

基于 LandTrendr 的老挝橡胶林遥感识别及扩张监测

琚旺龙¹, 詹正豪², 秦震宇¹, 张 军^{2*}

1. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 云南昆明 650500; 2. 云南大学地球科学学院, 云南昆明 650500

摘 要: 天然橡胶作为世界上重要的工业原料, 也是老挝农民收入的重要组成部分, 受替代种植政策和橡胶价格变化的影响, 准确快速地监测当地人工橡胶林对于促进橡胶产业的良性发展具有重要意义。目前大部分研究都集中在小区域的橡胶林提取, 多为单时相或双时相影像的分类提取, 无法得到长时间序列的橡胶林扩张特征。为探究长时间、大尺度的橡胶林种植扩张特征, 本研究选取 1990—2020 年连续 30 年的 Landsat 时间序列影像, 利用 LandTrendr 算法对老挝 30 年间橡胶林变化进行提取, 并借助国际橡胶期货价格和地形数据进行时空变化分析。结果表明: 经过优选后的特征组合可以更好地进行橡胶林分布提取, 2020 年橡胶林分布提取的总体精度为 89.85%, Kappa 系数为 0.82, 得出老挝在 2020 年的橡胶林总面积为 32.1 万 hm^2 ; 使用 LandTrendr 算法和二次分类的橡胶林扩张变化监测总体精度为 92.44%, Kappa 系数为 0.82; 老挝人工橡胶林的扩张和橡胶期货市场密切相关, 通过地形因素分析, 得出橡胶林适宜种植在低海拔、坡度平缓且向阳的区域。本研究能够很好地在国家尺度上对橡胶林变化进行长时间的监测, 为橡胶产业的发展 and 政策的把控提供数据支撑。

关键词: 老挝; 人工橡胶林; LandTrendr 算法; Landsat; 变化检测

中图分类号: S31 **文献标志码:** A

Remote Sensing Identification and Expansion Monitoring of Rubber Forests in Laos Based on LandTrendr

JU Wanglong¹, ZHAN Zhenghao², QIN Zhenyu¹, ZHANG Jun^{2*}

1. Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650500, China; 2. School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650500, China

Abstract: Natural rubber, a crucial industrial raw material worldwide, and a significant part of the income for Laotian farmers, is influenced by alternative planting policies and fluctuations in rubber prices. Accurate and rapid monitoring of local artificial rubber plantation is of crucial significance for promoting the sustainable development of the rubber industry. Most research has focused on the extraction of rubber plantation information in small areas, typically utilizing single or dual-temporal image classification, which fails to capture the long-term expansion characteristics of rubber forests. To investigate the long-term, large-scale expansion features of rubber plantation, this study selected a continuous thirty-year Landsat time series imagery from 1990 to 2020. The LandTrendr algorithm was employed to extract changes in rubber plantation across Laos over the three decades. International rubber futures prices and terrain data were also utilized for spatiotemporal change analysis. The selected feature combination, after optimization, can better extract rubber forest distribution. The overall accuracy of rubber forest distribution extraction in 2020 was 89.85%, with a Kappa coefficient of 0.82, revealing Laos' rubber plantation area to be 321 000 hectares in 2020. The overall accuracy of rubber forest expansion change monitoring using the LandTrendr algorithm and secondary classification was 92.44%, with a Kappa coefficient of 0.82. The expansion of artificial rubber forests in Laos was closely related to the rubber futures market. Through terrain factor analysis, it is deduced that rubber forests are suitable for planting in low-altitude,

收稿日期 2024-01-10; **修回日期** 2024-01-30

基金项目 国家国防科技工业局高分专项云南省政府综合治理深度应用与规模化产业化示范项目 (No. 89-Y50G31-9001-22/23); 云南大学研究生创新人才培养项目——研究生课程教材建设质量提升计划 (No. HXKC202112)。

作者简介 琚旺龙 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 遥感影像识别。*通信作者 (Corresponding author): 张 军 (ZHANG Jun), E-mail: zhjun@ynu.edu.cn。

gently sloping, and sunny areas. This study effectively monitors changes in rubber forests at the national level over an extended period, providing valuable data support for the development of the rubber industry and policy control.

Keywords: Laos; planted rubber forest; LandTrendr algorithm; Landsat; change detection

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.08.023

天然橡胶作为重要的工业原料是国防和工业建设不可或缺的战略资源,已成为中国国民经济的基础产业之一^[1]。橡胶树作为重要的经济作物在热带地区农民增收和经济发展中发挥着越来越重要的作用^[2]。全球天然橡胶的生产地高度集中,东南亚地区的天然橡胶产品占全球的 90%以上。而老挝的橡胶种植得益于马来西亚、泰国等先行国的经验,在国家市场的强劲需求下,发展迅速,橡胶种植面积和产量得到大幅提升,成为东南亚橡胶新的增长点^[3]。同时,老挝的橡胶种植也受中国境外罂粟替代种植政策的影响,老挝的南塔省、乌多姆赛省、丰沙里省开展替代种植的主要农作物就包含天然橡胶,这极大地促进了当地的经济社会发展^[4]。老挝橡胶产业飞速发展的同时,大量的原始森林被砍伐用于满足橡胶林的扩张,给生态环境带来严重影响。利用遥感技术提取天然橡胶林种植的空间分布信息,对橡胶林进行长时序的扩张监测,获取橡胶林种植的时空变化特征,是开展橡胶林长势、灾害、产量遥感监测的重要前置条件^[5]。

变化检测作为林业遥感领域的研究热点,经过多年的发展,已经取得了大量的研究成果。随着美国地质调查局(USGS)对 Landsat 数据的免费开放,可以将这些数据应用于区域尺度和全球尺度的森林信息提取^[6]。而森林变化分析作为变化检测中重要的组成部分,变化较为频繁且干扰类型复杂多样,不同区域不同时期的森林变化所适用的变化检测方法也有所不同^[7]。基于 Landsat 影像数据的森林变化检测方法在近 10 年得到非常大的发展,在此基础上,也有不少研究将这些方法应用于橡胶林种植扩张研究,并取得了不错的成果^[8]。与其他变化检测方法不同,LandTrendr 算法对于影像的要求较低,通过自定义时间窗口,每年获得一幅完整清晰的影像即可进行变化检测,且生成的基于轨迹的光谱时间序列数据基本上不存在年际信号噪声,对于东南亚这种多云多雨的区域有着较好的适用性。

目前对人工橡胶林的研究多集中于海南岛等小区域,且使用决策树方法进行单时相种植区域

识别,对大范围的人工橡胶林识别和变化检测研究很少。本研究将单时相的随机森林分类和基于 LandTrendr 算法的变化检测相结合,对老挝进行连续 30 年的人工橡胶林扩张监测,总结出一套适用于大范围人工橡胶林扩张监测的方法。通过对老挝人工橡胶林的扩张监测,可以为中国橡胶产业的发展和政策制定提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

老挝位于东南亚,是一个位于中南半岛内陆的国家,其国土面积为 23.68 万 km²。老挝地势南北高低不平,北部与中国云南的滇西高原相接,东部与老挝和越南的边境地区形成由长山山脉构成的高原,西部则为湄公河谷地和湄公河及其支流沿岸的盆地和少量平原。老挝属于热带和亚热带季风气候,5—10 月为雨季,11 月至次年 4 月为旱季。全境降水量充沛,一般年降水量为 2000 mm。

老挝的橡胶树种植开始于 1930 年,自 2000 年以来,天然橡胶种业发展迅速,主要的驱动力包括其国内和国际两方面因素,主要是由于大规模土地租赁特许权的开放^[9]。

1.2 数据源

1.2.1 数据源和预处理 Landsat 是美国航空航天局(NASA)与美国地质调查局(USGS)的联合计划,该计划提供了较长时间的连续基空观测记录。

本研究使用 1990—2020 年的 Landsat 5/7/8 卫星获得的遥感影像数据,所有的 Landsat 数据均为 Level 2-Collection 2-Tier 1 级别,均来自 GEE 平台。Level 2 表示数据经过了几何校正、辐射定标和大气校正;Collection 2 表示 USGS 对 Landsat 档案进行的第二次重大再处理工作,实现了多项数据产品改进;Tier 1 表示具有最高数据质量的 Landsat 影像,并被认为适合于时间序列分析^[10],在此数据的基础上进行去云处理就可以进行相关研究。

完全覆盖研究区域需要 25 景 Landsat 影像(path: 125~130, row: 44~51)。为了做到连续变化

检测,需要消除不同 Landsat 卫星之间传感器差异造成的影响,本研究将 Landsat 8 进行与 Landsat 5/7 相同的辐射校正参数,便于后期的缨帽变换处理。

除了 Landsat 影像数据之外,本研究还用到分辨精度为 30 m 的 SRTM 1 地形数据,这是由美国在 2000 年 2 月 11 日测量的覆盖全球 80% 以上陆地面积的数字高程模型 DEM (Digital Elevation Model) 数据。本研究使用 DEM 数据提取坡度、坡向等地形辅助因子数据,有助于提高分类精度。

World Cover 数据集是欧洲航天局 (ESA) 联合全球多家科研机构,共同制作的 2020 年全球土地覆盖产品,分辨率为 10 m,基于 Sentinel-1 和 Sentinel-2 数据进行制作,将该数据集中包含森林的部分进行掩膜提取^[11]。

1.2.2 样本点数据 为了对现有橡胶林的分布进行提取,需要有数量充足且准确的样本点进行训练和验证。本研究主要选取 5 种地物类型,分别为橡胶林、森林、耕地、水体和建成区。样本点的来源是年度全球土地利用数据和 Google Earth (<https://google.cn/earth/>) 的历史高分辨率卫星影像,还有一些橡胶替代种植企业提供的数据。对于除橡胶林外的 4 种地物类型,本研究使用 2020 年 ESA 全球土地覆盖 10 m 分辨率数据 (<https://esa-worldcover.org/en>) 进行随机样本点的生成,之后利用 Google Earth 对样本点进行比对和修改,删除明显错误的样本点,再添加目视解译和企业提供数据获得的橡胶林样本点数据。最终获得 9901 个样本点,其中包括橡胶林样本 2346 个,森林样本 4630 个,耕地样本 431 个,建成区样本 2395 个和水体样本 99 个,其中 70% 用于随机森林模型的样本训练,其余 30% 用于精度验证。

借助 Google Earth 提供的高清历史影像和 LandTrendr 算法拟合的时间序列曲线获取变化和非变化样本区域,最终共获得 450 个样本,其中带有大致变化年份的样本 324 个,未发生变化的样本 126 个,将用于橡胶林变化制图的精度评估。

1.3 方法

1.3.1 橡胶林种植分布提取 随机森林是通过集成学习的 Bagging 思想将多棵树集成的一种算法,其基本单元为决策树。随机森林在多光谱、多时相遥感影像分类中,具有速度快和精度高等优点^[12]。在进行随机森林分类时,需要考虑特征

个数和决策树棵数,针对不同的特征组合选择合适的参数,可以在保证效率的情况下得到更高的精度。

对于 Landsat 8 影像,本研究选取 6 个基础波段和 4 个光谱指数作为特征因子。6 个基础波段分别为蓝、绿、红、近红外、短波红外 1 和短波红外 2,4 个光谱指数分别为归一化植被指数、归一化水体指数、归一化建筑指数和绿红植被指数。纹理特征是一种全局特征,反映图像中同质现象的视觉特征。灰度共生矩阵 (GLCM) 的统计方法是在假定图像中各像素间的空间分布关系包含了图像纹理信息的前提下,提出的具有广泛性的纹理分析方法^[13]。在 GLCM 的基础上计算描述纹理特征的统计属性,可以获得 8 个常用的纹理特征,分别为均值 (mean)、方差 (variance)、同质度 (homogeneity)、对比度 (contrast)、非相似性 (dissimilarity)、熵 (entropy)、角二阶矩 (ASM) 和相关性 (correlation)。通过缨帽变换,可以获得反映多光谱遥感中的土壤和植被信息,分别为亮度、绿度和湿度。利用 DEM 数据,可以提取出高程、坡度和坡向,作为分类的特征因子。

在随机森林算法中,训练样本会通过有放回的随机抽样进行 t 次抽样,并进入到并行的 t 个决策树中。这样的抽样方式会导致有部分训练集中的样本无法进入决策树中,而这些未被采集的样本就叫做袋外数据 (Out of Bag, OOB),通过袋外数据可以检测模型的泛化能力,相当于交叉验证^[14]。对于这些特征,利用随机森林算法中的特征重要性和 OOB 袋外误差进行筛选,进行最佳特征组合,避免信息冗余。

1.3.2 橡胶林扩张监测 LandTrendr 是一组光谱-时间分割算法,是针对多波段 Landsat 影像的时间序列开发,用于检测变化以及对在变化发生之前和之后的土地覆盖进行分类。对于森林类型的土地覆盖,该算法可以捕获突然发生的干扰事件,例如砍伐和火灾^[15]。LandTrendr 算法可以通过拟合时间序列曲线对不同像元进行扰动检测,通过光谱变化轨迹简化后的重要特征,例如变化发生的年份、变化持续时间、变化强度、变化前后的光谱值等,从而获得森林变化的基本信息。具体的拟合公式如下:

$$f(x) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot P_i(x)$$

式中， $f(x)$ 代表拟合的曲线， x 代表时间序列中的时间点， a_i 是 Legendre 多项式的系数， $P_i(x)$ 是 Legendre 多项式的第 i 阶， n 代表拟合曲线的阶数，通常根据具体情况选择。

归一化燃烧指数（normalized burn ratio, NBR）是一种遥感影像指数，可以很好地反映植被状况，从而对森林的变化较为敏感，经常被用于检测森林扰动和生态恢复过程^[16]，其计算公式为：

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

式中，NIR 代表近红外波段的反射值，SWIR 代表短波红外波段的反射值。

研究区内的橡胶林具有明显的物候特征，直接体现在叶的抽发和凋落，在 12 月底橡胶林开始落叶，到次年 3 月开始进入新叶抽发期。为避免落叶期光谱指数对识别的影响，将每年 4 月 20 日—12 月 10 日作为绿叶期，试验选择的影像均为绿叶期的影像。将 1990—2020 年绿叶期的 Landsat 影像输入 LandTrendr 算法，再使用 CFMask 算法进行云和阴影的掩膜，获得一组连续的无云 Landsat 时间序列影像集。对时间序列影像集进行森林的栅格掩膜，可以有效避免类似森林的地物变化对变化检测产生的干扰，例如灌木丛的砍伐、密集农田的弃耕和复垦。

对掩膜后的影像集进行逐像元的 NBR 计算，将计算得到的 NBR 值按照时间顺序排列，将 NBR 时间序列作为 LandTrendr 算法的输入数据，算法会在 NBR 时间序列中检测变化点，识别和描述地表特征的变化。通过设置参数，对趋势线进行拟合，获得一条地表特征随着时间变化的趋势线，通过对突变时间、持续时间、前后数值变化来判断是否发生了森林扰动。通过查阅文献和反复试验，本研究的 LandTrendr 算法参数如表 1 所示。

通过 LandTrendr 算法检测出的森林扰动除了包含橡胶林种植，还包括火烧、城市扩张、农田种植等原因，需要通过二次分类将检测到的森林扰动进行区分，筛选出由于橡胶林种植造成的森林扰动。该算法生成的图像共包含 6 个波段，包括扰动发生的年份、扰动强度、持续时间、变化普遍性、变化速率和检测信噪比。除扰动发生年份外，其他信息可有助于区分是否为橡胶林种植引起的森林扰动。根据这些信息进行二次分类可以获得橡胶林扰动变化图，再使用 2020 年橡胶林分布图掩膜掉非橡胶林种植的区域，可以进一

表 1 LandTrendr 算法参数设置
Tab. 1 LandTrendr algorithm parameterization

参数 Parameter	数值 Score	介绍 Introduction
maxSegments	6	时间序列上拟合的最大线段数
spikeThreshold	0.9	抑制尖峰的阈值
vertexCountOvershoot	3	拟合模型中最多能存在的拐点数量
preventOneYearRecovery	True	是否防止一年恢复的情况
recoveryThreshold	0.35	若恢复速率快于该值的倒数，则忽略
pvalThreshold	0.05	变化点的阈值，大于该值则被舍弃
bestModelProportion	0.75	当存在多个拟合模型时，大于该值则被选中
minObservationsNeeded	6	输出拟合所需的最小观测数

步避免其他森林扰动类型对于试验的干扰。

1.3.3 分类精度评价 在使用随机森林进行分类后，计算混淆矩阵的总体分类精度和 Kappa 系数来判断分类准确与否。总体精度为正确分类的像元总和除以总像元数，而 Kappa 系数用于衡量分类精度，检验一致性^[17]。当 Kappa 系数小于 0.40 时，表明一致性不理想；当 Kappa 系数为 0.40~0.60 时，表明一致性效果一般；当 Kappa 系数大于 0.60 时，表明参考的分类结果和橡胶提取的结果二者之间的一致性较强^[18]。其计算公式为：

$$OA = \frac{TP + TN}{TP + FN + FP + TN}$$
$$Kappa = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})}$$
$$PA = \frac{\text{正确分为A类的像元数}}{\text{A类真实参考总数}}$$
$$UA = \frac{\text{正确分为A类的像元数}}{\text{被分为A类的像元总数}}$$

式中，OA 表示分类正确的样本个数占所有样本个数的比例；TP 表示实际为正类的样本被正确地分类为正类的数量；TN 表示实际为负类的样本被正确地分类为负类的数量；FN 表示实际为正类的样本被错误地分类为负类的数量；FP 为实际为负类的样本被错误地分类为正类的数量； N 表示类别个数的总和； r 表示类别； i 为矩阵中元素所在位置的行数和列数； x_{ii} 为误差矩阵对角线元素； x_{i+} 为类别的列总和； x_{+i} 为类别的行总和；PA 为

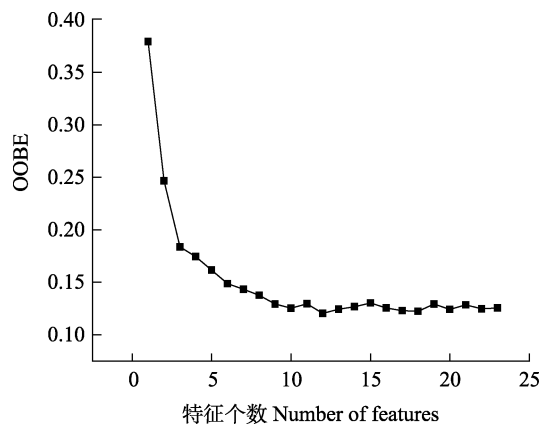


图 2 特征个数与 OOB 的关系
Fig. 2 Relationship between number of features and OOB

2.1.2 橡胶林分布与精度评价 对特征进行筛选组合后，在减少特征数量的情况下，还能够有更高的分类精度。从精度评价结果来看，当分类的总体精度为 89.85%，Kappa 系数为 0.82 时，分类效果较好，从橡胶林的用户精度和生产者精度上看，能够较好地将该地物和其他地物区分开来（表 5）。

从橡胶林分布来看，2020 年老挝的橡胶林总面积为 32.1 万 hm^2 ，与资料中显示的 30 万 hm^2

相差不大^[20]，这可能是由于在分类时，和部分零碎的森林产生混淆，导致橡胶林面积变大；还可能由于 Landsat 分辨率较低和提取范围较大，导致了混合像元的误提取。在分布区域上看，与已有的资料一致，在北部靠近边境的省份种植较多，在中部和南部也有种植。

2.2 橡胶林变化制图精度评估

在研究区域内结合谷歌历史高清影像和 LandTrendr 算法拟合出的 NBR 曲线获得样本验证数据，利用随机获得的不同年份的 450 个样本数据对橡胶林变化进行精度评估。在进行验证时，变化样本点和实际变化区域重合，且相差年份不超过 2 年，则认为分类正确，反之则认为分类错误。未变化样本点若在变化检测时间内发生变化，则认为分类错误。通过样本验证数据对橡胶林变化检测图进行生产者精度、用户精度、总体精度和 Kappa 系数的计算，从而判断制图的准确性是否符合要求。对于变化区域，生产者精度和用户精度均达到 90% 以上，分别为 96.47% 和 92.90%，制图的总体精度为 92.44%，Kappa 系数达到 0.82，说明对于橡胶林变化检测的效果较好（表 6）。

表 5 分类精度评价
Tab. 5 Classification accuracy evaluation

指标 Index	橡胶林 Rubber	森林 Forest	耕地 Cropland	建成区 Built-up	水体 Water	总体精度 Overall accuracy/%	Kappa
用户精度/%	88.38	90.53	82.20	94.44	100.00	89.85	0.82
生产者精度/%	85.20	93.71	70.23	92.25	96.97		

表 6 橡胶林变化制图精度评估
Tab. 6 Assessment of the accuracy of mapping changes in rubber forests

类别 Classification	生产者精度 Producer accuracy/%	用户精度 User accuracy/%	总体精度 Overall accuracy/%	Kappa
变化	96.47	92.90	92.44	0.82
未变化	91.27	83.33		

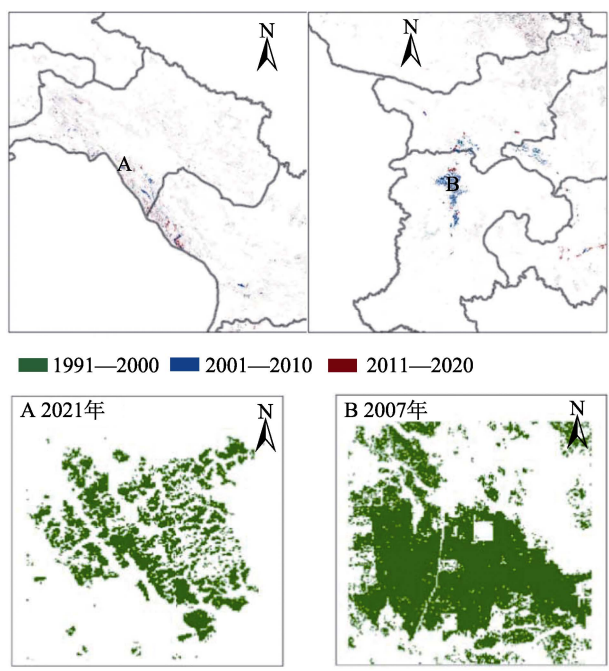
2.3 老挝橡胶林时空变化分析

2.3.1 橡胶林总体扩张趋势 从图 3 可以看出，1991—2020 年，老挝的橡胶林一直处于不断扩张的趋势，从分布来看，橡胶林的种植扩张多处于边境省份，例如与多国交界的北部省份，橡胶林扩张较为明显；在中部区域，橡胶林扩张多位于与泰国相邻的省份。从总体数据来看，1990—2020 年，新种植橡胶林 18.94 万 hm^2 ，占 2020 年已有面积的 59%，可以看出老挝橡胶林的扩张较为迅速，种植面积增长明显。2006—2010 年新增橡胶林最

多，共 7.07 万 hm^2 ，仅 2010 年新增橡胶林 3.43 万 hm^2 （图 4）。

根据 2020 年老挝橡胶林分布和 30 年间新植橡胶林可以计算出老挝各省份在 1990 年的橡胶林种植分布。如表 7 所示，其中橡胶林种植较多和增长较多的省份大多位于边境，例如与中国、缅甸接壤的丰沙里省、琅南塔省和波乔省，与泰国接壤的沙湾拿吉省等。

通过分析 1997—2020 年国际橡胶期货价格的变化可以发现，橡胶林面积和 market 价格的波动



上图变化区域图，下图为对应变化细节图。
The above figure shows the change area map, and the following figure shows the corresponding change details.

图 3 橡胶林变化细节图

Fig. 3 Detailed map of rubber forest changes

表 7 老挝各省份橡胶林种植分布
Tab. 7 Distribution of rubber forest plantations by province in Laos

省份 Province	种植面积 Planting area/hm ²		变化面积 Area of variation/hm ²
	2020	1990	
阿速坡省	9 656.64	3462.21	6 194.43
波乔省	26 325.55	12 391.84	13 933.71
波里坎赛省	27 152.87	8 612.51	18 540.36
占巴塞省	23 237.90	5 628.23	17 609.67
华潘省	6 142.32	3 302.73	2 839.59
甘蒙省	20 233.98	4 775.58	15 458.40
琅南塔省	35 227.90	13 959.82	21 268.08
琅勃拉邦省	21 580.31	12 652.22	8 928.09
乌多姆塞省	25 130.93	18 751.07	6 379.86
丰沙里省	27 016.84	18 754.48	8 262.36
沙拉湾省	12 900.60	1 683.99	11 216.61
沙湾拿吉省	26 390.29	1 945.75	24 444.54
万象市	7 698.27	1 048.80	6 649.47
沙耶武里省	14 392.15	11 611.96	2 780.19
万象省	27 258.83	8 893.43	18 365.4
色贡省	9 141.48	3 923.19	5218.29
川圹省	1 688.76	350.73	1 338.03
合计	321 175.62	131 748.54	189 427.08

有很强的相关性。橡胶期货价格自 2001 年到达谷底后，开始逐渐上涨，橡胶林面积也随之上升，

在 2010 年达到顶峰，而橡胶期货价格也在 2011 年达到最高，之后逐渐下降并趋于平稳（图 4）。

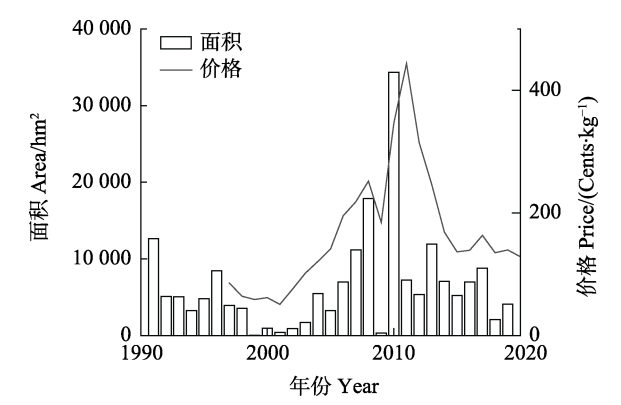


图 4 1990—2020 年老挝橡胶林种植扩张分布与期货价格

Fig. 4 Distribution of rubber forest plantation expansion and futures prices in Laos from 1990 to 2020

2.3.2 橡胶林扩张地形特征 研究区域内的橡胶林分布基本符合资料中对种植条件的描述^[21]，橡胶林的扩张主要分布在海拔 0~750 m 区间，其中 0~500 m 占 64.4%，500~750 m 占 34.9%，而 750 m 以上基本很少，仅占 0.7%，基本均处于低海拔区域（图 5A）。对于坡度，橡胶林不宜种植在 35° 以上的区域，从图 5B 可知，绝大多数的橡胶林均种植在 35° 以下，0~5° 占 42.1%，5~15° 占 36.2%，15~25° 占 17.6%，25~35° 占 3.9%，而 35° 以上只占 0.2%。从坡向来看，橡胶林的扩张分布较为平均，占比最多的坡向为南和东南，分别占 18.5% 和 17.8%，皆为阳坡。在所有坡向中，位于阳坡种植的橡胶林占 57.6%，半阳坡种植的占 22.3%（图 5C）。

3 讨论

通过 GEE 平台和 Landsat 卫星数据可以在国家尺度上对橡胶林进行提取，能够取得良好效果，并且分类效率高。随机森林算法分类效果较好，但输入的特征并不是越多越好，当特征较多时，分类效率会下降，同时也会导致分类效果较差，因此要选择合适的特征和随机森林分类参数。

通过 GEE 平台提供的强大计算能力，结合长时间序列的 Landsat 时序影像，可以很好地减少雨云对影像质量的影响。通过选取的验证样本发现，通过 LandTrendr 算法检测到的橡胶林扩张变化总体精度能达到 92.44%，Kappa 系数为 0.82。变化检测结果显示，1990—2020 年共新增橡胶林

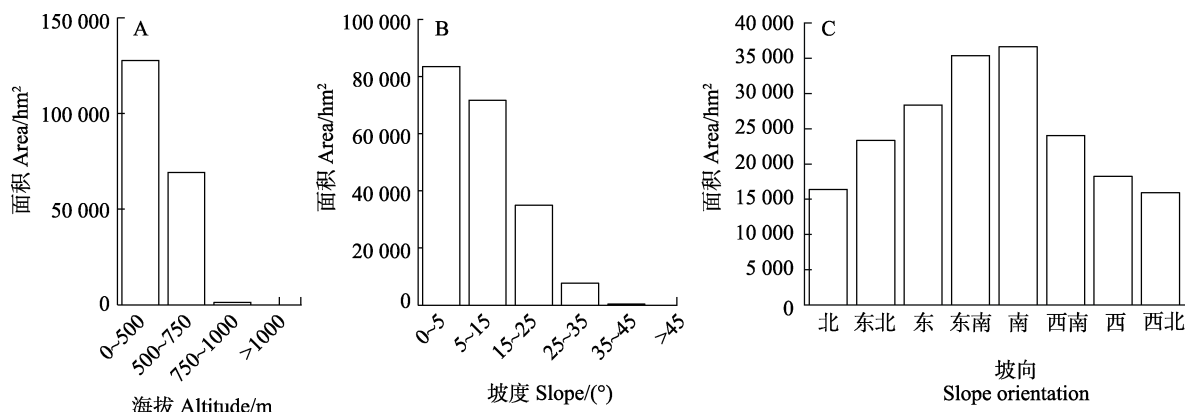


图 5 1990—2020 年老挝橡胶林扩张与地形分布

Fig. 5 Expansion and topographic distribution of rubber forests in Laos from 1990 to 2020

18.94 万 hm^2 ，占橡胶林总种植面积的 59%，其中 2006—2010 年种植最多，为 7.07 万 hm^2 。通过对比国际市场橡胶期货价格，可以看出橡胶林的种植和橡胶期货价格的变化有着较强关联。从橡胶种植的地形环境上看，橡胶主要种植在低海拔区域，0~500 m 区域占 64.4%；坡度较为平缓的区域种植橡胶更多，坡度在 25° 以下区域的橡胶林占 95.9%；坡向上，不同方向皆有橡胶种植，但阳坡种植较多，占 57.6%。以上说明橡胶林宜种植在海拔较低、坡度平缓且向阳的区域。

与其他研究相比，本研究结果未使用逐年分类的方法，而利用变化检测算法对区域内的橡胶林扩张进行识别，极大减少了工作量^[22]。连续的变化检测更利于进行相关性分析，与相关试验进行对比，发现橡胶林变化数据和变化区域基本符合^[8]。由于是大范围长时间的变化检测，而且 Landsat 影像的空间分辨率不高，对边缘和细小区域检测效果较差；其次，由于研究区位于东南亚，离赤道较近，雨云较多，严重影响了影像质量，无法获得更密集的时间序列影像，只能使用年合成影像进行变化检测，无法更好地利用橡胶林的物候特征获得更高的精度。未来可以考虑进行实地勘测，利用无人机提供的影像进行更加准确的识别，同时结合当地橡胶树的种植特性，进行更加准确的分析。

参考文献

- [1] 李维锐, 赵国祥, 候丹. 云南天然橡胶产业高质量发展对策[J]. 热带农业科技, 2022, 45(3): 1-5, 14.
LI W R, ZHAO G X, HOU D. Natural rubber industry in Yunnan province and the strategies for healthy development at high level[J]. Tropical Agricultural Science & Technology, 2022, 45(3): 1-5, 14. (in Chinese)
- [2] 陈明文. 中国热带地区农户种植结构调整研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
CHEN M W. A study of China tropical regions farmers' planting structure adjustment[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [3] 姚元园. 深度分析东南亚橡胶产业发展状况[J]. 世界热带农业信息, 2016(11): 1-10.
YAO Y Y. In-depth analysis of the development of rubber industry in Southeast Asia[J]. World Tropical Agriculture Information, 2016(11): 1-10. (in Chinese)
- [4] 李隆伟, 王云美, 毛昭庆. 中国境外(老挝)罂粟替代种植政策的问题研究[J]. 农业展望, 2021, 17(8): 65-70.
LI L W, WANG Y M, MAO Z Q. Research on the problems of implementing opium poppy substitution cultivation policy outside China (Laos)[J]. Agricultural Outlook, 2021, 17(8): 65-70. (in Chinese)
- [5] 翟佳豪, 刘影, 肖池伟. 1987—2018 年西双版纳橡胶林时空变化及其线状特征[J]. 热带地理, 2022, 42(8): 1376-1385.
ZHAI J H, LIU Y, XIAO C W. Spatio-temporal changes and linear characteristics of rubber plantations in Xishuangbanna, Southwest China from 1987 to 2018[J]. Tropical Geography, 2022, 42(8): 1376-1385. (in Chinese)
- [6] 刘月, 濮毅涵, 刘艳清, 安德帅, 徐丹丹, 朱建琴, 阮宏华. 基于 Landsat 影像研究全球气候变化对武夷山国家公园垂直带谱上各植被群落的影响[J]. 生态科学, 2022, 41(5): 152-162.
LIU Y, PU Y H, LIU Y Q, AN D S, XU D D, ZHU J Q, RUAN H H. Study on the impact of global climate change on the communities of vegetation vertical zone spectrum in Wuyishan National Park based on landsat imagery[J]. Ecological Science, 2022, 41(5): 152-162. (in Chinese)
- [7] 钟莉, 陈芸芝, 汪小钦. 基于 Landsat 时序数据的森林干

- 扰监测[J]. 林业科学, 2020, 56(5): 80-88.
- ZHONG L, CHEN Y Z, WANG X Q. Forest disturbance monitoring based on time series of Landsat data[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2020, 56(5): 80-88. (in Chinese)
- [8] 李伟光, 张京红, 刘少军, 陈小敏, 邹海平, 白蕻, 吕润. 基于 GEE 的东南亚主产区橡胶林分布遥感提取[J]. 热带作物学报, 2021, 42(11): 3345-3350.
- LI W G, ZHANG J H, LIU S J, CHEN X M, ZOU H P, BAI R, LYU R. GEE-based extraction of rubber forest distribution in main producing areas of Southeast Asia[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2021, 42(11): 3345-3350. (in Chinese)
- [9] 刘洪江, 兰恒星, 张军, 刘杰, 杨军. 老挝北部罂粟替代种植高分辨率遥感调查评价与分析[J]. 资源科学, 2010, 32(7): 1425-1432.
- LIU H J, LAN H X, ZHANG J, LIU J, YANG J. Evaluation and analysis for the substitution planting for opium poppy in the north of Laos based on remote sensing[J]. *Resources Science*, 2010, 32(7): 1425-1432. (in Chinese)
- [10] PARASTATIDIS D, MITRAKA Z, CHRYSOULAKIS N, ABRAMS M. Online global land surface temperature estimation from landsat[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(12): 1208.
- [11] VAN DE KERCHOVE R, ZANAGA D, KEERSMAECKER W, SOUVERIJNS N, WEVERS J, BROCKMANN C, GRO-SU A, PACCINI A, CARTUS O, SANTORO M, LESIV M, GEORGIEVA I, FRITZ S, CARTER S, TSENDBAZAR N-E, LI L, HEROLD M, ARINO O. ESA WorldCover: global land cover mapping at 10 m resolution for 2020 based on Sentinel-1 and 2 data[C/OL]. AGU Fall Meeting 2021, held in New Orleans, LA, 13—17 December 2021, id. GC45I-0915. [2023-12-23]. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021-AGUFMGC45I0915V/abstract>.
- [12] BELGIU M, DRĂGUȚ L. Random forest in remote sensing: a review of applications and future directions[J]. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 114: 24-31.
- [13] HARALICK R M, SHANMUGAM K, DINSTEN I. Textural features for image classification[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1973, 3(6): 610-621.
- [14] EISAVI V, HOMAYOUNI S, YAZDI A M, ALIMOHAMMADI A. Land cover mapping based on random forest classification of multitemporal spectral and thermal images[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(5): 291.
- [15] KENNEDY R E, YANG Z, COHEN W B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly landsat time series: 1. LandTrendr - temporal segmentation algorithms[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(12): 2897-2910.
- [16] KEY C H, BENSON N C. Landscape assessment (LA)[R]// LUTES D C, KEANE R E, CARATTI J F, KEY C H, BENSON N C, SUTHERLAND S, GANGI L J (Eds.). FIREMON: fire effects monitoring and inventory system. General Technical Report RMRS-GTR-164-CD. Fort Collins, CO: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2006.
- [17] 唐万, 胡俊, 张晖, 吴攀, 贺华. Kappa 系数: 一种衡量评估者间一致性的常用方法(英文)[J]. 上海精神医学, 2015, 27(1): 62-67.
- TANG W, HU J, ZHANG H, WU P, HE H. Kappa coefficient: a popular measure of rater agreement[J]. *Shanghai Archives of Psychiatry*, 2015, 27(1): 62-67. (in Chinese)
- [18] 李宇宸, 张军, 薛宇飞, 张萍. 基于 Google Earth Engine 的中老缅交界区橡胶林分布遥感提取[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 174-181.
- LI Y C, ZHANG J, XUE Y F, ZHANG P. Remote sensing image extraction for rubber forest distribution in the border regions of China, Laos and Myanmar based on Google Earth Engine platform[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(8): 174-181. (in Chinese)
- [19] SINGH A K, LIU W, ZAKARI S, WU J, YANG B, JIANG X J, ZHU X, ZOU X, ZHANG W, CHEN C, SINGH R, NATH A J. A global review of rubber plantations: impacts on ecosystem functions, mitigations, future directions, and policies for sustainable cultivation[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 796: 148948.
- [20] 王立丰, 袁坤, 刘勇, 白渊松. 澜湄合作机制下的中国-老挝天然橡胶科技国际合作现状与展望[J]. 热带农业科学, 2022, 42(6): 110-115.
- WANG L F, YUAN K, LIU Y, BAI Y S. Current situation and prospects of international cooperation in natural rubber technology between China and Laos under “Lancang-Mekong Cooperation”[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2022, 42(6): 110-115. (in Chinese)
- [21] 李阳阳, 张军, 刘陈立, 杨旭超, 李杰. 老挝北部 5 省橡胶林提取及时空扩张研究[J]. 林业科学研究, 2017, 30(5): 709-717.
- LI Y Y, ZHANG J, LIU C L, YANG X C, LI J. Research on extraction and spatial-temporal expansion of rubber forest in five provinces of northern Laos based on multi-source remote sensing[J]. *Forest Research*, 2017, 30(5): 709-717. (in Chinese)
- [22] HAN P, CHEN J, HAN Y, YI L, ZHANG Y, JIANG X. Monitoring rubber plantation distribution on Hainan Island using Landsat OLI imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39(8): 2189-2206.