

文章编号:1001—7380(2022)03—0022—06

无人机多光谱遥感技术监测 松材线虫病疫木研究

张林燕¹, 徐丽丽², 李 莉¹, 刘云鹏^{2*}

(1. 溧阳市林业站, 江苏 溧阳 213300; 2. 江苏省林业科学研究院, 江苏 南京 211153)

摘要:为探索无人机多光谱遥感技术监测大面积松材线虫病疫木的可能性和精度,该研究利用多旋翼无人机加载6通道多光谱相机,获取了典型松材线虫病疫区遥感图像,进而通过波段配准、拼接、辐射定标处理获得试验区的正射全景影像,并以此对试验区病死树进行识别和定位分析。结果显示:本次航拍试验区共有松材线虫病死树83株。通过对识别出的病死树分布位置 and 对应坐标的实地验证表明,本次航拍监测的准确率为95.2%,平均坐标精度为2.6 m,漏检率为9.8%,能够满足大面积松材线虫病监测工作应用需求。

关键词:松材线虫病;多旋翼无人机;遥感监测;准确率

中图分类号:S763.712.48;TP212.14;TP732;TP75 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-7380.2022.03.004

Application of UAV multis-pectral remote sensing technology in monitoring dead trees of pine wilt disease (PWD)

Zhang Linyan¹, Xu lili², Li Li¹, Liu Yunpeng^{2*}

(1. Liyang Forestry Station, Liyang 213300, China; 2. Jiangsu Academy of Forestry, Nanjing 211153, China)

Abstract: To explore the application possibility and precision of UAV multi-spectral remote sensing technology in monitoring large-scale pine wood suffered in pine wilt disease (PWD), we used a multi-rotor UAV with a 6-channel multi-spectral camera to obtain the remote sensing image of the typical symptom areas of PWD, and the orthophoto panoramic image of this area was obtained through band registration, splicing and radiometric calibration. The diseased tree in the experimental area was identified and located by means of system automatic identification and manual correction. The results showed that 83 diseased trees suffered by PWD were identified in the aerial photography test area, and their distribution map and coordinate points also succeeded in obtaining. The field verification showed that the monitoring accuracy was 95.2%, the coordinate point accuracy was 2.6 m while the missed detection rate was 9.8%, which basically meets the needs of large-scale monitoring PWD.

Key words: Pine wilt disease (PWD); Multi-rotor UAV; Remote Sensing Monitoring Technology; Accuracy

松材线虫病是一种对松林资源具有毁灭性危害的森林病害,也是我国一级危害性林业有害生物,有着松树“癌症”的称号^[1]。截至2022年,我国松材线虫病疫情已扩散到全国19个省(市)731个县级行政区(县),最西端已扩散至四川凉山,最北

端到达辽宁抚顺,在庐山、黄山、九华山等国家级风景名胜区和生态保护区也有入侵,防控形势依然严峻。监测预警是做好松材线虫病防控的基础和关键。目前,松材线虫病的监测主要还是依靠人工林间踏查为主。但是受地形地势、林间杂灌等影响,

收稿日期:2022-04-07;修回日期:2022-04-28

基金项目:江苏省林业科技创新与推广项目“无人机多光谱遥感在松材线虫病疫情监测中的应用与示范”(LYKJ[2020]10);中央财政林业科技推广示范资金项目“松材线虫病遥感监测与分类治理技术集成示范”(苏[2021]TG05)

作者简介:张林燕(1982-),女,山东聊城人,工程师,硕士。主要从事林业有害生物防治和植物检疫等工作。

***通信作者:**刘云鹏(1978-),男,安徽宿州人,副研究员,硕士。主要从事农林病虫害防治技术研究和推广工作。

人工踏查难以做到全面普查,特别是在林分茂密、人员无法到达的区域踏查尤为困难,迫切需要适宜大面积疫情监测的技术和装备,能够全面、精确掌握疫情分布和发生动态。松树感染松材线虫病后,针叶会出现由绿转黄褐色,严重后转变为红褐色的典型症状,并在其光谱特征中有所体现,这为遥感监测技术的应用提供了理论基础^[2-8]。

近年来,基于高分系列、资源系列和环境系列等遥感卫星获得数据源的林业有害生物监测研究已有很多。然而,受空间分辨率、大气云层和运行周期的影响,卫星遥感在获取松材线虫病的高精度遥感影像方面依然有较大局限。无人机遥感具有机动灵活、实时性强等优点,能够较好地解决人工踏查效率低、卫星遥感分辨率差和重访周期固定等问题。目前,国内外关于松材线虫病遥感监测的原理、图像处理和解译算法方面的研究很多^[9-11],但面向生产的应用研究和大面积推广还处于起步阶段。

本研究从完善松材线虫病无人机遥感监测应用流程出发,利用小型多旋翼无人机加载6通道多光谱相机,大范围采集松材线虫病典型疫区低空航摄影像,进而利用专业软件对获取的影像进行配准、拼接、辐射定标,最终得到一张多光谱全景影像。再将多光谱反射率影像导入Yusense Map+软件进行分析,对松材线虫病死树进行识别和定位,获取其分布图及坐标数据,并通过人工林间踏查验证。研究结果可为大面积松材线虫病疫情遥感监测和流行动态研究、防控效果评价和灾害损失评估提供参考。

1 试验区概况

试验区位于江苏省溧阳市(E119.13—119.62°,N31.15—31.67°),地处苏浙皖3省交界,境内南部和西北部多为低山丘陵区,陡坡岗地众多;腹地自西向东地势平坦,以平原圩区为主,是江苏松材线虫病的典型疫区之一。其幅员面积1 535 km²,林业用地27 735.8 hm²,林木覆盖率31.6%。针叶林面积9 376.3 hm²,主要以马尾松和黑松为主,并伴有部分香樟、麻栎、枫香树、山胡椒等阔叶树种。自1995年发生松材线虫病危害以来,受害面积超2 400 hm²,累计病死松树超30万株。近年来,通过实施综合治理工程,疫情总体得到有效遏制,病死树率维持在3%以下。然而,由于病死树分布零散,林下杂灌众多,通行不便,大面积的病

死树人工监测一直是工作难点。

2 材料与方法

2.1 试验地点

试验样地位于溧阳市天目湖镇十里长山,其松林总面积210.8 hm²,其4角经纬度分别为:西北角E 119.41°,N 31.37°、东北角E 119.41°,N 31.38°、东南角E 119.42°,N 31.36°和西南角E 119.41°,N 31.36°。

2.2 航摄装备

选用DJI M300 RTK多旋翼无人机,其最大续航时间55 min,悬停精度±0.5 m,最大飞行限制风速15 m/s,适配可见光相机、多光谱相机等多种云台相机。飞行器内置RTK模块,可实现高精度准确定位。遥感信息采集运用长光禹辰的MS600 PRO多光谱相机,包含允许用户在400—900 nm范围内预设的17种波长任选6种组配摄像通道,单通道120万像素,12 bit数字量化位深,捕获速率≥1s,精度15 cm。本研究参考国内外松材线虫病光谱特征分析,选择450,555,660,720,750,840 nm等6个光谱通道作为航拍参数。

2.3 航摄环境条件及实施情况

无人机航摄时间为2021年11月3日,气温为9—14℃,晴,风速1—3级,无持续风向,空气质量良好;飞行时段为10:00—14:00。由于飞行区域总面积较大,为保证起伏地形下的数据拼接兼容性,航摄高度为200 m,航速7 m/s,航向重叠度80%以上,旁向重叠度70%以上。每个架次起飞前和降落后分布进行灰板拍摄,便于后期对不同时段影像的配准和定标。

2.4 航摄影像预处理

航摄图像数据采集之后,采用Yusense Map航空遥感预处理软件[长光禹辰信息技术与装备(青岛)有限公司提供]对原始多光谱数据进行预处理。通过影像内置GPS新建工程,选择5—10张具有代表性图像,在相机参数设置中实现空中三角测量、自动转点等工作最终输出虚拟相机参数。通过生成的虚拟相机参数将波段配准、概略DSM、单片正射影像、镶嵌正射影像、拼接、辐射定标,最终得到具有真实地面反射率的多光谱遥感影像。

2.5 无人机航摄影像分析及解译

将遥感影像导入Yusense Map+系统进行影像分析;系统分析算法主要基于病死树的典型光谱特

性构建,并采用监督分类方法进行。系统识别之前人工辅助选取多处典型的松材线虫病病死树影像,作为病死树光谱数据样本进行深度学习,再通过软件进行自动识别和定位,最后对分析结果进行目视检验校正,增删明显误提、漏提的点,确保提取结果的准确度。

2.6 识别及定位精度验证

为验证松材线虫病病死树识别正确率及定位的精度,将 Yusesense Map+软件中的病死树 GPS 坐标文件导入林调通或 GPS 定位设备,再通过人工现场核查的方式对相关监测数据点位和属性进行验证,计算识别正确率。同时,测定被识别的病死树实际位置与系统提取的坐标点位置之间距离,检查自动化识别的定位精度。最后对试验区疫木进行人工

拉网式彻底清理,统计清理株数,计算漏检率。

3 结果与分析

3.1 航摄数据采集及拼接

本次航摄采集了试验区 450, 555, 660, 720, 750, 840 nm 等 6 个波段的多光谱图像,经校正、拼接、配准、融合处理,获得试验区的全景正射图像和归一化植被指数(NDVI)图像(如图 1),覆盖区域面积为 210.8 hm²。将全景正射图像部分区域进行放大观察和影像信息显示,表明航拍数据质量和精度较好无明显的重影或扭曲现象,地面精度达 15 cm,目视情况下能够分辨出典型的病枯死松树单株(见图 2)。

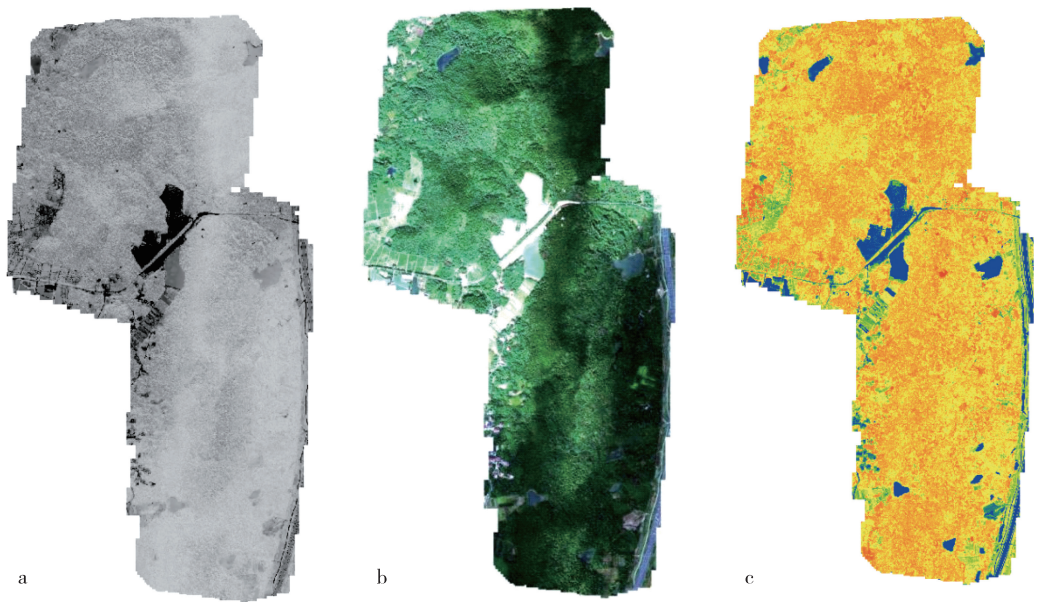


图 1 拼接获得的多光谱图像(a)、彩色全景图相(b)和 NDVI 伪彩图像(c)

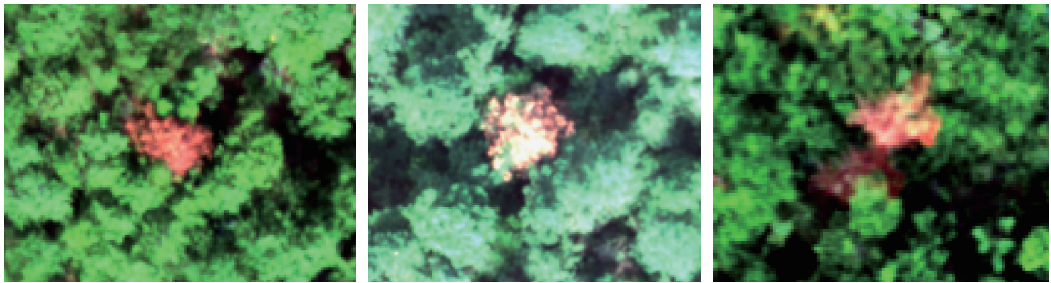


图 2 航摄精度(15 cm)效果图像

3.2 无人机航摄影像解译结果

利用 Yusesense Map+软件的松材线虫病病死树

识别与定位模块,对本次航摄图像中的病枯死树进行自动化识别和定位,并结合目测校正,共识别出

病死松树 83 株,病死树冠幅总面积约 315.78 m²。同时,还获得了所有病死树坐标点 GPS 坐标,其分布标示图如图 3。



图3 枯死松树分布标示

3.3 识别的正确率及定位精度验证

将获取的 83 株病死树 GPS 坐标导入林调通,并按照图示位置人工进入林区寻找对应坐标点上的病死树,测量树种和与系统定位坐标的距离。结果显示,根据图像识别的 83 株病死树,实地调查确认有 79 株为死亡松树,1 株为秋季彩叶乌桕,2 株为山胡椒,1 株为死亡杉木,识别精度为 95.2% (见表 1)。根据系统提取的位置信息与 GPS 实测位置信息比对,病死树坐标点位置的平均水平误差为 2.6 m,其中最大水平误差为 6 m,最小为 0.5 m。11 月底,对航拍试验区的病死树进行全面清理,共清理病死树 92 株,较航拍图像分析获得的 83 株有所增加。按此计算本次遥感监测漏检率为 9.8%。造成漏检的主要原因是有一部分枯死树为航拍后至清理前 1 个月内新增的病死木,大部分为林下被压木或针叶脱落比较严重的早期枯死木。总体而言,基于多旋翼无人机+多光谱遥感的松材线虫病病死木分析精度和定位精准度可以用于疫情监测和病死树清理定位参考。

4 结论与讨论

多光谱遥感是基于多个特定光谱波长的图像数据采集,因此,相对可见光遥感图像所获得的信息更丰富,特别是对松材线虫病这种感病后针叶颜色有显著光谱反射变化的情况,使大面积、快速监测成为可能。

多光谱遥感信息获取途径主要有卫星遥感、航拍多光谱遥感 2 种。1972 年美国成功发射了世界上第一颗地球资源卫星 (Landsat),开创了利用卫星遥感影像进行病虫害监测的新篇章^[12]。基于 Landsat TM,ETM+等卫星遥感影像,监测山松甲虫、松材线虫病等侵害已有大量研究,监测精度能够达到 67%—85%不等^[13-15]。然而,目前的多光谱卫星遥感影像分辨率大多在米级,对于连片的、大面积的灾害监测有优势,但对于松材线虫病这种病死树分布较为分散的单株识别,其相对精度仍然偏低。此外,松材线虫病在我国多分布于山区,山体阴影和大气云层对卫星遥感影像的拼接、融合和解译分析有较大影响^[16]。而航拍遥感作为一种低空遥感监测,在数据获取过程中受云层影响较小,且具有作业灵活性、时空分辨率较高等优势。特别是近年来,随着无人机和高精度遥感拍摄设备和技术水平的快速发展,无人机遥感图像的质量和所包含信息量都得到显著提升。武红敢等^[17]利用固定翼无人机遥感(航高 450 m)在重庆市沙坪坝区对松材线虫病监测应用,监测准确率为 94%,定位精度在 10 m 以内。黄焕华等^[18]利用固定翼无人机搭载可见光相机和多光谱相机,以 450 m 航高,采集了广东省部分松材线虫病疫点的遥感影像,分析获得了区域内病死树的数量和 GPS 坐标,验证监测准确率达到 80%,GPS 坐标点位置精度为 2—3 m。本研究利用大疆 DJI M300 RTK 多旋翼无人机搭载 6 通道多光谱相机获取率溧阳市天目湖镇典型松材线虫病疫区的低空遥感影像,病死树识别精度达到 95.2%,坐标点位置的水平误差为 2.6 m,漏检率低于 10%。相比较而言,本次试验的病死树识别精度、漏检率、坐标水平误差均有所改善,一方面得益于大疆 DJI M300 RTK 多旋翼无人机的飞控平台稳定性,另一方面也得益于多旋翼无人机的航高(200 m)相对固定翼更低,成像分辨率更高的优势。

表 1 无人机多光谱遥感监测病死树识别与定位验证统计

编号	经度/°	纬度/°	识别验证	定位误差/m	编号	经度/°	纬度/°	识别验证	定位误差/m
1	31.383 101	119.414 002	病死树	2.3	43	31.372 500	119.418 999	病死树	3.0
2	31.381 201	119.415 001	病死树	2.5	44	31.372 500	119.417 999	病死树	3.2
3	31.381 100	119.413 002	病死树	0.3	45	31.372 601	119.418 999	病死树	0.4
4	31.380 600	119.415 001	病死树	0.5	46	31.374 001	119.418 999	病死树	1.6
5	31.380 100	119.415 001	病死树	0.5	47	31.374 600	119.418 999	病死树	3.5
6	31.379 299	119.417 999	病死树	1.8	48	31.371 800	119.418 999	病死树	1.9
7	31.378 700	119.414 002	病死树	1.6	49	31.370 800	119.418 999	病死树	2.2
8	31.378 000	119.417 999	病死树	3.2	50	31.370 600	119.418 999	病死树	2.5
9	31.377 100	119.418 999	病死树	3.0	51	31.370 001	119.418 999	病死树	3.2
10	31.377 001	119.418 999	病死树	1.7	52	31.369 801	119.420 998	病死树	1.4
11	31.376 900	119.414 002	病死树	2.1	53	31.369 400	119.419 998	病死树	2.4
12	31.376 499	119.418 999	病死树	1.5	54	31.369 700	119.420 998	病死树	5.6
13	31.374 100	119.414 002	病死树	1.8	55	31.370 100	119.419 998	病死树	2.7
14	31.374 001	119.414 002	病死树	1.6	56	31.367 901	119.419 998	病死树	0.5
15	31.374 901	119.413 002	病死树	1.9	57	31.368 000	119.419 998	病死树	3.9
16	31.376 101	119.413 002	病死树	2.1	58	31.368 900	119.417 999	病死树	1.6
17	31.383 301	119.417 000	乌桕	0.9	59	31.367 600	119.417 000	病死树	3.2
18	31.382 799	119.417 000	病死树	1.7	60	31.368 300	119.418 999	病死树	3.0
19	31.383 101	119.415 001	病死树	2.2	61	31.369 301	119.420 998	山胡椒	1.7
20	31.382 999	119.414 002	病死树	2.5	62	31.369 600	119.420 998	病死树	2.1
21	31.379 000	119.416 000	病死树	3.2	63	31.367 300	119.419 998	病死树	6.0
22	31.377 100	119.416 000	病死树	1.4	64	31.366 100	119.417 999	病死树	2.6
23	31.380 501	119.417 000	病死树	2.4	65	31.366 900	119.418 999	病死树	5.3
24	31.382 700	119.419 998	病死树	2.6	66	31.362 801	119.419 998	病死树	2.6
25	31.383 600	119.417 999	病死树	2.7	67	31.365 601	119.418 999	病死树	5.1
26	31.382 900	119.420 998	病死树	2.4	68	31.369 900	119.419 998	病死树	3.8
27	31.379 101	119.417 000	山胡椒	1.9	69	31.365 900	119.421 997	死杉木	2.5
28	31.379 101	119.417 999	病死树	1.7	70	31.366 100	119.419 998	病死树	3.4
29	31.379 101	119.417 999	病死树	1.8	71	31.375 099	119.415 001	病死树	2.1
30	31.375 700	119.420 998	病死树	1.9	72	31.376 301	119.414 002	病死树	3.0
31	31.375 200	119.418 999	病死树	2.1	73	31.376 499	119.414 002	病死树	3.2
32	31.375 200	119.418 999	病死树	2.6	74	31.377 899	119.417 000	病死树	0.5
33	31.375 099	119.418 999	病死树	6.0	75	31.378 401	119.420 998	病死树	2.9
34	31.375 300	119.418 999	病死树	5.6	76	31.380 699	119.419 998	病死树	1.6
35	31.374 800	119.419 998	病死树	5.3	77	31.380 199	119.418 999	病死树	3.3
36	31.374 701	119.419 998	病死树	2.6	78	31.382 500	119.415 001	病死树	2.4
37	31.374 600	119.419 998	病死树	5.1	79	31.382 401	119.415 001	病死树	2.3
38	31.372 299	119.422 997	病死树	4.8	80	31.382 000	119.417 000	病死树	2.7
39	31.372 900	119.421 997	病死树	3.5	81	31.382 099	119.417 000	病死树	3.0
40	31.372 400	119.421 997	病死树	2.5	82	31.370 199	119.420 998	病死树	2.2
41	31.372 900	119.420 998	病死树	4.4	83	31.363 899	119.420 998	病死树	1.6
42	31.372 801	119.417 999	病死树	2.1					

松材线虫病的遥感监测中,影像的解译方法对最终病死树的识别精度也有至关重要的作用。目前,松材线虫病的无人机遥感图像解译主要依靠人工目视或人机结合的方式进行判读,这种方式对判读人员专业技术要求很高,存在主观性强、效率低的弊端,难以满足大面积快速识别、判读的应用需求。本研究采用的Yusense Map+软件,配置专门的松材线虫病病死树识别和定位功能模块,可以实现系统自动识别和定位。但在操作过程中也发现,基于系统的自动识别,存在将裸地错误识别、提取为变色病死树,或将非典型变色病死树遗漏的现象,尚需人工辅助对上述明显的误提、漏提加以纠正,才能得到相对较为精准的病死树识别结果。

因此,实现无人机遥感在松材线虫病监测中的大面积推广应用,尚需进一步优化解译算法,提高系统自动识别精度。重点可以从以下几个方面加以改进:一是积累更加丰富的变色病死树样本数据库,提高系统自动识别过程中的比对成功率;二是有针对性地增加松树与其他地面地物、不同场景下的试验区分析实验,增强不同环境下的影像解译算法的鲁棒性;三是进一步规范无人机遥感监测作业流程和要求,如航高、航速、航向重叠率等参数设置,遥感影像采集季节、航拍时间节点等,提高航摄影像的质量。此外,专业的飞手也是必不可少,只有飞手对飞行参数的科学合理的规划、设计和操控,才能确保获得高质量的遥感数据。

参考文献:

- [1] 叶建仁.松材线虫病在中国的流行现状、防治技术与对策分析[J].林业科学,2019,55(9):1-10.
- [2] 杜华强,葛宏立,范文义,等.马尾松针叶光谱特征与其叶绿素含量间关系研究[J].光谱学与光谱分析,2009,29(11):3033-3037.
- [3] 马菁,张晓丽,刘维,等.松材线虫病对马尾松蒸腾速率和光谱特征的影响[J].东北林业大学学报,2013,41(11):115-117.
- [4] 张素兰,覃菊,唐晓东,等.松材线虫危害下马尾松光谱特征与估测模型研究[J].光谱学与光谱分析,2019,39(3):865-871.
- [5] 黄明祥,龚建华,李顺,等.松材线虫病害高光谱时序与敏感特征研究[J].遥感技术与应用,2012,27(6):954-960.
- [6] 马跃,吕全,赵相涛,等.接种不同浓度松材线虫的黑松光谱学特征分析[J].山东农业科学,2012,44(11):12-16.
- [7] 刘宁,张晓丽,王书涵,等.基于蒸腾速率与光谱特征的松材线虫病预测[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(6):129-135.
- [8] 王震,张晓丽,安树杰.松材线虫病危害的马尾松林木光谱特征分析[J].遥感技术与应用,2007,22(3):367-370.
- [9] SAARI H, PELLIKKA I, PESONEN L, et al. Unmanned aerial vehicle (UAV) operated spectral camera system for forest and agriculture applications[C]//Conference on Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIII/18th International Symposium On Remote Sensing, Prague, Czech Republic, 2011: 19-21.
- [10] 黄宝华.无人机搭载多光谱相机监测松材线虫病的研究[J].广西林业科学,2020,49,193(3):74-78.
- [11] 曾全,孙华富,杨远亮,等.无人机监测松材线虫病的精度比较[J].四川林业科技,2019,40(3):92-95.
- [12] 李华玉,陈永富,陈巧,等.基于遥感技术的森林树种识别研究进展[J].西北林学院学报,2021,36(6):220-229.
- [13] WULDER M A, WHITE J C, COOPS N C, et al. A procedure for mapping and monitoring mountain pine beetle red attack forest damage using Landsat imagery[R]. Victoria, British Columbia: Natural Resources Canada, Canadian Forest Service (CFS), Pacific Forestry Centre. 2006:1-28.
- [14] MEDDENS A J, HICKE J A, VIERLING L A, et al. Evaluating methods to detect bark beetle-caused tree mortality using single-date and multi-date Landsat imagery[J].Remote Sensing of Environment, 2013,132:49-58.
- [15] SKAKUN R S, WULDER M A, FRANKLIN S E. Sensitivity of the thematic mapper enhanced wetness difference index to detect mountain pine beetle red-attack damage [J].Remote Sensing of Environment, 2003,86(4):433-443.
- [16] 段四波,阎广建.山区遥感图像地形校正模型研究综述[J].北京师范大学学报(自然科学版),2007,43(3):362-366.
- [17] 武红敢,牟晓伟,杨清钰,等.无人机遥感技术在重庆市沙坪坝区松材线虫病监测中的应用[J].林业资源管理,2019(2):109-115.
- [18] 黄焕华,马晓航,黄华毅,等.利用固定翼无人机监测松材线虫病疫点枯死松树的初步研究[J].环境昆虫学报,2018,40(2):306-313.