

DOI: 10.5846/stxb202010112587

吴得卿, 魏建华, 樊辉. 南滚河流域土地利用变化对亚洲象生境的影响. 生态学报, 2021, 41(16): 6476-6485.

Wu D Q, Wei J H, Fan H. Impacts of land use changes on the habitat of Asian elephants in the Nangun River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16): 6476-6485.

南滚河流域土地利用变化对亚洲象生境的影响

吴得卿^{1,2}, 魏建华^{1,3}, 樊 辉^{1,*}

1 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650091

2 六盘水师范学院旅游与历史文化学院, 六盘水 553001

3 中国市政工程华北设计研究总院有限公司 北京分公司, 北京 100044

摘要: 土地利用变化对亚洲象生境影响显著, 明晰其影响机制是有效保护亚洲象的前提。为探明土地利用变化对亚洲象生境影响的时空过程及机制, 以亚洲象残存的中-缅跨境流域—南滚河流域为例, 在 1988 和 2018 年两期 Landsat 土地利用/土地覆被遥感分类图的基础上, 采用 LandTrendr 算法检测 30 年间流域土地利用变化引起的天然林扰动, 结合生态位因子分析 (ENFA) 模型评定的亚洲象生境适宜性分布, 探究以天然林扰动为主的土地利用变化对亚洲象生境的影响。结果表明: (1) 1988—2018 年间, 南滚河流域土地利用变化主要为天然林转化为其他地类, 且天然林扰动强度在中、缅境内差异明显; (2) 以橡胶种植扩张导致毁林为主的土地利用变化造成南滚河流域亚洲象生境萎缩, 生境斑块间连通性降低, 破碎化程度较高; (3) 该流域亚洲象生境丧失过程表现为由边缘向内部逐渐被蚕食, 适宜生境最终被分割为上、下游两个相互孤立的子区域。因此, 抑制以橡胶林为主的热作种植扩张, 恢复上、下游生境连通性, 建立流域尺度的跨境保护区, 是实现南滚河流域亚洲象种群保护和缓解人象冲突的重要途径。

关键词: 亚洲象; 土地利用变化; 生境评价; LandTrendr 算法; 跨境流域

Impacts of land use changes on the habitat of Asian elephants in the Nangun River Basin

WU Deqing^{1,2}, WEI Jianhua^{1,3}, FAN Hui^{1,*}

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

2 School of Tourism and History and Culture, Liupanshui Normal University, Liupanshui 553001, China

3 Beijing Branch, North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100044, China

Abstract: Land use change exerts a significant effect on the Asian elephant's habitat, and understanding the impact mechanism is a prerequisite for effective protection for this endangered species. To explore the spatiotemporal processes and mechanisms of land use changes and their impacts on the Asian elephant's habitat, LandTrendr algorithm was used to detect annual natural forest disturbances in Nangun River Basin, a China-Myanmar cross border region, based on Landsat time-series images for 1988 to 2018 together with land use/land cover classification maps of 1988 and 2018. The Ecological Niche Factor Analysis (ENFA) model was employed to evaluate the habitat suitability of the Nangun River Basin for Asian elephants. The results show that (1) from 1988 to 2018, land use changes were mainly characterized by rubber plantation expansion and severe natural forest loss, and the areas of disturbed forest differed greatly between China and Myanmar. (2) Drastic deforestation resulted from remarkable rubber plantation expansion led to the area loss, and the decline of connectivity of the Asian elephant's habitat. (3) The Asian elephant's habitat in the basin was gradually encroached from

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41971239, 41461017); 第二次青藏高原综合科学考察研究 (2019QZKK0402)

收稿日期: 2020-10-11; 网络出版日期: 2021-05-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fanhui@ynu.edu.cn

the edge to the interior so that the upstream and downstream suitable habitats were isolated because of severe deforestation in the cross-border regions between China and Myanmar. Thus, reversing the expansion of tropical cash crops like rubber trees, to restore the habitat connectivity between China and Myanmar through establishing a cross-border basin-wide natural reserve is a critical path to protect Asian elephant and to mitigate human-elephant conflict.

Key Words: Asian elephants; land use change; habitat assessment; LandTrendr algorithm; cross-border river basin

亚洲象 (*Elephas maximus*) 是世界重要濒危物种之一,为国家 I 级保护野生动物,主要分布于云南西双版纳州、普洱市和临沧市等地^[1-4],现存种群数量 300 余头^[4-6]。亚洲象数量减少的主要原因是其生境的丧失和退化^[1]。因土地利用活动加剧,尤其是近 30 年来全球橡胶需求驱动下橡胶林扩张导致天然林面积减少^[7-8],严重威胁着区域生态环境及生物多样性^[9]。亚洲象生境与天然林分布高度叠合^[2, 10],天然林减少导致的生境丧失使其种群生存难以为继,人象冲突事件逐年攀升,保护亚洲象、缓解人象冲突已成为当务之急。现有亚洲象保护研究主要致力于种群数量调查^[5, 11-12]、生境评价与保护^[1-2, 13-15]以及人象冲突等^[16-18]。但较少从土地利用变化的角度揭示亚洲象生境的长期变化过程。

基于 Landsat 时序影像的遥感变化检测能诊断土地利用时序变化过程^[19],具有长时序及较高空间分辨率优势^[20-21],已逐渐成为一种主流的检测方法^[22]。生态位因子分析模型可根据亚洲象出现点的生态位特征预测亚洲象适宜生境范围^[23]。亚洲象近乎只生存在完整的天然林中^[24],天然林的时序变化动态能较好地反映亚洲象生境变化的时空过程^[25]。以中-缅边境的南滚河跨境流域为例,运用基于 LandTrendr 算法的时序变化检测法和生态位因子分析模型,揭示 1988—2018 年土地利用变化对亚洲象生境影响的时空过程,以期服务于跨境区域亚洲象生境保护、种群规模维持以及人象冲突缓解等。

1 研究区概况

南滚河流域位于东经 98°34′—99°12′,北纬 22°58′—23°22′(图 1),为中、缅跨境流域,海拔 413—2632 m,地形复杂多样;流域总面积 1666.67 km²,中、缅境内面积分别为 554.03 km²(占 33.24%)和 1112.64 km²(占 66.76%)。该流域属典型西南季风气候区,干湿季分明,雨季为 5—10 月,旱季为 11 月至次年 4 月,年均降水量 1700—2500 mm,年均气温 16—25 °C;动植物热带性质较为明显^[1, 26],生物多样性丰富。流域内主要土地利用类型包括六类:天然林、橡胶林、园地(茶园及核桃套种等)、耕地、建设用地以及水体(河流和水塘)。

南滚河流域中国境内亚洲象现仅存 12 头^[27],主要栖息于海拔 1000 m 以下且坡度小于 15°的河谷地区^[1, 28]。20 世纪 80 年代以前,亚洲象常迁徙于中、缅两国之间觅食,但随着土地利用变化加剧,中-缅边境森林被破坏,导致亚洲象栖息地破碎化^[26, 28],近 30 年已无跨境种群交流^[27],形成极小种群,生存和繁衍受到严重威胁^[29]。

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

使用的数据包括:南滚河流域 1988—2018 年间 Landsat 逐年时序数据、地形数据、亚洲象出现点数据、1988 年和 2018 年两期土地利用/土地覆被遥感分类图等。Landsat 数据来源于 <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat>,采用 1988—2018 年间云量小于 10%的地表反射率 TM、ETM+和 OLI 影像,并预处理,构建每年旱季高质量像元影像时序栈,其中无云像元比例达 95%以上;地形数据来源于 <https://earthexplorer.usgs.gov/>的航天雷达地形测绘任务的数字高程模型(SRTM DEM),空间分辨率为 30 m;亚洲象出现点数据主要包括 2018 年的野外调查样线和冯利民等^[26]的样线调查数据及亚洲象活动范围图,并参考郎学东等^[30]提供的亚洲象活动痕迹样点、Bohnett 等^[31]提供的红外相机监测数据、陈明勇团队^[32]提供的无人机监

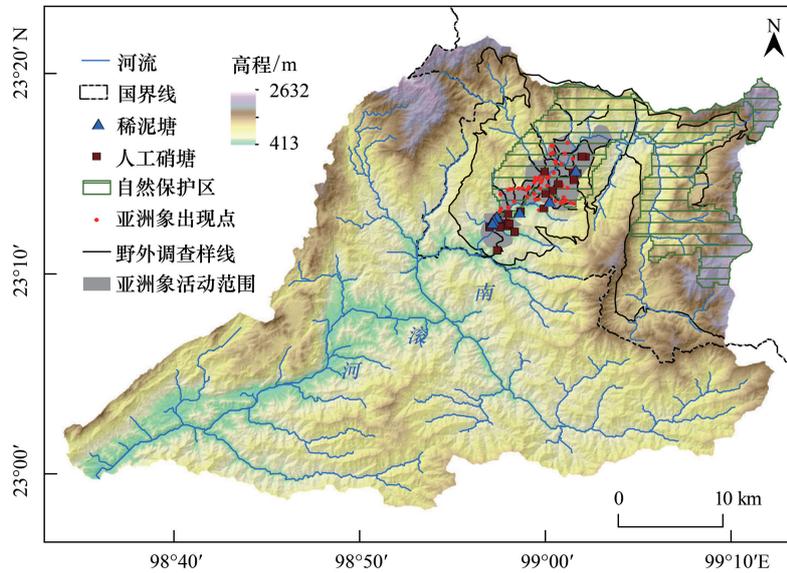


图1 研究区位置及地形、野外调查样线和亚洲象活动范围

Fig.1 The location and topography, and transect of field survey and Asian elephants' home range

国界线和省界线来源于全国地理信息资源目录服务系统 <https://www.webmap.cn/main.do?method=index>

测数据(图1);1988年和2018年的土地利用/覆被遥感分类大致流程如下:根据南滚河流域中国境内2018年土地利用现状调查,建立土地利用分类系统,结合Google Earth™高空间分辨率影像绘制2018年南滚河流域土地利用分类地面参照样本,并通过双时相影像差异变化检测,得到1988年南滚河流域土地利用分类地面参照样本,基于1988年2月Landsat 5 TM 1—5,7和2018年2月Landsat 8 OLI 2—7波段影像,采用随机森林分类器整合光谱、地形和纹理信息进行监督分类,分别得到1988和2018年该流域包括天然林、橡胶林、耕地、建设用地、园地和水体六类的土地利用/土地覆被遥感分类图^[33]。

2.2 研究方法

2.2.1 基于ENFA模型的生境评价

ENFA模型根据收集的亚洲象出现点及其所处的生态环境,对比其生态位与环境因子间的异同,计算2018年亚洲象的适宜生境范围^[23],其建模与分析在Biomapper 4.0(<https://www2.unil.ch/biomapper/>)中完成。基于南滚河流域2018年的土地利用/土地覆被图,获取生境评价所需的植被因子和干扰要素,根据该流域自然条件^[26, 28],结合已有研究筛选出的对亚洲象适宜生境贡献率较高的因子^[1, 14, 25],选取了12个生态地理变量(EGVs)作为模型输入(表1),并计算其边际值 M 、特异值 S 和耐受值 T 以描述亚洲象生态位特征^[23, 33]。其中, M 值为EGV在整个南滚河流域与该流域内亚洲象分布区的差异,值越大,则亚洲象对EGV的选择性越强; S 为流域内亚洲象对EGV的选择范围,值越大,其生态位的特化程度越高; T 为亚洲象对EGV的耐受性,值越小,则亚洲象对EGV的耐受性越低、生存范围越狭窄^[23]。与主成分分析类似,ENFA模型将所选取的12个EGVs变换为包含主要信息的边际因子和特异因子,并选取累计贡献率超过90%的因子计算生境适宜性指数(HSI)。ENFA模型采用Boyce Index的交叉验证方法评价其准确度,并根据Boyce Index曲线间断点将HSI划分为四个等级:最适生境、较适生境、边际生境和非生境^[14]。

由于1988年亚洲象出现点数据难以获取,因此据ENFA模型评价得到的2018年各类EGVs对亚洲象适宜生境的贡献率,假设亚洲象30年间对环境偏好不变,采用赋值累乘法,结合1988年土地利用/土地覆被图为EGV赋予相应权重,计算每个评价单元的亚洲象适宜性指数^[15],得到1988年的亚洲象适宜生境及其空间分布范围。

表 1 生态地理变量(EGVs)及其处理方式
Table 1 Ecological Geographical Variables (EGVs) and their processing methods

类型 Type	生态地理变量 Ecogeographical variables (EGVs)	处理方式 Process method
地理因子 Geographical factors	海拔/m	原值
	坡度/(°)	原值
	坡向	按方位进行重分类
	坡位	采用地形位置指数,将坡位分为:1—山脊、2—上坡位、3—中坡位、4—下坡位、5—山谷
	距山脊距离/m	欧式距离
	距山谷距离/m	欧氏距离
	距干流距离/m	欧氏距离
	距支流距离/m	欧氏距离
植被因子 Vegetation factors	森林频率	分区统计
	距经济林距离/m	欧式距离
干扰要素 Disturbing factors	距耕地距离/m	欧式距离
	距居民点距离/m	欧式距离

2.2.2 森林扰动时序变化检测

亚洲象几乎只生存在完整的天然林中^[24],天然林状态的变化则意味着其生境的适宜性发生改变。ARVI 能准确区分橡胶林与其它地类(含天然林)^[34],减小大气及地形对时序变化检测的影响,公式为:

$$ARVI = \frac{\rho_{NIR} - 2\rho_{Red} + \rho_{Blue}}{\rho_{NIR} + 2\rho_{Red} - \rho_{Blue}} \quad (1)$$

式中, ρ_{Blue} 、 ρ_{Red} 、 ρ_{NIR} 为 Landsat 影像中蓝、红、近红外波段的地表反射率。基于 1988 年土地利用/土地覆被图,将天然林设为时序变化检测的森林初始分布,用 LandTrendr 算法检测森林扰动时序变化,扰动阈值取 $\Delta ARVI = 0.32$ ^[7]。若某一像元的 ARVI 时序系列中其值年间变化大于 0.32 且保持低值不连续大于 3 年,则将其标记为扰动。

2.2.3 精度评价

采用 Kappa 系数和基于混淆矩阵的传统精度评价方法计算土地利用分类精度与森林扰动时序变化检测精度。Kappa 系数能客观评价检测结果的准确性^[35];基于混淆矩阵的传统精度评价方法的指标包括总体精度(OA)、制图精度(PA)、用户精度(UA)^[36]。其中,土地利用分类精度评价中所采用的参考地类为根据实地调查结合 Google Earth™ 高空间分辨率影像绘制所得,通过分层随机抽样法从 1988 年和 2018 年地面参照样本中分别抽取两个年份的验证样本;森林扰动时序变化检测的验证样本采用 TimeSync 方法绘制^[37],共获取 320 余个扰动样本,结合未扰动森林样本可对森林扰动时序变化检测结果进行逐年精度评价。

2.2.4 生境景观格局分析

采用斑块数(NP)、斑块密度(PD)、最大斑块指数(MPI)、平均斑块面积(AREA_MN)、斑块分维数(FRAC)、斑块连通度指数(CONNECT)等 6 个常用景观指数来分析亚洲象生境景观格局特征^[38],这些指标由 FRAGSTATS 3.3 (<https://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/>) 计算得出。其中,NP、MPI、PD、AREA_MN 值越小,则表示亚洲象生境退化越严重;FRAC 取值范围为[1,2],值越接近 1,表示人类活动对生境适宜性影响越大,反之则小;CONNECT 取值范围[0,1],0 表示生境间不存在生态连接、生境破碎化程度高,1 代表生境间处于完全连接状态。对比 1988 年到 2018 年亚洲象的生境景观格局指数,可得到 30 年间亚洲象的生境面积、受人类活动影响程度以及生境连通性等的变化情况。

3 研究结果

3.1 南滚河流域土地利用变化特征

南滚河流域 1988 年和 2018 年土地利用土地/覆被分类图的 OA、UA 和 PA 均在 90%以上(除 1988 年耕地

的 UA 为 87.27%)。从图 2 可知,1988 年到 2018 年,南滚河流域天然林面积急剧减少,主要向橡胶林转化,其次是转化为耕地、建设用地和园地。30 年间,天然林从 1495.45 km²减少到 1291.91 km²,年均减少 6.73 km²;橡胶林面积从 48.07 km²扩张到 194.09 km²,年均增长 4.87 km²。

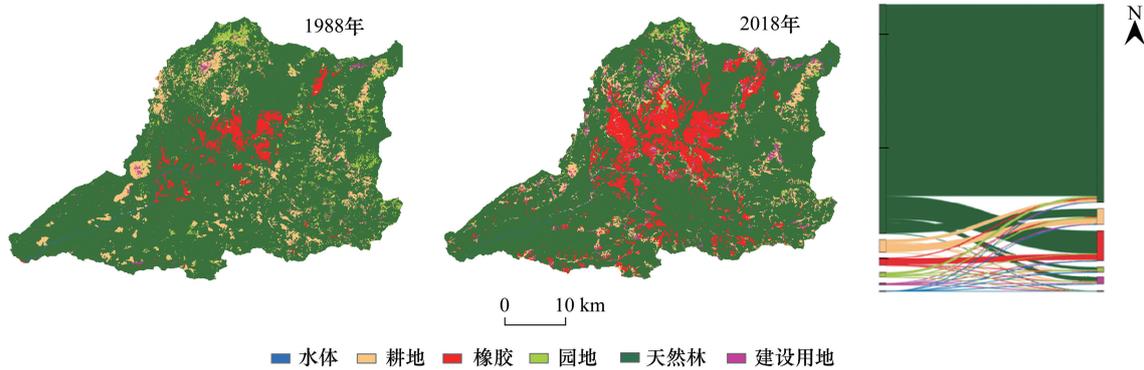


图 2 南滚河流域 1988 年和 2018 年土地利用/覆被分类图及其土地利用/覆被类型转移图

Fig.2 Land use/land cover classification map of 1988 and 2018, and land use/land cover conversion from 1988 to 2018 in Nangun River Basin

3.2 南滚河流域亚洲象生境格局

ENFA 模型中,前 4 个因子共解释了 91%的信息,可用于计算亚洲象生境适宜度,其中边际因子解释了 100%的边际性信息和 18.97%的特异性信息^[33](表 2)。表 2 表明亚洲象生境主要分布于海拔低、坡度小、水源与食物充足、远离经济林和居民点的河谷地区。亚洲象生态位边际值 $M = 1.691 > 1$,特异值 $S = 2.865$,耐受值 $T = 0.349$,表明其对生境的选择非随机、生境特化程度高,对环境有一定耐受性,但生境范围较窄,受环境制约较大。据交叉检验所得 $Boyce\ Index = 0.825 \pm 0.2021$,表明 ENFA 对亚洲象生境预测能力较强。根据 HSI 的自然裂点分级,亚洲象生境可分为最适生境 ($100 \geq HSI > 62$)、较适生境 ($62 \geq HSI > 37$)、边际生境 ($37 \geq HSI > 12$) 和非生境 ($12 \geq HSI > 0$) 4 个等级(图 3)。

表 2 生态地理变量得分矩阵

Table 2 The scoring matrix of Ecological Geographical Variables

生态地理变量 EGVs Ecological geographical variables	海拔 Elevation /m	坡度 Slope /(°)	坡位 Position	坡向 Aspect	距山脊 Distance to ridge /m	距山谷 Distance to valley /m	距支流 Distance to tributary /m	距干流 Distance to main stream/m	森林频率 Natural forest frequency /%	距居民点 Distance to settlement /m	距耕地 Distance to cropland /m	距经济林 Distance to economic forest/m
边际因子 Marginality factor(18.97%)	-0.324	-0.23	0.278	-0.002	0.151	-0.291	-0.138	-0.462	0.192	0.396	0.269	0.398
特异因子 1 Specialization factor 1(41.12%)	0.835	-0.01	0.106	0.008	-0.021	-0.041	-0.064	-0.288	0.375	0.011	-0.19	0.158
特异因子 2 Specialization factor 2(15.82%)	-0.581	0.048	-0.025	0.017	0.039	0.092	0.039	0.533	0.563	0.139	-0.158	-0.045
特异因子 3 Specialization factor 3(6.67%)	0.17	0.061	0.464	-0.004	0.405	0.387	-0.13	0.163	-0.26	0.029	-0.346	0.455

图 3 表明,1988 年和 2018 年亚洲象生境主要分布于河流两岸的河谷区,最适和较适生境面积较少,边际生境面积较大;最适生境相对集中,但其斑块面积较小且斑块间连通性低,生态位较窄。相较于 1988 年,

2018 年亚洲象生境范围变窄,上、下游流域段最适生境被完全分隔;较适生境和边际生境面积均大幅减少,分别减少 32.38 km²和 44.12 km²。

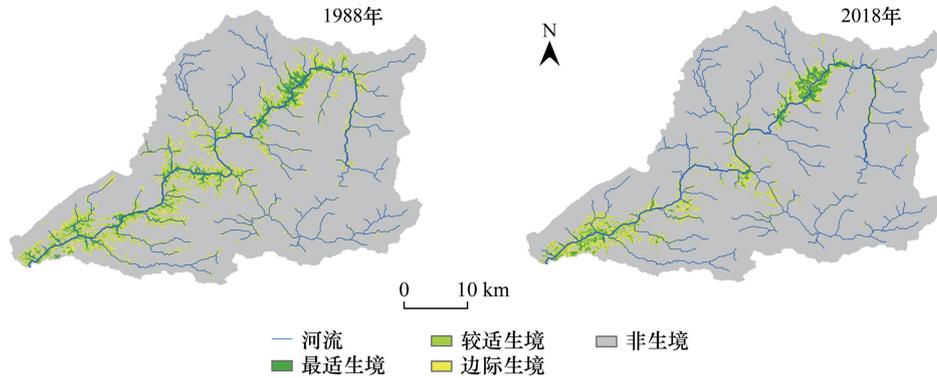


图 3 南滚河流域 1988 年和 2018 年亚洲象生境分布

Fig.3 The habitat distribution of Asian elephants in Nangun River Basin in 1988 and 2018

由图 4 可知,1988 年和 2018 年南滚河流域亚洲象 3 种生境类型的斑块数、斑块密度、斑块分维数和斑块连通度指数表现为边际生境>较适生境>最适生境,而平均斑块面积和最大斑块指数则为最适生境>较适生境>边际生境。与 1988 年相比,2018 年亚洲象各类生境的 6 个常用景观指数均有所下降,其中最适生境的最大斑块指数从 0.60 降至 0.29,降幅达 48.33%。

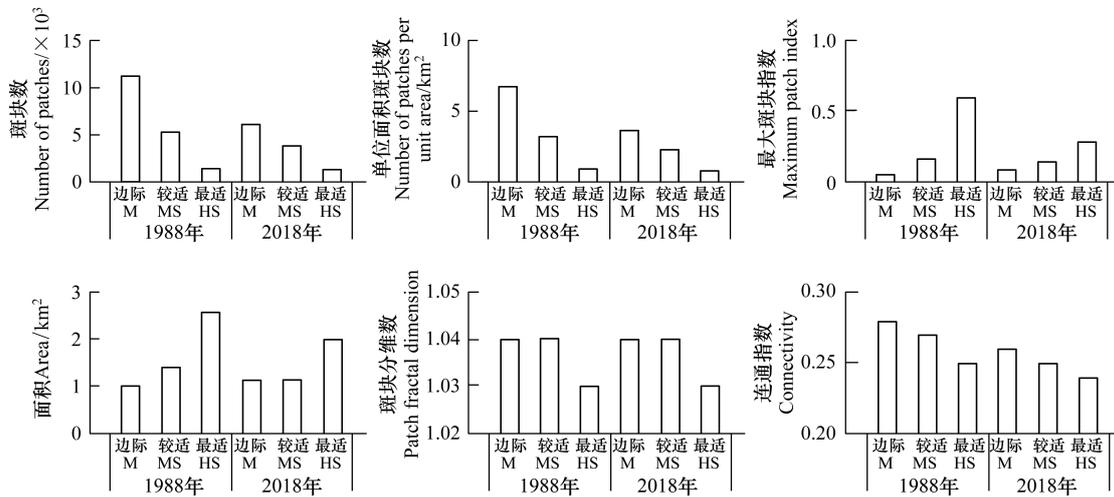


图 4 1988 年和 2018 年亚洲象生境景观指数

Fig.4 Landscape indices of Asian elephants' habitat in 1988 and 2018

3.3 南滚河流域亚洲象生境时空变化过程

3.3.1 森林扰动变化检测及精度

南滚河流域森林扰动由天然林边缘逐渐向森林内部延伸(图 5);1989—2018 年间总扰动面积 230.48 km²,占 1988 年森林总面积的 15.61%,各年受扰动面积各异。据混淆矩阵评价,森林扰动检测的 OA 为 91.25%,未扰动区域的 PA 与 UA 分别为 91.71%和 92.40%,而扰动区域的 PA 与 UA 为 92.42%和 91.74%,Kappa 系数 0.88。

3.3.2 森林扰动时序变化特征

1988—2018 年间,南滚河流域以橡胶林扩张为主的森林扰动明显(图 6)。1989—1993 年间扰动面积波

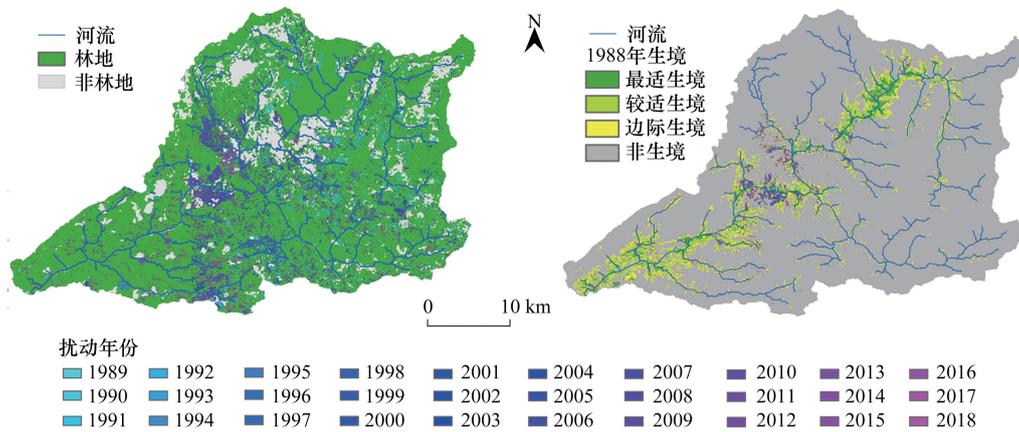


图5 南滚河流域森林扰动及亚洲象生境变化

Fig.5 The map of forest disturbance and Asian elephants' habitat change in Nangun River Basin

动较大,1989年和1992年分别为24.69 km²和26.35 km²,远高于其他年份;1993—2003年扰动面积总体较小;2004—2008年扰动面积快速递增,2008年达25.71 km²;此后(2012年除外)扰动面积回落至较低水平。但1989—2018年间该流域的中国境内、外区域森林扰动面积存在较大差异(图6),其总面积分别为58.48 km²和171.89 km²,占1988年初期森林总面积的3.96%和11.64%;从时序上看,境外区域(缅甸境内)扰动面积大于中国境内区域,以2001—2013年间最突出,其扰动面积在2004—2008年快速递增,且在2009—2013年仍维持较大面积,而在中国境内区域扰动面积在2009—2018年出现大幅减小。

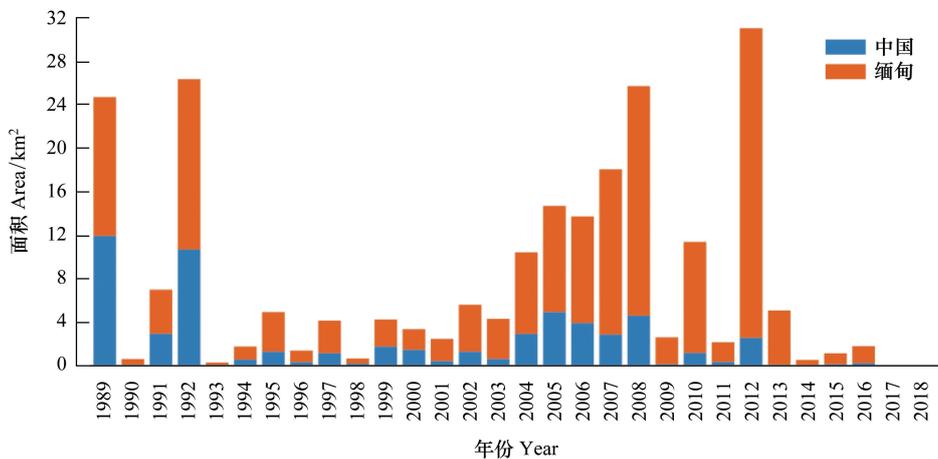


图6 1989—2018年南滚河流域森林扰动面积

Fig.6 The areas of disturbed forest in Nangun River Basin from 1989 to 2018

3.3.3 融合森林扰动的南滚河流域亚洲象生境变化时空动态

1988—2018年间,亚洲象适宜生境范围内森林扰动总面积32.2 km²,占1988年其适宜生境的13.84%。1989年、1992年、2007年、2008年和2012年扰动面积较大,主要集中于流域中段(图5)。30年间亚洲象生境面积逐渐缩小,破碎化加重,生境间连通性降低,各类生境均由高等级向次级、更次级乃至非生境转出。最适生境减少了35.76%,较适生境约50%转化为非生境;边际生境主要转化为非生境;适宜生境总面积从232.61 km²减至141.42 km²,减少量为91.19 km²,占1988年适宜生境总面积的39.20%(图7)。

从6个不同时期来看(图7),南滚河流域亚洲象适宜生境森林扰动面积1989—1993年间较大(尤其在在上

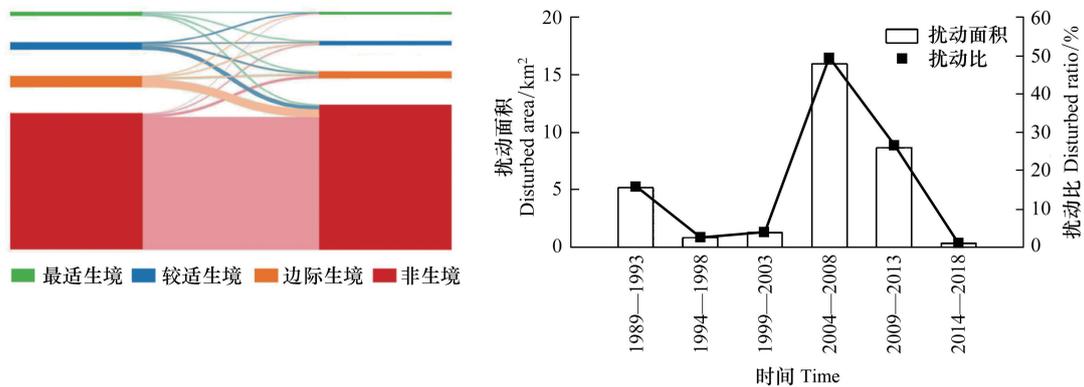


图7 1988—2018年南滚河流域生境面积转化和生境内各时期森林扰动面积

Fig.7 The map of transferred habitat area from 1988 to 2018 and the area and area percentage of disturbed habitat in five-year intervals in Nangun River Basin

流域区),而1994—1998年、1999—2003年两个时段相对较小,且均主要发生在较适及边际生境内,但2001年以后最适生境受森林扰动影响较大;2004—2008年间扰动面积最大,达15.97 km²,扰动比为49.59%,且主要集中在流域中段的适宜生境区;2009—2013年间扰动面积仍较大,主要发生在中下游流域区;但2014年以后森林扰动面积极少。

综合图5和图7可知,因森林扰动导致亚洲象生境退化表现为:2001年以前(1989年和1992年除外)扰动面积较小,外围生境退化;2001—2013年间扰动面积增大,最适生境受扰明显,适宜生境大面积减少,特别是边境地区适宜生境受扰后被分隔成上、下游两个孤立区域;2013年以后适宜生境变动较少,趋于稳定。

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 土地利用变化与森林扰动的跨境差异:1988—2018年间,南滚河流域橡胶林种植扩张导致毁林,这与以前众多学者的研究结果一致^[7-8, 24, 39-41]。因亚洲象几乎只生存在完整的天然林中^[1, 24],天然林的时空变化在较大程度上反映其生境时空演变特征。南滚河流域天然林的时序变化检测结果显示,近30年间以橡胶林扩张导致毁林为主的森林扰动面积中、缅跨境差异明显。2001年以前中、缅境内森林扰动面积大致相当,波动性均较大,主要发生在边际生境和较适生境区域;2001—2013年中-缅边境天然林面积锐减,导致南滚河中游流域区亚洲象适宜生境丧失,被分割为上、下游两个孤立区域,从地理上阻断了中、缅亚洲象种群交流的机会^[25, 27];该时期缅甸境内森林扰动面积明显大于中国境内,这与两国发展水平差异以及相关社会经济政策实施有关。20世纪90年代后期,缅甸开展罂粟替代种植,从而促进了橡胶林种植的迅速扩张;而中国实施了“集体林权制度改革”和“天然林保护计划”等措施,抑制了橡胶种植扩张导致的毁林,表明政策是影响该流域土地利用变化的重要因素;2013年之后中、缅境内森林扰动面积均减少,亚洲象生境趋于稳定,这与该流域内橡胶适宜种植区趋于饱和,以及全球橡胶价格长期低迷有关^[42]。

(2) 土地利用变化对亚洲象生境的影响:流域内土地利用变化导致亚洲象生境面积严重减少,破碎化程度增加。受天然林减少的持续影响,2018年南滚河流域亚洲象最适生境总面积仅剩26.34 km²,远低于其生存最小家域面积(105 km²)^[43],也低于其在旱季的最小活动范围需求35.67 km²^[10]。大面积森林扰动导致的适宜生境破碎化,阻断了亚洲象往返于上、下游的迁徙通道,致使中、缅亚洲象种群交流中断了近30年^[25, 27]。橡胶林等热作种植的扩张挤占了亚洲象的生存空间,削减了天然食物来源,迫使亚洲象进入人类生产生活区觅食,诱发人象冲突。最新调查显示中国境内的南滚河流域区目前仅存12头亚洲象^[27],适宜生境丧失与破碎化是制约亚洲象种群增长的重要原因^[6, 25],而极小种群效应是目前该流域亚洲象保护所面临的最大挑

战^[29]。此外,研究也表明南滚河国家级自然保护区是亚洲象的最适生境区域,且受森林扰动影响极微,表明保护区的设立和建设对亚洲象生境保护起到了明显成效。但上、下游生境地理隔离,长期孤岛式保护不利于种群繁衍^[25]。因此,亟需突破国界线的人为限制,谋划建立流域尺度的跨境亚洲象保护区,有计划恢复或修复亚洲象迁移廊道,改善和恢复适宜生境连通性,从而促进境内外亚洲象种群间的交流。

(3) 森林扰动时序变化检测方法在物种生境研究中的推广:LandTrendr 算法用于南滚河流域 1989—2018 年森林扰动检测,为揭示亚洲象生境时空变化过程提供了准确度较高、可靠性较强的数据支撑。时序变化检测方法能精准发现亚洲象生境变化的关键时间点与空间位置,利于生境变化归因,也可为生境修复的先后次序划定提供依据,从而提高修复的精准性和效率。该方法同样可应用于其他物种生境时空演变过程的诊断,为相应物种的生境保护与恢复等提供科学依据。

4.2 结论

为探明土地利用变化对亚洲象生境影响的时空过程及机制,以南滚河流域为例,采用基于 Landsat 影像的土地利用/土地覆被遥感制图和基于 LandTrendr 算法的时序变化检测等方法,分析了 1988—2018 年间流域土地利用变化及其导致的森林扰动过程,结合 ENFA 模型评定的亚洲象适宜生境格局,探究以天然林扰动为主的土地利用变化对亚洲象生境的影响,得出以下结论:

(1) 1988—2018 年间,南滚河流域土地利用变化主要表现为天然林向其他土地利用类型转化,其中橡胶林扩张导致毁林最为明显;森林扰动强度在中、缅境内存在明显差异,在 2001 年之前两国森林扰动面积大体相当,但其后缅甸境内流域森林扰动面积高于中国境内流域。中、缅两国经济发展水平和政策差异及全球橡胶价格变动是驱动该流域土地利用变化的重要因素。

(2) 南滚河流域以橡胶林种植扩张导致毁林为主的土地利用变化,导致亚洲象生境丧失,适宜生境斑块间连通性降低,破碎化程度较高。

(3) 该流域亚洲象生境丧失过程表现为由生境边缘逐渐向内部侵蚀,从而导致上、下游生境斑块完全隔离。2001 年以前,亚洲象最适生境区受土地利用变化影响较少,生境丧失主要表现为较适生境和边际生境的减少;2001—2013 年间中、缅边境地区剧烈的土地利用变化导致流域中游段亚洲象适宜生境的丧失,从而使上、下游适宜生境区完全被隔离,进而影响亚洲象的跨境迁徙和种群交流。

参考文献 (References):

- [1] 郎学东, 彭明春, 王崇云, 李永杰, 段禾祥, 李晓华, 江望高. 南滚河流域亚洲象生境质量现状评价. 云南大学学报: 自然科学版, 2008, 30(4): 415-423.
- [2] 刘鹏, 代娟, 曹大藩, 李志宏, 张立. 普洱市亚洲象栖息地适宜度评价. 生态学报, 2016, 36(13): 4163-4170.
- [3] 陈明勇, 杨士剑, 刘林云, 董永华, 杨正斌. 中国亚洲象与人类关系. 林业调查规划, 2006, 31(4): 114-117.
- [4] 云南省林业厅野生动植物保护与自然保护区管理处. 保护亚洲象——云南在行动. 云南林业, 2017, 38(3): 20-22.
- [5] Zhang L, Dong L, Lin L, Feng L M, Yan F, Wang L X, Guo X M, Luo A D. Asian elephants in China: estimating population size and evaluating habitat suitability. PLoS One, 2015, 10(5): e0124834.
- [6] 赵宇, 金崑. 亚洲象分布、数量、栖息地状况及种群管理. 世界林业研究, 2018, 31(2): 25-30.
- [7] Tang D M, Fan H, Yang K, Zhang Y. Mapping forest disturbance across the China-Laos border using annual landsat time series. International Journal of Remote Sensing, 2019, 40(8): 2895-2915.
- [8] Sadali N. Determinant of volatility natural rubber price. Social Science Electronic Publishing. (2013-07-10) [2020-10-01]. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2276767.
- [9] Liu W J, Hu H B, Ma Y X, Li H M. Environmental and socioeconomic impacts of increasing rubber plantations in Menglun township, southwest China. Mountain Research and Development, 2006, 26(3): 245-253.
- [10] 张立, 王宁, 王宇宇, 马利超. 云南思茅亚洲象对栖息地的选择与利用. 兽类学报, 2003, 23(3): 185-192.
- [11] 林柳, 张龙田, 罗爱东, 王利繁, 张立. 尚勇保护区亚洲象种群数量动态、种群结构及季节分布格局. 兽类学报, 2011, 31(3): 226-234.
- [12] Baskaran N, Kannan G, Anbarasan U, Thapa A, Sukumar R. A landscape-level assessment of Asian elephant habitat, its population and elephant-human conflict in the anamalai hill ranges of southern western Ghats, India. Mammalian Biology, 2013, 78(6): 470-481.
- [13] 李芝喜, 李红春, 陆锋. 亚洲象生境评价. 环境遥感, 1996, 11(2): 108-115.

- [14] 林柳, 金延飞, 杨鸿培, 罗爱东, 郭贤明, 王利繁, 张立. 西双版纳亚洲象的栖息地评价. 兽类学报, 2015, 35(1): 1-13.
- [15] 杨正斌, 陈明勇, 董永华, 刘林云, 杨士剑. 西双版纳国家级自然保护区勐养子保护区亚洲象生境现状分析. 林业调查规划, 2006, 31(3): 49-52.
- [16] Estes J G, Othman N, Ismail S, Ancrenaz M, Goossens B, Ambu L N, Estes A B, Palmiotto P A. Quantity and configuration of available elephant habitat and related conservation concerns in the lower Kinabatangan Floodplain of Sabah, Malaysia. PLoS One, 2012, 7(10): e44601.
- [17] 李正玲, 陈明勇, 吴兆录, 王倩, 董永华. 西双版纳社区村民对亚洲象保护廊道建设的认知与态度. 应用生态学报, 2009, 20(6): 1483-1487.
- [18] 肖洒. 普洱地区亚洲象肇事特点及损失情况分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [19] Wulder M A, White J C, Goward S N, Masek J G, Irons J R, Herold M, Cohen W B, Loveland T R, Woodcock C E. Landsat continuity: issues and opportunities for land cover monitoring. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(3): 955-969.
- [20] Townshend J R, Masek J G, Huang C Q, Vermote E F, Gao F, Channan S, Sexton J O, Feng M, Narasimhan R, Kim D, Song K, Song D X, Song X P, Noojipady P, Tan B, Hansen M C, Li M X, Wolfe R E. Global characterization and monitoring of forest cover using Landsat data: opportunities and challenges. International Journal of Digital Earth, 2012, 5(5): 373-397.
- [21] Wulder M A, White J C, Loveland T R, Woodcock C E, Belward A S, Cohen W B, Fosnight E A, Shaw J, Masek J G, Roy D P. The global Landsat archive: status, consolidation, and direction. Remote Sensing of Environment, 2016, 185: 271-283.
- [22] Banskota A, Kayastha N, Falkowski M J, Wulder M A, Froese R E, White J C. Forest monitoring using Landsat time series data: a review. Canadian Journal of Remote Sensing, 2014, 40(5): 362-384.
- [23] Hirzel A H, Hausser J, Chessel D, Perrin N. Ecological-niche factor analysis: how to compute habitat-suitability maps without absence data? Ecology, 2002, 83(7): 2027-2036.
- [24] Liu P, Wen H, Harich F K, He C H, Wang L X, Guo X M, Zhao J W, Luo A D, Yang H P, Sun X, Yu Y, Zheng S B, Guo J, Li L, Zhang L. Conflict between conservation and development: cash forest encroachment in Asian elephant distributions. Scientific Reports, 2017, 7(1): 6404.
- [25] Liu P, Wen H, Lin L, Liu J, Zhang L. Habitat evaluation for Asian elephants (*Elephas maximus*) in Lincang: conservation planning for an extremely small population of elephants in China. Biological Conservation, 2016, 198: 113-121.
- [26] 冯利民, 王志胜, 林柳, 杨绍兵, 周宾, 李春华, 熊友明, 张立. 云南南滚河国家级自然保护区亚洲象种群旱季生境选择及保护策略. 兽类学报, 2010, 30(1): 1-10.
- [27] 汤永晶, 王志胜, 蒋桂莲, 郑璇, 黄元, 李正玲, 陈明勇. 云南南滚河流域亚洲象种群动态分析. 林业建设, 2019, (6): 97-102.
- [28] 秦岭. 云南南滚河自然保护区亚洲象(*Elephas maximus*)对栖息地的选择[D]. 西安: 西北大学, 2007.
- [29] Clark T W, Warneke R M, George G G. Management and conservation of small populations//Clark T W, Seebeck J H, eds. Management and Conservation of Small Populations. Brookfield: Chicago Zoological Society Publication Dept, 1990: 1-18.
- [30] 郎学东. 南滚河流域亚洲象生境质量现状评价[D]. 昆明: 云南大学, 2008.
- [31] Bohnett E. 使用自动红外相机对云南南滚河自然保护区及江西高天岩自然保护区内大中型哺乳动物的调查评估[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [32] 王方, 郑璇, 马杰, 王智红, 刘宇, 姚冲学, 李正玲, 陈明勇. 无人机技术在中国野生亚洲象调查研究及监测中的应用. 林业建设, 2019, (6): 38-44.
- [33] 魏建华. 南滚河流域土地利用变化对亚洲象生境的影响[D]. 昆明: 云南大学, 2019.
- [34] Fan H, Fu X H, Zhang Z, Wu Q. Phenology-based vegetation index differencing for mapping of rubber plantations using Landsat OLI data. Remote Sensing, 2015, 7(5): 6041-6058.
- [35] Janssen L L F, Van Der Wel F J M. Accuracy assessment of satellite derived land cover data: a review. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1994, 60(4): 419-426.
- [36] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法. 北京: 科学出版社, 2013:192-193.
- [37] 汤冬梅, 樊辉, 张瑶. Landsat 时序变化检测综述. 地球信息科学学报, 2017, 19(8): 1069-1079.
- [38] 刘宇, 吕一河, 傅伯杰. 景观格局-土壤侵蚀研究中景观指数的意义解释及局限性. 生态学报, 2011, 31(1): 267-275.
- [39] 赖庆奎, 曹广侠, 范自强. 南滚河国家级自然保护区及周边地区社会林业现状与发展对策研究. 西南林学院学报, 1997, 17(4): 29-39.
- [40] Ren G P, Young S S, Wang L, Wang W, Long Y C, Wu R D, Li J S, Zhu J G, Yu D W. Effectiveness of China's national forest protection program and nature reserves. Conservation Biology, 2015, 29(5): 1368-1377.
- [41] Woods K. Rubber out of the ashes: locating Chinese agribusiness investments in 'armed sovereignties' in the Myanmar-China borderlands. Territory, Politics, Governance, 2019, 7(1): 79-95.
- [42] 刘陈立, 张军, 杨旭超, 李杰. 缅甸佤邦北部罂粟替代种植下橡胶林时空演变特征. 西部林业科学, 2018, 47(4): 115-121.
- [43] Jathanna D, Karanth K U, Kumar N S, Karanth K K, Goswami V R. Patterns and determinants of habitat occupancy by the Asian elephant in the Western Ghats of Karnataka, India. PLoS One, 2015, 10(7): e0133233.