

非洲大陆区域一体化背景下国家边境森林变化及其主要因素贡献

唐梦雅¹, 李鹏^{2,3}, 李霞¹, 陈生媚⁴, Jeffrey Chiwukem CHIAKA^{5,6}

(1. 长安大学土地工程学院, 西安 710054; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 4. 长江大学地球科学学院, 武汉 430100;

5. 北京师范大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875;

6. Anambra-Imo 河流域发展局, 尼日利亚 奥韦里 1301)

摘要: 经济全球化与区域一体化促使边境从封闭走向开放并渐成人地关系研究热点区域。自《非洲大陆自由贸易区协定》签署以来, 非洲一体化进程历经数十载并影响各国边境景观与土地利用。但非洲大陆国家边境森林等土地覆被变化过程尚缺乏深究且对其主要影响因素及其对森林变化贡献量化不足。利用2017—2022年土地覆被产品、活跃火、人口密度与武装冲突数据, 在揭示非洲大陆国家边境森林等土地覆被变化年际动态基础上, 采用随机森林回归与相关性分析界定森林变化影响因素并量化其主因与贡献。结果表明: ① 非洲大陆国家边境以赤道为界向北、向南呈现森林—草灌—裸地递次分布格局, 占地近九成, 且森林、草灌、裸地三者主导着(> 80%)边境土地覆被变化(年均变化2%); 2020年森林有所恢复, 但草灌/裸地增加所致毁林仍是大势。② 活跃火和人口密度是非洲边境森林覆被变化主/从因, 且森林变化与活跃火频次、人口密度关系先弱后强。③ 非洲大陆国家边境年际近九成森林减少与活跃火发生呈强正相关性, 受季节影响由赤道向南北两侧递增。④ 旱季活跃火对非洲大陆国家边境森林减少影响更为显著。本文可为探索热带森林变化诱因和揭示边境土地利用变化对区域一体化响应程度提供借鉴。

关键词: 边境土地利用; 地缘经济合作; 森林减少; 活跃火; 随机森林回归; 非洲大陆

DOI: 10.11821/dlxb202505005

1 引言

经济全球化和区域一体化促使毗邻国家地缘经济合作蓬勃发展^[1]。作为国家安全屏障与地缘合作前沿, 边境由封闭走向开放渐成大势^[1]。然而, 地区冲突、非法移民与突发公共卫生事件等^[2-3]迫使部分边境回归阻隔。主权国家国境线使边境两侧呈现相似或相异发展, 原本相似的地理环境可能表现出不同的地理特征^[4]。国际关系、地理连通性、自然资源开发、经济发展与生态保护等因素, 已经或正在影响边境发展及其土地利用变化且独具地缘色彩^[5]。冷战结束以来, 地缘经济关系与边境土地利用交叉研究渐受关注^[5-6], 如各大洲(南极洲除外)国家边境^[6-9], 即便是接壤国家最少的大洋洲(巴布亚新几内亚^[10])

收稿日期: 2024-06-24; 修订日期: 2025-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(42371282, 42130508) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.42371282, No.42130508]

作者简介: 唐梦雅(2000-), 女, 新疆巴州人, 硕士生, 研究方向为边境土地利用变化。E-mail: 2022135009@chd.edu.cn

通讯作者: 李鹏(1984-), 男, 江西永新人, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为资源遥感与边境地理。

E-mail: lip@igsrr.ac.cn

亦如是。聚焦地缘视角下国家边境土地利用动态，有助于评估地缘经济合作与边境土地利用因果关系及评估边境人为活动所致生态环境效应^[11]。

非洲大陆区域一体化进程始于非洲统一组织建立^[12]。2002年改组后的非洲联盟更加重视非洲经济一体化建设，并于2015年通过《2063年议程》^[12]。2018年《非洲大陆自由贸易区协定》签署，标志非洲区域一体化进程迎来了历史转折^[13]。非洲联盟着力推动非洲大陆自贸区（AfCFTA）建设并于2021年正式启动，国家间地缘合作迎来实质发展^[12]。非洲已成为地缘合作与边境土地利用综合研究的典型区。近年来，非洲大陆土地利用时空格局与驱动机制较受关注，特别是森林变化及其驱动因素^[14]，研究尺度涉及微观^[15]到与非洲全域不等^[16]，涉及线性回归模型^[17]、相关性分析^[18]、地理探测器^[19]等经验统计方法。非洲大陆森林等覆被变化驱动因素包括直接和间接两类，前者包括农业扩张、伐木等人类活动，后者则涉及人口动态、政策等人类活动以及气候变化、火等自然过程^[20]。受人类活动影响，非洲气候变化所致火情日渐加剧^[21]，全球近七成森林火情发生在非洲^[22]，2001—2019年非洲森林烧毁面积占到全球78%^[23]。与此同时，非洲面临政治环境动荡、经济冲击、人口变动等挑战，进一步加剧了非洲森林变化^[24]。当前，基于较高分辨率土地覆被产品与一体化背景下非洲土地变化的研究仍然不足^[16]。机器学习方法如随机森林回归模型在土地利用变化研究中更具优势^[25]，但在大洲森林变化驱动因素分析中却鲜有报道。

尽管已有研究较为全面地揭示了非洲土地利用及其变化趋势，却少有研究聚焦非洲地缘合作背景下边境土地覆被变化，尤其是森林及其驱动因素^[16]。鉴于此，本文聚焦地缘经济合作影响下非洲大陆国家边境森林等土地覆被变化及其影响因素贡献量强度，利用2017—2022年Sentinel-2 10 m土地覆被产品，基于GIS空间分析揭示非洲大陆国家边境（国境线两侧60 km）森林等土地利用变化过程，采用随机森林回归方法量化森林变化关键驱动因子及其贡献。本文有助于探索世界各国边境森林等土地利用变化驱动因素及其贡献，并发展地缘经济合作与边境土地利用交叉定量研究。

2 研究区概况与数据来源

2.1 非洲大陆国家边境概况

非洲的土地与人口分别占全球20%和18%，均列世界第二大洲^[26]。非洲大陆有49个主权国家（图1），2022年其面积与人口占到非洲（含岛屿）97%与96%。“联合国地理方案”将其划分为东非、西非、南非、北非、中非。非洲大陆国家区域一体化从规划到正式启动历时10年（图2）。AfCFTA启动后边境贸易持续增长^[13]，边境发展促使边境农进林退、不透水层扩张与草灌退化等土地利用变化。据世界银行商品贸易统计，2017—2020年非洲（限于数据获取特指撒哈以南非洲）在全世界GDP占比相应下降2.2%，之后反弹，2022年增至45.3%。

非洲大陆国家有国境线146条，苏丹—南苏丹最长（2292 km），纳米比亚—博茨瓦纳最短（< 3 km）。有5条及以上边境的国家共29个，刚果民主共和国最多，共10条，莱索托边境仅1条。其中，以直线、弧线或曲线等数理或几何划界占到74%（含44%沿经纬度划定国界），自然边界（河流、湖泊和山脉等）占到26%^[27]。人为划界已成为非洲大陆国家边境冲突与领土争端主因^[2]。综合非洲大陆国家边境领土争端及其土地利用变化特征，将非洲大陆国家边境定义为国境线两侧60 km带状区域^[28-29]。边境总面积为966×10⁴ km²，占非洲大陆31.28%，平均海拔与人口密度分别为564 m与52人/km²。

赤道横贯非洲大陆中部, 干燥气候与热带气候各占区域面积的3/5与1/3, 亚热带气候约占7%, 分布于南北边缘, 气候带南北对称分布^[30]。气候差异决定着非洲大陆(边境)植被分布特征。2022年Sentinel-2 10 m土地覆被数据表明, 非洲大陆以赤道为界向南、向北依次分布有森林、草灌、裸地及其过渡类型, 且东西方向覆被类型一致性较强, 边境差异较小。

2.2 数据来源及预处理

2.2.1 Sentinel-2 10 m土地覆被产品及其预处理 本文所用全球2017—2022年10 m土地覆被产品, 为Impact Observatory基于历年Sentinel-2影像和超50亿个人为标记训练样本(像元)并利用全卷积神经网络人工智能土地分类模型研制而成^[31], 由美国环境系统研究所(<https://livingatlas.arcgis.com/landcover/>)和微软合作多平台发布。该产品包括水体(Water)、森林(Trees)、淹没植被(Flooded Vegetation)、耕地(Crops)、建设用地(Built Area)、裸地(Bare Ground)、雪/冰(Snow/Ice)、云(Clouds)、草灌(Rangeland)9类, 总体分类精度为85%^[31]。该产品采用WGS84伪墨卡托投影, 对全球数据按经度6°×纬度8°产品输出^[32]。获取非洲大陆6年共456景影像, 通过投影(WGS_1984_UTM_Zone_34N)、裁剪拼接、栅格计算、按属性提取主要变化覆被等预处理操作, 得到非洲大陆国家边境土地覆被数据。本文将森林—草灌与草灌—裸地定义为森林变化。该数据集时间跨度与非洲一体化发展历程较为吻合, 其高空间分辨率有助于刻画一体化影响下土地覆被变化增减状况。2017—2022年非洲大陆国家边境以草灌、森林与裸地为主, 占比89.3%。非洲大陆森林面积年均达 $824.35 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中2018年最高, 随后波动降低至2022年, 其中边境地区森林占比达35.82%, 热带边境森林占边境96%, 后续拟以热带非洲作为重点分析区域。

2.2.2 VIIRS火点数据及其预处理 活跃火数据来源于美国国家航空航天局火灾信息资源管理系统(FIRMS)提供的可见光红外成像辐射仪(VIIRS)产品(<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>)。VIIRS于2011年10月28日搭载S-NPP卫星发射^[33], 12 h覆盖全球一次, 提供750 m和375 m空间分辨率数据。VIIRS 375 m数据提高了对较小火情的检测能力, 改进了火灾边界轮廓监测范围的连续性^[33-34]。2017—2022年非洲大陆活跃火频次为 5949.75×10^4 次, 其中国家边境与热带范围国家边境分别为 2174.40×10^4 次和 2089.50×10^4 次, 占比分别为36.55%和35.12%。热带非洲国家边境森林活跃火频次高达 1561.47×10^4 次, 约占热带非洲国家边境活跃火总频次的74.73%; 草灌区累计 495.51×10^4 次, 占23.71%; 裸地区 5.18×10^4 次, 占0.25%。活跃火集中在每年8月—次年2月, 共占全年74.34%, 即多发生在旱季(北半球11—4月、南半球5—10月)^[35]。

2.2.3 人口密度与武装冲突数据及其预处理 人口数据为美国橡树岭国家实验室研制的LandScan全球1 km分辨率人口数据集^[36](<https://landscan.ornl.gov/>)。利用GIS投影、裁剪等预处理得到2017—2022年非洲大陆国家边境人口密度数据(表1)。非洲大陆国家边境人口密度逐年上升, 2022年最高(52人/ km^2), 多分布于北非摩洛哥、阿尔及利亚、突尼斯、埃及、与苏丹边境, 西非加纳、多哥、贝宁、尼日利亚边境, 中非乍得、刚果共和国与刚果民主共和国交界及安哥拉南部边境, 东非坦桑尼亚、非洲之角, 南非纳米比亚北部、南非共和国边境。

冲突数据来源于瑞典乌普萨拉大学和平与冲突研究系研制的冲突数据交互式数据库(<https://pcr.uu.se/research/ucdp/>)^[37]。武装冲突被定义为“涉及政府和/或领土有争议的不相容行为, 双方(至少一方是一国政府)使用武力, 一年内造成至少25人因战斗而死亡”。对数据进行清洗筛查, 去除字段不全与重复事件。1946—2022年全球共发生316476起武装冲突事件, 2012年骤增并于2014年达到峰值(25918起)。2017—2022年非洲大陆

表1 2017—2022年非洲大陆国家边境土地覆被、活跃火、人口密度以及武装冲突统计

Tab. 1 Statistics of land cover, active fires, population density, and armed conflicts along the international borders of continental Africa during 2017-2022

分区	主要土地覆被		活跃火 频次占比(%)	人口密度(人/km ²)		武装冲突(次)	
	类型	占比(%)		平均值	变化趋势/标准差	数量占比(%)	变化趋势/标准差
东非	森林	6.04	12.97	56	2.18	29.13	139.92
	草灌	13.60	15.40				
	裸地	0.95	0.17				
	其他	4.88	1.09				
西非	森林	6.81	10.72	67	3.90	22.16	92.71
	草灌	12.94	10.97				
	裸地	4.72	0.02				
	其他	1.32	1.20				
南非	森林	1.83	0.87	25	0.47	0.42	8.70
	草灌	4.96	0.60				
	裸地	0.75	0				
	其他	0.70	0.01				
北非	森林	2.07	5.89	37	0.87	10.70	80.42
	草灌	8.79	4.31				
	裸地	9.17	0.01				
	其他	1.28	0.10				
中非	森林	11.23	20.78	39	3.63	37.58	211.94
	草灌	5.91	13.66				
	裸地	1.26	0.06				
	其他	0.79	1.18				

与边境各发生203148起与11698起，且边境呈上升趋势至2022年达最高（2396起）。中非武装冲突最频繁，占非洲武装冲突总数的37.58%，南非最少（0.42%）。2017—2022年中非边境武装冲突集中于赤道及南北纬10°区域，即西非、中非、东非各国边境。

3 研究方法

3.1 基于渔网的GIS空间分析

基于ArcGIS创建非洲热带边境1 km格网系统并编码，用于统计热带非洲边境土地覆被与活跃火、武装冲突、人口密度的定量关系。非洲大陆国家边境格网共10216544个，热带区域约占80%。2017—2022年热带非洲边境至少发生过1次活跃火的格网占43%，即为有火区^[34]。在森林区域至少发生过一次活跃火的网格（林火区）共2789748个，占有火区79%。统计2017—2022年热带非洲国家边境森林减少数量与活跃火发生频次核密度并进行归一化处理，对二者按等距法划分为10个等级（分别为I~X和i~x）。统计森林减少数量对应的活跃火发生等级占比，以表征活跃火发生与森林减少空间一致性。此外，计算森林、草灌和裸地等土地利用类型动态度、土地利用转移矩阵，统计2017—2022年非洲大陆国家边境土地利用/覆盖类型变化剧烈程度以及各土地利用类型间转移情况。

3.2 随机森林回归分析

随机森林回归（Random Forest Regression, RFR）模型使用自助抽样法从原始数据中提取若干样本构建决策树，获取所有决策树回归结果平均值作为最终的模型输出^[38]。每

次随机抽取约1/3样本，剩余样本为“袋外数据”（Out-of-Bag），作为模型精度检验集^[39]。因其具有较高稳定性与准确率，不易出现过拟合并能对变量相对重要性进行排序^[38]，已应用于森林变化研究^[25]。部分依赖图（Partial Dependence Plot）表征某一影响因素对预测模型结果的边际效应，用以分析各因素对森林变化预测的影响作用，并验证和补充既有理论^[40]。

使用RFR模型对2017—2022年非洲大陆国家边境活跃火、武装冲突、人口密度特征重要性进行排序，并通过部分依赖图确定各因素对森林减少影响作用。部分依赖图中y轴（Partial Dependence）表示森林减少数量平均预测输出随着x轴活跃火频次、冲突数量或人口密度发生变化。样本（格网统计的各变量）数量70%用于训练决策树，30%用于验证与评估模型的回归性能。RFR模型通过Python中的Scikit-learn库实现，经过调试选定参数决策树数量ntree=200、每个树节点上变量个数mtry=1（输入特征数的1/3），其余参数默认。

3.3 相关性分析

在公里渔网统计基础上，使用Pearson相关系数^[41]探究非洲大陆国家边境森林变化与活跃火、人口密度与武装冲突相关关系。计算公式如下：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式中： r 为相关系数； x_i 和 y_i 表示变量 x 和 y 的样本数据； \bar{x} 和 \bar{y} 表示各变量的样本平均值。将相关系数（ $p < 0.05$ ）划分7个等级用于评估森林变化与各变量间相关性强弱（表2）。

表2 相关系数等级划分

Tab. 2 Classification of correlation coefficients

等级	强负相关	中负相关	弱负相关	无相关	弱正相关	中正相关	强正相关
r	-1.0~-0.6	-0.6~-0.4	-0.4~0	0	0~0.4	0.4~0.6	0.6~1.0

4 结果分析

4.1 非洲大陆国家边境土地覆被变化总体特征

2017—2022年非洲大陆国家边境土地覆被变化面积占边境总面积11.58%。森林占比减幅1.69%，变化面积占覆被变化总面积45.46%；草灌占比增幅0.32%，相应变化面积占到11.15%；裸地占比增幅0.49%，相应变化面积占到14.49%；耕地占比增幅0.42%，相应变化面积占到11.94%；水体、淹没植被与建设用地占比分别为4.47%、3.11%与7.51%；雪/冰与云变化甚小，相应占比均小于2.0%。

非洲大陆国家边境土地覆被变化以森林萎缩最为显著（图3a），2017—2022年净减少 $17.76 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。森林向草灌转换占比最大，占比达92.06%，其他流向涉及裸地（0.09%）与其他覆被类型（7.85%）（图4）。森林变化常见于中非乍得—中非共和国—喀麦隆、乍得—中非共和国—苏丹、喀麦隆—赤道几内亚、刚果民主共和国—安哥拉边境；西非几内亚—马里—塞内加尔、几内亚—几内亚比绍边境；南非博茨瓦纳—赞比亚—津巴布韦边境。同时，裸地和草灌表现为扩张，2017—2022年分别净增 $5.66 \times 10^4 \text{ km}^2$ 与 $4.36 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，草灌向裸地转换在裸地变化中占主导（72.69%）（图3b），集中发生于北非边境。

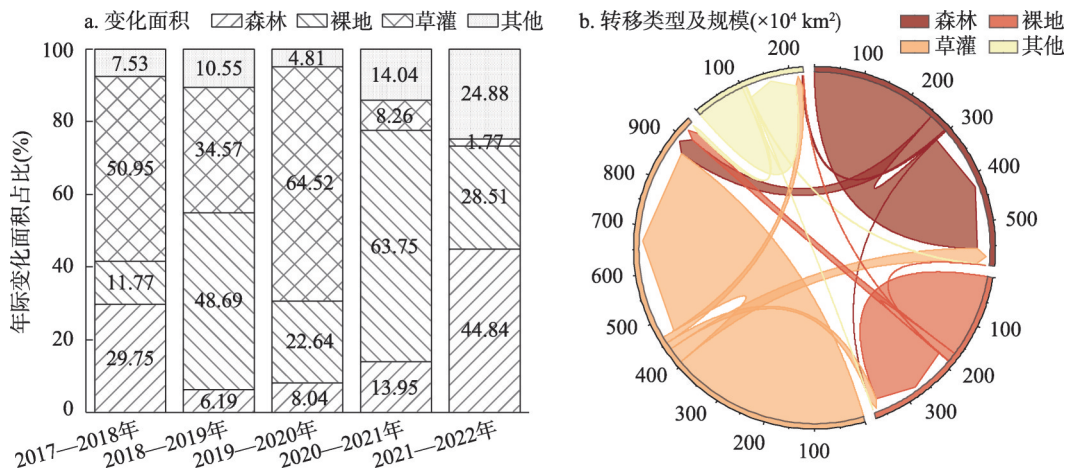


图3 2017—2022年非洲大陆国家边境主要土地覆被类型年际变化面积及转换类型与规模
Fig. 3 Area of inter-annual change in main land cover types and their conversion type and scale along the international borders of continental Africa during 2017-2022

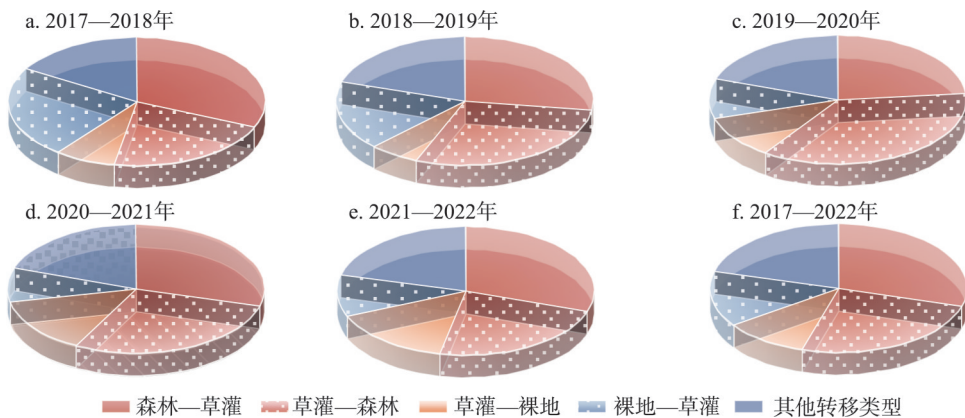


图4 2017—2022年非洲大陆国家边境主要土地覆被类型转换占比

Fig. 4 Percentage of main land cover types converted along the African international borders of continental Africa during 2017-2022

森林与草灌相互转换规模存在显著年际波动与地域差异。区域一体化与动荡社会环境交织下的森林减少是对历史毁林过程的延续^[6]，2020年前后森林变化最为突出（图3a）。2018年森林转入草灌面积居6年之最（ $35.26 \times 10^4 \text{ km}^2$ ），占到同期覆被总变化31.60%，集中在阿尔及利亚北部、几内亚、布基纳法索、中非共和国、埃塞俄比亚、博茨瓦纳等国边境（图5）；2020年森林转入草灌逐渐减少，局部甚至出现森林增加（ $4.36 \times 10^4 \text{ km}^2$ ）；2020年以后，草灌面积（源自森林）逐渐增加，而森林减少 $10.57 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，2020年加蓬及其毗邻国家边境有裸地等其他类型转入森林，转入量却不及森林减少的一半。2017—2019年草灌向裸地转移有所减少（ $2.87 \times 10^4 \text{ km}^2$ ），之后不断增加（ $4.41 \times 10^4 \text{ km}^2$ ）。2017—2019年裸地亦呈先减后增趋势，向草灌转换是其减少主因（图4），集中在北非（ $10^\circ\text{N} \sim 30^\circ\text{N}$ ）阿尔及利亚、利比亚、突尼斯等国边境；2021—2022年草灌向裸地转换最多，占15.37%，与裸地面积增加量相比不足一半。受2020年疫情影响，非洲大陆自由贸易协定被迫延迟，经济一体化进程停滞，经济活动迟滞和人员流动限制等政策在一定程度上减缓了非法商业导致的森林资源开发^[3]；然而，随着2021年AfCFTA的正式启

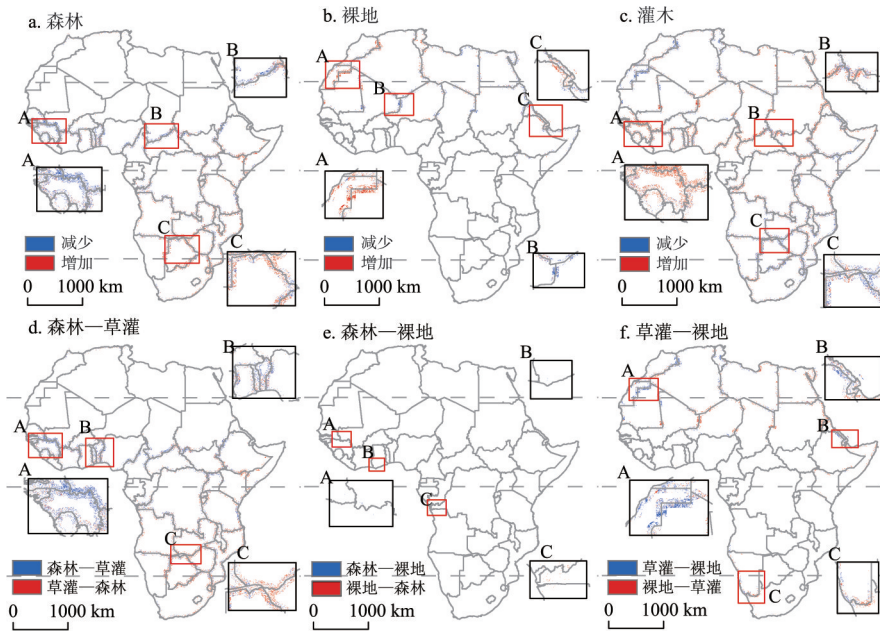


图5 2017—2022年非洲大陆国家边境主要土地覆被类型转换空间分布

Fig. 5 Spatial pattern of main land cover conversions along the international borders of continental Africa during 2017-2022

动，非洲经济逐渐复苏，林业生产得以恢复，尽管森林减少速度有所放缓，但森林面积整体仍呈下降趋势^[42]。

4.2 非洲大陆国家边境森林变化主要影响因素界定

4.2.1 森林减少与各变量相关性空间分布 2017—2022年热带非洲大陆国家边境有71.24%森林减少与活跃火有关，主要见于西非几内亚、多哥及其毗邻国家边境，中非刚果民主共和国—安哥拉、赞比亚以及中非共和国边境，东非南苏丹、马拉维以及南非博茨瓦纳北部边境。森林减少变化与活跃火发生表现为正相关性（图6~图7），强正、强负相关各占89.23%与10.77%。强正相关性由赤道向南北两侧逐渐密集（图8），以几内亚、南苏丹、赞比亚及其国家边境较为典型（图8a、8b）；强负相关集中分布于西非国家边境、北

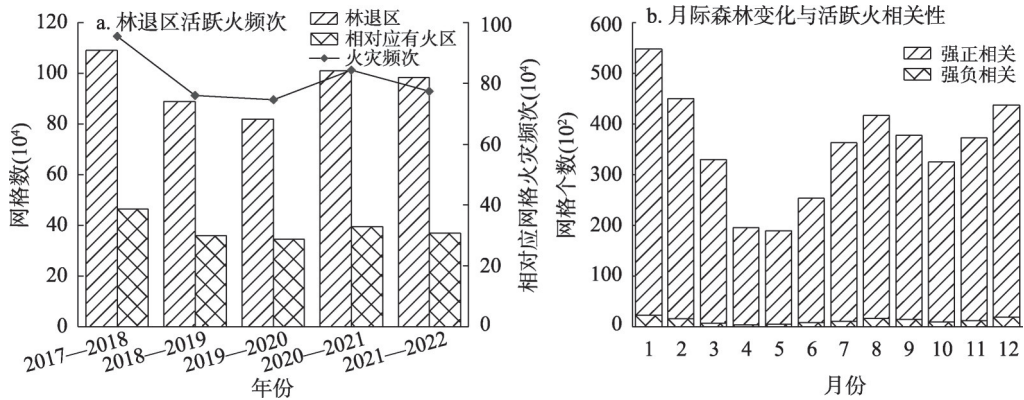


图6 2017—2022年非洲大陆国家边境森林变化与活跃火发生相关性网格个数月际变化

Fig. 6 Inter-monthly changes in the number of correlated grids between forest change and active fire occurrence along the international borders of continental Africa during 2017-2022

非苏丹—南苏丹、中非刚果民主共和—安哥拉、赞比亚边境、东非莫桑比克北部边境（图8c、8d）。

非洲大陆国家边境森林减少与人口密度呈显著正相关格网占到65.78%（图9），常见于西非几内亚（图9a）、多哥—贝宁边境，中非喀麦隆—乍得、中非共和国（图9b）、安哥拉南部以及安哥拉—刚果共和国、刚果民主共和国边境（图9c），北非苏丹—南苏丹边境，东非肯尼亚—乌干达—卢旺达、莫桑比克—赞比亚、津巴布韦边境以及南非各国北部边境（图9d）。同时，森林减少与人口密度和活跃火的相关性空间一致性较高，表明上述边境森林受人口增长与人类活动（如农业扩张、伐木、采矿）所致活跃火影响剧烈。森林减少与人口密度显著负相关占比为34.22%，与正相关分布有部分重合，集中分布于几内亚、多哥、中非共和国—乍得、苏丹—南苏丹、刚果民主共和国东部与南部、博茨瓦纳—津巴布韦边境。人口密度增加反映对森林资源需求增长，导致森林砍伐；另一方面，由于森林保护政策实施，部分森林得到恢复。

2017—2022年武装冲突与森林减少呈显著正相关格网占比95.24%，大部分森林减少和武装冲突频次表现出同步增长趋势，常见于东非、南非与西非（图10）。显著正相关主要分布在尼日利亚—尼日尔—乍得（图10a）、刚果民主共和国—乌干达、卢旺达、布隆迪及莫桑比克东部边境（图10b~10d）；呈显著负相关网格占比较小（4.76%），分布于马

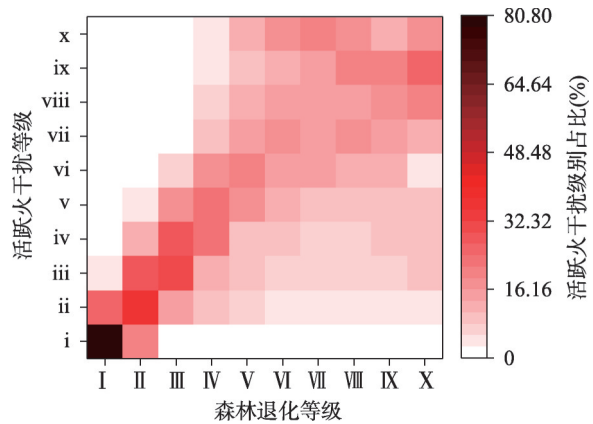


图7 2017—2022年非洲大陆国家边境森林变化等级与活跃火干扰等级占比统计

Fig. 7 Percentage statistics on varied levels of forest change and active fire disturbance along the international borders of continental Africa during 2017-2022

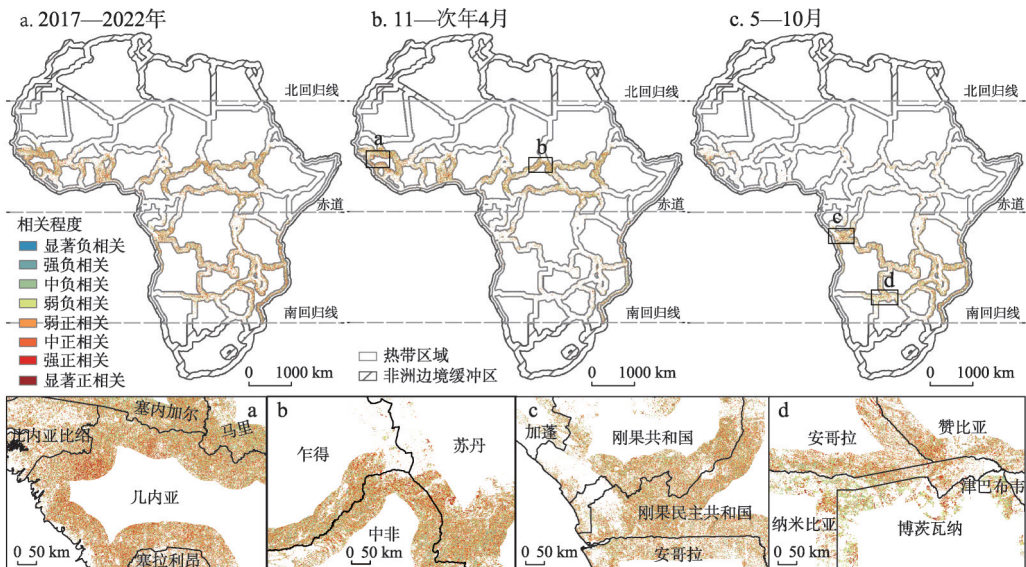


图8 2017—2022年非洲大陆边境森林变化与活跃火发生相关性空间分布
Fig. 8 Spatial distribution of correlation between forest change and active fire occurrence along the international borders of continental Africa during 2017-2022

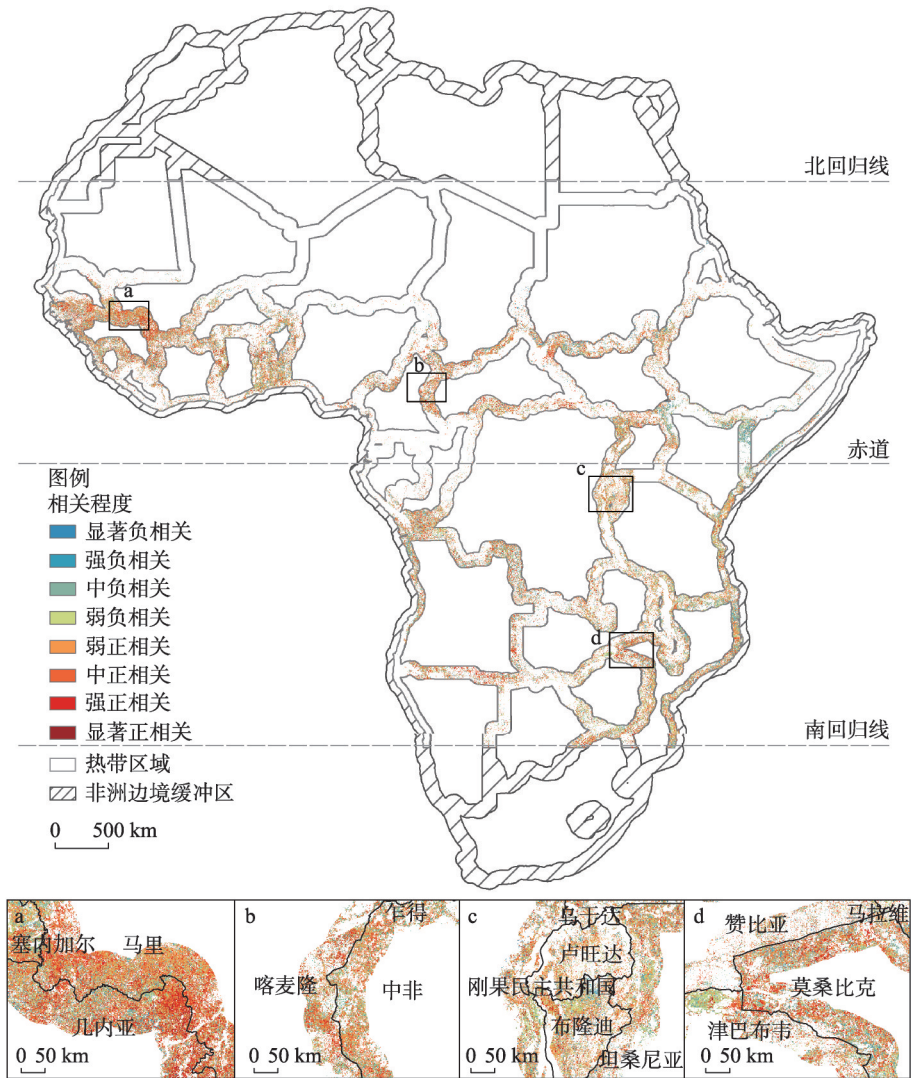


图9 2017—2022年非洲大陆边境森林变化与人口密度相关性空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of correlation between forest change and population density along the international borders of continental Africa during 2017-2022

里—布基纳法索、喀麦隆—尼日利亚、喀麦隆—中非共和国—乍得及刚果民主共和国—乌干达、卢旺达、布隆迪边境。武装冲突对森林局部影响以经济欠发展国家边境为主且较为复杂，同一国家不同边境森林影响不同。

4.2.2 活跃火对森林减少年际、年内影响 2017—2022年热带非洲大陆国家边境森林受活跃火频次干扰年际波动变化较明显（图7）。森林减少等级在II级以上时（除II~IV级），即发生森林减少，此时对应活跃火干扰等级均在ii级以上（即有活跃火发生），而II、III、IV级对应i级（无或极少活跃火）活跃火频次也仅占到18.91%、0.20%、0.13%。因此，森林减少与活跃火发生密切相关。当活跃火干扰等级在v级及以下时，造成V级以下森林减少均占60%以上，且相应活跃火频次等级占比均在15%以上，第ii、iii、iv、v等级分别占36.05%、31.54%、22.80%与16.48%；当活跃火干扰等级达到v级以上，有超过50%的活

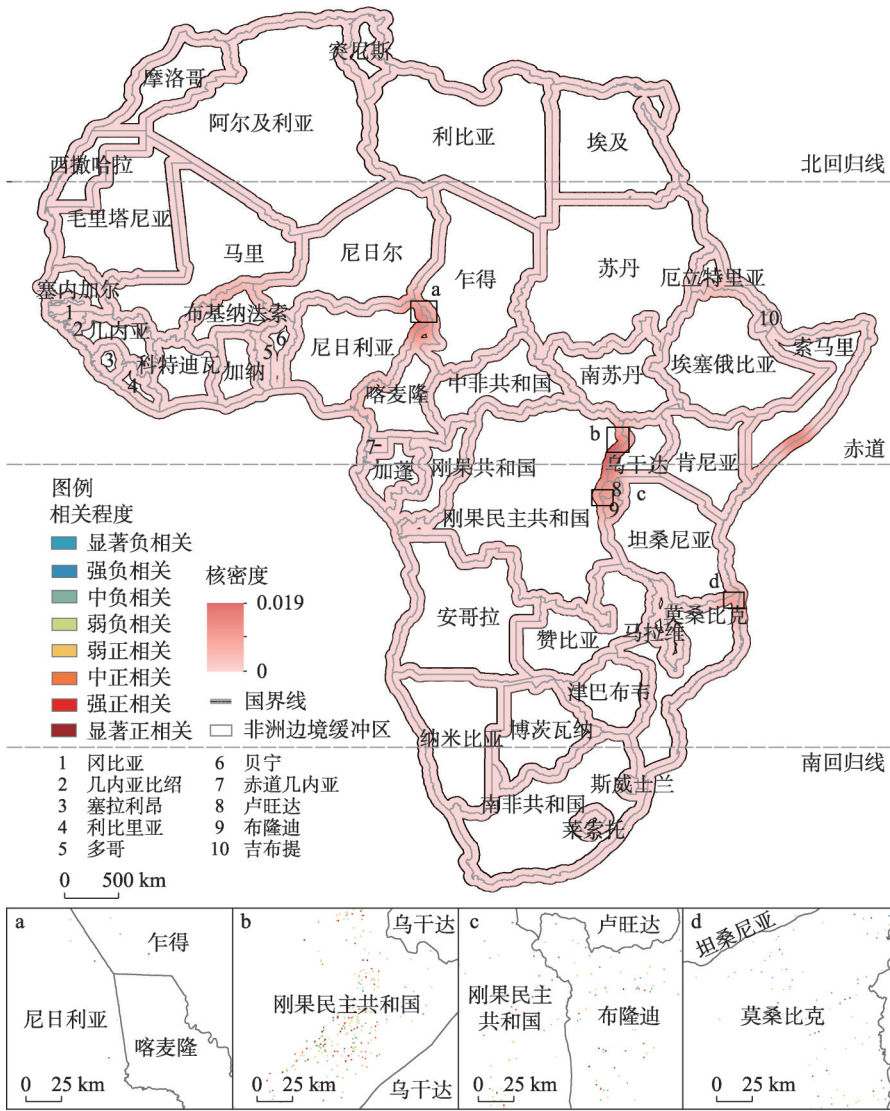


图 10 2017—2022 年非洲大陆边境森林变化与武装冲突相关性空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of correlation between forest change and armed conflict within the international borders of continental Africa during 2017-2022

跃火造成了V级以上森林减少，相应同等级活跃火频次占比均低于20%，第vi、vii、viii、ix、x等级活跃火频次占比分别为14.55%、15.60%、15.62%、19.37%、16.82%。因此，随着活跃火频次等级越高，森林减少等级越高，且森林减少等级普遍在相对应活跃火干扰等级上下3个区间范围内浮动。

热带非洲大陆国家边境森林变化受月际活跃火影响更为明显（图6b），且因活跃火在赤道南北发生季节差异而呈现显著空间特征^[43]。11月—次年4月活跃火与森林变化强相关性主要分布于赤道以北的西非、中非地区，以几内亚、中非共和国及其毗邻国家边境最为显著（图8），5月逐渐过渡至南半球，5—10月活跃火对森林减少作用以赤道以南中非、东非为主，以刚果民主共和国—刚果共和国、安哥拉、赞比亚、坦桑尼亚以及莫桑比克—马拉维—坦桑尼亚边境最为显著。11月—次年4月北半球热带非洲正值旱季，其活跃火

发生对赤道以北森林减少影响较大，强正相关区域占到96.65%。1月强正相关网格数全年占比最大，达12.75%，其次为2月（10.58%）、12月（10.14%）。11月—次年4月（图8b），活跃火所致森林减少多见于几内亚、多哥及其毗邻国家、南苏丹—中非共和国—乍得、南苏丹—乌干达边境等。南半球热带非洲旱季（5—10月）活跃火发生与森林减少亦密切相关（占比54.77%）。5—10月活跃火与森林变化强正相关区域占到96.52%（集中于7—9月），此时主要分布于南半球热带非洲。8月活跃火发生对南半球热带非洲边境森林减少影响最甚，强正相关网格全年占到9.74%，其次为9月（8.84%）、10月（7.67%），常见于刚果民主共和国—加蓬、赞比亚—津巴布韦—纳米比亚—博茨瓦纳边境。活跃火所致森林减少正向作用与森林减少区域及活跃火频次变化趋势相一致（图6a）。

4.3 不同因素所致非洲大陆国家边境森林变化贡献分析

2017—2022年际随机森林回归模型精度均超0.86，均方根误差和平均绝对误差均值分别为0.78和0.38。活跃火对非洲大陆国家边境森林减少贡献超60%（图11），2017—2018年贡献最高，占比76.52%，随后逐渐减弱（-11.93%）。因此，活跃火是非洲大陆国家边境森林减少主要影响因素（图11a）。2017—2018年人口密度所致森林减少贡献为23.43%，且逐年增加。2018—2019年增幅4.81%，2021—2022年贡献程度最高，占比达35.34%。限于武装冲突数量及其空间分布特殊性，其重要性占比不高（< 1%）且稳定（图11）。

2017—2022年活跃火贡献程度除南非外总体呈下降趋势，东非减幅最大（26.80%），其次为北非（10.32%）、西非（10.30%）、中非（8.00%），而南非增幅17.60%（图11b~11f）。以2020年为界，各分区（除东非外）活跃火贡献程度逐年呈先减后增，且对南非贡献程度更大，占到八成以上，西非、北非均占五成多，东非、中非超过三成。活跃火对森林减少逐月贡献特征如下：活跃火对东非的贡献体现在除2019—2020年以外的每年11—次年3月，2019—2020年对东非的贡献主要集中在8—10月；对西非、北非森林减少贡献主要体现在11月—次年4月（> 10%），且每年呈先减后增变化；对南非的贡献主要

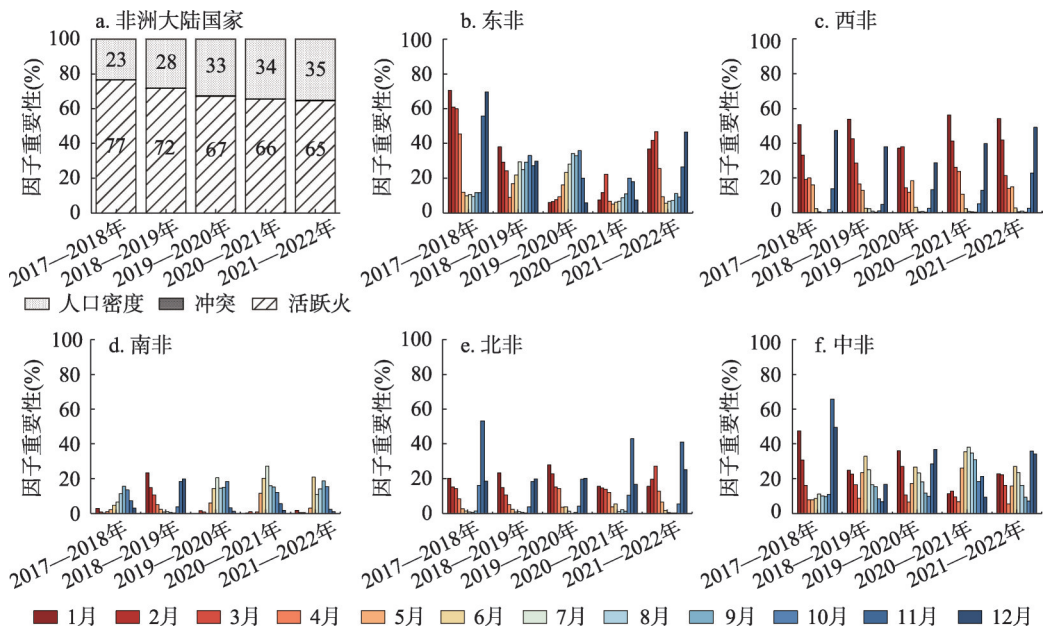


图 11 非洲国家边境森林变化驱动因子贡献

Fig. 11 The contribution of factors to forest change along international borders of continental Africa

体现在7—10月,相对重要性先增后减;对中非森林减少影响(除2017—2018年)体现在两个阶段,一是每年11月—次年2月;另一阶段是每年5—8月,其贡献大多在11—12月达到峰值。人口密度对森林减少贡献程度与活跃火逐月重要性占比变化相反,武装冲突影响最小,这可能与近6年非洲大陆国家边境武装冲突数量相对较少与分布集中有关。活跃火等各驱动因子对非洲大陆国家边境森林减少的贡献程度在不同分区不同年份具有一致性,但月际层面空间异质性和特殊性较明显。

非洲大陆国家边境活跃火频次和人口密度对森林减少影响较为复杂(图12),整体呈近“U”型变化,在其处于较小和较大区间时,即当活跃火频次处于低于50次和高于100次区间、人口密度处于低于20人/km²和高于50人/km²区间时,对森林减少影响作用更明显,且在冲突频次低于100的区域作用更加显著。2017—2021年活跃火对森林减少贡献以其发生频次50、100为转折点,前后呈波动下降—上升趋势,2021—2022年相应情形正好相反,呈上升—下降趋势;2018—2022年活跃火所致森林减少最大值均超2017—2018年(0.71×10⁴ km²)。随着冲突频次增加,2017—2021年对森林减少影响快速下降(图12c、12f、12i、12l、12o),表明武装冲突发生减弱了林业生产活动,2021—2022年武装冲突影响较为显著,波动增长,造成森林减少数量远超前4年(0.08×10⁴ km²)。人口密度对森林减少影响在2017—2019年、2021—2022年人口密度为30人/km²处为转折点,随后继续上升;2019—2021年相反,在30人/km²转折点后下降,相比往年却对森林减少贡献程度更高,特别是人口密度为30~40人/km²时,此时森林减少超2.7×10⁴ km²。

5 讨论

5.1 多维度解析自然与人为因素共同驱动的非洲大陆国家边境森林动态变化

非洲一体化背景下,非洲大陆国家边境森林总体呈减少趋势,且与活跃火频发、人类活动等密切相关。活跃火作为影响热带非洲大陆国家边境森林减少主要因素,与前人研究结果一致^[44]。活跃火包括野火和人类活动用火,如刀耕火种、伐木与商品化种植,均导致森林砍伐^[22]。据世界银行统计,2018年撒哈拉以南非洲商品贸易GDP占比达峰值(41.7%),2018年非洲大陆林产品生产和贸易达6年间最高(668万美元)。2020年非洲经济跌入谷底(35.7%),2021年后缓慢恢复,2020—2021年非洲林产品贸易趋势类似。这与本文结果相印证,2018年非洲森林减少面积最大;2020年后非洲大陆国家边境森林逐渐减少。人类活动造成非洲森林缩减,尤其是边境人口增长,同时人类活动增加火发生风险进而危及森林^[44]。然而,人类活动并不总是负向影响。在非洲绿色长城计划^[45]、贝宁森林保护区建立^[46]作用下,相关地区森林得到恢复(图5、图9)。其次,非洲大陆国家边境武装冲突产生了局部影响。突发公共卫生事件等疾病爆发导致非洲环境动荡,暴力行为与森林资源争夺加剧^[3,20];当然,冲突也可能延缓或暂停森林开采活动。

本文还表明28%的森林减少与活跃火关联并不明显,多见于科特迪瓦—马里—布基纳法索、毛里塔尼亚—马里、乍得—苏丹、刚果共和国—刚果民主共和国、卢旺达—布隆迪及肯尼亚—埃塞俄比亚—索马里等边境。这说明活跃火并非非洲大陆国家边境森林减少唯一诱因。此外,干旱、高温、虫灾等因素都可能导致森林减少^[20]。非洲大陆国家边境森林变化驱动因素复杂多样,不同时空尺度具有不同变化,未来需加强其他因素归因分析^[16,20]。

5.2 加强精细尺度下非洲森林变化与活跃火发生发展关系研究

基于年际10 m土地覆被数据的非洲大陆国家边境森林变化分析,较以往30 m等中低分辨率产品分析更加可信^[32]。现有森林年际数据虽具有较高空间分辨率,仍缺乏年内森

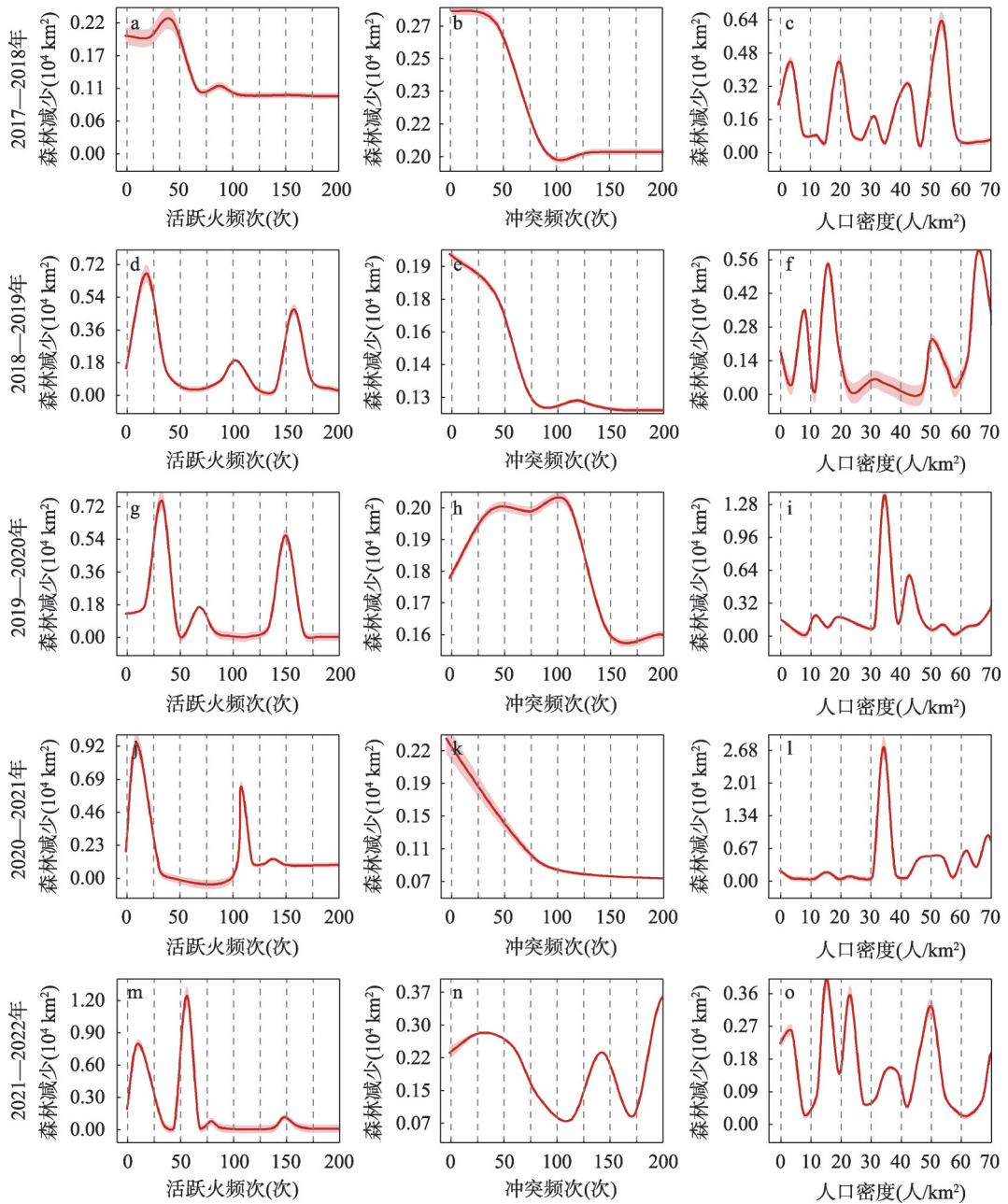


图 12 2017—2022年非洲大陆国家边境驱动因子偏依赖

Fig. 12 Partial dependence within the international borders of continental Africa during 2017-2022

林扰动数据集。VIIRS活跃火数据具有较高时间分辨率^[47]，但对于全球特别是热带小规模火情（如伐木与刀耕火种）识别与监测仍力不从心^[48]，导致火情遗漏现象普遍^[44]。当前，火已成为热带森林扰动最重要因素，也是热带农林生产实践主要手段^[49]。囿于现有光学卫星在重访周期、空间分辨率、光谱分辨率等技术瓶颈及云影干扰，未来宜加强 Sentinel-1/2与 Landsat-8/9数据融合以提供时间更精细（5~8 d）、空间更准确（10~30 m）的森林扰动与活跃火时序产品，在时空对等尺度上揭示活跃火所致森林变化扰动过程。

鉴于国家间地缘经济合作对边境土地利用变化影响的剧烈性、渐进性和持续性,时空精细化土地覆被时序产品亦可助力探索区域一体化、地缘经济合作对边境土地利用变化的影响及其响应过程^[6, 50]。

6 结论

作为地缘经济学与土地变化科学新兴交叉议题,地缘经济合作与边境土地利用渐受关注。非洲大陆主权国家边境复杂多样且特色鲜明,且非洲一体化进程蓬勃发展,为评估边境森林等土地覆被变化及其主要因素贡献提供了独特的地缘与政策背景。全球 Sentinel-2 10 m土地覆被产品亦为探索非洲一体化与边境土地利用变化研究提供了契机。利用GIS技术分析2017—2022年非洲大陆国家边境森林变化,基于随机森林回归与相关性分析探索活跃火、人口密度与武装冲突对边境森林变化贡献。研究结论有:①非洲大陆国家边境森林、草灌与裸地近占90%,从赤道向南、北表现为森林、裸地、草灌及其交互分布。②非洲大陆国家边境土地覆被变化占到11.58%,年均变化2%,突出表现为森林萎缩和草灌、裸地扩张,以2020年尤为显著。③热带非洲大陆国家边境有超71%的森林变化受到活跃火影响,近九成存在强正相关性。森林变化与活跃火相关性受活跃火发生发展的季节性影响由赤道向南北两侧递增,年际差异小于年内差异。旱季活跃火对非洲大陆国家边境森林减少正向影响最大,集中分布于几内亚、南苏丹、赞比亚及其毗邻国家边境。④活跃火是影响非洲国家边境森林变化主要因素,贡献超六成;人口密度次之,贡献约二成。

参考文献(References)

- [1] Li P, Xiao Z. Impervious surface expansion in the China-Laos border area under the context of geo-economic cooperation: A case study of the Mohan-Boten Economic Cooperation Zone. *GIScience & Remote Sensing*, 2022, 59(1): 2184-2201.
- [2] Schon J, Koren O. Introducing AfroGrid, a unified framework for environmental conflict research in Africa. *Scientific Data*, 2022, 9(1): 116. DOI: 10.1038/s41597-022-01198-5.
- [3] Nolte K, Sipangule K, Wendt N. Agricultural households in times of crisis. The COVID-19 pandemic, livelihoods and land-use decisions. *Journal of Land Use Science*, 2022, 17(1): 134-160.
- [4] Zhu A X, Lu G N, Liu J, et al. Spatial prediction based on Third Law of Geography. *Annals of GIS*, 2018, 24(4): 225-240.
- [5] Li Peng, Qi Yueji, Feng Zhiming, et al. Dynamic characteristics of agricultural expansion and forest loss in the Cambodia-Laos-Vietnam Development Triangle Area under the context of geo-cooperation. *Resources Science*, 2021, 43(12): 2416-2427. [李鹏, 祁月基, 封志明, 等. 地缘合作背景下柬老越发展三角区农进林退动态特征. *资源科学*, 2021, 43(12): 2416-2427.]
- [6] Xiao C W, Li P, Feng Z M, et al. Global border watch: From land use change to joint action. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 103(10): 102494. DOI: 10.1016/j.jag.2021.102494.
- [7] Bohn T J, Vivoni E R, Mascaro G, et al. Land and water use changes in the US-Mexico border region, 1992-2011. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(11): 114005. DOI: 10.1088/1748-9326/aae53e.
- [8] de la Vega-Leinert A C, Huber C. The down side of cross-border integration: The case of deforestation in the Brazilian Mato Grosso and Bolivian Santa Cruz Lowlands. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 2019, 61(2): 31-44.
- [9] Kuemmerle T, Radeloff V C, Perzanowski K, et al. Cross-border comparison of land cover and landscape pattern in Eastern Europe using a hybrid classification technique. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 103(4): 449-464.
- [10] Metherall N, De Fretes D R, Mandibondibo F, et al. Assessing the development impact of the sota border post connecting Indonesia and Papua New Guinea. *Papua Journal of Diplomacy and International Relations*, 2022, 2(2): 95-122.

- [11] Zhuo Y Y, Wang M Y, Liu Z J, et al. Border fences reduce potential for transboundary migration of Marco Polo Sheep (*Ovis ammon polii*) in the Pamir Plateau. *Science of The Total Environment*, 2024, 912(7): 169298. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169298.
- [12] Obeng-Odoom F. The African continental free trade area. *American Journal of Economics and Sociology*, 2020, 79(1): 167-197.
- [13] Musara M, Maredza A. Intra-Africa immigrant entrepreneurship for intra-African trade and economic development: Towards a borderless Africa. *Ekonomski Vjesnik*, 2022, 35(2): 367-381.
- [14] Jebiwott A, Ogendi G M, Agbeja B O, et al. Mapping the trends of forest cover change and associated drivers in Mau Forest, Kenya. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2021, 23(3): 100586. DOI: 10.1016/j.rsase.2021.100586.
- [15] Hoppe-Speer S, Adams J B, Bailey D. Present state of mangrove forests along the Eastern Cape coast, South Africa. *Wetlands Ecology and Management*, 2015, 23(3): 371-383.
- [16] Wei X X, Liu Y, Qi L, et al. Monitoring forest dynamics in Africa during 2000-2020 using a remotely sensed fractional tree cover dataset. *International Journal of Digital Earth*, 2023, 16(1): 2212-2232.
- [17] Gondwe M, Chirwa P, Cho M A, et al. Key drivers of LULCC in co-managed and government-managed forest reserves in Malawi (1999-2018). *International Forestry Review*, 2022, 24(1): 1-14.
- [18] Leroux L, Bégué A, Lo Seen D, et al. Driving forces of recent vegetation changes in the Sahel: Lessons learned from regional and local level analyses. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 191(4): 38-54.
- [19] Wang S K, He S L, Wang J L, et al. Analysis of land use/cover changes and driving forces in a typical subtropical region of South Africa. *Remote Sensing*, 2023, 15(19): 4823. DOI: 10.3390/rs15194823.
- [20] Phiri D, Morgenroth J, Xu C. Long-term land cover change in Zambia: An assessment of driving factors. *Science of the Total Environment*, 2019, 697(52): 134206. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134206.
- [21] Sayedi S S, Abbott B W, Vanniere B, et al. Assessing changes in global fire regimes. *Fire Ecology*, 2024, 20(1): 18. DOI: 10.1186/s42408-023-00237-9.
- [22] Wan C Y, Roy S S. Geospatial characteristics of fire occurrences in southern hemispheric Africa and Madagascar during 2001-2020. *Journal of Forestry Research*, 2023, 34(2): 553-563.
- [23] FAO. Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. Rome, 2020. DOI: 10.4060/ca9825en.
- [24] Kuuwill A, Kimengsi J N, Campion B B. Pandemic-induced shocks and shifts in forest-based livelihood strategies: Learning from COVID-19 in the Bia West District of Ghana. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(6): 64033. DOI: 10.1088/1748-9326/ac70ed.
- [25] Bax V, Francesconi W. Environmental predictors of forest change: An analysis of natural predisposition to deforestation in the tropical Andes region, Peru. *Applied Geography*, 2018, 91(2): 99-110.
- [26] Sinumvayo J P, Munezero P C, Tope A T, et al. Vaccination and vaccine-preventable diseases in Africa. *Scientific African*, 2024, 24(2): e02199. DOI: 10.1016/j.sciaf.2024.e02199.
- [27] Hargreaves J D. African boundaries: A legal and diplomatic encyclopaedia. *African Affairs*, 1979, 78(313): 565-566.
- [28] Flesch A D, Epps C W, Cain J W, et al. Potential effects of the United States-Mexico border fence on wildlife. *Conservation Biology*, 2010, 24(1): 171-181.
- [29] Illés I. Borders and cross-border co-operation in the countries of central and south-eastern Europe. *Comparative Southeast European Studies*, 2002, 51(4-6): 289-302.
- [30] Beck H E, Zimmermann N E, McVicar T R, et al. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 2018, 5(1): 180214. DOI: 10.1038/sdata.2018.214.
- [31] Karra K, Kontgis C, Statman-Weil Z, et al. Global land use/land cover with Sentinel 2 and deep learning. 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2021: 4704-4707.
- [32] Chen Shengmei, Li Peng, Feng Zhiming, et al. Forest disturbance process caused by the expansion of agricultural and construction lands in the border zones of Mainland Southeast Asian countries and their neighbors. *Progress in Geography*, 2024, 43(4): 741-754. [陈生媚, 李鹏, 封志明, 等. 中南半岛及其毗邻国家边境农用地/建设用地扩张所致森林扰动过程. *地理科学进展*, 2024, 43(4): 741-754.]
- [33] Schroeder W, Oliva P, Giglio L, et al. The new VIIRS 375m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 143(4): 85-96.
- [34] Li Peng, Liu Ying, Shi Dong, et al. Comparison of the consistency and discrepancy of three remotely-sensed active fire products (MODIS C6, VIIRS V1 and VIIRS J1). *Geographical Research*, 2022, 41(5): 1481-1495. [李鹏, 刘颖, 施冬, 等. 三种活跃火遥感产品(MODIS C6、VIIRS V1和VIIRS J1)一致性与差异性对比. *地理研究*, 2022, 41(5): 1481-1495.]

- [35] Xu H, Lian X, Slette I J, et al. Rising ecosystem water demand exacerbates the lengthening of tropical dry seasons. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 4093. DOI: 10.1038/s41467-022-31826-y.
- [36] Bright E A, Coleman P R, Dobson J E. LandScan: A global population database for estimating populations at risk. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2000, 66(7): 849-858.
- [37] Davies S, Pettersson T, Öberg M. Organized violence 1989-2022, and the return of conflict between states. *Journal of Peace Research*, 2023, 60(4): 691-708.
- [38] Breiman L. Random forests. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5-32.
- [39] Fang Kuangnan, Wu Jianbin, Zhu Jianping, et al. A review of technologies on random forests. *Statistics and Information Forum*, 2011, 26(3): 32-38. [方匡南, 吴见彬, 朱建平, 等. 随机森林方法研究综述. *统计与信息论坛*, 2011, 26(3): 32-38.]
- [40] Du Shukun, Zhang Jing, Han Zhijun, et al. Armed conflict risk prediction and influencing factors analysis based on the random forest model at the grid-month scale: A case study of Indochina Peninsula. *Journal of Geo-Information Science*, 2023, 25(10): 2026-2038. [杜树坤, 张晶, 韩志军, 等. 基于随机森林模型的“网格—月”尺度武装冲突风险预测及影响因素分析: 以中南半岛为例. *地球信息科学学报*, 2023, 25(10): 2026-2038.]
- [41] Pearson K. Notes on the history of correlation. *Biometrika*, 1920, 13(1): 25. DOI: 10.1093/biomet/13.1.25.
- [42] Malahayati M, Masui T, Anggraeni L. An assessment of the short-term impact of COVID-19 on economics and the environment: A case study of Indonesia. *Economia*, 2021, 22(3): 291-313.
- [43] Li Peng, Jin Xianghao, Li Xia. How do tropical active fires respond to intra-annual climate change in the early 21st century? *Geography and Sustainability*, 2025, 6(3): 100253. DOI: 10.1016/j.geosus.2024.100253.
- [44] van Wees D, van der Werf G R, Randerson J T, et al. The role of fire in global forest loss dynamics. *Global Change Biology*, 2021, 27(11): 2377-2391.
- [45] Goffner D, Sinare H, Gordon L J. The Great Green Wall for the Sahara and the Sahel Initiative as an opportunity to enhance resilience in Sahelian landscapes and livelihoods. *Regional Environmental Change*, 2019, 19(5): 1417-1428.
- [46] Biauou S, Gouwakinnou G N, Biauou H S S, et al. Identifying the land use and land cover change drivers: Methods and case studies of two forest reserves in Northern Benin. *Environment, Development and Sustainability*, 2022, 24(8): 9885-9905.
- [47] Liu Ying, Li Peng, Xiao Chiwei, et al. Spatial characteristics and national differences of active fires derived from Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) in Mainland Southeast Asia in the dry season during 2012-2019. *Progress in Geography*, 2021, 40(8): 1406-1418. [刘颖, 李鹏, 肖池伟, 等. 中南半岛旱季VIIRS活跃火的空间特征与国别差异. *地理科学进展*, 2021, 40(8): 1406-1418.]
- [48] Miettinen J, Stibig H J, Achard F. Remote sensing of forest degradation in Southeast Asia: Aiming for a regional view through 5-30 m satellite data. *Global Ecology and Conservation*, 2014, 2(2): 24-36.
- [49] Li Xia, Jin Xianghao, Li Peng. Land conversion between agriculture and forestry and its contributing role of active fires in Mainland Southeast Asia over the past two decades. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(24): 256-265. [李霞, 金相皓, 李鹏. 中南半岛近20年农林转换及其活跃火贡献. *农业工程学报*, 2024, 40(24): 256-265.]
- [50] Hu Tao, Peng Jian, Dong Jianquan, et al. Forest definitions collaboration based on global remote sensing data products. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(5): 1115-1128. [胡涛, 彭建, 董建权, 等. 基于全球遥感产品的森林概念协同. *地理学报*, 2024, 79(5): 1115-1128.]

Forest change and the contributions of major influencing factors along international borders in the context of regional integration of African continent

TANG Mengya¹, LI Peng^{2,3}, LI Xia¹, CHEN Shengmei⁴, Jeffrey Chiwiikem CHIAKA^{5,6}

(1. School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 5. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 6. Anambra-Imo River Basin Development Authority, Owerri 1301, Nigeria)

Abstract: Economic globalization and regional integration have pushed international borders from closure to opening-up, making them a hot spot for studying human-environment relations. The promotion of African integration has lasted for decades and has also affected cross-border landscape and land use. Since the signing of the African Continental Free Trade Area Agreement, the processes of forest loss and gain and other land cover change within international borders of continental Africa and its main influencing factors (e.g., active fire) as well as their contribution remain understudied. With the Sentinel-2 10-m land use/land cover products, Suomi National Polar-orbiting Partnership Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) active fires, LandScan population density, and armed conflict records during 2017-2022, we first examined the inter-annual dynamics and cross-transformations between forest (trees), rangeland (grass and shrub), and bare ground within a total of 146 international borders of the African continent, covering 49 countries. We then determined the major influencing factors and quantified their contribution using Random Forest Regression and correlation analysis. The results show that: (1) the international borders of continental Africa are characterized by a general distribution pattern of forest, rangeland, and bare ground in a sequential order in both the northern and southern parts, divided by the equator. The three land cover types account for nearly 90% of all borders, and dominate (>80%) the change in land cover at the borders with an average annual rate of 2%. Forest loss due to the transformation into rangeland remains a major trend albeit short-term forest gain in 2020. (2) Active fire and population density are the primary and secondary respectively causes of forest cover change along national borders in Africa. The relationship between forest changes and the frequency of active fire or population density is initially weak and then strong during the study period. (3) Nearly 90% of interannual forest loss is strongly and positively correlated with the occurrence of active fires along the international borders of continental Africa, showing a gradual increase on both the northern and southern sides of the equator due to the seasonal dynamics of active fires. (4) Active fires have a more pronounced impact on forest decline within African borders during dry seasons. This study contributes to providing a methodological reference for exploring the causal factors of tropical forest change and the extent to which land-use change at the borders responds to regional integration.

Keywords: border land use; geo-economic cooperation; forest loss; active fire; Random Forest Regression; continental Africa