

DOI: 10.5846/stxb202101200210

周维, 刘国华, 段兴武, 苏旭坤. 滇金丝猴分布区森林面积变化的时空特征及其影响因素. 生态学报, 2022, 42(2): 791-803.

Zhou W, Liu G H, Duan X W, Su X K. Spatio-temporal characteristics of forest area change and its determinants in the distribution area of Yunnan snub-nosed monkey (*Rhinopithecus bieti*). Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 791-803.

滇金丝猴分布区森林面积变化的时空特征及其影响因素

周 维^{1,2}, 刘国华^{1,2,3}, 段兴武¹, 苏旭坤^{2,3,*}

1 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650091

2 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

3 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

摘要: 森林生态系统是滇金丝猴 (*Rhinopithecus bieti*) 的主要生境, 森林面积变化会直接影响滇金丝猴的生存。本研究基于全球森林变化 (Global Forest Change) 数据, 采用 Theil-Sen 趋势分析和 Mann-Kendall 检验、热点分析与地理探测器模型等方法, 探讨了滇金丝猴分布区 2001—2019 年森林面积变化的时空特征及其影响因素。结果表明: (1) 近 20 年间, 滇金丝猴分布区森林面积变化总量为 $3.81 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 约占研究区森林面积的 2.44%, 逐年森林面积变化呈现较大的年际波动, 其中 5 个保护地森林面积变化总量达 5456 hm^2 , 约占研究区森林面积变化总量的 14.3%, 老君山风景区和云岭保护区森林面积变化的比例较高; (2) 滇金丝猴分布区森林面积变化趋于缓和, 其中森林面积减少呈现显著增加的区域面积为 $1.03 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占整个研究区面积的 2.9%; 森林面积减少呈现显著减少的区域面积为 $3.05 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占整个研究区面积的 7.9%; 同时森林面积变化的热点区域面积呈不断下降的趋势; (3) 滇金丝猴分布区森林面积变化呈现向低海拔、高坡度转移的趋势; (4) 过火面积和人口密度是滇金丝猴分布区森林面积变化的主要影响因素, 其次是降水、海拔、气温。本研究对滇金丝猴分布区森林生态系统管理与滇金丝猴保护具有现实意义。
关键词: 滇金丝猴分布区; 森林面积变化; 自然保护地; 热点分析; 地理探测器模型

Spatio-temporal characteristics of forest area change and its determinants in the distribution area of Yunnan snub-nosed monkey (*Rhinopithecus bieti*)

ZHOU Wei^{1,2}, LIU Guohua^{1,2,3}, DUAN Xingwu¹, SU Xukun^{2,3,*}

1 Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650091, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Forest ecosystem is main habitat of Yunnan snub-nosed monkey (*Rhinopithecus bieti*) (YSM). The change of forest area is considered to be a direct impact to YSM existence. Based on Global Forest Change data, using Theil-Sen trend analysis, Mann-Kendall test, hotspot analysis and geographical detector model, this research discussed the spatio-temporal characteristics and determinants of forest area change in the distribution area of YSM from 2001 to 2019. The results showed that: (1) During the past 20 years, the total forest area change in the distribution area of YSM was $3.81 \times 10^4 \text{ hm}^2$, about 2.44% of the total forest area in the study area, annual forest area change showed a large inter-annual fluctuation, in which 5456 hm^2 forest area change in 5 protected areas, accounting for 14.3% of the total forest area change in the study area. Forest area change ratio was relatively higher in Laojunshan scenic spot and Yunling nature reserve. (2) Forest area change

基金项目: 科技部课题“第二次青藏高原综合科学考察研究”(2019QZKK0402)

收稿日期: 2021-01-20; 网络出版日期: 2021-09-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xksu@rcees.ac.cn

trended to mitigate in the distribution area of YSM. The significantly increasing area of forest loss was $1.03 \times 10^5 \text{ hm}^2$, accounting for 2.9% of the whole study area. The significantly decreasing area of forest loss was $3.05 \times 10^5 \text{ hm}^2$, accounting for 7.9% of the whole study area. At the same time, the hotspot areas of forest area change showed a decreasing trend. (3) Forest area change showed a trend of shifting to low altitude and high slope area in the distribution area of YSM. (4) The burned area and population density were main impact factors of forest area change in the distribution area of YSM, followed by precipitation, altitude and temperature. This study has practical significance for forest ecosystem management and YSM conservation.

Key Words: distribution area of Yunnan snub-nosed Monkey; forest area change; protected areas; hotspot analysis; geographic detector model

作为重要的陆地生态系统类型,森林生态系统能够提供水源涵养、固碳、气候调节等多种生态系统服务^[1]。森林生态系统对调节区域气候、提升生态安全屏障功能、促进社会经济发展十分重要。因此,森林生态系统保护十分必要,我国已经制定与实施了一系列森林保护政策,如退耕还林、天然林保护等,同时建立了多种不同级别、不同类型自然保护地,整体上,我国森林面积总体正在稳步增加^[2-3],但不同地区的森林面积变化存在较大差异,一些地区仍然存在森林退化^[4-5]和持续的森林面积减少^[6]。森林退化与森林面积减少不仅会降低生态系统服务功能,同时也会对生物多样性保护产生威胁。滇金丝猴(*Rhinopithecus bieti*)是我国特有珍稀濒危物种,其生境主要依赖针叶林为主的森林生态系统,森林面积减少会导致滇金丝猴生境破碎化,严重压缩滇金丝猴的生境及降低生境间的连通性^[7-8]。近些年来,随着保护力度的不断提升,滇金丝猴的种群数量稳中有升^[9]。然而,滇金丝猴的生境并没有得到全面的改善,部分区域仍出现了生境退化、破碎化等现象^[10-11]。因此需要较高时空分辨率森林监测数据,实时监测滇金丝猴分布区森林面积的动态变化特征,为森林生态系统管理和滇金丝猴保护提供决策支持。

Hansen 等^[12]对 Landsat 影像进行分类,并发布了 Global Forest Change(GFC)全球森林变化逐年数据集,其中最新的 GFC v1.7 数据集包含了 2001—2019 年逐年 30 m 分辨率的全球森林变化情况。由于 Hansen 等发布的 GFC 数据集具有较高的时空分辨率,能够反映长时间序列的逐年森林变化情况,应用该数据集进行区域森林面积变化监测的研究在不断增多^[13-15]。Zeng 等^[16]利用 GFC 数据结合 2000 年和 2017 年的高分辨率土地利用数据分析了泰国楠府(Nan Province)2001—2016 年森林面积减少的动态特征。Xiong 等^[6]和 Montibeller 等^[17]则分别利用 GFC 数据分析了浙江省和巴西亚马逊地区自 2001 年以来森林面积减少的时空特征。综上所述,目前在区域尺度上运用 GFC 数据集进行森林变化监测的研究较多,而保护地对于关键生态系统类型和珍稀濒危物种的保护具有重要作用,一些地区的保护地仍存在较为严重的森林面积减少^[15-16],因此亟需加强对于保护地森林变化的监测,未来利用 GFC 数据集对区域保护地和物种分布区的森林面积变化监测和保护成效评估具有重要意义。

本研究基于具有较高时空分辨率的 GFC 数据集,拟解决如下关键科学问题:(1)滇金丝猴分布区森林面积变化的时空特征如何?(2)导致森林面积变化的影响因素有哪些?通过本研究以期为该地区的森林生态系统可持续管理和滇金丝猴保护提供数据支撑和决策支持。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

滇金丝猴分布区主要位于横断山区澜沧江和金沙江之间的狭长区域,主要涉及云南西北部的德钦县、维西县、云龙县、玉龙县、兰坪县和西藏芒康县,总面积约 $3.85 \times 10^6 \text{ km}^2$ (图 1)。目前该地区已经建立了 4 个滇金丝猴保护区及 1 个风景名胜区,分别是西藏芒康红拉山滇金丝猴国家级自然保护区(以下简称芒康保护区),面积约 1852 km^2 、云南白马雪山国家级自然保护区(以下简称白马雪山保护区),面积约 2820 km^2 、云南云龙

天池国家级自然保护区(以下简称云龙天池保护区),面积约 145 km²、云南兰坪云岭省级自然保护区(以下简称云岭保护区),面积约 746 km²、云南丽江老君山风景区(以下简称老君山风景区),面积约 1107 km²。5 个保护地总面积约 6672 km²,约占整个滇金丝猴分布区面积的 17.3%。该地区海拔在 733—6505 m 之间,呈现北高南低的特点。气候主要为亚热带高原季风气候,其中 5—10 月份为湿季,降水量较多,11 月至次年 4 月份为干季,降水量较少。

1.2 数据来源

本文主要基于 Hansen 等发布的 Global Forest Change v1.7(GFC)数据集,该数据集主要包括三部分:2000 年的森林覆盖数据(treecover)、2001—2019 年的森林面积减少量(forest loss)、2001—2019 年的森林面积增加量(forest gain),空间分辨率均为 30 m(图 2)。本文关注的森林面积变化主要采用 GFC 数据中的 2001—2019 年的森林面积减少(forest loss)数据和 2000 年的森林覆盖(treecover)数据,其中 2000 年的森林面积数据,取树冠覆盖(tree canopy cover)大于 30%作为 2000 年的森林覆盖面积^[6, 18]。其中 GFC 数据集利用世界粮农组织的统计数据进行了验证^[12],同时有学者将该数据与 Globe Land 30 数据集^[15]、国家森林资源调查数据^[19]进行比较,并利用该数据集在部分区域结合高分影像进行验证^[6],结果均表明该数据集具有较高的精度。

参考相关研究对于森林面积变化因素的探讨^[6, 16, 19—20],并结合研究区特征和数据的可获取性,选取过火面积、人口密度数据、海拔、坡度、坡向、气温、降水、土地利用、道路数据作为森林面积变化的影响因素。其中,过火面积数据采用 MODIS-MCD64A1 火灾面积数据产品。DEM 数据采用 SRTM DEM 30 m 分辨率数据,并生成海拔、坡度、坡向。上述数据产品均通过 Google Earth Engine(GEE)云平台调用,并基于 GEE 平台进行裁剪、导出。其中 2000—2015 年气温、降水栅格数据和 2015 年人口密度栅格数据、土地利用栅格数据均来源于中国科学院资源环境科学数据中心,道路数据来源于全国地理信息资源目录服务系统。数据来源详见表 1。

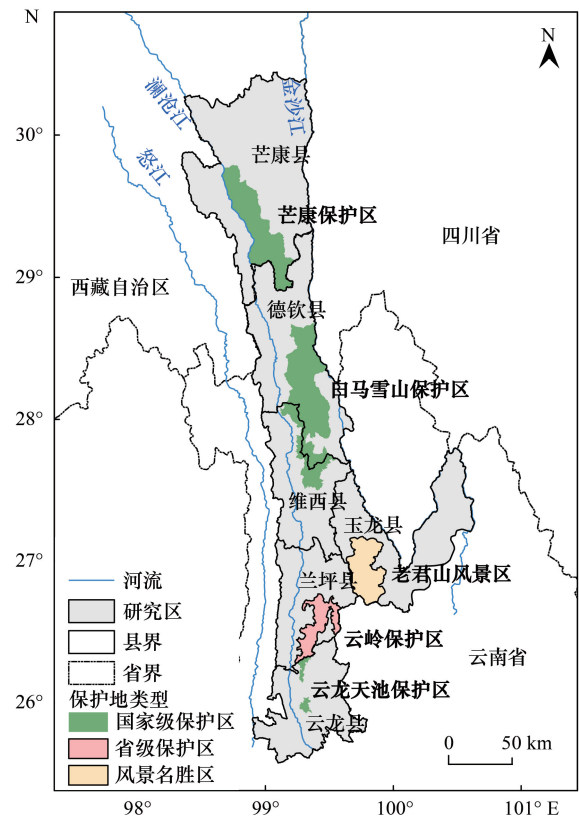


图 1 研究区位置
Fig.1 The location of study area

表 1 主要数据来源
Table 1 The main data source

数据 Data	分辨率 Resolution	数据对应时间 Time range of data	数据来源 Data source
全球森林变化数据集 Global Forest Change dataset	30 m	2001—2019 年逐年	GEE 云平台 (https://earthengine.google.com)
过火面积 Burned area	500 m	2001—2019 年逐年	
数字高程模型 Digital elevation model	30 m	—	
气温 Temperature	1 km	2001—2015 年均值	中国科学院资源环境科学数据中心
降水 Precipitation	1 km	2001—2015 年均值	(http://www.resdc.cn)
土地利用 Land use	1 km	2015 年	
人口密度 Population density	1 km	2015 年	全国地理信息资源目录服务系统
道路数据 Road data	1:250000	—	(http://www.webmap.cn)

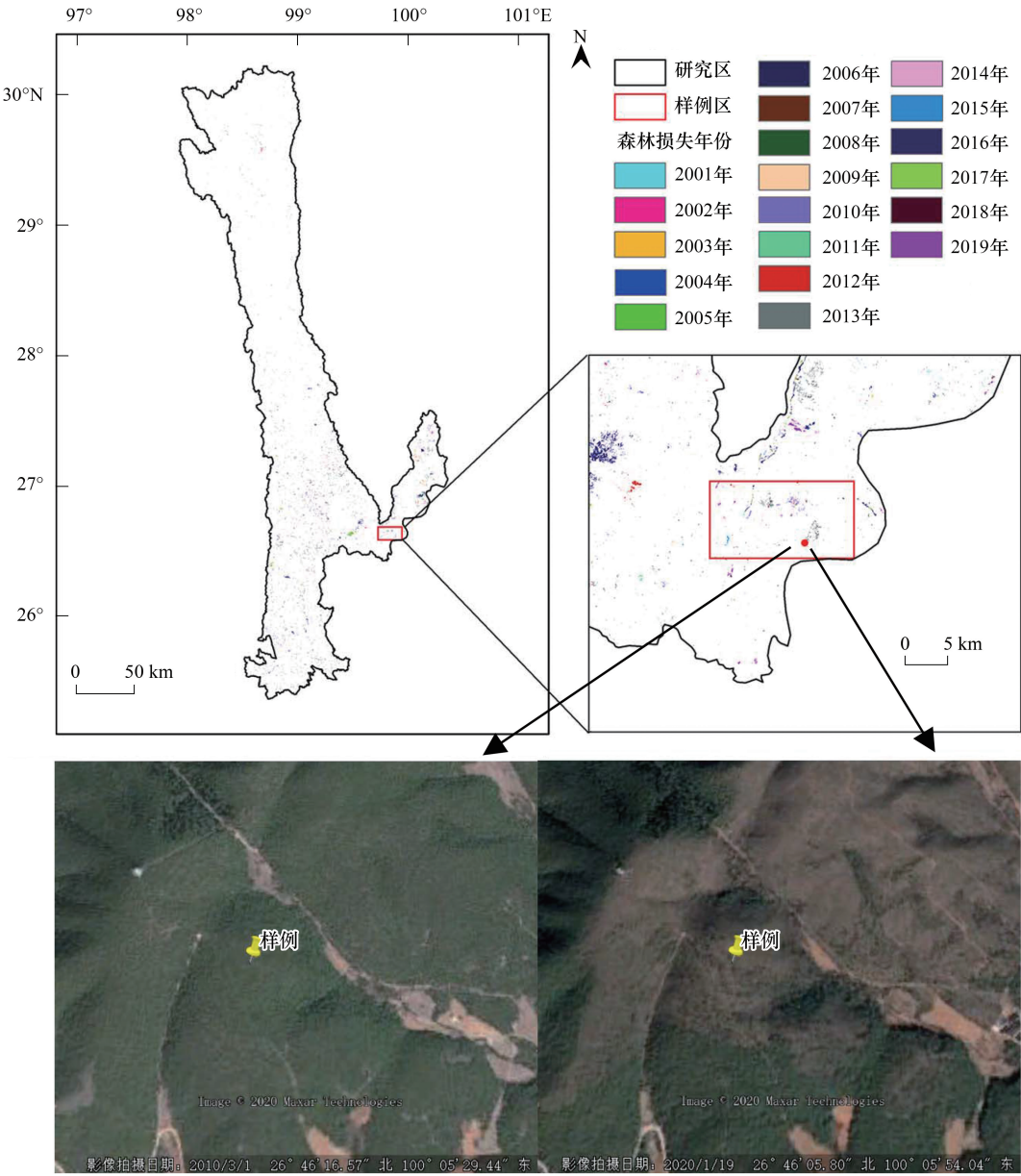


图 2 森林面积变化的空间分布及森林面积变化前后示例图

Fig.2 The spatial distribution of forest area change and a sample of before and after forest area change

1.3 研究方法

1.3.1 网格尺度的选取

滇金丝猴分布区内行政区面积大小不一致,选取行政边界作为评价单元不利于探究森林面积变化的时空分异特征^[21]。因此,本研究以网格为基本研究单元,参考相关文献针对网格的划分^[22-23],将研究区划分成 1 km×1 km,3 km×3 km,5 km×5 km 的网格,为了突出森林面积变化的空间分异,经过对比调整,最终选取 3 km×3 km 网格作为本研究的基本单元,共生成 4705 个网格。

1.3.2 Theil-Sen 趋势分析与 Mann-Kendall 检验

Theil-Sen 趋势分析(简称 Sen 趋势分析)与 Mann-Kendall 检验(简称 MK 检验)能够用来判断长时间序列数据的变化趋势^[24-26]。本文利用 Sen 趋势分析与 MK 检验来探究滇金丝猴分布区 3 km×3 km 网格范围内森林面积变化的空间分布、时间变化特征和显著性检验。

Sen 趋势分析能够对时间序列数据进行变化趋势检测^[27-28]。其公式如下:

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) (\forall j > i) \quad (1)$$

式中, j 和 i 分别代表第 j 年和第 i 年; x_j 和 x_i 分别表示同一格网范围内第 j 年森林面积减少量和第 i 年森林面积减少量; β 表示趋势度,用 β 值来判断时序森林面积减少趋势的升降,当 $\beta > 0$ 时,呈上升的趋势,反之呈下降的趋势。

基于秩的非参数 MK 检验方法能够对变化趋势进行显著性检验^[29-30],公式如下:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (2)$$

式中, n 为样本总量, $j, k = 1, 2, \dots, n$; x_j, x_k 分别为第 j, k 时刻的样本值。 sgn 为符号函数,公式如下:

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1, (x_j - x_k) < 0 \\ 0, (x_j - x_k) = 0 \\ -1, (x_j - x_k) > 0 \end{cases} \quad (3)$$

S 为正态分布,其均值为 0,方差 $\text{var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$,当 $n > 10$ 时,正态分布统计量计算如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, S > 0 \\ 0, S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

本文检验中取显著水平 $\alpha = 0.1$, $Z = 1.64$ 进行显著性检验^[31]。当 $|Z| > 1.64$ 时,表明通过了显著性检验,即当 $Z > 1.64$ 时,表明森林面积减少量呈现显著增加,当 $Z < -1.64$ 时,表明森林面积减少量呈现显著减少。

1.3.3 热点分析

通过热点分析(Getis-Ord G_i^*)可得到高值或低值要素在空间上发生聚类的位置^[32-33]。本文利用热点分析探究在 3 km×3 km 格网尺度下森林面积变化的空间聚集特征。公式如下:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n W_{ij}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n W_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n W_{ij})^2}{n-1}}} \quad (5)$$

式中,每个要素返回的 G_i^* 统计就是 Z 得分, Z 得分越大且为正数,说明高值聚类越紧密;反之, Z 值得分越小且为负数,表明低值聚类越紧密^[34]。

本文利用 3 km×3 km 的格网提取每个格网内相应时段的森林面积减少总量,并利用热点分析工具探究格网尺度下森林面积变化的冷热点时空分布及其变化特征。

1.3.4 地理探测器模型

地理探测器模型是探测地理要素的空间分异,揭示其驱动力的一种方法^[35-36]。利用地理探测器模型可以研究各影响因素对于因变量的交互作用。计算公式为:

$$q = 1 - \frac{1}{n\sigma^2} \sum_{h=1}^L n_h \sigma_h^2 \quad (6)$$

式中, L 为因变量 Y 或自变量 X 的分层; N_h 和 σ_h^2 分别为层 h 内的单元数和方差; N 和 σ^2 分别为研究区整体的单元数和方差。其中 q 的取值为 $[0, 1]$,当 q 的取值越大,表明该因素对于森林面积变化的影响越大,反之越小。

基于 3 km×3 km 的格网,统计每个格网内的森林面积减少量、森林火灾面积、道路长度等信息,并提取海

拔、坡度、坡向等其他环境因子,最后将环境因子离散化并利用地理探测器模型进行运算。

2 结果

2.1 森林面积变化的时间特征

如图 3 所示,在 2001—2019 年间,滇金丝猴分布区累计森林面积变化为 $3.81\times10^4\text{ hm}^2$,平均每年减少量约 2000 hm^2 。森林面积变化的年际波动较大,在 2016 年森林面积变化最大为 4424 hm^2 ,在 2018 年最小为 279 hm^2 。其中在 2006 年、2009 年、2016 年等年份森林面积变化均达到了 4000 hm^2 ,森林面积变化较为严重。而在 2001 年、2003 年、2018 年森林面积变化低于 500 hm^2 ,森林面积变化相对缓和。

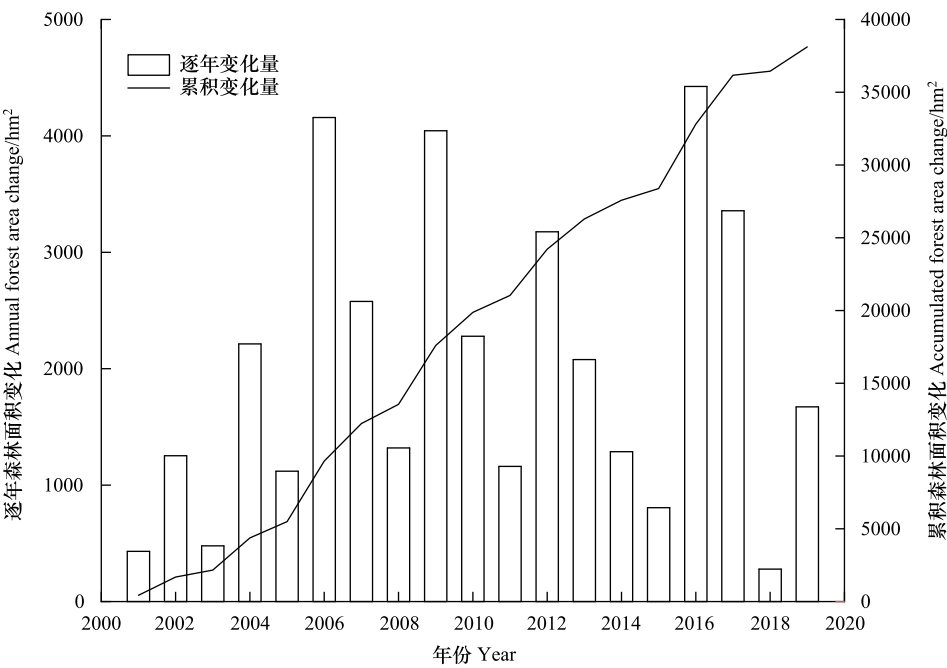


图 3 森林面积变化的时间特征
Fig.3 Temporal characteristics of forest area change

其中,5 个保护地与滇金丝猴分布区森林面积变化间的关系如表 2 所示,近 20 年间,整个滇金丝猴分布区森林面积变化比例为 2.44%,保护地外森林面积变化比例为 2.7%。其中,丽江老君山风景区和云岭保护区森林面积变化比例达到了 3.7%和 3.5%,高于研究区平均水平。而白马雪山保护区、芒康保护区和云龙天池保护区森林面积变化比例分别为 0.51%、0.31%、0.83%,森林面积变化比例相对较小。

表 2 滇金丝猴分布区与保护地森林面积变化特征
Table 2 Characteristics of forest area change in the distribution area of YSM and protected areas

名称 Name	成立年份 Year	2000 年森林面积 Forest area in 2000/hm ²	森林面积变化总量 Total forest area change /hm ²	森林面积变化比例 The proportion of forest area change/%
老君山风景区 Laojunshan Scenic Spot	—	79508	2913	3.7
云岭保护区 Yunling Nature Reserve	2003	41227	1446	3.5
白马雪山保护区 Baimaxueshan Nature Reserve	1983	158367	812	0.51
芒康保护区 Mangkang Nature Reserve	1992	63418	198	0.31
云龙天池保护区 Yunlongtianchi Nature Reserve	1983	10487	87	0.83
滇金丝猴分布区 Distribution Area of Yunnan snub-nosed monkey	—	1561588	38116	2.44
保护地外 Outside the protected areas	—	1208581	32660	2.7

森林面积变化比例=2001—2019 年森林面积变化总量/2000 年森林面积

近 20 年间五个保护地的森林面积变化特征如图 4 所示,森林面积变化总量达 5456 hm^2 ,约占整个滇金丝猴分布区森林面积变化总量的 14.3%。其中森林面积变化总量最大的保护地为老君山风景区,森林面积变化达 2913 hm^2 ,约占 5 个保护地总量的 53.3%,其中老君山风景区在 2016、2017 年森林面积变化量分别为 882 hm^2 、1173 hm^2 ,2016—2017 年森林面积变化总量达 2055 hm^2 ,约占老君山风景区近 20 年森林面积变化的 70%;其次是云岭保护区,森林面积变化总量为 1446 hm^2 ,约占 5 个保护地总量的 26.5%;另外 3 个保护地约占 5 个保护地总量的 20%,森林面积变化量相对较少,且年际波动不大,其中白马雪山保护区为 812 hm^2 ,芒康保护区为 198 hm^2 ,云龙天池保护区为 87 hm^2 。

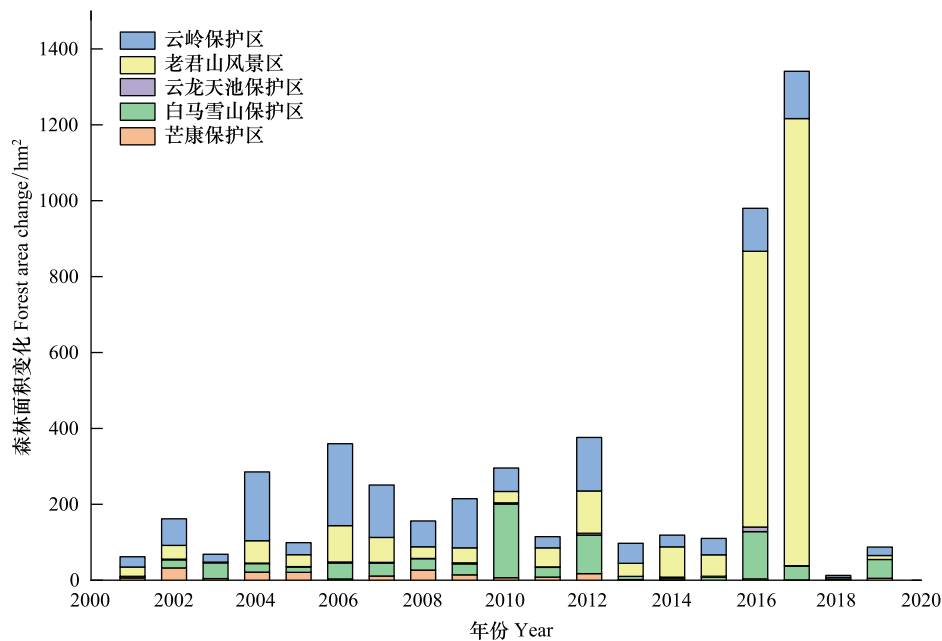


图 4 2001—2019 年保护地森林面积变化

Fig.4 Forest area change in protected areas from 2001 to 2019

2.2 森林面积变化的空间特征

首先,利用 Sen 趋势分析对研究区森林面积减少的变化趋势进行分析。如图 5 所示,近 20 年间研究区森林面积减少有 4.7% 的区域呈现上升趋势($\beta > 0$),10.9% 的区域呈现下降趋势($\beta < 0$)。森林面积减少变化趋势值介于 -0.09 — $0.52 \text{ hm}^2/\text{a}$ 之间,平均增长速率为 $-0.0018 \text{ hm}^2/\text{a}$,即整体森林面积减少呈现下降的趋势,表明研究区森林面积减少整体呈现不断缓和的特征。

进一步利用 MK 检验对研究区森林面积减少的变化趋势进行显著性检验。如图 5 和表 3 所示,约 10% 的区域呈现显著变化,其中,森林面积减少呈现显著增加趋势的区域面积为 $1.03 \times 10^5 \text{ hm}^2$,占整个研究区的 2.9%,显著增加区域主要集中分布于玉龙县内金沙江沿岸和老君山风景区南部,兰坪县云岭保护区周边以及云龙县的中东部和西南部;森林面积减少呈现显著减少趋势的区域面积为 $3.05 \times 10^5 \text{ hm}^2$,占整个研究区的 7.9%,显著减少区域主要集中在芒康保护区东北部和云岭保护区的东北部和南部,并在芒康县宗西乡周边和维西县内有较大面积呈显著减少趋势;其中研究区内 89.2% 的区域未通过显著性检验,因此森林面积的变化特征不显著。

如图 6 所示,在 2001—2019 年间,滇金丝猴分布区森林面积变化均无冷点分布。不同年份各热点类型的数量和空间分布也存在差异,但存在三个主要的热点聚集区,包括玉龙县东部、以及维西县、兰坪县和玉龙县三县的交界处、云龙天池保护区周边区域(图 6)。如图 7 所示,进一步对各年份的较热点区、热点区、极热点区所占 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ 格网数进行统计,滇金丝猴分布区极热点区数量最大,年均 105 个格网;热点区年均 35 个

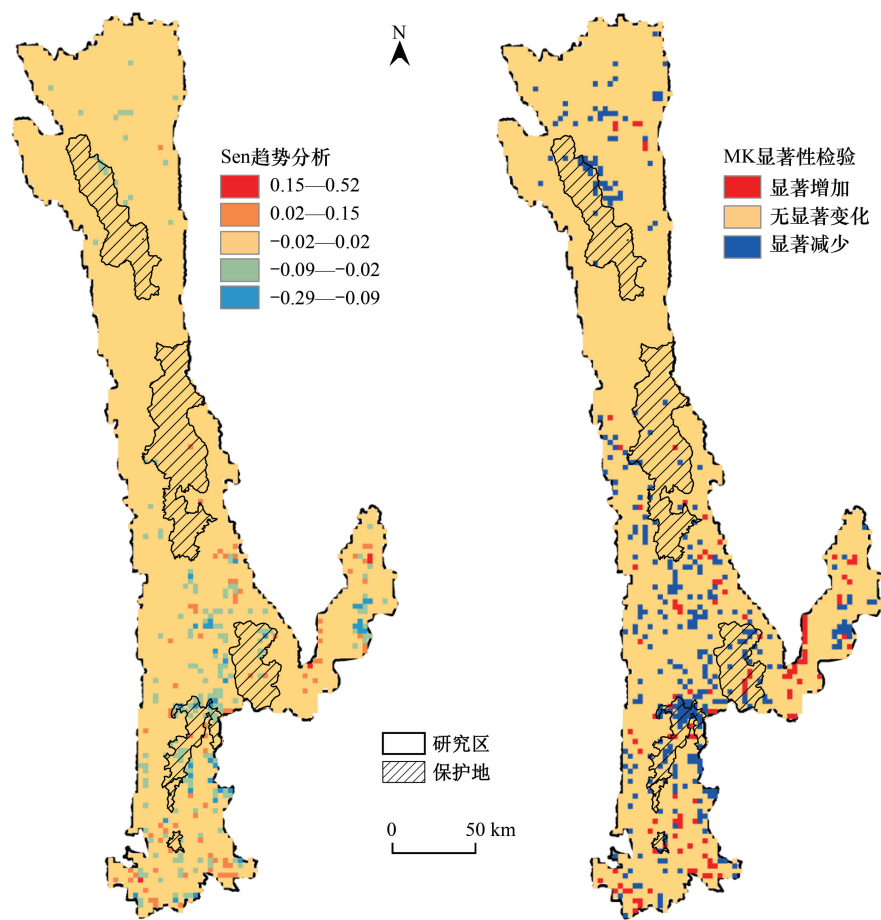


图 5 森林面积减少的变化趋势与显著性检验

Fig.5 Variation trend of forest area decrease and its significance test

格网;较热点区数量则相对较小,年均 25 个格网。同时研究区中极热点区、热点区、较热点区数量均呈下降趋势,其中极热点区数量下降速率最大,进一步表明研究区森林面积变化趋于缓和。

表 3 研究区森林面积减少的变化趋势特征

Table 3 Variation trend characteristics of forest area decrease in the study area

Sen 趋势(β) Sen's trend(β)	MK 检验(Z) MK test(Z)	变化类型 Change type	面积 Area/hm ²	面积占比 The proportion of area
$\beta > 0$	$Z > 1.64$	显著增加	102780	2.9%
$\beta \in [-0.091, 0.525]$	$-1.64 \leq Z \leq 1.64$	无显著变化	3447431	89.2%
$\beta < 0$	$Z < -1.64$	显著减少	304962	7.9%

2.3 不同海拔和坡度的森林面积变化

由于研究区海拔差异显著,本研究进一步探究了森林面积变化在海拔与坡度上的变化趋势与分异特征。如图 8 所示,森林面积变化呈现由高海拔向低海拔转移的趋势,由 2001 年的平均 3234 m 到 2019 年的平均 2755 m,森林面积变化的平均海拔降低了约 500 m;森林面积变化呈现由低坡度向高坡度转移的趋势,由 2001 年的 21.9°增加到 2019 年的 25°,森林面积变化的坡度增加了约 3°。因此,滇金丝猴分布区森林面积变化整体呈现由高海拔向低海拔、由低坡度向高坡度转移的特征。

2.4 森林面积变化的影响因素

利用地理探测器模型,得到各环境因子对森林面积变化的影响程度如表 4 所示,其中,过火面积、人口密

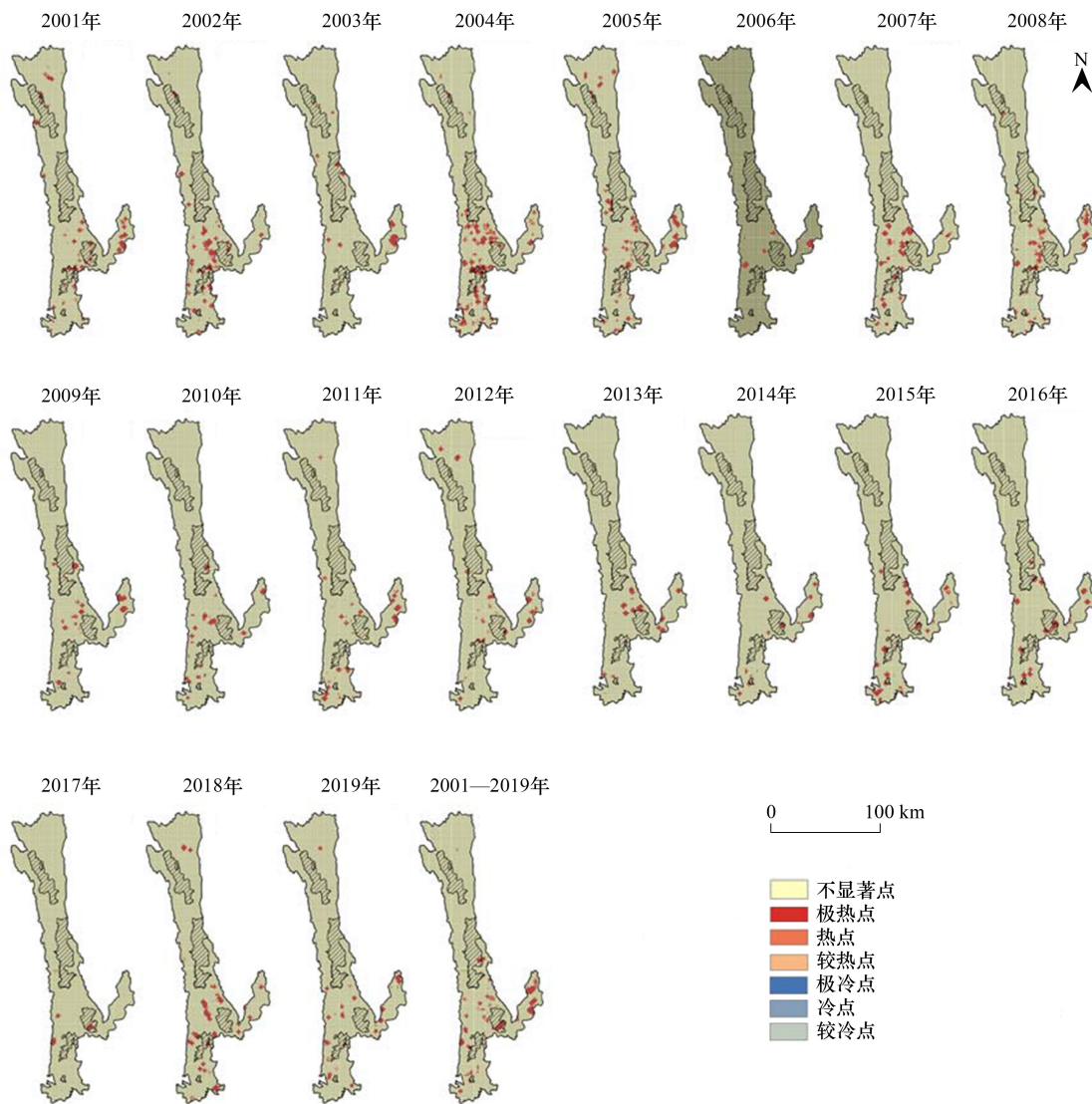


图 6 2001—2019 年森林面积变化的冷热点分布

Fig.6 Distribution of cold and hot spots of forest area change from 2001 to 2019

度的 q 值最大,分别为 0.1835 和 0.0736,是森林面积变化的主要影响因素;年平均降水、海拔、年平均气温的 q 值在 0.03—0.046 之间,是森林面积变化的次要影响因素;而土地利用、道路密度、坡度、坡向的 q 值均小于 0.03,对该地区的森林面积变化影响较小。

表 4 森林面积变化的影响因子

Table 4 The impact factors of forest area change

影响因素 Influence factor	q	影响因素 Influence factor	q
过火面积 Burned area	0.1835 **	土地利用 Land use	0.0179 **
人口密度 Population density	0.0736 **	道路密度 Road density	0.0078 **
年平均降水 Annual average precipitation	0.0456 **	坡度 Slope	0.0024 **
海拔 Elevation	0.041 **	坡向 Aspect	0.0016
年平均气温 Annual average temperature	0.0394 **		

* * 表示在 5% 的水平上显著

将 2001—2019 年逐年对应年份的过火面积与森林面积变化进行叠加,重叠区域可表征由森林火灾面积

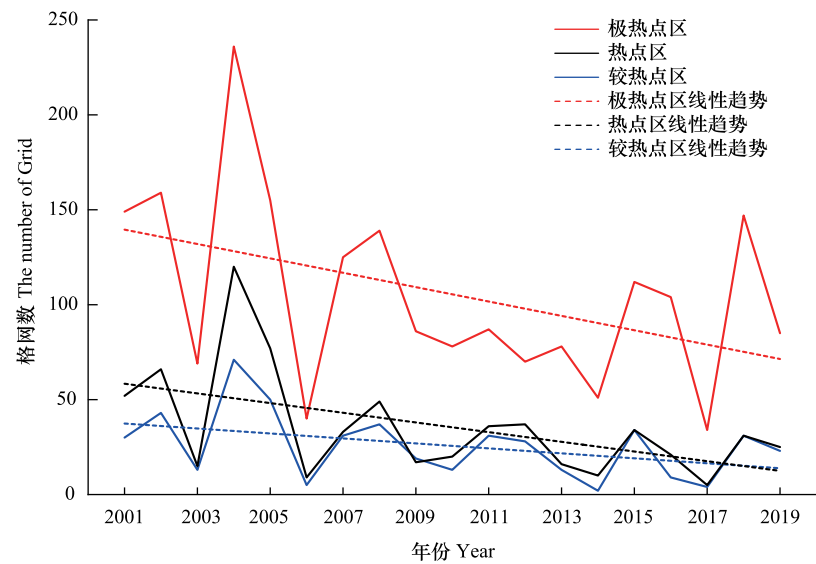


图 7 2001—2019 年不同热点区类型所占格网数
Fig.7 Grid number of different hotspot types from 2001 to 2019

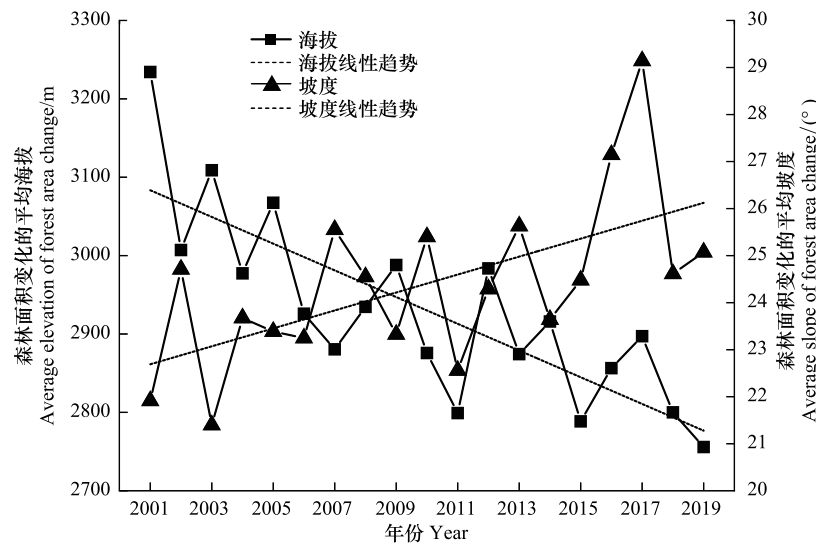


图 8 森林面积变化在海拔与坡度上的时间特征
Fig.8 Temporal characteristics of forest area change in elevation and slope

导致的森林面积变化,分别对 5 个保护地内、保护地外、整个滇金丝猴分布区逐年进行统计,由森林火灾导致的森林面积变化所占比例如图 9 所示,得知森林火灾导致的森林面积变化占比波动较大,保护地在 2017 年占比达 80%,而保护地在部分年份不存在由森林火灾导致的森林面积变化。但整体而言,保护地内外和整个研究区在多个年份由森林火灾导致的森林面积变化均大于 30%,森林火灾对当地的森林面积变化具有较大的影响。

3 讨论

由于研究区生态环境脆弱,森林资源一旦遭到破坏,恢复难度大且具有时滞性。并且通过 GFC 数据集中的森林面积增加量得到研究区森林面积增加量约为 1822 hm²,仅为森林面积减少量的 4.7%,因此,本文主要

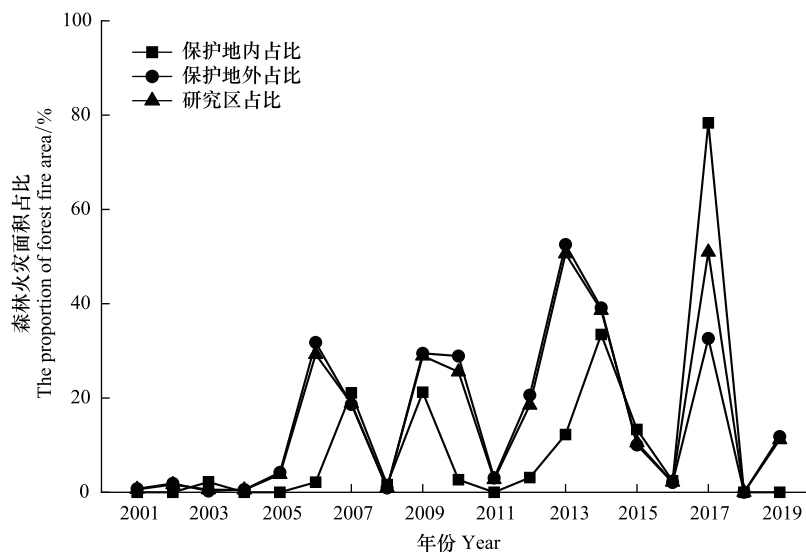


图9 森林火灾导致的森林面积变化占比

Fig.9 The proportion of forest area change caused by forest fires

森林火灾面积占比 = 森林火灾面积 / 对应区域森林面积变化总量

关注了森林面积减少问题。另外,在天然林等保护政策的背景下,森林面积变化空间分布较为零散,且多以较小的斑块构成(图2),利用中低空间分辨率影像难以准确识别森林面积减少,未来需要加强应用高分遥感影像对于滇金丝猴分布区森林生态系统的监测。

3.1 多因素驱动森林面积变化

森林面积变化呈现从高海拔向低海拔转移的特征。首先,这可能是由于高海拔地区人口密度有所降低。一方面,随着脱贫攻坚等政策的实施推进,滇金丝猴分布区开展了较大规模的易地扶贫搬迁,如将高海拔偏远不适宜居住地区的居民安置到县城等低海拔地区;另一方面,随着经济发展,高海拔地区居民也会倾向于到低海拔地区就业生活,均会降低居民对高海拔地区森林生态系统的依赖。其次,保护区大多主要位于海拔相对较高的地区,随着保护力度的加大,也会抑制高海拔地区的森林面积变化。

森林面积变化与森林火灾面积密切相关。一些研究认为农田扩张、道路建设等人类活动要素是森林面积变化的主要驱动力^[37—38]。也有研究认为同时海拔、坡度是指示人类活动可达性的指标,也会影响森林面积变化^[39—40]。本研究结果表明在滇金丝猴分布区,相较于道路长度、土地利用以及海拔、坡度等影响因素,过火面积尤其是森林火灾对森林面积变化的影响更大。这是由于西南地区是我国森林火灾的高发区域^[41],在滇金丝猴分布区内分布着大面积的云南松林(*Pinus yunnanensis*),而云南松林的枯死枝条极易燃烧^[42—43],从而容易引发森林火灾造成森林面积变化。其中老君山风景区2017年森林面积变化达到1173 hm²,约占当年五个保护地森林面积变化的88%(图4),这是由于2017年老君山风景区内的利苴村附近发生了较大面积的森林火灾,其中2017年风景区内过火面积与森林面积变化的重叠区域约为980 hm²,表明森林火灾面积达980 hm²,约占老君山风景区当年森林面积变化的83.5%,从而促使老君山风景区森林面积变化总量较大。

研究区森林面积变化整体呈现缓和的趋势。首先,自然保护区在抑制森林面积变化方面起着积极作用^[40, 44],并且自然保护区级别越高,抑制森林面积变化的作用越大。其中芒康保护区、白马雪山保护区和云龙天池三个国家级保护区森林面积近20年间森林面积变化比例均低于1%,森林面积减少显著改善的区域在芒康保护区和云岭保护区的东北部较为集中。以森林面积减少热点区较为密集的云岭保护区为例(图6),该保护区森林面积减少所占比例达3.5%,自2003年保护区成立以来,该保护区内森林面积减少整体不断降低,并且在该保护区东北部森林面积减少呈现显著减少的趋势(图5)。其次,森林面积变化的极热点区、热点区、

较热点区数量和面积均呈不断减少的趋势,表明该地区森林面积变化较大的区域空间集聚不断降低,森林面积变化整体趋于缓和。最后,尽管一些地区森林面积减少仍呈现显著增加的趋势,但主要集中在研究区南部地区如玉龙县内金沙江沿岸和老君山风景区南部、云岭保护区周边以及云龙县的中东部和西南部,可能是由于这些地区森林火灾频发、经济发展程度较高、人口密集、城镇扩张等因素导致^[5]。

3.2 森林面积变化存在潜在影响

首先,滇金丝猴分布区森林面积减少主要集中于保护区外及其周边区域,而保护区外森林面积减少会加剧保护地外森林生态系统的破碎化,并使得各保护地相对孤立,导致滇金丝猴生境连通性遭到破坏,进而阻碍滇金丝猴种群在不同保护地间的活动和基因交流^[8],会降低滇金丝猴种群质量并威胁其可持续发展。其次,由于森林面积减少呈现由低坡度区域向高坡度区域转移的趋势,而较高坡度的森林面积减少容易引起滑坡、泥石流等次生灾害,从而对当地居民生命安全和经济生产造成威胁^[6, 16]。

4 结论

在多因素的驱动下,自然保护地内外均存在森林面积变化,同时会带来诸多的潜在影响。本研究以滇金丝猴分布区为研究区域,研究了近 20 年森林面积变化的时空动态及影响因素,主要结论如下:(1)滇金丝猴分布区森林面积变化总量约为 $3.81 \times 10^4 \text{ hm}^2$,5 个保护地森林面积变化总量约占研究区森林面积变化总量的 14.3%,其中,丽江老君山风景区和云岭保护区变化比例较高;(2)研究区森林面积变化整体趋于缓和。从水平梯度上看,森林面积变化的热点区域面积不断下降并呈向研究区南部转移的趋势,垂直梯度上,森林面积变化呈现向低海拔、高坡度区域转移的趋势;(3)过火面积和人口密度是导致森林面积变化的主要因素,其次是降水、海拔、气温,森林火灾对当地森林面积变化影响较大。研究结果揭示了滇金丝猴分布区森林生态系统时空变化特征及其影响因素,为滇金丝猴保护与森林生态系统管理提供了重要支撑。

参考文献(References):

- [1] 赵同谦, 欧阳志云, 郑华, 王效科, 苗鸿. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价. 自然资源学报, 2004, 19(4): 480-491.
- [2] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. Nature Sustainability, 2019, 2(2): 122-129.
- [3] Liang L Z, Chen F, Shi L, Niu S K. NDVI-derived forest area change and its driving factors in China. PLoS One, 2018, 13(10): e0205885.
- [4] Yu J, Li F T, Wang Y, Lin Y, Peng Z W, Cheng K. Spatiotemporal evolution of tropical forest degradation and its impact on ecological sensitivity: a case study in Jinghong, Xishuangbanna, China. Science of the Total Environment, 2020, 727: 138678.
- [5] 郑朝菊, 曾源, 赵玉金, 高文文, 赵旦, 吴炳方. 20 世纪 90 年代以来中国西南地区土地覆被变化. 生态学报, 2016, 36(23): 7858-7869.
- [6] Xiong B, Chen R S, Xia Z L, Ye C, Anker Y. Large-scale deforestation of mountainous areas during the 21st Century in Zhejiang Province. Land Degradation & Development, 2020, 31(14): 1761-1774.
- [7] Zhao X M, Ren B P, Li D Y, Garber P A, Zhu P F, Xiang Z F, Grueter C C, Liu Z J, Li M. Climate change, grazing, and collecting accelerate habitat contraction in an endangered primate. Biological Conservation, 2019, 231: 88-97.
- [8] Su X K, Han W Y, Liu G H. Potential priority areas and protection network for Yunnan snub-nosed monkey (*Rhinopithecus bieti*) in Southwest China. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(7): 1211-1227.
- [9] 任宝平, 黎大勇, 刘志瑾, 李明. 滇金丝猴数量分布变迁、家域、食性研究进展及保护现状. 动物学杂志, 2016, 51(1): 148-150.
- [10] Xia W C, Zhang C, Zhuang H F, Ren B P, Zhou J, Shen J, Krzton A, Luan X F, Li D Y. The potential distribution and disappearing of Yunnan snub-nosed monkey: influences of habitat fragmentation. Global Ecology and Conservation, 2020, 21: e00835.
- [11] Zhao X M, Ren B P, Li D Y, Xiang Z F, Garber P A, Li M. Effects of habitat fragmentation and human disturbance on the population dynamics of the Yunnan snub-nosed monkey from 1994 to 2016. PeerJ, 2019, 7: e6633.
- [12] Hansen M C, Potapov P V, Moore R, Hancher M, Turubanova S A, Tyukavina A, Thau D, Stehman S V, Goetz S J, Loveland T R, Kommareddy A, Egorov A, Chini L, Justice C O, Townshend J R G. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. Science, 2013, 342(6160): 850-853.
- [13] Anaya J A, Gutierrez-Vélez V H, Pacheco-Pascagaza A M, Palomino-Ángel S, Han N, Balzter H. Drivers of Forest loss in a megadiverse hotspot

- on the pacific coast of colombia. *Remote Sensing*, 2020, 12(8): 1235.
- [14] 赵佩, 陈琼, 刘林山, 刘峰贵, 周强. 柯西河流域森林覆盖度的空间分布及变化分析. *生态科学*, 2020, 39(4): 89-98.
- [15] 王昊, 吕植, 顾垒, 闻丞. 基于 Global Forest Watch 观察 2000—2013 年间中国森林变化. *生物多样性*, 2015, 23(5): 575-582.
- [16] Zeng Z Z, Gower D B, Wood E F. Accelerating forest loss in Southeast Asian Massif in the 21st century: a case study in Nan Province, Thailand. *Global Change Biology*, 2018, 24(10): 4682-4695.
- [17] Montibeller B, Kmoch A, Virro H, Mander Ü, Uuemaa E. Increasing fragmentation of forest cover in Brazil's Legal Amazon from 2001 to 2017. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 5803.
- [18] Galiatsatos N, Donoghue D N M, Watt P, Bholanath P, Pickering J, Hansen M C, Mahmood A R J. An assessment of global forest change datasets for national forest monitoring and reporting. *Remote Sensing*, 2020, 12(11): 1790.
- [19] Wu Z W, Yan S J, He L, Shan Y L. Spatiotemporal changes in forest loss and its linkage to burned areas in China. *Journal of Forestry Research*, 2020, 31(6): 2525-2536.
- [20] 王治国, 白永平, 车磊, 陈志杰, 乔富伟. 关中平原城市群植被覆盖的时空特征与影响因素. *干旱区地理*, 2020, 43(4): 1041-1050.
- [21] 柳冬青, 张金茜, 李红瑛, 曹二佳, 巩杰. 基于地理探测器的流域土壤磷流失影响因素分析. *环境科学学报*, 2018, 38(12): 4814-4822.
- [22] 李珊珊, 李阳兵, 王萌萌, 罗光杰. 基于微空间单元的岩溶峡谷区土地利用结构演变. *自然资源学报*, 2020, 35(4): 908-924.
- [23] 郭椿阳, 高尚, 周伯燕, 高建华. 基于格网的伏牛山区土地利用变化对生态服务价值影响研究. *生态学报*, 2019, 39(10): 3482-3493.
- [24] 陶帅, 邝婷婷, 彭文甫, 王广杰. 2000—2015 年长江上游 NDVI 时空变化及驱动力——以宜宾市为例. *生态学报*, 2020, 40(14): 5029-5043.
- [25] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 刘颖慧, 王文杰, 陶亮亮, 郑华, 刘孝富. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化. *生态学报*, 2013, 33(24): 7798-7806.
- [26] 康雄, 曹俊涛, 陈成, 杨杰, 王建雄. 不同趋势法的宁夏长时序植被变化分析. *测绘通报*, 2020, (11): 23-27.
- [27] 张莉, 陈芸芝, 汪小钦. 基于时序 MODIS NDVI 数据的长汀县植被趋势特征研究. *福州大学学报: 自然科学版*, 2016, 44(5): 661-667.
- [28] 田义超, 黄远林, 张强, 陶进, 张亚丽, 黄鹄, 周国清. 北部湾南流江流域植被净初级生产力时空分布及其驱动因素. *生态学报*, 2019, 39(21): 8156-8171.
- [29] 陈华, 郭生练, 郭海晋, 徐高洪, 徐德龙. 汉江流域 1951—2003 年降水气温时空变化趋势分析. *长江流域资源与环境*, 2006, 15(3): 340-345.
- [30] 陆文秀, 刘丙军, 陈俊凡, 陈晓宏. 近 50a 来珠江流域降水变化趋势分析. *自然资源学报*, 2014, 29(1): 80-90.
- [31] 袁瑞强, 青松. 2002—2015 年黄河流域 NDVI 对陆地水储量的响应. *灌溉排水学报*, 2020, 39(10): 115-122.
- [32] 孔雪松, 朱芷晴, 刘殿锋. 江苏省乡村聚落演化的多尺度特征与空间关联性分析. *农业工程学报*, 2020, 36(12): 247-256.
- [33] 李丹, 梅晓丹, 张玉娟, 王帅, 王家凯. 绥芬河市土地利用变化的时空格局研究. *测绘科学*, 2019, 44(3): 78-85.
- [34] 姚可桢, 岳书平. 网络大数据下的中国现代食甜习惯空间分布特征及其影响因素研究. *地球信息科学学报*, 2020, 22(6): 1202-1215.
- [35] Wang J F, Li X H, Christakos G, Liao Y L, Zhang T, Gu X, Zheng X Y. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107-127.
- [36] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [37] Reddy C S, Jha C S, Dadhwal V K, Krishna P H, Pasha S V, Satish K V, Dutta K, Saranya K R L, Rakesh F, Rajashekar G, Diwakar P G. Quantification and monitoring of deforestation in India over eight decades (1930-2013). *Biodiversity and Conservation*, 2016, 25(1): 93-116.
- [38] Reddy C S, Dutta K, Jha C S. Analysing the gross and net deforestation rates in India. *Current Science*, 2013, 105(11): 1492-1500.
- [39] Kanade R, John R. Topographical influence on recent deforestation and degradation in the Sikkim Himalaya in India; Implications for conservation of East Himalayan broadleaf forest. *Applied Geography*, 2018, 92: 85-93.
- [40] Gu C J, Zhao P, Chen Q, Li S C, Li L H, Liu L S, Zhang Y L. Forest cover change and the effectiveness of protected areas in the himalaya since 1998. *Sustainability*, 2020, 12(15): 6123.
- [41] 苏立娟, 何友均, 陈绍志. 1950—2010 年中国森林火灾时空特征及风险分析. *林业科学*, 2015, 51(1): 88-96.
- [42] 王秋华, 舒立福, 李世友. 云南主要针叶林可燃物类型划分及特征. *林业资源管理*, 2011, (2): 48-53.
- [43] 徐伟恒, 黄邵东, 杨磊, 徐盛基, 戴杨, 王秋华. 滇东北地区云南松地表可燃物载量及火强度研究. *西部林业科学*, 2019, 48(4): 19-26.
- [44] Yu B W, Chao X L, Zhang J D, Xu W H, Ouyang Z Y. Effectiveness of nature reserves for natural forests protection in tropical Hainan: a 20 year analysis. *Chinese Geographical Science*, 2016, 26(2): 208-215.