

doi: 10. 6046/gtzyyg. 2015. 01. 01

引用格式: 杨辰,沈润平. 森林扰动遥感监测研究进展[J]. 国土资源遥感,2015,27(1):1-8. (Yang C,Shen R P. Progress in the study of forest disturbance by remote sensing[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2015,27(1):1-8.)

森林扰动遥感监测研究进展

杨 辰^{1,2}, 沈润平³

(1. 上海市气象灾害防御工程技术中心,上海 200030; 2. 上海市防雷中心,上海 200030;
3. 南京信息工程大学遥感学院,南京 210044)

摘要: 作为陆地生态系统的主体,森林的碳循环与碳蓄积对研究陆地生态系统起着重要作用,但目前森林扰动资料的缺乏在很大程度上影响着区域森林碳通量的估算精度。在对森林扰动监测方法和监测指数进行总结的基础上,对几种森林扰动监测指数进行了比较研究。鉴于当前基于长时间序列的森林扰动研究主要集中在北美国家,国内鲜有系统报道,因此,针对我国森林变化特点,结合长时间序列扰动分析方法和适宜的扰动监测指数,研究适用于我国森林的扰动监测模型具有重要的理论意义和应用价值。

关键词: 森林扰动; 监测方法; 监测指数

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2015)01-0001-08

0 引言

森林是地球生物圈的重要组成部分,也是人类社会赖以生存和发展的物质基础之一。森林生态系统是陆地生态系统中生产力最高的系统,也是一个巨大的碳库。已有研究表明,森林生态系统储存了陆地生态系统地上部分 76%~98% 的有机碳^[1],是大气 CO₂ 含量的 2 倍之多^[2]。因此,森林生态系统的碳循环与碳蓄积在全球陆地碳循环和气候变化研究中具有重要意义^[3-4]。1997 年《京都议定书》的通过,认可森林碳汇功能可部分抵消温室气体减排指标,更激起了陆地生态系统碳循环研究的高潮。中国作为最大的亚洲国家,阐明其森林的 CO₂ 源汇功能不仅对研究本地区碳循环至关重要,对研究全球碳循环也必不可少。

通常情况下,森林植被通过光合作用吸收空气中的 CO₂,并将一部分碳储存于生物体中,而诸如森林火灾、病虫害和砍伐等森林扰动事件则将储存于生物体中的碳重新释放到大气中。由于森林植被是最大的陆地碳汇,因此,森林扰动事件在一定程度上影响着区域与全球的碳收支,并可能对全球气候系统产生影响^[5]。大量研究表明,大气中 CO₂ 等温室气体浓度增加的一个主要来源就是人类对森林的不断破坏^[6-7],其中,全球因森林砍伐造成的 CO₂ 净

排放占到由于土地利用变化导致的 CO₂ 净排放中的约 87%^[8]。目前较大尺度森林碳汇的估算及预测方法仍然不成熟,估测结果存在很大的不确定性^[9],其中一个主要原因就是缺乏较为精确的森林扰动资料^[10]。因此,准确地估算森林扰动引起的碳储量的变化不仅可以加深对生态系统结构、功能的理解,提高全球碳汇的估算精度,更能够在国家政策的制定以及碳预算的评估中发挥重要作用。

当前森林扰动研究集中在北美国家,主要基于区域和全球尺度的遥感数据。低分辨率的 AVHRR 和 MODIS 资料大多应用于大尺度的森林扰动变化分析;相比之下,Landsat 具有较高的空间分辨率,适合研究区域尺度的森林扰动以及由其造成的森林碳通量的变化。目前,森林扰动研究主要针对监测方法和监测指数开展,为此,本文分别对监测方法和监测指数进行总结,并对几种扰动监测指数进行了比较研究。

1 监测方法研究进展

在人类的发展进程中,全球森林植被遭到了频繁且大量的破坏,以美国原始森林为例,在近 300 a 内,被破坏的森林面积达 130 亿 m³,占总面积的 2/3。森林扰动通常包括人为扰动和自然扰动 2 个方面,其形式主要表现为森林火灾、森林砍伐、病虫害以及

森林抚育管理政策等所引起的变化。Waring 等^[11]将森林扰动定义为持续 1 a 以上并造成生态系统叶面积指数明显降低的事件。这一定义与生态失调的概念相吻合,但森林扰动并不包括生态系统自身的时空动态变化^[12]。

传统的森林资源调查监测主要以地面调查为主,存在着工作量大、成本高、周期长、效率低和实效性差等问题,而且调查精度不高,难以满足当今森林资源变化监测的需要。随着上世纪 70 年代陆地资源卫星的发射,遥感技术得到了极大的发展,特别是对于区域以及更大的空间尺度来说,遥感技术已经成为定期和连续监测森林变化的唯一可行手段。

早期的森林遥感监测主要基于对影像的目视解译^[13],由于在解译过程中存在较多的主观因素,因此其结果具有很大的不确定性。随着遥感监测技术的发展,20 世纪 80—90 年代逐渐涌现出以分类后比较法和影像差异法为基础的森林变化监测技术,而随着研究的深入和细化,更多方法和技术手段被逐步运用到森林遥感监测中,如分类及统计分析法、时间序列分析法及综合分析法等。本文对目前常用的森林扰动监测方法进行了归纳。

1.1 分类后比较法

分类后比较法通常需要首先对每一期影像进行单独分类,并基于不同时期的分类结果进行逐像元比较来监测森林覆盖的变化情况。由于分类后比较法仅针对影像的分类结果,因此能在很大程度上减少光照辐射差异对监测的影响,并适用于不同传感器、不同季相数据的比较^[14],同时该方法不仅可以提供变化信息,而且还能够给出各时期之间的类型转换矩阵,便于森林管理政策的制定。但是分类后比较法的精度取决于每一期影像的分类精度,并且由于不同时期分类结果存在误差累积现象,最终导致对森林监测的精度偏低^[15]。Allum 等^[16]使用间隔 10 a 的 2 幅 MSS 影像进行了分类后比较,得到了安大略湖流域植被的相对变化信息;Hall 等^[17]同样利用 2 景 MSS 数据区分出 5 种森林类别,分别为皆伐、再生、阔叶林、针叶林和混合林;Miller 等^[18]基于 4 期 MSS 影像实现了 18 a 的长时间监测,结果表明,研究区森林的破坏率在 10% 左右;而 Cohen 等^[19]利用非监督分类方法研究了西俄勒冈地区的长时间人为扰动规律,并着重分析了森林权属与扰动的关系。

1.2 影像差异法

影像差异法通过选取对森林变化比较敏感的波段或指数,并使用差值的方法来提取森林的变化信息。该方法可以避免分类过程所导致的误差累积,

但需要事先对影像进行严格的辐射标准化。由于目前对各种干扰造成的辐射差异的校正方法仍不成熟,因此,只能通过选择同一传感器、同一季相的数据来尽可能地减少噪声影响。Collins 等^[20]基于多期影像的缨帽(tasseled cap)变换结果,使用影像差异法分析了森林的多年受灾状况;Coppin 等^[21]评估了辐射标准化对影像差异法应用效果的影响;Key 等^[22]通过计算火灾前后 2 幅影像中 NBR 指数(归一化燃烧率)的差值来划分火灾的严重等级;Masek 等^[23]计算了 10 a 间扰动指数(disturbance index, DI)的变化情况,并在此基础上估算得到北美地区的森林年扰动率;DeRose 等^[24]同样使用影像差异法评估了 DI 的监测效果,结果表明该方法的总体精度可以达到 80% ~ 82%;Huang 等^[25-26]通过引入一定的判别流程,使用 VCT 模型成功识别出多年的森林、非森林和扰动区域,并进一步提取了扰动时间和扰动量信息。此外,张连华等^[27]也采用类似方法对云南省景洪市森林扰动状况进行了遥感监测。

1.3 分类及统计分析法

相对于未发生变化的森林来说,扰动森林在影像光谱上会产生较为明显的变化,并且这种变化可以通过一定的统计方法加以识别。分类及统计分析法一般通过对单期或多期影像的光谱变化进行模式分析来确定发生扰动的森林区域,该方法通常需要一定的先验知识参与判断。Adams 等^[28]使用光谱混合分解方法对亚马孙森林的植被覆盖状况进行了研究;Woodcock 等^[29]通过采用人工神经网络方法得到了新俄勒冈州森林变化信息;而 Gitas 等^[30]基于 NOAA - AVHRR 数据、采用面向对象的影像分类方法实现了地中海地区大范围的森林火灾监测,结果表明该方法的监测结果与地面资料的匹配程度高达 90%;Healey 等^[31]通过监督分类方法验证了不同研究区 DI 的监测效果,表明 DI 在不同研究区具有一定的差异;Jin 等^[32]比较了 MODIS 日产品和 16 d 合成产品在扰动提取上的差异,结果表明 2 种产品总体分类精度比较相近,但对于斑块尺度的扰动识别存在显著的差异;Schreder 等^[33]对不同日期的影像进行 RGB 合成,并基于合成结果进行监督分类实验以研究火灾后的砍伐扰动,得到总体精度为 68% 的扰动分类图;Hanson 等^[34-35]使用回归树方法构建了森林的连续覆盖数据集(vegetation continuous fields, VCF);而 Potapov 等^[36]同样使用基于 S - Plus 构建的回归树方法得到研究区多年的植被损害信息。

1.4 时间序列分析方法

时间序列分析方法一般用于多期影像的联合分

析中,通过对时间序列进行特征提取和分析可以有效地监测森林的长期变化状况。Eklundh 等^[37]通过对 MODIS 16 d 合成影像进行 Savitsky - Golay 滤波以消除数据质量差异对扰动识别的影响,同时通过 TIMESAT 提取的植被物候学参数来确定虫害扰动; Vogelmann 等^[38]通过对光谱指数和观测年份进行线性回归来描述森林的扰动特征; Röder 等^[39-40]通过构建分段线性函数的方式评估了火灾扰动后森林植被的恢复情况; Kennedy 等^[41-42]引入了 LandTrendr 分析方法,通过对扰动的时间序列进行分割和重构,不仅可以获取短暂的扰动信息,还可以监测森林长期的变化; Gómez 等^[43]在缨帽角 (tasseled cap angle, TCA) 指数的基础上引入过程指标 (process indicator, PI) 分析方法,用以监测植被的持续变化。杨辰等^[44]同样利用时间序列轨迹分析方法研究了江西省武宁县近 30 a 的森林扰动状况。

1.5 综合分析法

综合分析法一般通过引入多源数据进行联合分析,以克服现有方法的不足,进一步提高森林扰动的监测效果。Hilker 等^[45]引入 STAARCH 融合方法,通过结合 Landsat 和 MODIS 数据,在保证监测效果的基础上,提高了森林扰动的监测频率; Li 等^[46]在对阿拉巴马州进行扰动监测的基础上,进一步评估了因扰动引起的研究区森林变化和森林破碎状况; Li 等^[47]使用 Landsat 与激光雷达 GLAS 数据相结合的方法监测了扰动后森林的恢复,克服了激光雷达覆盖范围小的劣势,实现了大范围的变化监测;此外, Vogelmann 等^[48]采用多种扰动监测方法对不同类型的扰动进行了研究,结果表明,没有一种方法能将所有类型的扰动变化信息提取出来,需要采取多种技术、多种数据源相结合的方法进行提取。

2 监测指数研究进展

在森林扰动遥感监测中,通常使用多光谱数据构建的用于表征森林生长状况的监测指数来进行分析研究。但是,由于植被变化在光谱空间中的响应比较复杂,因此,没有一种指数可以完全概括多维光谱空间的变化信息,因此,Wallace 等^[49]认为应引入不同的监测指数进行比较分析。

虽然森林扰动可以通过可见光^[50]和热红外波段^[51]加以监测,但目前常用的监测指数主要基于短波红外 (SWIR) 和近红外 (NIR) 波段反射率^[52-54]。森林扰动发生后,随着落叶的增多,影像上逐渐表现出土壤的光谱特征。由于土壤的反射率低于针叶和阔叶植被的反射率^[55],因此在影像上,近红外波段

反射率会呈现逐渐降低的趋势^[56]。相反,森林冠层 (尤其是针叶林冠层) 的短波红外反射率低于裸土和林下植被,因此在森林扰动发生后短波红外的反射率升高。扰动发生后,随着林下植被的再生,森林扰动监测会更加复杂。由于林下植被在近红外波段反射率较高,因此可能会补偿由于森林扰动造成的近红外波段反射率的降低^[55]。

Horler 等^[52]指出,相比其他波段而言,短波红外波段更多地解释了森林结构的信息; Vogelmann 等^[57]评估了 TM 数据对于云杉冠层损害的监测能力,得出 $TM5/TM4$ 所反映出的信息与森林损害的地面观测信息十分吻合; Hunt 等^[58]同样发现 $TM5/TM4$ 与叶片相对含水量呈现线性相关关系; Fiorella 等^[59]指出了 $TM4/TM5$ 与缨帽湿度存在很高的相关性 ($r^2 = 0.97$)。

缨帽变换也广泛应用于森林扰动的遥感监测中,缨帽变换结果由 3 个主要分量组成,分别是亮度、绿度和湿度^[60-61]。在这 3 个分量中,湿度对水分含量^[60]和植被结构^[59,62-63]比较敏感,因此常用于森林扰动的监测中^[64]。Wulder 等^[65]使用湿度分量监测了红松甲虫造成的森林侵害; Kuzera 等^[66]应用亮度和绿度分量评估了华盛顿地区的森林扰动变化; Wulder 等^[67]通过结合 3 个分量估算了采伐的恢复时间;而 Healey 等^[31]指出缨帽变换相比原始的 Landsat 反射率数据更能够反映森林的扰动状况,其评估了缨帽分量的不同组合,并通过 3 个分量的结合,构建了扰动指数 (DI),用于监测森林冠层的更替扰动。

2.1 归一化植被指数 (NDVI)

归一化植被指数 (normalized difference vegetable index, NDVI) 常常用来反映植被的生长状况、覆盖率和生物量等信息,是反映生态环境的重要指标,也是目前使用最为广泛的植被指数之一。但是,在稀疏植被覆盖条件下,NDVI 容易受到土壤背景的干扰^[68],并且对于浓密植被,NDVI 也会表现出饱和效应^[69-70]。Maselli^[71]利用 NDVI 指数对地中海保护区的森林状况进行了长期监测,并分析了该区域生态系统功能的变化;付安民等^[72]使用 23 期 MODIS MOD13A1 产品对我国东北亚研究区的森林覆盖变化情况进行了评估,森林变化的制图精度分别达到 80.24% 和 88.73%,取得了较好的监测效果。

2.2 归一化湿度指数 (NDMI)

归一化湿度指数 (normalized difference moisture index, NDMI) 是一种有效的森林扰动监测方法,通常用于森林砍伐的遥感监测^[32]。Hardisky 等^[73]指出 NDMI 与冠层水分含量高度相关,由于提高了对

择伐的监测能力,与 NDVI 相比能更好地跟踪植被生物量和水分阻抗的变化^[74]; Jin 等^[32]通过对比 NDMI 和缨帽湿度分量,指出 2 个指数对于森林扰动的监测能力大体相当,但对于影像获取时间间隔小于 2 a 的情况,NDMI 的监测精度稍高。研究表明,基于 Landsat 影像构建的 NDMI 时间序列数据能够精确地描述美国缅因州的森林变化状况^[32,74-75],对于局部的森林扰动,作者推荐采用逐年的遥感影像来降低监测误差,而对于皆伐等扰动类型,则可以采用长达 5 a 的时间间隔进行监测。

2.3 基于缨帽变换的监测指数

基于缨帽变换的扰动监测指数被用于采伐、森林火灾和病虫害等多种类型的扰动监测中。由于缨帽变换突出了森林的扰动信息,因此通过对缨帽分量进行适当的组合可以有效地增强扰动的光谱响应。相对于未受到扰动的森林来说,扰动森林的亮度分量较高,而绿度和湿度分量较低,因此通过线性组合方式构建的扰动指数(disturbance index, DI)方法对森林扰动信号的响应更为敏感^[30], Healey 等^[31]还针对不同研究区开展了 DI 指数的监测效果比较,结果发现 DI 指数对低生产率森林的监测效果最好,而在生产率较高的西华盛顿地区,由于扰动信号的持续时间最为短暂,因此在长时间间隔的观测中 DI 精度并不理想; Skakun 等^[76]使用增强型植被差异指数(enhanced wetness difference index, EWDI)对受害林进行了扰动监测,总体精度为 67% ~ 78%; Hais 等^[77]在方法比较研究中针对研究区特点引入了与 DI 指数相类似的 DI' 方法,取得了较好的监测效果; Gómez 等^[43]基于亮度和绿度分量提出了缨帽角(tasseled cap angle, TCA)方法,通过构建 2 个分量在植被平面上的夹角表征植被与非植被的比例。

2.4 IFZ 指数

IFZ 指数由 Huang 等^[25-26]利用 TM3, TM5 和 TM7 波段数据构建,并通过基于条件判别的 VCT 模型对长时间序列中森林、非森林和扰动区域进行判别。结果表明,针对美国国家森林所发生的扰动,该方法的总体精度约为 80%,其中大部分扰动类别的用户精度达到 70% ~ 95%;生产者精度则较低,一般为 50% ~ 70%。这表明该方法对于扰动的监测可能存在一定程度的低估,其中误差主要发生在小型扰动区域。该方法的优点在于其空间明确且时间连续,较传统的双时相变化监测法增加了很多时间细节信息。Huang 等^[78]还指出该方法可以监测大多数的森林扰动类型,包括采伐、林火及城市发展引起的扰动等,而对于一些程度较轻的扰动(如择伐

等)也具有一定的监测能力。此外,该方法分别在阿拉巴马和密西西比研究区进行了验证,取得了良好的监测效果^[46-47]。

2.5 归一化燃烧比(NBR)指数

归一化燃烧比(normalized burn ratio, NBR)指数通常用于森林火灾的遥感监测。Key 和 Benson^[22]结合了对火烧迹地存在不同光谱响应的 TM4 和 TM7 波段构建了 NBR 指数,用以评估火灾的严重等级。TM4 对叶绿素含量比较敏感,而 TM7 对植被水汽含量较为敏感。通过计算火灾前后 NBR 指数的差值(dNBR)可以在一定程度上表征火灾的严重程度。Miller 等^[79]指出,dNBR 与火灾发生前的绿色生物量关系密切,为了避免可能存在的误差,Miller 等通过引入火灾前植被密度参量,提出了相对差分归一化燃烧比(relative differenced normalized burn ratio, RdNBR)指数,用以消除火灾前植被覆盖差异对火烧等级评估的影响。Soverel 等^[80]对加拿大国家公园应用 RdNBR 和 dNBR 指数进行对比,结果表明 RdNBR 有时候并不比 dNBR 的精度更高,2 种指数方法的分类总体精度分别为 65.2% 和 70.2%; Sunderman 等^[81]针对沙漠生态系统进行了 dNBR 和差异线性光谱分离(differenced linear spectral unmixing, dSMA)方法的对比分析,结果表明 dNBR 方法更胜一筹,对燃烧区的分类精度达到 86%。

2.6 MODIS 全球扰动指数(MGDI)

地表温度(land surface temperature, LST)是区域和全球尺度地表过程的重要物理参数,与地表大气间相互作用以及能量通量的变化息息相关^[82-83]。由于植被指数提供了绿色植被的生长状况,而地表温度反映了土壤湿度状况,两者信息互补,因此,地表温度与植被指数之间存在密切的负相关关系^[84-89]。Mildrexler 等^[90]利用植被指数和地表温度的负相关关系提出了扰动指数,用于监测基于像元尺度 LST/EVI 的长期变化; Mildrexler 等^[91]改进了先前提出的扰动指数,将其更名为 MODIS 全球扰动指数(MODIS global disturbance index, MGDI),并针对瞬时扰动和非瞬时扰动 2 种情况给出定义,使其具备监测多种类型扰动的能力。由于 MGDI 使用的是年最大合成地表温度数据,因而避免了地表温度可能存在的短时间自然变化的影响。

Mildrexler 等^[90]指出,MGDI 指数可以精确估算森林火灾的影响范围和程度,并且对扰动后森林的恢复过程也很敏感; Mildrexler 等^[91]使用 MGDI 指数监测北美森林火灾发生的位置、严重程度以及飓风造成的风倒木灾害,结果表明北美森林在 2005 年和 2006 年分别遭受了 1.5% 和 0.5% 的森林扰动;

Coops 等^[92]研究表明, MGDL 监测得到的扰动区域与使用其他卫星数据获取的林火区域具有很高的相关性, 并且指出 MGDL 还可用于区域尺度森林病虫害的监测。此外, 尤慧等^[93]同样利用 MGDL 对加拿大研究区开展了火烧迹地的遥感监测。

3 扰动监测指数比较研究

目前, 针对不同监测指数的比较研究还较少, 仅在欧洲中部和加拿大北方森林研究区有过文献记载。由于指数的构建方式不同, 因此针对不同的扰动类型和扰动程度, 不同监测指数的响应能力也存在较大的差异。以森林砍伐为例, 森林砍伐分皆伐、择伐和抚育伐等, 皆伐最容易监测, 而对后两者的监测却比较困难。Hardisky 等^[73]比较了 NDVI 和 NDMI, 指出 NDMI 比 NDVI 更易于监测因择伐造成的扰动。Hais 等^[77]比较了 4 种指数 (NDMI、缨帽分量、DI 和 DI') 对树皮甲虫暴发和皆伐扰动的表现特点和响应能力, 结果表明, DI'、缨帽湿度和亮度分量对 2 种类型的扰动都比较敏感, 且表现出较为明显的差异; Schroeder 等^[94]比较了 TM5、缨帽湿度、IFZ、NDVI、NBR 和 TCA 等 6 种扰动监测指数对森林火灾和砍伐扰动的区分能力, 研究表明, 基于短波红外波段构建的指数对于火灾和砍伐的区分能力普遍优于使用近红外波段构建的指数, 并且该研究还进一步分析了不同类型扰动对北方森林生态系统的影响。

4 结论

本文对森林扰动遥感监测方法和监测指数进行了回顾和总结, 归纳并比较了目前几种扰动监测指数。可以看出, 尽管近年来森林扰动遥感监测技术得到了较好的应用, 然而仍存在一定的不足, 建议今后可以在以下 3 个方面开展进一步的研究:

1) 加强扰动监测指数的比较研究。由于不同指数的构建方式和理论依据各不相同, 针对不同类型扰动的监测效果也存在差异, 因此, 对于特定的森林扰动类型, 通过比较不同指数的监测效果有助于进一步区分和识别扰动原因。

2) 开展长时间序列扰动监测分析。长期以来, 森林扰动研究多为基于 2 期或 3 期遥感资料的变化研究, 不仅费时费力, 还存在长时间序列分析时精度明显降低, 以致不能满足应用要求的问题。通过结合长时间序列扰动分析方法和适宜的扰动监测指数, 可以进一步提高森林扰动的监测效率。

3) 建立和完善适用于我国森林的扰动监测模型。森林的频繁变化对陆地碳汇的估算造成了很大的干扰, 而现有森林碳储量研究大多使用森林资源清查资料, 基于遥感资料的森林扰动监测开展较少。因此, 研究适用于我国森林的扰动监测模型具有重要的理论意义和应用价值。

参考文献 (References):

- [1] 王效科, 冯宗炜. 森林生态系统生物量和碳储量研究历史 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996: 335 - 347.
Wang X K, Feng Z W. Study on the History of Forest Ecosystem Biomass and Carbon Storage [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1996: 335 - 347.
- [2] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. Science, 1994, 263 (5144): 185 - 190.
- [3] 王绍强, 许 君, 周成虎. 土地覆被变化对陆地碳循环的影响——以黄河三角洲河口地区为例 [J]. 遥感学报, 2001, 5 (2): 142 - 148.
Wang S Q, Xu J, Zhou C H. The effect of land cover change on carbon cycle: A case study in the estuary of Yellow River Delta [J]. Journal of Remote Sensing, 2001, 5 (2): 142 - 148.
- [4] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积 [M]. 北京: 气象出版社, 2003: 139 - 179.
Yu G R. Global Change, Carbon Cycle and Storage in Terrestrial Ecosystem [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003: 139 - 179.
- [5] Schimel D S, Emanuel W, Rizzo B, et al. Continental scale variability in ecosystem processes: Models, data, and the role of disturbance [J]. Ecological Monographs, 1997, 67 (2): 251 - 271.
- [6] Houghton R A. Land - use change and the carbon cycle [J]. Global Change Biology, 1995, 1 (4): 275 - 287.
- [7] Detwiler R P, Hall C A S. Tropical forests and the global carbon cycle [J]. Science, 1988, 239 (4835): 42 - 47.
- [8] Houghton R A, Hackler J L, Lawrence K T. The U S carbon budget: Contributions from land - use change [J]. Science, 1999, 285 (5427): 574 - 578.
- [9] Schimel D S, House J I, Hibbard K A, et al. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystem [J]. Nature, 2001, 414 (6860): 169 - 172.
- [10] Goward S N, Masek J G, Cohen W, et al. Forest disturbance and North American carbon flux [J]. Ecosystems, 2008, 89 (11): 105 - 116.
- [11] Waring R H, Running S W. Forest Ecosystems: Analysis at Multiple Scales [M]. San Diego: Academic Press, 1998.
- [12] Oliver C D, Larson B C. Forest Stand Dynamics [M]. New York: John Wiley and Sons, 1996.
- [13] Edwards G. Image segmentation, cartographic information and knowledge - based reasoning: Getting the mixture right [C] // 10th Annual International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Remote Sensing Science for the Nineties. College Park, MD, USA: IEEE, 1990: 1641 - 1644.
- [14] Colwell J, Davis G, Thomas F. Detection and Measurement of Changes in the Production and Quality of Renewable Resources [M]. Ann Arbor, MI: ERIM, 1980.
- [15] Howarth P J, Wickware G M. Procedures for change detection using

- Landsat digital data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1981, 2(3): 277 – 291.
- [16] Allum J A E, Dreisinger B R. Remote sensing of vegetation change near Inco's Sudbury mining complexes[J]. International Journal of Remote Sensing, 1987, 8(3): 399 – 416.
- [17] Hall F G, Botkin D B, Strebel D E, et al. Large – scale patterns of forest succession as determined by remote sensing[J]. Ecology, 1991, 72(2): 628 – 640.
- [18] Miller A B, Bryant E S, Birnie R W. An analysis of land cover changes in the Northern Forest of New England using multitemporal Landsat MSS data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(2): 245 – 265.
- [19] Cohen W B, Spies T A, Alig R J, et al. Characterizing 23 years (1972 – 95) of stand replacement disturbance in western Oregon forests with Landsat imagery[J]. Ecosystems, 2002, 5(2): 122 – 137.
- [20] Collins J B, Woodcock C E. Change detection using the Gramm – Schmidt transformation applied to mapping forest mortality[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 50(3): 267 – 279.
- [21] Coppin P R, Bauer M E. Processing of multitemporal Landsat TM imagery to optimize extraction of forest cover change features[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(4): 918 – 927.
- [22] Lutes D C, Keane R E, Caratti J F, et al. FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System[R]. General Technical Report RMRS – GTR – 164 – CD. Washington, D C, 2006.
- [23] 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.
- [24] DeRose R J, Long J N, Ramsey R D. Combining dendrochronological data and the disturbance index to assess Engelmann spruce mortality caused by a spruce beetle outbreak in southern Utah, USA[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(9): 2342 – 2349.
- [25] Huang C Q, Goward S N, Schleeweis 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.
- [26] 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.
- [27] 张连华, 庞 勇, 岳彩荣, 等. 基于缨帽变换的景洪市时间序列 Landsat 影像森林扰动自动识别方法研究[J]. 林业调查规划, 2013, 38(2): 6 – 12.
- Zhang L H, Pang Y, Yue C R, et al. Forest disturbance automatic identification method based on time series Landsat image of Tasseled cap transformation[J]. Forest Inventory and Planning, 2013, 38(2): 6 – 12.
- [28] Adams J B, Sabol D E, Kapos V, et al. Classification of multispectral images based on fractions of endmembers: Application to land – cover change in the Brazilian Amazon[J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 52(2): 137 – 154.
- [29] Woodcock C E, Macomber S A, Pax – Lenney M, et al. Monitoring large areas for forest change using Landsat: Generalization across space, time and Landsat sensors[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 78(1/2): 194 – 203.
- [30] Gitas I Z, Mitri G H, Ventura G. Object – based image classification for burned area mapping of Creus Cape, Spain, using NOAA – AVHRR imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 92(3): 409 – 413.
- [31] 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.
- [32] Jin S, Sader S A. MODIS time – series imagery for forest disturbance detection and quantification of patch size effects[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 99(4): 462 – 470.
- [33] Schroeder T A, Wulder M A, Healey S P, et al. Detecting post – fire salvage logging from Landsat change maps and national fire survey data[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 122: 166 – 174.
- [34] Hansen M C, DeFries R S, Townshend J R G, et al. Towards an operational MODIS continuous field of percent tree cover algorithm: Examples using AVHRR and MODIS data[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1/2): 303 – 319.
- [35] Hansen M C, DeFries R S, Townshend J R G, et al. Global percent tree cover at a spatial resolution of 500 meters: First results of the MODIS vegetation continuous fields algorithm[J]. Earth Interact, 2003, 7(10): 1 – 15.
- [36] Potapov P, Hansen M C, Stehman S V, et al. Combining MODIS and Landsat imagery to estimate and map boreal forest cover loss[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(9): 3708 – 3719.
- [37] Eklundh L, Johansson T, Solberg S. Mapping insect defoliation in Scots pine with MODIS time – series data[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(7): 1566 – 1573.
- [38] Vogelmann J E, Tolk B, Zhu Z L. Monitoring forest changes in the southwestern United States using multitemporal Landsat data[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(8): 1739 – 1748.
- [39] Röder A, Hill J, Duguy B, et al. Using long time series of Landsat data to monitor fire events and post – fire dynamics and identify driving factors: A case study in the Ayora region (eastern Spain) [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(1): 259 – 273.
- [40] Röder A, Udelhoven T, Hill J, et al. Trend analysis of Landsat – TM and – ETM⁺ imagery to monitor grazing impact in a rangeland ecosystem in Northern Greece[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(6): 2863 – 2875.
- [41] Kennedy R E, Yang Z Q, Cohen W B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. Land – Trendr – Temporal segmentation algorithms[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(12): 2897 – 2910.
- [42] Kennedy R E, Yang Z Q, Cohen W B, et al. Spatial and temporal patterns of forest disturbance and regrowth within the area of the Northwest Forest Plan[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 122: 117 – 133.
- [43] Gómez C, White J C, Wulder M A. Characterizing the state and processes of change in a dynamic forest environment using hierarchical spatio – temporal segmentation[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(7): 1665 – 1679.
- [44] 杨 辰, 沈润平, 郁达威, 等. 利用遥感指数时间序列轨迹监测森林扰动[J]. 遥感学报, 2013, 17(5): 1246 – 1263.
- Yang C, Shen R P, Yu D W, et al. Forest disturbance monitoring based on the time – series trajectory of remote sensing index[J]. Journal of Remote Sensing, 2013, 17(5): 1246 – 1263.

- [45] 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.
- [46] Li M S, Huang C Q, Zhu Z L, et al. Assessing rates of forest change and fragmentation in Alabama, USA, using the vegetation change tracker model[J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257(6): 1480 – 1488.
- [47] Li A N, Huang C Q, Sun G Q, et al. Modeling the height of young forests regenerating from recent disturbances in Mississippi using Landsat and ICESat data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(8): 1837 – 1849.
- [48] Vogelmann J E, Kost J R, Tolk B, et al. Monitoring landscape change for landfire using multi – temporal satellite imagery and ancillary data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2011, 4(2): 252 – 264.
- [49] Wallace J F, Campbell H. Analysis of remotely sensed data[M]// *Remote Sensing of Biosphere Functioning*. New York: Springer – Verlag, 1989: 291 – 304.
- [50] Hall R J. The roles of aerial photographs in forestry remote sensing image analysis[M]// *Remote Sensing of Forest Environments*. US: Springer, 2003: 47 – 75.
- [51] Hais M, Kučera T. Surface temperature change of spruce forest as a result of bark beetle attack: Remote sensing and GIS approach[J]. *European Journal of Forest Research*, 2008, 127(4): 327 – 336.
- [52] Horler D N H, Ahern F J. Forestry information content of Thematic Mapper data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(3): 405 – 428.
- [53] Lambert N J, Ardö J, Rock B N, et al. Spectral characterization and regression – based estimates of forest damage in Norway spruce stands in the Czech Republic using landsat thematic mapper data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16: 1261 – 1287.
- [54] Toomey M, Vierling L A. Multispectral remote sensing of landscape level foliar moisture: Techniques and applications for forest ecosystem monitoring[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35(5): 1087 – 1097.
- [55] Guyot G, Riom J. Review of Factors Affecting Remote Sensing of Forest Decline. Proceedings – seminar on Remote Sensing of Forest Decline Attributed to Air Pollution[M]. Laxenburg, Austria, 1988.
- [56] Ekstrand S. Assessment of forest damage with Landsat TM: Correction for varying forest stand characteristics[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 47(3): 291 – 302.
- [57] Vogelmann J E, Rock B N. Assessing forest damage in high – elevation coniferous forests in Vermont and New Hampshire using thematic mapper data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 24(2): 227 – 246.
- [58] Hunt E R Jr, Rock B N. Detection of changes in leaf water content using near – and middle – infrared reflectances[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1989, 30(1): 43 – 54.
- [59] Fiorella M, Ripple W J. Analysis of conifer forest regeneration using Landsat thematic mapper data[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1993, 59(9): 1383 – 1388.
- [60] Crist E P, Ciccone R C. A physically – based transformation of thematic mapper data – the TM tasseled cap[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1984, 22(3): 256 – 263.
- [61] Kauth R J, Thomas G S. The tasseled cap – a graphic description of the spectral – temporal development of agricultural crops as seen by Landsat[J]. *Laboratory for Applications of Remote Sensing*, 1976: 4B41 – 4B51.
- [62] 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.
- [63] Cohen W B, Spies T A, Fiorella M. Estimating the age and structure of forests in a multi – ownership landscape of western Oregon, U S A[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16(4): 721 – 746.
- [64] 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.
- [65] Wulder M A, Dymond C C, White J C, et al. Surveying mountain pine beetle damage of forests: A review of remote sensing opportunities[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 221(1 – 3): 27 – 41.
- [66] Kuzera K, Rogan J, Eastman J R. Monitoring vegetation regeneration and deforestation using change vector analysis: Mt St Helens study area[C]// *ASPRS Annual Conference*. Baltimore, Maryland, 2005.
- [67] Wulder M A, Skakun R S, Kurz W A, et al. Estimating time since forest harvest using segmented Landsat ETM⁺ imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(1/2): 179 – 187.
- [68] Huete A R. A soil – adjusted vegetation index(SAVI)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 25(3): 295 – 309.
- [69] Asrar G, Fuchs M, Kanemasu E T, et al. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat[J]. *Agronomy Journal*, 1983, 76(2): 300 – 306.
- [70] Turner D P, Cohen W B, Kennedy R E, et al. Relationships between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70(1): 52 – 68.
- [71] Maselli F. Monitoring forest conditions in a protected Mediterranean coastal area by the analysis of multiyear NDVI data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4): 423 – 433.
- [72] 付安民, 孙国清, 过志峰, 等. 基于 MODIS 数据的东北亚森林时序变化分析[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2010, 46(5): 835 – 843.
Fu A M, Sun G Q, Guo Z F, et al. Forest changes detection in the northeastern Asia using MODIS imagery[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010, 46(5): 835 – 843.
- [73] Hardisky M A, Klemas V, Smart R M, et al. The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina alterniflora* canopies[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1983, 49(1): 77 – 83.
- [74] 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.
- [75] Sader S A, Bertrand M, Wilson E H. Satellite change detection of forest harvest patterns on an industrial forest landscape[J]. *Forest Science*, 2003, 49(3): 341 – 353.
- [76] Skakun R S, Wulder M A, Franklin S E. Sensitivity of the thematic mapper enhanced wetness difference index to detect mountain pine beetle red – attack damage[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(4): 433 – 443.

- [77] Hais M, Jonášová M, Langhammer J, et al. Comparison of two types of forest disturbance using multitemporal Landsat TM/ETM⁺ imagery and field vegetation data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(4): 835–845.
- [78] Huang C Q, Thomas N, Goward S N, et al. Automated masking of cloud and cloud shadow for forest change analysis using Landsat images [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(20): 5449–5464.
- [79] Miller J D, Thode A E. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 109(1): 66–80.
- [80] Soverel N O, Perrakis D D B, Coops N C, et al. Estimating burn severity from Landsat dNBR and RdNBR indices across western Canada [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(9): 1896–1909.
- [81] Sunderman S O, Weisberg P J. Remote sensing approaches for reconstructing fire perimeters and burn severity mosaics in desert spring ecosystems [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(9): 2384–2389.
- [82] Mannstein H. Surface energy budget, surface temperature and thermal inertia [M]// *Remote Sensing Applications in Meteorology and Climatology*. Netherlands: Springer, 1987: 391–410.
- [83] Sellers P J, Hall F G, Asrar G, et al. The first ISLSCP field experiment (FIFE) [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1988, 69(1): 22–27.
- [84] Friedl M A, Davis F W. Sources of variation in radiometric surface temperature over a tallgrass prairie [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48(1): 1–17.
- [85] Goetz S J. Multi-sensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(1): 71–94.
- [86] Nemani R, Running S W. Land cover characterization using multi-temporal red, near-IR, and thermal-IR data from NOAA/AVHRR [J]. *Ecological Applications*, 1997, 7(1): 79–90.
- [87] Price J C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(5): 940–948.
- [88] Smith R C G, Choudhury B J. Analysis of normalized difference and surface temperature observations over southeastern Australia [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, 12(10): 2021–2044.
- [89] Wan Z, Zhang Y, Zhang Q, et al. Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(1): 261–274.
- [90] Mildrexler D J, Zhao M S, Heinsch F A, et al. A new satellite-based methodology for continental-scale disturbance detection [J]. *Ecological Applications*, 2007, 17(1): 235–250.
- [91] Mildrexler D J, Zhao M S, Running S W. Testing a MODIS global disturbance index across North America [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(10): 2103–2117.
- [92] Coops N C, Wulder M A, Iwanicka D. Large area monitoring with a MODIS-based Disturbance Index (DI) sensitive to annual and seasonal variations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(6): 1250–1261.
- [93] 尤 慧, 刘荣高, 祝善友, 等. 加拿大北方森林火烧迹地遥感分析 [J]. *地球信息科学学报*, 2013, 15(4): 597–603.
You H, Liu R G, Zhu S Y, et al. Burned area detection in the Canadian boreal forest using MODIS imagery [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2013, 15(4): 597–603.
- [94] 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.

Progress in the study of forest disturbance by remote sensing

YANG Chen^{1,2}, SHEN Runping³

(1. Shanghai Meteorological Disaster Protection Technology Center, Shanghai 200030, China; 2. Shanghai Lightning Protection Center, Shanghai 200030, China; 3. School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Forest ecosystems, which constitute a major part of the terrestrial biosphere, play an important role in terrestrial carbon cycling and storage. However, the accuracy of regional forest carbon-flux estimation is greatly influenced by the lack of forest disturbance data. After reviewing the monitoring methods and index, the authors compared several disturbance monitoring indices. The current study of forest disturbance based on long time series is mainly conducted by North America countries, and China's research work in this aspect is very rare. Therefore, on account of characteristics of China's forest change, it is of important theoretic significance and application value to develop a disturbance monitoring method applicable to China's forest by combining a long time series disturbance analysis method and a appropriate monitoring index.

Keywords: forest disturbance; monitoring method; monitoring indexes

第一作者简介: 杨 辰(1988-),男,硕士,研究方向为生态环境遥感及气象灾害风险分析。Email: yangc@lightning.sh.cn。

通信作者: 沈润平(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事遥感建模与分析研究。Email: rpshen@nuist.edu.cn。

(责任编辑: 刁淑娟)