

文章编号: 1008 - 2786 - (2019)1 - 118 - 11

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000405

# 广西森林转型与森林扰动遥感监测研究

黄 萍<sup>1</sup>, 卢 远<sup>1, 2\*</sup>, 王丹媛<sup>1</sup>, 刘斌涛<sup>3</sup>

(1. 南宁师范大学 地理科学与规划学院, 南宁 530001; 2. 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 南宁 530001;

3. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

**摘 要:** 近 20 年来由于封山育林政策的实施和人工乔木林的大面积种植, 广西森林面积大幅增加, 正在经历深刻的森林转型, 森林转型过程中农林交错带和森林内部的结构重组都给生态系统带来了不容忽视的扰动。本文基于 2000—2016 年 MODIS-EVI 影像数据、1: 100 万地貌图和 4 期土地利用数据, 采用变化矢量法和 Sen + Mann-Kendall 对广西进行森林转型背景下的森林转型路径和森林内部扰动特征分析。研究表明: 自 2000 年以来广西森林的 EVI 变化强度以无变化和低变化类型为主, 总体 EVI 上升趋势略大于下降趋势, EVI 显著下降主要分布于十万大山、大瑶山、海洋山和越城岭等山地区域和桂西北的百色水利枢纽和龙滩水利枢纽周围, 显著上升部分主要集中于桂中南的左江—邕江—郁江流域平原丘陵区、桂西南喀斯特区和桂东北山地区地势低平的河谷地带。广西森林面积增加的土地来源于耕地和草地, 森林转型路径表现为“经济增长型”和“森林短缺型”两种路径并存, 或者存在更为复杂的复合型路径。广西森林内部扰动的减少型和扰动型分布于桂西北喀斯特和桂东北山地起伏度较大的陡坡区域, 增加型分布于桂中南的平原丘陵地区。由于山地陡坡区域和喀斯特地区的生态敏感性, 应更多关注扰动型和减少型在桂西北和桂东北地区的集中分布问题。

**关键词:** MODIS; Sen + Mann-Kendall; 变化矢量法; 森林转型; 森林扰动

**中图分类号:** P95; TP79

**文献标志码:** A

土地利用是人口、经济、资源、环境耦合系统的一条重要的纽带。近年来, 对人地关系和土地利用演变问题, 国际学术界总结的一些规律性的认识, 其中认可度最大的是“森林转型”或“国家土地利用形态转型”<sup>[1]</sup>。森林转型最初的概念是指在经济社会发展过程中, 一个国或区域的森林会由持续萎缩转而恢复性增长<sup>[2-3]</sup>。森林转型在全球各地普遍存在, 是一个复杂的社会经济过程, 森林转型共同点为森林面积的增加, 但是由于社会经济发展和自然条

件的差异, 世界各地的森林转型时间和表现形态均有不同。美国、法国等国家的森林转型发生于 19 世纪初<sup>[4-5]</sup>, 我国森林转型发生 1980 年前后, 与耕地转型时间吻合<sup>[6]</sup>。基于驱动力的不同, 可以表现为“经济发展型”和“森林短缺型”等类型, 前者指经济增长创造非农就业机会, 劣质农地退耕为森林; 后者是指社会对林木产品的需求增加, 在市场经济调剂下人工林面积增加<sup>[7-8]</sup>。目前国内外的森林转型案例研究思路均为利用土地利用、遥感影像和森林资

**收稿日期** (Received date): 2018 - 05 - 15; **改回日期** (Accepted date): 2019 - 01 - 04

**基金项目** (Foundation item): 国家自然科学基金 (41661043); 广西自然科学基金 (2015GXNSFAA139234); 广西科技重点研发计划 (AB16380318); 广西研究生教育创新计划项目 (YCSW2017185)。[National Natural Science Foundation of China (41661043); Natural Science Foundation of Guangxi Province of China (2015GXNSFAA139234); Guangxi Science and Technology Program (AB16380318); Graduate Students' Innovation and Entrepreneurship Training Program of Guangxi (YCSW2017185)]

**作者简介** (Biography): 黄萍 (1995 - ), 女, 广西横县人, 硕士研究生, 主要研究方向: 植被定量遥感、GIS 应用。[HUANG Ping (1995 - ), female, born in Hengxian, Guangxi province, M. Sc. candidate, research on quantitative remote sensing of vegetation and GIS applications] E-mail: huangping8101@126. com

\* **通讯作者** (Corresponding author): 卢远 (1971 - ), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 环境遥感。[LU Yuan (1971 - ), male, Ph. D., professor, specialized in environmental remote sensing] E-mail: luyuan. gx@qq. com

源调查数据分析森林面积变化,模拟土地利用空间变化格局<sup>[9]</sup>,判断区域森林转型驱动力类型和发展态势<sup>[10-14]</sup>。森林转型不仅意味在森林边际空间发生着土地利用类型的相互转化,森林内部结构也会发生变化。在市场经济驱动下,多功能的天然林常常转化为人工经济林,森林转型过程中伴随的森林扰动而引起的水土流失和生境丧失等诸多问题不容忽视<sup>[15]</sup>,基于土地利用转移矩阵等传统分析手段无法进行森林内部扰动强度和扰动类型的分析。

目前利用遥感进行森林扰动的研究较为成熟,主要有分类后比较法、影像差异法、分类及统计分析法、时间序列分析方法、综合分析法<sup>[16]</sup>。其中,新兴的时间序列分析法可以通过多期影像对研究区进行长时间森林扰动的特征提取和分析,是当前研究的热点<sup>[17-24]</sup>。目前可用于长时间(>10 a)森林监测的数据集有 AVHRR、MODIS、SPOT 和 Landsat 等。MODIS 涵括了 NDVI 和 EVI 两种植被指数数据集,MODIS-EVI 不同于 NDVI 采用比值的方式减少大气影响,MODIS-EVI 在高植被覆盖地区避免出现过饱和问题<sup>[21]</sup>。目前 MODIS 数据多用于植被变化趋势及驱动因子分析<sup>[22-23]</sup>,针对森林转型背景下的森林扰动分析尚少。

广西作为我国桉树种植的主要区域,经历了起步阶段(1949—1977 年)、推广阶段(1978—2000 年)和大发展阶段(2001 年至今)。进入 21 世纪以来,广西桉树种植面积每年以 133 300 km<sup>2</sup> 的速度发展<sup>[24]</sup>,广西森林边际空间的土地利用和森林内部结构均发生了巨大变化,广西正在经历着独特的森林转型过程。鉴此,本文基于大幅宽、高时空分辨率的 MODIS-EVI 数据,采用变化矢量法和 Sen + Mann-Kendall,结合地貌数据和 4 期土地利用数据,分析近 20 年间广西森林面积增长的土地利用来源,探讨广西森林内部的扰动类型和空间分布情况,以丰富森林转型的研究内容与案例。

## 1 研究区与数据来源

### 1.1 研究区概况

广西位于 104°26′~112°04′E,20°54′~26°24′N 之间,处与中国第一阶梯向第二阶梯过渡的斜坡地带,西部为云贵高原边缘,东北与湘西南山地相接,东部与粤西山地连成一体,总体地势西北高东南低。

周边多为高耸的山地,中部多为低矮的盆地、平原、丘陵和弧形山脉,被称为广西盆地。广西各地年均气温 16.5~23.1℃,年降水量在 1250~1700 mm,且拥有三个多雨中心(东兴、永福和蒙山),其年降雨量均在 2000 mm 以上。优越的气候条件孕育了良好的生态环境,历史上广西的森林覆盖率曾高达 91%<sup>[25]</sup>。但是由于各种因素,广西森林覆盖率一度跌破 20% 的历史低点,改革开放以后广西的森林覆盖率稳步提高,1982 年广西全区森林覆盖率仅 18.45%,1990 年提高 31%,2000 年提高到 41.38%,2013 年更是上升到 61.84%<sup>[26]</sup>。从 20 世纪 80 年代初期始,广西已经进入了统计意义上的森林转型 U 型上升期。拐点后的森林覆盖率增长期。根据 2000—2015 年广西森林清查数据,人工乔木林呈上涨趋势,2015 年人工乔木林蓄积量已超天然乔木林,森林的组成结构在近年间发生了巨大的变化。

### 1.2 数据来源及预处理

本文使用 EOS/Terra 卫星的 MODIS MOD13Q1 数据产品,时间分辨率为 16 d,空间分辨率 250 m,时间序列为 2000 年至 2016 年,数据来源于美国航空航天局(NASA)。采用 MRT 软件进行投影转化批处理,其中,镶嵌、裁剪、Savitzky-Golay 滤波的时间序列重构和年最大合成(MVC)的预处理过程利用 Python 2.7 和 ENVI+IDL 编码实现。地貌数据来源于《中华人民共和国地貌图集(1:100 万)》,为了便于分析计算结果的空间差异性,将广西地貌聚类为 3 个区块:I 桂中南平原丘陵区,II 桂西北喀斯特区,III 桂东北山地区。基于 1:5 万数字线画图(DLG),提取划定了广西全区 9631 条小流域边界。2000、2005、2010、2015 年的土地利用现状数据是本项目组基于 Landsat 影像数据,辅以第二次全国土地调查成果和 2014 年土地利用年度变更调查数据,经过人机交互目视解译,并通过质量控制检查。森林清查数据来自全国森林资源清查——广西壮族自治区森林清查成果(第六次至第九次)。

## 2 研究方法 with 数据处理

### 2.1 变化矢量法

变化矢量法(Change Vector Analysis)<sup>[27]</sup>多应用于高空间分辨率的多波段影像的地类变化分析,若将其应用于时序数据需重新定义矢量空间。本文以

年为间隔,完成数据预处理后获得 17 张 EVI 影像,定义 2 维的矢量空间,通过欧氏距离 (Euclidean Distance) 计算相邻两年间矢量的模,将矢量的模累加获得 17 年的 EVI 变化强度。

$$\|P\| = \sum_{i=1}^n \sqrt{(y_{n-1} - y_n)^2 + (x_{n-1} - x_n)^2} \quad (1)$$

$n$  是序列年份数,  $y$  为植被指数,  $x$  为年份。

变化矢量法可以获得 EVI 变化强度,但无法获得植被变化趋势,本文采用当前通用的 Sen + Mann-Kendall 方法检验植被变化趋势的显著性<sup>[28]</sup>。

## 2.2 Sen + Mann-Kendall

Sen 趋势度<sup>[29]</sup>通过计算序列的中值,以此来量化单调趋势,可极大地减少噪声的干扰,但 Sen 趋势度不能实现序列趋势的显著性判断。Mann-Kendall 方法<sup>[30]</sup>本身对序列分布无要求且对异常值不敏感,引入该方法可完成序列的趋势显著性检验。

Sen 趋势度的计算公式为:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{y_j - y_i}{j - i}\right), \forall j > i \quad (2)$$

式(2)中,  $y$  为植被指数,  $1 < i < j < n$ , 当  $\beta > 0$  时表示植被呈上升趋势,反之呈下降趋势。

对序列  $A_i = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ , 先确定所有对偶值  $(a_i, a_j, j > i)$  中  $a_i$  与  $a_j$  的大小关系 (设为  $Z$ )。

$$U_{mk} = \frac{\tau}{\sqrt{[Var(\tau)]}} \quad (3)$$

$$\tau = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(y_j - y_i) \quad (4)$$

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{Var}(\tau) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1) - (2t_i-5)}{18} \quad (6)$$

$n$  是序列年份数,  $m$  是序列中重复出现的数据组个数,  $t_i$  是第  $i$  组重复数据组中的重复数据个数。当  $n > 10$  时,  $U_{mk}$  收敛于标准正态分布。原假设为该序列无趋势,采用双边趋势检验,在给定显著性水平下,当  $|U_{mk}| \leq U_{1-\alpha/2}$  时,接受原假设,即趋势不显著;若  $|U_{mk}| > U_{1-\alpha/2}$ ,则拒绝原假设,即认为趋势显著。在显著性水平 = 0.05 下,  $U_{0.975} = \pm 1.96$ 。当  $\beta > 0$  且  $|U_{mk}| > 1.96$  则表示植被呈显著上升趋势,当  $\beta > 0$  且  $|U_{mk}| \leq 1.96$  则表示植被呈上升不显著趋

势。同理,当  $\beta < 0$  且  $|U_{mk}| > 1.96$  则表示植被呈显著下降趋势;当  $\beta < 0$  且  $|U_{mk}| \leq 1.96$  则表示植被呈下降不显著趋势。

## 2.3 矢量变化类型

本文利用自然断点法将 EVI 矢量变化强度进行 4 级图像分割,分别定义为无变化、低变化、中变化和高变化区域,并将低变化和中变化的分割阈值定义为  $K$ ,将矢量变化强度和 Sen + Mann-Kendall 结合可以判断扰动类型,如式(7)所示。

$$\begin{cases} \|P\| \leq K & \text{平稳型} \\ \|P\| > K, \beta > 0, |U_{mk}| > 1.96 & \text{增加型} \\ \|P\| > K, \beta < 0, |U_{mk}| > 1.96 & \text{减少型} \\ \|P\| < K, |U_{mk}| \leq 1.96 & \text{扰动型} \end{cases} \quad (7)$$

## 2.4 数据处理

利用 Python2.7 将预处理完成的 MODIS-EVI 按上述公式计算 EVI 变化趋势和 EVI 变化强度,通过自然断点法进行矢量变化强度图像分割,具体参数如表 1 所示。将广西 2000、2005、2010、2015 年的土地利用如表 2 进行重分类,按式(8)进行栅格叠加,即万位、千位、十位和个位分别代表 2000、2005、2010 和 2015 年土地利用代码,将 4 期土地利用中未涉及林地的土地利用转化类型均归为非林地,利

表 1 矢量变化强度图像分割参数

Tab. 1 Image segmentation parameters of vector change analysis

变化类型	无变化	低变化	中变化	高变化
分割阈值	0.00 ~ 0.19	0.19 ~ 0.25	0.25 ~ 0.33	0.33 ~ 1.76

表 2 土地利用代码表

Tab. 2 Land use code table

地类代码	一级地类名称	二级地类名称
1	耕地	水田、水浇地、旱地
2	林地	有林地、灌木林地、疏林地、其他林地
3	草地	高覆盖草地、中覆盖草地、低覆盖草地
4	水域	河渠、湖泊、水库坑塘、冰川积雪、海涂、滩地
5	建设用地	城镇用地、农村居民点、工交建设用地、采矿用地
6	未利用地	沙地、戈壁、盐碱地沼泽地、裸土地、裸岩、其他

用非林地图层将 EVI 变化趋势和 EVI 变化类型进行空间擦除,结果如图 1 和图 2 所示。

土地利用转化模式 = 2000 年 × 1000 +  
2005 年 × 100 + 2010 年 × 10 +  
2015 年 × 1

(8)

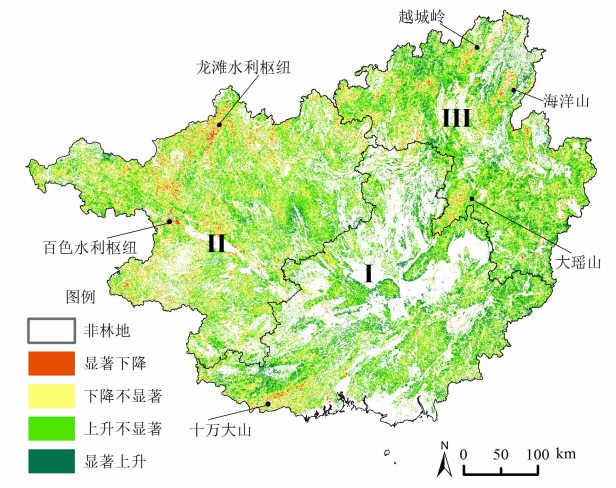


图 1 广西森林 EVI 变化趋势  
Fig. 1 EVI trends of forests in Guangxi, China

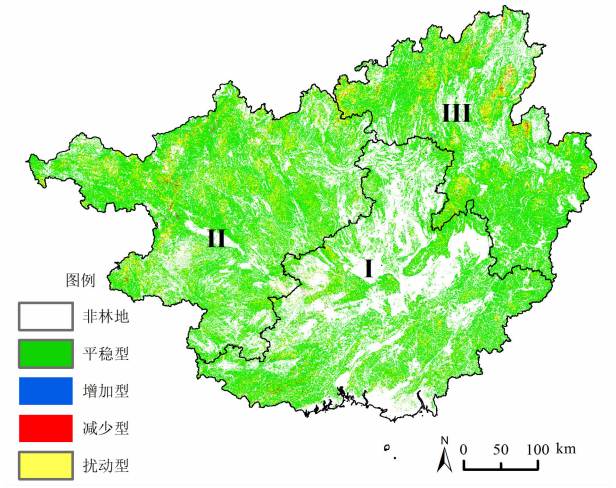


图 2 广西森林 EVI 变化类型  
Fig. 2 Types of changes in forest EVI in Guangxi, China

### 3 结果分析

#### 3.1 广西森林 EVI 变化特征分析

广西森林 EVI 变化趋势的计算结果如图 1 所示:(1) 显著下降部分占林地面积 4. 21%, 主要分布于十万大山、大瑶山、海洋山和越城岭等山地区域和桂西北的百色水利枢纽和龙滩水利枢纽周围;(2) 显著上升部分占林地面积 9. 67%, 主要分布于桂中南的左江 - 邕江 - 郁江流域平原丘陵区, 以及 II、III 区的地势低平的河谷地带;(3) 广西森林的 EVI 下降不显著和上升不显著占林地面积分别为 36. 92% 和 49. 20%。整体来看, 广西森林的 EVI 上升趋势略大于下降趋势。

如图 2 所示, 2000—2016 年广西森林 EVI 变化类型有如下特征:(1) 广西 17 年间的森林 EVI 变化类型以平稳型为主, 占林地面积的 82. 25%; 扰动型次之, 占林地面积 16. 31%; 增加型和减少型分别占 0. 82% 和 0. 63%; (2) 扰动型和减少型的分布与山地的空间相关性较高, 主要集中于海拔较大的山地地区; 增加型的空间分布非常破碎, 全区各地均有零散分布, 但主要集中于桂中南平原丘陵区。

#### 3.2 广西森林土地利用转化分析

利用多期土地利用数据进行林地流入流出分析, 由表 3 可知, 近 20 年来广西林地的转入大于转出, 林地净增加面积为 24 376. 64 km<sup>2</sup>, 随着农用地被边缘化, 19 439. 25 km<sup>2</sup> 的耕地转为林地, 7 885. 52 km<sup>2</sup> 的林地转为耕地, 耕地对林地的转入大于林地转出为耕地; 15 289. 09 km<sup>2</sup> 的草地转为林地, 142 km<sup>2</sup> 的林地转为草地, 草地对林地的转入远远大于林地转出为草地; 由于百色和龙滩水力枢纽 2006 年的建成蓄水, 1 663. 49 km<sup>2</sup> 的林地转为水域; 2 419. 26 km<sup>2</sup> 的林地由于城乡开发建设转为建设用地。综上, 林地增加的面积主要来源于耕地和草地; 水域、建设用地和未利用地等地类以林地的转出为

表 3 2000—2015 年广西林地面积变化统计表 km<sup>2</sup>  
Tab. 3 Forest change areas in Guangxi from 2000 to 2015 km<sup>2</sup>

土地利用类型	耕地	草地	水域	建设用地	未利用地	合计
转入林地	19 439. 25	15 289. 09	1024. 93	784. 27	18. 71	36 556. 25
林地转出	7 885. 52	142. 06	1 663. 49	2 419. 26	69. 28	12 179. 61
林地净增加	11 553. 73	15 147. 03	- 638. 56	- 1 634. 99	- 50. 58	24 376. 64



主。耕地和草地是广西森林转型过程中林地面积增加的主要土地来源。

### 3.3 广西森林土地利用转化的 EVI 变化类型分析

统计土地利用转化模式的 EVI 变化类型,结果如图 3 和图 4 所示。由于版面限制,此处仅讨论林地转化,且减少型和增加型统计面积大于  $1 \text{ km}^2$ 、扰动型统计面积大于  $10 \text{ km}^2$  的土地利用转化类型。由图 3 得知:(1)“1112”“2212”“2221”“2223”“2226”和“3332”的减少型和增加型占比有增有减,且增减比例较为接近,说明耕地、林地和草地之间的相互转变引起了较为剧烈的扰动;(2)土地利用转化模式的“2222”型,减少型、增加型和扰动型分别占各变化类型的面积百分比为 46.55%、53.01% 和 55.63%,说明未参与土地利用转化的林地内部同样存在着强烈的扰动。

### 3.4 森林内部扰动分析

为了深入挖掘广西近 20 年的森林内部扰动情况,利用广西 9631 条小流域作为基本统计单元,将土地利用变化模式“2222”的 4 种矢量变化类型按地貌类型和坡度分级进行分区统计,并将统计结果进行分区讨论。

#### (1) 桂中南平原丘陵区

由图 5 和图 6 可知,增加型在桂中南地区表现

明显,主要分布于山地与平原谷地的过渡地带。增加型集中于  $0^\circ \sim 5^\circ$  和  $8^\circ \sim 15^\circ$  的低坡缓丘区域(图 7),类型面积全区占比为:22.28% 和 14.83%;由图 8 按地貌类型的统计可知,该区的增加型在丘陵和小起伏山地区域表现也较为突出,类型全区面积占比为 15.01%、18.72%。

#### (2) 桂西北喀斯特区

由图 9 和图 10 可以看出,该区的森林 EVI 扰动型表现突出,主要分布于龙滩和百色水利枢纽周围,这两个水利枢纽分别于 2006 年和 2007 年完成蓄水拦截,水库蓄水引起的移民后靠开垦效应明显。桂西北喀斯特区是广西岩溶分布最为集中的区域(图 11),该区岩溶面积占比为 58.20%。由图 12 可知,桂西北小起伏山地类型的扰动型面积占比为 23.22% 喀斯特地区土层薄生态脆弱,该区的森林植被对于扰动的反馈更为敏感。

#### (3) 桂东北山地区

桂东北山地区是广西山地最为集中的区域,由图 13 和图 14 可知,该区也是 EVI 减少型最为集中的区域。分别按地貌类型和坡度分级统计(图 15 和图 16),该区的大起伏山地减少型面积全区占比为 28.77%, $15^\circ \sim 25^\circ$  类型面积占比为 20.38%,减少型分布与山地的空间相关性较高。

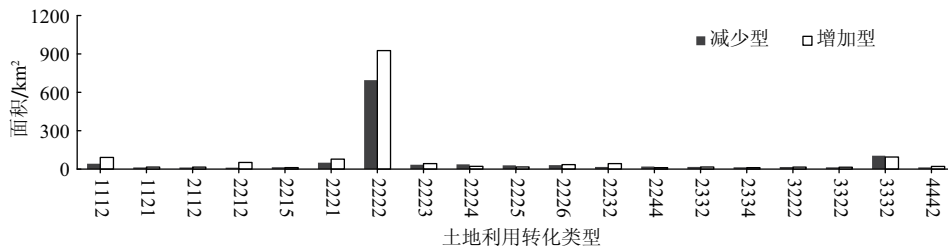


图3 林地转化的减少型和增加型统计图

Fig. 3 Statistics graph of increase and decrease in woodland conversion

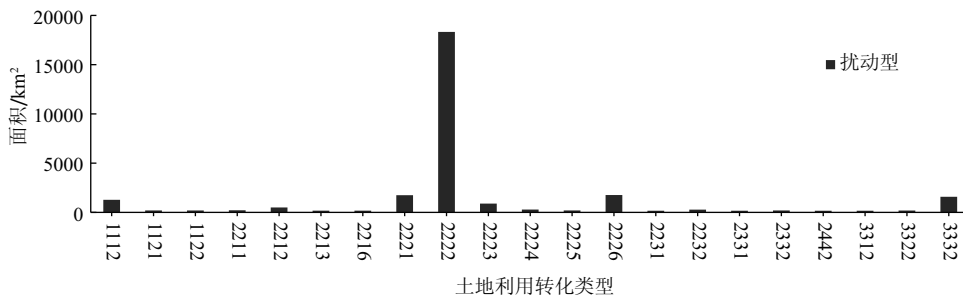


图4 林地转化的扰动型统计图

Fig. 4 Statistical chart of disturbance in forest land conversion

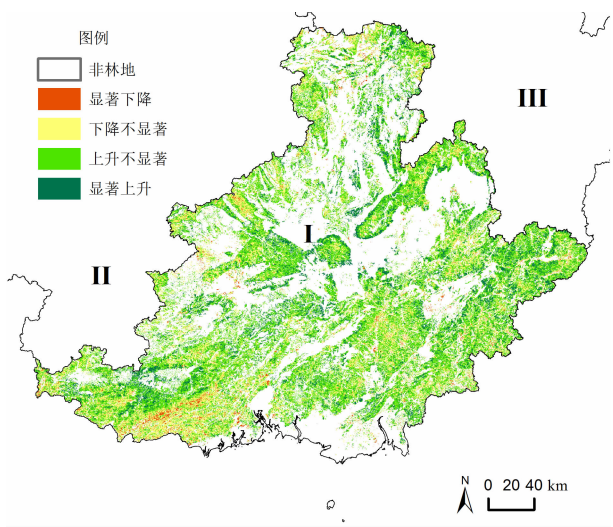


图5 桂中南平原丘陵区森林 EVI 变化趋势  
Fig.5 EVI trends in forest in the hilly areas  
of the central and south Guangxi, China

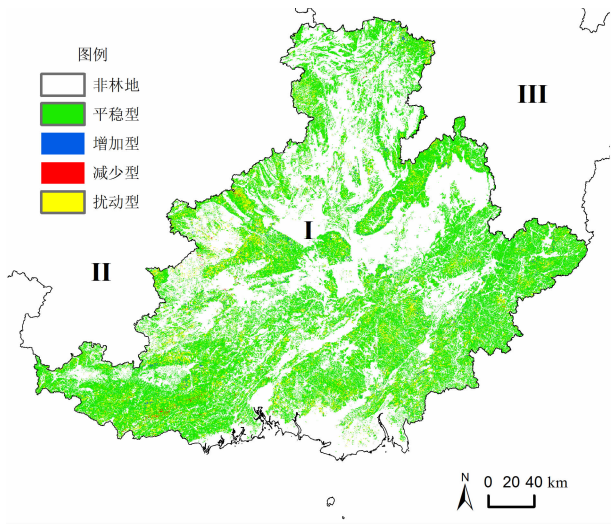


图6 桂中南平原丘陵区森林 EVI 变化类型  
Fig.6 Types of forest EVI changes in hilly areas  
of the central plains of Guangxi, China

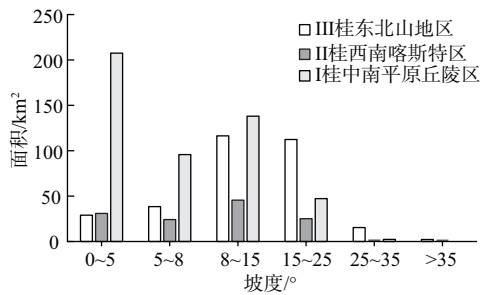


图7 增加型坡度分级统计图  
Fig.7 Statistical chart of increase types of slope

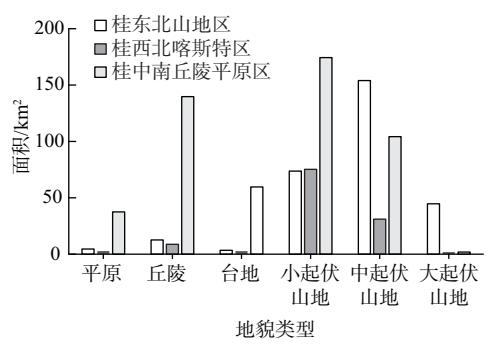


图8 增加型地貌类型统计图  
Fig.8 Statistical chart of increase landform type

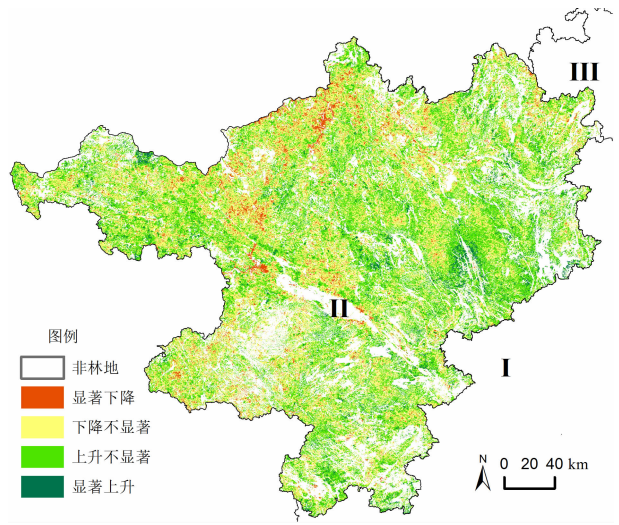


图9 桂西北喀斯特区森林 EVI 变化趋势  
Fig.9 Trend in forest EVI in northwestern Guangxi, China

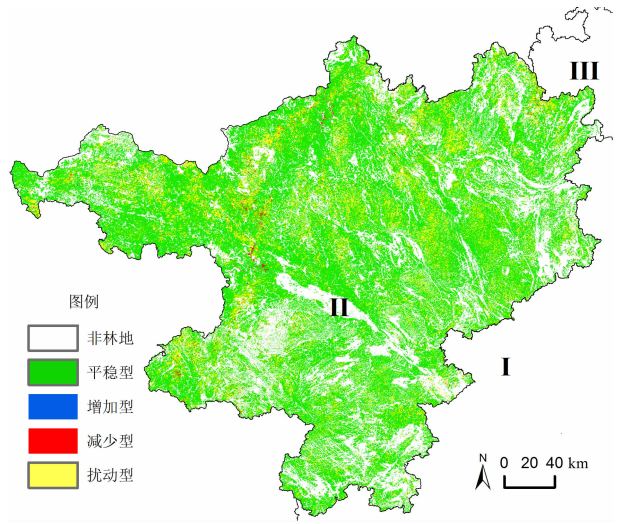


图10 桂西北喀斯特区森林 EVI 变化类型  
Fig.10 Trend in forest EVI in northwestern Guangxi, China

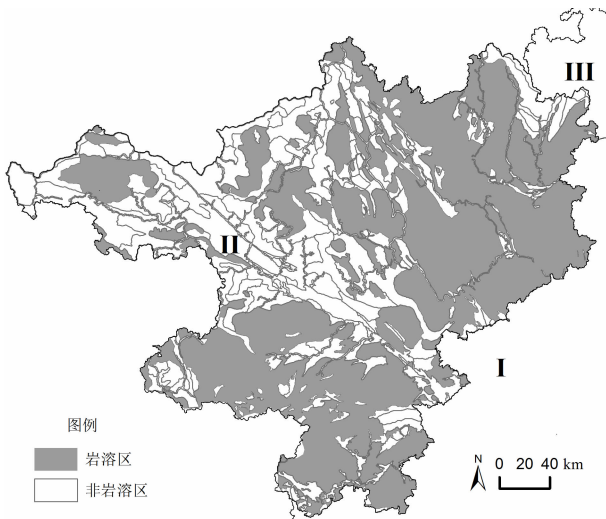


图 11 桂西北喀斯特区岩溶分布图

Fig. 11 Forest EVI change types in karst areas of north-western Guangxi, China

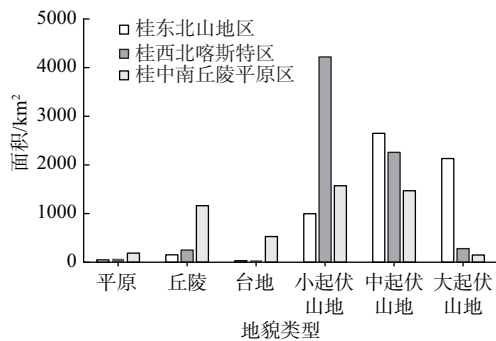


图 12 扰动型地貌类型统计图

Fig. 12 Chart of disturbance landform types

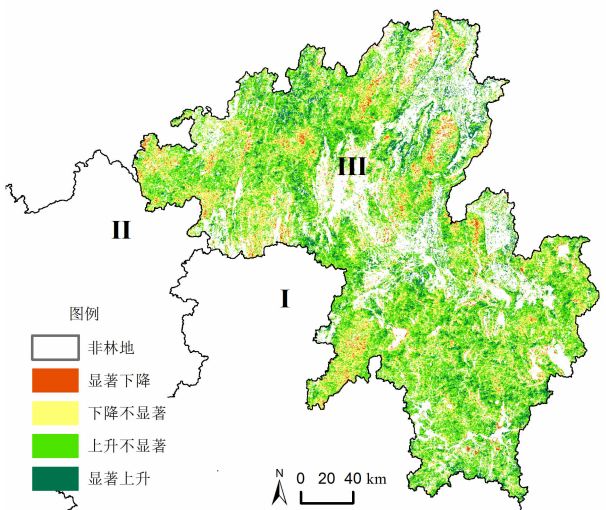


图 13 桂东北山区森林 EVI 变化趋势

Fig. 13 Change trend of forest EVI in northern mountain areas of eastern Guangxi, China

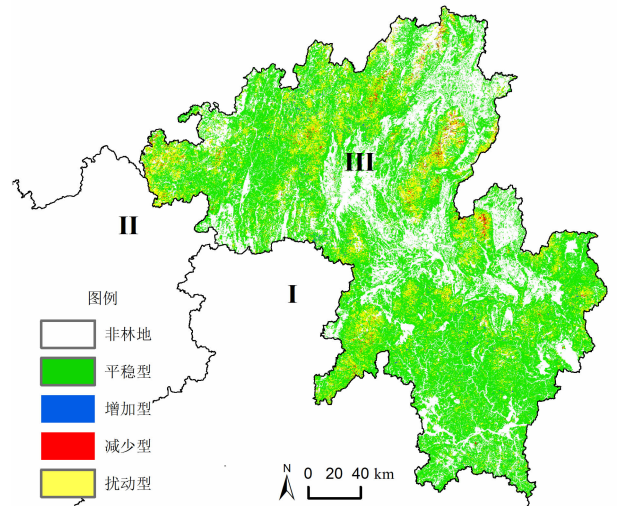


图 14 桂东北山区森林 EVI 变化类型

Fig. 14 Change types of forest EVI in northeast Guangxi, China

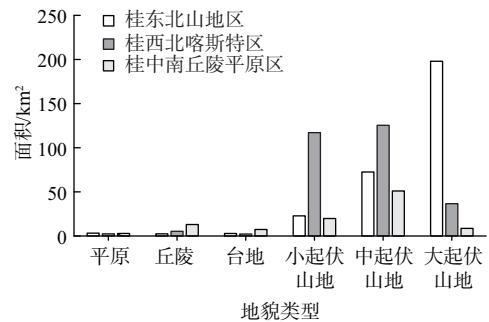


图 15 减少型地貌类型统计图

Fig. 15 Chart of decrease type of landforms

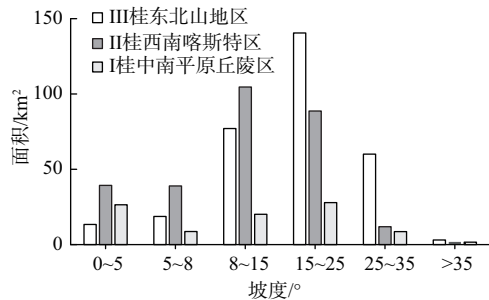


图 16 减少型坡度统计图

Fig. 16 Chart of decrease type of slopes

## 4 讨论

### (1) 森林 EVI 变化及其驱动因素

自 2000 年以来,广西森林 EVI 的上升趋势略大于下降趋势。森林植被 EVI 的变化受到多种因素的共同影响,主要包括气候变化和人类影响两大类。



1961—2015年,广西气候变化主要表现为气温明显升高,降水无明显变化,极端气温和强降水增加,极端高气温在21世纪频频被刷新<sup>[31]</sup>。总体来看,气候变化对广西森林植被是气温胁迫的态势,这种胁迫作用较为缓慢,需要长时间的持续观测定量评定。短期来看,广西森林EVI上升的良好态势与近年来推行的喀斯特地区封山育林和“十五”以来广西实施南方速生丰产林工程等政策有关,显著上升主要分布于桂中南平原丘陵区,以及桂西南喀斯特区、桂东北山地区的地势低平的河谷地带。百色水利枢纽和龙滩水利枢纽周围水库蓄水引起的移民后靠开垦,桂北部分区域的山地作物种植等人为活动导致森林EVI特征值出现了显著下降趋势。

## (2) 森林转型路径

根据森林清查和统计数据,广西正在经历森林转型,森林内部结构发生了巨大的变化。森林转型路径分析多是人口迁徙、经济活动等分析,目前没有明确的定量指标进行森林转型路径评定,但是森林转型的土地利用变化是表征森林转型路径的重要指标。广西作为一个劳务输出大省<sup>[32]</sup>,劳动力成本上升使得劣质耕地沦为边际外土地,农民自发改种劳动成本更低的人工林。随着广西农村劳动力的持续输出,劣质耕地“被边际化”是不可避免的过程,被边际的农用地改种人工林仍将持续一段时间,并且在市场经济和木材价格的驱动下,农民自发地将边际化农用地和荒草地改种为人工林。通过上文3.2分析可知,广西的森林面积增加的土地并不来源于单一的耕地,大量的草地在转化林地。不管是从经济发展角度还是土地利用转化模式分析,在近20年间广西森林转型路径表现为“经济增长型”和“森林短缺型”两种路径并存的现象,或者存在更为复杂的复合型森林转型路径。

## (3) 森林扰动

通过提取2000—2015年的4期土地利用转化模型中“2222”型,分析森林转型背景下近20年间广西森林内部扰动的情况得知:桂西北森林扰动型主要分布于小起伏山地,喀斯特地区的生态保护工作仍然任重道远;桂东北山地是水源涵养型重点生态功能区,同时也是岩溶分布较为广泛的区域,该地区虽然农业开发时间较广西其他地区早,但是近年来桂北大规模兴起的柑橘等山地作物开发种植<sup>[33]</sup>,

桂东 $8^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 和大起伏山地等区域的森林内部受到了较为强烈的扰动,减少型也较为集中。桂中南平原丘陵区地势平缓 and 雨热充沛,是广西人工乔木林种植最为广泛的区域<sup>[34]</sup>,是增加型最为集中的区域。但是桂中南地区的丘陵台地分布广泛,景观异质度高,桉树种植过程中存在的炼山除草和4~6年周期轮伐等强烈人为扰动在MODIS 250 m的空间分辨率无法准确复刻,导致桂中南地区可能出现了一定程度的森林内部扰动低估。针对广西地形破碎和桉树的种植特点,如何进行更准确的大时空尺度森林扰动评估还需要后续研究探讨。

# 5 结论

本文基于MODIS-EVI数据,通过变化矢量法和Sen + Mann-Kendall,结合地貌和4期土地利用数据的分析和讨论,可得如下结论:

(1)广西森林EVI变化强度以无变化和低变化的类型为主,森林EVI上升趋势略大于下降趋势。EVI显著下降主要分布于十万大山、大瑶山、海洋山和越城岭等山地区域和桂西北的百色水利枢纽和龙滩水利枢纽周围,显著上升部分主要集中于桂中南的左江—邕江—郁江流域平原丘陵区、桂西南喀斯特区和桂东北山地区地势低平的河谷地带。

(2)根据广西经济发展过程和土地利用转化模式分析可知,广西森林面积增加的土地来源于耕地和草地,近20年间广西森林转型表现为“经济增长型”和“森林短缺型”两种路径并存,或者存在更为复杂的复合型森林转型路径。

(3)自2000年以来,广西森林内部扰动的减少型和扰动型分布于桂西北和桂东北山起伏度较大的山地陡坡区域,增加型主要分布于桂中南的平原丘陵地区。由于山地陡坡区域和喀斯特地区的生态敏感性,扰动型和减少型在桂西北和桂东北地区的集中分布应给予更多的关注。

## 参考文献 (References)

- [1] 龙花楼,李秀彬. 区域土地利用转型分析——以长江沿线样带为例[J]. 自然资源学报, 2002, 17(2): 144 - 149. [LONG Hualou, LI Xiubin. Analysis on regional land use transition: a case study in transect of Yangtze River [J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(2): 144 - 149]

- [2] MATHER A S. The forest transition [J]. *Area*, 1992, **24**(4): 367–379.
- [3] GRAINGER A. The forest transition: an alternative approach [J]. *Area*, 1995, **27**(3): 242–251.
- [4] MATHERA S, FAIRBAIRN J, NEEDLE C L. The course and drivers of the forest transition: the case of France [J]. *Journal of Rural Studies*, 1999, **15**(1): 65–90.
- [5] YEO I Y, HUANG C. Revisiting the forest transition theory with historical records and geospatial data: a case study from Mississippi (USA) [J]. *Land Use Policy*, 2013, **32**(3): 1–13.
- [6] 李秀彬, 赵宇鸾. 森林转型、农地边际化与生态恢复 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, **21**(10): 91–95. [LI Xiubin, ZHAO Yuluan. Forest transition, agricultural land marginalization and ecological restoration [J]. *China Population, Resources and Environment* [J], 2011, **21**(10): 91–95]
- [7] RUDEL T K, COOMES O T, MORANE, et al. Forest transitions: towards a global understanding of land use change [J]. *Global Environmental Change*, 2005, **15**(1): 23–31.
- [8] ANGELSEN A. Forest cover change in space and time: combining the Von Thunen and forest transition theories [J]. *Policy Research Working Paper*, 2007: 1–43 (43).
- [9] 苏永莉, 阎建忠, 周洪. 重庆市的森林转型: 时空格局与动态模拟 [J]. *西南大学学报 (自然科学版)*, 2016, **38**(6): 82–91. [SU Yongli, YAN Jianzhong, ZHOU Hong. Forest transition in Chongqing: temporal and spatial patterns and dynamic simulation [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2016, **38**(6): 82–91]
- [10] FOSETER A D, ROSENZWEIG M R. Economic growth and the rise of forests [J]. *Quarterly Journal of Economics*, 2003, **118**(2): 601–637.
- [11] THOMPSON D. Landscape-level dynamics of grassland-forest transitions in British Columbia [J]. *Journal of Range Management*, 2004, **57**(1): 66–75.
- [12] DRUMMOND M A, LOVELAND T R. Land-use pressure and a transition to forest-cover loss in the Eastern United States [J]. *Bioscience*, 2010, **60**(4): 286–298.
- [13] TIMMS B F, MCCracken M. From deforestation to reforestation: applying the forest transition to the Cockpit Country of Jamaica [J]. *Area*, 2013, **45**(1): 77–87.
- [14] 赵宇鸾, 葛玉娟, 旷成华, 等. 乡村振兴战略下贵州山区森林转型路径研究 [J]. *贵州师范大学学报 (自然科学版)*, 2018, **36**(1): 1–7. [ZHAO Yuluan, GE Yujuan, KUANG Chenghua, et al. The path of forest transformation in mountainous areas in Guizhou province under the strategy of rural revitalization [J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2018, **36**(1): 1–7]
- [15] XU J. China's new forests aren't a green as they seem [J]. *Nature*, 2011, **477**(7365): 371.
- [16] 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 Chen, SHEN Runping. Progress in the study of forest disturbance by remote sensing [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2015, **27**(1): 1–8]
- [17] 吕莹莹, 庄义琳, 任芯雨, 等. 南京城市森林干扰及恢复自动制图 [J]. *应用生态学报*, 2016, **27**(2): 429–435. [LYU Yingying, ZHANG Yilin, REN Xinyu, et al. Automated mapping of urban forests' disturbance and recovery in Nanjing, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(2): 429–435]
- [18] SHEN W, LI M, WEI A. Spatio-temporal variations in plantation forests' disturbance and recovery of northern Guangdong Province using yearly Landsat time series observations (1986–2015) [J]. *Chinese Geographical Science*, 2017, **27**(4): 600–613.
- [19] 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 Dongmei, FAN Hui, ZHANG Yao. Review on Landsat time series change detection methods [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2017, **19**(8): 1069–1079]
- [20] 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. [SHEN Wenjuan, LI Mingshi. Mapping disturbance and recovery of plantation forests in southern China using yearly Landsat time series observations [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(5): 1438–1449]
- [21] 王正兴, 刘闯, HUETE Alfredo. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI [J]. *生态学报*, 2003, **23**(5): 979–987. [WANG Zhengxing, LIU Chuang, HUETE Alfredo. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: advances in vegetation index research [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(5): 979–987]
- [22] 陈效述, 王恒. 1982—2003 年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化 [J]. *地理学报*, 2009, **64**(1): 84–94. [CHEN Xiaoqi, WANG Heng. Spatial and temporal variations of vegetation belts and vegetation cover degrees in Inner Mongolia from 1982 to 2003 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, **64**(1): 84–94]
- [23] 邓晨晖, 白红英, 高山, 等. 秦岭植被覆盖时空变化及其对气候变化与人类活动的双重响应 [J]. *自然资源学报*, 2018, **33**(3): 425–438. [DENG Chenhui, BAI Hongying, GAO Shan, et al. Spatial-temporal variation of the vegetation coverage in Qinling Mountains and its dual response to climate change and human activities [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, **33**(3): 425–438]
- [24] 黄国勤, 赵其国. 广西桉树种植的历史、现状、生态问题及应对策略 [J]. *生态学报*, 2014, **34**(18): 5142–5152. [HUANG Guoqin, ZHAO Qiguo. The history, status quo, ecological problems and countermeasures of Eucalyptus plantations in Guangxi [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(18): 5142–5152]
- [25] 李治基. 广西森林 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2001: 29–42. [LI Zhiji. *Forest of Guangxi* [M]. Beijing: China Forestry



- Publishing House, 2001:29-42]
- [26] 广西统计局. 广西统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 1983, 1991, 2001, 2014. [Bureau of Statistics of Guangxi. Guangxi statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 1983, 1991, 2001, 2014]
- [27] 陈云浩, 李晓兵, 陈晋, 等. 1983—1992年中国陆地植被 NDVI 演变特征的变化矢量分析[J]. 遥感学报, 2002, 6(1):12-18. [CHEN Yunhao, LI Xiaobing, CHEN Jin, et al. The Change of NDVI time series based on change vector analysis in China, 1983-1992[J]. Journal of Remote Sensing, 2002, 6(1):12-18]
- [28] 蔡博峰, 于嵘. 基于遥感的植被长时序趋势特征研究进展及评价[J]. 遥感学报, 2009, 13(6):1170-1186. [CAI Bofeng, YU Rong. Advance and evaluation in the long time series vegetation trends research based on remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(6):1170-1186]
- [29] GHOSH M, SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau [J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324):1379-1389.
- [30] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2版. 北京:气象出版社, 2007: 58-60. [WEI Fengying. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology - Second Edition [M]. 2nd Edition. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 58-60]
- [31] 何洁琳, 谢敏, 黄卓, 等. 广西气候变化事实[J]. 气象研究与应用, 2016, 37(3):11-15. [HE Jielin, XIE Min, HUANG Zhuo, et al. Climate change in Guangxi [J]. Journal of Metrological Research and Application, 2016, 37(3):11-15]
- [32] 刘德红, 白光. 解决广西农村就业问题的经济学探讨[J]. 中央民族大学学报(哲学社会科学版), 2016(5):41-45. [LIU Dehong, BAI Guang. Solution to the problem of rural employment in Guangxi in perspective of economics [J]. Journal of Minzu University of China (Philosophy and Social Sciences Edition), 2016(5):41-45]
- [33] 杨智文. “十三五”广西柑橘产业发展对策研究[D]. 南宁:广西大学, 2015: 23-26. [YANG Zhiwen. Study on the developmental countermeasure of Guangxi's citrus industry in the 13th five-year-plan[D]. Nanning: Guangxi University. 2015:23-26]
- [34] 聂鑫, 章文波, 薛丽霞. 广西速生桉种植的空间分布及生态特征[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(2):215-221. [NIE Xin, ZHANG Wenbo, XUE Lixia. The spatial distribution of fast-growing Eucalyptus and ecological characteristics in Guangxi [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2017, 53(2):215-221]

## Remote Sensing Monitoring of Forest Transition and Forest Disturbance in Guangxi, China

HUANG Ping<sup>1</sup>, LU Yuan<sup>1, 2\*</sup>, WANG Danyuan<sup>1</sup>, LIU Bintao<sup>3</sup>

(1. School of Geography and Planning, Nanning Normal University, Nanning 530001, China;

2. Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf, Ministry of Education, Nanning 530001, China;

3. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In the past 20 years, due to the implementation of the Chinese afforestation policy and the extensive planting of artificial forests, the forest area in Guangxi has increased significantly and is undergoing profound forest transformation. In the process of forest transformation, the structural reorganization developing within the ecotone between agriculture and forestry as well as internal forest have brought disturbance to the ecosystem that cannot be ignored. Based on MODIS-EVI image data from 2000 to 2016, 1:1 000 000 geomorphologic maps and 4 periods of land use data(2000, 2005, 2010 and 2015), this paper used the change vector method and Sen + Mann-Kendall statistics to analyze forest transformation path and forest internal disturbance characteristics in Guangxi. And forest disturbance could be interpreted as four types, i. e. invariance, disturbance, increase and decrease type according to EVI values. Results shows that the intensity of EVI in Guangxi forests had been dominated by non-change and

low-variation types since 2000, and the overall EVI rising trend was slightly higher than the downward trend. The significant decline in EVI was mainly distributed in the mountain areas of the Siwangda Mountain, Dayao Mountain, Haiyang Mountain and Yuecheng Ridge, and the Baise Dam Project and Longtan Hydro Project in northwestern Guangxi. The substantial increase in EVI was mainly concentrated in the plain and hilly areas of Zuojiang-Yongjiang-Yujiang river basins in the central and south Guangxi, karst areas in southwestern Guangxi and low-lying valley areas in north-eastern Guangxi. The decrease and disturbance types were distributed in karst areas in northwestern Guangxi and steep slopes with large fluctuation in the mountainous areas of northeastern Guangxi, while the increase type was distributed in plain and hilly areas of the central and south Guangxi. The increased forest area in Guangxi came from cultivated lands and grasslands. The path of forest transformation was characterized by the coexistence of “economic growth” and “forest shortage”, or there was a more complex compound path. Due to the ecological sensitivity of mountainous steep slope areas and karst areas to forest transformation, more attention should be paid to the concentrated distribution of disturbance and decrease types in northwestern and northeastern Guangxi.

**Key words:** MODIS; Sen + Mann-Kendall; change vector method; forest transition; forest disturbance