

翟佳豪, 刘影, 肖池伟. 2022. 1987—2018年西双版纳橡胶林时空变化及其线状特征. 热带地理, 42 (8): 1376-1385.
Zhai Jiahao, Liu Ying and Xiao Chiwei. 2022. Spatio-Temporal Changes and Linear Characteristics of Rubber Plantations in Xishuangbanna, Southwest China from 1987 to 2018. *Tropical Geography*, 42 (8): 1376-1385.

1987—2018年西双版纳橡胶林 时空变化及其线状特征

翟佳豪¹, 刘影¹, 肖池伟²

(1. 江西师范大学地理与环境学院, 南昌 330022; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 基于1987—2018年西双版纳30 m分辨率橡胶林数据集, 利用叠置、缓冲区等GIS空间分析方法, 对比分析了过去32年橡胶林沿道路、河流和边境线的空间变化特征与区域差异。结果表明: 1) 1987—2018年, 西双版纳橡胶种植面积在道路、河流沿线5 km以内分别增加了1 874.6和1 484.6 km², 在边境地区(国境线20 km缓冲带)增加了1 393.1 km²。2) 从道路沿线看, 受橡胶种植可达性和交通运输影响, 过去32年道路5 km缓冲带内的橡胶林平均占比超过九成。3) 从河流沿线看, 因灌溉和水源等需求, 过去32年河流沿线5 km缓冲带内橡胶林平均占比69.7%。值得注意的是, 受天然橡胶价格持续低迷、城镇化与生态环境保护等影响, 2010年河流沿线橡胶林种植面积开始下降, 沿线2 km内表现尤为显著。4) 从边境地区看, 西双版纳橡胶林种植呈明显趋边性特征, 跨境种植频繁。过去32年边境沿线地区橡胶林平均占比55.6%, 且由1987年的35.4%上升到2018年的66.2%, 其中, 在中缅边境的扩张面积和速率高于中老边境。

关键词: 橡胶林; 道路; 河流; 边境地区; 西双版纳

中图分类号: F316.299

文献标志码: A

文章编号: 1001-5221(2022)08-1376-10

DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003530

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



橡胶树(*Hevea brasiliensis*)原产于亚马孙河流域, 主要种植在赤道附近全年潮湿多雨的地区, 如巴西和印度尼西亚等传统种植区。为了国防建设和经济发展, 打破西方封锁, 20世纪50年代初中国投入大量资金研究在非传统地区种植橡胶林的可行性, 并在云南西双版纳地区成功种植(Li et al., 2012)。其后的几十年间, 橡胶林在西双版纳地区迅速扩张。尽管橡胶种植可以显著提高农户收入、增加就业机会和改善生计(Zhang et al., 2015), 但其造成的土地占用和粮食安全问题也是不争的事实(Chiarelli et al., 2018), 对生态环境造成的负面影响更为突出, 如热带雨林消失、生物多样性减少、水土流失、土壤肥力下降等(周宗等, 2006; Li et al., 2007; Zhang et al., 2007; Guardiola-Clara et al.,

2008; De Blecourt et al., 2013)。西双版纳橡胶林种植具有明显的地域分布特征且扩张势头强劲(张佩芳等, 2006; 刘晓娜等, 2013)。因此, 及时准确地掌握橡胶林空间分布、时空扩张过程与特征, 对促进橡胶可持续发展和维持区域生态系统稳定意义重大。

已有对橡胶林种植研究集中在种植面积、空间分布变化及其生态环境效应等方面(刘晓娜等, 2013; 廖谔嫫等, 2014), 侧重讨论橡胶林分布与地形因子(海拔、坡度、坡向)之间的关系(李增加等, 2008; 封志明等, 2013; 李阳阳等, 2017)。事实上, 除了地形因素制约, 人工种植园(如茶园)往往还受道路、河流的影响, 即倾向于沿道路、河流(水源)扩张种植(刁亚芹等,

收稿日期: 2021-11-08; 修回日期: 2021-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(42001226, 42130508); 江西师范大学研究生创新基金(YJS2021012); 江西师范大学研究生国内访学研究项目

作者简介: 翟佳豪(1998—), 男, 山西晋城人, 硕士研究生, 研究方向为资源遥感与边境地理, (E-mail) zhaijh@jxnu.edu.cn;

通信作者: 肖池伟(1991—), 男, 湖北荆州人, 博士, 副研究员, 研究方向为边境地理与资源地理, (E-mail) xiaocw@igsnr.ac.cn.

2013; 李雪柔等, 2020)。与道路和河流的距离是农户种植经济作物时选择区位的重要影响因素 (Xiao et al., 2015), 但在橡胶林扩张种植中尚未有相关报道。地理景观格局和过程往往受到道路的直接影响而改变 (李月辉等, 2003), 沿线景观转移变化幅度与道路干扰强度呈正比, 即道路驱动着沿线景观格局发生变化 (张景华等, 2013; Zheng et al., 2021), 如青藏公路沿线地区的草地退化严重而建设用地增加迅速, 同时景观破碎化程度加剧 (张懿锂等, 2002; 阎建忠等, 2003)。自然林大规模转换为橡胶林是过去几十年来西双版纳地区最明显的景观变化 (李红梅等, 2007; Ziegler et al., 2009; 刘晓娜等, 2014), 因此有必要开展西双版纳道路沿线橡胶林分布特征研究。同时, 橡胶 (树) 生长对水分的需求极高, 土壤含水量是橡胶树生长和产胶量的重要影响因素 (李国尧等, 2014; 张明洁等, 2015)。一般而言, 河流及其附近区域土壤含水量更高 (蔡亮红等, 2017), 对橡胶 (胶乳) 产量影响较大, 特别在早期灌溉更为重要 (陈瑶, 2010)。而已有研究普遍关注降水对橡胶林种植区位的选择以及橡胶林扩张种植对气候 (降水) 的影响 (刘少军等, 2015; 2016), 鲜有关关注橡胶林沿河流 (水源) 扩张特征。另外, 自1990年以来中国—中南半岛地缘政治经济合作不断加强, 边境地区的土地利用/覆被已经或正在发生急剧变化 (刘晓娜等, 2013), 人工种植园的持续扩张是导致自然林减少的主要原因 (冯京辉等, 2021)。其中, 西双版纳橡胶林的扩张表现最为明显, 并持续向中国与老挝、缅甸交界的地区扩张 (刘晓娜等, 2014), 且其跨境种植势头不可逆 (封志明等, 2013; Xiao et al., 2019a), 但其扩张规律亟待进一步研究。

基于此, 本文利用1987—2018年西双版纳橡胶林空间分布数据产品, 基于GIS空间分析方法, 定量揭示过去32年西双版纳橡胶林在河流沿线、交通廊道以及边境地区的空间分布规律和线状特征。以期明晰西双版纳地区橡胶林种植的空间分布规律, 为未来橡胶林的合理布局与可持续发展提供参考。

1 研究区概况

西双版纳位于 $21^{\circ}10'—22^{\circ}40' N$ 、 $99^{\circ}55'—101^{\circ}50' E$ 之间, 面积约 $19\ 124.5\ km^2$, 西南与缅甸

接壤, 东南与老挝相连 (图1)。西双版纳地势周围高、中间低, 西北高、东南低, 山地丘陵占95%, 海拔为 $369\sim 2\ 404\ m$ (图1-a)。西双版纳地处热带北部边缘, 北有哀牢山、无量山为屏障, 南面东西两侧靠近印度洋和孟加拉湾, 形成了高温多雨、旱雨季分明的气候特征。年均温 $18.9\sim 22.6\ ^{\circ}C$, 年均降雨量 $1\ 136\sim 1\ 513\ mm$; 旱季从当年11月到次年4月, 雨季为5—10月。西双版纳下辖一市两县 (景洪市、勐腊县、勐海县), 首府位于景洪市, 共32个乡镇, 常住总人口118万人 (2018年^①)。西双版纳主要公路有213国道、171县道、允大公路、昆磨高速公路等 (图1-b), 主要河流有澜沧江、补远江、流沙河、南阿河、南腊河等 (图1-c)。

西双版纳是中国第二大天然橡胶生产基地, 橡胶是西双版纳的特色支柱产业, 成为农民增收和地方财政收入的主要来源。但橡胶林的急剧扩张也给生态环境带来了许多不利的影 响 (Mann, 2009), 其中自然林的不断减少尤其突出。西双版纳热带雨林作为中国重要和独特的生态系统, 具有唯一性和不可替代性 (吴学灿等, 2020)。但由于橡胶需求量增大, 导致西双版纳众多热带雨林转化为人工橡胶林 (邹国民等, 2015)。单一化橡胶林种植改变了西双版纳热带雨林的景观格局, 并出现较为严重的片段化和破碎化 (张佳琦等, 2013)。

西双版纳橡胶林种植面积从1987年的 $329.7\ km^2$ 增加到2018年的 $2\ 287.2\ km^2$, 其中景洪市 ($1\ 086.5\ km^2$) 和勐腊县 ($1\ 122.2\ km^2$) 占比约96.6%, 勐海县不到 $78.5\ km^2$ (Xiao et al., 2019b)。橡胶林种植面积在2000—2010年增长速度最快, 10年间增加了 $1\ 374.1\ km^2$, 占32年间增长总面积的70.2%; 2010年后由于橡胶价格低迷和“地尽其用” (封志明等, 2013; 李达等, 2020), 到2018年全州橡胶种植面积仅增加了 $97.1\ km^2$ 。当前, 西双版纳的橡胶林主要分布在景洪市的景哈乡、嘎洒镇、勐罕镇和勐龙镇, 勐腊县的关累镇、勐捧镇、勐满镇和勐仑镇, 而勐海县的橡胶种植高度集聚于中缅边境的打洛镇 (图1-d)。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

西双版纳橡胶林空间分布数据产品源于已有研究 (Xiao et al., 2019b), 时间尺度为1987—2018

^① https://www.xsbn.gov.cn/597.news.detail.dhtml?news_id=78799

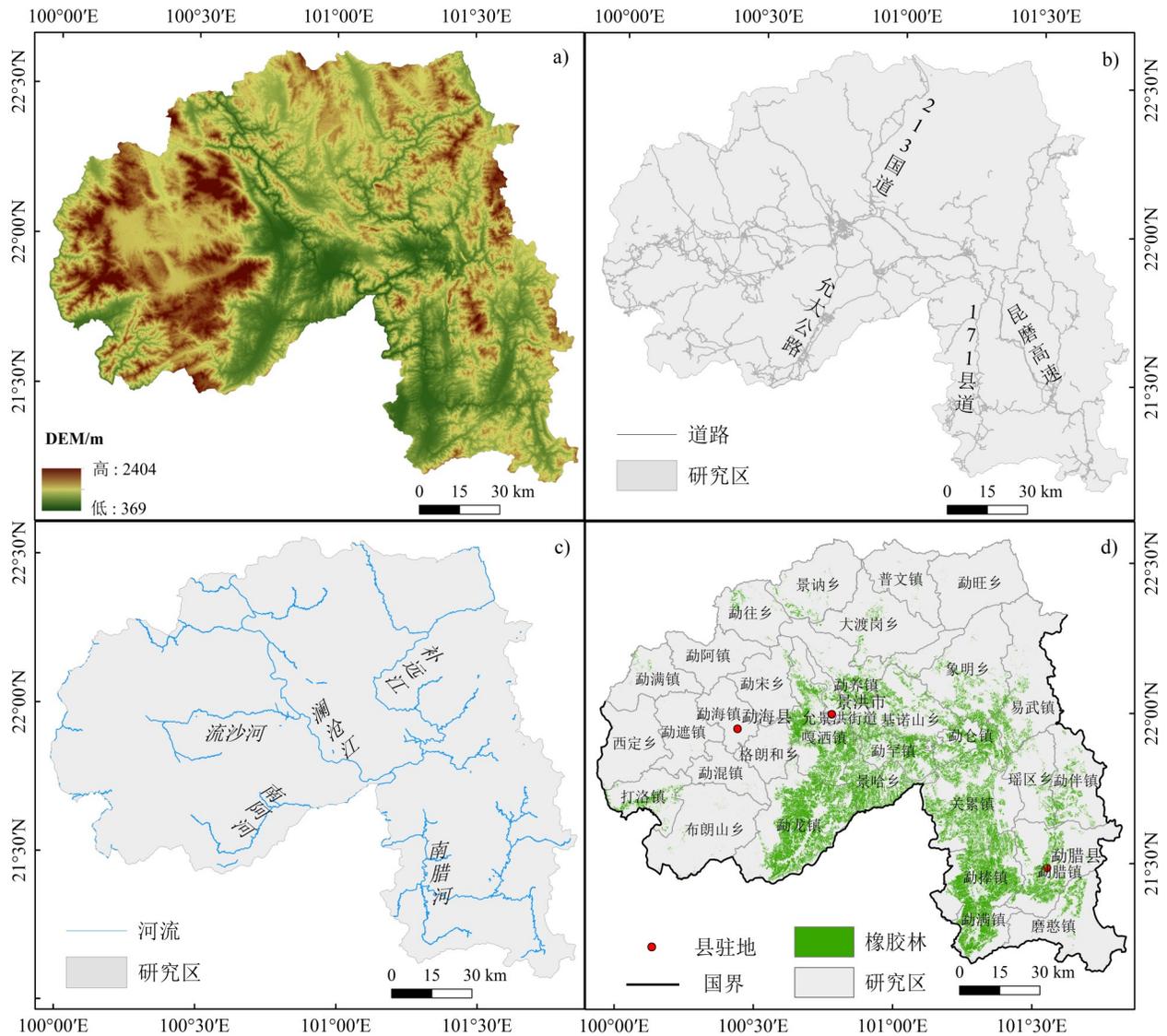


图1 西双版纳地形 (a)、道路 (b)、河流 (c) 及当前橡胶林分布 (d)

Fig.1 The topography(a), road(b), river(c) and current rubber plantations distribution(d) of Xishuangbanna

注: 该图基于云南省地理信息公共服务平台网站下载的审图号为云S (2019) 059号的标准地图制作, 底图无修改

年、空间分辨率为 30 m。从中选取 1987、1990、2000、2010、2018 年为代表年份, 据此表征不同时间节点橡胶林的空间分布, 并分析过去 32 年西双版纳橡胶林的线状 (沿道路、河流与边境线) 扩张特征。

道路和水系矢量数据来源于 OSM (OpenStreetMap, <https://www.openstreetmap.org>), 这是一款由网络公众共同打造的免费开源地图, 具有高丰富性和准确性等优点 (罗路长等, 2017)。基于 OSM 的道路和水系矢量数据提取西双版纳的主要道路 (如允大公路) 和河流 (如澜沧江) (见图 1-b、c)。

2.2 研究方法

基于 1987 年西双版纳橡胶林分布与道路、河流的距离关系, 定义缓冲区距离为道路、河流两侧 5 km, 以 1 km 为间隔建立缓冲区量化西双版纳橡胶林在道路、河流沿线的线状扩张特征。

在对边境研究和边境管理中, 通常将边境地区定义为距国境线 20 km 的带状区域 (刘景峰等, 2006; 刘美玲等, 2006a, 2006b)。基于此, 在国境线中国一侧建立 5、10、15、20 km 4 个缓冲带, 定量刻画西双版纳橡胶林在边境地区的分布特征和扩张规律。需要说明, 在构建边境地区缓冲区时,

中缅和中老边境缓冲区在勐腊县境内的关累镇和勐捧镇重叠部分较多，鉴于关累镇大部分与缅甸接壤，勐捧镇只与老挝相连，所以将关累镇境内橡胶林归为中缅边境，勐捧镇境内橡胶林归为中老边境。

3 结果与讨论

3.1 橡胶林沿道路扩张特征

从西双版纳道路两侧不同距离内橡胶林种植面积（图 2-a）及占比变化（图 2-b）可知，1987—2018 年，在西双版纳道路两侧 0~1、1~2、2~3、3~4、4~5 km 范围内，橡胶林面积分别增加 787.0、476.6、311.4、203.1、95.5 km²。不难发现，在不同时期，各缓冲带内橡胶林面积占比均随着距离的增加而减少，呈明显衰减趋势。换言之，橡胶林优先种植在距离道路更近的区域，即可达性高更有利于

胶林开垦、种植、割胶和运输，道路交通条件对国营农场保障橡胶的及时转运、个体胶农割胶后的及时存储与交易具有重要作用。西双版纳道路两侧 5 km 内橡胶林种植面积由 1987 年的 264.6 km² 增加到 2018 年的 2 139.2 km²，增长了 7.1 倍，而其余地区仅增长了 1.3 倍（78.7 km²）。过去 32 年间，西双版纳 96.0% 的新增橡胶林位于道路两侧 5 km 以内的区域，特别是在允大公路、171 县道和昆磨高速两侧尤为明显。整体上，1987—2018 年道路沿线 5 km 内的橡胶林种植面积占比呈现先上升后趋于平稳的趋势。细言之，1987—2000 年道路沿线 5 km 缓冲区内橡胶林的种植面积占比由 81.3% 持续上升到 94.2%，面积增加了 501.4 km²。2000 年后 5 km 缓冲区内橡胶林种植面积占比维持在九成左右，且其增加面积高达 1 373.2 km²。

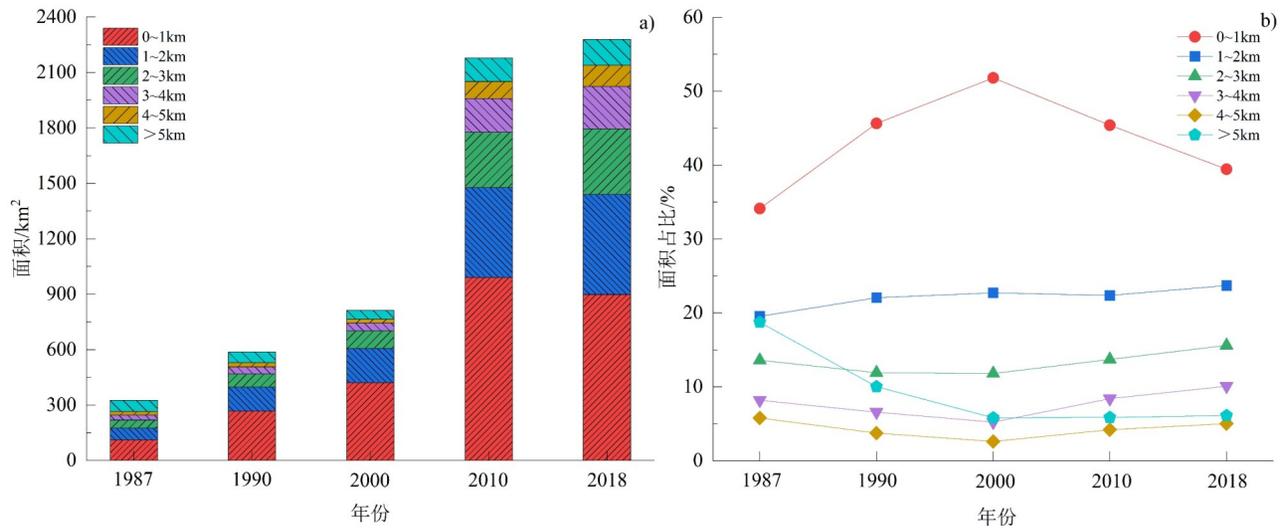


图 2 1987—2018 年西双版纳道路沿线橡胶林面积 (a) 及占全区比例 (b) 变化

Fig.2 Change of rubber plantation area(a) and proportions(b) along roads in Xishuangbanna from 1987 to 2018

距道路不同距离缓冲区内，橡胶林面积占比变化明显，0~1 km 内先升后降，而 1~2 和 2~3 km 内稳中有升，3~4 和 4~5 km 内则为先降后升，5 km 以外明显的先降后稳。西双版纳橡胶林早期会在距离道路更近的地方种植，随后逐渐向两侧扩张。与此同时，随着橡胶林不断扩张，不同缓冲区内种植面积占比发生变化。其中，道路沿线 2 km 以内橡胶林扩张最为明显。1987—2000 年道路沿线 2 km 内橡胶林的种植占比由 53.6% 持续上升到 74.5%，相应面积增加了 431.3 km²；其中超七成（310.2 km²）的增长发生在道路沿线 1 km 以内，其橡胶林面积达全区橡胶林种植总面积的一半以上。2000—2010 年，橡

胶林加速扩张，道路 2 km 范围内种植面积增加了 870.7 km²。虽然这一时期道路沿线 2 km 以内区域橡胶林面积占比下降，但仍维持在 67.8%，而道路沿线 2~5 km 内橡胶林面积占比呈上升趋势。由此可见，西双版纳橡胶林优先在道路沿线 2 km 内大规模种植；随着橡胶林不断向外扩张，2 km 缓冲带内的面积占比有所下降，但其面积仍增长迅速。2010 年后西双版纳橡胶林面积快速增长态势减弱，道路附近种植空间所剩不多，加之 2012 年以来天然橡胶价格持续下跌，部分个体胶农改种经济收益更高的其他作物，如菠萝、香蕉等。该时期，道路沿线 1 km 范围内橡胶林种植面积首次减少，占比由 45.4% 下

降到39.4%；但道路5 km范围内橡胶林面积依然增加，占比也略有上升。由此可知，交通运输及其道路可达性是影响橡胶林扩张种植的重要因素。

3.2 橡胶林沿河流扩张特征

1987年以来，西双版纳橡胶林种植面积在河流沿线5 km内明显增加，由1987年的180.6 km²增加到2018年的1 665.2 km²，增长了近8.2倍（图3-a）。

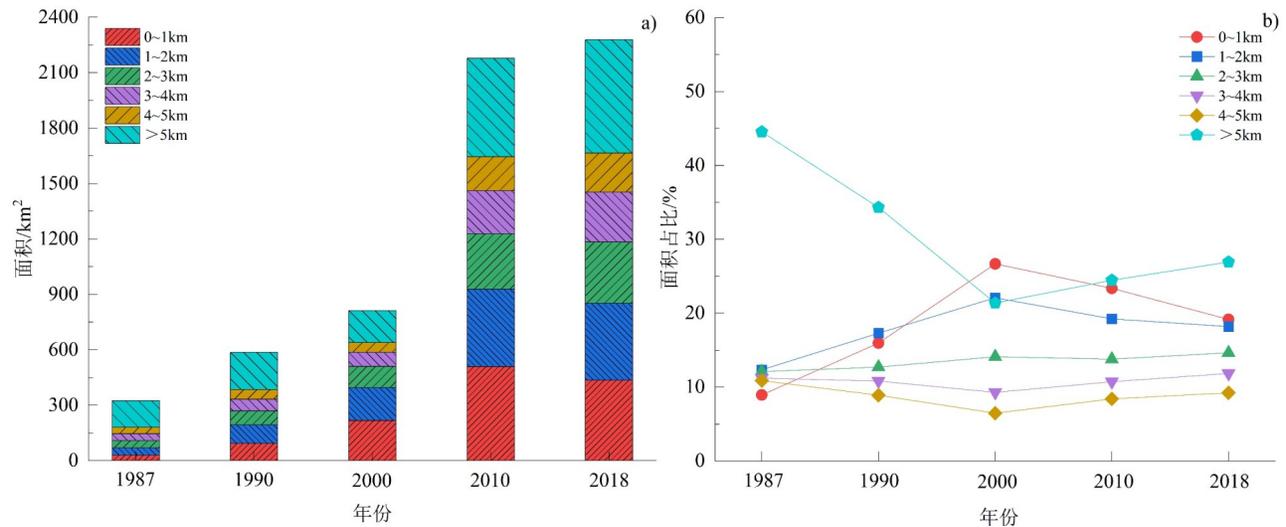


图3 1987—2018年西双版纳河流沿线橡胶林面积(a)及占全区比例(b)变化

Fig.3 Change of rubber plantations area(a) and proportion(b) along rivers in Xishuangbanna from 1987 to 2018

1987—2018年，西双版纳有76.0%（1 484.6 km²）的新增橡胶林位于河流沿线5 km以内，其中40%位于2 km内。具体地，1987—2000年，河流沿线1 km内橡胶林扩张速率最快，在2000年占比最高，达26.7%。2000年后河流沿线1 km以内和1~2 km内橡胶林占比有所下降，其他区域占比上升（图3-b）。1987—2018年，在西双版纳河流沿线0~1、1~2、2~3、3~4、4~5 km，橡胶林面积分别增加了342.9、313.0、259.1、206.3、158.1 km²。由此可知，距离河流越近，橡胶林种植面积增加越多。此外，2000年以来，距离河流5 km以外区域的橡胶林种植面积增加近七成（71.7%），橡胶林由河流沿线逐渐向外不断扩张。不言而喻，“地尽其用”导致西双版纳橡胶林不断向距离河流更远的地方发展，橡胶林从种植的“适宜区”逐渐向“非适宜区”扩张。

特别地，2010年以来，西双版纳橡胶林种植面积在河流沿线2 km区域内出现首次下降，共减少77.1 km²。原因可能包括：1) 2012年天然橡胶价格大幅度下跌，许多个体农户纷纷砍伐橡胶林而改种

其中，河流沿线2 km以内增长了11.3倍，种植面积达851.2 km²，而全区仅增长了5.9倍。由于橡胶种植对水分需求较大，橡胶林种植区位的选择倾向于距离河流更近的区域，如澜沧江、南阿河与南腊河沿岸地区。不难发现，这些区域普遍地势低平，土壤含水量较高且靠近水源，十分适宜橡胶林种植。

其他经济收益较高的作物（如菠萝、甘蔗、香蕉等）。2) 河流沿线的土地地势低平，更适合人工建设用地的的发展，随着城镇化进程的不断发，建设用地逐渐侵占河流附近原有的橡胶林地（刘怡媛等，2019）。3) 西双版纳政府实施的生态保护政策中要求建设环境友好型橡胶林，如西双版纳生物产业作物办公室“十二五”规划明确指出河流附近需要恢复种植自然植被（西双版纳人民政府，2012），导致河流附近的部分橡胶林减少（刘怡媛等，2019）。4) 橡胶种植使用的化肥和除草剂会导致水质下降（Xu et al., 2014），因此保证饮用水源不受污染也是河流附近橡胶林减少的重要原因之一。

需要说明，西双版纳地形起伏度较大，山地丘陵占95%以上，一般而言，道路大多分布在地势低平的河谷。在GIS空间分析时，导致道路与河流沿线橡胶林重合较多，道路两侧的橡胶林同样也位于河流沿线。在今后实地考察和农户调研中，需进一步厘清人类活动（居民点等）对橡胶种植区位选择的影响及其驱动因素分析。

3.3 橡胶林沿边境扩张特征

1987—2018 年，西双版纳边境地区（距国境线 20 km 以内）橡胶林种植面积由 115.3 km² 增加到 1 508.4 km²，增长了 12.1 倍（图 4-a）。过去 32 年间，中缅边境橡胶林种植面积增加了 861.6 km²，超过边境地区增加面积的六成，年均增加 27.8 km²，

高度集中在勐龙镇、景哈乡和打洛镇。同一时期，中老边境橡胶林增加面积约占边境地区的四成，年均增加 17.1 km²，主要集中在勐捧镇、勐满镇、磨憨镇和勐腊镇。受地缘合作的影响，边境地区橡胶林扩张种植势头强劲，且中缅边境橡胶林扩张速率和面积均高于中老边境。

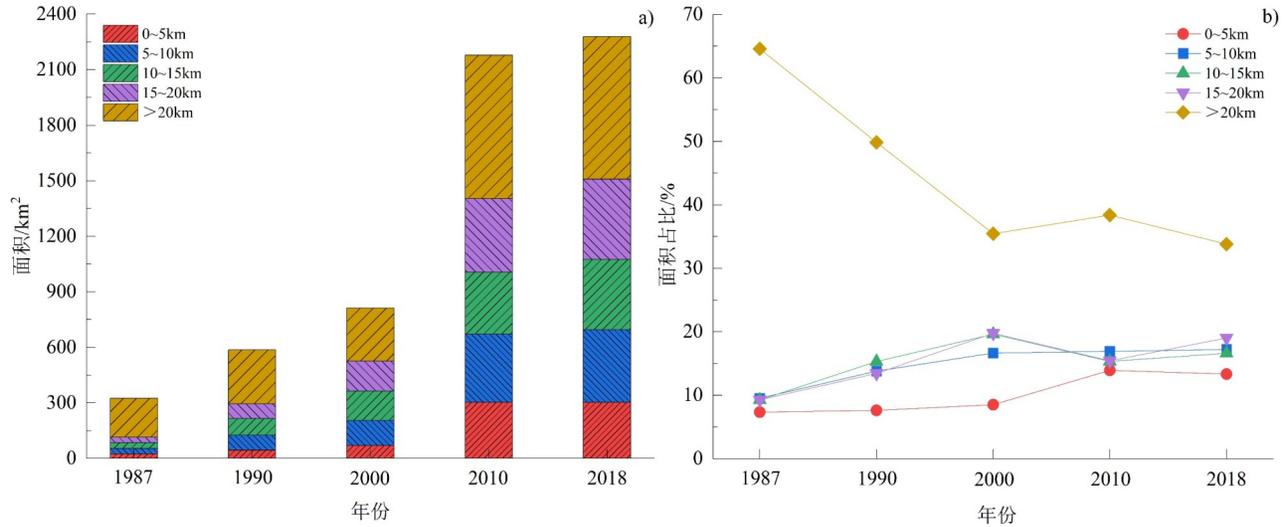


图4 1987—2018年西双版纳边境地区橡胶林面积(a)及占全区比例(b)变化

Fig.4 Change of rubber plantations area(a) and proportion(b) in xishuangbanna border region from 1987 to 2018

过去 32 年间，西双版纳边境地区的橡胶林平均占全区橡胶林种植面积的 55.6% 以上，平均占比由 1987 年 35.4% 上升到 2018 年的 66.2%。其中，边境沿线 10 km 以内平均占比近四成，边境地区的橡胶林种植面积及其占比总体呈不断增加趋势，且增加的面积及速度均远高于非边境地区。由此可知，西双版纳橡胶林扩张种植具有明显的趋边性特征，即持续向靠近老挝和缅甸的边境地区扩张。然而，受土地资源限制，当前西双版纳橡胶林已占用了大部分的橡胶种植适宜区，未来可供橡胶林种植的区域十分有限（即“地尽其用”）；而老挝和缅甸境内有较大的橡胶林种植适宜区，因此，西双版纳的橡胶林种植向老挝、缅甸跨境种植已是不可避免（封志明等，2013）。

栗替代种植项目（李隆伟等，2021），即种植其他经济作物（橡胶、甘蔗、茶叶、水果等）以减少罂粟的种植，涉及区域包括老挝北部和缅甸东部，其中橡胶是最主要的替代种植品种。西双版纳作为“替代种植”政策的主要实施地，促使缅甸和老挝境内的橡胶林（特别是靠近中国的边境省份）持续扩张（李宇宸等，2020），如老挝北部琅南塔省 2018 年橡胶林种植面积已是 2011 年的 2 倍（Xiao et al., 2020）。

西双版纳与缅甸和老挝 2 个中南半岛国家相邻，受地缘政治经济合作持续加强的影响，橡胶林在边境地区扩张迅速，缅甸、老挝与西双版纳相邻的部分省份也开始种植橡胶林。特别是为了维护边疆安全稳定，减少边境地区的毒品犯罪活动，以及从源头上铲除毒源，中国自 1990 年以来开始实施境外罂

由于西双版纳地区的橡胶种植面积与产量在一定程度上已达到了“瓶颈”，而中国是世界第一大天然橡胶消费和进口国，因此迫切需要加强保障天然橡胶的供应能力。中南半岛地区作为世界上最重要的橡胶主产区且毗邻中国，当前和未来相当长时间内仍是中国橡胶进口的主要来源地。与此同时，近些年来橡胶的跨境种植愈来愈热，即利用中国的资金与技术以及中南半岛邻国的土地、劳动力，从而供应国内的天然橡胶需求。由此，中国—中南半岛橡胶种植和跨境合作种植是农林合作的优先领域。

4 结论

利用1987—2018年西双版纳30 m分辨率橡胶林数据集,基于GIS空间分析方法,定量揭示了过去32年间西双版纳橡胶林时空变化及其在道路沿线、河流沿线和边境地区的分布特征。得到的结论主要有:1)道路对橡胶林种植区位的选择具有重要导向作用。橡胶林种植会优先选择在距离道路较近的区域。因不便于采胶或者橡胶林更新换代,距离道路较远、交通可达性较差的地区可能会减少橡胶种植或者改种其他经济作物。2)河流沿线也是橡胶林扩张的主要区域,其土壤含水量高且便于灌溉,更适宜橡胶林的种植。受橡胶价格下跌、建设用地扩张、生态环境保护等影响,2010年以来河流沿线部分区域橡胶林面积逐渐减少。3)西双版纳橡胶林扩张具有明显的趋边性特征,边境地区占全州橡胶林种植面积的比例持续上升。中缅和中老边境橡胶林种植面积均不断增加,中缅边境扩张速率和面积高于中老边境。

本文的橡胶林分布数据产品重点关注了成林而忽略了橡胶幼林,而其他统计结果也可能会遗漏个体农户种植的小块橡胶林。因此,有必要开展针对橡胶幼林的遥感识别方法研究,特别是利用高时空分辨率数据源(如Sentinel-2)进行更为精细的橡胶林遥感制图。

参考文献 (References):

Chiarelli D D, Rosa L, Rulli M C and D'Odorico P. 2018. The Water-Land-Food Nexus of Natural Rubber Production. *Journal of Cleaner Production*, 172: 1739-1747.

蔡亮红, 丁建丽, 魏阳. 2017. 基于多源数据的土壤水分反演及空间分异格局研究. *土壤学报*, 54 (5): 1057-1067. [Cai Lianghong, Ding Jianli and Wei Yang. 2017. Spatial Variation and Inversion of Soil Moisture Based on Multi-Source Data. *Acta Pedologica Sinica*, 54(5): 1057-1067.]

陈瑶. 2010. 西双版纳2009/2010年秋冬春连旱对橡胶生产的影响. *热带农业科技*, 33 (2): 43-46. [Chen Yao. 2010. The Effect of Three-Season Drought on Natural Rubber in Xishuangbanna. *Tropical Agricultural Science & Technology*, 33(2): 43-46.]

De Blecourt M, Brumme R, Xu J C, Corre M D and Veldkamp E. 2013. Soil Carbon Stocks Decrease Following Conversion of Secondary Forests to Rubber (*Hevea Brasiliensis*) Plantations. *PLoS One*, 8(7): e69357.

刁亚芹, 韩莹, 李兆富. 2013. 2000年以来天目湖流域茶园分布变化及趋势模拟. *湖泊科学*, 25 (6): 799-808. [Diao Yaqin, Han Ying and Li Zhaofu. 2013. Spatio-Temporal Change of Tea

Plantation Since 2000 and Model-Based Prediction in the Tianmuhu Reservoir Watershed. *Journal of Lake Sciences*, 25(6): 799-808.]

封志明, 刘晓娜, 姜鲁光, 李鹏. 2013. 中老缅交界地区橡胶种植的时空格局及其地形因素分析. *地理学报*, 68 (10): 1432-1446. [Feng Zhiming, Liu Xiaona, Jiang Luguang and Li Peng. 2013. Spatial-Temporal Analysis of Rubber Plantation and Its Relationship with Topographical Factors in the Border Region of China, Laos and Myanmar. *Acta Geographica Sinica*, 68(10): 1432-1446.]

冯京辉, 李鹏, 肖池伟, 祁月基, 李霞. 2021. 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. *地球信息科学学报*, 23 (3): 479-491. [Feng Jinghui, Li Peng, Xiao Chiwei, Qi Yueji and Li Xia. 2021. 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*, 23(3): 479-491.]

Guardiola-Claramonte M, Troch P A, Ziegler A D, Giambelluca T W, Vogler J B and Nullet M A. 2008. Local Hydrologic Effects of Introducing Non-Native Vegetation in a Tropical Catchment. *Ecohydrology*, 1(1): 13-22.

Li Hongmei, Aide T Mitchell, Ma Youxin, Liu Wenjun and Cao Min. 2007. Demand for Rubber is Causing the Loss of High Diversity Rain Forest in SW China. *Biodiversity and Conservation*, 16(6): 1731-1745.

Li Zhe and Fox Jefferson M. 2012. Mapping Rubber Tree Growth in Mainland Southeast Asia Using Time-Series MODIS 250 m NDVI and Statistical Data. *Applied Geography*, 32(2): 420-432.

李达, 张绍文. 2020. 橡胶主产区农户“橡胶依赖”及其影响因素——基于西双版纳612份胶农调查数据. *热带地理*, 40 (6): 1085-1093. [Li Da and Zhang Shaowen. 2020. Farms' "Rubber Dependence" and Influencing Factors in Major Rubber Producing Areas: Empirical Evidence from 612 Farm Households in Xishuangbanna. *Tropical Geography*, 40(6): 1085-1093.]

李国尧, 王权宝, 李玉英, 周双喜, 于海英. 2014. 橡胶树产胶量影响因素. *生态学杂志*, 33 (2): 510-517. [Li Guoyao, Wang Quanbao, Li Yuying, Zhou Shuangxi and Yu Haiying. 2014. A Review of Influencing Factors on Latex Yield of *Hevea Brasiliensis*. *Chinese Journal of Ecology*, 33(2): 510-517.]

李红梅, 马友鑫, 郭宗峰, 刘文俊. 2007. 基于RS和GIS的西双版纳土地覆被动态变化. *山地学报*, 25 (3): 280-289. [Li Hongmei, Ma Youxin, Guo Zongfeng and Liu Wenjun. 2007. Land Use/Land Cover Dynamic Change in Xishuangbanna Based on RS and GIS Technology. *Mountain Research*, 25(3): 280-289.]

李隆伟, 王云美, 毛昭庆. 2021. 中国境外(老挝)罂粟替代种植政策的问题研究. *农业展望*, 17 (8): 65-70. [Li Longwei,

- Wang Yunmei and Mao Zhaoqing. 2021. Research on the Problems of Implementing Opium Poppy Substitution Cultivation Policy Outside China (Laos). *Agricultural Outlook*, 17(8): 65-70.]
- 李雪柔, 陈飞燕, 林爱文, 邹建成, 周志高. 2020. 基于随机森林回归的茶园扩张驱动机制分析. *生态与农村环境学报*, 36(1): 44-52. [Li Xuerou, Chen Feiyan, Lin Aiwen, Zou Jiancheng and Zhou Zhigao. 2020. Driving Mechanism of Tea Plantation Expansion Using a Random Forest Regression Model. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 36(1): 44-52.]
- 李阳阳, 张军, 刘陈立, 杨旭超, 李杰. 2017. 老挝北部 5 省橡胶林提取及时空扩张研究. *林业科学研究*, 30(5): 709-717. [Li Yangyang, Zhang Jun, Liu Chenli, Yang Xuchao and Li Jie. 2017. Research on Extraction and Spatial-Temporal Expansion of Rubber Forest in Five Provinces of Northern Laos Based on Multi-Source Remote Sensing. *Forest Research*, 30(5): 709-717.]
- 李宇宸, 张军, 薛宇飞, 张萍. 2020. 基于 Google Earth Engine 的中老缅交界区橡胶林分布遥感提取. *农业工程学报*, 36(8): 174-181. [Li Yuchen, Zhang Jun, Xue Yufei and Zhang Ping. 2020. Remote Sensing Image Extraction for Rubber Forest Distribution in the Border Regions of China, Laos and Myanmar Based on Google Earth Engine Platform. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 36(8): 174-181.]
- 李月辉, 胡远满, 李秀珍, 肖笃宁. 2003. 道路生态研究进展. *应用生态学报*, 14(3): 447-452. [Li Yuehui, Hu Yuanman, Li Xiuzhen and Xiao Duning. 2003. A Review on Road Ecology. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 14(3): 447-452.]
- 李增加, 马友鑫, 李红梅, 彭明春, 刘文俊. 2008. 西双版纳土地利用/覆盖变化与地形的关系. *植物生态学报*, 32(5): 1091-1103. [Li Zengjia, Ma Youxin, Li Hongmei, Peng Mingchun and Liu Wenjun. 2008. Relation of Land Use and Cover Change to Topography in Xishuangbanna, Southwest China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 32(5): 1091-1103.]
- 廖谌姘, 李鹏, 封志明, 张景华. 2014. 西双版纳橡胶林面积遥感监测和时空变化. *农业工程学报*, 30(22): 170-180. [Liao Chenhua, Li Peng, Feng Zhiming and Zhang Jinghua. 2014. Area Monitoring by Remote Sensing and Spatiotemporal Variation of Rubber Plantations in Xishuangbanna. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 30(22): 170-180.]
- 刘景峰, 袁春. 2006. 云南边境地区近 30 年土地利用与覆盖变化研究. *国土资源科技管理*, 23(2): 15-19. [Liu Jingfeng and Yuan Chun. 2006. A Research into Land Use and Cover Change of Yunnan Boundary in the Past Thirties Year. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 23(2): 15-19.]
- 刘美玲, 齐清文, 邹秀萍, 李晋. 2006a. 基于 RS 对云南边境地区土地覆盖现状及变化研究. *国土资源遥感*, (1): 75-78, 87. [Liu Meilin, Qi Qingwen, Zhou Xiuping and Li Jing. 2006a. Spatial-Temporal Changes of the Land Use/Cover in Border Areas of Yunnan Province. *Remote Sensing for Natural Resources*, (1): 75-78, 87.]
- 刘美玲, 齐清文, 刘景峰, 邹秀萍, 李晋. 2006b. 云南边境地区土地利用/覆盖变化及环境效应分析. *云南地理环境研究*, 18(2): 1-5. [Liu Meilin, Qi Qingwen, Liu Jingfeng, Zhou Xiuping and Li Jing. 2006b. Spatial-Temporal Changes of the Land Use/Cover and Its Ecological Effect Analysis in Trans Boundary Yunnan Province. *Yunnan Geographic Environment Research*, 18(2): 1-5.]
- 刘少军, 周广胜, 房世波. 2015. 中国橡胶树种植气候适宜性区划. *中国农业科学*, 48(12): 2335-2345. [Liu Shaojun, Zhou Guangsheng and Fang Shibo. 2015. Climatic Suitability Regionalization of Rubber Plantation in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 48(12): 2335-2345.]
- 刘少军, 周广胜, 房世波. 2016. 中国橡胶种植北界. *生态学报*, 36(5): 1272-1280. [Liu Shaojun, Zhou Guangsheng and Fang Shibo. 2016. Preliminary Study of the Northern Planting Boundary of Rubber Tree Cultivation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 36(5): 1272-1280.]
- 刘晓娜, 封志明, 姜鲁光. 2013. 中老缅泰“黄金四角”地区土地利用与土地覆被变化研究进展. *地理科学进展*, 32(2): 191-202. [Liu Xiaona, Feng Zhiming and Jiang Luguang. 2013. Review of Land Use and Land Cover Change of Golden Economic Quadrangle Region in the Border of China, Laos, Myanmar and Thailand. *Progress in Geography*, 32(2): 191-202.]
- 刘晓娜, 封志明, 姜鲁光, 张景华. 2014. 西双版纳土地利用/土地覆被变化时空格局分析. *资源科学*, 36(2): 233-244. [Liu Xiaona, Feng Zhiming, Jiang Luguang and Zhang Jinghua. 2014. Spatial-Temporal Pattern Analysis of Land Use and Land Cover Change in Xishuangbanna. *Resources Science*, 36(2): 233-244.]
- 刘怡媛, 肖池伟, 李鹏, 刘影, 饶滴滴. 2019. 基于 CR_{NBR} 物候算法的西双版纳橡胶成林提取及时空变研究. *地球信息科学学报*, 21(3): 467-474. [Liu Yiyuan, Xiao Chiwei, Li Peng, Liu Ying and Rao Didi. 2019. Extraction of Mature Rubber Plantations Based on the CR_{NBR} Algorithm and Spatio-Temporal Variations in Xishuangbanna. *Journal of Geo-Information Science*, 21(3): 467-474.]
- 罗路长, 刘波, 刘雪朝. 2017. OpenStreetMap 路网数据质量评价及应用分析. *江西科学*, 35(1): 151-157. [Luo Luchang, Liu Bo and Liu Xuechao. 2017. Data Quality Assessment and Application Analysis for OpenStreetMap Road Network. *Jiangxi Science*, 35(1): 151-157.]
- Mann C C. 2009. Addicted to Rubber. *Science*, 325(5940): 564-566.
- 吴学灿, 段禾祥, 杨靖. 2020. 西双版纳热带雨林保护与修复探讨. *环境与可持续发展*, 45(5): 118-121. [Wu Xuecan, Duan Hexiang and Yang Jing. 2020. Discussion on the Protection and

- Restoration of Tropical Rainforest in Xishuangbanna. *Environment and Sustainable Development*, 45(5): 118-121.]
- Xiao Chiewei, Li Peng and Feng Zhiming. 2019a. How Did Deciduous Rubber Plantations Expand Spatially in China's Xishuangbanna Dai Autonomous Prefecture during 1991-2016?. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 85(9): 687-697.
- Xiao Chiwei, Li Peng and Feng Zhiming. 2019b. Monitoring Annual Dynamics of Mature Rubber Plantations in Xishuangbanna during 1987-2018 Using Landsat Time Series Data: A Multiple Normalization Approach. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 77: 30-41.
- Xiao Chiwei, Li Peng, Feng Zhiming, Liu Yiyuan and Zhang Xianzhou. 2020. Sentinel-2 Red Edge Spectral Indices (RESI) Suitability for Mapping Rubber Boom in Luang Namtha Province, Northern Lao PDR. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 93: 102176.
- Xiao Rui, Su Shiliang, Mai Gengchen, Zhang Zhonghao and Yang Chenxue. 2015. Quantifying Determinants of Cash Crop Expansion and Their Relative Effects Using Logistic Regression Modeling and Variance Partitioning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 34: 258-263.
- Xu Jianchu, Grumbine R E and Beckschäfer P. 2014. Landscape Transformation through the Use of Ecological and Socioeconomic Indicators in Xishuangbanna, Southwest China, Mekong Region. *Ecological Indicators*, 36: 749-756.
- 阎建忠, 张懿锂, 刘林山, 沈振西, 刘燕华, 郑度. 2003. 高原交通干线对土地利用和景观格局的影响——以兰州至格尔木段为例. *地理学报*, 58 (1): 34-44. [Yan Jianzhong, Zhang Yili, Liu Linshan, Shen Zhenxi, Liu Yanhua and Zheng Du. 2003. Main Effect of Plateau Traffic on Land Use and Landscape Pattern Change: From Lanzhou to Golmud. *Acta Geographica Sinica*, 58(1): 34-44.]
- Zhang Hua, Zhang Ganlin, Zhao Yuguo, Zhao Wenjun and Qi Zhiping. 2007. Chemical Degradation of a Ferralsol (Oxisol) Under Intensive Rubber (*Hevea Brasiliensis*) Farming in Tropical China. *Soil and Tillage Research*, 93(1): 109-116.
- Zheng Fangyu, Huang Jiuming, Feng Zhiming and Xiao Chiwei. 2021. Impact of the Kunming-Bangkok Highway on Land Use Changes Along the Route between Laos and Thailand. *Land*, 10(9): 991.
- Zhang Le, Kono Yasuyuki, Kobayashi, Shigeo, Hu Huabin, Zhou Rui and Qin, Yaochen. 2015. The Expansion of Smallholder Rubber Farming in Xishuangbanna, China: A Case Study of Two Dai Villages. *Land Use Policy*, 42: 628-634.
- Ziegler Alan D, Fox Jefferson M and Xu Jianchu. 2009. The Rubber Juggernaut. *Science*, 324(5930): 1024-1025.
- 张佳琦, 薛达元. 2013. 西双版纳橡胶林种植的生态环境影响研究. *中国人口·资源与环境*, 23 (S2): 304-307. [Zhang Jiaqi and Xue Dayuan. 2013. The Impacts of Rubber Plantation on the Eco-Environment in Xishuangbanna of Yunnan Province. *China Population, Resources and Environment*, 23(S2): 304-307.]
- 张景华, 封志明, 姜鲁光, 杨艳昭, 刘晓娜. 2013. 道路干扰对澜沧江流域景观格局的影响. *自然资源学报*, 28 (6): 969-980. [Zhang Jinghua, Feng Zhiming, Jiang Luguang, Yang Yanzhao and Liu Xiaona. 2013. Effect of Road Disturbance on Landscape Pattern in the Lancang River Valley. *Journal of Natural Resources*, 28(6): 969-980.]
- 张明洁, 张京红, 刘少军, 李文韬. 2015. 中国橡胶气象研究进展概述. *中国农学通报*, 31 (29): 191-197. [Zhang Mingjie, Zhang Jinghong, Liu Shaojun and Li Wentao. 2015. Research Progress of Rubber Meteorology. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 31(29): 191-197.]
- 张佩芳, 许建初, 王茂新, 邓喜庆. 2006. 西双版纳橡胶种植特点及其对热带森林景观影响的遥感研究. *国土资源遥感*, (3): 51-55. [Zhang Peifang, Xu Jianchu, Wang Maoxin and Deng Xiqing. 2006. Spatial and Temporal Dynamics of Rubber Plantation and Its Impacts on Tropical Forest in Xishuangbanna. *Remote Sensing for Land & Resources*, (3): 51-55.]
- 张懿锂, 阎建忠, 刘林山, 摆万奇, 李双成, 郑度. 2002. 青藏公路对区域土地利用和景观格局的影响——以格尔木至唐古拉山段为例. *地理学报*, 57 (3): 253-266. [Zhang Yili, Yan Jianzhong, Liu Linshan, Bai Wanqi, Li Shuangcheng and Zheng Du. 2002. Impact of Qinghai-Xizang Highway on Land Use and Landscape Pattern Change: From Golmud to Tanggulusan Pass. *Acta Geographica Sinica*, 57(3): 253-266.]
- 周宗, 胡绍云, 谭应中. 2006. 西双版纳大面积橡胶种植与生态环境影响. *云南环境科学*, 25 (Z1): 67-69. [Zhou Zong, Hu Shaoyun and Tan Yingzhong. 2006. Ecological Environment Impact from Large-Scale Rubber Planting in Xishuangbanna. *Yunnan Environmental Science*, 25(Z1): 67-69.]
- 邹国民, 杨勇, 曹云清, 石兆武, 蒋桂芝. 2015. 西双版纳橡胶种植业现状、问题及发展的探讨. *热带农业科技*, 38 (3): 1-3, 8. [Zou Guoming, Yang Yong, Cao Yunqing, Shi Zhaowu and Jiang Guizhi. 2015. Current State of Natural Rubber Tree and Its Development Proposal in Xishuangbanna. *Tropical Agricultural Science & Technology*, 38(3): 1-3, 8.]

作者贡献声明:

翟佳豪:数据处理、初稿撰写、制图等;

刘影:论文修改和课题经费支持;

肖池伟:提出了研究思路,承担了写作过程中具体内容指导、论文修改和课题经费支持。

Spatio-Temporal Changes and Linear Characteristics of Rubber Plantations in Xishuangbanna, Southwest China from 1987 to 2018

Zhai Jiahao¹, Liu Ying¹ and Xiao Chiwei²

(1. School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 2. Institute of Geographic, Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The expansion of rubber plantations is an important driving factor and main manifestation of land use/cover change in Xishuangbanna, which has extensive socio-economic and eco-environment effects locally. However, to our knowledge, the expansion trends of rubber plantations are still not clearly understood, such as the distribution characteristics and changes of rubber plantations in traffic corridors, along rivers, and along border regions. Based on the 30 m resolution rubber plantations dataset of Xishuangbanna from 1987 to 2018, we used GIS spatial analysis methods, such as overlay and buffer, to compare the spatial characteristics and regional differences of rubber plantations along roads, rivers, and boundary lines in the past 32 years. The results were as follows: Firstly, from 1987 to 2018, rubber plantations in Xishuangbanna expanded significantly in traffic corridors, along rivers, and along border regions. The planted area of rubber plantations increased by 1,874.6 km² within 5 km along the roads, 1,484.6 km² within 5 km along the rivers, and 1,393.1 km² in the border regions (i.e., a buffer of 20 km). Secondly, roads have been affected by the accessibility of rubber farming and transportation. Over the past 32 years, the average proportion of rubber plantations within the 5 km buffer zone of the roads has exceeded 90%. Roads play an important guiding role in the location selection of rubber plantations. Rubber plantations are planted in areas close to roads, rather than areas far from roads with poor accessibility, because it is not convenient to pick rubber or undergo rubber plantation replacement otherwise, and this may reduce planting or result in a switch to other cash crops. Thirdly, rivers and water source irrigation are important conditions and limiting factors for rubber plantation expansion. In the past 32 years, the average proportion of rubber plantations in the 5 km buffer zone along the rivers has been 69.7%. It is worth noting that, as a result of natural rubber prices remaining low, urbanization, and ecological environmental protection, the planted area of rubber plantations along the river began to decline in the 2010s, especially within 2 km along the line. Finally, in border regions, the rubber plantations showed obvious characteristics of border-proneness in Xishuangbanna. Over the past 32 years, the average proportion has been 55.6% of rubber plantations in the border regions, and this increased from 35.4% in 1987 to 66.2% in 2018. In particular, the expansion area and rate of the Sino - Myanmar border are higher than those of the Sino-Laos border. This study is helpful for clarifying the spatial distribution and change trend of rubber plantations in Xishuangbanna. It provides support for future rubber plantation planting and cross-border cooperation.

Keywords: rubber; roads; rivers; border regions; Xishuangbanna