

# 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

陈生媚<sup>1</sup>, 李 鹏<sup>2,3\*</sup>, 封志明<sup>2,3</sup>, 施 冬<sup>1</sup>

(1. 长江大学地球科学学院, 武汉 430100; 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)

**摘 要:**全球特别是热带国家间地缘合作驱动着边境森林转换等土地利用变化。相较热带特定森林类型扰动, 边境森林干扰及其对国家间地缘合作响应机制等研究明显滞后。中南半岛与其毗邻乃至域外大地缘合作和博弈已逾30年, 2020、2021年新冠疫情在迟滞地缘合作与边境发展之余是否对边境森林扰动施加影响? 论文利用2017—2021年Sentinel-2 10 m土地覆被产品, 基于森林转换流向与核密度等方法, 从农用地扩张与建设用地扩展评估了中南半岛及其邻国边境森林扰动过程与特征。结果表明: ①森林是半岛13条边境地带基质覆被类型, 耕草地次之, 建设用地在口岸占据优势。②森林干扰是边境土地覆被与景观变化主导形式, 面积占近50%, 耕地、草地变化所致农用地扩张与建设用地扩展贡献比为9:1。③农用地扩张与口岸建设用地扩展分别是边境森林扰动主要与次要驱动因素。前者所致森林扰动超7成, 后者所致相应占比为3%且呈逐年上升态势, 同时其对森林扰动直接和间接影响国别差异突出。④新冠疫情致使所有边境森林扰动减弱, 柬埔寨居首位, 柬埔寨—老挝边境最突出。边境两侧国家森林扰动减弱具有同步和异步影响特征。

**关键词:**边境土地利用; 地缘经济合作; 森林扰动; 农进林退; 建设用地扩展; 新冠疫情

人口增长、经济发展、基础设施改善等已成为热带森林干扰的重要因素<sup>[1]</sup>, 其所致森林开发和土地利用变化是森林扰动的主要形式<sup>[2]</sup>。1990年以来, 热带森林扰动超1/4<sup>[3]</sup>, 再生林占比已逾6成<sup>[4]</sup>; 未来热带森林景观将呈现以受保护原始森林和次生林为主的格局<sup>[5]</sup>, 既影响森林生态系统平衡<sup>[6]</sup>与生物多样性<sup>[7]</sup>, 也给全球碳循环施加压力<sup>[5]</sup>。相比之下, 有关热带国家间地缘关系变化对其边境森林干扰研究较为薄弱<sup>[8-9]</sup>, 特别是对边境基于热带森林本底的农用地扩张、休耕<sup>[8,10]</sup>与不透水层扩展<sup>[11]</sup>等农进林退、农休林复相关过程缺乏研究。

边境长期是国家经济发展末梢<sup>[10]</sup>, 干扰程度低<sup>[12]</sup>。区域一体化已促使边境成为国家间开放和

区域合作的前沿<sup>[11]</sup>。地缘经济合作促使边境发展与土地利用变化, 其中森林变化与转换等干扰首当其冲<sup>[13]</sup>。地缘合作加剧边境自然林缩减<sup>[14-15]</sup>, 如巴西—秘鲁—玻利维亚<sup>[12]</sup>、土耳其—格鲁吉亚—亚美尼亚<sup>[16]</sup>、西班牙—葡萄牙<sup>[17]</sup>、泰国—柬埔寨<sup>[18]</sup>、捷克—德国<sup>[19]</sup>、波兰—捷克—斯洛伐克<sup>[20]</sup>、纳米比亚—安哥拉<sup>[21-22]</sup>等国家边境表现为森林缩减与结构退化、景观破碎化等。现有森林扰动研究常聚焦保护区<sup>[23]</sup>或热带雨林<sup>[24-26]</sup>, 如亚马逊雨林<sup>[25]</sup>、婆罗洲保护区<sup>[23]</sup>等, 对界山界河两侧边境森林扰动关注不足<sup>[8,27-31]</sup>, 基于地缘合作视角开展森林干扰的特征与过程研究更为鲜见<sup>[8]</sup>。

冷战结束以来, 东南亚国家间意识形态之争随着区域地缘合作兴起而减弱, 区域国家及其毗邻国

收稿日期: 2023-08-26; 修订日期: 2023-11-28。

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 and 42130508.]

第一作者简介: 陈生媚(1997—), 女, 海南乐东人, 硕士生, 研究方向为边境土地利用变化。E-mail: 2021710413@yangtzeu.edu.cn

\*通信作者简介: 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@igsnr.ac.cn

引用格式: 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[J]. 地理科学进展, 2024, 43(4): 741-754. [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.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2024.04.009

家间地缘合作方兴未艾<sup>[8]</sup>。中南半岛及其邻国已成立近40个地缘合作组织/机制<sup>[8]</sup>,促使国家边境土地覆被与利用快速变化,以毁林、退化与转换等森林扰动尤其突出<sup>[8,10,32-33]</sup>。涉及中国—中南半岛交界区橡胶林替代种植、“金三角”农进林退、中—老等口岸建设所致森林缩减<sup>[11,15,34-35]</sup>等。中南半岛及其邻国边境森林干扰研究陆续受到关注<sup>[35]</sup>,但相对零星且缺乏全域边境地带综合对比,滞后于本区日渐加剧的森林扰动。尽管中南半岛与其毗邻乃至域外大国间地缘合作和博弈已逾30载,但始于2020年的新冠疫情在迟滞地缘合作与边境发展之余是否也对边境森林扰动过程施加影响尚缺乏专门探讨<sup>[36-38]</sup>。

为揭示中南半岛及其邻国边境森林扰动特征并回答地缘经济合作与新冠疫情如何影响边境森林扰动过程,本文基于全球2017—2021年Sentinel-2 10 m土地覆被产品,采用GIS空间分析等方法刻画中南半岛及其邻国边境森林缩减、转换等扰动过程,并从建设用地扩展与农用地扩张评估对森林扰动作用方式与贡献,最后量化新冠疫情对主要国家边境森林扰动影响,可为探索中南半岛及其毗国地缘经济合作与土地利用变化相互关系提供启示。

## 1 中南半岛及其毗邻国家13条边境地带

作为亚洲唯一不发达国家带组成部分<sup>[8]</sup>,中南半岛与邻国涉及13条国境线(表1、图1)。边境地带常以山脊线或主要河流为界。根据《关于边境贸易

有关问题的通知》(国发〔1996〕2号),将边界界定为陆域国境线两侧20 km以内狭长地带(简称“半岛13条边境地带”),土地面积为5.11万km<sup>2</sup>,各边境地带自然地理概况见表1。半岛13条边境地带地势北高南低,中缅、印缅边境北部地势最高(>1500 m)。除中缅、印缅北部边境外,其余均处热带,盛行热带季风气候,旱/雨季(5—10月)较为分明。根据Chel-sa 1 km气候数据,全区年均温度29.63℃,最高温(4月)、最低温(1月)分别为30℃、25℃;年均降水量为1951.54 mm。全区森林资源丰富,以热带雨林和季雨林为主。边境是少数民族聚集区,以农业为主,人口密度普遍较低(75人/km<sup>2</sup>),交通设施发展落后。根据世界国家划分体系<sup>[39]</sup>,将半岛13条边境地带划分三类(图1),分别为中、印与半岛国家接壤地区(A类),泰、越两国与邻国接壤地区(B类),孟、缅、老、柬四国接壤地区(C类)。

## 2 数据来源及方法

### 2.1 Sentinel-2 10 m 土地覆被产品及其预处理

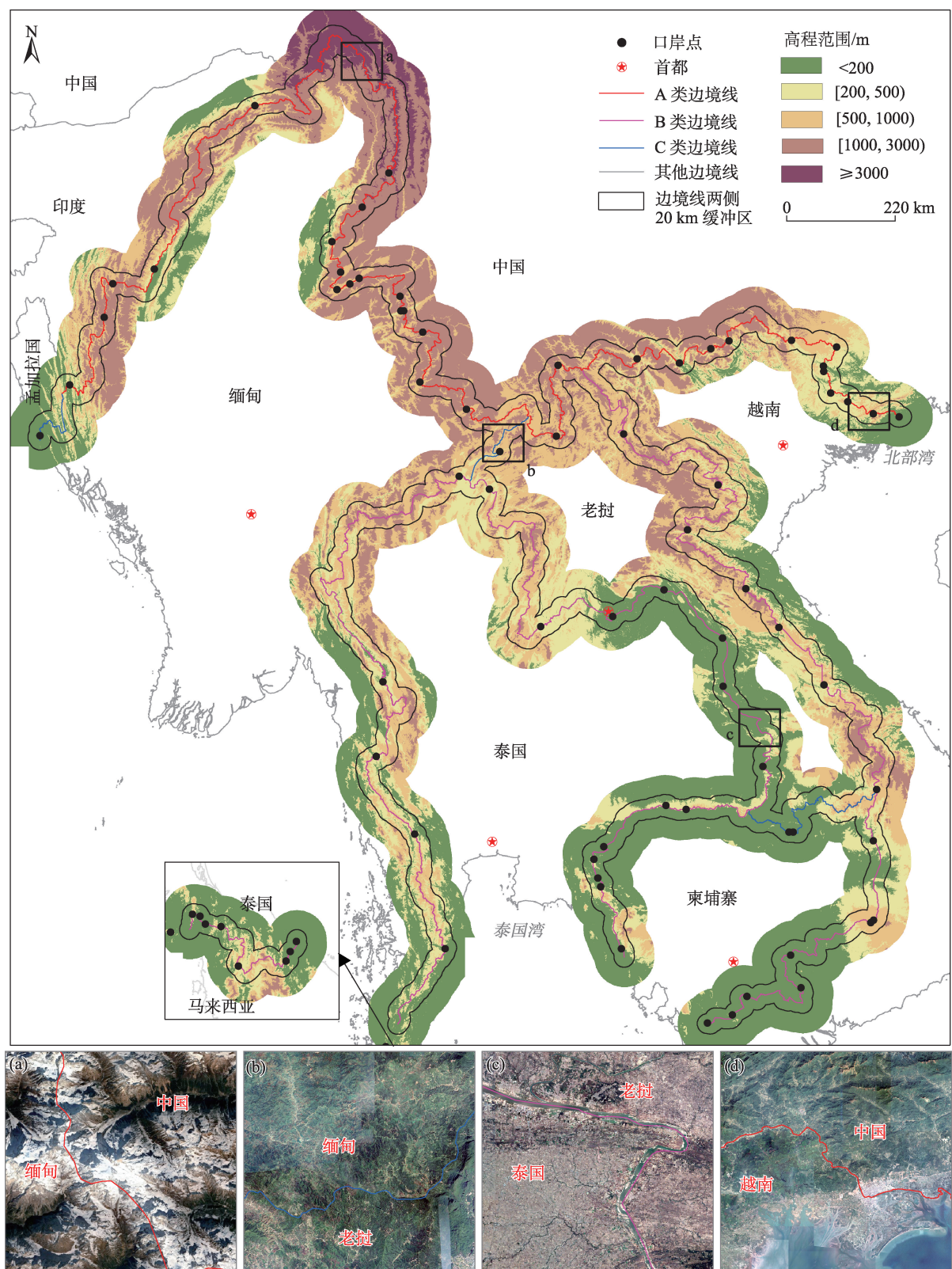
2017—2021年10 m土地覆被产品由ESRI公司2022年在线发布。该产品利用全球历年可获取Sentinel-2 A/B影像并基于深度学习模型<sup>[40]</sup>研制而成,具有较高空间分辨率<sup>[40]</sup>与较高总体精度(85%)<sup>[40]</sup>,可满足区域森林干扰与不透水层扩张等渐变景观变化研究<sup>[40]</sup>。数据涵盖9种土地覆被类型(水体、森林、淹没植被、耕地、建设用地、裸地、冰雪、云阴影与草地)。共获取2017—2021年研究区40景数据,每年8景(经度6°×纬度8°)。全区超72%处热带季

表1 中南半岛与毗邻国家13条边境地带概况

Tab.1 Overview of the 13 border zones between Mainland Southeast Asian countries and their neighbors

国家边境	国境线/km	土地面积/万 km <sup>2</sup>	人口密度/(人/km <sup>2</sup> )	森林占比/%	平均海拔/m	年均温度/℃	年均降水量/mm
中国—缅甸(中缅)	2250	7.342	44	14.19	1895.99	28.82	1750
中国—越南(中越)	1290	4.408	105	9.02	805.33	29.34	1670
中国—老挝(中老)	440	1.480	33	3.28	1025.34	29.41	1700
印度—缅甸(印缅)	1510	5.341	30	12.40	1164.34	29.19	2150
缅甸—孟加拉国(缅孟)	230	0.774	168	1.78	192.51	29.77	2480
缅甸—老挝(缅老)	250	0.678	19	1.68	810.01	29.58	1750
泰国—缅甸(泰缅)	2310	7.316	34	16.99	537.61	29.77	2070
泰国—老挝(泰老)	1790	6.537	77	10.24	393.52	29.86	1720
泰国—柬埔寨(泰柬)	730	2.544	133	2.91	178.34	30.00	1770
泰国—马来西亚(泰马)	500	1.637	122	3.99	242.69	29.93	2000
越南—老挝(越老)	2050	7.012	36	16.06	795.52	29.47	1860
越南—柬埔寨(越柬)	1060	3.696	161	3.98	173.95	30.06	2040
老挝—柬埔寨(老柬)	490	1.419	18	3.48	256.76	30.01	2410





注：本图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)2890号的标准地图对比制作，底图无修改。下同。

图1 中南半岛与毗邻国家13条边境地带地形特征

Fig.1 Location of the 13 border zones between Mainland Southeast Asian countries and their neighbors and topography

风气候区,草地稀少,本文将草地定义为森林干扰后恢复的新生草/灌。为便于量化农用地及建设用地扩展对森林扰动影响,将草地、耕地增加统称为农用地扩张,建设用地及其备用地增加定义为建设用地扩展。基于 ArcGIS 对其栅格影像裁剪拼接、覆被转换栅格计算<sup>[41]</sup>、按属性提取主要变化覆被、数据格式转换等预处理;通过计算耕地、草地和建设用地扩展点核密度判断边境森林扰动重点区域。

## 2.2 边境口岸数据收集及其数字化处理

半岛 13 条边境地带包括国家级口岸(一类)与省级口岸(二类)。结合 Google Map 和 Google Earth 等网络资料,在统计、分类和校正基础上,笔者对中南半岛及其邻国边境地区一、二类口岸进行了数字化,并更新其属性信息。涉及各类口岸 105 对(图 1),一类口岸位于中越(10 对)、中老(2 对)、中缅(5 对)、泰缅(4 对)、泰老(20 对)、泰柬(7 对)、泰马(8 对)、缅孟(1 对)、缅印(2 对)、缅老(1 对)、越老(8 对)、越柬(11 对)、柬老(1 对)边境,共 80 对;二类口岸位于中越(4 对)、中缅(8 对)、中老(1 对)、泰缅(2 对)、泰柬(10 对)边境,共 25 对。边境地带其他临时过境点和边民互市贸易点及各类通道未在本文考虑之列。其中,地图可视化只显示单个口岸,对于空间邻近的二类口岸只统计陆路过境口岸。基于口岸数据,拟回答边境建设用地扩展与口岸地理分布相关关系。

## 2.3 森林干扰评估指数与核密度分析

利用综合土地利用度<sup>[41]</sup>分别计算半岛 13 条边境地带 2017—2021 年土地覆被(尤其是森林)逐年宏观变化。利用单一覆被动态度<sup>[41]</sup>评价边境森林扰动及其与其他主要覆被类型转换时空动态特征,为后续森林面积变化速率与幅度提供校正参考。通过 GIS 栅格计算器与转移矩阵绘制 13 条边境地带研究期内森林变化态势图谱<sup>[42]</sup>,分析其森林增减规模、流向趋势,以及农用地扩张与建设用地扩展等对森林扰动的作用方式与影响规模。利用核密度分析<sup>[43]</sup>估算单位面积(km<sup>2</sup>)内建设用地和耕/草地扩张(经过栅格转点)相应点的空间密集程度,并按

照标准差划分法<sup>[44]</sup>分为低、中、中高、高、较高 5 个等级(表 2),以突出建设用地扩展和耕草地扩张及其森林缩减特征与规律。最后,选定森林扰动核密度高(建设用地>85 万/km<sup>2</sup>、耕地>635 万/km<sup>2</sup>、草地>504 万/km<sup>2</sup>)的边境地带开展局部定量评估。

## 3 结果与分析

### 3.1 半岛 13 条边境地带森林扰动时空变化总体特征

#### 3.1.1 以森林覆盖为主的时空分布特征

森林是半岛 13 条边境带最主要的土地覆被与自然景观类型。2017—2021 年森林年均变化面积约 33 万 km<sup>2</sup>。森林在各国边境集中连续分布,印缅、泰缅、越老、老柬与老缅等边境尤为突出。在耕草地分布较集中的泰老、柬越与柬泰等边境,森林斑块相对稀疏破碎。整体来看,边境地带呈现以森林为“基质”,耕地、草地在边境线两侧呈相对平行分布,建设用地为“团聚斑块”,裸地集中在高海拔地区的土地覆被分布格局。各国边境地带森林土地覆被覆盖度均>70%(柬埔寨 42%、泰国 64%除外,图 2a);年际各覆被土地覆盖度均以森林为主(>70%,图 2b)。

#### 3.1.2 以森林缩减为主的时空演变特征

半岛 13 条边境地带土地覆被结构变化剧烈。2017—2021 年土地覆被年均变化面积达 1.6 万 km<sup>2</sup>,突出表现为森林剧烈缩减,耕地、建设用地逐年增加(表 3)。其中,2017—2018 年土地覆被变化最为剧烈,土地综合利用度最高,总变化面积达 2.0 万 km<sup>2</sup>。次年起变化速率逐年减缓(减幅 26%),新冠疫情期尤为明显。2020—2021 年所有边境地带毁林程度有所降低,但缩减量仍达 1 万 km<sup>2</sup>。特别地,泰老、泰缅、柬越等边境地带 2020—2021 年出现大规模草地向森林转变,森林增幅分别为 9%、4%、8%,森林恢复 15 万 km<sup>2</sup>(占当年覆被总变化的 39%,图 2d)。然而,森林净增长规模仍远低于历年净缩减量。

表 2 不同土地覆被类型扩展强度核密度划分标准

Tab.2 Kernel density classification criteria of expansion strength of various land cover types

(万/km<sup>2</sup>)

等级	低	中	中高	高	较高
建设用地	0~28	>28~85	>85~157	>157~275	>275
耕地	0~206	>206~635	>635~1327	>1327~2654	>2654
草地	0~108	>108~504	>504~900	>900~1296	>1296

注:单位万/km<sup>2</sup>表示建设用地扩展或耕地、草地扩张的强度。

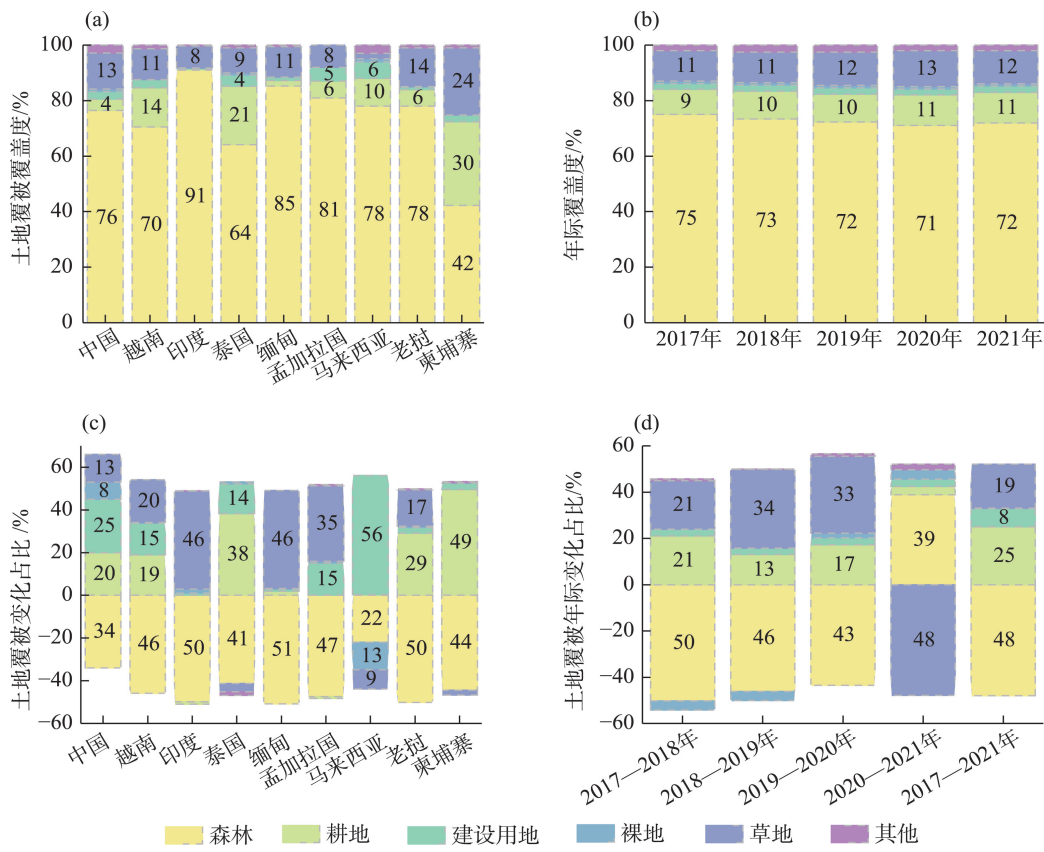


图2 2017—2021年半岛13条边境地带及各国边境土地覆被概况

Fig.2 Overview of land cover types in the 13 border zones between Mainland Southeast Asian countries and their neighbors during 2017–2021

表3 2017—2021年半岛13条边境带土地动态度

Tab.3 Land use dynamic degree in the 13 border zones between Mainland Southeast Asian countries and their neighbors during 2017–2021 (%)

类型		2017—2018年	2018—2019年	2019—2020年	2020—2021年	2017—2021年
单一土地动态度	森林	-2.53	-1.95	-1.72	1.68	-1.12
	耕地	8.44	3.95	4.57	1.23	4.83
	建设用地	8.82	6.95	5.47	5.30	7.32
	裸地	-48.91	-28.26	73.06	66.85	1.46
	草地	7.54	9.20	7.47	-10.78	3.15
综合土地动态度		2.20	1.62	1.62	1.69	0.93

新冠疫情前(2017—2019年),半岛13条边境地带森林逐年大规模缩减,扰动占比近50%(图2d);之后,森林不减反增,有1.30万km<sup>2</sup>草地转入森林(扰动占比48%)。各国森林以缩减为主,但国别差异大(图2c)。除中国和马来西亚之外,各国缩减规模超2/5,其中缅、老、印三国边境森林扰动占比最大(约50%)。综合看,全区森林(占比超70%)、耕地(占比超10%)基数大(图2b),年变化速率及幅度小(低于2%和5%),表现为“基数大、变化小”。草地与耕地覆

盖度相当(10%),但年变化速率与幅度大,如2021年前呈正增长模式(图2d),2021年骤降(-7000 km<sup>2</sup>/a),减幅超98%,即“基数大、变化大”。边境建设用地(占比2%~3%)则为“基数小、变化小”(增幅低于10%)。

半岛13条边境地带森林、耕/草地和建设用地覆被间转换占据主导。第一,森林向耕草地转换(95%)是5年森林扰动(图3c)主导方向,向建设用地转换(3%)是次要流向。建设用地所致森林扰动占



比不高,但其作为建设用地扩展第一转入来源(43%)所致毁林(988 km<sup>2</sup>)不容小觑。此外,耕/草地(二者合计50%)亦是建设用地扩展转入来源(图3a),建设用地扩展导致耕/草地减少的同时也促进耕/草地加剧森林扰动。第二,耕/草地及建设用地每年所致森林扰动占比稳定(耕/草地二者合计超90%、建设用地约3%)。相对于耕地与建设用地对森林扰动的持续性影响,草地与森林呈现出“补偿式”交替转换(5年二者互转过7成,图3c),且草转林面积于2021年达到峰值(74%)。第三,草地作为耕地的第一转入来源(53%,图3c),是森林转向耕地的“过渡类型”,草地向耕地的年均转换率超

29.5%(图3b)。农用地扩张与建设用地扩张是半岛13条边境地带森林扰动的两大主因。

### 3.2 农用地扩张所致边境森林扰动分析

#### 3.2.1 耕/草地增加所致农用地扩张基本态势分析

半岛13条边境地带5年内耕/草地二者总扩张居各覆被之首,总扩张面积8190 km<sup>2</sup>,年均增长1600 km<sup>2</sup>。空间上,耕地扩张斑块在泰—老边境南部以及越—柬、泰—柬等边境连片集中分布,且同一国家与不同邻国的边境耕地扩张强度差异明显。如泰—老边境耕地(3760万/km<sup>2</sup>)扩张强度大于泰—缅边境(<629万/km<sup>2</sup>),越—柬边境(3000万/km<sup>2</sup>)强度大于越—老边境(<1300万/km<sup>2</sup>)。具体地,同一边境两

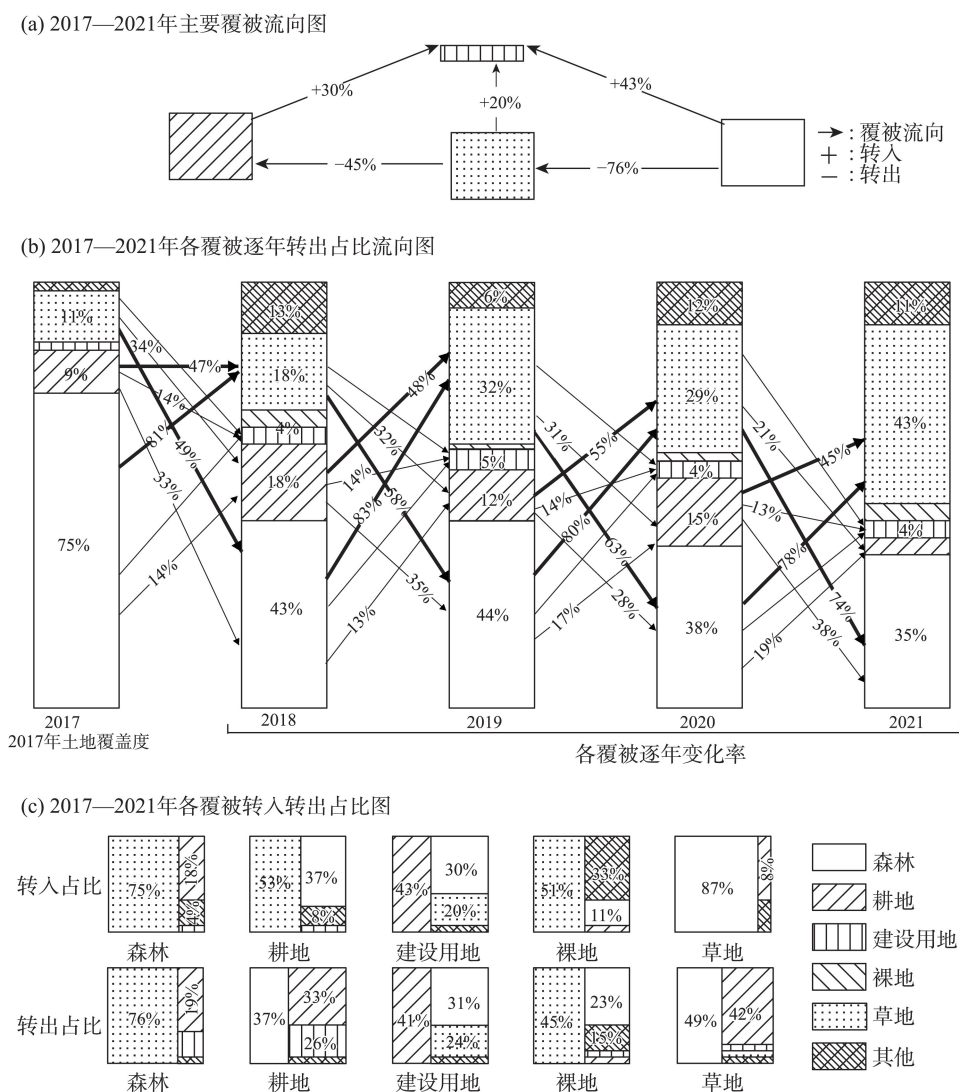


图3 半岛13条边境地带2017—2021年不同土地覆被年际流向及占比

Fig.3 Interannual flow direction and proportion of land cover conversion in the 13 border zones between Mainland Southeast Asian countries and their neighbors during 2017–2021

侧耕地扩张也呈现较大差异。如柬—越边境耕地扩张面积为 3390 km<sup>2</sup>, 柬埔寨占比过半。中国与越、老、缅三国边境以中国一侧扩张为主, 如中越边境中国一侧耕地扩张占比超 6 成。

草地扩张斑块在泰—老、柬—越边境呈现密集和均匀的分布特征。相较耕地扩张, 草地扩张空间特征不稳定。如 2018 年柬—越边境草地扩张规模最大(3668 万/km<sup>2</sup>), 2019 年越—老边境中南部草地扩张增强(1378 万/km<sup>2</sup>), 2020 年泰—缅边境(2825 万/km<sup>2</sup>)和 2021 年印—缅边境(1969 万/km<sup>2</sup>)、中—越边境(956 万/km<sup>2</sup>)扩张突出。

半岛 13 条边境地带农用地空间移动特征突出。第一, 边境耕地扩张“抵边”“离边”差异显著。其中, 泰—柬边境北部, 柬国一侧为“单边抵边”(图 4a), 5 年间抵边扩张趋势明显, 且主要集中在边境线 10 km 以内(扩张占比 42%~54%); 在泰—柬边境北部柬国另一处, 5 年间耕地扩张则偏离边境线方向扩张, 5~15 km 内扩张占比 56%(2020—2021 年), 呈现“单边离边”态势(图 4b)。同样, 越—老边境中南部(图 4c), 耕地朝边境方向扩张, 5 年间边境线 10 km 内耕地每年扩张面积超 56%, 呈“双向抵边”趋势。第二, 泰—缅、泰—柬等边境同期呈现土地覆

被变化“趋同性”。随着森林缩减加剧(图 4e), 泰—缅边境林/草混合覆被(81%:18%)逐渐转换为草地单一类型(33%)。泰—柬边境同样由于耕地扩张(图 4f), 耕/草地混合覆被(47%:36%)转换为耕地单一类型(67%)。

### 3.2.2 农用地扩张对半岛 13 条边境地带森林扰动的贡献

以耕/草地扩张为主的农用地扩张是半岛 13 条边境带森林缩减的主导因素。5 年间农用地扩张所致森林缩减面积约 3.0 万 km<sup>2</sup>。各国转至耕/草地的森林面积超 9 成(马来西亚除外), 其中以柬(99%)、老(98%)、缅(97%)、印(96%)最为突出。同期, 除柬埔寨和马来西亚, 各国耕地转入覆被中 9 成以上是草地和森林。森林转出和转入说明农用地扩张是各国边境森林扰动首要驱动因素, 对森林覆被完整性造成了威胁(覆盖度降低 4%)。

边境地带农用地扩张对森林扰动的影响有主次之分。主要影响指越(53%)、孟(50%)、马来西亚(66.5%)等国边境地带耕地扩张以森林转入为主(图 5); 次要影响指老、柬、缅、印等国耕地扩张以草地转入为主, 森林转入辅之(<50%)。草地扩张在耕地与森林间存在间接作用关系, 其作为农用地扩

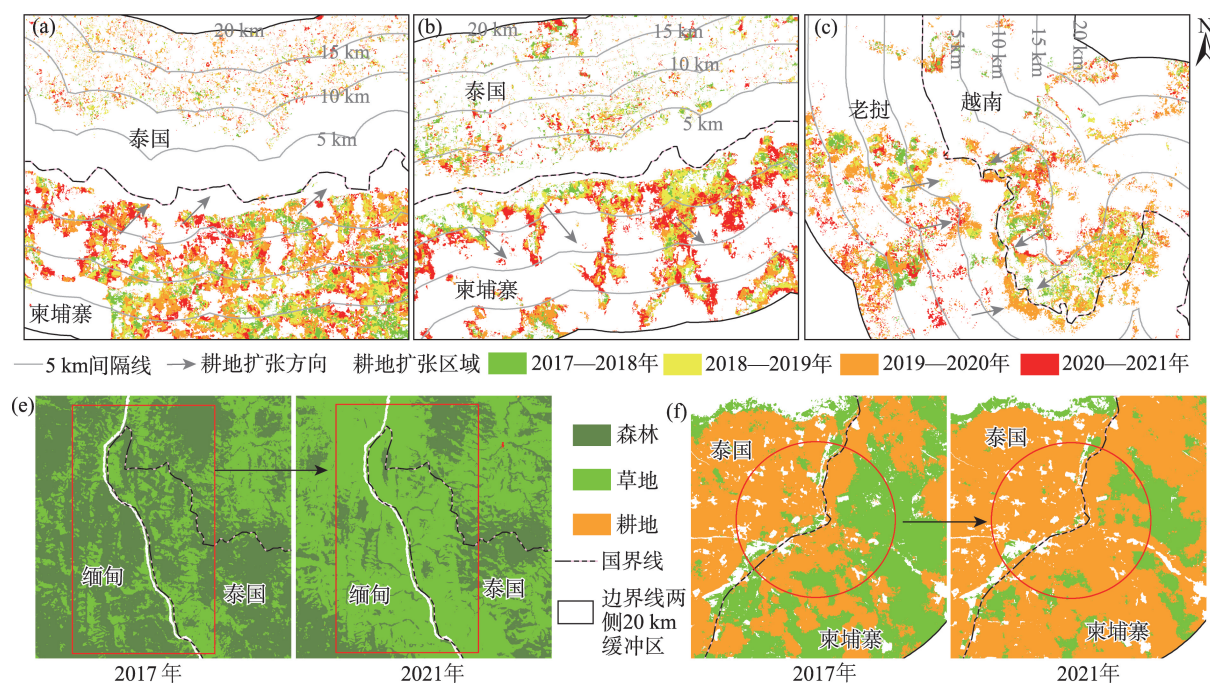


图4 2017—2021年中南半岛国家主要边境地带耕地“抵边离边”扩张与林草耕地“趋同性”变化趋势

Fig.4 Border-approaching and/or border-deviating trends of cropland expansion and convergence trends of forestland, rangeland, and cropland in major border zones among Mainland Southeast Asian countries during 2017–2021

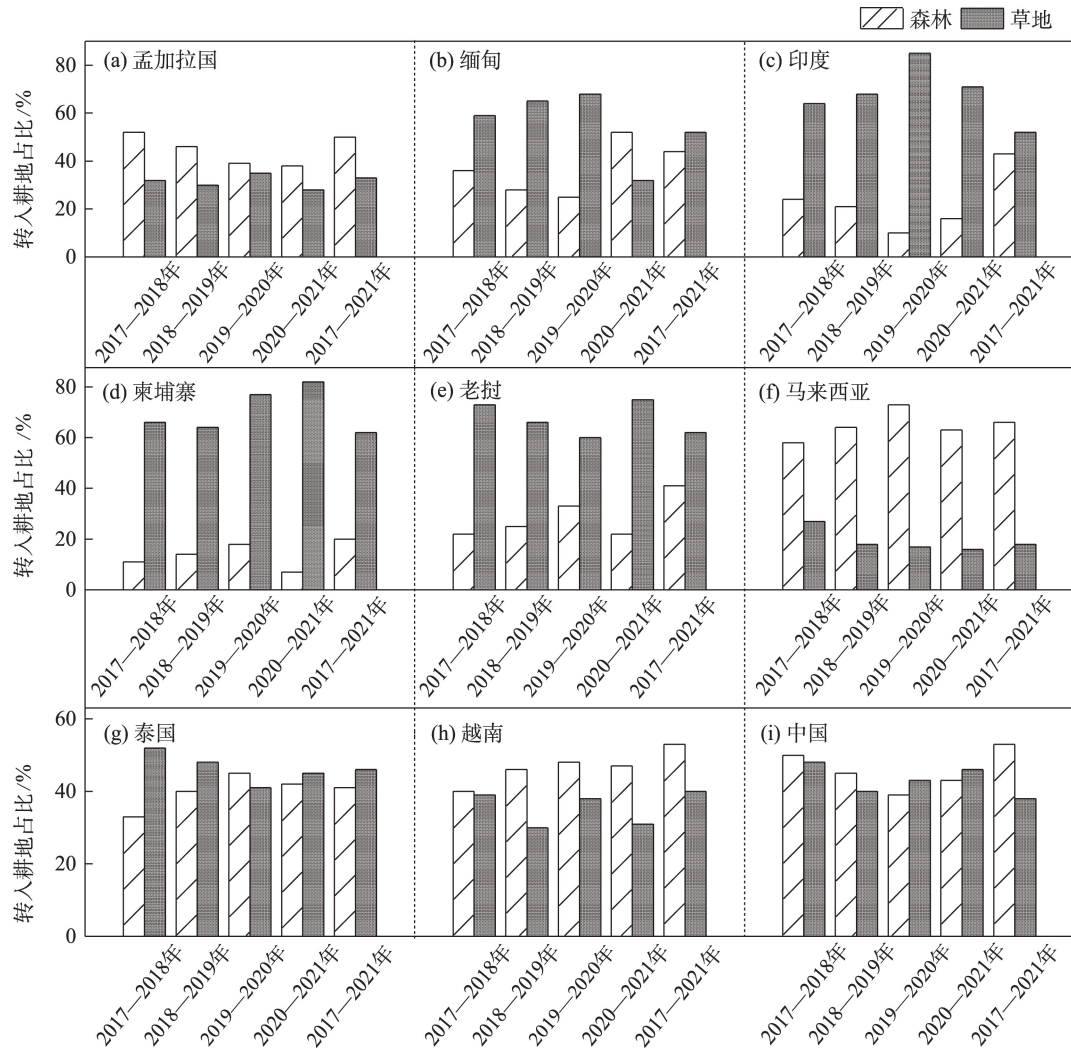


图5 2017—2021年半岛13条边境地带森林、草地转入耕地占比

Fig.5 Proportions of conversion of forestland and rangeland into cropland in the 13 border zones between Mainland Southeast Asian countries and their neighbors during 2017–2021

张中间环节,是耕地短期剧烈扩张结果,且扩张规模与耕地次年扩张规模呈正相关。以柬—越边境为例,2018年森林转入草地达1610 km<sup>2</sup>,次年超90%的扩张草地转入耕地,实现耕地扩张。比较而言,农用地扩张的主要影响对森林扰动有直接、缓慢推进作用,次要影响对森林扰动有间接、快速推进功效。双重影响致使中间覆被(草地)数量大、分布广,加剧森林干扰与退化。

### 3.3 口岸建设用地扩展所致边境森林扰动分析

#### 3.3.1 口岸建设用地扩展基本态势分析

口岸建设用地空间分布特征为:第一,建设用地在边境一、二类口岸及其通道附近(20 km内)扩张突出,斑块大而连续并呈四周辐射状,其余区域斑块零碎。其中,中国—中南半岛口岸(226万/km<sup>2</sup>)、

缅—孟口岸(407万/km<sup>2</sup>)、泰—老第一友谊桥口岸(514万/km<sup>2</sup>)、泰—马口岸(272万/km<sup>2</sup>)和越—柬埔寨口岸(347万/km<sup>2</sup>)建设用地扩展较为突出(图6)。第二,同一国家与不同邻国边境口岸建设用地侧重扩张突出。如老—泰(507万/km<sup>2</sup>)强于老—越(<90万/km<sup>2</sup>)、柬—越(411万/km<sup>2</sup>)强于柬—泰(<230万/km<sup>2</sup>)。第三,同一边境线建设用地扩展国别差异明显,如中、越、泰三国建设用地扩展占比远大于其邻国(超68%)。印—缅(99%:1%)、越—老(83%:17%)、孟—缅(94%:6%)、泰—缅(81%:19%)等边境的印、越、孟、泰建设用地扩展同样远超邻国。第四,口岸建设用地2017—2018年扩张最突出,占5年总扩张的45%(图6a~6c),主要由耕地转入(图6d~6f),占比41%。



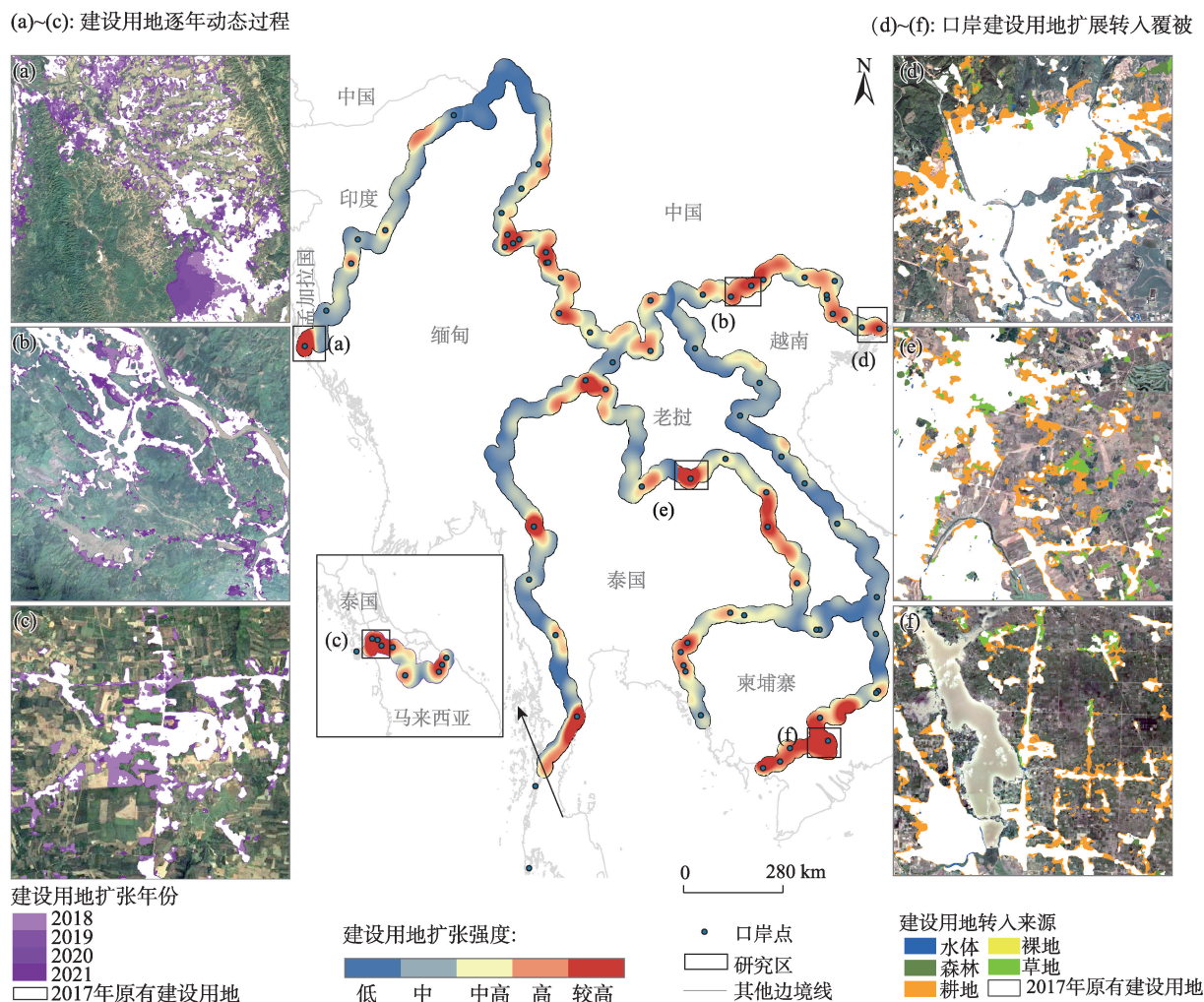


图6 2017—2021年半岛13条边境地带建设用地扩展强度与动态

Fig.6 Expansion intensity and dynamics of built-up areas in the 13 border zones between Mainland Southeast Asian countries and their neighbors during 2017–2021

### 3.3.2 口岸建设用地扩展对半岛13条边境地带森林扰动的贡献

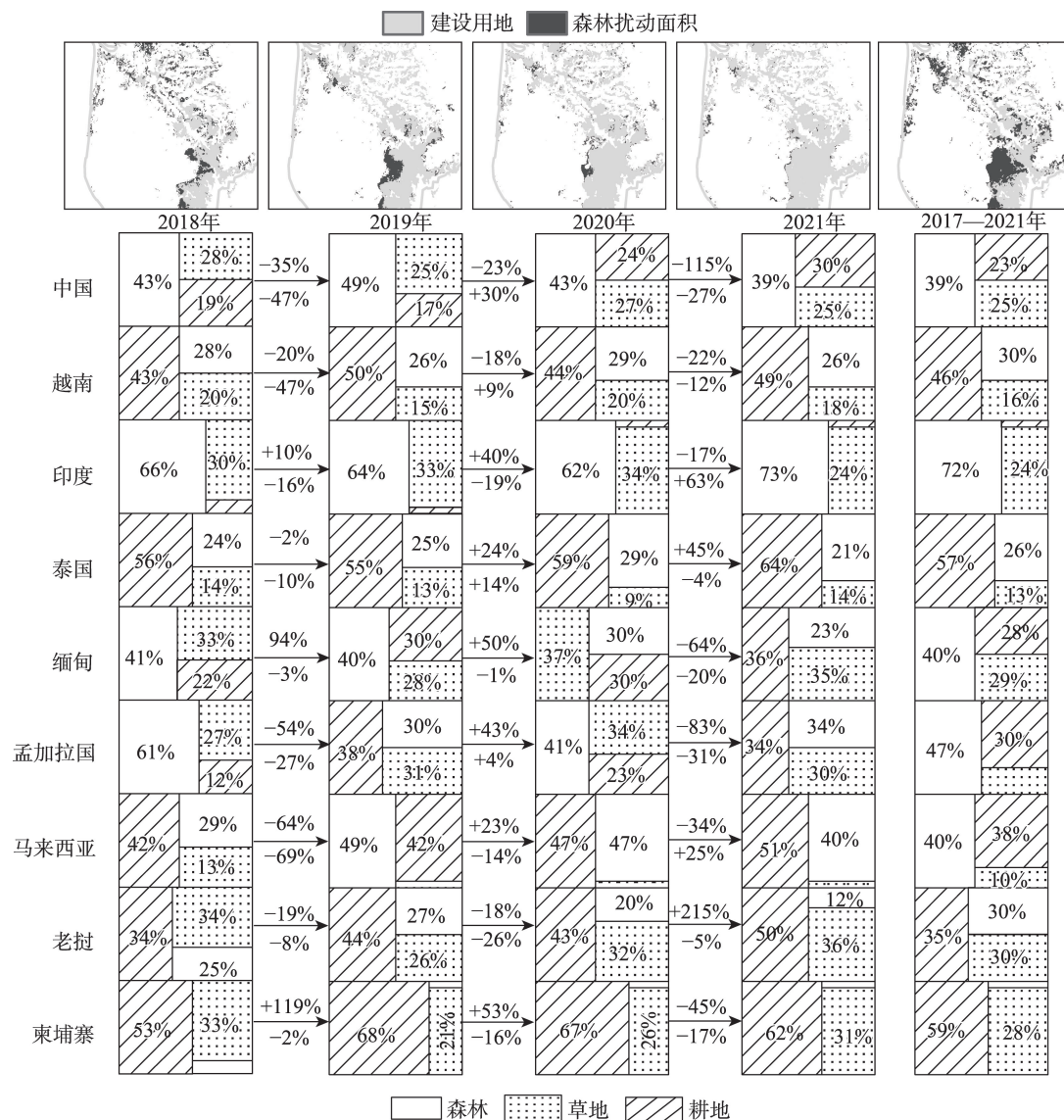
森林(43%, 图3a)是建设用地转入主要覆被类型, 耕(30%)、草(20%)次之。各国边境口岸地区建设用地对森林扰动差异较大(图7), 具体表现为:

第一, 5年内各国边境口岸建设用地扩展对森林扰动分为直接和间接影响。直接影响指建设用地扩展依赖周边森林转入, 如2017—2021年中国—缅老越边境口岸建设用地扩展39%来源于森林干扰。印度(72%)、孟加拉国(47%)、马来西亚(40%)等国边境口岸建设用地扩展对森林扰动亦起到直接影响。间接影响指建设用地扩展通过耕/草地转入间接导致森林扰动, 多发生于耕/草地覆盖度较高的国家边境。以柬、老两国最为突出, 耕/草地覆盖度合计各占64%、20%, 是其边境口岸建设用地扩展主

要转入来源, 建设用地扩展对其森林扰动程度最低(各占<5%、30%)。

第二, 国别上, 5年间印度边境建设用地扩展所致森林干扰比重最高(72%), 柬埔寨最低(<5%)。印度边境高森林覆盖度(91%)、低耕/草地覆盖度(二者均<9%)易促使建设用地向森林扩张, 而柬埔寨低森林覆盖度(42%)、高耕/草地覆盖度(二者共占64%)不利于建设用地向森林扩张。此外, 各国边境森林扰动分为先增后减(中、泰、马)、先减后增(印、老)、持续减少(缅)以及减—增—减波动趋势(越、孟), 其变化趋势转折时间节点(峰值)国别差异突出。以中国为例, 2019年森林扰动面积占比达到峰值(49%), 而缅甸、越南、印度峰值(41%、29%、73%)先后出现于2018、2020与2021年。

第三, 缅、老、柬建设用地对森林扰动影响逐年



注:箭头上方的占比表示建设用地年际变化,箭头下方的占比表示森林转向建设用地年际变化,“+”表示增幅,“-”表示减幅。

图7 2017—2021年半岛13条边境地带建设用地转入的覆被占比与动态变化

Fig.7 Proportions and annual changes in various land cover types converted into built-up areas in the 13 border zones between Mainland Southeast Asian countries and their neighbors during 2017–2021

减小,减幅分别为1%~20%、5%~26%、2%~17%。对比之下,中、泰、印、孟、马5国每年转建设用地的森林面积变化幅度超30%,对边境森林规划和开发不利。

### 3.4 新冠疫情下边境地带森林扰动变化特征

受新冠疫情影响,中南半岛及其邻国关闭口岸通道,13条边境带森林扰动相应减弱,期间森林净缩减面积较疫情前(为有效对比疫情前后森林扰动变化情况,以2019年为节点,本小节以2017、2018年为疫情前,2020、2021年为疫情期间)减少4%~40%;耕/草地总面积和建设用地面积对森林扰动贡

献较疫情前分别下降4%~41%、2%~29%。具体地,第一,中南半岛及其邻国疫情期间森林扰动均不同程度减弱,2021年最甚。当年6国(柬、老、缅、泰、越、中)森林扰动面积显著减少(超30%)。其中柬埔寨森林扰动影响最显著,较疫情前森林扰动减少65%以上,包括建设用地与耕/草地对森林扰动的贡献相应减少25%和74%。

第二,新冠疫情对半岛13条边境带森林扰动影响呈现空间差异。2021年柬埔寨、老挝及其邻国边境带森林扰动程度明显抑制(超3成),以柬—老边境最突出(72%),其耕/草地总面积和建设用地面积



对森林扰动的贡献对应减少75%、45%;泰—老、柬—越边境次之(58%)。同年,各边境带森林扰动影响由大到小排列为柬—老>柬—越>泰—老>泰—缅>越—老>泰—柬>中—老>缅—老,表明不同边境当年受到的森林扰动影响强度不一。

第三,新冠疫情对同一边境两侧不同国家森林扰动影响差异显著,包括同步和异步影响。同步影响是指边境线两侧国家森林扰动面积同期减少。如柬、老两国2021年森林扰动面积同步缩减,减幅分别为75%、65%;同期耕/草地总面积对森林扰动贡献相应下降75%、71%;建设用地面积贡献下降30%、51%。同步影响还见于泰—柬/老/缅、老挝与邻国、柬—越边境。异步影响是指边境线两侧国家森林扰动影响增减各异。以缅—孟边境为例,2020年孟加拉国一侧森林扰动面积减少39%,耕/草地总面积贡献下降52%。而缅甸一侧森林扰动面积仍逐年递增,2020、2021年增幅分别为2%、11%。泰—马边境森林干扰亦有异步变化,即泰一侧增加。

## 4 讨论

### 4.1 加强边境土地利用与景观精细化遥感以探索其季节性变化特征

相较于中低分辨率土地覆被产品,10 m数据为探索边境这一特定区域土地利用与景观变化提供了契机<sup>[40]</sup>,对监测小农生产所致森林干扰尤其如此<sup>[45]</sup>。边境通常限于国家间界山界河等自然分界两侧一定距离内,是交通末梢与发展盲区,过去土地利用变化幅度小且相对缓慢<sup>[12]</sup>。随着国家间地缘经济合作日益推进,边境迎来了广泛且快速的土地利用与景观变化<sup>[8,10]</sup>。过去30年,尽管中南半岛及其邻国边境土地覆被及景观变化陆续引起学界关注<sup>[8,10-11,32]</sup>。但此类研究仍零星离散、进展缓慢<sup>[9]</sup>,且研究层面小,缺乏整体认识<sup>[35]</sup>。本文基于年际尺度的森林干扰、农用地扩张与建设用地扩展分析,可在宏观层面把握土地利用与景观变化,但也忽视或掩盖了地缘合作或竞争视角下的快速土地利用变化特征,在热带季风气候盛行的中南半岛及其邻国边境尤为突出,如口岸不透水层扩张主要发生在旱季且月际差异突出<sup>[11]</sup>。现有土地覆被产品时序短、覆被分类少等,尚无法有效回溯过去边境森林干扰等土地利用变化。近期,宜加强基于Sentinel-2 5 d分辨率影像的连续变化检测和典型地物(如跨境种植)

分类研究,进一步发展与改进连续变化检测系列算法,提高建设用地扩展、耕地扩张、森林干扰时空演变的精细遥感监测。

### 4.2 基于边境土地利用变化刻画国家间地缘经济合作与竞争关系

基于遥感可有效监测边境正在经历的森林干扰、农用地扩张与建设用地扩展。森林是中南半岛及其邻国边境主导覆被和主要变化类型,农用地扩张与建设用地扩展是森林扰动两大诱因。本文从宏观层面刻画了森林扰动过程及其特征,但对不同边境土地利用与景观变化的原因及其影响程度还缺乏深入研究。边境(特别是口岸)是国家间地缘经济合作前沿载体,也是国家间人口流动与经贸往来重要通道<sup>[11]</sup>。冷战后,世界各国边境由封闭走向开放<sup>[8]</sup>,新冠疫情又使大部分边境回归封闭。在区域一体化与新冠疫情双重背景下,边境作为国家间地缘经济合作的前沿载体面临挑战。当前,热带国家边境森林扰动研究尺度与数据精度仍显不足<sup>[8]</sup>,且聚焦地缘政治经济背景下的森林扰动过程与特征研究更是少见<sup>[28]</sup>。未来宜开展地缘合作背景和新冠视角下不透水层月季尺度长时间序列的扩张动态特征探究,服务于不透水层对地缘合作的影响—响应机制研究。

## 5 结论

本文基于2017—2021年Sentinel-2 10 m土地覆被产品,立足中南半岛及其邻国13条边境地带(国境两侧20 km),聚焦国家间不同边境地带森林干扰的强度与速度,揭示了农用地扩张与建设用地扩展所致森林干扰特征与过程。主要结论如下:

(1) 森林是边境地带基质覆被类型,耕地、草地次之,建设用地在口岸地区占主要比重。森林干扰是边境最主要的土地覆被与景观变化形式,农用地与建设用地扩张相应贡献为9:1。

(2) 耕地、草地增加所致农用地扩张是边境森林扰动主要驱动因素,占森林扰动面积的7成以上;各国森林、草地面积之和约占耕地总转入来源的8成,森林、草地是耕地的主要转入来源。

(3) 口岸建设用地扩展是边境森林扰动次要驱动因素,其森林扰动占比小,但呈逐年上升态势,口岸建设用地扩展所致森林扰动直接和间接影响国别差异突出。



(4) 新冠疫情期间,半岛13条边境地带森林干扰过程受到明显抑制,2021年扰动面积减少最突出。同一边境两侧国家森林扰动影响呈现同步影响和异步影响。

## 参考文献(References)

- [1] Tyukavina A, Hansen M C, Potapov P V, et al. Types and rates of forest disturbance in Brazilian Legal Amazon, 2000–2013 [J]. *Science Advances*, 2017, 3(4): e1601047. doi: 10.1126/sciadv.1601047.
- [2] Burgess N D, Balmford A, Cordeiro N J, et al. Correlations among species distributions, human density and human infrastructure across the high biodiversity tropical mountains of Africa [J]. *Biological Conservation*, 2007, 134(2): 164-177.
- [3] Vancutsem C, Achard F, Pekel J, et al. Long-term (1990–2019) monitoring of forest cover changes in the humid tropics [J]. *Science Advances*, 2021, 7(10): eabe1603. doi: 10.1126/sciadv.abe1603.
- [4] Chazdon R L. Second growth: the promise of tropical forest regeneration in an age of deforestation [M]. Chicago, USA: The University of Chicago Press, 2014: 1-11.
- [5] Wright S J. Tropical forests in a changing environment [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20(10): 553-560.
- [6] Betts M G, Wolf C, Ripple W J, et al. Global forest loss disproportionately erodes biodiversity in intact landscapes [J]. *Nature*, 2017, 547: 441-444.
- [7] Prance G T. Biodiversity and conservation of Neotropical montane forests [J]. *Kew Bulletin*, 1996, 51(3): 609-611.
- [8] 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林退动态特征 [J]. *资源科学*, 2021, 43(12): 2416-2427. [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. ]
- [9] 宋涛, 刘卫东, 李玢. 国外对地缘视野下边境地区的研究进展及其启示 [J]. *地理科学进展*, 2016, 35(3): 276-285. [Song Tao, Liu Weidong, Li Le. International research on the border regions with a geopolitical perspective and revelation. *Progress in Geography*, 2016, 35(3): 276-285. ]
- [10] 冯京辉, 李鹏, 肖池伟, 等. 地缘经济背景下泰国及其毗邻国家边境农业扩张与集约化抵边特征 [J]. *地球信息科学学报*, 2021, 23(3): 479-491. [Feng Jinghui, Li Peng, Xiao Chiwei, et al. Border-prone characteristics of agricultural expansion and intensification in the borders of Thailand and its neighboring countries (Cambodia, Laos and Myanmar) under the context of geo-economy. *Journal of Geo-information Science*, 2021, 23(3): 479-491. ]
- [11] 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 [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2022, 59(1): 2184-2201.
- [12] Perz S G, Qiu Y L, Xia Y B, et al. Trans-boundary infrastructure and land cover change: Highway paving and community-level deforestation in a tri-national frontier in the Amazon [J]. *Land Use Policy*, 2013, 34: 27-41.
- [13] 刘郑伟, 付梅臣, 丁茜. 边境贸易地区土地利用变化驱动力演变研究 [J]. *资源科学*, 2018, 40(4): 729-736. [Liu Zhengwei, Fu Meichen, Ding Qian. Driving force evolution of land use change in a border trade area of China. *Resources Science*, 2018, 40(4): 729-736. ]
- [14] Li P, Xiao C, Feng Z. Swidden agriculture in transition and its roles in tropical forest loss and industrial plantation expansion [J]. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(2): 388-392.
- [15] 封志明, 刘晓娜, 姜鲁光, 等. 中老缅交界地区橡胶种植的时空格局及其地形因素分析 [J]. *地理学报*, 2013, 68(10): 1432-1446. [Feng Zhiming, Liu Xiaona, Jiang Lu-guang, et al. Spatial-temporal analysis of rubber plantation and its relationship with topographical factors in the border region of China, Laos and Myanmar. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(10): 1432-1446. ]
- [16] Kadioğulları A I. Assessing implications of land use and land cover changes in forest ecosystems of NE Turkey [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185: 2095-2106.
- [17] Cabanillas F J J, Aliseda J M, Gallego J A G. Land cover and land use change in the Central Spanish-Portuguese border region [J]. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 2012, 60: 369-398.
- [18] Charoenpol K, Kheoruenromne I, Suddhiprakarn A, et al. Assessment on land use of Phanom Dong Rak Mountain Range [J]. *Thai Journal of Agricultural Science*, 2013, 46(1): 1-10.
- [19] Kołodziejczyk K. Tourism management in national parks: Šumava and Bayerischer Wald (Bavarian Forest) in the Czech-German borderland [J]. *Journal of Mountain Science*, 2021, 18(9): 2213-2239.
- [20] Main-Knorn M, Hostert P, Kozak J, et al. How pollution legacies and land use histories shape post-communist forest cover trends in the western Carpathians [J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(2): 60-70.
- [21] Röder A, Pröpper M, Stellmes M, et al. Assessing urban

- growth and rural land use transformations in a cross-border situation in northern Namibia and southern Angola [J]. *Land Use Policy*, 2015, 42: 340-354.
- [22] Soto-Berelov M, Madsen K D. Continuity and distinction in land cover across a rural stretch of the US-Mexico border [J]. *Human Ecology*, 2011, 39(4): 509-526.
- [23] Hardwick S R, Toumi R, Pfeifer M, et al. The relationship between leaf area index and microclimate in tropical forest and oil palm plantation: Forest disturbance drives changes in microclimate [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 201: 187-195.
- [24] Kirika J M, Farwig N, Böhning-gaese K. Effects of local disturbance of tropical forests on frugivores and seed removal of a small-seeded afrotropical tree [J]. *Conservation Biology*, 2008, 22(2): 318-328.
- [25] Peres C A, Barlow J, Laurance W F. Detecting anthropogenic disturbance in tropical forests [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2006, 21(5): 227-229.
- [26] Cole L E, Bhagwat S A, Willis K J. Recovery and resilience of tropical forests after disturbance [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3906. doi: 10.1038/ncomms4906.
- [27] Klarenberg G, Muñoz-Carpena R, Campo-Bescós M A, et al. Highway paving in the southwestern Amazon alters long-term trends and drivers of regional vegetation dynamics [J]. *Heliyon*, 2018, 4(8): e721. doi: 10.1016/j.heliyon.2018.e00721.
- [28] 李鹏, 冯京辉, 肖池伟, 等. 1987—2015年泰国—老挝边境地区自然林减少及其转换特征[J]. *世界地理研究*, 2023, 32(6): 51-62. [Li Peng, Feng Jinghui, Xiao Chiwei, et al. Natural forest loss and its transformation characteristics along the Thailand-Laos border during 1987–2015. *World Regional Studies*, 2023, 32(6): 51-62. ]
- [29] Grogan K, Pflugmacher D, Hostert P, et al. Cross-border forest disturbance and the role of natural rubber in mainland Southeast Asia using annual Landsat time series [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 169: 438-453.
- [30] Broich M, Hansen M, Potapov P, et al. Patterns of tree-cover loss along the Indonesia-Malaysia border on Borneo [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(16): 5748-5760.
- [31] Perz S G, Selaya G, Muñoz-Carpena R, et al. Scientists and stakeholders, data and diagnostics: Crossing boundaries for modeling the impacts of highway paving in a transnational frontier in the Amazon [M]. Cham, Switzerland: Springer, 2019: 327-359.
- [32] Xiao C W, Li P, Feng Z M, et al. Latest 30-m map of mature rubber plantations in Mainland Southeast Asia and Yunnan Province of China: Spatial patterns and geographical characteristics [J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2021, 45(5): 736-756.
- [33] Lambin E F, Meyfroidt P. Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity [J]. *PNAS*, 2011, 108(9): 3465-3472.
- [34] 李鹏, 封志明. 地缘经济背景下的老挝橡胶林地扩张监测及其影响研究综述 [J]. *地理科学进展*, 2016, 35(3): 286-294. [Li P, Feng Z M. 2016. Review of remote sensing monitoring and socioeconomic and environmental impacts of rubber plantation expansion in Laos in the geoeconomic context. *Progress in Geography*, 2016, 35(3): 286-294. ]
- [35] 廖湛嫻, 封志明, 李鹏, 等. 中老缅泰交界地区土地利用变化信息挖掘与国别对比 [J]. *自然资源学报*, 2015, 30(11): 1785-1797. [Liao Chenhua, Feng Zhiming, Li Peng, et al. Information detecting and inter-national comparison of land use changes in the border region of China, Laos, Myanmar and Thailand. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(11): 1785-1797. ]
- [36] Golar G, Malik A, Muis H, et al. The social-economic impact of COVID-19 pandemic: Implications for potential forest degradation [J]. *Heliyon*, 2020, 6(10): e5354. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e05354.
- [37] Zabini F, Albanese L, Becheri F R, et al. Comparative study of the restorative effects of forest and urban videos during COVID-19 lockdown: Intrinsic and benchmark values [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(21): 8011. doi: 10.3390/ijerph17218011.
- [38] Jenila V M, Varalakshmi P, Rajasekar S J S. Geospatial mapping, epidemiological modelling, statistical correlation and analysis of COVID-19 with forest cover and population in the districts of Tamil Nadu, India [C]// 2020 IEEE International conference on advent trends in multidisciplinary research and innovation (ICATMRI). Buldhana, India: IEEE, 2020.
- [39] Cohen S B. Geopolitics: The geography of international relations [M]. Lanham, USA: Rowman & Littlefield, 2014: 329-353.
- [40] Venter Z S, Barton D N, Chakraborty T, et al. Global 10 m land use land cover datasets: A comparison of dynamic world, world cover and ESRI land cover [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(16): 4101. doi: 10.3390/rs14164101.
- [41] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨 [J]. *地理科学进展*, 1999, 18(1): 81-87. [Wang Xiulan, Bao Yuhai. Study on the methods of land use dynamic change research. *Progress in Geography*, 1999, 18(1): 81-87. ]
- [42] Ye Q H, Liu G H, Tian G L, et al. Geospatial-temporal

- analysis of land-use changes in the Yellow River Delta during the last 40 years [J]. *Science in China: Earth Sciences*, 2004, 47(11): 1008-1024.
- [43] 黄聪, 赵小敏, 郭熙, 等. 基于核密度的余江县农村居民点布局优化研究 [J]. *中国农业大学学报*, 2016, 21(11): 165-174. [Huang Cong, Zhao Xiaomin, Guo Xi, et al. Study on the rural residential layout optimization of Yujiang County based on kernel density. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(11): 165-174. ]
- [44] 应申, 窦小影, 徐雅洁, 等. 新型冠状病毒肺炎疫情可视化进展与分析 [J]. *地球信息科学学报*, 2021, 23(2): 211-221. [Ying Shen, Dou Xiaoying, Xu Yajie, et al. Visualization of the epidemic situation of COVID-19. *Journal of Geo-information Science*, 2021, 23(2): 211-221. ]
- [45] Murdjoko A, Brearley F Q, Ungirwalu A, et al. Secondary succession after slash-and-burn cultivation in Papuan lowland forest, Indonesia [J]. *Forests*, 2022, 13(3): 434. doi: 10.3390/f13030434.

## Forest disturbance process caused by the expansion of agricultural and construction lands in the border zones of Mainland Southeast Asian countries and their neighbors

CHEN Shengmei<sup>1</sup>, LI Peng<sup>2,3\*</sup>, FENG Zhiming<sup>2,3</sup>, SHI Dong<sup>1</sup>

(1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, 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)

**Abstract:** Geocooperation between neighboring countries globally facilitates forest conversion and land use change across border zones especially in the tropics. Compared with the disturbance of specific tropical forest types, research on border forest disturbance and its mechanism of response to geocooperation between countries still lags behind. Geoeconomic cooperation and competition among the countries of Mainland Southeast Asia (MSEA) and their neighbors (including Bangladesh, China, India, and Malaysia) as well as major extraterritorial powers have developed over three decades. However, the COVID-19 pandemic delayed geoeconomic cooperation and border development. A pressing question is whether the process of border forest disturbance was affected accordingly. With the Sentinel-2 10 m 2017–2021 land cover products, forest disturbance process in the 13 border zones between MSEA and their neighbors from two driving mechanisms of agricultural expansion and built-up area enlargement were examined using GIS spatial analysis, including forest conversion flow and kernel density. The main conclusions are: 1) Forest is the dominant land cover type in all border zones of MSEA and their neighbors, followed by cropland and rangeland, and built-up area is critical in the surrounding areas of border ports. 2) Forest disturbance represented the primary form of border land cover and landscape changes, with the area accounting for nearly 50%. Changes in cropland and rangeland have contributed to agricultural land expansion (90%) and built-up area growth (10%). 3) Agricultural land expansion and built-up area enlargement of port areas were the principal and secondary driving mechanisms of border forest disturbance, respectively. The former contributed to over 70%, while the latter accounted for 3% of the changes, yet showing an increasing trend year by year and notable national differences in direct and indirect effects on border forest disturbance. 4) The COVID-19 pandemic weakened forest disturbance in all border zones, particularly in Cambodia and its border with Laos, exhibiting synchronous and asynchronous effects on the slow-down of forest disturbance on both sides of the borders.

**Keywords:** border land use; geoeconomic cooperation; forest disturbance; agriculture advance and forest retreat; built-up area growth; COVID-19 pandemic