影像的36%。这些地区的影像难以满足地物年内变化特征检测的需要,一般可选用准周年影像,采用LandTrendr等算法<sup>[14,24,33]</sup>以检测地物变化趋势。

准周年影像通常是在周年影像难以获得时的一种替代选择。植被在生长旺盛期内光谱相对稳定,检测植被变化时,研究者使用最多的是处于植被生长旺季所获得的影像<sup>[14,24,26,28,33,37,41,47–48,50–53]</sup>。

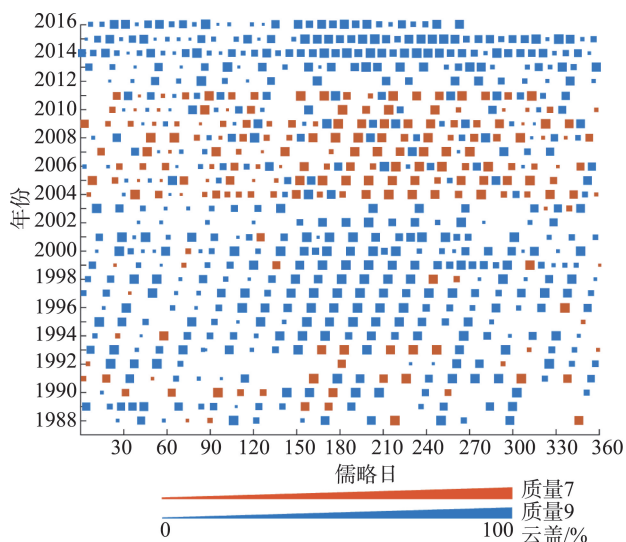


图1 Landsat 影像(129/044)云盖量统计

Fig.1 Statistics on cloud cover in Landsat images (129/044)

Schroeder 等<sup>[50]</sup>采用植被生长季节(5–9月)16幅Landsat 周年影像检测加拿大北方火灾和择伐引起的森林扰动。但在干湿季特别明显的地区,很难获得植被生长季节影像,则可根据研究对象的特点,选择干季植被光谱相对稳定时间段内的影像<sup>[24,38,54]</sup>。虽然处于同一季节的准周年影像可以在一定程度上减弱因物候和太阳高度角不同带来的光谱差异,但仍会影响时序变化检测结果<sup>[9]</sup>。由于太阳高度角和物候差异带来的问题更难处理,所以选择准周年影像时一般遵循卫星过境时间优于云量的原则<sup>[33]</sup>。

#### 3.2 Landsat 影像预处理

辐射校正(包括传感器定标和校准、大气校正、地形校正、相对辐射归一化等)是确保变化检测时序数据同质性的重要步骤,忽视此步骤的检测结果是无效的<sup>[55]</sup>。美国地质调查局(USGS)分别采用Landsat 生态系统干扰自适应处理系统(LEDAPS)和Landsat 8 表面反射代码(LaSRC)将Landsat TM、ETM+和OLI 等级1(level-1)数据转换成地表反射高质量数据产品(Landsat Surface Reflectance Higher-Level Data Products)<sup>[56–57]</sup>。为使Landsat 等级1数据产品为时序分析提供一致的、已知质量的存档数据,USGS将所有Landsat 数据重新归档为1级(Tier 1)、2级(Tier 2)和实时(Real-Time)。其中,1级数据已完成了传感器之间定标,且图像几何配准精度误差在0.5个像元以内<sup>[58]</sup>,故该高质量数据产品适合用于Landsat 时序变化检测。地理配准也是减少变化检测中“伪变化”的重要预处理步骤。但是时序数据构建时,是否需要地理精配准须权衡实际应用需求和时间成本。已有研究表明,地形会对植被指数的计算产生较大影响<sup>[59–64]</sup>。因此,在地形复杂地区,地形效应对Landsat 时序变化检测结果的影响程度如何,以及何种情况下需纠正地形效应的影响,值得进一步研究。

此外,如何消除Landsat ETM+中坏条带的影响是构建长时序Landsat 数据所需解决的问题。通常,可利用邻近时间或同一季节可用像元进行替换来增加可用像元的比例,或不进行替代处理,直接用掩去坏条带后的影像构建时序数据<sup>[16,19,43–44]</sup>。

#### 3.3 指标的选取

表2列出了Landsat时序变化检测采用的常见指标。这些指标可大致分为4类:波段型、植被指数型、线性变换型和组合型。波段型是指直接利用原始波

段进行变化检测,最常用波段为短波红外波段(SWIR),它是描述植被结构和检测森林变化<sup>[46,65-66]</sup>,或推断植被烧伤程度的重要波段<sup>[67]</sup>。单一波段无法充分利用所有波段信息,难以诊断不同变化类型,所以一般建议采用多个波段或多种指标进行对比分析<sup>[16,19]</sup>。

常见的植被指数型指标包括归一化差异植被

指数(NDVI)、增强型植被指数(EVI)、归一化差异湿度指数(NDMI)、归一化燃烧率(NBR)等。其中,NDVI是使用最广泛的植被指数<sup>[68]</sup>。NDVI和EVI与叶绿素含量、叶面积指数、光合作用能力等有很高的相关性,被广泛用来分析植被的绿色趋势<sup>[44,69-70]</sup>。与NDVI相比,EVI受大气条件、土壤背景的影响较

表2 Landsat时序变化检测的主要指标

Tab.2 Major indices used in Landsat time series change detection

类别	指标	公式	例子
波段型	短波红外波段	$\rho_{SWIR1}、\rho_{SWIR2}$	森林扰动及恢复轨迹检测 <sup>[24]</sup> 、野火及伐木引起的森林扰动检测 <sup>[50]</sup>
	所有波段	$\rho_B、\rho_G、\rho_R、\rho_{NIR}、\rho_{SWIR1}、\rho_{SWIR2}、TIR$	多种土地覆被变化检测和分类 <sup>[19]</sup> 、土地覆被变化检测及土地覆被分类 <sup>[44]</sup>
植被指数型	归一化差异植被指数(NDVI)	$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R}$	连续森林扰动检测 <sup>[16]</sup> 、植被缓慢变化(植被恢复、病虫害)检测 <sup>[20]</sup> 、森林扰动和恢复趋势检测 <sup>[33]</sup> 、量化干旱导致的森林扰动 <sup>[37]</sup> 、沿边地区森林扰动检测 <sup>[38]</sup> 、热带森林扰动检测 <sup>[43]</sup> 、绿色变化趋势检测 <sup>[44]</sup>
	增强型植被指数(EVI)	$EVI = G \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + C_1 \rho_R - C_2 \rho_B + L}$ <p>其中G为调节因子一般取G=2.5;C<sub>1</sub>和C<sub>2</sub>为抗大气调节系数,C<sub>1</sub>=6和C<sub>2</sub>=7.5;L为土壤调节因子,取值一般为L=1</p>	绿色变化趋势检测 <sup>[44]</sup>
	归一化差异湿度指数(NDMI)	$NDMI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR1}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR1}}$	记录热带雨林扰动-恢复动态 <sup>[79]</sup>
	归一化燃烧率(NBR)	$NBR = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR2}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR2}}$	连续森林扰动检测 <sup>[16]</sup> 、森林扰动和恢复趋势检测 <sup>[33]</sup> 、突变扰动(城市化、森林管理、大火灾)检测 <sup>[34]</sup> 、沿边地区森林扰动检测 <sup>[38]</sup>
	线性变换型 穗帽变换湿度指数(TCW))	<p>Landsat4-5中:</p> $TCW = 0.0315 \times \rho_B + 0.2021 \times \rho_G + 0.3102 \times \rho_R + 0.1594 \times \rho_{NIR} - 0.6806 \times \rho_{SWIR1} - 0.6109 \times \rho_{SWIR2}$ <p>Landsat7中:</p> $TCW = 0.2626 \times \rho_{TOA,B} + 0.2141 \times \rho_{TOA,G} + 0.0926 \times \rho_{TOA,R} + 0.0656 \times \rho_{TOA,NIR} - 0.7629 \times \rho_{TOA,SWIR1} - 0.5388 \times \rho_{TOA,SWIR2}$ <p>Landsat8中:</p> $TCW = 0.1511 \times \rho_{TOA,B} + 0.1973 \times \rho_{TOA,G} + 0.3283 \times \rho_{TOA,R} + 0.3407 \times \rho_{TOA,NIR} - 0.7117 \times \rho_{TOA,SWIR1} \times -0.4559 \rho_{TOA,SWIR2}$	连续森林扰动检测 <sup>[16]</sup> 、森林扰动和恢复趋势检测 <sup>[33]</sup> 、不同阶段森林扰动检测 <sup>[52]</sup> 、森林扰动检测 <sup>[80]</sup>
组合型	穗帽变换角(TCA)	$TCA = \arctan\left(\frac{TCG}{TCB}\right)$	森林扰动检测(主要检测采伐) <sup>[25]</sup> 、森林扰动历史重建 <sup>[26]</sup> 、森林扰动和恢复历史检测 <sup>[41]</sup> 、野火及伐木引起的森林扰动检测 <sup>[50]</sup> 、量化景观变化(土地利用替换扰动速度) <sup>[51]</sup>
	穗帽变换距离(TCD)	$TCD = \sqrt{TCG^2 + TCB^2}$	森林扰动历史重建 <sup>[26]</sup> 、森林扰动和恢复历史检测 <sup>[41]</sup>
	扰动指数(DI)	$DI = TCB - (TCG + TCW)$	森林扰动检测 <sup>[12]</sup> 、连续森林扰动检测 <sup>[16]</sup>
	森林综合得分(IFZ)	$IFZ = \sqrt{\frac{1}{NB} \sum_{i=1}^{NB} \left( \frac{b_p - \bar{b}_i}{SD_i} \right)^2}$ <p>其中NB代表使用的波段数量;b<sub>p</sub>代表某像元在第i波段的光谱值; <math>\bar{b}_i</math>和SD<sub>i</sub>分别代表第i波段森林训练样本的平均值和标准差。最常用的波段是近红外(<math>\rho_{NIR}</math>)和短波红外波段(<math>\rho_{SWIR1}、\rho_{SWIR2}</math>)</p>	森林扰动历史重建 <sup>[14]</sup> 、野火及伐木引起的森林扰动检测 <sup>[50]</sup>

注:  $\rho_B、\rho_G、\rho_R、\rho_{NIR}、\rho_{SWIR1}、\rho_{SWIR2}$  分别为TM1-5、7波段和OLI 2-7波段的地表反射率;  $\rho_{TOA,B}、\rho_{TOA,G}、\rho_{TOA,R}、\rho_{TOA,NIR}、\rho_{TOA,SWIR1}、\rho_{TOA,SWIR2}$  分别为TM 1-5、7波段和OLI2-7波段的大气顶部反射率; TIR 为热红外波段; TCB、TCG、TCW 分别为穗帽变换的亮度、绿色、湿度分量



小。Zhu等<sup>[44]</sup>检测广州市绿度趋势时发现,与NDVI相比,由Landsat OLI影像计算的EVI与Landsat系列之前的传感器具有更高一致性,故推荐利用EVI检测绿度趋势。在检测细微扰动方面,NDMI比NDVI具有更高的精度,是检测森林扰动的有效指标<sup>[71]</sup>,NBR对叶绿素、叶片和土壤的含水量、炭灰等敏感,可很好地区分健康和烧伤的植被<sup>[72]</sup>,但其易受地形效应影响。

线性变换型指标主要有穗帽变换湿度指数(TCW)<sup>[73]</sup>。TCW对土壤和植被水分、结构很敏感,且对不同光照引起的地形效应不敏感<sup>[74]</sup>,是检测森林扰动最常用的指标之一。

组合型指标是指前2类指标的线性或非线性组合,包括穗帽变换角(TCA)、穗帽变换距离(TCD)、扰动指数(DI)、森林综合得分(IFZ)等。Powell等<sup>[75]</sup>提出了TCA指标,用以建立时序分析中Landsat MSS(缺少短波红外波段)与其后续传感器所获得数据之间的关联。Duane等<sup>[76]</sup>提出的TCD与植被的组成、结构和年龄有关,经常被用于量化地上生物量<sup>[41,77]</sup>。DI专门为检测森林扰动而提出,并成功应用于大面积的森林扰动检测<sup>[46,78]</sup>,但在检测其他类型变化时,DI效果不佳。IFZ表示某一像元为森

林的可能性,该指标在没有先验知识前提下也能检测出森林变化<sup>[14]</sup>。虽然IFZ和DI可以通过预设的森林样本对影像进行均一化处理,从而减少物候和BRDF影响,但是它们只适合检测单一的森林类型扰动。

4 Landsat时序变化检测精度评价

大面积土地利用/土地覆盖图及其相关变化产品的精度评价一直是遥感领域研究的难点<sup>[14, 20, 33, 39, 81]</sup>。由于缺乏大范围更高时间和空间分辨率的数据为Landsat时序变化检测提供验证,评价时序变化检测比双时相变化检测更具有挑战性,很少有与研究时段相吻合的历史数据来验证时序变化检测结果的精度。就历史长时序变化检测研究而言,最好的高空间分辨率验证数据就是Landsat数据本身。由表3可看出,目前多数时序变化检测精度评价利用基于Landsat影像的数据产品作为验证依据,如Cohen等<sup>[39]</sup>提出的人工解译Landsat时序数据栈同步算法(TimeSync算法),即借助Google Earth或其他高空间分辨率影像为辅助数据,目视解译Landsat影像绘制验证样本。

表3 Landsat时序变化检测精度评价方法和指标

Tab.3 Evaluation methods and indices of detection accuracy of Landsat time series change

精度评价方法	采用数据	评价策略	评价指标	例子
TimeSync	Landsat 影像、Google Earth 上的高空间分辨率影像	TimeSync 解译 703 个样本点	总体精度、Kappa 系数、制图精度、用户精度	文献[33]、[39]
	Landsat 影像、Google Earth 上的高空间分辨率影像	TimeSync 解译 1016 个栅格块	制图精度、用户精度	文献[34]
以高空间分辨率影像辅助目视解译原始 Landsat 影像获取验证样本	Landsat 影像、Google Earth 上的高空间分辨率影像	目视解译	制图精度、用户精度和时间精度	文献[16]
	Landsat 时序数据、Google Earth 上的高空间分辨率影像	随机分层采样,每类(变化和未变化)250 个像元样本	总体精度、制图精度、用户精度	文献[19]
	Landsat 时序数据、Google Earth 上的高空间分辨率影像	等分随机采样,每类(变化和未变化)50 个 3×3 样本单元	总体精度	文献[82]
	Landsat 影像、Google Earth 上的高空间分辨率影像	分层随机采样,每层(扰动和未扰动)各 500 个 3×3 样本单元	总体精度、制图精度、用户精度	文献[38]
	Landsat 影像	分层随机采样,目视解译	总体精度、用户精度	文献[28]
	Landsa 影像、高空间分辨率影像、Digital Ortho Quarter Quad(DOQQ)	实地验证、视觉验证、目视解译	总体精度、制图精度、用户精度、Kappa 系数	文献[14]
	Landsat 时序数据, SPOT5 (2007–2011 年)、QuickBird 影像 (2012–2013 年)	只评价 2009 年森林扰动和未扰动两类精度,随机分层采样,112 个变化像元样本,109 个未变化像元样本,类似 TimeSync 评价方法	总体精度、制图精度、用户精度	文献[43]
其它方法(从地真数据或历史存档数据获取验证样本)	国家高空计划(NHAP)、国家航空摄影计划(NAPP)、国家农业影像计划(NAIP)解译的影像集	目视解译	总体精度	文献[30]
	地真数据和 Landsat 影像	目视解译和地真数据	制图精度、用户精度	文献[49]

Landsat 时序变化检测结果的精度评价应该包括空间域精度评价和时间域精度评价<sup>[16]</sup>。空间域精度评价指标为制图精度和用户精度,而时间域精度评价指标为时间精度,具体计算公式如下:

制图精度=被正确检测为扰动像元的数量/参考数据中扰动像元的数量 (1)

用户精度=被正确检测为扰动像元的数量/变化检测结果图中扰动像元的数量 (2)

时间精度=像元的数量(算法时间在参考数据时间之前)/被正确检测为扰动像元的数量 (3)

## 5 存在的问题与挑战

近年来,Landsat 时序变化检测取得了长足的发展,但在获得高质量变化检测产品方面仍面临着诸多挑战。例如,云和坏条带减少时序数据栈中可用像元的数量,影响时序变化检测产品的精度,如何减少 Landsat 时序影像中云污染和 Landsat ETM+数据中的坏条带影响,以提高时序变化检测产品质量。在地形复杂的山区,地形效应对时序变化检测影响程度,以及如何消除复杂地形山区影像中的地形效应对 Landsat 时序变化检测的影响等,都有待进一步研究。此外,物候、大气、光照条件等方面的差异也会给时序变化检测结果带来一定的误差,需辨别由此引起的“伪变化”。Landsat 时序数据构建需要花费大量的时间和存储空间,对此现阶段仍缺少有效方法。精度评价也是 Landsat 时序变化检测所面临的重大挑战,一致性参考数据缺乏或现存历史数据集缺失元数据等阻碍 Landsat 时序变化检测的广泛应用。现有 Landsat 时序变化检测方法大多基于森林扰动提出,在其他方面的应用效果有待进一步验证。不同时序变化检测方法在检测不同强度变化和生成最终变化图之间存在一定的差异<sup>[83]</sup>,用户需要根据自身的研究选择合适的方法,现阶段应加强不同算法之间的对比研究,以便更好地为特定领域研究的时序变化检测方法选择提供指导。

### 参考文献(References):

[1] Committee on Strategic Directions for the Geographical Sciences in the Next Decade, National Research Council. Understanding the changing planet: Strategic directions for the geographical sciences[M]. Washington: National Academies Press, 2010.

[2] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, et al. Human

domination of Earth's ecosystems[J]. Science, 1997,277(5325):494-499.

- [3] Mooney H, Cropper A, Reid W. Confronting the human dilemma[J]. Nature, 2005,434(7033):561-562.
- [4] Turner B L, Lambin E F, Reenberg A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2007,104(52):20666-20671.
- [5] Reid W V, Chen D, Goldfarb L, et al. Earth system science for global sustainability: grand challenges[J]. Science, 2010,330(6006):916-917.
- [6] 傅伯杰.我国生态系统研究的发展趋势与优先领域[J].地理研究,2010,29(3):383-396. [Fu B J. Trends and priority areas in ecosystem research of China[J]. Geographical Research, 2010,29(3):383-396.]
- [7] 徐冠华,葛全胜,宫鹏,等.全球变化和人类可持续发展:挑战与对策[J].科学通报,2013,58(21):2100-2106. [Xu G H, Ge Q S, Gong P, et al. Societal response to challenges of global change and human sustainable development[J]. Chinese Science Bulletin, 2013,58(21):2100-2106.]
- [8] Singh A. Digital change detection techniques using remotely-sensed data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1989,10(6):989-1003.
- [9] Coppin P, Jonckheere I, Nackaerts K, et al. Digital change detection methods in natural ecosystem monitoring: A review[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004,25(9):1565-1596.
- [10] Lu D, Mausel P, Brondizio E, et al. Change detection techniques[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(12):2365-2407.
- [11] Woodcock C E, Allen R, Anderson M, et al. Free access to Landsat imagery[J]. Science, 2008,320(5879):1011-1011.
- [12] Hilker T, Wulder M A, Coops N C, et al. A new data fusion model for high spatial- and temporal-resolution mapping of forest disturbance based on Landsat and MODIS [J]. Remote Sensing of Environment, 2009,113(8):1613-1627.
- [13] Vogelmann J E, Tolk B, Zhu Z L. Monitoring forest changes in the southwestern United States using multi-temporal Landsat data[J]. Remote Sensing of Environment, 2009,113(8):1739-1748.
- [14] Huang C Q, Goward S N, Masek J G, et al. An automated approach for reconstructing recent forest disturbance history using dense Landsat time series stacks[J]. Remote Sensing of Environment, 2010,114(1):183-198.
- [15] Vogelmann J E, Xian G, Homer C, et al. Monitoring gradual ecosystem change using Landsat time series analyses:



- Case studies in selected forest and rangeland ecosystems[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012,122(SI):92-105.
- [16] Zhu Z, Woodcock C E, Olofsson P. Continuous monitoring of forest disturbance using all available Landsat imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012,122(SI):75-91.
- [17] Zhu Z, Woodcock C E. Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012,118:83-94.
- [18] Banskota A, Kayastha N, Falkowski M J, et al. Forest monitoring using Landsat time series data: A review[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2014,40(5):362-384.
- [19] Zhu Z, Woodcock C E. Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014,144:152-171.
- [20] Vogelmann J E, Gallant A L, Shi H, et al. Perspectives on monitoring gradual change across the continuity of Landsat sensors using time-series data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016,185(SI):258-270.
- [21] Townshend J R, Masek J G, Huang C Q, et al. Global characterization and monitoring of forest cover using Landsat data: opportunities and challenges[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2012,5(5):373-397.
- [22] Wulder M A, White J C, Loveland T R, et al. The global Landsat archive: Status, consolidation, and direction[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016,185(SI):271-283.
- [23] Loveland T R, Irons J R. Landsat 8: The plans, the reality, and the legacy[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 185(SI):1-6.
- [24] Kennedy R E, Cohen W B, Schroeder T A. Trajectory-based change detection for automated characterization of forest disturbance dynamics[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007,110(3):370-386.
- [25] Ahmed O S, Franklin S E, Wulder M A. Interpretation of forest disturbance using a time series of Landsat imagery and canopy structure from airborne LiDAR[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2014,39(6):521-542.
- [26] Ahmed O S, Franklin S E, Wulder M A, et al. Characterizing stand-level forest canopy cover and height using Landsat time series, samples of airborne LiDAR, and the Random Forest algorithm[J]. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015,101:89-101.
- [27] Xue X J, Liu H P, Mu X D, et al. Trajectory-based detection of urban expansion using Landsat time series[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014,35(4):1450-1465.
- [28] Huang C Q, Goward S N, Schleeeweis K, et al. Dynamics of national forests assessed using the Landsat record: Case studies in eastern United States[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009,113(7):1430-1442.
- [29] Stueve K M, Housman I W, Zimmerman P L, et al. Snow-covered Landsat time series stacks improve automated disturbance mapping accuracy in forested landscapes[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011,115(12):3203-3219.
- [30] Zimmerman P L, Housman I W, Perry C H, et al. An accuracy assessment of forest disturbance mapping in the western Great Lakes[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013,128:176-185.
- [31] Liu L Y, Peng D L, Wang Z H, et al. Mapping afforestation and forest biomass using time-series Landsat stacks [C]// SPIE Asia-Pacific Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2014,92601V:1-7.
- [32] Liu L Y, Peng D L, Wang Z H, et al. Improving artificial forest biomass estimates using afforestation age information from time series Landsat stacks[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014,186(11):7293-7306.
- [33] Kennedy R E, Yang Z Q, Cohen W B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr - Temporal segmentation algorithms [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010,114(12):2897-2910.
- [34] Kennedy R E, Yang Z Q, Braaten J, et al. Attribution of disturbance change agent from Landsat time-series in support of habitat monitoring in the Puget Sound region, USA[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015,166:271-285.
- [35] Meigs G W, Kennedy R E, Cohen W B. A Landsat time series approach to characterize bark beetle and defoliator impacts on tree mortality and surface fuels in conifer forests[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011,115(12): 3707-3718.
- [36] Bright B C, Hudak A T, Kennedy R E, et al. Landsat time series and LiDAR as predictors of live and dead basal area across five bark beetle-affected forests[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014,7(8):3440-3452.
- [37] Schwantes A M, Swenson J J, Jackson R B. Quantifying drought-induced tree mortality in the open canopy woodlands of central Texas[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016,181:54-64.
- [38] Grogan K, Pflugmacher D, Hostert P, et al. Cross-border forest disturbance and the role of natural rubber in main-

- land Southeast Asia using annual Landsat time series[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015,169:438-453.
- [39] Cohen W B, Yang Z Q, Kennedy R. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 2. TimeSync - Tools for calibration and validation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010,114(12):2911-2924.
- [40] Ohmann J L, Gregory M J, Roberts H M, et al. Mapping change of older forest with nearest-neighbor imputation and Landsat time-series[J]. *Fuel and Energy Abstracts*, 2012,272(SI):13-25.
- [41] Pflugmacher D, Cohen W B, Kennedy R E, et al. Using Landsat-derived disturbance and recovery history and LiDAR to map forest biomass dynamics[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014,151(SI):124-137.
- [42] Verbesselt J, Hyndman R, Newnham G, et al. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010,114(1):106-115.
- [43] Devries B, Verbesselt J, Kooistra L, et al. Robust monitoring of small-scale forest disturbances in a tropical montane forest using Landsat time series[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015,161:107-121.
- [44] Zhu Z, Fu Y C, Woodcock C E, et al. Including land cover change in analysis of greenness trends using all available Landsat 5, 7, and 8 images: A case study from Guangzhou, China (2000-2014) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016,185(SI):243-257.
- [45] Healey S P, Cohen W B, Yang Z Q, et al. Comparison of Tasseled Cap-based Landsat data structures for use in forest disturbance detection[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005,97(3):301-310.
- [46] Healey S P, Yang Z Q, Cohen W B, et al. Application of two regression-based methods to estimate the effects of partial harvest on forest structure using Landsat data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006,101(1):115-126.
- [47] Huang C Q, Goward S N, Masek J G, et al. Development of time series stacks of Landsat images for reconstructing forest disturbance history[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2009,2(3):195-218.
- [48] Liu L Y, Tang H, Caccetta P, et al. Mapping afforestation and deforestation from 1974 to 2012 using Landsat time-series stacks in Yulin District, a key region of the Three-North Shelter region, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013,185(12):9949-9965.
- [49] Schroeder T A, Wulder M A, Healey S P, et al. Mapping wildfire and clearcut harvest disturbances in boreal forests with Landsat time series data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011,115(6):1421-1433.
- [50] White J C, Wulder M A, Gómez C, et al. A history of habitat dynamics: Characterizing 35 years of stand replacing disturbance[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2011,37(2):234-251.
- [51] Griffiths P, Kuemmerle T, Kennedy R E, et al. Using annual time-series of Landsat images to assess the effects of forest restitution in post-socialist Romania[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012,118:199-214.
- [52] Neigh C S R, Bolton D K, Diabate M, et al. An automated approach to map the history of forest disturbance from insect mortality and harvest with Landsat time-series data [J]. *Remote Sensing*, 2014,6(4):2782-2808.
- [53] Liang L, Hawbaker T J, Zhu Z L, et al. Forest disturbance interactions and successional pathways in the Southern Rocky Mountains[J]. *Forest Ecology and Management*, 2016,375:35-45.
- [54] Lehmann E A, Wallace J F, Caccetta P A, et al. Forest cover trends from time series Landsat data for the Australian continent[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013,21:453-462.
- [55] Vicente-Serrano S M, Pérez-Cabello F, Lasanta T. Assessment of radiometric correction techniques in analyzing vegetation variability and change using time series of Landsat images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008,112(10):3916-3934.
- [56] USGS. Product Guide: Landsat 4-7 Climate Data Record (CDR). Surface Reflectance [DB/OL]. 2016.
- [57] USGS. Product Guide: Landsat 8 Surface Reflectance Code(LaSRC) Product [DB/OL]. 2016.
- [58] USGS. <https://landsat.usgs.gov/landsat-collections> [DB/OL]. 2017.
- [59] Bannari A, Morin D, Bonn F, et al. A review of vegetation indices[J]. *Remote Sensing Reviews*, 1995,13:95-120.
- [60] Chen J M. Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for boreal applications[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1996,22(3):229-242.
- [61] 姚晨,黄微,李先华.地形复杂区域的典型植被指数评估[J]. *遥感技术与应用*, 2009,24(4):496-501. [ Yao C, Huang W, Li X H. 2009. Evaluation of topographical influence on vegetation indices of rugged terrain[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2009,24(4): 496-501. ]
- [62] 朱高龙,柳艺博,居为民,等. 4种常用植被指数的地形效应评估[J]. *遥感学报*, 2013,17(1):210-234. [ Zhu G L, Liu Y B, Ju W M, et al. Evaluation of topographic effects on four commonly used vegetation indices[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013,17(1):210-234. ]
- [63] Galvão L S, Breunig F M, Teles T S, et al. Investigation

- of terrain illumination effects on vegetation indices and VI-derived phenological metrics in subtropical deciduous forests[J]. *GIScience and Remote Sensing*, 2016,53(3): 360-381.
- [64] 穆悦,曹晓阳,冯益明,等.地形复杂山区常用植被指数的地形校正对比[J].*地球信息科学学报*,2016,18(7):951-961. [ Mu Y, Cao X Y, Feng Y M, et al. Comparison of topographic correction on commonly used vegetation indices in rugged terrain area[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2016,18(7):951-961. ]
- [65] Brown L, Chen J M, Leblanc S G, et al. A shortwave infrared modification to the simple ratio for LAI retrieval in boreal forests : An image and model analysis[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000,71(1):16-25.
- [66] Chuvieco E, Cocero D, Aguado I, et al. Improving burning efficiency estimates through satellite assessment of fuel moisture content [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2004,109(D14):251-256.
- [67] Wagtenonk J W V, Root R R, Key C H. Comparison of AVIRIS and Landsat ETM + detection capabilities for burn severity[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(3):397-408.
- [68] Myneni R B, Hall F G. The interpretation of spectral vegetation indexes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995,33(2):481-486.
- [69] Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997,62(3):241-252.
- [70] Huete A, Didan K, Miura T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1):195-213.
- [71] Wilson E H, Sader S A. Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002,80(3):385-396.
- [72] Howard S M, Ohlen D O, Mckinley R A, et al. Historical fire severity mapping from Landsat data[C]// Integrating Remote Sensing at the Global, Regional and Local Scale. Pecora 15/Land Satellite Information IV Conference, 2002.
- [73] Cohen W B, Goward S N. Landsat's role in ecological applications of remote sensing[J]. *Bioscience*, 2004,54(6): 535-545.
- [74] Cohen W B, Spies T A. Estimating structural attributes of Douglas-fir/western hemlock forest stands from Landsat and SPOT imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992,41(1):1-17.
- [75] Powell S L, Cohen W B, Healey S P, et al. Quantification of live aboveground forest biomass dynamics with Landsat time-series and field inventory data: A comparison of empirical modeling approaches[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010,114(5):1053-1068.
- [76] Duane M V, Cohen W B, Campbell J L, et al. Implications of alternative field-sampling designs on Landsat-based mapping of stand age and carbon stocks in Oregon forests[J]. *Forest Science*, 2010,56(4):405-416.
- [77] Powell S L, Cohen W B, Yang Z Q, et al. Quantification of impervious surface in the Snohomish Water Resources Inventory Area of Western Washington from 1972-2006 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008,112(4):1895-1908.
- [78] Masek J G, Huang C Q, Wolfe R, et al. North American forest disturbance mapped from a decadal Landsat record [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008,112(6):2914-2926.
- [79] Devries B, Decuyper M, Verbesselt J, et al. Tracking disturbance- regrowth dynamics in tropical forests using structural change detection and Landsat time series[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015,169:320-334.
- [80] Jin S M, Sader S A. Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005,94(3):364-372.
- [81] Thomas N E, Huang C Q, Goward S N, et al. Validation of North American forest disturbance dynamics derived from Landsat time series stacks[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011,115(1):19-32.
- [82] Jin S M, Yang L M, Danielson P, et al. A comprehensive change detection method for updating the national land cover database to circa 2011[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013,132:159-175.
- [83] Cohen W B, Healey S P, Yang Z Q, et al. How similar are forest disturbance maps derived from different Landsat time series algorithms?[J]. *Forests*, 2017,8(4):98.