

引用格式:刘怡媛,肖池伟,李鹏,等.基于CR<sub>NBR</sub>物候算法的西双版纳橡胶成林提取及时空变化研究[J].地球信息科学学报,2019,21(3):467-474.  
[ Liu Y Y, Xiao C W, Li P, et al. Extraction of mature rubber plantations based on the CR<sub>NBR</sub> algorithm and spatio-temporal variations in Xishuangbanna[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(3):467-474. ] DOI:10.12082/dqxxkx.2019.180431

# 基于CR<sub>NBR</sub>物候算法的西双版纳橡胶成林提取及时空变化研究

刘怡媛<sup>1</sup>,肖池伟<sup>2,3</sup>,李鹏<sup>2,3\*</sup>,刘影<sup>1</sup>,饶滴滴<sup>2</sup>

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;  
3. 中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049

## Extraction of Mature Rubber Plantations based on the CR<sub>NBR</sub> Algorithm and Spatio-temporal Variations in Xishuangbanna

LIU Yiyuan<sup>1</sup>, XIAO Chiwei<sup>2,3</sup>, LI Peng<sup>2,3,\*</sup>, LIU Ying<sup>1</sup>, RAO Didi<sup>2</sup>

1. College 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; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** With the Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) images over Xishuangbanna acquired during the dry seasons of 2014 and 2018, the Change Rate of Normalized Burn Ratio (CR<sub>NBR</sub>) algorithm (reported in our previous study), along with two masks of Landsat-derived natural forest and Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM), were used to detect and obtain the geographical information of the mature rubber plantations during this period. The spatial and temporal change pattern of mature rubber plantations were detected and analyzed by means of spatial and statistical analyses using the ArcGIS 10.5 platform. Results showed that: (1) Mature rubber plantations were mainly distributed in areas with well hydrothermal conditions and moderate to low elevations in the south of Xishuangbanna. Jinghong City had the largest area of mature rubber plantations, followed by Mengla County and Menghai County accordingly. These plantations were typically concentrated within the towns of Menglong, Yunjinghong, and Gasa of Jinghong City, and Guanlei, Mengbang, and Mengman of Mengla County. (2) The declining area of mature rubber plantations were initially reported in Xishuangbanna from 2014 to 2018 (at a reduction of approximately 17.27%). In particular, Mengla County had the largest reduction in mature rubber plantations (19.10%), while Menghai County had the least (2.70%). (3) The stable plantation areas of mature rubber were predominantly located in the towns of Menglong, Gasa and Jingha of Jinghong City, and Guanlei, Mengbang and Mengla of Mengla County. The increase in mature rubber plantation areas were mainly

收稿日期:2018-08-29;修回日期:2018-12-29.

基金项目:中国科学院地理科学与资源研究所“秉维”优秀青年人才计划(2018RC201);中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA20010203)。[ **Foundation items:** Program for BINGWEI Excellent Young Talents of Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, No.2018RC201; Strategic Pilot Science and Technology Project of Chinese Academy of Sciences (Category A), No.XDA20010203. ]

作者简介:刘怡媛(1994-),女,江西赣州人,硕士生,主要从事资源遥感研究。E-mail: liuyiyi163@163.com

\*通讯作者:李鹏(1984-),男,江西永新人,博士,副研究员,主要从事资源地理与国土资源遥感研究。E-mail: lip@igsrr.ac.cn

concentrated in the towns of Menglong, Gasa and Yunjinghong in Jinghong City, Guanlei, Mengla and Mengban in Mengla County, and the town of Daluo in Menghai County. The reduction area was mainly evident in the towns of Mengyang, Gasa and Menglong of Jinghong City, and Mengbang of Mengla County and Mengban in Mengla County. This study can provide a new understanding of the current status of rubber plantation in Xishuangbanna.

**Key words:** rubber plantations; Normalized Burn Ratio (NBR); defoliation-foliation stage; planting area; Xishuangbanna

\*Corresponding author: LI Peng, E-mail: lip@igsrr.ac.cn

**摘要:**基于西双版纳2014年和2018年旱季 Landsat-8 OLI 遥感影像,利用橡胶林落叶-新叶萌生期内归一化焚烧指数变化率(CR<sub>NBR</sub>)算法,运用当年新叶萌生期植被分布(NDVI)与海拔数据(ASTER GDEM)进行掩膜提取,分别获取了2014年和2018年西双版纳橡胶成林种植面积,基于 ArcGIS 10.5 平台分析了橡胶成林时空格局和种植面积增减变化。结果表明:①西双版纳橡胶林主要分布于南部水热条件较好、中低海拔的橡胶种植适宜区。景洪市的橡胶林面积最大,其次是勐腊县,勐海县最小。集中分布于景洪市的勐龙镇、允景洪街道和嘎洒镇;勐腊县的关累镇、勐棒镇和勐满镇;②西双版纳及其下辖一市两县2014-2018年橡胶林种植面积总体呈现下降趋势,减幅为17.27%。其中,勐腊县的减幅最大为19.10%,勐海县减幅最小,仅2.70%。③橡胶林持续种植区主要在景洪市勐龙镇、嘎洒镇和景哈镇等,勐腊县的关累镇、勐棒镇和勐腊镇等;橡胶林种植增加区主要集中在景洪市勐龙镇、嘎洒镇和允景洪街道,勐腊县关累镇、勐腊镇和勐伴镇,勐海县打洛镇;橡胶林种植减少区主要在景洪市勐养镇、嘎洒镇和勐龙镇,勐腊县勐棒镇、勐腊镇和勐伴镇,本研究可为西双版纳橡胶林种植现状特征提供了新的认识。

**关键词:**橡胶林;归一化焚烧指数(NBR);落叶-新叶萌生期;种植面积;西双版纳

## 1 引言

天然橡胶树(*Hevea brasiliensis*)原本生长在南美洲亚马逊河流域,然而橡胶园却已在过去认为不适合种植的东南亚北部山区迅速扩展<sup>[1]</sup>。类似地,西双版纳自20世纪50年代以来经历了剧烈且广泛的土地利用变化,其中以橡胶林扩展尤为突出。橡胶林的快速发展虽然极大地改善了当地居民的收入状况<sup>[2]</sup>,但也给当地生态环境造成了显著影响,如水土流失、土壤肥力下降和水质恶化等问题日益突出<sup>[3-4]</sup>。基于遥感手段进行橡胶林种植信息提取与动态监测,是开展橡胶林种植随市场波动及其动态变化的前提。

目前,有关橡胶林种植信息的算法构建、遥感监测及其动态分析等已取得一定研究进展。在遥感识别和监测方法方面,过去多以传统分类器为主,包括决策树法<sup>[5-8]</sup>、面向对象法<sup>[9-11]</sup>和最大似然法<sup>[3,12]</sup>等。2008年以来,随着 Landsat 历史影像产品免费共享,基于物候特征的遥感算法在橡胶林监测应用中表现出显著优势<sup>[13-16]</sup>。如基于单窗口或双窗口的物候算法减少了遥感监测所需的数据需求,又显著提高了分类结果精度<sup>[13-17]</sup>。在时空格局与分布特征等动态分析方面,相关研究主要分析了包括橡胶林种植面积变化、时空分布与地形、气候特征的相关

性,认为橡胶林适宜海拔在600~1200 m<sup>[10]</sup>,而种植海拔上限高达2100 m<sup>[5]</sup>,适宜坡度在8~25°之间<sup>[10]</sup>。同时,也对橡胶林林龄结构、地类转变关系以及扩展速度等进行了定量分析<sup>[18-19]</sup>。值得注意的是,过去学者普遍认为西双版纳橡胶林种植面积在增加,且不断向海拔更高、坡度更陡的区域扩张<sup>[7]</sup>。然而,在2015、2016与2018年共3年的实地考察与农户调研中发现,受2012年天然橡胶价格下跌的影响,西双版纳橡胶林种植区已有大量私营(民营)橡胶园因橡胶林快进入老林期(>20年)而提前淘汰老林并栽种橡胶幼苗,或不再更新种植橡胶林而改种菠萝、香蕉等其他经济作物的现象。不难发现,不同于国营橡胶农场,橡胶林市场价格的变动使得西双版纳胶农面临是否继续种植橡胶的窘境。由此,西双版纳近5年来橡胶林种植有什么新变化?其增长势头是否有所变化?这些都是亟待回答的现实问题。然而到目前为止,围绕上述问题的遥感监测与分析研究还未见报道。此外,Landsat 影像作为橡胶林监测的常用数据产品,尽管ETM+条带问题限制了相关分析,但2013年初发射的OLI传感器系列产品数据为开展上述研究提供了可靠基础<sup>[20]</sup>。

本研究以西双版纳为试验区,利用2014与2018年落叶期-新叶萌生期内 Landsat-8 OLI 影像并计算相应的归一化焚烧指数(NBR)与归一化植被

指数(NDVI), 基于前期发表的NBR变化率(CR<sub>NBR</sub>)算法<sup>[15]</sup>, 结合ASTER GDEM 30 m海拔掩膜数据, 分别提取了西双版纳两期橡胶成林的空间分布信息。在此基础上, 分析了该州2014–2018年橡胶成林的增减变化及其时空格局, 以期对西双版纳橡胶成林种植现状特征提供新的认识。

## 2 研究区概况与数据源

### 2.1 研究区概况

西双版纳傣族自治州(以下简称“西双版纳”或XSBN, 图1)位于中国云南省南部边缘(21°08' N – 22°36' N, 99°56' E – 101°50' E), 下辖景洪市、勐海县和勐腊县, 全州面积1.91×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>。作为云南省边境州, 南与老挝、缅甸接壤, 国境线长966.3 km, 东南亚第一大国际河流澜沧江–湄公河从此出境。全州以山地为主, 海拔在389–2428 m之间, 地形起伏较大。该州地处热带季风气候北缘, 一年分为旱季(11月至次年4月)和雨季(5–10月), 全州多年平

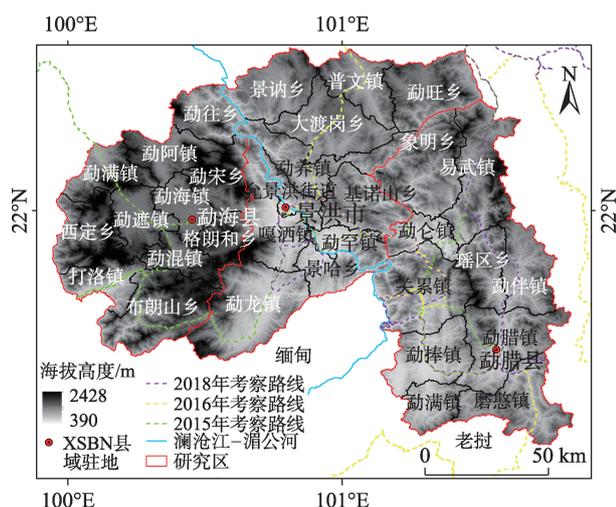


图1 研究区地形图及2015、2016和2018年考察路线  
Fig. 1 Topographical map of the study area (ASTER GDEM) showing the field trips in 2015, 2016 and 2018

均气温约19.7–22.9 °C, 年降雨量介于1036.1–2431.5 mm, 年空气相对湿度达80%以上。雨季优越的水、热、气等自然条件有利于包括橡胶林在内的热带植物生长。此外, 长达半年的旱季又有利于无云/少云Landsat影像的获取<sup>[20–21]</sup>。

早在20世纪50年代, 橡胶树就已被成功引入西双版纳, 经过近70年的发展, 现已成为中国第二大天然橡胶基地<sup>[9]</sup>。1956年起, 华南垦殖区在西双版纳先后建立了11个国营农场。80年代早期, 西双版纳橡胶种植以国营为主, 发展规模较大, 总面积达2.69×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>。90年代之后, 橡胶价格不断上涨, 极大激发了农民种植橡胶的热情, 民营橡胶迅速发展, 如早在1999年, 全州橡胶林种植面积已达到14.32×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>, 橡胶种植业成为了西双版纳农业中的一项基础支柱产业<sup>[9]</sup>。西双版纳原生树种以常绿林为主, 而橡胶树通常在1月底至2月落叶, 在3月上中旬发芽开始长出新叶, 到3月底可完全长出新叶<sup>[15]</sup>。因此, 橡胶成林特有的落叶–新叶萌生特征为遥感识别与监测提供了科学依据<sup>[22]</sup>。

### 2.2 Landsat 影像与预处理

从美国地质勘探局地球资源观测和科学中心(USGS EROS, <https://espa.cr.usgs.gov/index/>)订购并免费获取了西双版纳地区Landsat-8影像(P/R: 130/045)的一级地形校正产品。USGS EROS提供了多项数据选项, 包括多光谱波段的地表反射率(如Red和NIR)、光谱指数(如NDVI和NBR)与质量评价波段(QA)等。Landsat一级地形校正产品已经进行了辐射校正、几何精校正, 数据质量能满足研究需要。根据橡胶成林旱季落叶–新叶萌生期物候特征与影像重访周期, 并考虑到影像云量影响(如2015、2016、2017年落叶期或新叶萌生期的影像受云量影响较大, 云量>18%), 本文分别获取了2014年和2018年2月落叶期、3月新叶期无云或少云的4景OLI影像(表1)进行橡胶成林提取等。通过影像对比分析, 对于影像中受到云及其阴影影响的像元, 利用QA数据进行剔除处理。

表1 2014和2018年西双版纳Landsat-8 OLI影像使用列表

Tab. 1 Lists of Landsat-8 OLI images over Xishuangbanna in 2014 and 2018 used in this study

影像获取时间	云量/%	物候期		不同影像边界对应的西双版纳面积/%
		落叶期	新叶萌生期	
2014–02–09	0.01			95.44
2014–03–13	4.08			95.32
2018–02–20	0	1月底–2月	3月	95.73
2018–03–08	2.52			95.76

### 3 研究方法

#### 3.1 归一化焚烧指数变化率( $CR_{NBR}$ )指数构建

为了揭示西双版纳近5年来橡胶成林种植的时空变化过程和地域增减差异,本文利用归一化焚烧指数变化率( $CR_{NBR}$ )算法<sup>[15]</sup>提取出橡胶成林的可能像元,并结合当年新叶萌生期内归一化植被指数(NDVI)和数字高程模型(DEM)作为掩膜条件,进一步提取2014年与2018年橡胶成林真实分布信息与面积。 $NBR$ <sup>[23]</sup>及 $CR_{NBR}$ <sup>[15]</sup>的计算公式如下:

$$NBR = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{SWIR2})}{(\rho_{NIR} + \rho_{SWIR2})} \quad (1)$$

$$CR_{NBR} = \frac{(NBR_{新} - NBR_{落})}{NBR_{落}} \quad (2)$$

式中: $\rho_{NIR}$ 与 $\rho_{SWIR2}$ 分别表示Landsat-8 OLI影像对应的近红外(NIR)与短波红外波段(SWIR)的地表反射率; $NBR_{新}$ 和 $NBR_{落}$ 分别是指新叶萌生期和落叶期相应影像的归一化焚烧指数; $CR_{NBR}$ 表示落叶期到新叶萌生期内的归一化焚烧指数变化率。

此前,利用 $CR_{NBR}>1.0$ 提取了西双版纳橡胶林的空间分布信息<sup>[15]</sup>。然而,通过对比影像与遥感提取结果发现,新叶萌生期内 $NBR$ 值只需要大于落叶期内 $NBR$ 值便能有效识别与提取出橡胶成林信息。因此,在本文中对该指数进行适当修正,即以 $CR_{NBR}>0$ 来确定西双版纳橡胶成林种植信息的可能分布,而其他地类相应的 $CR_{NBR}\leq 0$ 。在此基础上,利用当年新叶萌生期内影像的植被分布( $NDVI>0.60$ <sup>[15]</sup>)与橡胶林适宜种植海拔范围( $600\text{ m}<DEM<1200\text{ m}$ )进一步确定橡胶林最终分布信息。需要说明,植被掩膜主要是用来消除物候期内非林地的影响<sup>[17]</sup>。地形(海

拔)掩膜“下限”(600 m)是为了进一步消除建设用地对橡胶林提取的影响,而海拔“上限”(1200 m)主要是考虑到橡胶林种植一般不超过这个界线。此外,需要特别说明的是,西双版纳橡胶幼林一般需要6-7年以上开割<sup>[15,17]</sup>。在开割以前橡胶林冠层郁闭度较低,且落叶特征不太明显<sup>[9]</sup>,在遥感监测中不易被识别出来,故本文基于归一化焚烧指数变化率( $CR_{NBR}$ )算法的监测对象为橡胶成林。

#### 3.2 精度评价与地面验证

当前,对于典型地类(如橡胶林)的监测过程中,使用Google Earth(GE)图像进行训练算法和验证结果较为常见<sup>[14,24-25]</sup>。GE影像的高分辨率和橡胶林环状纹理特征,为样本的选择提供了基础。基于2014年和2018年GE影像,结合2015、2016与2018年3次野外调查所收集的点位照片,分别随机选取了2014年的样本(橡胶成林186个、非橡胶林90个)和2018年的样本(橡胶成林156个、非橡胶林78个)。需要说明的是,所选样点均没有受到云或阴影的影响,且橡胶林样点位于均质的大块林地。基于混淆矩阵(表2)结果表明,2014年的分类总体精度为92.16%,Kappa系数为0.84;2018年的分类总体精度为91.77%,Kappa系数为0.83。精度评价表明,基于Landsat-8 OLI的影像的归一化焚烧指数变化率( $CR_{NBR}$ )算法,对于西双版纳橡胶成林种植信息的提取是可行的,相应结果可满足时空分析需求。

## 4 结果与分析

#### 4.1 西双版纳橡胶林种植的时空分布格局

基于物候特征的 $CR_{NBR}$ 橡胶成林提取算法,分

表2 基于混淆矩阵的西双版纳2014年和2018年橡胶成林提取结果精度评价

Tab. 2 Accuracy assessment of mature rubber plantations derived from the  $CR_{NBR}$  approach via confusion matrix in Xishuanbanna in 2014 and 2018

			地表真实像素分类数据			用户精度	整体精度/%	Kappa系数
			橡胶成林	非橡胶成林	小计			
2014年	分类结果	橡胶成林	23 429	337	23 766	0.99	92.16	0.84
		非橡胶成林	2890	14 514	17 404	0.83		
		小计	26 319	14 851	41 170			
	生产者精度		0.89	0.98				
2018年	分类结果	橡胶成林	22 409	392	22 801	0.98	91.77	0.83
		非橡胶成林	2986	15 238	18 224	0.84		
		小计	25 395	15 630	41 025			
	生产者精度		0.88	0.97				

别提取了西双版纳2014年和2018年橡胶林种植分布信息(图2)。结果表明,西双版纳橡胶林主要分布于南部中低海拔、水热条件较好的橡胶种植适宜区。具体来看,超过80%橡胶林的种植区分布于景洪市南部与东南部乡镇(包括勐龙镇、允景洪街道、嘎洒镇、景哈乡、勐养镇和勐罕镇)、勐腊县西南部乡镇(包括关累镇、勐棒镇、勐满镇、勐仑镇和勐腊镇)。此外,在勐海县西南部打洛镇、景洪市北部景讷乡和勐腊县东部勐伴镇,北部的象明乡都有较小范围的分布。

#### 4.2 西双版纳2014–2018年橡胶林的增减变化特征

根据2014–2018年橡胶成林种植信息提取结果(图3)分析发现,西双版纳及其下辖一市两县2014–2018年橡胶林种植面积总体呈现下降趋势,共减少了 $4.78 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,减幅约为17.27%。这表明2014–

2018年大面积的橡胶林转换成其他经济作物或者其他地物类型。就一市两县而言,其橡胶林种植面积差异较大。景洪市和勐腊县种植面积占了全州的绝大部分,而勐海县种植橡胶林的面积远小于景洪市和勐腊县,仅占全州种植面积的5%左右。景洪市从2014年的 $13.21 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 减少到2018年的 $11.01 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,减幅为16.65%;勐腊县从2014年的 $13.30 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 降低至2018年的 $10.76 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,减幅达到19.10%;而勐海县由于种植面积基数最小,因此减少的面积也最小,减幅为2.70%。总体而言,景洪市的橡胶林种植面积最大,而勐腊县2014–2018年的减幅最大。

为了进一步厘清西双版纳近5年橡胶林种植面积增减变化与区域差异,通过分区统计,得到西双版纳2014–2018年橡胶林种植面积增减变化图(图

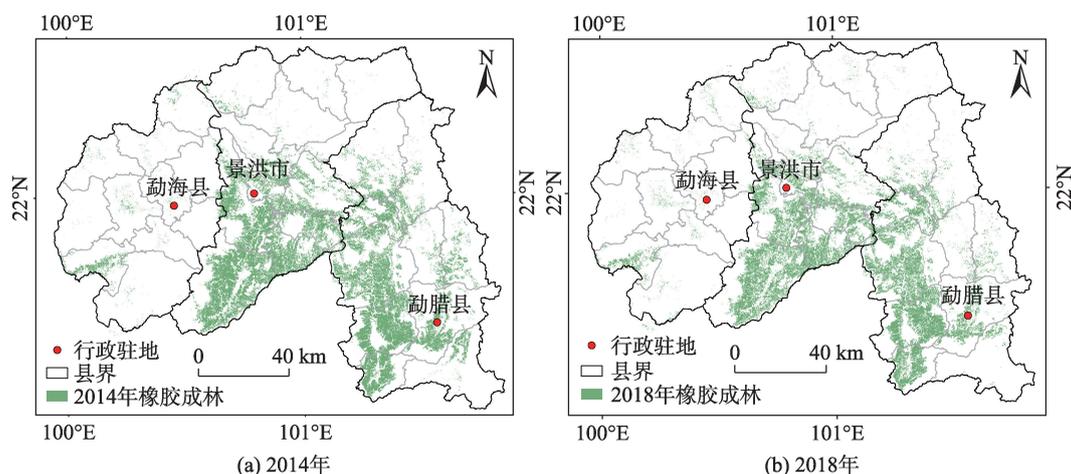


图2 2014年和2018年西双版纳橡胶成林空间分布

Fig. 2 Maps of mature rubber plantations in Xishuangbanna in 2014 and 2018

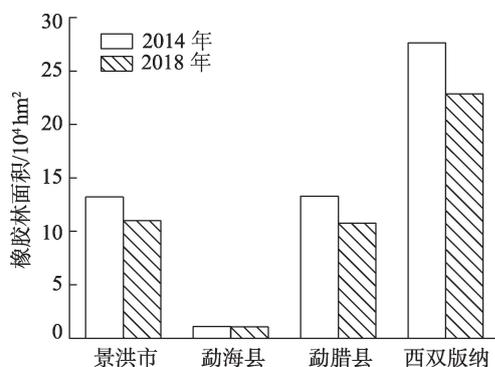


图3 西双版纳及相应市县2014和2018年橡胶成林种植面积

Fig. 3 Changes in the area sizes of mature rubber plantation in Xishuangbanna between 2014 and 2018

4)。2014–2018年整个西双版纳橡胶林种植面积呈减少状态,且橡胶林种植的减少区远大于增加区,其中橡胶林持续不变的种植区面积有 $19.80 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,减少的面积达 $7.25 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,增加的面积约 $2.83 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。由于数据处理时将云/影像元剔除为空值,可能与直接提取的橡胶林有一些误差。一市两县中,橡胶林持续种植区的面积最大的勐腊县( $9.73 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ),其次是景洪市( $9.53 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ),勐海县最小;橡胶林种植增加量由大到小依次是景洪市( $1.41 \times 10^4 \text{ hm}^2$ )、勐腊县( $2.06 \times 10^4 \text{ hm}^2$ )和勐海县( $1.00 \times 10^4 \text{ hm}^2$ );橡胶林种植区减少最多的是景洪市( $3.67 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ),勐腊县紧随其后( $3.03 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ),勐海县减少的面积最小。在2014–2018年勐腊县持续

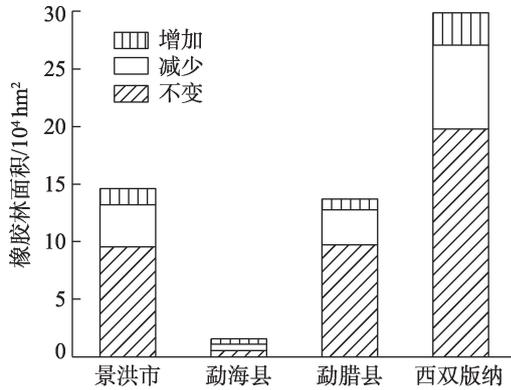


图4 西双版纳及其相应市县2014–2018年橡胶成林种植面积增减变化

Fig. 4 Differences in the change of rubber plantation area in Xishuangbanna from 2014 to 2018

种植橡胶林的面积最大,景洪市橡胶林变化(增加和减少之和)的面积最大。

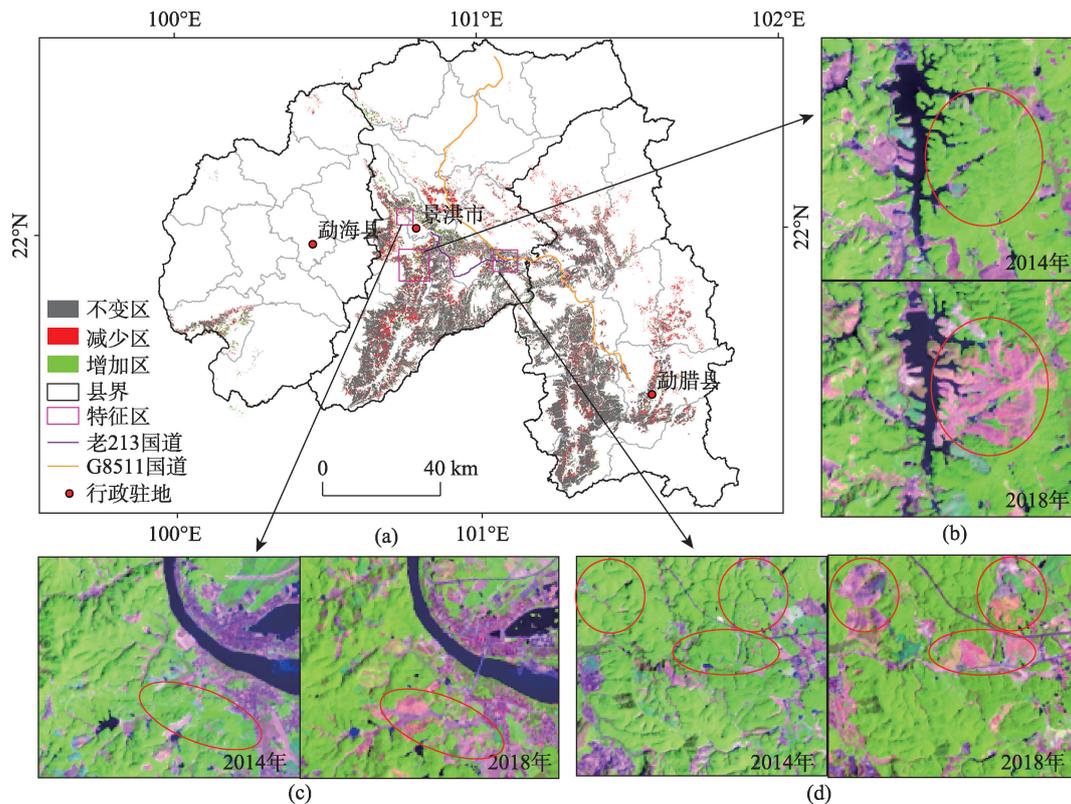
从乡镇橡胶林种植的时空变化来看(图5(a)),橡胶林持续种植区主要分布在国营农场所所在的乡镇,如景洪市的勐龙镇、嘎洒镇和景哈镇等,勐腊县的关系镇、勐棒镇和勐腊镇等。橡胶林种植增加区有景洪市的勐龙镇、嘎洒镇和允景洪街道,勐腊县的

关累镇、勐腊镇和勐伴镇,勐海县的打洛镇,其余乡镇橡胶林种植区仅有零星增加。橡胶林种植减少区则主要分布在景洪市的勐养镇、嘎洒镇和勐龙镇,勐腊县的勐棒镇、勐腊镇和勐伴镇,其余乡镇橡胶林种植区也有零星减少。结合实地调研与文献研究,分析发现橡胶林种植面积增加可能与主要经营橡胶生产的大型半私有化公司、私营公司凭借其大规模以及长时间的经营经验认定橡胶种植在未来仍具有的潜在利润有关,促使了扩展橡胶再生产<sup>[26]</sup>。

橡胶种植减少原因可能与以下因素有关:

- ①2012年起,西双版纳橡胶价格持续下跌,致使部分胶农将其橡胶园租出,甚至停止开采或更新<sup>[26]</sup>。
- ②在政府土地利用政策影响下,西双版纳部分村民重视原生森林衍生的生态系统服务以及精神利益,促使新开辟区域橡胶林种植现象显著减少<sup>[27]</sup>。
- ③2011年云南省政府批准的《西双版纳环保橡胶管理工作指导意见》,明确要求制定以市场为基础的生态补偿/支付方案和生态系统服务奖励,这也在很大程度上抑制了橡胶林继续扩张<sup>[28]</sup>。

在以往的研究中,更多关注橡胶林种植的增加或跨境扩展,而忽略了橡胶林种植减少的客观事



注:图中红色椭圆圈出区域为橡胶林显著减少的特征区。

图5 西双版纳2014–2018年橡胶成林面积空间增减及影像对比

Fig. 5 Dynamic pattern of mature rubber plantations and regional imaging comparisons in Xishuangbanna from 2014 to 2018

实。因此,在西双版纳2014–2018年橡胶林种植增减变化图的基础上,利用Landsat影像进一步对比分析了橡胶林减少较为明显的区域。如图5所示,在景洪市勐龙镇居民聚集区的北缘坝卡村附近有集中的、成片的橡胶林减少,并在勐龙镇与勐罕镇一条东北西南方向的乡道两侧也有较为明显的橡胶林减少,在嘎洒镇居民聚集区的北缘因道路的扩建也导致橡胶林明显的减少。此外,嘎洒镇中部地区的曼飞龙水库周边(图5(b))、嘎洒镇和允景洪街道交界的澜沧江南岸也出现了成片的橡胶林减少区(图5(c))。在勐罕镇的东北部国道G8511和老213国道两侧出现大面积连片的橡胶林减少区(图5(d))。在勐腊镇大沙坝水库的南部和勐腊镇居民点北侧的橡胶林也出现成片的减少。通过对橡胶林减少较为明显区域的重点分析,发现橡胶林种植的减少区主要集中在城镇建设用地、水库、湖泊的边缘以及河道、公路的两侧。

随着城市化的不断推进,人工建设用地必然要优先挤占附近的低平土地,因此城镇居民建设用地周边的橡胶林种植面积减少是大势所趋。此外,2012年西双版纳生物产业作物办公室“十二五”规划,其中概述了考虑到生态系统服务的橡胶林土地利用战略,其要点有避免在海拔高、坡度陡的区域种植橡胶,并在河道和其他走廊上种植当地原生植物物种作为缓冲地带,这也是河道和公路两侧橡胶成林减少的原因。水库周边橡胶林减少,其主要原因是为了避免橡胶林种植对饮用水的污染。橡胶作物生长期使用化肥导致当地水体富营养化,同时除草剂的流失也可能污染当地饮用水源<sup>[29]</sup>。

## 5 结论和讨论

本文利用西双版纳2014年和2018年Landsat-8 OLI遥感影像,基于橡胶成林落叶–新叶萌生期内归一化焚烧指数变化率(CR<sub>NBR</sub>)算法,结合当年新叶萌生期植被(NDVI>0.60)分布与海拔数据(600 m < DEM < 1200 m)进行掩膜,提取了该州2014年和2018年橡胶成林种植面积,通过空间分析揭示了橡胶成林时空格局和种植面积增减变化。结果表明:

(1)基于橡胶成林落叶–新叶萌生期内归一化焚烧指数变化率(CR<sub>NBR</sub>>0)算法,能够有效提取西双版纳落叶型橡胶成林分布信息。在提取阈值界定上,进一步完善了CR<sub>NBR</sub>算法。

(2)西双版纳橡胶林主要分布于南部中低海

拔、水热条件较好的橡胶种植适宜区。景洪市的橡胶林面积最大,其次是勐腊县,勐海县最小。集中分布在景洪市勐龙镇、允景洪街道、嘎洒镇;勐腊县关累镇、勐棒镇、勐满镇。

(3)西双版纳及其下辖一市两县2014–2018年橡胶林种植面积总体呈现下降趋势,从2014年的 $27.62 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 到2018年的 $22.85 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,减幅为17.27%。其中,勐腊县的减幅最大为19.10%,勐海县减幅最小仅2.70%。

(4)橡胶林持续种植区主要是景洪市勐龙镇、嘎洒镇和景哈镇等,勐腊县的关累镇、勐棒镇和勐腊镇等;橡胶林种植增加区主要集中在景洪市勐龙镇、嘎洒镇和允景洪街道,勐腊县关累镇、勐腊镇和勐伴镇,勐海县打洛镇;橡胶林种植减少区主要在景洪市勐养镇、嘎洒镇和勐龙镇,勐腊县勐棒镇、勐腊镇和勐伴镇。

值得强调,受Landsat重访周期(16 d)的影响,每年选取的落叶期和生叶期的影像略有差异,导致提出结果可能存在差异。另外,在数据处理过程中利用QA数据将云量和阴影的覆盖像素全部剔除,也会使部分的橡胶林种植区被剔除,导致提取面积有所减少。因此,未来通过提高影像时间分辨率,减少云/影干扰,可进一步提高遥感分类精度。此外,作为中国重要的橡胶种植基地和橡胶跨境(老挝、缅甸)种植前沿,尽管价格波动是西双版纳橡胶林种植面积增长势头发生较大变化的重要原因之一,但有关其他驱动因素及其影响程度等研究缺乏相应报道。因此,未来亟待从胶农层面(微观视角),进一步厘清当前形势下西双版纳橡胶林时空变化的驱动因素及其影响。

### 参考文献(References):

- [1] Ziegler A D, Fox J M, Xu J C. The rubber juggernaut[J]. Science, 2009,324(5930):1024-1025.
- [2] 刘晓娜,封志明,姜鲁光,等.西双版纳土地利用/土地覆被变化时空格局分析[J].资源科学,2014,36(2):233-244. [Liu X N, Feng Z M, Jiang L G, et al. Spatial-temporal pattern analysis of land use and land cover change in Xishuangbanna[J]. Resources Sciences, 2014,36(2):233-244.]
- [3] Li H, Aide T M, Ma Y X, et al. Demand for rubber is causing the loss of high diversity rain forest in SW China[J]. Biodiversity and Conservation, 2007,16(6):1731-1745.
- [4] Tan Z H, Zhang Y P, Song Q H, et al. Rubber plantations act as water pumps in tropical China[J]. Geophysical Research Letters, 2011,38:L24406.
- [5] 李亚飞,刘高焕,黄翀.基于HJ-1CCD数据的西双版纳地区橡胶林分布特征[J].中国科学:信息科学,2011,41(增刊):166-176. [Li Y F, Liu G H, Huang C. Analysis of dis-

- tribution characteristics of *Hevea brasiliensis* in the Xishuangbanna area based on HJ-1 satellite data[J]. *Science In China (Information Sciences)*, 2011,41(Supp):166-176. ]
- [ 6 ] 刘晓娜,封志明,姜鲁光.基于决策树分类的橡胶林地遥感识别[J].*农业工程学报*,2013,29(24):163-172. [ Liu X N, Feng Z M, Jiang L G. Application of decision tree classification to rubber plantations extraction with remote sensing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of CSAE)*, 2013,29(24):163-172. ]
- [ 7 ] 李阳阳,张军,刘陈立,等.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, et al. 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. ]
- [ 8 ] 杨雪峰,王雪梅.基于决策树的多角度遥感影像分类[J].*地球信息科学学报*,2016,18(3):416-422. [ Yang X F, Wang X M. Classification of MISR multi-angle imagery based on decision tree classifier[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2016,18(3):416-422. ]
- [ 9 ] 刘晓娜,封志明,姜鲁光,等.西双版纳橡胶林地的遥感识别与数字制图[J].*资源科学*,2012,34(9):1769-1780. [ Liu X N, Feng Z M, Jiang L G, et al. Rubber plantations in Xishuangbanna: Remote sensing identification and digital mapping[J]. *Resources Sciences*,2012,34(9):1769-1780. ]
- [10] 刘陈立,张军,李阳阳,等.西双版纳橡胶林信息提取和时空格局扩张监测[J].*福建林业科技*,2017,44(2):43-50. [ Liu C L, Zhang J, Li Y Y, et al. Rubber plantation of Xishuangbanna information extraction and monitoring of spatial-temporal pattern expansion[J]. *Journal of Fujian Forestry Sci and Tech*, 2017,44(2):43-50. ]
- [11] 单治彬,孔金玲,张永庭,等.面向对象的特色农作物种植遥感调查方法研究[J].*地球信息科学学报*,2018,20(10):1509-1519. [ Shan Z B, Kong J L, Zhang Y T, et al. Remote sensing investigation method of object-oriented crops with special characteristics[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2018,20(10):1509-1519. ]
- [12] Hu H B, Liu W J, Cao M. Impact of land use and land cover changes on ecosystem services in Menglun, Xishuangbanna, southwest China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008,146(1-3):147-156.
- [13] Dong J W, Xiao X M, Sheldon S, et al. Mapping tropical forests and rubber plantations in complex landscapes by integrating PALSAR and MODIS imagery[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012,74:20-33.
- [14] Dong J W, Xiao X M, Chen B, et al. Mapping deciduous rubber plantations through integration of PALSAR and multi-temporal Landsat imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013,134:392-402.
- [15] Li P, Zhang J H, Feng Z M. Mapping rubber tree plantations using a Landsat-based phenological algorithm in Xishuangbanna, southwest China[J]. *Remote Sensing Letters*, 2015,6(1):49-58.
- [16] Xiao C W, Li P, Feng Z M. Monitoring annual dynamics of mature rubber plantations in Xishuangbanna during 1987-2018 using Landsat time series data: A multiple normalization approach[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019,77:31-40.
- [17] Xiao C W, Li P, Feng Z M, et al. An updated delineation of stand ages of deciduous rubber plantations during 1987-2018 using Landsat-derived bi-temporal thresholds method in an anti-chronological strategy[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019,76:40-50.
- [18] 廖谌嫻,李鹏,封志明,等.西双版纳橡胶林面积遥感监测和时空变化[J].*农业工程学报*,2014,30(22):170-180. [ Liao C H, Li P, Feng Z M, et al. Area monitoring by remote sensing and spatiotemporal variation of rubber plantations in Xishuangbanna[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of CSAE)*, 2014,30(22):170-180. ]
- [19] Xiao C W, Li P, Feng Z M. A renormalized modified normalized burn ratio (RMNBR) index for detecting mature rubber plantations with Landsat-8 OLI in Xishuangbanna, China[J]. *Remote Sensing Letters*, 2019,10(3):214-223.
- [20] Xiao C W, Li P, Feng Z M, et al. Spatio-temporal differences in cloud cover of Landsat-8 OLI observations across China during 2013-2016[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018,28(4):429-444.
- [21] Li P, Feng Z M, Xiao C W. Acquisition probability differences in cloud coverage of the available Landsat observations over mainland Southeast Asia from 1986 to 2015[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2018,11(5):437-450.
- [22] Mann C C. Addicted to rubber[J]. *Science*, 2009,325(5940):564-566.
- [23] García M J L, Caselles V. Mapping burns and natural reforestation using thematic mapper data[J]. *Geocarto International*, 2008,6(1):31-37.
- [24] Li Z, Fox J M. Mapping rubber tree growth in mainland Southeast Asia using time-series MODIS 250 m NDVI and statistical data[J]. *Applied Geography*, 2012,32(2):420-432.
- [25] Senf C, Pflugmacher D, Van der Linden S, et al. Mapping rubber plantations and natural forests in Xishuangbanna (southwest China) using multi-spectral phenological metrics from MODIS time series[J]. *Remote Sensing*, 2013,5(6):2795-2812.
- [26] Hammond J, Yi Z F, McLellan T, et al. Situational analysis report: Xishuangbanna autonomous Dai prefecture Yunnan, China[R]. ICRAF Working Paper 194. World Agroforestry Centre East and Central Asia, Kunming, China, 2015:80.
- [27] Zhang L, Kono Y, Kobayashi S, et al. The expansion of smallholder rubber farming in Xishuangbanna, China: A case study of two Dai villages[J]. *Land Use Policy*, 2015, 42:628-634.
- [28] Yi Z F, Cannon C H, Chen J, et al. Developing indicators of economic value and biodiversity loss for rubber plantations in Xishuangbanna, southwest China: A case study from Menglun township[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 36:788-797.
- [29] Xu J C, Grumbine R E, Beckschäfer P. Landscape transformation through the use of ecological and socioeconomic indicators in Xishuangbanna, southwest China, Mekong Region[J]. *Ecological Indicators*, 2014,36:749-756.