

doi: 10.6046/zrzyg.2021110

引用格式: 胡盈盈,戴声佩,罗红霞,等. 2001—2015年海南岛橡胶林物候时空变化特征分析[J]. 自然资源遥感,2022,34(1): 210–217. (Hu Y Y, Dai S P, Luo H X, et al. Spatio-temporal change characteristics of rubber forest phenology in Hainan Island during 2001–2015[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(1): 210–217.)

2001—2015年海南岛橡胶林物候时空变化特征分析

胡盈盈^{1,2}, 戴声佩^{1,2}, 罗红霞^{1,2}, 李海亮^{1,2},
李茂芬^{1,2}, 郑倩^{1,2}, 禹莹^{1,2}, 李宁³

(1. 中国热带农业科学院科技信息研究所/海南省热带作物信息技术应用研究重点实验室, 海口 571101;
2. 农业农村部农业遥感重点实验室, 北京 100081; 3. 中国热带农业科学院环境与植物保护
研究所/海南儋州热带农业生态系统国家野外科学观测研究站, 海口 571101)

摘要: 为分析海南岛橡胶林物候特征, 探究热带森林植被物候变化特征, 本研究利用 MODIS 归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 数据, 采用 Savitzky-Golay (S-G) 滤波法重建 2001—2015 年的 MODIS NDVI 时间序列, 利用动态阈值法和典型样区提取海南岛橡胶林物候, 分析了橡胶林物候的时空变化特征。结果表明: 15 a 间海南岛橡胶林春季在 1 月中旬—3 月下旬开始展叶, 秋季在 11 月中旬—12 月下旬开始落叶, 生长季长度约 7~10 个月; 在时间尺度上, 15 a 间橡胶林物候没有显著性变化, 春季物候每年提前约 0.94 d, 秋季物候每年延迟约 0.84 d, 生长季长度每年延长约 1.79 d; 在空间尺度上, 15 a 间春季物候显著提前地区主要有白沙黎族自治县、屯昌县、琼中黎族苗族自治县、万宁市和琼海市等, 变化幅度为 -1.8~-0.1 d/a, 秋季物候显著延迟地区在儋州市、白沙黎族自治县、屯昌县、琼中黎族苗族自治县、琼海市、万宁市、乐东黎族自治县、三亚市和保亭黎族苗族自治县等地, 变化幅度为 0.5~2.7 d/a, 生长季长度显著延长区域主要分布在儋州市和白沙黎族自治县等地, 变化幅度为 0.2~0.8 d/a, 落叶期开始日显著延迟是橡胶林物候变化的主要特征。

关键词: 橡胶; 物候; MODIS NDVI; 海南岛; 时空变化

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)01-0210-08

0 引言

植被物候是植物长期适应季节性变化而形成的生长发育节律, 是目前指示植物生长发育的季节特征和生理活动最常用的一个指标^[1]。森林植被作为陆地生态系统的重要组成部分, 在全球物质和能量循环中起着重要作用。开展森林植被物候研究不仅有助增进森林植被对气候变化响应的理解, 对评估植被生产力和碳平衡也具有重要意义^[2-3]。海南岛是重要农产品天然橡胶保护区划定的重点区域, 天然橡胶是一种不可或缺的战略物资, 监测海南岛橡胶林物候变化特征对于重要农产品保护以及生态保护具有重要意义。

长时间序列物候监测和评估成为目前植被物候

研究的主要方向, 而遥感作为一门对地观测综合学科, 由于其范围广、时序长、可获取性强, 最近几十年来被广泛应用在植被物候监测领域^[4-6]。MODIS 遥感影像由于其描述植被信息受到的干扰较小, 时间序列较长和分辨率较高, 许多学者利用其归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 对植被物候变化进行研究^[7-8]。目前, 已有学者对橡胶物候进行了研究, Razak 等^[9]使用 Landsat NDVI 数据提取了马来西亚橡胶林物候参数, 实现了橡胶林制图; Kou 等^[10]和 Zhai 等^[11]分别利用 Landsat 数据和物候观测资料研究了西双版纳橡胶林物候特征; 陈汇林等^[12]和陈小敏等^[13]使用 MODIS 时间序列年内均值变化及邻域变化量来提取海南岛橡胶林物候参数; 田光辉等^[14]基于 2001—2011 年海南岛橡胶林物候特征提取了橡胶林分布

收稿日期: 2021-04-13; 修订日期: 2021-08-16

基金项目: 海南省自然科学基金青年项目“橡胶林落叶物候期的时空变化特征及其对气候变化的响应研究”(编号: 419QN280)、海南省自然科学基金面上项目“基于 GEE 云平台的易混淆热带作物遥感分类算法研究”(编号: 619MS100)、国家自然科学基金项目“关联常规气象要素模拟我国热区水平面太阳总辐射的研究”(编号: 31601211)和农业农村部农业遥感重点实验室开放基金课题“海南岛橡胶林叶面积指数遥感估算研究”(编号: 2016005)共同资助。

第一作者: 胡盈盈(1992-), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事生态遥感监测研究。Email: hyy1992@catas.cn。

通信作者: 戴声佩(1986-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事农业资源环境遥感研究。Email: shengpeidai@catas.cn。

信息。上述研究或局限于橡胶物候的应用,或研究物候参数不全面,对橡胶林生长季长度鲜有涉及。

海南岛作为一个独立的生态系统,在全球气候变化背景下,橡胶林物候会出现什么样的规律特征,需要进一步探讨。因此,本研究基于 2001—2015 年 MODIS NDVI 数据,采用 Savitzky - Golay (S - G) 滤波法、动态阈值法提取海南岛橡胶林展叶期开始日、落叶期开始日和生长季长度,对 15 a 间橡胶林的物候变化进行动态监测,并基于橡胶林像元分析物候变化趋势和显著性,以期摸清海南岛橡胶林物候时空变化规律,为其他研究提供基础数据和参考。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

海南岛(N18°10'~20°10',E108°37'~111°30')地处中国最南端,是海南省的主体,是我国第二大岛,全岛面积约 3.54 万 km²。海南岛是我国橡胶林的主要种植基地之一,中西部和中部地区多为橡胶林种植区,如儋州市、澄迈县、白沙黎族自治县、琼中黎族苗族自治县等^[15-16]。海南岛属热带季风气候,年均气温为 22~26℃,年均降水量在 1 600 mm 以上,地势中间高四周低。综合地理位置、气候、胶林面积、胶龄、经营主体等多种因素,在海南岛西部、南部和中部分别选择 3 个典型样区。海南岛典型样区及数字高程模型(digital elevation model, DEM)如图 1 所示。

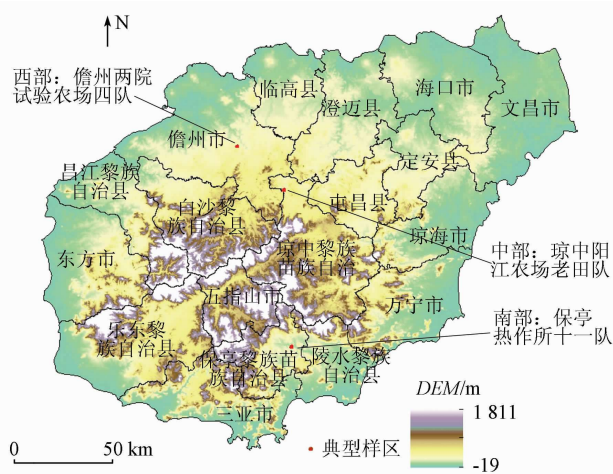


图 1 研究区域示意图

Fig. 1 The map of study area

1.2 数据来源与预处理

遥感数据为 2001—2015 年 MOD13Q1 NDVI 数据,空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d,每年有 23 期影像数据,数据格式为 EOS - HDF。使用 MODIS Reprojection Tool 工具对海南岛原始影像进

行镶嵌、裁剪以及投影转换;然后对 NDVI 数据去除无效值、归一化处理,将值控制在 -1~1;物候参数的提取在 Timesat 软件中完成,需将原始数据 HDF 格式转换成 Timesat 有效的 DAT 格式,归一化处理和格式转换均在 ArcGIS 软件中完成。

海南岛是天然橡胶保护区,橡胶为多年生热带经济作物,经济寿命长,种植至少在 30 a 以上^[17-18],受《森林法》保护,不可大面积砍伐。Dong 等^[19]研究表明基于 Landsat/PALSAR 橡胶林分类精度比 MODIS/PLASAR 高,橡胶林划定以 Chen 等^[18]基于 Landsat /PALSAR(25 m)绘制的 2010 年海南岛橡胶林分布图为准,利用海南岛橡胶林分布图对 NDVI 时间序列数据进行掩模处理,以便精准提取橡胶林。

2 研究方法

2.1 物候提取方法

为了减少噪声的影响,利用 S - G 滤波对 NDVI 时间序列进行去噪平滑处理。S - G 滤波^[20]是利用滑动窗口对曲线进行分段的多项回归,并加权平均,拟合公式为:

$$Y_j^* = \frac{\sum_{i=-m}^{i=m} C_i Y_{i+j}}{n}, \quad (1)$$

式中: Y^* 为拟合后值; Y_{i+j} 为第 $i+j$ 个像元的原始 NDVI 值; j 为滑动窗口内纵向原始数据下标; C_i 为第 i 个像元的滤波系数,由最小二乘法确定; n 为窗口宽度($n=2m+1$),其中 m 为半个平滑窗口的宽度。采用 S - G 滤波对时间序列数据拟合时,移动窗口的宽度 n 和迭代次数 d 是应用中的关键, n 不仅决定了平滑度,也影响了生长季节开始时跟踪曲线快速变化的能力^[21]; d 越高可以去除更多异常值,但是也会使结果噪声更多。本研究依据经验^[17]和样区尝试,设定 n 和 d 都为 3。

考虑到研究区橡胶林 NDVI 的变化特征,本研究采用动态阈值法提取橡胶林的物候参数。动态阈值法的提出者 Jönsson 等^[21]建议植被生长季开始日期阈值为 20% 左右,但是对森林植被生长季开始与结束期提取时的阈值设定各有不同。根据已有经验并在多次试验的基础上,将生长季开始和生长季结束开始时间阈值分别设定为 30% 和 60%。

2.2 物候趋势分析

为研究海南岛橡胶林每个像元点 15 a 间的物候变化趋势,基于最小二乘法的线性回归方法逐像元计算橡胶林物候变化率,并利用 F 检验分析其显

著性,具体算法详见文献^[22],其公式为:

$$G_{\text{slope}} = \frac{N \sum_{i=1}^N (i G_i) - (\sum_{i=1}^N i) (\sum_{i=1}^N G_i)}{N \sum_{i=1}^N i^2 - (\sum_{i=1}^N i)^2}, \quad (2)$$

式中: G_{slope} 为物候变化趋势; G_i 为第 i 年物候开始(结束)日期, N 为年变化量 ($N=15$)。当 $G_{\text{slope}} > 0$, 物候推迟; 当 $G_{\text{slope}} < 0$, 物候提前。使用 F 检验进行显著性分析, 当 $P < 0.05$ 时, 趋势显著。

3 结果与分析

3.1 典型样区 NDVI 值拟合曲线特征

海南岛 3 个典型橡胶林样区 Google Earth 影像纹理如图 2(a)—(c) 所示。本研究在典型样区 NDVI 曲线重构时, 前后各添加 1 a 的虚拟时间, 图 2(d)—(f) 拟合曲线时序有 69 期, 只选取中间时序 23—46 期进行分析。儋州市两院试验农场橡胶林展叶期开始日和落叶期开始日阈值分别设置为

30% 和 50%。图 2(d) 可以看出, 儋州市橡胶林在 12 月下旬—次年 2 月初明显落叶, 2 月初 NDVI 值最低, 为落叶盛期; 在 2 月下旬开始展叶, 6 月下旬进入稳定期; 时序 38—41 间 NDVI 值出现下降, 经分析该时段正处于 8—9 月雨季, 云量较多, 故 NDVI 值受影响下降。同理, 保亭黎族苗族自治县热作所阈值设定为 30% 和 60%。图 2(e) 所示保亭黎族苗族自治县橡胶林 12 月下旬开始落叶, 2 月为落叶盛期, 3 月下旬开始展叶, 6 月下旬—7 月上旬 NDVI 值下降, 可能是热作所橡胶林地块琐碎(图 2(b)), 像元混杂, 或天气等因素造成的 NDVI 值下降。琼中黎族苗族自治县阳江农场阈值设定为 30% 和 60%。图 2(f) 显示琼中黎族苗族自治县 12 月初橡胶林开始落叶, 2 月初—2 月下旬达落叶盛期, 3 月中旬为橡胶林展叶期, 之后 NDVI 值迅速上升, 在 5 月下旬达到稳定期。根据典型样区试验, 设定海南岛橡胶林展叶期开始日和落叶期开始日阈值分别为 30% 和 60%。

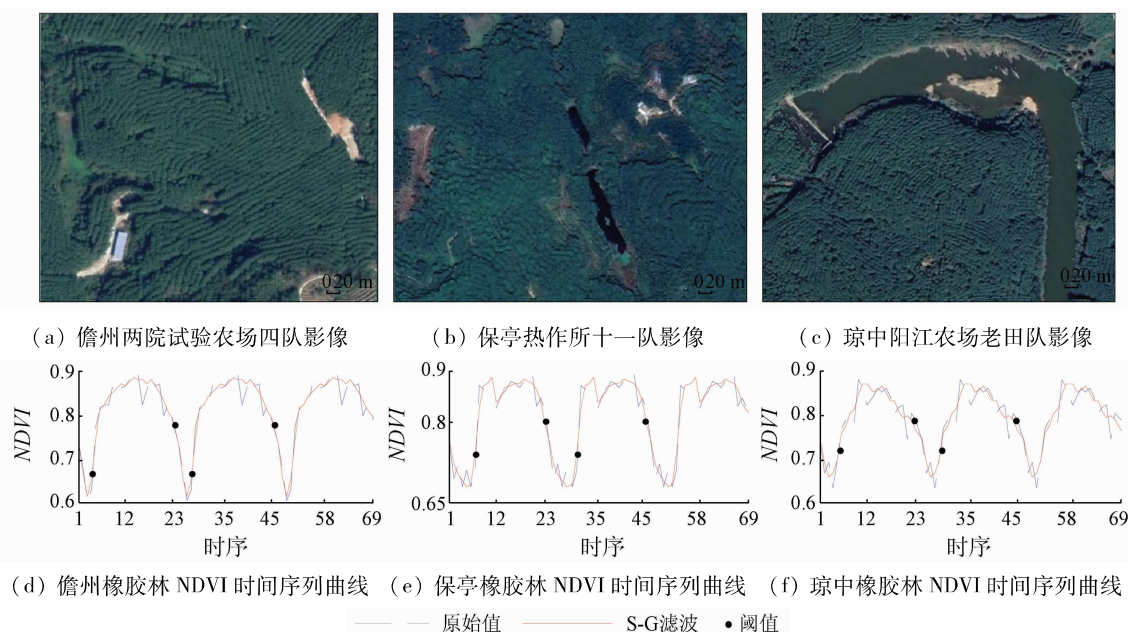


图 2 典型样区影像及拟合曲线

Fig. 2 Typical sample image and fitting curve

3.2 橡胶林物候结果验证

采用 2017 年儋州市 ($19^{\circ}35'N, 109^{\circ}30'E$)、白沙黎族自治县 ($19^{\circ}22'N, 109^{\circ}28'E$)、琼中黎族苗族自治县 ($19^{\circ}14'N, 109^{\circ}48'E$) 橡胶林物候观测数据对研究结果进行验证, 数据来源于海南儋州热带农业生态系统国家野外科学观测研究站。观测记录数据虽然比影像时间晚, 但仍可用, 因为观测站点橡胶林龄为 15~20 a。本研究选取展叶期开始日、落叶期开始日 2 种观测数据, 因生长季长度观测站点未记载, 根据观测点记录的第一篷叶抽发期到落叶始期之间的时间计算得出。地面观测站点数据与相同站点

15 a 的平均物候数据对比, 对比结果见表 1。3 个站点观测记录的展叶期开始日和遥感提取的结果相差不大。观测数据的落叶期开始日均大于遥感手段监测天数, 相差 6~11 d, 原因是每年遥感影像最后一期(第 23 期)正好对应 353 d, 小于全年实际天数 365 d, 但 2 种结果均表现出橡胶林在年末开始落叶。橡胶生长季长度观测数据均大于遥感手段监测数据, 由于人工观测和遥感监测的尺度差异较大, 且遥感手段监测到的物候期和地面观测的物候期不具有传统意义上的一致性, 区域内最早展叶的植物出现绿色, 并不一定表明植物遥感生长季的开始, 因为

遥感监测的生长季开始日期是区域内多数植物开始展叶的日期,遥感监测的物候期相对地面单一植株的物候期有延迟,因此遥感监测的橡胶林生长季长度短于地面观测记录的生长季长度。2001—2014 年海南省儋州市南丰镇那王村(19°24′20″N,109°33′44″E) 站点观测的橡胶展叶期物候^[13] 平均在 3 月 6 日,本研究春季物候平均出现在 3 月 4 日,与 14 a 平均观测数据相差不大。本文研究结果与地面观测物候结果一致,证明了本研究结果的可靠性。

表 1 不同物候测量方法的结果对比
Tab.1 Comparison of the phenology between different measuring methods (d)

地点	获取方法	展叶期 开始日	落叶期 开始日	生长季 长度
儋州市	地面观测数据	59	362	303
	遥感监测数据	65	353	273
白沙黎族自 治县	地面观测数据	62	364	302
	遥感监测数据	65	353	289
琼中黎族苗 族自治县	地面观测数据	59	359	300
	遥感监测数据	57	353	289

3.3 橡胶林物候年际变化

从时间上看,海南岛橡胶林展叶期开始日呈提前趋势(图 3),从 2001 年的第 70 天(3 月上旬),波动提前到 2015 年的第 42 天(2 月中旬),约提前 28 d,平均每年提前 0.94 d($R^2 = 0.16, P > 0.05$)。落叶期开始日整体呈延迟趋势,从 2001 年的第 330 天(11 月下旬)延迟到 2015 年第 356 天(12 月下旬),约延迟了 26 d,平均每年延迟 0.84 d($R^2 = 0.04, P > 0.05$)。生长季长度总体呈延长趋势,从 2001 年的第 246 天(8 个月)波动延长到 2015 年的第 300 天(10 个月),大致延长了 54 d,平均每年延长 1.79 d($R^2 = 0.10, P > 0.05$)。橡胶林展叶期开始日的提前趋势(0.94 d/a),与 1950—2015 年全国木本植物春季物候变化(0.28 d/a)相比提前较多^[23],与 1982—2006 年东部南北样带亚热带落叶阔叶林返青期开始日变化(0.58 d/a)相比提前也较多^[24],比

2001—2014 年海南省儋州市南丰镇那王村观测点橡胶林展叶期变化(1.12 d/a)提前较少^[13],但在变化趋势上具有一致性;秋季落叶期开始日的延迟趋势(0.84 d/a),与 1950—2015 年全国木本植物秋季物候变化(0.19 d/a)相比延迟较多^[23],同 1982—2006 年东部南北样带亚热带落叶阔叶林休眠期起始日变化(0.80 d/a)相差不大^[24];生长季长度的延长趋势(1.79 d/a),较 1950—2015 年全国木本植被生长季长度变化(0.21 d/a)延长较多^[23],且大于 1982—2006 年东部南北样带亚热带落叶阔叶林生长季长度延长趋势(1.40 d/a)^[24]。本研究春季展叶期开始日提前趋势是秋季落叶期开始日延迟趋势的 1.1 倍,推测生长季长度延长是由春季展叶期开始日提前引起的。

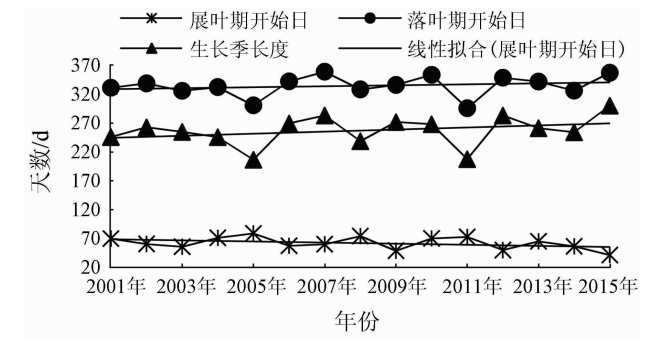


图 3 2001—2015 年海南岛橡胶林物候年际变化
Fig.3 Inter - annual variations of rubber forest phenology in Hainan Island from 2001 to 2015

3.4 橡胶林物候空间分布

海南岛 15 a 间展叶期开始日自中向西和东逐渐提前,落叶期开始日则相反(图 4(a)—(b)),研究区海拔由中间向四周降低,表明物候的开始、结束日期与海拔有着密切关系。橡胶林平均展叶期开始日在第 17—81 天,即 1 月中旬—3 月下旬(图 4(a)),其中第 17—81 天开始展叶的橡胶林占全岛的 81.38%,第 49—81 天占 58.11%(图 5(a)),即全岛一半左右的橡胶林在 3 月份开始展叶;展叶期

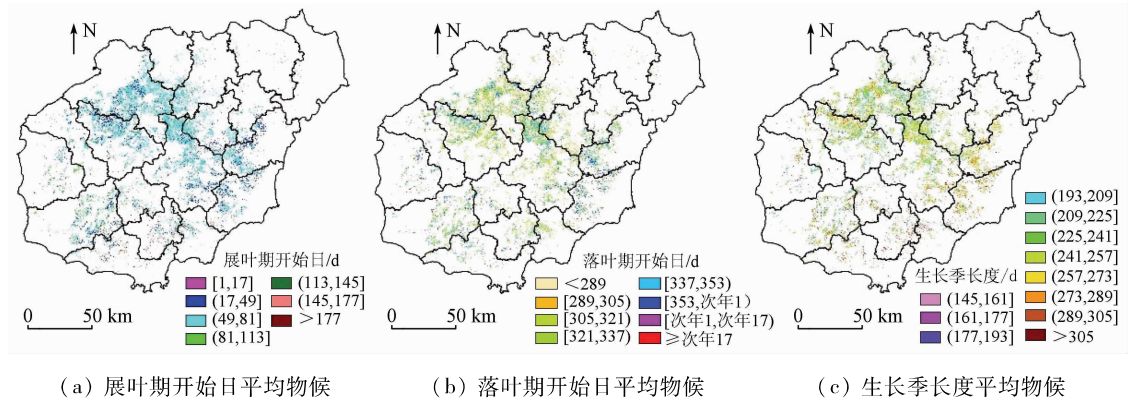


图 4 2001—2015 年海南岛橡胶林平均物候空间分布
Fig.4 Spatial distribution of phenology in Hainan Island form 2001—2015

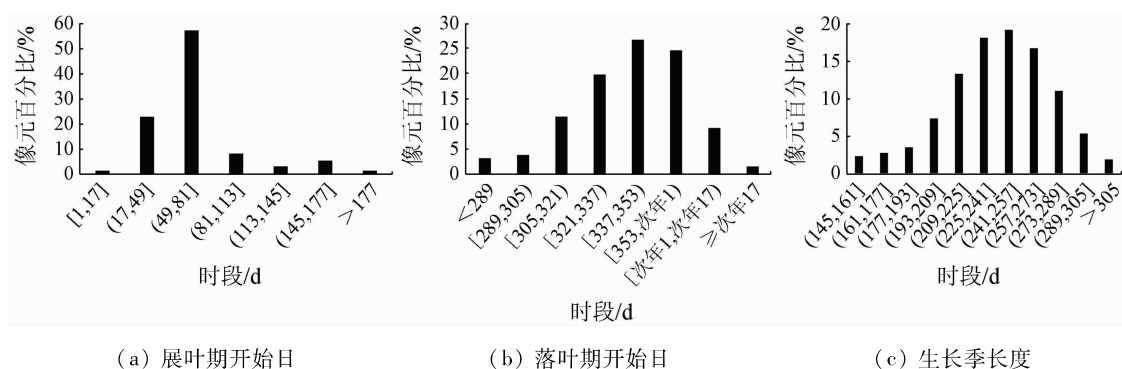


图5 橡胶林平均物候各时段所占像元的百分比

Fig. 5 Percentage of pixels in rubber plantation per year average phenology period

较早的地区集中在研究区西部和东部,均在第1—49天开始展叶。橡胶林平均落叶期开始日在第321—353天,11月中旬—12月下旬(图4(b)),第321—次年第1天开始落叶的橡胶林有71%(图5(b)),即绝大多数橡胶林在11月中旬—12月下旬落叶;落叶期较早的地区集中在中部山区,落叶期较晚的地区有东方市、琼海市和万宁市等。橡胶林生长周期约持续209~305d,达7~10个月左右(图4(c)),其中生长季长度225~273d的橡胶林占全岛的54.04%(图5(c)),即海南岛大多数橡胶林生长季长度约在8~9个月;琼海市和万宁市生长周期较长约在9~10个月左右。

3.5 橡胶林物候时空变化趋势

从空间上看,15 a来,海南岛橡胶林展叶期开始

日总体上呈提前趋势(图6(a)),变化幅度为 $-2.3 \sim -0.1$ d/a,展叶期开始日显著变化地区较少(图6(d)),约占8.7%,变化显著区域中约81%的橡胶林显著提前,主要集中在白沙黎族自治县、屯昌市、琼中黎族苗族自治县、万宁市和琼海市等地。橡胶林落叶期开始日呈延迟趋势(图6(b)),延迟幅度集中在 $0.5 \sim 2.7$ d/a,显著延迟地区占33.4%(图6(e))。海南岛橡胶林生长季长度呈增加趋势(图6(c)),增长趋势为 $0.05 \sim 0.9$ d/a,生长季长度显著延长区域占13%(图6(f)),主要分布在儋州市和白沙黎族自治县等。对比橡胶林时空变化趋势,落叶期开始日显著延迟是橡胶林物候变化最显著的特征。

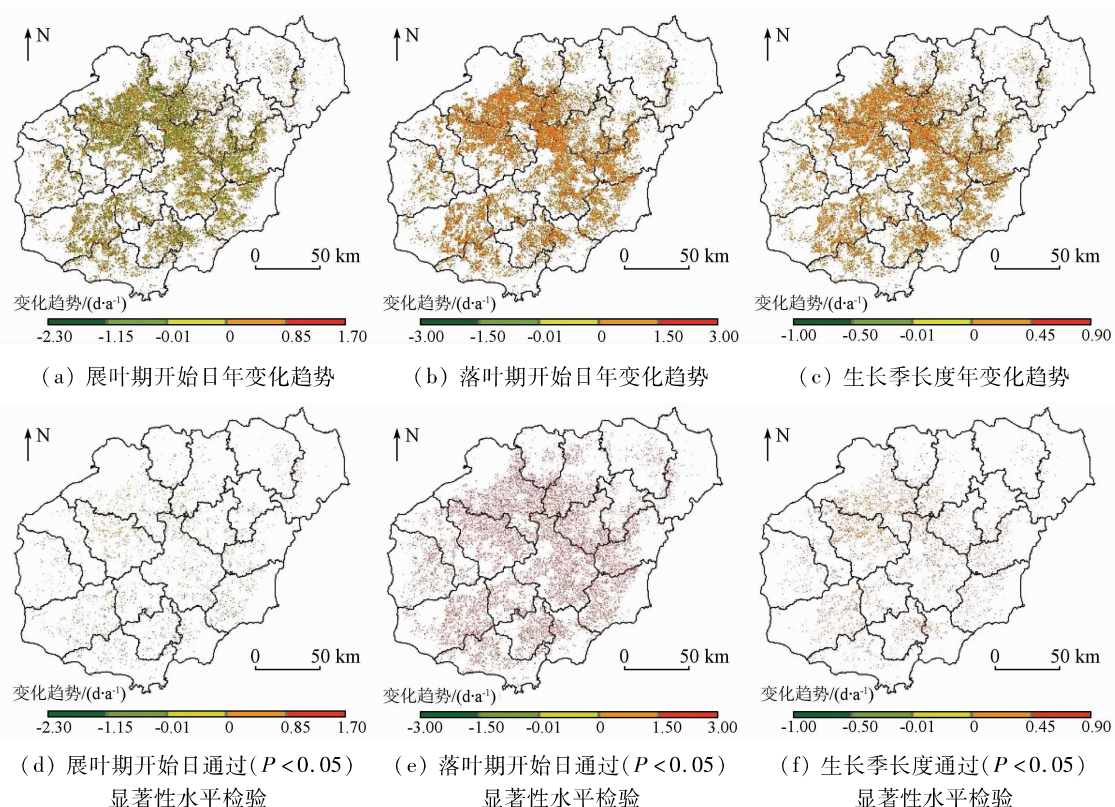


图6 2001—2015年海南岛橡胶林物候变化趋势空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of phenology change trend in Hainan Island from 2001 to 2015

橡胶林春季物候的提前和秋季物候的延迟,这与近几十年来基于地面观测^[13]和遥感监测^[25-26]的

研究结果一致。此外,本研究获取的橡胶林生长季长度是指从橡胶展叶期开始日到橡胶林落叶期开始日之间的时间累积,实际生产过程中,橡胶割胶时间是从篷叶发育完好后开始计算的,故本研究的橡胶林生长季长度较实际产胶时间偏长。就橡胶生长机理来看,该结果提取的生长季长度符合橡胶生长机理,可以准确地反映橡胶林的生长季长度。

橡胶林春季物候提前,秋季物候延迟,生长季长度延长,割胶期有可能提前和延长,产胶量可能会相应提高。但是,橡胶展叶期提前也会带来一些危害的提前发生,例如第一篷叶展叶期的提前橡胶树极大可能受到寒害,而且这个时期橡胶病虫害极易发生,尤其是白粉病,导致防治时间会提前和延长。因此,随着橡胶物候期的变化,还应加强橡胶树对极端气象灾害和病虫害的预防措施。

本研究中使用 2010 年橡胶林空间分布数据,并以此分析 2001—2015 年橡胶林物候时空变化特征。结合橡胶种植面积统计数据来看,2001—2010 年和 2010—2015 年期间橡胶种植面积、种植区域均发生了变化。但是根据 Chen 等^[27]研究表明,近几十年来新增种植橡胶林主要来源于老胶园更新,其次为耕地和林地转化,这表明橡胶林种植面积虽然有变化,但老胶园种植区的位置变化不大。从海南省各县橡胶热带作物面积统计数据来看,2001—2010 年海南岛南部、东南部内陆地区橡胶种植面积增长幅度较小,而北部橡胶种植面积增长幅度较大,主要有儋州市、澄迈县和临高县。因此,本研究结果可能由于影像时间和土地利用变化之间的差异存在误差,其中海南岛北部橡胶林物候结果差异较大,东部误差较小。

4 结论

本研究基于 MODIS NDVI 数据探讨了 2001—2015 年海南岛橡胶林物候的时空变化特征,基于 S-G 滤波和动态阈值法提取的物候结果与地面观测结果较一致,说明对海南岛橡胶林物候监测是可靠的,可为橡胶林生长监测和保护提供一定的参考依据。

1) 本研究设定展叶期开始日和落叶期开始日阈值分别为 30% 和 60%,可以准确地监测海南岛橡胶林物候特征。典型样区大约在 12 月开始落叶,2 月进入落叶盛期,2 月下旬—3 月下旬陆续进入展叶期,典型样区物候提取方法可为局部地区物候监测提供有效的技术参考。

2) 空间上,2001—2015 年海南岛橡胶林从 1 月中旬—3 月下旬开始展叶,11 月中旬—12 月下旬逐

渐开始落叶,生长季长度长达 7~10 个月。同一时间段内,海南岛橡胶林物候空间分布与海拔空间分布具有较好的一致性。

3) 时间上,15 a 间海南岛橡胶林物候变化趋势不显著。展叶期开始日提前约 28 d,落叶期开始日约推迟 26 d,生长季长度延长约 54 d,展叶期开始日提前是生长季延长的主要原因。

4) 物候在空间尺度上变化趋势存在显著空间差异。15 a 间橡胶林展叶期开始日变化趋势普遍提前,落叶期开始日变化趋势整体推迟,生长季长度变化趋势普遍延长,橡胶林落叶期开始日推迟成为橡胶林较显著的物候变化特征之一。

参考文献 (References):

- [1] Morissette J T, Richardson A D, Knapp A K, et al. Tracking the rhythm of the seasons in the face of global change: Phenological research in the 21st century[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(5): 253–260.
- [2] 张树清, 张 柏, 汪爱华. 三江平原湿地消长与区域气候变化关系研究[J]. *地球科学进展*, 2001, 16(6): 836–841.
Zhang S Q, Zhang B, Wang A H. A study on the relationship between distributive variation of wetlands and regional climate change in Sanjiang Plain[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(6): 836–841.
- [3] 范德芹, 赵学胜, 朱文泉, 等. 植物物候遥感监测精度影响因素研究综述[J]. *地理科学进展*, 2016, 35(3): 304–319.
Fan D Q, Zhao X S, Zhu W Q, et al. Review of influencing factors of accuracy of plant phenology monitoring based on remote sensing data[J]. *Progress in Geography*, 2016, 35(3): 304–319.
- [4] 翟 佳, 袁凤辉, 吴家兵. 植物物候变化研究进展[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(11): 3237–3243.
Zhai J, Yuan F H, Wu J B. Research progress on vegetation phenological changes[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(11): 3237–3243.
- [5] 王连喜, 陈怀亮, 李 琪, 等. 植物物候与气候研究进展[J]. *生态学报*, 2010, 30(2): 447–454.
Wang L X, Chen H L, Li Q, et al. Research advances in plant phenology and climate[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(2): 447–454.
- [6] 陆佩玲, 于 强, 贺庆棠. 植物物候对气候变化的响应[J]. *生态学报*, 2006, 31(3): 923–929.
Lu P L, Yu Q, He Q T. Responses of plant phenology to climate change[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 31(3): 923–929.
- [7] Clerici N, Weissteniner C J, Gerard F. Exploring the use of MODIS NDVI – based phenology indicators for classifying forest general categories[J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(12): 1781–1803.
- [8] Xin Q C, Broich M, Zhu P, et al. Modeling grassland spring onset across the Western United States using climate variables and MODIS – derived phenology metrics[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 161(5): 63–77.
- [9] Razak A, Shariff R, Ahmad N, et al. Mapping rubber trees based on phenological analysis of Landsat time series data – sets[J]. *Geoc-*

- arto International, 2018, 33(6): 627–650.
- [10] Kou W L, Xiao X M, Dong J W, et al. Mapping deciduous rubber plantation areas and stand ages with PALSAR and Landsat images [J]. Remote Sensing, 2015, 7(1): 1048–1073.
- [11] Zhai D L, Yu H, Chen S C, et al. Responses of rubber leaf phenology to climatic variations in Southwest China [J]. International Journal of Biometeorology, 2019, 63(5): 607–616.
- [12] 陈汇林, 陈小敏, 陈珍丽, 等. 基于 MODIS 遥感数据提取海南橡胶信息初步研究 [J]. 热带作物学报, 2010, 31(7): 1181–1185.
- Chen H L, Chen X M, Chen Z L, et al. A primary study on rubber acreage estimation form MODIS: Based information in Hainan [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2010, 31(7): 1181–1185.
- [13] 陈小敏, 陈汇林, 李伟光, 等. 海南岛天然橡胶林春季物候期的遥感监测 [J]. 中国农业气象, 2016, 37(1): 111–116.
- Chen X M, Chen H L, Li W G, et al. Remote sensing monitoring of spring phenophase of natural rubber forest in Hainan Province [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016, 37(1): 111–116.
- [14] 田光辉, 李海亮, 陈汇林. 基于物候特征参数的橡胶树种植信息遥感提取研究 [J]. 中国农学通报, 2013, 29(28): 46–52.
- Tian G H, Li H L, Chen H L. Research on remote sensing extraction of planting information for rubber trees based on phenological characteristic parameters [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(28): 46–52.
- [15] 唐海川, 何永东. 海南统计年鉴. 行政区划 (2018) [Z]. 2019.
- Tang H C, He Y D. Hainan statistical yearbook. divisions of administrative areas (2018) [Z]. 2019.
- [16] 许灿光, 蒋菊生, 石 靓, 等. 中国植胶环境生态状况调查与评价 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2014: 27–28.
- Xu C G, Jiang J S, Shi L, et al. Investigation and evaluation on the ecological status of glue planting environment in China [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2014: 27–28.
- [17] 张惜珠, 黄慧德. 橡胶树栽培与利用 [M]. 北京: 金盾出版社, 2006: 5–7.
- Zhang X Z, Huang H D. Rubber tree cultivation and utilization [M]. Beijing: Jindun Press, 2006: 5–7.
- [18] Chen B Q, Li X P, Xiao X M, et al. Mapping tropical forests and deciduous rubber plantations in Hainan Island, China by integrating PALSAR 25-m and multi-temporal Landsat image [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016, 50(5): 117–130.
- [19] Dong J W, Xiao X X, Chen B Q, et al. Mapping deciduous rubber plantations through integration of PALSAR and multi-temporal Landsat imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 134(5): 392–402.
- [20] Chen J, Jönsson P, Tamura M, et al. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(3): 332–334.
- [21] Jönsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(8): 1824–1832.
- [22] Yin L C, Wang X F, Feng X M, et al. A comparison of SSEBop-model-based evapotranspiration with eight evapotranspiration products in the Yellow River basin, China [J]. Remote Sensing, 2020, 12(16): 25–28.
- [23] 徐 佳, 樊海东, 倪 健. 1950—2015 年中国植物物候变化的集成分析 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2019, 14(2): 1–11.
- Xu J, Fan H D, Ni J. Meta-analysis of plant phenological change in China during 1950 and 2015 [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2019, 14(2): 1–11.
- [24] 余 振, 孙鹏森, 刘世荣. 中国东部南北样带主要植被类型物候期的变化 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(3): 316–329.
- Yu Z, Sun P S, Liu S R. Phenological change of main vegetation types along a north-south transect of eastern China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(3): 316–329.
- [25] 葛全胜, 郑景云, 张学霞, 等. 过去 40 年中国气候与物候的变化研究 [J]. 自然科学进展, 2003, 13(10): 1048–1053.
- Ge Q S, Zheng J Y, Zhang X X, et al. Studies on climate and phenology changes in China in the past 40 years [J]. Progress in Natural Science, 2003, 13(10): 1048–1053.
- [26] 仲舒颖, 郑景云, 葛全胜. 近 40 年中国东部本本植物秋季叶全变色期变化 [J]. 中国农业气象, 2010, 31(1): 1–4.
- Zhong S Y, Zheng J Y, Ge Q S. Change of autumnal leaf coloring of woody plants in eastern China for the last 40 years [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(1): 1–4.
- [27] Chen B Q, Xiao X M, Wu Z X, et al. Identifying establishment year and pre-conversion land cover of rubber plantations on Hainan Island, China using Landsat data during 1987–2015 [J]. Remote Sensing, 2018, 10(8): 13–19.

Spatio-temporal change characteristics of rubber forest phenology in Hainan Island during 2001—2015

HU Yingying^{1,2}, DAI Shengpei^{1,2}, LUO Hongxia^{1,2}, LI Hailiang^{1,2},
LI Maofen^{1,2}, ZHENG Qian^{1,2}, YU Xuan^{1,2}, LI Ning³

(1. Institute of Scientific and Technological Information, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences/Key Laboratory of Applied Research on Tropical Crop Information Technology of Hainan Province, Haikou 571101, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Remote Sensing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China; 3. Environment and Plant Protection Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences/Danzhou Hainan, Tropical Agro-Ecosystem, National Observation and Research Station, Haikou 571101, China)

Abstract: To analyze the phenological characteristics of the rubber forest in Hainan Island and to explore the

phenological change characteristics of tropical forest vegetation, this study reconstructed the 2001—2015 MODIS NDVI time series using the Savitzky – Golay (S – G) filtering method based on the MODIS normalized difference vegetation index (NDVI) data. Then, this study extracted the phenological parameters of the rubber forest using the dynamic threshold method and typical sampling areas. Finally, this study analyzed the spatio – temporal changes in the phenological characteristics of the rubber forest. The results are as follows. During 2001—2015, the rubber forest started its foliation season mainly from mid – January to late March in spring and started its defoliation season from mid – November to late December in autumn, with the growing season lasting for about 7 ~ 10 months. On the time scale, the phenological characteristics did not significantly changed in the 15 years. Specially, the spring phenology occurred about 0.94 days earlier, the autumn phenology showed an about 0.84 days delay, and the growing season was prolonged for about 1.79 days every year. On a spatial scale, the regions where the spring phenology occurred significantly earlier in the 15 years primarily included Baisha Li Autonomous County, Tunchang County, Qiongzong Li – Miao Autonomous County, Wanning City, and Qionghai City, with a changing rate of $-1.8 \sim -0.1$ d/a. The areas with a significant delay in autumn phenology included Danzhou City, Baisha Li Autonomous County, Tunchang County, Qiongzong Li – Miao Autonomous County, Qionghai City, Wanning City, Ledong Li Autonomous County, Sanya City, and Baoting Li – Miao Autonomous County, with a changing rate of $0.5 \sim 2.7$ d/a. The areas where the growing season was significantly prolonged mainly included Danzhou City and Baisha Li Autonomous County, with a changing rate of $0.2 \sim 0.8$ d/a. The main characteristic of phenological changes of the rubber forest is the significant delay in the start date of the defoliation season.

Keywords: rubber; phenology; MODIS NDVI; Hainan Island; spatio – temporal change

(责任编辑: 陈 理)