

引用格式: Wu Honggan, Wang Chengbo, Miao Zhenwang, *et al.* Study on Early Warning Technology of Sub-health State of Forest Resources with Spaceborne Remote Sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(5): 1121-1130. [武红敢, 王成波, 苗振旺, 等. 森林资源亚健康状态的卫星遥感预警技术研究[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(5): 1121-1130.]
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.5.1121

森林资源亚健康状态的卫星遥感预警技术研究

武红敢^{1,2}, 王成波³, 苗振旺⁴, 王文泉^{1,2}, 王晓丽⁴, 米国兵⁵

- (1. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091;
2. 国家林业和草原局林业遥感与信息技术实验室, 北京 100091;
3. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100101;
4. 山西省林业和草原有害生物防治检疫局, 山西 太原 030024;
5. 关帝山国有林管理局二道川林场, 山西 文水 032199)

摘要: 森林病虫害等扰动类型造成的亚健康林木监测预警工作不能及时到位, 导致防治工作长期处于灾后救灾的被动局面。基于2019年5~9月份的多时相GF-1 WFV数据, 应用比值植被指数和红绿植被指数, 准实时地监测逆生长、叶冠胁迫或失色等“灾害”信息。结果表明: 虽然树木叶片枯黄、萎蔫等叶绿素降解并逐渐转化成叶黄素和叶红素需要一定的过程, 或“灾害症状”有时具有滞后性, 但高频次遥感动态监测结果对于指导森林灾害地面踏查, 提高监测覆盖率和科学性, 防范大面积灾害, 具有积极作用。国产GF-1和GF-6 WFV遥感数据的高重访周期能为月度森林资源生长过程的监测提供坚实的数据保障, 满足公顷级树叶长势退化预警监测的需要。

关键词: GF-1 WFV; 森林资源; 亚健康; 森林病虫害; 预警

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2021)05-1121-10

1 引言

干扰是世界上所有森林的普遍特点, 伴随着森林的生存与繁衍, 亘古有之^[1], 即森林扰动是森林生态系统不可避免的一部分, 轻者影响森林发育, 重者改变森林结构、树种组成和立地状况, 造成严重生态灾害。因此以病虫害灾害、火灾、气象灾害为代表的自然扰动与砍伐、植树造林等人为扰动等正改变着地球系统能量收支与物质循环过程, 是影响全球变化时空格局的重要驱动力, 因此定量描述森林扰动模式及其影响是当前全球变化研究的热点问题。尤其北美在广泛开展森林扰动监测方法和监测指数研究的基础上, 已经在关注基于长时间序列

的森林扰动研究^[2], 以探究森林的健康状况与全球生态安全和人类社会可持续发展的关系, 应对生物多样性减少, 水灾、旱灾、火灾、森林病虫害频发引发森林资源锐减导致森林生态系统退化的恶性循环局面。实际上, 当植物受到很多环境因素影响时, 叶肉细胞损害导致生长胁迫, 这种胁迫是通过植物的反射光谱来表现, 于是早在20世纪80年代中期就研制了机载多光谱成像仪PMI, 主要用来探测植物生长胁迫时表现出的细微颜色变化^[3]。近20 a来卫星遥感技术已被用于生产不同尺度的全球森林扰动产品, 目前国内外有多套来源多样、时空尺度各异的单一森林扰动类型监测产品。如单纯依赖中低分辨率卫星遥感图像研制的GBS(8 km)^[4]、

收稿日期: 2020-06-18; 修订日期: 2021-07-11

基金项目: 中国林业科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目“基于北斗的林业野外多业务综合巡护协同技术研究”(CAFYBB2017ZC001)。

作者简介: 武红敢(1963—), 女, 山西祁县人, 研究员, 主要从事遥感在林业上的应用研究。E-mail: wuhg@ifrit.ac.cn

通讯作者: 王成波(1988—), 男, 天津宝坻人, 助理研究员, 主要从事遥感、人工智能在空间信息领域的应用研究。E-mail: wangcb@aircas.ac.cn

Global Burned Area 2000 (GBA2000, 1 km)^[5]、GLOBSCAR (1 km)^[6]、GlobCarbon (1 km)^[7]、L3JRC (1 km)^[8]、MCD45 (500 m)^[9]、Global Fire Emissions Database (GFED, 0.5 degree)^[10]、MCD64 (500 m)^[11]、Fire_cci (250 m)^[12]和中国科学院遥感与数字地球研究所 GABAM 2015 (Global annual Burned Area Map of 2015, 30 m)^[13]等全球火烧迹地监测产品,以及北美西部区域 1 km 的森林虫灾监测产品^[14];也有业务部门持续发布的系列产品,如美国通过用户上传与 Landsat 卫星解译相结合形成的火烧强度 MTBS 产品^[15],借助航空勾绘作业制作的森林病虫害 ADS31 产品^[16],以及我国国家林业和草原科学数据中心的造林数据库^[17]、森林火灾数据库^[18]和林业有害生物数据库^[19]等,这些数据产品对于了解森林扰动历史和现状具有极其重要价值;Curtis 等^[20]2018 年开展了全球 10 km 分辨率的森林扰动成因制图,主要区分了土地利用方式不同引起的森林扰动,仍没有区分自然扰动类型。Huo 等^[21]基于 MTBS 和 ADS 数据库构建出一套美国区域的不同森林扰动类型 Landsat 图像样本库,并研制了美国本土区域 30 m 空间分辨率森林扰动类型产品(包含砍伐、火烧、病虫害三大类)。区域和全球尺度森林病虫害干扰的时空分布和动态变化日益引起关注,Cornelius 等^[22]曾提出应开展高频次、准实时病虫害干扰遥感监测,以服务于森林资源的业务管理。胡圣元等^[23]利用 2013~2019 年多时序 Landsat 8 OLI 遥感数据,采用改进的植被变化追踪算法对南亚热带森林年度扰动进行检测研究,改善了植被变化追踪算法在森林扰动频繁区域的漏检率高的问题,更准确地反映了南亚热带森林年度变化特征。殷崎栋等^[24]使用 LandTrendr 算法和 Landsat 卫星时间序列数据,描述了柴松和太白山保护区的长期(1984~2018 年)森林变化模式,对扰动年探测的总体精度为 89%,可为森林生态系统的自然保护区保护评估提供基础信息。Ye 等^[25]研究了一种随机连续变化检测方法,能够利用 Landsat 卫星时间序列数据对森林扰动进行准实时的监测,具备较高的准确率和计算效率,为数据密集型的大范围森林健康监测任务提供了一种有效工具。

我国的森林病虫害一直采用线路踏查结合标准地详查的监测调查方法,且实行月度零报告制度,对于 1 000 个国家级中心测报点而言是直报国家模式,同时还建立有应急报告(如疫情)机制^[26]。

总之国家、省、地、县通过逐级细化工作任务,明确任务要求、落实主体责任、增强各项任务措施的可操作性等措施,全面落实林业有害生物成灾率、无公害防治率、测报准确率和种苗产地检疫率等“四率”指标的目标管理责任,并把推进监测预警的智能化、检疫御灾的信息化、防治减灾的社会化、应急救援的机动化进程作为完成“四率”指标的重要手段,确保如期实现“四率”指标要求^[27]。实际上森林病虫害对森林资源的危害不亚于人类对树木的砍伐以及火灾对森林的危害,病虫害不仅会造成树木生长缓慢,还可能造成稀有树种的灭绝,危及生态系统的平衡^[28]。严控成灾率是巩固造林绿化成果保护森林资源的重要抓手之一,森林病虫害的重要特点就是树木发生物理或生理的变化,即呈现失叶、失色、失水、死亡等表现现象,而这些变化正好可以被光学传感器所捕捉,说明通过森林扰动区域和类型的遥感评估,可以服务于森林病虫害的监测调查。因为扰动的区域可能是病虫害所致,至少也是未来可能引发病虫害等次期灾害的潜在风险区,所以准实时的森林扰动遥感监测产品对于指导森林病虫害踏查线路设计和标准地设置具有重要科学意义,也是最大限度降低森林病虫害灾害损失,彻底扭转灾后救灾被动局面,最终实现有虫有病不成灾目标的有效保障手段。实验通过对时序卫星遥感数据的处理和分析,快速获取高动态森林扰动产品,旨在为森林灾害遥感预警和地面调查提供技术指导。

2 研究区及数据

2.1 实验区概况

选取山西省关帝山国有林管理局二道川林场作为实验区,该林场位于 111°36′0″~111°56′15″ E, 37°31′20″~37°25′50″ N,地处文水县西部山区腹地,国有林经营面积 10 973.3 hm²。林场境内属暖温带大陆性气候,海拔 1 100~2 200 m。年均气温 4~6℃,年均积温 2 500~3 000℃。年降水量不足 500 mm,年日照约 2 600 h,无霜期 120 d 左右。林场生物资源丰富,种类繁多,森林覆盖率达 92.4%。主要乔木树种有油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、辽东栎(*Quercus liaotungensis* Koidz)、山杨(*Populus davidiana* Dore)、白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr)等;灌木有中国沙棘(*Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis*)

Rousi)、山刺玫(*Rosa davidii* Crep)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、柠条(*Caragana Korshinskii* Kom)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana* Decne)、山桃(*Prunus davidiana* Franch.)等;草类有苔草(*Carex spp.*)、羊胡子草(*Caryota ochlandra*)等。表1为二类调查数据基本信息,表明林场以油松和栎类为主。

表1 二道川林场优势树种信息表

Table 1 Information table of dominant tree species in Erdaochuan Forest Farm

优势树种	油松	柏类	落叶松	栎类	桦类	杨类	灌木
小班个数	919	15	28	357	37	58	53
占比/%	62.64	1.02	1.90	24.33	2.52	3.95	3.61

2.2 研究数据

高分一号卫星(GF-1)于2013年4月26日发射,它是我国高分辨率对地观测系统重大专项中天基系统的首发星,卫星搭载了4台16 m分辨率多光谱相机(WFV)。2018年6月2日发射的高分六号(GF-6)卫星,配备了1台幅宽为800 km的16 m分

辨率多光谱宽幅相机(WFV)。目前GF-1和GF-6组网运行后极大提高了遥感数据获取的时间分辨率,可为林草资源高动态管理等重大需求提供遥感数据支撑。同时为进一步支撑全球可持续发展、防灾减灾和气候变化应对的需求,中国国家航天局于2019年11月推出了“中国国家航天局高分卫星16 m数据共享服务平台(CNSA-GEO平台)”,决定免费开放共享GF-1和GF-6卫星中16 m分辨率历史数据和实时数据,并提供持续稳定的服务,彰显中国负责任大国的担当^[29]。

为了开展基于WFV数据的(生长季)月度森林资源生长状况动态监测应用示范,暂时收集了表2所示的2019年度GF-1 WFV时序多光谱数据,基本满足旺盛生长季月度监测需求。4月30日时研究区植被已经全面进入复苏阶段,定义为基准图像。图1为12个时相的局部假彩色合成影像,合成方案为红(R)、近红外(G)、绿(B),由此也可初步看出森林植被的生长过程。

表2 2019 GF-1 WFV时序多光谱数据

Table 2 GF-1 WFV remote sensing data in 2019

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
过境日期	0430	0509	0517	0521	0529	0602	0704	0904	0921	1028
传感器	WFV2	WFV4	WFV4	WFV3	WFV3	WFV1	WFV1	WFV2	WFV3	WFV4

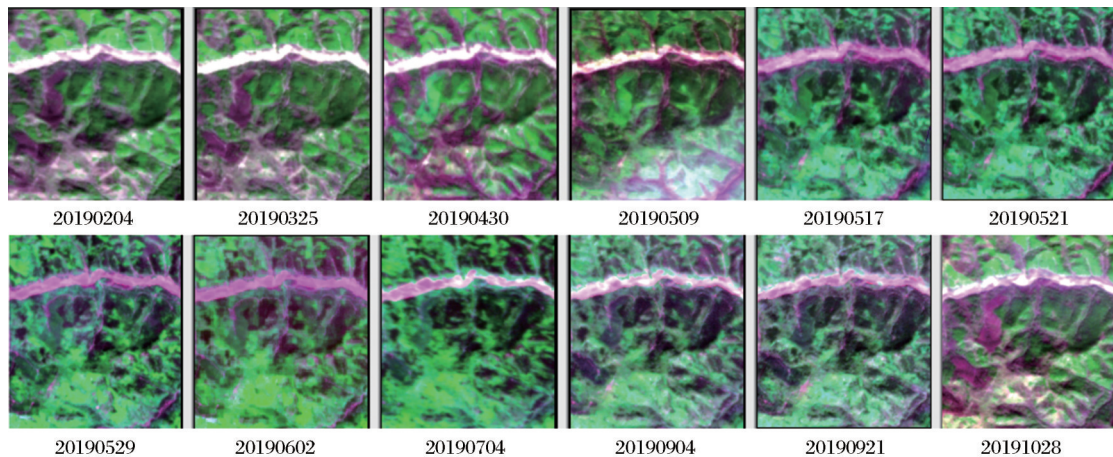


图1 2019研究区域时间序列GF-1 WFV多光谱影像(局部)

Fig.1 GF-1 WFV multi-temporal composite images for research zone in 2019

2.3 辅助数据

为满足分析需要,还收集整理了研究区1:1万小班数据,以及高空间分辨率正摄影像地图数据。同时获取了2019年1月17日和6月9日的GF-2 PMS数据,并经过几何精校正、配准、融合等数据处理,生成1 m空间分辨率影像,单株林木清晰可见。

3 研究方法

3.1 植被指数

植被指数是根据植被的光谱特性,将能够反映植被自身及其变化特征的相关波段进行组合形成的各种指数。它是对地表植被状况简单、有效度量,已被广泛用来评价植被覆盖及其生长活力。它

是一个无量纲的植被观测量,是利用叶冠的光学参数提取的独特光谱信号^[30]。由于森林光谱表现为冠层、下垫面、土壤、环境因子和阴影等复杂混合反映,而且受大气空间—时间(含季相)变化的影响,其值会随时空产生不同的结果。

比值植被指数(RVI)是近红外和红光两个波段反射率的比值,是最早(1969年)发展的植被指数^[31]。它是绿色植物的灵敏指示参数,与叶面积指数(LAI)、叶干生物量(DM)、叶绿素含量相关性高,常用于检测和估算植物生物量,特别适宜高植被覆盖度区域的植被生长状况监测;红绿植被指数(RGRI)是红波段与绿波段两个波段反射率的比值^[32],它是指示由于花青素代替叶绿素而引起叶片变红的表达式之一,常用于估测植被冠层发展过程,是叶片胁迫性的指示器。

3.2 技术原理

林木叶片卷曲、变色、缺失、脱落等现象,标志着林木生长出现异常,表明森林正在遭受病虫害或气象灾害等的侵袭。光学遥感技术可以捕捉叶片色素、叶片结构和叶片含水量的信息,高频次的时序遥感数据可以动态监测林分的生长状态或过程,及时发现异常区域,林木(寄主)的生物物理(失叶、叶生物量减少等)和生物化学(失色等)参数变化是危害症状指示器,也是开展森林病虫害等监测调查的警报器。

3.3 遥感数据处理

首先对多时相遥感数据进行相关预处理,确保时序数据精确配准和辐射归一化。为了便于对比分析,对表2所示的10个时相数据还剔除了云及阴影区,故实际研究区面积略小于林场面积,总计为9 079.84 hm²;其次分别计算了各时相的比值和红绿植被指数,以及相对于2019年4月30基准图像的差值。

3.4 冠层叶片生长异常程度分级

采用阈值法对植被指数差值进行分级,提取不同程度的异常区域。其中优于或与基准日期持平的状态为健康区域,而把相比基准日期叶部失色或叶部长势衰弱的区域分为轻度、中度和重度变化区域,分割阈值见表3。

4 结果与分析

4.1 红绿植被指数变化状况

正常情况下,森林植被在5~9月份的整个旺盛

表 3 异常程度分级表

Table 3 Classification of forest disturbance degree				
植被指数	健康	轻度	中度	重度
Δ RGRI	≤ 0.0	0-0.1	0.1-0.2	≥ 0.2
Δ RVI	≥ 0.0	0-0.1	-0.1-0.25	≤ -0.25

生长季,林分的叶青素含量较低,即植被呈现健康的绿色。通过时序遥感数据分析,相对于2019年4月30日的林分状态,红绿比值植被指数在5月9日和5月17日都没有异常反映,但在5月21日、5月29日和6月2日的一些林分中出现不同程度的增高,表明这些林分中树叶出现了泛黄(或红),应属异常现象。由表4可知峰值出现在6月上旬,具体空间分布情况见图2。

表 4 失色林分面积统计及其图斑的立地情况

Table 4 Area statistics of discoloration stands and site conditions(Units:hm ²)					
日期	轻度	中度	重度	所在小班数量/个	平均海拔/m
20190521	3.92	0.23	0.56	16	1 534.52
20190529	3.79	0.16	0.56	28	1 524.42
20190602	33.14	0.41	0.00	88	1 519.00
20191028	1 574.29	383.47	9.27	914	1 600.91

表4和图2展示了失色林木的空间分布情况。从时间序列来看,失色图斑所在小班数量逐渐增多,虽然具有海拔从高到低逐步蔓延趋势,但总体都在林场的低海拔区域(林场平均海拔1 615 m),坡向和坡位经分析后规律不甚明显。这些低海拔区域正好是4月下旬和5月初灌草和乔木最早生长的植被区域。而在10月28日的深秋季节,杨树、辽东栎、落叶松以及林下灌草等植被进入变色季节,大面积落叶植被叶片泛黄(或红)为正常物候变化引起,故深秋数据间接验证了红绿指数检测失色的可靠性。

4.2 比值植被指数变化状况

同理正常情况下森林植被在5~9月份的整个旺盛生长季,表征林分活力的叶生物量、叶面积指数、叶片水分含量等生物参数都会是增长或至少是持平状况。通过时序遥感数据分析,基于2019年4月30日的林分状态,比值植被指数在5月9日出现逆变化,结果见表5。不过之后所有时相的比值植被指数都高于4月30日或前一时相,所以可以认定5月9日的植被属生长异常状态。因为进入5月份后,乔木和林下植被快速生长,植被叶片的数量和

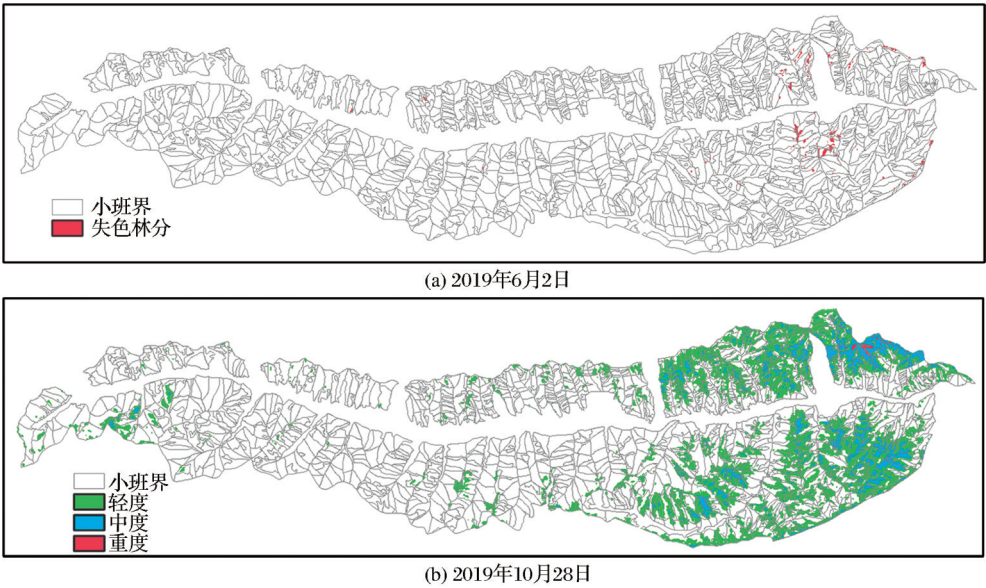


图 2 失色林分分布图

Fig.2 Spatial distribution map of discoloration stands

表 5 树叶生长退化林分面积统计及图斑立地情况

Table 5 Area statistics in growth degradation stands and site conditions(Units:hm²)

日 期	轻度	中度	重度	所在小班数量/个	平均海拔/m
20190509	693.32	431.74	29.01	992	1 641.39
20191028	1 291.62	1 633.32	2 569.41	1 373	1 610.22

活力都应该呈现明显增加态势,直至深秋林木基本停止生长,叶片活力才可能下降。

表 5 和图 3 展示了树叶生长退化(或树叶长势衰弱)林分的空间分布情况,其中 2019 年 5 月 9 日的退化图斑主要位于林场平均海拔之上的“高”海拔

地区,且以油松林为主。在 10 月 28 日的深秋季节,杨树、辽东栎、落叶松以及林下灌草等植被的叶片水分、鲜生物量等随物候变化会急剧下降,故也再次佐证了比值植被指数检测林木(或叶片)活力的可靠性。

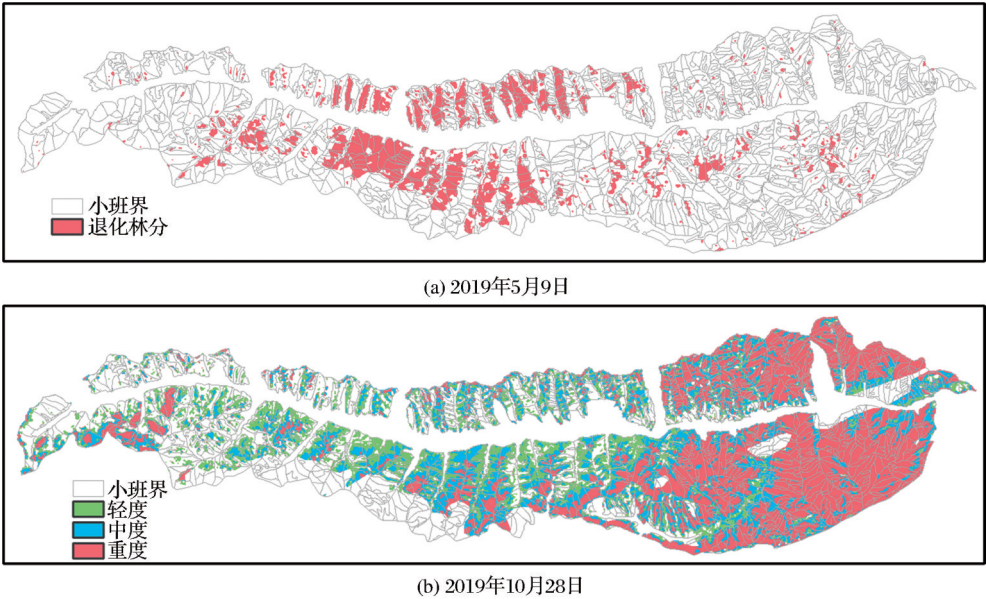


图 3 树叶生长退化林分分布图

Fig.3 Spatial distribution of growth degradation stands

4.3 树木失色或生长异常原因分析

根据前述的遥感监测结果,初步认定5月份该区域出现过相关灾害(特别是4月30日至5月9日期间),致使生长季树木叶片失色和叶片结构出现阶段性异常。于是2019年6月12日~15日对相关异常林分进行了实地验证与考察,目睹了变色的阔叶树,见图4。

虽然5月底时可能会有油松毛虫(*Dendrolimus tabulaeformis* Tsai et Liu)、松针小卷蛾(*Epinotia rubiginosana* Herrich-Schaffermuller)、华北落叶松鞘蛾(*Coleophora dahurica* Falkovitsh)、红脂大小蠹(*Dendroctonus valens*)、松六齿小蠹(*Ipsacuminatus* Gyllenhal)、纵坑切梢小蠹(*Tomicus Piniperda*)、微红梢斑螟(*Dioryctria rubella* Hampson)、松大蚜(*Cinara pinitabulaeformis* Zhang et Zhang)、绵山天幕毛虫(*Malacosoma rectifascia* Lajonquiere)、沙棘木蠹蛾(*Holcocerus hippophaecolus* (Hua, Chou, Fang et Chen))、红缘天牛(*Asias halodendri* Pallas)等的危害,但在初春时其寄主症状都不甚明显,于是收集了文水县4月下旬至6月上旬气温数据^[33],见图5。

由图5可知,2019年4月30日、5月12日和5月19日文水县(县城海拔740 m)经历3次倒春寒^[34],位于县城30 km以外、平均海拔1 615 m的林场最低气温降至0℃以下,致使辽东栎、山杨、白桦等当年新展树叶在5月下旬后出现枯萎变色(表4),而树木生长活力的逆变化(即树叶长势衰弱)只出现在5月上旬,表明5月中旬的低温对于已经旺盛生长的植被,至少从发展的角度看影响相对较小,或因为5月是植被的快速展叶期,长势健康叶片总数远超过受损叶片。进入深秋后,受物候影响,落叶松、阔叶树和林下植被开始变色或叶片停止生长,图6为层林尽染的初秋景观。

4.4 精度评估

由于6月中旬才到达现场,经过半个多月的生长已难以复原5月上旬的真实情况,因而对5月9日的逆生长(树叶长势衰弱)无法实施验证,故实验只对林分失色的遥感监测结果进行验证。主要运用2019年1月17日和6月9日的1 m融合影像,对所有监测结果(总计89个图斑)进行目视对比分析,虽然相比6月2日有一周的延迟,但仍应该能够基本反映当时的状况,部分对比图像见图7所示。



图4 油松林中的枯萎辽东栎与山坡上的失绿林分(摄于2019年6月14日)

Fig.4 Discoloration forest on June 14, 2019

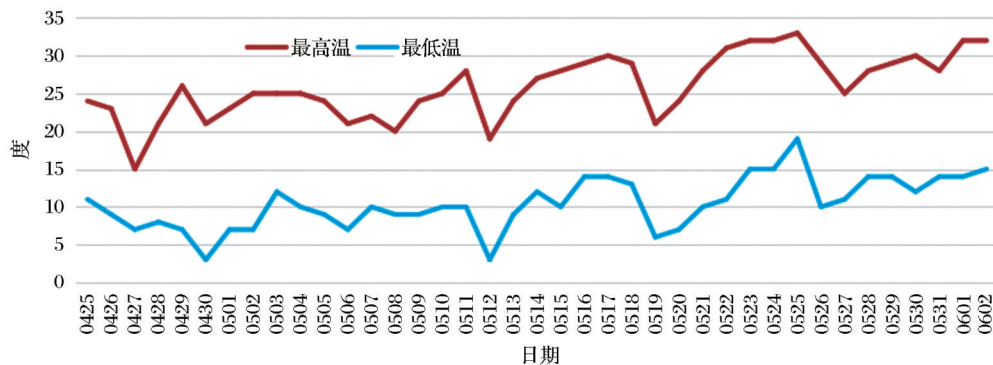


图5 文水县2019年4月25日~6月2日温度极值散点图

Fig.5 Temperature scatter diagram in Wenshui County between Apr. 25 to Jun. 2, 2019

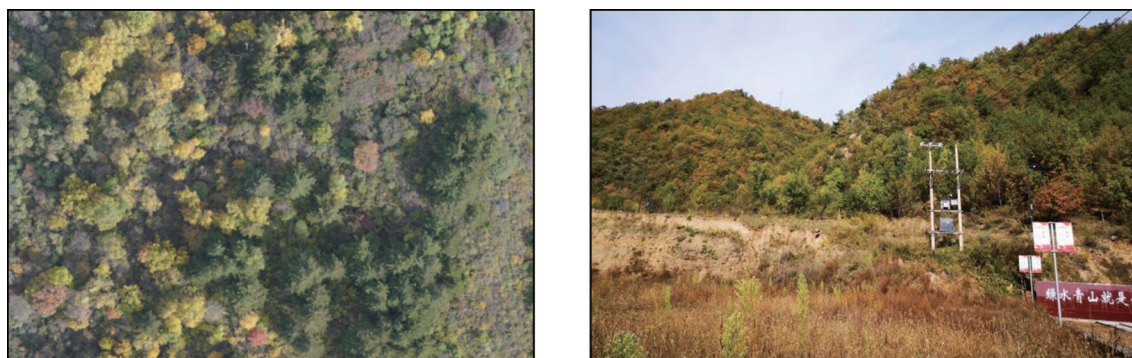


图6 2019年10月11日无人机遥感正摄影像(局部)和地面景观照片

Fig.6 Orthophoto image and Landscape photos on October 11, 2019



图7 GF-2 1 m 融合影像的对比和验证图

Fig.7 Comparison and verification in high resolution remote sensing images of GF-2

经对比分析后认为监测结果主要包括森林抚育木或病虫害清理木(边界清晰,采伐剩余物纹理明显,11个图斑)和活立木叶片变色两大类型,后者主要分布在混交林的阔叶树林窗、林缘和阔叶林中。

5 讨论

5.1 林分生长过程的高频次宏观精准监测时代来临

近些年来 10 m 级中等空间分辨率地球观测卫星数据实现了全球共享和开放,美国的陆地资源卫星数据、欧盟的“哨兵卫星”数据等一直是各国森林资源及其扰动监测的重要数据源,随着我国高分卫星数据的加入,又极大地提高了中等空间分辨率卫星遥感数据的时间分辨率和数据保障性,为实现旬、月度等高频次森林生长过程的准实时监测提供了可能。需要说明的是,用于表述生长状态的生物物理和生物化学参数的光谱波段位于可见光、近红

外和中红外区域,即必须采用光学遥感传感器来获取这些信息,但云及阴影等覆盖区无法获得有用数据,虽然覆盖范围大是航天遥感的重要优势,但实现无任何干扰的大范围、全覆盖、无遗漏、高频度的过程监测存在困难,好在影响森林生长的生物灾害多半呈区域性,局部的缺失对全局的分析影响较小。其次,我国森林资源一直沿用小班为最小单元的管理模式,遥感技术正在使管理粒度从粗放的十公顷级向公顷级或亚公顷级迈进,实现更为精准的管理。

5.2 时序遥感监测技术的应用服务离不开其他数据支持

森林植被受到外界干扰后对景观的影响有些是实时的,如食叶害虫导致的森林失叶、森林砍伐、森林火灾后的迹地等,致灾因子与危害表象几乎同步出现,属“物理变化”过程。但有些扰动类型的影

响其表象有滞后性,如蛀干害虫、病害、倒春寒、干旱等,这些因子的发生发展本身有个过程,植物响应也需要一定时间,是个“化学变化”过程。其次这些“物理和化学变化”都会有累积性,即其影响是长远的,如火烧迹地恢复是个漫长过程,它又会是次期性森林病虫害的孳生地。森林变化过程的这种实时性、延迟性、累积性等的多样性差异导致了其生态过程的复杂性和遥感监测结果笼统性的矛盾,无论如何致灾因子的分析离不开地面核查或其他数据的辅助支持。

5.3 森林失绿、失叶等的卫星遥感高频度动态监测能力可以服务于森林病虫害灾害预警

尽管病虫害、气象灾害、火灾、滥砍滥伐、森林抚育等都会造成林分平均叶面积指数、鲜生物量、叶绿素等的变化,它们也是遥感监测的因变量。其中火灾有着明确的边界和光谱响应特征,气象和抚育等森林干扰也容易采用相关辅助数据予以确认,唯独盗伐和病虫害等具有偶发、突发和爆发等特点,需要及时监测和预警,况且森林病虫害的地面调查也完全基于寄主症状特征,因此高频次时间序列的大范围、“全覆盖”(非云和阴影覆盖区)、准实时的森林生长亚健康状态卫星遥感监测可以为森林病虫害灾害的地面调查提供预警服务。

5.4 卫星遥感是构建天空地协同监测技术体系不可或缺的重要组成部分

林业“十三五”发展规划中明确指出要深化遥感、定位、通信(通导遥)技术的全面应用,构建天空地一体化监测预警评估体系,实时掌握全国生态资源状况及动态变化,及时发现和评估重大生态灾害、重大生态环境损害情况^[34]。特别是近些年来我国林业发展已经由生产木材为主向生态建设为主转变,由主要提供物质产品向主要为全社会提供优质生态产品、满足经济社会生态文化等多元需求转变,更加突显建立系统科学、准确、快捷的生态监测评价体系 and 标准,对推行生态政绩考核和生态损害责任追究制度提供科学依据的重要性。高时间分辨率(周、旬、月)的卫星遥感对地观测能力正初步形成,为森林动态变化(或扰动类型)监测预警提供了技术保障,助力建立“天空地”一体化的林草行业防灾减灾监测体系^[35]。

参考文献(References):

- [1] Liu Zengwen, Li Yasu. On the disturbance of forest[J]. Shanxi Forest Science and Technology, 1997(1): 28-32. [刘增文,李雅素.论森林干扰[J].陕西林业科技,1997(1):28-32.]
- [2] Yang Chen, Shen Runping. Progress in the study of forest disturbance by remote sensing[J]. Remote Sensing For Land & Resources, 2015, 27(1): 1-8. [杨辰,沈润萍.森林扰动遥感监测研究进展[J].国土资源遥感,2015,27(1):1-8.]
- [3] Reid J N. Remote sensing and forest damage[J]. Environmental Science & Technology, 1987, 21(5): 428-429.
- [4] Carmona-Moreno C, Belward A, Malingreau J P, et al. Characterizing interannual variations in global fire calendar using data from earth observing satellites[J]. Global Change Biology, 2005, (11): 1537-1555.
- [5] Tansey K, Grégoire J M, Stroppiana D, et al. Vegetation burning in the year 2000: global burned area estimates from spot vegetation data [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109: D14S03. DOI:10.1029/2003JD003598.
- [6] Simon M, Plummer S, Fierens F, et al. Burnt area detection at global scale using ATSR-2: the GLOBSCAR products and their qualification[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109: D14S02. DOI:10.1029/2003JD003622 Citations:142.
- [7] Plummer S, Arino O, Simon M, et al. Establishing a earth observation product service for the terrestrial carbon community: the globcarbon initiative [J]. Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change, 2006, 11(1): 97-111.
- [8] Tansey K, Grégoire J M, Defourny P, et al. A new, global, multi-annual (2000~2007) burnt area product at 1 km resolution[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35: L01401. DOI: 10.1029/2007GL031567.
- [9] Roy D, Jin Y, Lewis P, et al. Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time-series data[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 97: 137-162.
- [10] Giglio L, Randerson J T, Vanderwerf G R, et al. Assessing variability and long-term trends in burned area by merging multiple satellite fire products [J]. Biogeosciences, 2010, 7: 1171-1186.
- [11] Giglio L, Schroeder W, Justice C O. The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 178: 31-41.
- [12] Chuvieco E, Lizundia-Loiola J, Pettinari M L, et al. Generation and analysis of a new global burned area product based on MODIS 250 m reflectance bands and thermal anomalies [J]. Earth System Science Data, 2018, 10: 2015-2031.
- [13] Long T F, Zhang Z M, He G J, et al. 30 m Resolution global annual burned area mapping based on landsat images and google earth engine [J]. Remote Sensing, 2019, 11(5): 489. DOI:10.3390/rs11050489.
- [14] Meddens A J H, Hicke J A, Ferguson C A. Spatialtemporal patterns of observed bark beetle-caused tree mortality in british columbia and the western united states [J]. Ecological Applications, 2012, 22(7): 1876-1891.
- [15] Eidenshink J, Schwind B, Brewer K, et al. A project for mon-

- itoring trends in burn severity[J]. *Fire Ecology*, 2007, 3:3-21.
- [16] USDA Forest Service. Major forest insect and disease conditions in the united states; 2009 update[R]. Forest Health Protection, Washington, D.C., USA.2010.
- [17] Afforestation data [EB/OL]. (2015-01-01) [2020-03-20]. <http://www.cfsdc.org/search-data.html? id=0801>. [造林数据 [EB/OL]. (2015-01-01) [2020-03-20]. <http://www.cfsdc.org/search-data.html? id=0801>.]
- [18] Forest Fire Data [EB/OL]. (2015-01-01) [2020-03-20]. <http://www.cfsdc.org/search-data.html? id=0702>. [森林火灾数据 [EB/OL]. (2015-01-01) [2020-03-20]. <http://www.cfsdc.org/search-data.html? id=0702>.]
- [19] Forest Pest Data [EB/OL]. (2015-01-01) [2020-03-20]. <http://www.cfsdc.org/search-data.html? id=0701>. [林业有害生物数据 [EB/OL]. (2015-01-01) [2020-03-20]. <http://www.cfsdc.org/search-data.html? id=0701>.]
- [20] Curtis P G, Slay C M, Harris N L, *et al.* Classifying drivers of global forest loss[J]. *Science*. 361(6407):1108-1111.
- [21] Huo L Z, Boschetti I, Sparks A M. Object-based classification of forest disturbance types in the conterminous united states [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11: 477. DOI: 10.3390/rs11050477.
- [22] Senf C, Seidl R, Hostert P. Remote sensing of forest insect disturbances: current state and future directions [J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2017, 60:49-60.
- [23] Hu Shengyuan, Pang Yong, Meng Shili, *et al.* Annual forest disturbance detection using time series Landsat 8 OLI data[J]. *Forest Research*, 2020, 33(6): 65-72. [胡圣元, 庞勇, 蒙诗砾, 等. 时间序列 Landsat 8 OLI 数据森林年扰动检测[J]. *林业科学研究*, 2020, 33(6): 65-72.]
- [24] Yin Qidong, Liu Caixia, Tian Ye. Detecting dynamics of vegetation disturbance in forest natural reserve using Landsat imagery and LandTrendr algorithm: the case of Chaisong and Taibaishan Natural Reserves in Shaanxi, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(20): 7343-7352. [殷崎栋, 柳彩霞, 田野. 基于 Landsat 时序影像和 LandTrendr 算法的森林保护区植被扰动研究——以陕西柴松和太白山保护区为例[J]. *生态学报*, 2020, 40(20): 7343-7352.]
- [25] Ye S, Rogan J, Zhu Z, *et al.* A near-real-time approach for monitoring forest disturbance using Landsat time series: stochastic continuous change detection [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 252:112167.
- [26] Wu Honggan, Wang Han, Chang Yuanfei, *et al.* Monitoring system construction of dead pine through synergy observation of spaceborne, airborne, and ground remote sensing[J]. *Forest Pest and Disease*, 2020(3): 35-39. [武红敢, 王晗, 常原飞, 等. 当议枯死松树的天空地协同监测技术体系建设[J]. *中国森林病虫害*, 2020(3): 35-39.]
- [27] Notice of the State Forestry Administration. Notice of the State Forestry Administration on the task of “Four Rate” index for the prevention and control of forest pests during the “13th Five Year Plan” [EB/OL]. (2016-05-12) [2020-03-20]. <http://www.forestry.gov.cn/main/4818/content-872152.html>. [国家林业局. 国家林业局关于下达“十三五”林业有害生物防治工作“四率”指标任务的通知 [EB/OL]. (2016-05-12) [2020-03-20]. <http://www.forestry.gov.cn/main/4818/content-872152.html>.]
- [28] Xu Hang. Problems and countermeasures in forest pest control [J]. *East China Science & Technology*, 2015(8): 145-145. [许航. 浅谈森林病虫害防治工作中存在的问题及对策[J]. *华东科技*, 2015(8): 145-145.]
- [29] China National Space Administration. CNSA-GEO Data Sharing Platform and Data Policy Released by China National Space Administration [EB/OL]. (2019-11-06) [2020-03-20]. <http://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758838/c6808018/content.html>. [中国国家航天局. 中国国家航天局发布 CNSA-GEO 数据共享平台和数据政策 [EB/OL]. (2019-11-06) [2020-03-20]. <http://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758838/c6808018/content.html>.]
- [30] Guo Ni. Vegetation index and its advances [J]. *Arid Meteorology*, 2003, 21(4): 71-75. [郭妮. 植被指数及其研究进展[J]. *干旱气象*, 2003, 21(4): 71-75.]
- [31] Tian Qingjiu, Min Xiangjun. Advances in study on vegetation indices [J]. *Advance in Earth Sciences*, 1998, 13(4): 327-33. [田庆久, 闵祥军. 植被指数研究进展[J]. *地球科学进展*, 1998, 13(4): 327-333.]
- [32] Gamon J A, Surfus J S. Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer [J]. *New Phytologist*. 1999, 143(1): 105-117.
- [33] Historical Weather of Wenshui County [EB/OL]. (2019-06-11) [2020-02-24]. http://tianqi.2345.com/wea_history/60619.htm#. [文水县历史天气 [EB/OL]. (2019-06-11) [2020-02-24]. http://tianqi.2345.com/wea_history/60619.html.]
- [34] Notice of the State Forestry Administration. Notice of the State Forestry Administration on Issuing the “13th Five-Year plan” for forestry development [EB/OL]. (2016-05-25) [2020-03-20]. <http://www.forestry.gov.cn/main/58/content-875013.html>. [国家林业局. 国家林业局关于印发《林业发展“十三五”规划》的通知 [EB/OL]. (2016-05-25) [2020-03-20]. <http://www.forestry.gov.cn/main/58/content-875013.html>.]
- [35] Notice of the State Forestry Administration. National Forestry and Grass Administration and China Tower will jointly build a disaster prevention and mitigation monitoring system for forestry and grass [EB/OL]. (2020-05-12) [2020-05-15]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-05/12/content_5511072.htm. [国家林业局. 国家林草局与中国铁塔将共建林草行业防灾减灾监测体系 [EB/OL]. (2020-05-12) [2020-05-15]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-05/12/content_5511072.htm.]

Study on Early Warning Technology of Sub-health State of Forest Resources with Spaceborne Remote Sensing

Wu Honggan^{1,2}, Wang Chengbo³, Miao Zhenwang⁴, Wang Wenquan^{1,2},
Wang Xiaoli⁴, Mi Guobing⁵

(1.*Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;*

2.*Laboratory of Forestry Remote Sensing and Information System, NFGA, Beijing 100091, China;*

3.*Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

4.*Forestry and Grassland Pest Control and Quarantine Bureau of Shanxi Province, Taiyuan 300024, China;*

5.*Erdaochuan Forest Farm of Guandishan state Forestry Administration, Wenshui 032199, China)*

Abstract: Monitoring and early warning of sub-healthy forests caused by forest diseases and insect pests and other disturbance types can not be carried out in time, resulting in a passive situation (disaster-relief /post-disaster) for a long time. Based on the multi-temporal GF-1 WFV data from May to September 2019, this paper uses the ratio vegetation index and the red-green vegetation index to monitor "disaster" information such as reverse growth, leaf canopy stress or loss of color in quasi-real time. The results show that although the degradation of chlorophyll such as withering and wilting of tree leaves and gradually transforming into lutein and red leaf pigment requires a certain process, or the "disaster symptoms" sometimes have a lag, but the high frequency remote sensing dynamic monitoring results are useful for guiding the ground inspection of forest disasters. It has a positive effect on improving monitoring coverage and scientificity, and preventing large-scale disasters. The high revisit cycle of domestic GF-1 and GF-6 WFV remote sensing data provides a solid data guarantee for the monthly monitoring of the growth process of forest resources, and meets the needs of hectare-level leaf growth and degradation early warning monitoring.

Key words: GF-1 WFV; Forest resources; Sub-health state; Forest pests and diseases; Early warning