

复合高低空间分辨率遥感影像的云南省近十年森林扰动提取

曹 云<sup>1</sup>, 祝善友<sup>1\*</sup>, 高 场<sup>2</sup>, 张桂欣<sup>1</sup>, 张海龙<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学 地理与遥感学院, 江苏 南京 210044; 2. 南京市浦口区气象局, 江苏 南京 211800)

**摘 要:**选择云南省作为研究区域,利用 2002、2013 年的 Landsat 数据和 2002—2013 年的 MODIS 产品数据,分别构建扰动指数提取森林扰动信息。在此基础上,根据空间位置的对应关系,抽样部分区域,建立 MODIS 数据与 Landsat 数据扰动提取结果间的统计关系,将该关系外推到整个研究区域,利用 FORMA 数据对扰动估算结果进行精度评价。结果表明,复合高低分辨率图像校正后的 MODIS 扰动提取具有较高精度,与 FORMA 相比,平均相对误差为 10.43%,近 10 a 云南省森林扰动主要发生在大理、丽江、玉溪等林区地带,其中 2010 年扰动最为剧烈。

**关键词:**森林扰动; Landsat; MODIS; 抽样方法

**中图分类号:**S758.4      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2015)06-0203-07

Extraction of Forest Disturbance in the Last Decade in Yunnan Province Based on Composition of Remotely Sensed Image with High and Low Spatial Resolution

CAO Yun<sup>1</sup>, ZHU Shan-you<sup>1\*</sup>, GAO Yang<sup>2</sup>, ZHANG Gui-xin<sup>1</sup>, ZHANG Hai-long<sup>1</sup>

(1. School of Geography and Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China; 2. Pukou Meteorological Bureau of Nanjing, Nanjing, Jiangsu 211800, China)

**Abstract:**Selecting Yunnan Province as the study area, this paper adopted the disturbance index (DI) to extract forest disturbance from Landsat data imaged on 2002 and 2013, as well as MODIS products imaged from 2002 to 2013. On this basis, according to the corresponding spatial location of the sampled blocks, the perturbation statistical relationship between the deforestation results of the MODIS data and Landsat data was built, which was then extrapolated to map the forest disturbance within the entire study area, and the accuracy of the disturbance estimation results were evaluated by the FORMA data. The results showed that the calibrated MODIS-detected disturbance by compounding images with high and low resolutions had a higher precision. Compared with FORMA, the mean relative error (MRE) was 10.43%. Forest disturbances mainly occurred in Dali, Lijiang, Yuxi in the last decade. Especially, the disturbance of 2010 was the most dramatic.

**Key words:**forest disturbance; Landsat; MODIS; sampling method

森林是陆地上最大的生态系统,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。森林通过植被光合作用把大量 CO<sub>2</sub> 固定起来,是最大的陆地碳汇。由于森林砍伐、火灾和病虫害等森林扰动事件的发生,使森林群落更替为疏林、低矮灌丛甚至草地,将原本储存于生物体中的

碳重新释放到大气中,严重影响着区域生态平衡与稳定,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<sup>[1]</sup>。开展区域性乃至全球性的森林扰动与变化动态监测具有重要的理论与实践意义,是全球变化研究中重要的组成部分。

森林变化与扰动监测研究中,除了常规的地面

收稿日期:2014-11-06 修回日期:2015-04-03

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2010CB950701);国家自然科学基金(41401471、41001289、41201369)。

作者简介:曹 云,女,在读硕士,研究方向:生态环境遥感。E-mail:caoxiaoyun1989@163.com

\* 通信作者:祝善友,男,副教授,博士,研究方向:热红外遥感与资源环境遥感。E-mail:zsyzg@163.com

调查手段之外,许多研究采用了 AVHRR(advanced very high resolution radiometer)、MODIS (moderate-resolution imaging spectroradiometer)等极轨卫星无云图像,开展区域性的森林变化遥感监测研究<sup>[2-4]</sup>。但由于这些数据的空间分辨率限制,许多森林覆盖变化发生在亚像元尺度<sup>[5-6]</sup>,直接用于估算森林退化面积的精度不能保证<sup>[7-11]</sup>。较高空间分辨率的卫星图像数据,如 Landsat 卫星的 TM(thematic mapper)、ETM+(enhanced thematic mapper)等,可提供更高精度的森林变化定量监测<sup>[7-8]</sup>。使用高分辨率数据监测森林退化主要有 2 种不同的方法:全地面覆盖制图方法和抽样方法<sup>[8]</sup>。但由于云覆盖的影响和 Landsat 卫星图像空间覆盖范围较小、卫星回归周期较长等原因,全地面覆盖制图方法代价昂贵、耗时多<sup>[12-14]</sup>,有些区域甚至无法获取可靠数据,这对于大区域或全球性的全地面森林覆盖及其变化制图来说非常困难。总体来说,低空间分辨率影像具有覆盖范围大,能够以较高的时间频率监测森林动态变化,但其监测精度得不到保证;而较高空间分辨率影像可以更高的精度监测森林变化,但其动态监测能力与空间覆盖范围相对较差,因此,有必要充分结合这 2 类数据的优势,实现较高时间分辨率、较大范围的高精度森林变化监测。

云南是我国 4 大林区之一,森林生态系统在控制 CO<sub>2</sub> 浓度和应对全球气候变化中具重要贡献。选择云南省作为研究区,尝试用复合高低空间分辨率遥感图像,开展 2002—2013 年间近 10 a 森林扰动监测研究,为服务于森林资源清查与管理提供数据与方法支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

云南省位于我国西南边陲,21°09′—29°15′N,97°30′—106°11′E 之间,总面积 39×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>。森林资源丰富、林业用地面积大、森林覆盖率高、活立木蓄积量多、林业发展基础好,具有面向东南亚、南亚开放的便利区位条件。根据 2007 年云南省森林资源连续清查第五次复查,全省林业用地面积 2 476.11×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,占全省土地总面积的 64.71%;森林面积 1 817.73×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,占林地面积的 73.41%;森林覆盖率达 47.50%<sup>[15]</sup>。云南省森林资源连续清查第二、三、四次复查统计资料显示,全省林分面积和蓄积虽然有所增长,但林分质量总体下降,客观反映了森林粗放经营和不合理的森林采伐的结果。

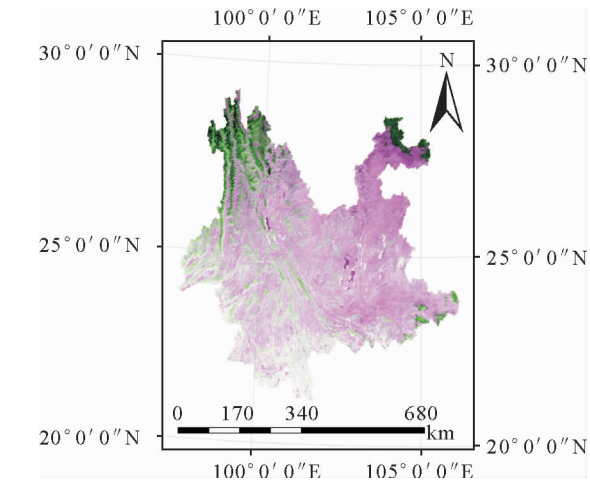


图 1 研究区遥感影像图

Fig. 1 Remote sensing image of the study area

### 1.2 数据

1.2.1 Landsat 系列卫星图像 包括 2002 年的 Landsat 5 TM、Landsat 7 ETM+数据和 2013 年的 Landsat 8 OLI(operational land imager)数据,覆盖整个研究区的 Landsat 卫星轨道为 path40-45, row27-34。Landsat 数据来源于美国地质调查局 USGS。研究中使用了 TM/ETM+数据的 1-5 波段和 7 波段,Landsat 8 OLI 数据的 2-7 波段提取森林扰动信息。

1.2.2 MODIS 数据与产品 获取 2002—2013 年云南省 MOD13A1 增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI)和 MOD11A2 地表温度数据(land surface temperature, LST)。MODIS 数据均通过 <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html> 下载。MOD11A2 地表温度(LST)数据为 8 d 合成、空间分辨率 1 000 m, MOD13A1 增强型植被指数(EVI)数据为 16 d 合成、空间分辨率 500 m,这 2 种产品数据的投影方式为正弦等积投影,数据存储格式为 EOS—HDF。研究中共使用了 LST 产品 1 196 幅, EVI 产品 598 幅。

1.2.3 辅助数据 森林资源监测行动组织(Forest Monitoring for Action, FORMA)是世界资源机构全球森林监测(Global Forest Monitoring, GFW)平台的重要组成部分。基于 NASA 提供的 1 km 空间分辨率的 MOD13A3 归一化指数数据, FORMA 利用扰动概率模型进行森林变化检测,提供月尺度的森林扰动监测结果。由于 FORMA 提供的数据从 2006 年开始,本研究选取 2007 年至 2013 年的数据进行结果验证。

### 1.3 研究方法

技术路线如图 2。

1.3.1 数据预处理

1.3.1.1 Landsat 数据预处理 对于从 USGS 获取的 TM、ETM+、OLI 数据分别进行辐射定标,利用 6S 辐射传输模型进行大气校正,然后将 2 个时段的数据利用区域灰度匹配方法自动产生匹配点,采取 2 次多项式方法进行图像配准,使配准精度控制在 0.5 个像元之内。为了消除云和云阴影对结果的

干扰,采用 ACCA<sup>[16-17]</sup> 云检测技术掩膜每幅影像上的云像元。

1.3.1.2 MODIS 数据预处理 采用 MRT(modis reprojection tools)软件对 MODIS 数据进行预处理,包括 MODIS 数据拼接、投影转换、图像剪切、图像配准、云和云阴影的处理。

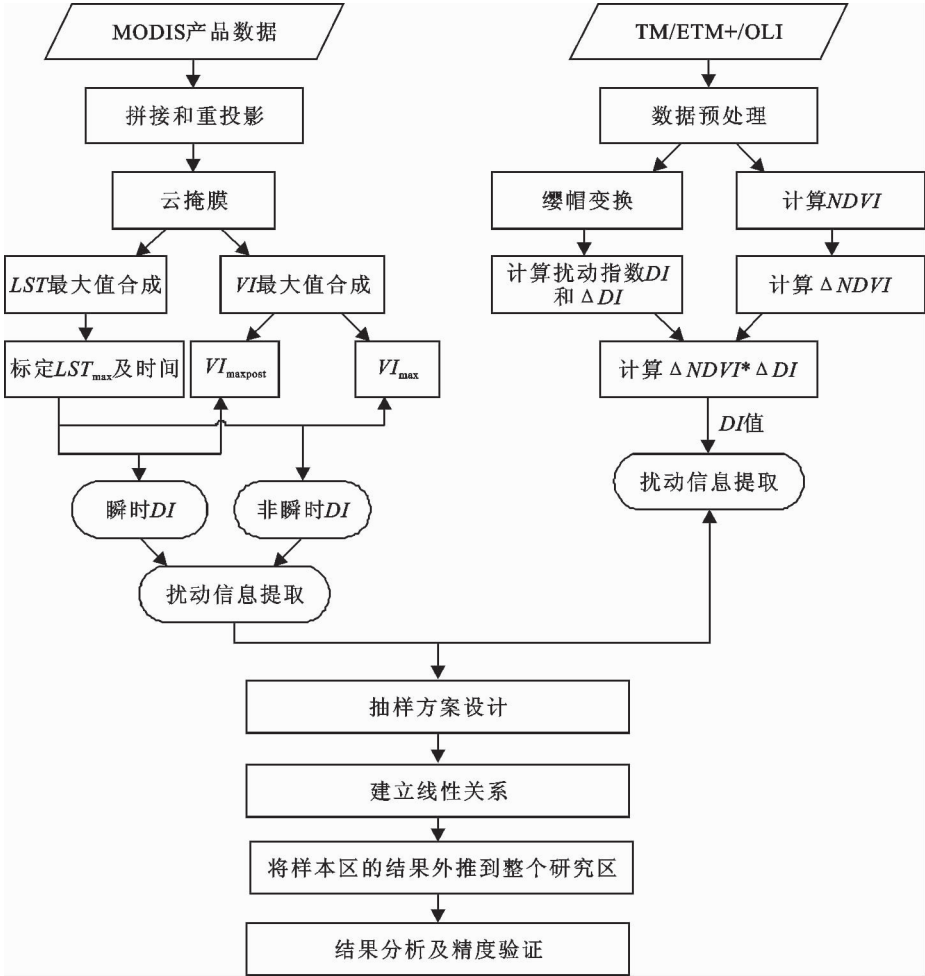


图 2 研究技术路线流程

Fig. 2 Research methodology flowchart

1.3.2 森林扰动提取方法

1.3.2.1 基于 Landsat 影像的森林扰动提取 基于缨帽变换的扰动指数(disturbance index, DI)较为广泛地应用于 Landsat 图像森林扰动提取<sup>[10]</sup>。DI 指数由 3 个缨帽分量线性组合构成,相对于未受到扰动的森林来说,扰动区域的亮度分量较高而绿度和湿度分量较低。

1) 扰动指数 DI 计算  
将预处理后的 Landsat 数据进行缨帽变换与归一化:

$$B_r = (B - B_u) / B_0$$
 (1)

$$G_r = (G - G_u) / G_0$$
 (2)

$$W_r = (W - W_u) / W_0$$
 (3)

式中,  $B_r$ 、 $G_r$ 、 $W_r$  分别代表归一化亮度、绿度和湿度;  $B_u$ 、 $G_u$ 、 $W_u$  分别代表紧密森林平均亮度、绿度和湿度;  $B_0$ 、 $G_0$ 、 $W_0$  分别代表紧密森林亮度、绿度和湿度的标准差;  $B$ 、 $G$ 、 $W$  分别代表缨帽变换后的亮度、绿度和湿度分量。

计算扰动指数 DI、 $\Delta DI$

$$DI = B_r - (G_r + W_r)$$
 (4)

$$\Delta DI = DI_y - DI_{y-1}$$
 (5)

式中,  $\Delta DI$  为检测时段内的 DI 差值,  $DI_{y-1}$ 、 $DI_y$  分别为 2002 年、2013 年的 DI 值。

计算归一化植被指数 NDVI 和  $\Delta NDVI$ :

$$NDVI=\frac{NIR(4)-R(3)}{NIR(4)+R(3)}\tag{6}$$

式中, $NIR(4)$ 和 $R(3)$ 分别表示近红外和红外波段的反射率。

$$\Delta NDVI=NDVI_{y-1}-NDVI_y\tag{7}$$

式中, $\Delta NDVI$ 为检测时段内归一化植被指数的差值, $NDVI_{y-1}$ 、 $NDVI_y$ 分别为2002、2013年的 $NDVI$ 值。

2) 扰动信息提取

利用2013年 $DI$ 值、 $\Delta NDVI$ 与 $\Delta DI$ 的乘积值共同判断森林扰动发生区域。如果仅仅使用 $\Delta NDVI$ 来判断森林扰动,由于其变化范围较小,不利于选择阈值,会使扰动漏检概率增大。使用 $\Delta NDVI$ 与 $\Delta DI$ 乘积可拉大扰动与非扰动像元之间的差异,从而便于选取合适的阈值。

1.3.2.2 基于MODIS影像的森林扰动提取 采用MODIS瞬时扰动和非瞬时扰动指数<sup>[3-4]</sup>从多时相、长时间序列的MODIS图像中提取森林扰动与变化区域。

1) 扰动指数计算

瞬时扰动  $DI_{inst}$

$$DI_{inst}=\frac{(LST_{max}/EVI_{max\ post})_{current(y)}}{(LST_{max}/EVI_{max\ post})_{mean(y-1)}}\tag{8}$$

式中 $LST_{max}$ 表示8 d合成 $LST$ 对应的年最大值, $EVI_{max\ post}$ 为每年 $LST$ 最大值出现时间之后的每个像元 $EVI$ 最大值, $current(y)$ 表示当前年份, $mean(y-1)$ 指目标检测年之前多年的均值。

非瞬时扰动  $DI_{Non\_inst}$

$$DI_{Non\_inst}=\frac{(LST_{max}/EVI_{max})_{current(y)}}{(LST_{max}/EVI_{max})_{mean(y-1)}}\tag{9}$$

式中, $EVI_{max}$ 为每个像元一年中的最大值。

2) 扰动信息提取

在植被未受扰动的正常情况下,MODIS扰动指数在1附近波动。使用基于像元统计分析的方法设定不同阈值,标定瞬时与非瞬时扰动,并将瞬时与非瞬时扰动图像叠加,从而生成研究区扰动结果图。由于 $EVI$ 和 $LST$ 产品的背景噪声,会产生扰动图像中离散分布的扰动像元,研究中通过滤波方法进行消除。

1.3.3 复合Landsat与MODIS图像的森林扰动信息提取 根据空间位置的对应关系,利用抽样方法在研究区选取部分区域,建立MODIS数据与Landsat数据扰动提取结果之间的统计关系,并将该关系从样本区域外推到整个研究区,从而获得整个研究区的扰动面统计图。

1.3.3.1 抽样方案设计 根据抽样方法中样本图

像与位置的确定原则,可将抽样方法划分为随机抽样、分层抽样、规则抽样3大类。选择随机抽样方法分析研究区的森林变化情况。随机抽样在研究区内的部分区域随机选择整景图像或图像的部分区域作为样本<sup>[16]</sup>。联合国粮食及农业组织(FAO)认为全地面覆盖制图用于估算森林退化的代价较高,建议采用随机抽样方法代替,使用较小采样单元,而不是采用整景图像可能会取得更高精度的估算结果<sup>[8,18]</sup>。研究过程中,将Landsat数据和MODIS数据提取的扰动结果分割为多个大小相同的斑块,每个斑块为15 km×15 km,随机选择Landsat图像中部分区域作为样本,找到对应位置的MODIS数据区域。由于随机抽样精度随着抽样斑块数目变化,当抽样斑块达到一定数目时,外推估算结果基本不再变化。据此并参考前人研究工作<sup>[6]</sup>,研究中选择抽样数为样本总数的10%。

1.3.3.2 基于Landsat订正的MODIS图像森林扰动提取 利用抽样样本数据,建立Landsat和MODIS数据提取的扰动面积之间的线性关系,代入MODIS数据每个斑块的扰动面积,可得到复合高低空间分辨率图像信息订正后的MODIS监测森林扰动面积。

2 结果与分析

2.1 基于Landsat数据的扰动结果分析

通过目视解译并对比扰动发生前后的Landsat彩色图像,经过多次阈值设定试验,确定了森林扰动提取阈值(表1)。

表1 基于Landsat数据的森林扰动监测参数阈值

Table 1 The threshold used for monitoring forest disturbance based on Landsat data

参数	意义	阈值
$DI$	提取森林分布区域	$\leq 20$
$\Delta NDVI * \Delta DI$	提取森林扰动变化区域	$\geq 5.5$

以轨道path131、row43影像为例,分析Landsat数据扰动监测结果精度(图3)。对比2002年影像、2013年影像和扰动提取结果,可以清晰看出,图3中黄色区域内大面积森林变化能够被准确提取,表明基于Landsat数据的扰动指数可以精确地提取森林变化信息。

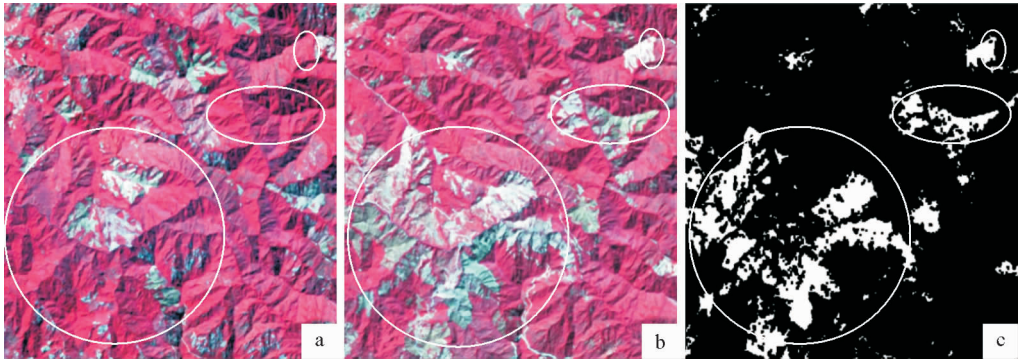
2.2 基于MODIS数据的扰动结果分析

为了分析MODIS数据监测结果的合理性及其局限性,选取Landsat path131、row42轨道对应区域的数据进行比较(图4)可以看到,在蓝色区域,Landsat、MODIS数据都监测到森林变化,说明MODIS数据在大面积森林扰动监测中具有较高的



精度;在黄色区域,MODIS 数据监测到森林变化,而 Landsat 数据却没有监测到,主要原因是 MODIS 数据监测结果是多年结果的叠加,而 Landsat 数据不能反映 2002—2013 年中间年份的森林退化与再生;在黑色区域,Landsat 数据能够监测到森林变化,而

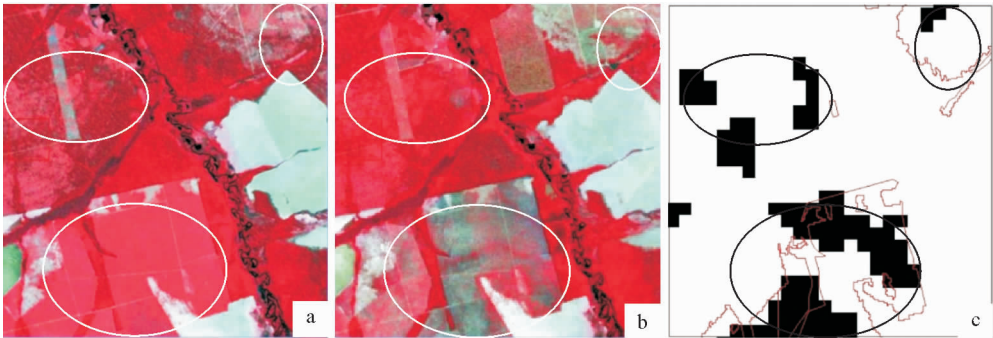
MODIS 数据由于空间分辨率较低,对于一些发生在亚像元尺度内的森林变化不能准确提取,说明 MODIS 数据监测小面积或零散分布的森林变化具有一定的局限性。



注:a、b、c 图分别为 2002 年的 TM 影像、2013 年的 OLI 影像、扰动结果图。

图 3 基于 Landsat 数据的扰动结果提取

Fig. 3 Extraction of the forest disturbance based on Landsat data



注:a 图为 2002 年的 TM 影像、b 图为 2013 年的 OLI 影像、c 图为 MODIS、Landsat 提取变化结果叠加,其中红色多边形为 Landsat 监测结果,黑色为 MODIS 监测结果。

图 4 Landsat 与 MODIS 提取森林扰动对比

Fig. 4 Comparison of forest disturbance extracted from Landsat and MODIS

2.3 复合 Landsat 与 MODIS 图像森林扰动信息提取

抽样 Landsat 数据总样本数的 10%,以 Landsat 数据监测的扰动面积作为 Y 轴,MODIS 数据监测的扰动面积作为 X 轴,建立 2 种数据监测扰动面积之间的线性关系(图 5)。MODIS、Landsat 数据监测的森林扰动结果之间线性相关性非常高,说明 2 种数据监测结果之间具有较高的吻合度。利用抽样区域建立的 MODIS、Landsat 扰动提取结果之间的关系,代入 MODIS 数据提取的每个斑块扰动面积,可外推获得整个研究区森林扰动面积。

为了验证复合 MODIS、Landsat 数据的线性关系外推结果,另外随机选择了 100 个斑块,将线性关系订正后的 MODIS 监测结果与 Landsat 监测结果进行对比(图 6)。可见基于 Landsat 数据监测的森林扰动面积与订正后的基于 MODIS 数据的监测结

果之间具有较高的吻合程度,充分说明了较高空间分辨率图像抽样方法辅助下的低空间分辨率图像能够获得更高的扰动监测精度。

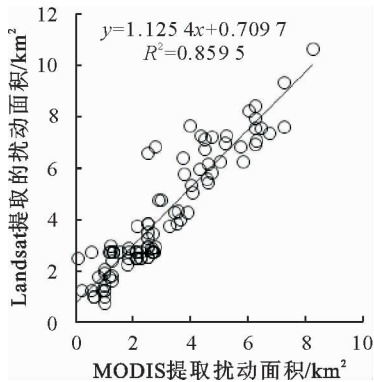


图 5 MODIS 和 Landsat 数据检测森林扰动面积之间的线性关系

Fig. 5 Linear relationship between sampled blocks of MODIS and Landsat disturbance data

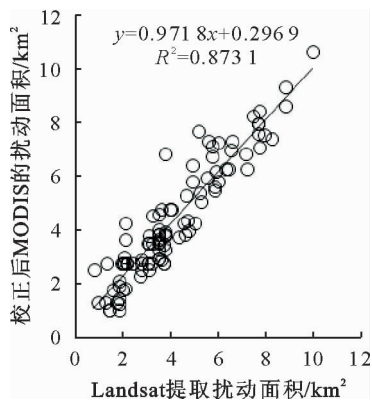


图 6 校正后 MODIS 数据和 Landsat 数据检测扰动面积之间线性关系

Fig. 6 Linear relationship between corrected MODIS and Landsat detected disturbance

2.4 校正后的 MODIS 监测扰动精度分析

以 FORMA 数据作为参考,评价线性模型校正后的 MODIS 森林扰动监测精度(表 2)可以看出,复合高低空间分辨率图像,利用抽样样本建立线性模

型,并对 MODIS 扰动结果进行校正后的扰动面积更接近于 FORMA 数据。由 MODIS 数据本身监测的扰动面积误差较大,平均相对误差为 28.72%;而校正后的 MODIS 扰动监测结果误差较小,平均相对误差下降为 10.43%。这表明基于抽样方法的低空间分辨率影像外推算法是可行的,这种数据融合方法在很大程度上克服了 MODIS 数据空间分辨率低和 Landsat 数据空间覆盖范围有限的问题。

2.5 基于 MODIS 数据的森林扰动时空分布分析

为了进一步分析研究区森林扰动时空变化,利用线性模型对 MODIS 森林扰动提取结果进行校正后,分别给出了 2002—2013 年间的森林扰动时间、空间分布。研究区在 2010、2012 和 2013 年扰动较强,其中 2010 年扰动最为剧烈,受扰动面积接近 830.27 km²,占云南森林覆盖面积的 0.5%(图 7)。近 10 a 云南省森林扰动主要集中在云南省的大理、丽江、玉溪等林区地带(图 8)。

表 2 校正前后的 MODIS 监测森林扰动面积与 FORMA 数据对比

Table 2 Comparison of forest disturbance areas between before and after corrected MODIS detected result, FORMA data

年份	MODIS 数据监测 /km²	MODIS 数据校正值 /km²	FORMA 测量值 /km²	相对误差 A/%	相对误差 B/%
2007	139.00	189.22	229.22	39.36	17.45
2008	98.50	140.17	170.21	42.13	15.65
2009	232.50	306.89	290.36	19.93	5.69
2010	674.00	830.27	910.38	25.97	8.79
2011	229.25	307.91	350.93	34.67	10.26
2012	487.50	627.73	670.76	27.32	6.41
2013	349.50	434.28	395.70	11.68	8.75
均值				28.72	10.43

注:相对误差 A、相对误差 B 分别表示与 FORMA 数据相比较,校正前后的 MODIS 扰动监测相对误差。

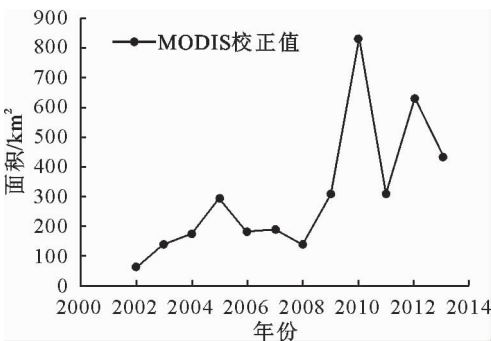


图 7 近 10 a 云南省森林扰动面积变化曲线

Fig. 7 Forest disturbance areas during recent ten years in Yunnan

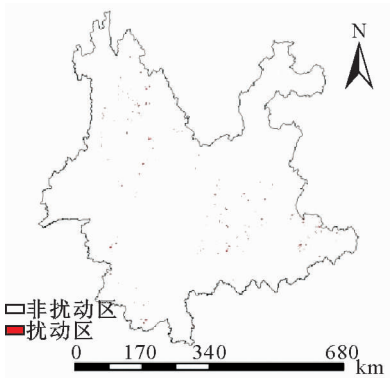


图 8 近 10 a 云南省 MODIS 森林扰动分布

Fig. 8 MODIS detected forest disturbance during the last ten years in Yunnan

3 结论讨论

针对 Landsat 系列传感器、MODIS 图像,分别构建扰动指数提取云南省森林变化信息,并通过抽样方法建立高低空间分辨率森林扰动结果之间的转换关系,用于提取研究区近 10 a 森林扰动时空变化

信息,探讨高低空间分辨率遥感图像在大面积森林扰动与变化准确监测应用中的可行性。Landsat 数据更能准确提取森林变化区域,而 MODIS 数据在大范围森林扰动提取方面具有较高精度,而无法提取扰动发生面积较小的区域。复合高低空间分辨率

影像数据,基于抽样方法建立二者之间的线性转换关系,可明显提高 MODIS 数据的森林扰动面积监测精度,平均相对误差由 28.72%下降为 10.43%。近 10 a 云南省森林扰动平均面积为 234.96 km<sup>2</sup>,其中 2010、2012 和 2013 年的扰动较强,其中 2010 年尤为剧烈,扰动区域主要包括云南省的大理、丽江、玉溪等林区地带。

通过分析,MODIS 数据空间覆盖范围大、具有较高的时间频率,在森林动态变化监测方面具有一定的可行性,但由于其空间分辨率较低,对于一些发生在亚像元尺度的变化不能准确监测,将其直接用于估算森林扰动面积的精度不能保证。在较低空间分辨率遥感图像提取森林扰动基础上,辅助于部分区域的较高空间分辨率图像进行校正,能够以更高的精度获得长时间序列、大面积的森林扰动时空分布。研究方法对于区域、乃至全球的森林扰动变化提取具有一定的借鉴意义。

参考文献:

[1] 王棣,余雕,张帆,等. 森林生态系统碳储量研究进展[J]. 西北林学院学报, 2014,29(2):85-91.  
WANG D, SHE D, ZHANG F, *et al.* Advances in the researches of carbon storage of forest ecosystems[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(2):85-91. (in Chinese)

[2] 凌小惠,刘悦翠,王锐. 基于"3S"技术的延川县森林资源调查数据的动态分析[J]. 西北林学院学报, 2009,24(4):37-40.  
LING X H, LIU Y C, WANG R. Dynamic analysis to inventory data of forest resource in Yanchuan County[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(4):37-40. (in Chinese)

[3] MILDREXLERD J, ZHAO M S, RUNNING S W, *et al.* Testing a MODIS Global Disturbance Index across North America[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(10): 2103-2117.

[4] COOPS N C, WULDER M A, IWANICKA D, *et al.* Large area monitoring with a MODIS-based Disturbance Index (DI) sensitive to annual and seasonal variations[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(6):1250-126.

[5] 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.

[6] HANSEN M C, STEHMAN S V, POTAPOVP V, *et al.* Humid tropical forest clearing from 2000 to 2005 quantified by using multitemporal and multiresolution remotely sensed data [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2008,

105:9439 -9444.

[7] MORTON D C, DEFRIES R S, SHIMABUKURO Y E, *et al.* Rapid assessment of annual deforestation in the Brazilian Amazon using MODIS data[J]. Earth Interaction, 2005, 9(8):1-22.

[8] CZAPLEWSKI R L. Can a sample of Landsat sensor scenes reliably estimate the global extent of tropical deforestation [J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(6): 1409-1412.

[9] DUVEILLER G, DEFOURNY P, DESCLEE B, *et al.* Deforestation in Central Africa: estimates at regional, national and landscape levels by advanced processing of systematically -distributed Landsat extracts [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(5):1969-1981.

[10] HEALEY S P, COHEN W B, YANG Z, *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.

[11] KUZERAK, ROGAN J, EASTMAN J R. Monitoring vegetation regeneration and deforestation using change vector analysis: Mt. St. Helens study area [C]. Maryland: ASPRS Annual Conference, Baltimore, 2005:172-178.

[12] FAO. Tropical resources assessment 1990[R]. Rome: FAO Forestry Paper 112, Food and Agricultural organization of United Nations, 1993.

[13] FAO. Forest resources assessment 1990: survey of tropical forest cover and study of change processes[R]. Rome: FAO Forestry Paper 130, Food and Agricultural organization of United Nations, 1996.

[14] BROICH M, STEHMAN S V, HANSEN M C, *et al.* A comparison of sampling designs for estimating deforestation from Landsat imagery: a case study of the Brazilian Legal Amazon [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(11):2448-2454.

[15] 云南省林业调查规划设计院. 云南省森林资源连续清查第五次成果(2002—2007)[R]. 昆明: 云南省林业调查规划设计院, 2008.

[16] IRISHRR. Landsat 7 automatic cloud cover assessment[J]. Algorithms for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery Vi, 2000, 4049: 348-355. DOI: 10. 1117/12. 410358.

[17] IRISH R R, BARKER J L, Goward S N, *et al.* Characterization of the Landsat 7 ETM+ automated cloud cloud-cover assessment (ACCA) algorithm [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2006, 72(10):1179-1188.

[18] TUCKER C J, Townshend. strategies for monitoring tropical deforestation using satellite data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(6/7):1461 -1471.