

引用格式: Wang Shujing, Lai Peiyu, Hao Binfei, *et al.* Remote Sensing Monitoring and Spatio-temporal Pattern of Deforestation in Southwest China from 2001 to 2019[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(3): 552-563. [王淑静, 赖佩玉, 郝斌飞, 等. 西南地区2001~2019年森林损失特征遥感监测与时空分析[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(3): 552-563.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2021.3.0552

西南地区2001~2019年森林损失特征遥感监测 与时空分析

王淑静^{1,2}, 赖佩玉^{1,2}, 郝斌飞³, 马明国^{1,2}, 韩旭军^{1,2}

(1. 西南大学地理科学学院 重庆金佛山喀斯特生态系统教育部野外科学观测研究站, 重庆 400715;
2. 西南大学地理科学学院 遥感大数据应用重庆市工程研究中心, 重庆 400715;
3. 广东海洋大学电子与信息工程学院, 广东 湛江 524088)

摘要: 森林在生态系统服务中起着重要作用, 例如提供清洁空气、保护生物栖息地以及减少全球温室气体的排放等。全球森林变化数据集(Global Forest Change, GFC)每年以30 m的高空间分辨率绘制森林覆盖变化图, 成为监测森林覆盖时空变化特征的有效工具。利用谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE), 基于GFC产品, 结合线性回归方法和空间自相关理论对西南地区2001~2019年森林变化情况进行研究, 结果表明: 近19 a来, 西南地区森林损失面积为375.27万 hm^2 , 以2008年为拐点, 2008年之前呈显著增加趋势($p < 0.05$), 在此之后波动下降, 损失主要集中分布在广西、贵州东南和云南南部地区; 森林损失与地形分析的关系表明损失主要分布在海拔2 000 m以下、坡度小于 40° 的区域, 并逐渐向海拔更低坡度更缓的地方转移; 森林损失面积具有一定的空间关联性, 2001~2019年来Moran's I 指数均为正, 平均值为0.406, 空间高值聚集在广西和贵州南部, 低值聚集在重庆、四川和云南北部; 政策因素在土地利用方式转变过程中发挥着重要作用, 林业活动和农业扩张是影响损失现象发生的主要驱动因素, 今后制定森林保护和管理战略时应充分考虑多方面因素造成的森林损失现象, 研究结果可以为森林监测和保护提供更科学的指导。

关键词: 森林变化; 西南地区; 遥感监测; Google Earth Engine; 空间自相关

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2021)03-0552-12

1 引言

森林资源是地球上重要的资源之一, 覆盖了全球陆地面积(除南极洲)近三分之一的土地^[1], 作为陆地生态系统的重要组成部分, 其多功能性在应对当前全球环境变化^[2-3]、土地退化^[4-5]和保护生物多样性^[6-7]等生态系统服务方面发挥着至关重要的作用。尽管森林为人类带来了难以估量的生态、经济、社会和健康效益, 保护森林资源已经成为世界

范围内的共识, 但人类活动和气候变化造成的持续毁林事件仍不断发生^[4,8-9]。联合国粮食及农业组织发布的《2020年全球森林资源评估》报告指出, 过去10 a间, 每年仍有470万 hm^2 森林遭受砍伐和退化^[10]。

基于卫星的遥感方法使我们对森林进行系统而准确的监测成为可能^[11], 遥感影像数据成为表征森林覆盖和监测不同尺度森林覆盖变化的主要数据源^[12-14]。许多研究基于遥感影像生产了不同的森

收稿日期: 2020-08-03; 修订日期: 2021-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771361、41771453), 西南大学博士基金(含引进人才计划)项目(SWU117035)。

作者简介: 王淑静(1998—), 女, 河南焦作人, 硕士研究生, 主要从事遥感大数据分析研究。E-mail: 1178725159@qq.com

通讯作者: 韩旭军(1980—), 男, 山东博兴人, 教授, 主要从事陆表过程模拟与数据同化研究。E-mail: hanxujun@swu.edu.cn

林变化产品,遥感数据产品的质量和受欢迎程度也在稳步提高^[15-17]。已有研究表明,近年来我国森林面积不断增加,植被状况不断改善,这得益于大规模的植树造林活动^[18-19]。然而,这种监测结果的可靠性仍存在争议,全国部分地区的森林退化仍然严重,一个国家内部的森林变化可能会因地而异,国家层面的森林再生并不能代表区域的变化趋势^[8,20-21]。西南地区多山地丘陵,是我国重要的森林资源分布区,随着社会经济的发展,其特殊的岩溶生态环境和频繁的人类活动使其生态环境不断恶化,生态系统呈现显著的脆弱性特征^[22]。到目前为止我们仍不清楚西南地区的土地利用变化呈现怎样的格局,森林发生变化的时间、地点等精确信息以及最终取代森林的土地利用变化情况。

随着大数据和云计算平台的发展,Google Earth Engine(GEE)平台以其强大的在线可视化数据处理和分析能力,为国内外地理学及相关领域学者进行科学研究提供了强有力的支撑作用,其多源数据目录和多种计算算法为大范围、长时间序列的遥感数据处理和分析提供了新的技术路径^[23]。与传统的影像处理工具相比,基于云计算的GEE平台不需要下载遥感影像,研究人员可直接使用JavaScript或Python语言对数据进行处理和分析,目前已成为一种强有力的科研工具。借助GEE平台,以西南地区作为研究区,分析2001~2019年间森林损失的模式和过程,使用全球森林变化GFC数据衍生森林年损失量,进行以下研究:①结合行政区划图,探索西南地区2001~2019年的森林损失情况;②结合数字高程模型(Digital Elevation Model,DEM)数据,分析森林损失地区的海拔和坡度变化趋势;③利用空间统计方法对森林损失区域进行探索性分析,捕捉森林损失现象是否存在空间关联性;④结合2017年10 m高分辨率土地利用覆盖数据确定森林损失地区的土地利用类型,探讨影响森林损失的驱动力。这项研究将有助于了解西南地区森林覆盖的动态变化,帮助国家和省政府监测森林损失的程度,为今后森林监测和制定保护措施提供参考依据。

2 研究区概况

西南地区包括四川、云南、贵州、广西、重庆四省一市,地理位置在20°54′~34°19′N,97°31′~112°04′E之间,国土面积约为136.4万km²。地势自东南向西北倾斜,多为山地、丘陵地貌。该地区

林业资源丰富,是我国重要的森林资源带(图1),也是生物多样性最丰富的地区^[24],碳酸盐岩在此集中分布,岩溶发育强烈,喀斯特面积在全球分布区中面积最大(54万km²)。受其地质背景制约,陆地生态系统环境极其脆弱,是我国重要的生态屏障区、也是贫困人口分布集中、国家扶贫开发工作的重点区域。20世纪末,该区大力推广种植速生林(以桉树、杨树为主),不仅增加了植被覆盖率而且带动了相关经济产业的发展。据统计资料显示,2018年西南地区森林面积占土地总面积的47.6%,2019年底人口达到24 940万,国内生产总值高达131 451.82亿元,人均地区生产总值5.37万,与2000年相比增加10.8倍,如此快速发展的经济水平和地理特征势必会影响土地利用方式发生改变。近年来,脆弱的岩溶生态环境使该地区石漠化问题越来越突出,自然环境和人地矛盾的双重影响迫使当地农民开山毁林、啃山种粮,造成大面积水土流失和植被退化等生态环境恶化的局面^[25],森林生态系统遭受了严重的干扰。

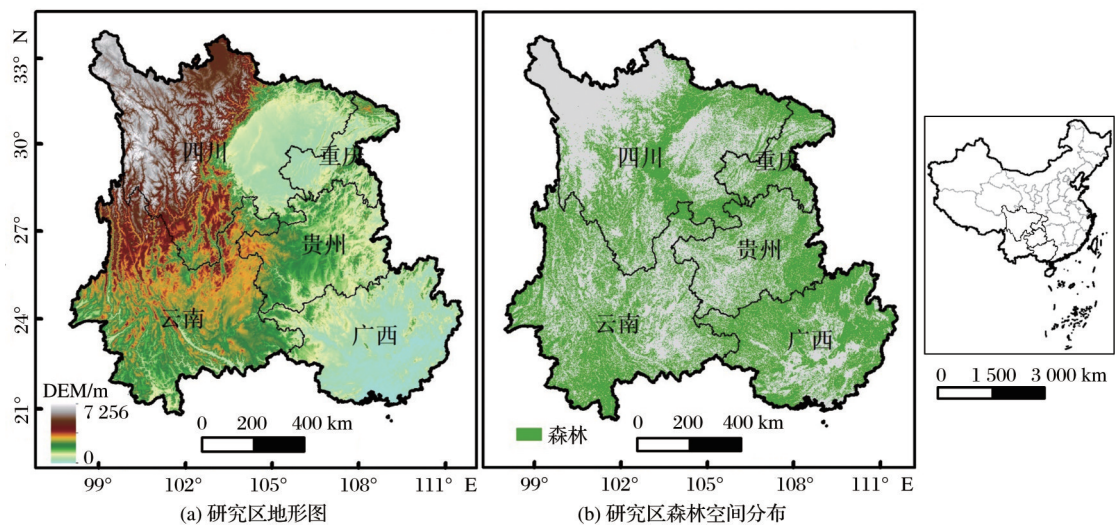
3 数据与方法

3.1 森林变化数据、高程数据和土地利用数据

为了进行分析,采用了最新更新、最近出版或者空间明确的数据集(表1)。包括:①2001~2019年30 m分辨率森林变化数据^[15];②航天飞机雷达地形测绘任务(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)生产的30 m分辨率全球数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据^[26];③清华大学宫鹏教授团队生产的2017年全球10 m分辨率土地利用数据^[27];④确定研究区范围所用的中国行政区划图。

3.2 数据处理

GFC数据集绘制了2001~2019年期间从森林到非森林的树木覆盖损失,可以用于确定森林损失发生的时间和地点,在这个数据集中,森林依据其物理属性进行定义,表示为树木高度>5 m且树冠覆盖度大于20%的区域^[28],不区分天然林或人工林类型。森林损失定义为“林分发生更替或者完全消失”,意思是由于各种自然或人为因素导致的树木覆盖的移除或显著减少。因此,此处定义的“森林损失”并不总是等同于砍伐森林。“lossyear”图层记录了森林损失的年份信息,取值范围为0~19,0代表无损失,1~19分别代表发生损失的年份。根据



审图号:GS(2016)1663

(森林为 2000 年树冠覆盖度大于 20% 的区域)

图 1 研究区地理位置及森林分布

Fig.1 Location and spatial pattern of forest cover of study area

表 1 研究所使用的空间数据集

Table 1 Summary of spatial datasets used

数据产品(版本)	代表年份	空间分辨率	来源
Global Forest Change(GFC) V1.7	2001~2019	30 m	http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest
SRTM-DEM V3	2007	30 m	http://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/USGS_SRTMGL1_003
Finer Resolution Observation and Monitoring of Global Land Cover(FROM-GLC) V0.1.3	2017	10 m	http://data.ess.tsinghua.edu.cn/fromglc10_2017v01.html
中国行政区划	2015	矢量	http://www.resdc.cn/

行政区划图,统计各行政单元不同年份森林的损失面积,为了更好地进行可视化表达,将 30 m 分辨率森林变化产品在 5 km 窗口内进行聚合,并计算每个 5 km×5 km 窗口内森林损失像元的总个数。

为了更好地理解森林损失发生地区与地形之间的关系,基于 SRTM-DEM 数据,从中提取出坡度信息,结合一元线性回归分析,探讨森林损失区域海拔高度、坡度的时间变化趋势。

FROM-GLC 数据是全球 10 m 分辨率土地利用数据集,使用随机森林分类器,基于图像分类特征以及人工验证的组合方式生成,包括耕地、森林、草地、灌丛、湿地、水体、苔原、人造地表、裸地和永久冰雪 10 种土地利用类型,不同行政区划的土地利用数据通过行政区划图掩模提取所获得。根据前人的研究,森林损失地区后续的土地利用类型是森林动态变化的直接体现,探讨损失后的土地利用类型变化是查明发生损失原因的有效手段^[29]。因此实验采用了空间分辨率更高和最新的土地利用数

据集 FROM-GLC,用来确定 2001~2016 年森林损失像元在 2017 年的土地利用类型,在此过程中假设损失像元的土地利用类型变化可以捕捉发生损失的原因。根据研究区的实际情况,将 10 个土地利用覆盖类型重新分类为 6 个类别,重新分类模式合并了“其他”土地利用类型(裸地、水体、湿地和冰川积雪),保留了耕地、林地、草地、灌木和不透水表面 5 个独立的类别。将土地利用数据重采样到 30 m 分辨率,这样既可以保证足够的空间信息,同时也与森林变化数据的分辨率相匹配。

3.3 空间自相关分析

空间自相关一种方法,用来描述空间事物的同一属性在不同空间位置上的相关性。实验利用全局 Moran’s *I* 指数和局部 Moran’s *I* 指数^[30]来评估研究区内森林损失的空间分布状态及变化趋势。全局 Moran’s *I* 指数用于确定森林损失现象是否存在空间自相关性,计算公式如下:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \right)} \quad (1)$$

其中: n 为要素总数; x_i, x_j 分别为空间位置 i 和 j 上的观测值; w_{ij} 为观测变量 i 和 j 的权重;当观测变量 i 与 j 相邻时, $w_{ij}=1$,反之 $w_{ij}=0$; \bar{x} 为观测变量属性值的平均值。全局Moran's I 指数的输出包括Moran's I 值、 Z 得分(标准差)和 P 值(用以检验显著统计性, P 值越小置信度越高),取值范围为 $[-1, 1]$ 。当Moran's $I > 0$ 时,表示该研究区及其邻近区域森林损失面积相对较大;反之,当Moran's $I < 0$ 时,表示该研究区及其邻近区域森林损失面积相对较小。Moran's I 接近于0,则表示没有明显的空间聚类。 Z 值高于1.96,说明在 $P < 0.05$ 的显著性水平上存在森林损失的同属性聚类(高值聚集或低值聚集), Z 值低于1.96,说明在 $P < 0.05$ 的显著性水平上存在森林损失的异属性聚类(高低聚集或低高聚集),而当 Z 值在两者之间时表示空间相关性不显著。局部Moran's I 指数用于确定局部范围内森林损失空间聚类的位置和程度,通过空间联系的局部指标(Local Indicators of Spatial Association, LISA)聚类图来进行空间可视化表达。

4 结果与分析

4.1 西南地区森林损失的时空分布

表2显示了2001~2019年西南地区森林损失面积的统计结果,整体来看,19 a来西南地区共计损失面积为375.27万 hm^2 ,占2000年森林覆盖面积的6.09%(损失面积/2000年森林覆盖面积),平均每年损失19.75万 hm^2 。损失最小的年份为2001年,面积为7.02万 hm^2 ,损失最大的年份为2016年,面积为29.73万 hm^2 。各行政区中以广西省损失情况最为严重,从2001到2019年广西省共损失了228.02万 hm^2 ,占总损失的60.76%,平均每年损失12万 hm^2 ;云南省次之,共计损失面积88.97万 hm^2 (占总损失的23.71%),相当于2000年森林覆盖面积的4.85%,2001年损失面积最小,为1.06万 hm^2 ,损失面积最大的年份为2012年,面积为7.5万 hm^2 ;贵州省和四川省森林损失面积分别为31.45万 hm^2 (占总损失的8.38%)和23.44万 hm^2 (占总损失的6.25%),平均每年损失面积为1.66万 hm^2 、1.23万 hm^2 ,两省份森林损失面积最大的年份都出现在2008年(贵州:3.21万 hm^2 、四川:3万 hm^2);19 a来重庆市森林面积损失最小(3.38万 hm^2),不到总损失面积的1%,损失面积最小的年份为2001年(279.71 hm^2),最大的年份为2017年(0.55万 hm^2),远低于广西的平均水平。

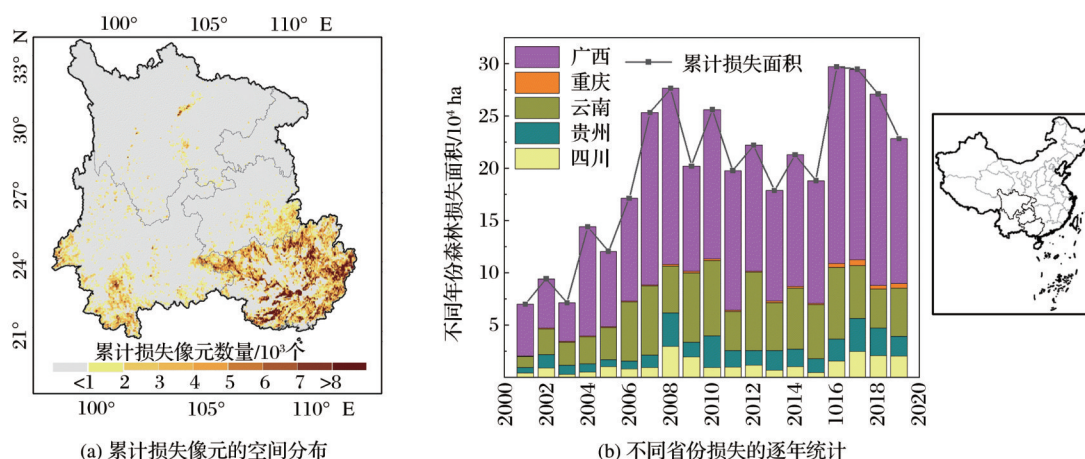
表2 2001~2019年西南地区森林损失面积统计(面积单位: hm^2)

Table 2 Forest loss area in Southwest China from 2001 to 2019(area unit: hm^2)

区域	减少面积	平均减少面积	占森林面积比例/%	最小年份及面积	最大年份及面积	占总损失百分比/%
广西	2 280 203.52	120 010.71	16.68	2003	2016	60.76
				36 813.6	188 205.03	
重庆	33 805.57	1 779.24	0.77	2001	2017	0.9
				279.71	5 527.98	
云南	889 675.73	46 825.04	4.85	2001	2012	23.71
				10 563.41	74 916.9	
贵州	314 547.31	16 555.12	3.83	2003	2008	8.38
				5 828.25	32 077.02	
四川	234 448.39	12 339.39	1.37	2001	2008	6.25
				2 994.92	29 904.78	
共计	3 752 680.5	197 505.9	6.09	2001	2016	1
				70 234.03	297 311.85	

图2展示了2001~2019年间西南地区森林损失的空间分布情况和时间序列变化,从图中可以清楚看出,损失主要集中分布在广西、云南省南部和贵州省东南部地区(图2(a)),损失面积随时间变化呈现累计增加趋势(图2(b))。实验计算了西南地区不同年份的森林损失率以反映森林损失面积随时

间的变化趋势,2001~2008年之间,森林年损失率较其他年份相比相对较低,但增加趋势显著($R^2=0.86, p < 0.05$),由2001年的1.8%增至2008年的7.3%,2008年之后,森林损失面积虽然维持在较高水平,但速度有所放缓,由2008年的7.3%降至2019年的6%。



审图号:GS(2016)1663

图2 2001~2019年西南地区不同行政区森林损失情况

Fig.2 Forest loss in different administrative regions.

4.2 森林损失的地形分布

为了探究森林损失地区与地形特征有何种联系,首先以地区平均海拔高度作为基准面(相对地面高度),把森林损失地区年平均海拔、年平均坡度和年份进行线性回归分析,并对其进行显著性检验。结果如图3所示:整体来看,相对地面高度而言,西南地区森林损失多发生在低海拔地区,且海拔随时间变化呈显著下降趋势($R^2=0.81$, $p<0.01$),坡度也同样如此($R^2=0.45$, $p<0.01$),但各省(市)之间存在显著差异。与其他省份相比,四川省森林损失多发生在海拔较高、坡度较陡的地方,且2001~2019年间波动范围较大,森林损失地区海拔从2001年的2 051 m降至2019年的1 446 m,坡度从2001年的24.28°降至2019年的20.78°;贵州省海拔则从2001年的1 028 m降至2019年的878 m,坡度从2001年的19.9°降至2019年的19.2°,两省海拔在 $P<0.01$ 的显著性水平下呈现下降趋势(四川 $R^2=0.67$,贵州 $R^2=0.53$),坡度在 $P<0.05$ 的显著性水平下呈现下降趋势(四川 $R^2=0.27$,贵州 $R^2=0.32$);与其他地方相比,重庆市森林损失多发生在相对地面高度海拔更高的地方,海拔由2001年的1 112 m降至2019年的871 m,坡度由2001年的22.3°降至2019年21.5°,海拔和坡度在 $P<0.01$ 显著性水平下均呈现显著下降趋势($R^2=0.78$, $R^2=0.37$);云南省森林损失地区海拔随年份变化呈显著下降趋势($R^2=0.22$, $p<0.05$),但坡度下降趋势不显著($R^2=0.06$, $p=0.313$);整个研究期间,广西省森林损失地区海拔相对地面高度上下波动,呈现不显著下降趋势($R^2=0.07$, $p=0.273$),坡度有微弱上升的趋势,但

未通过显著性检验($R^2=0.007$, $p=0.741$)。考虑到不同地区的地形差异,实验以坡度1°、海拔50 m为间隔进一步统计了不同海拔和坡度范围的森林损失面积。

整体来看,西南地区森林损失多发生在海拔2 000 m以下、坡度40°以下的地区(图4),坡度分布普遍具有正态分布特征,峰值出现在20°附近,不同行政区之间无明显差异,其中四川省森林损失坡度范围最广(0°~70°)(图4(a))。图4(b)为不同海拔范围内森林损失面积的分布情况,广西省森林损失主要分布在1 500 m以下的地区,海拔300 m以下范围,森林损失面积逐渐增加,在250~300 m之间达到峰值后,随着海拔的增加森林损失面积逐渐下降;重庆、云南和贵州地区损失面积主要集中在海拔2 500 m以下的地区,在海拔600~650 m、1 250~1 300 m、850~900 m之间达到峰值后,森林损失面积大幅度下降;四川省2001~2019年间森林损失面积海拔范围最广,主要分布在海拔4 000 m以下的地区,森林损失面积在450 m~500 m之间达到最高值。

从森林损失面积海拔和坡度的时间序列中可以看出西南地区森林损失逐渐转向更低更缓的地区,随着海拔的升高和坡度的增大,森林损失面积逐渐减少。该地区地质构造复杂,岩溶发育强烈,岩石多属于白云岩、页岩等可溶性岩石,受到地质构造和岩性结构的制约,加之地形因素的影响,土壤类型各异,以黄壤、红壤和紫色土为主。作为陆生植物重要的生活基质,土壤和植物之间的物质交换进一步影响了植被的生长,海拔相对较低坡度较缓的地方通常水土保持较好,水热条件更有利于保持土壤肥力,为植物的生长发育提供了良好的条

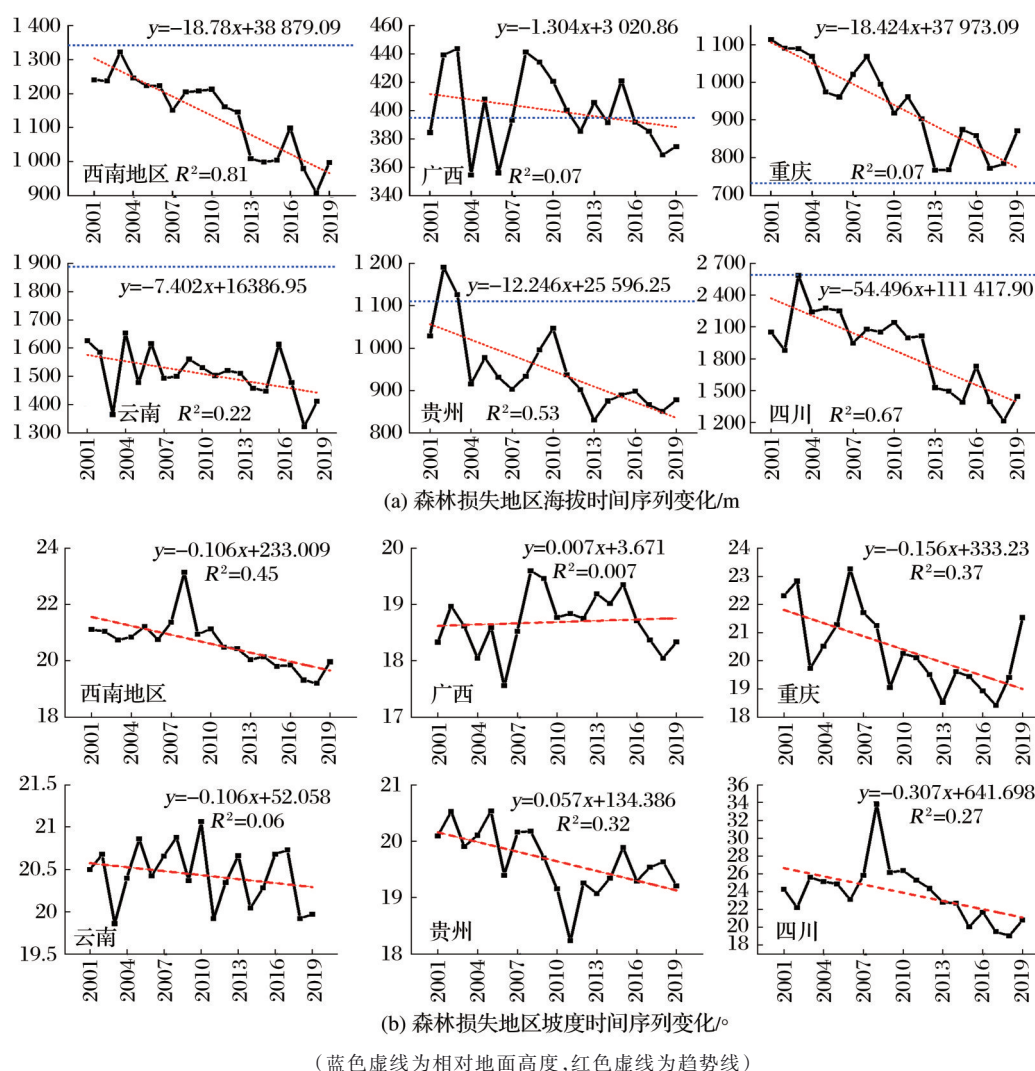


图3 不同行政区森林损失区域地形特征变化趋势

Fig.3 The topographical Characteristics of forest loss areas in different administrative districts changes over time

件。近年来,日益紧张的人地关系迫使当地农民开山毁林,天然林植被遭到严重的破坏,同时为促进经济发展,当地居民寻找地形适宜的地形大量种植桉树、杨树等具有经济效益的商品林,这进一步增加了低海拔坡度缓地方的森林损失面积。

4.3 空间自相关分析结果

以地级市为单位,利用2001~2019年间不同年份森林损失面积计算西南地区森林损失现象的相关性指数Moran's I ,并且在 $P < 0.05$ 的显著性水平上检验结果。结果如图5所示:从该图中可以明显看出,2001~2019年间,全局Moran's I 指数均为正值(平均值为0.406),表明西南地区森林损失现象在整个空间分布上存在较强的正相关性,相邻区域森林损失面积的空间相关性显著,总体水平较为平稳。2003、2009和2019年,Moran's I 值相对较小,有明显下降趋势,表明在这几年,西南地区森林损

失现象的正相关性相对较弱。 Z 得分的变化趋势同Moran's I 指数一致,且均远高于1.96(代表5%的置信区间),这表明,在此期间森林损失模式是随机产生的可能性非常小,西南地区森林损失现象在空间上形成密集区。

局部自相关分析所用到的指标可以反映整个区域中,局部样区的某一地理现象与相邻局部样区上同一现象的相关程度,研究区不同时间段森林损失面积局部自相关LISA聚集图如下(图6),西南地区森林损失现象存在明显的空间聚类性。从空间分布来看,2001~2019年研究区森林损失面积高值主要分布在广西和贵州,从广西省中南部逐步向贵州省南部扩展,表明这些地区的森林损失面积大,相邻地区的森林损失面积也较大,大面积森林损失现象有恶化趋势;森林损失面积低值主要分布在重庆、四川、云南北部和贵州西北地区,从重庆、四川

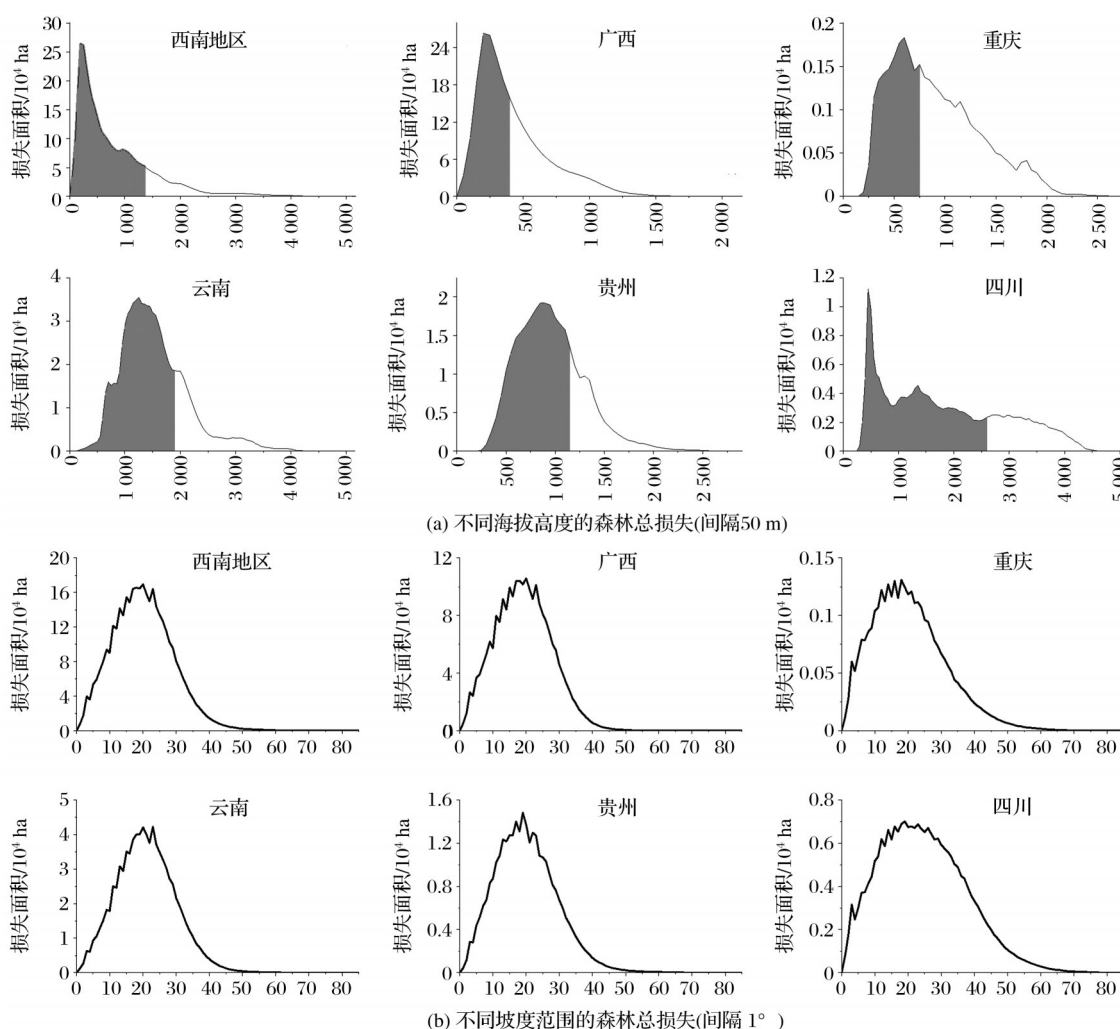


图4 西南地区2001~2019年森林损失面积的地形分布

Fig.4 Topographic distribution of forest loss area in Southwest China from 2001 to 2019

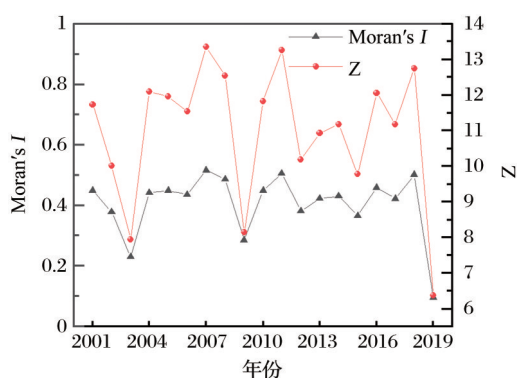


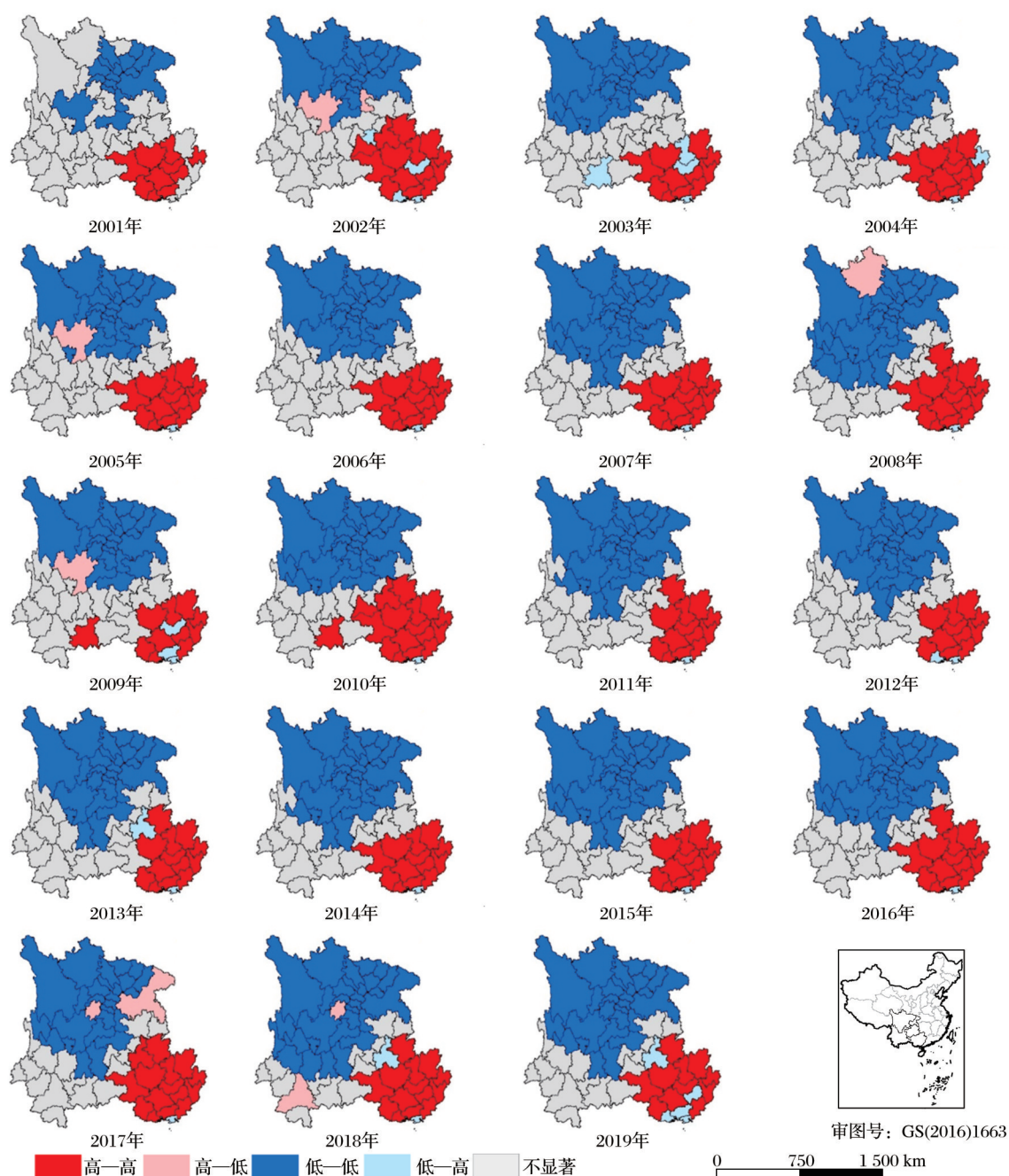
图5 2001~2019年空间自相关分析结果

Fig.5 Global spatial autocorrelation analysis results from 2001 to 2019

东南部向云南北部、贵州西北地区扩展,形成了大片集中分布的连续区域,低值聚集说明这些地区的森林损失面积和相邻地区的森林损失面积都较小;低高异常值聚集表明这些地区的森林损失面积小,

相邻地区的森林损失面积较大,主要分布在广西省南部部分地区;高低异常值聚集表明这些地区的森林损失面积大,相邻地区的森林损失面积较小,在整个空间上零星散布,无明显规律。

总之,空间自相关的分析结果表明西南地区森林损失现象具有空间正相关性,LISA 聚集图具体揭示出森林损失现象的空间分布,总体上呈现明显的高值聚集和低值聚集,局部零星出现高低聚集和低高聚集的空间格局。由于其空间关联性的存在,空间自相关分析的统计结果可以提供未来有关森林变化可能的轨迹和见解,查明这些地区森林变化的模式、过程对于制定解决毁林问题的政策和保护措施至关重要。在今后对西南地区森林资源进行保护和规划时,应充分考虑森林损失现象的空间分布,重点监测损失面积高值集中分布的广西省和贵州南部地区,制定差异化森林生态保护政策,采取主次分明、划区管理、因地制宜的治理方式,同时要



(高—高型关联:损失面积高值地区被周围是高值的地区包围;高—低型关联:损失面积高值地区被周围是低值的地区包围;低—低型关联:损失面积低值地区被周围是低值的地区包围;低—高型关联:损失面积低值地区被周围是高值的地区包围)

图6 2001~2019年西南地区森林损失LISA分布图

Fig.6 Deforestation distribution of LISA map in Southwest China from 2001 to 2019

突破行政区划,加强区域之间的联系。受政策导向和市场需求变动的影响,要想进一步了解这些聚集地区的空间动态,还要将影响森林砍伐和森林退化的因素纳入考虑范围。

5 讨论

5.1 影响森林损失的可能驱动力

以往研究指出在快速的城市化进程中,偏远山

区森林砍伐情况日益恶化^[29,31],为了提供西南地区森林损失的变化证据,利用2017年高分辨率土地利用覆盖图(辅助谷歌地球历史影像图7),确定了2001~2016年来森林损失地区最终的土地利用类型(图8)。整体上西南地区大部分(约占77.7%)损失地区又再生为林地,12%转变为耕地,3%转变为草地,2%变成了建设用地,其他、灌木的占比均小于3%。土地利用的转变过程与我国近年来实施的

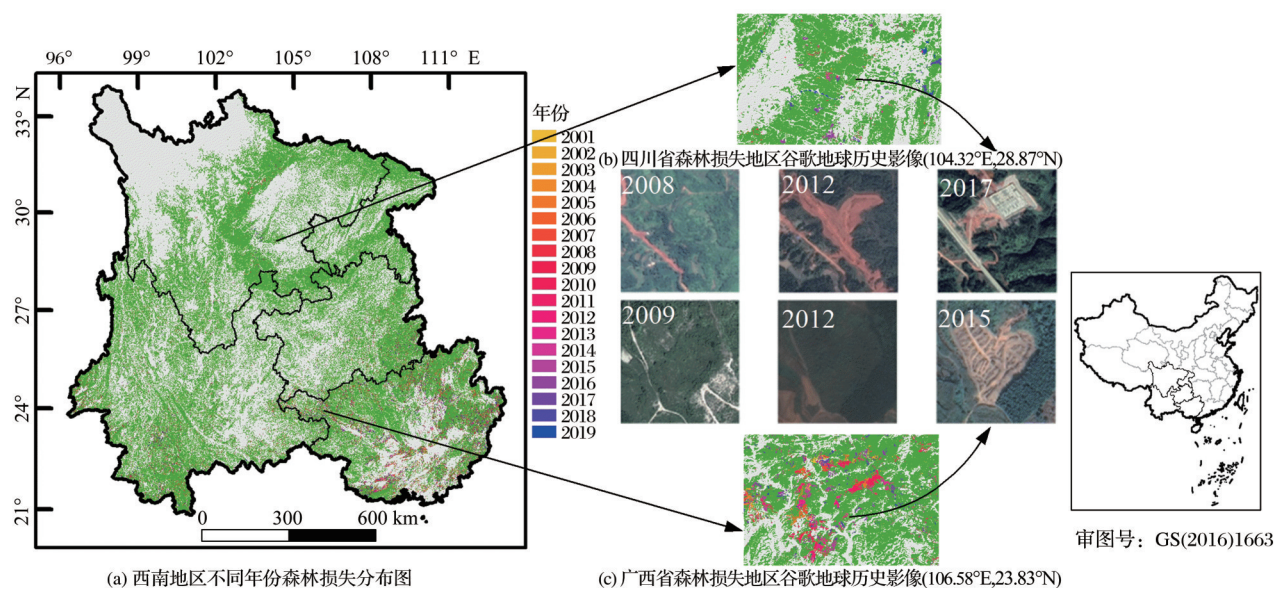


图7 2001~2019年西南地区森林损失空间分布

Fig.7 Spatial distribution of forest loss in southwest China from 2001 to 2019

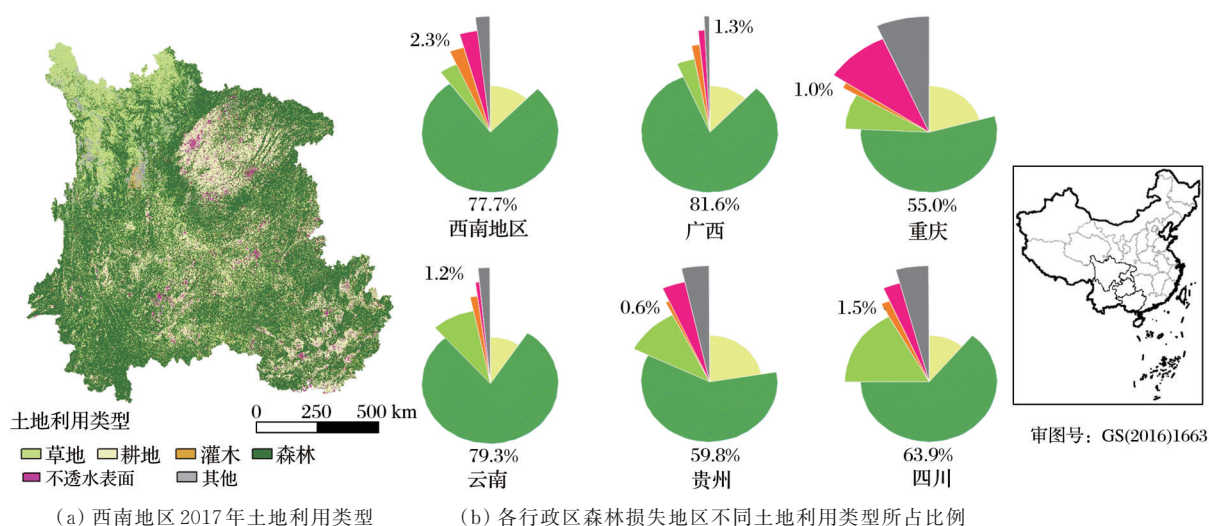


图8 森林损失地区土地利用变化情况

Fig.8 Land cover followed forest loss in Southwest China

相关政策密不可分,20世纪末,该地区(以广西、云南为主)为拉动经济发展大力推广种植速生林,频繁的林业活动造成前期森林损失面积趋势呈现加速状态(图2)。为有效改善该区脆弱的喀斯特生态环境,国家先后实施了天然林保护、石漠化综合治理等一系列生态建设工程,特别是2008年,国务院批复了《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2006~2015年)》,2012年为进一步加快石漠化治理步伐,批复了《滇黔桂石漠化片区区域发展与扶贫攻坚规划(2011~2020年)》。与其他省份相比,广西(约占81.6%)、云南(约占79.3%)森林再生面积相对较大,在这之后的几年中,森林损失恶化趋势得到了控

制,这在前人的研究中也得到了证实^[32]。2016年《国务院关于全国“十三五”期间森林采伐限额的批复》规定中,对森林砍伐实施了严格的审批制度,次年广西壮族自治区人民政府也明确提出“十三五”期间积极开展森林生态修复行动,受政策导向的影响,2016年之后西南地区森林损失面积在逐步下降。

农业扩张和森林砍伐往往导致山区环境的严重退化^[33-34],成为山地地区森林损失的主要原因,除受林业活动影响外,随着当地人口的不断增长,对粮食、燃料、木柴等的需求不断扩大,国家统计局人口数据表明,2000~2018年西南地区各省(市)年均人口自然增长率均大于3‰。西南地区共有约12%

的林地转变为耕地,贵州和重庆分别有22.5%、20.7%的土地由森林转变为耕地,广西、云南、四川耕地分别占比12%、9.2%和11.1%。

城市发展对土地的需求是中国土地利用政策面临的困境之一^[35],由于城市化进程的加快,愈发紧张的人地关系成为森林损失现象的矛盾源头,森林转变为建设用地占比以重庆市最为突出(约占9%),其余各行政区均小于5%。据统计资料显示,重庆市建成区面积从2004年的514 km²迅速扩大到2018年的1 497 km²^[36],建设用地的不断扩张需要征用更多的土地,从而不可避免地导致森林砍伐等环境问题。

除受人类活动影响外,毁林和森林火灾有着密切的联系^[37],在世界范围内,森林火灾一直被认为是导致森林损失的主要因素之一,灾后火烧迹地总是先被草本植物所覆盖,随后被灌丛代替,最终植被的恢复效果还与火烧强度、持续时间、植被类型、火烧季节等因素密不可分。四川和云南分别有17.1%和8.2%的森林转变为草地,这与近年来西南地区林火频发事件密切相关。2003~2015年间,中国森林损失和火灾面积之间呈现显著正相关关系^[38],西南地区火灾次数和火场面积呈现上升趋势^[39],火灾的发生使森林植被遭到破坏,大面积的树木死亡导致森林面积进一步减少。

5.2 山区森林损失的潜在影响

西南地区多山地丘陵,损失多发生在年平均海拔900 m以上,坡度19°以上的地区,当地对山区森林损失的关注主要在由于环境退化引发的自然灾害上。坡地大面积的森林砍伐会暴露土壤,遇上季节性洪水将造成严重的水土流失,增加山体滑坡和泥石流的危险。近年来,损失逐渐向低海拔缓坡的地区转移,这表明森林砍伐对低地平缓地区的影响更大,这些地区通常是人口和耕地密集区,由此引发的环境问题(土地退化、山体滑坡等)对当地居民的生命和财产安全构成了严重威胁。此外将森林转变为耕地,由于坡地农业的不可持续性,不仅使农作物产量减少而且容易导致耕地撂荒现象^[40],农业污染物的增加也会降低当地水质,这对当地居民的健康和生计都存在潜在影响。最后,地形特征(海拔、坡度)以不同的方式与植被相互作用,植被的生物地球物理效应(调节反照率和蒸腾作用)和生物地球化学效应(光合作用)共同影响着云和降水的形成,进一步改变当地的气候条件。

6 结 语

遥感数据产品目前已成为监测森林覆盖变化的有效工具,目前我国对大范围的森林资源动态变化监测主要通过每5 a一次的国家森林资源清查报告,然而森林的动态变化是十分快速的,5 a一次的森林资源清查可能并不会捕捉到局部区域的细微变化。在这里,实验利用30 m的高空间分辨率全球森林变化数据集GFC对2000年以来我国西南地区进行了监测,结果表明,2001~2019年西南地区森林损失面积整体上呈现波动上升趋势,总损失量为375.27万 hm²。以2008年为分界点,2008年以前,年损失率相对较低,呈显著上升趋势,2008年以后,年损失率虽然维持在较高水平但波动下降。森林损失现象逐渐向海拔较低、坡度较缓的地方转移。在空间分布上,各地级市之间森林损失存在显著的空间正相关性,空间聚集现象有不断扩张的趋势。此外,频繁的林业活动和农业扩张等因素成为森林砍伐的主要驱动力,今后管理部门确定森林监测和执法工作重点时应充分考虑多因素造成的森林砍伐和退化,制定更加科学合理的决策方案从而促进森林生态的可持续发展。

参考文献(References):

- [1] Bonan G B. Forests, Climate, and Public Policy: A 500-Year Interdisciplinary Odyssey[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2016, 47(1): 97-121. doi: 10.1146/annurev-ecolsys-121415-032359.
- [2] Redowan M, Phinn S R, Roelfsema C M, et al. Satellite Estimation of Emission Factors and Emissions of Biomass-carbon due to Deforestation and Forest Degradation in Bangladesh for a REDD+Program[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2021, 15(1):014510. doi:10.1117/1.JRS.15.014510.
- [3] Worden J, Saatchi S, Keller M, et al. Satellite Observations of the Tropical Terrestrial Carbon Balance and Interactions with the Water Cycle during the 21st Century[J]. *Reviews of Geophysics*, 2021, 59. doi:10.1029/2020RG000711.
- [4] Moffette F, Alix-Garcia J, Shea K, et al. The Impact of Near-real-time Deforestation Alerts Across the Tropics[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11: 172-178. doi: 10.1038/s41558-020-00956-w.
- [5] Garcíarui J M, Begueria S, Arnaez J, et al. Deforestation Induces Shallow Landsliding in the Montane and Subalpine Belts of the Urbión Mountains, Iberian Range, Northern Spain[J]. *Geomorphology*, 2017, 296: 31-44. doi:10.1016/j.geomorph.2017.08.016.
- [6] Barlow J, Lennox G D, Ferreira J, et al. Anthropogenic Disturbance in Tropical Forests Can Double Biodiversity Loss from Deforestation[J]. *Nature*, 2016, 535(7610): 144-7. doi:10.1038/nature18326.

- [7] Tracewski L, Butchart S H M, Donald P F, *et al.* Patterns of Twenty-first Century Forest Loss Across a Global Network of Important Sites for Biodiversity[J]. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2016, 2(1): 37-44. doi:10.1002/rse2.13.
- [8] Xiong B, Chen R S, Xia Z L, *et al.* Large-scale Deforestation of Mountainous Areas during the 21st Century in Zhejiang Province[J]. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(14): 1761-1774. doi:10.1002/ldr.3563.
- [9] Jackson B, Decker Sparks J L, Brown C, *et al.* Understanding the co-occurrence of Tree Loss and Modern Slavery to Improve Efficacy of Conservation Actions and Policies[J]. *Conservation Science and Practice*, 2020, 2(5). doi:10.1111/csp2.183.
- [10] FAO. Global Forest Resources Assessment 2020[M]. Rome: FAO, 2020.
- [11] Shi Liangshu. Status of Remote Sensing Technology and Its Application in Forestry[J]. *Forest Resources Management*, 2004(2): 50-52.[史良树. 遥感技术现状及其在林业中的应用[J]. *林业资源管理*, 2004(2): 50-52.]
- [12] Gong P, Wang J, Yu L, *et al.* Finer Resolution Observation and Monitoring of Global Land Cover: First Mapping Results with Landsat TM and ETM+ Data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 34(7): 2607-2654. doi:10.1080/01431161.2012.748992.
- [13] Wu Nan, Li Zengyuan, Liao Shengxi, *et al.* Overview and Prospects of Forestry Remote Sensing Applications at Home and Abroad[J]. *World Forestry Research*, 2017, 30(6): 34-40.[吴楠, 李增元, 廖声熙, 等. 国内外林业遥感应用研究概况与展望[J]. *世界林业研究*, 2017, 30(6): 34-40.]
- [14] Frappart F, Wigneron J P, Li X, *et al.* Global Monitoring of the Vegetation Dynamics from the Vegetation Optical Depth (VOD): A Review[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(18): 2915. doi:10.3390/rs12182915.
- [15] Hansen M C, Potapov P, Moore R, *et al.* High-resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change[J]. *Science*, 2013, 342(6160): 850-853. doi:10.1126/science.1244693.
- [16] Shimada M, Itoh T, Motooka T, *et al.* New Global Forest/non-forest Maps from ALOS PALSAR Data (2007-2010)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 155: 13-31. doi:10.1016/j.rse.2014.04.014.
- [17] Sexton J O, Song X P, Feng M, *et al.* Global 30 m Resolution Continuous Fields of Tree Cover: Landsat-based Rescaling of MODIS Vegetation Continuous Fields with LiDAR-based Estimates of Error[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2013, 6(5): 427-448. doi:10.1080/17538947.2013.786146.
- [18] Macdicken K G. Global Forest Resources Assessment 2015: What, Why and How?[J]. *Forest Ecology & Management*, 2015, 352: 38. doi:10.1016/j.f-reco.2015.02.006.
- [19] Chen C, Park T, Wang X H, *et al.* China and India Lead in Greening of the World through Land-use Management[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2: 122-129. doi:10.1038/s41893-019-0220-7.
- [20] Li Huiying, Li Xiaoyan, Yu Hao, *et al.* Research on Forest Area Reduction and Landscape Fragmentation in Changji Demonstration Area of Jilin Province in the Past 40 Years based on Multi-source Remote Sensing Information[J]. *Arid Area Resources and Environment*, 2018, 32(2): 128-135.[李慧颖, 李晓燕, 于皓, 等. 基于多源遥感信息的过去40年间吉林省长吉示范区森林面积减少与景观破碎化研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(2): 128-135.]
- [21] Cao Rongqing, Hu Xisheng, Wu Chengzhen. A Study on the Temporal and Spatial Distribution of Forest Loss in Fujian Province from 2000 to 2012[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2019, 50(2): 197-201.[曹荣青, 胡喜生, 吴承祯. 福建省2000~2012年森林丧失量时空分布动态研究[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(2): 197-201.]
- [22] Hou Wenjuan, Gao Jiangbo, Peng Tao, *et al.* Research Progress on the Vulnerability of Southwest Karst Ecosystem under the Framework of Structure-function-habitat[J]. *Progress in Geographical Sciences*, 2016, 35(3): 320-330.[侯文娟, 高江波, 彭韬, 等. 结构-功能-生境框架下的西南喀斯特生态系统脆弱性研究进展[J]. *地理科学进展*, 2016, 35(3): 320-330.]
- [23] Hao Binfei, Han Xujun, Ma Mingguo, *et al.* The Application Research Progress of Google Earth Engine in Earth Sciences and Environmental Sciences[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, 33(4): 600-611.[郝斌飞, 韩旭军, 马明国, 等. Google Earth Engine在地球科学与环境科学中的应用研究进展[J]. *遥感技术与应用*, 2018, 33(4): 600-611.]
- [24] Li Wenhua. Several Problems of Ecological Environment Construction in Southwest My Country[J]. *Forestry Science*, 2000, 36(5): 10-11.[李文华. 我国西南地区生态环境建设的几个问题[J]. *林业科学*, 2000, 36(5): 10-11.]
- [25] Du Wenpeng, Yan Huimin, Zhen Lin, *et al.* Research on Comprehensive Control of Rocky Desertification in Southwest Karst Area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(16): 5798-5808.[杜文鹏, 闫慧敏, 甄霖, 等. 西南岩溶地区石漠化综合治理研究[J]. *生态学报*, 2019, 39(16): 5798-5808.]
- [26] Farr T G, Rosen P A, Caro E, *et al.* The Shuttle Radar Topography Mission[J]. *Reviews of Geophysics*, 2007, 45(2). doi:10.1029/2005rg000183.
- [27] Gong P, Liu H, Zhang M N, *et al.* Stableclassification with Limited Sample: Transferring a 30 m Resolution Sample Set Collected in 2015 to Mapping 10 m Resolution Global Land Cover in 2017[J]. *Science Bulletin*, 2019, 64(6): 370-373. doi:10.1016/j.sci-b.2019.03.002.
- [28] 唐小平. GB/T 26424—2010, 森林资源规划设计调查技术规程[S]. 国家林业局调查规划设计院, 2011.
- [29] Zeng Z Z, Gower D, Wood E F, *et al.* Accelerating Forest Loss in Southeast Asian Massif in the 21st Century: A Case Study in Nan Province, Thailand[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(10): 4682-4695. doi:10.1111/gcb.14366.
- [30] Harris N L, Goldman E, Gabris C, *et al.* Using Spatial Statistics to Identify Emerging Hot Spots of Forest Loss[J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(2): 024012. doi:10.1088/1748-9326/aa5a2f.
- [31] Curtis P G, Slay C M, Harris N L, *et al.* Classifying Drivers of Global Forest Loss[J]. *Science*, 2018, 361(6407): 1108-1111. doi:10.1126/science.aau3445.
- [32] Liu Jiuyan, Kuang Wenhui, Zhang Zengxiang, *et al.* Spatio-temporal Characteristics, Patterns and Causes of Land Use

- Changes in China Since the Late 1980s[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 69(1): 3-14.[刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. *地理学报*, 2014, 69(1): 3-14.]
- [33] Bruun T B, Neergaard A D, Burup M L, *et al.* Intensification of Upland Agriculture in Thailand: Development or Degradation? [J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(1): 83-94. doi:10.1002/ldr.2596.
- [34] Zeng Z Z, Estes L, Ziegler A D, *et al.* Highland Cropland Expansion and Forest Loss in Southeast Asia in the Twenty-first Century[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(8): 556-562. doi: 10.1038/s41561-018-0166-9.
- [35] Chen R S, Ye C, Cai Y L, *et al.* The Impact of Rural Out-migration on Land Use Transition in China: Past, Present and Trend[J]. *Land Use Policy*, 2014, 40(40): 101-110. doi: 10.1016/j.landusepol.2013.10.003.
- [36] 国家统计局, 城市建设[DB/OL]. <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103>, 2020
- [37] Adrianto H A, Spracklen D V, Arnold S R. Relationship between Fire and Forest Cover Loss in Riau Province, Indonesia between 2001 and 2012[J]. *Forests*, 2019, 10(10): 889. doi: 10.3390/f10100889.
- [38] Wu Z W, Yan S J, He L, *et al.* Spatiotemporal Changes in Forest Loss and Its Linkage to Burned Areas in China [J]. *Journal of Forestry Research*, 2020, 31: 2525-2536. doi: 10.1007/s11676-019-01062-0.
- [39] Yi Bole, Cao Zheming, Ban Qingyu, *et al.* Evaluation of Forest Fire Situation in Southwest China based on PCA and System Clustering [J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Science Edition)*, 2018, 38(4): 153-160.[伊伯乐, 曹哲铭, 班擎宇, 等. 基于PCA和系统聚类的西南地区森林火灾形势评价[J]. *西南林业大学学报(自然科学版)*, 2018, 38(4): 153-160.]
- [40] Shi T C, Li X B, Xin L J, *et al.* The Spatial Distribution of Farmland Abandonment and Its Influential Factors at the Township Level: A Case Study in the Mountainous Area of China[J]. *Land Use Policy*, 2018, 70(70): 510520. doi:10.1016/j.landusepol.2017.10.039.

Remote Sensing Monitoring and Spatio-temporal Pattern of Deforestation in Southwest China from 2001 to 2019

Wang Shujing^{1,2}, Lai Peiyu^{1,2}, Hao Binfei³, Ma Mingguo^{1,2}, Han Xujun^{1,2}

(1.Chongqing Jinpo Mountain Karst Ecosystem Field Science Observation and Research Station, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2.Chongqing Engineering Research Center for Remote Sensing Big Data Application; School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

3.College of Electronics and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: Forests play an important role in ecosystem services, such as providing clean air, protecting biological habitats, and reducing global greenhouse gas emissions. Global Forest Change (GFC) maps the forest cover change with a high spatial resolution of 30 m every year, which has become an effective tool for monitoring the spatio-temporal changes of forest cover. Based on Google Earth Engine, using high-resolution global forest change data, we inspected the patterns and processes of deforestation combined with linear regression methods and spatial autocorrelation theory in Southwest China. The results show that in the past 19 years, the total forest loss in southwest China was 3.752 7 million ha. 2008 is a turning point, as the area of annual forest loss has a significant rising trend before ($P < 0.05$), and a fluctuant decreasing trend afterwards. The losses were mainly distributed in Guangxi province, southeast Guizhou Province and southern Yunnan Province. While forest loss are mainly located on the mountains (elevation below 2 000 m, slope below 19°), the location of forest loss patches has moved to lower and flatter areas in recent years. From a spatial perspective, the Moran's I index was positive, with an average value of 0.406 from 2001 to 2019. It also tells that most prefecture-level cities are neighboring by the cities with similar forest loss area. High-High clusters are mainly in Guangxi Province and southern Guizhou Province, and the aggregation of Low-Low are showed in Chongqing, Sichuan Province, and northern Yunnan Province. The potential factors that affect deforestation in Southwest China highlight the role of forestry activities and agricultural expansion, policy factors play an important role in the transformation of land use patterns. This study provides a basis for the future rational forest management and planning of forest resources, formulating more scientific and effective policies and programs.

Key words: Forest change; Southwest China; Remote sensing monitoring; Google Earth Engine; Spatial autocorrelation