陆地生态系统碳监测卫星松材线虫病变色木识别指数研究

焦全军[1],郑焰锋[2],黄文江[1,3],张　兵[1,3],张鹤译[2],史宜梦[2],吴发云[2],付安民[2]
(1. 中国科学院空天信息创新研究院数字地球重点实验室, 北京 100094; 2. 国家林业和草原局林草调查规划院, 北京 100714; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要:松材线虫病是一种严重威胁松树生存的林业有害生物疫情。高分辨率卫星遥感技术是松材线虫病变色松木识别的有效手段。通过研究植被指数阈值法, 利用 2022 年 8 月 4 日发射的陆地生态系统碳监测卫星(句芒号)优于 2 m 高分辨率 4 谱段相机的特点, 开展基于指数的松材线虫病木识别示范, 验证该卫星松材线虫病监测应用能力。基于松材线虫染病松木光谱特征, 提出基于与生物量和色素相关的双指数识别策略, 设计了松材线虫病指数(PWDI), 并在山东省栖霞市疫区进行句芒号松材线虫病识别测试。结果表明, 双指数识别策略相比单指数策略性能更优, 其中 PWDI 与 NDVI 组合的松材线虫病变色松木识别能力最强, 总体精度达到 84.5%, NWI—NDVI, NGRDI—NDVI 组合次之。在单指数策略下, PWDI 的识别性仍能优于其他 5 个测试植被指数。研究表明, 句芒号卫星具有可靠识别松材线虫病变色松木的良好潜力, 松材线虫病变色松木双指数识别策略及新的识别指数 PWDI 可为其他类似卫星的松材线虫病监测提供借鉴。

关键词:松材线虫病;遥感;陆地生态系统碳监测卫星;句芒号;植被指数
中图分类号:S763;S771.8　**文献标识码**:A　**文章编号**:1002-6622(2023)04-0123-09
DOI:10.13466/j.cnki.lyzygl.2023.04.015

Detection of Discolored Trees Caused by Pine Wilt Disease Based on Vegetation Index Method Using Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite Data

JIAO Quanjun[1], ZHENG Yanfeng[2], HUANG Wenjiang[1,3], ZHANG Bing[1,3], ZHANG Heyi[2], SHI Yimeng[2], WU Fayun[2], FU Anmin[2]
(1. *Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100094, *China*; 2. *Academy of Forest Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration, Beijing* 100714, *China*; 3. *College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: Pine wilt disease(PWD) is a forestry pest epidemic that poses a major threat to the survival ofpine trees. High-resolution satellite remote sensing is an effective approach for identifying PWD-infected pine trees. The Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite(Goumang Satellite), which was launched

收稿日期:2023-06-29;**修回日期**:2023-07-28
基金项目:国家重点研发计划课题"产品真实性检验和综合应用示范研究"(2022YFB3903305);国家自然科学基金项目"基于塔基光谱自动观测的叶片叶绿素含量遥感反演研究"(42071330);国家自然科学基金项目"复杂观测场景下松材线虫病疫木卫星遥感识别研究"(42201355)
作者简介:焦全军(1981-),男,河南巩义人,副研究员,主要研究方向:植被定量遥感与应用。
Email:jiaoqj@radi.ac.cn
通讯作者:郑焰锋(1978-),男,吉林农安人,高级工程师,主要研究方向:林草生态监测、林业信息化等。
Email:zhyanfeng2005@126.com

on August 4,2022,has a four-band camera with a spatial resolution of more than 2m. The purpose of this paper is to investigate the vegetation index(VI) threshold approach for demonstrating PWD detection using Goumang Satellite multispectral data. Based on the multispectral characteristics of PWD discolored pine trees,an identification strategy based on two biomass-related and pigment-related VIs is proposed and a pine wilt disease index(PWDI) is designed. A test of PWD identification was conducted in Qixia City, Shandong Province. The results demonstrated that the double-VIs identification method outperformed the single-VI strategy,with the combination of PWDI and NDVI having the best PWD recognition capacity, with an overall accuracy of 84.5%,followed by the combinations of NWI-NDVI and NGRDI-NDVI. PWDI outperformed the other five examined VIs in terms of identification performance while using a single-VI method. This research demonstrates that the Goumang Satellite has a high potential for rapid and reliable detection of PWD discolored pine trees,and that the suggested double-VIs identification technique and the new PWDI can serve as a model for other comparable satellites used for PWD monitoring.

Key words:pine wilt disease,remote sensing,Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite,Goumang, vegetation index

松材线虫病又称松树枯萎病,是由松材线虫引起的松树毁灭性传染病害。该病在我国迅速传播扩散,危害程度不断加深,给我国森林生态安全和经济发展带来严重威胁[1]。及时有效地预警松材线虫病的发生和分布,对于防治该病具有重要意义[2]。遥感是利用各种传感器接收地表反射或辐射的电磁波信号获取地表信息的技术,它能提供大范围、高时效、多尺度的空间信息,主要通过对变色后的松材线虫病树目标的识别,支撑松材线虫病疫情的监测及除治[3-4]。无人机遥感具备了对松材线虫染病变色松树的精确识别和定位能力,成为当下松材线虫病防治应用最多的遥感监测手段[5-7]。然而,成本较高、数据处理复杂、空域法规约束等因素限制了无人机遥感在松材线虫病监测中的大范围应用[3,8]。

卫星遥感在松材线虫病监测中具有覆盖范围广、重访周期短、数据获取成本低等优势,对于松材线虫大尺度及时监测预警、无人机普查区域规划具有重要作用[9]。它主要利用反映松材线虫病树生理状态的特定植被光谱特征,通过阈值分割,实现对松材线虫病的卫星识别[9-11]。松木林冠信息提取通常需要米级左右的高空间分辨率遥感影像[12-13],常见多光谱卫星遥感影像的空间分辨率较低,难以识别小面积或离散分布的松材线虫病木[9,14]。我国2022年8月4日发射的陆地生态系统碳监测卫星(句芒号),能够同时提供更清晰、大幅宽的高空间分辨率(优于2 m)和多光谱分辨率影像信息[15],为高精度、大尺度上的松材线虫病监测提供了重要的新型数据源。以植被指数为主的光谱特征阈值分割方法是识别松材线虫病变色松木的重要途径[3-4,6],然而,松材线虫病变色松木与复杂结构的健康林木、林间裸地等地物的卫星多光谱特征存在一定的相似性,给基于单一植被指数阈值的松材线虫病变色松木卫星遥感识别带来挑战[9,14,16]。

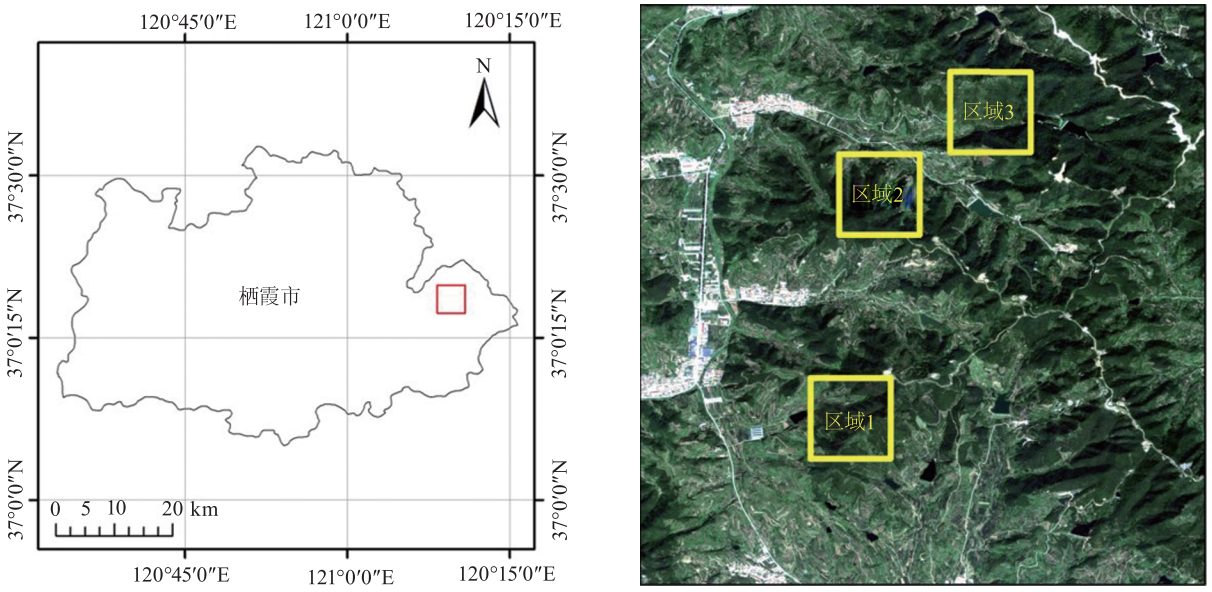
基于我国新发射的句芒号林业遥感卫星具有分辨率高、多光谱分辨率影像信息等特点,本研究针对句芒号卫星优于2 m高分辨率多光谱数据的特点,通过松材线虫病变色松木光谱特征设计及筛选适合该卫星监测的变色松树植被光谱指数,统筹考虑松材线虫病树的冠层生物量、叶片色素方面的多遥感表征,改进现有单指一植被指数阈值分割策略,以提高卫星识别精度和效率。通过在山东省栖霞市松材线虫病发生区进行实验验证,评估句芒号卫星在松材线虫病识别方面的应用能力。

1 数据

1.1 实验区概况

山东省栖霞市位于山东半岛东部,烟台市西南部,是烟台市辖县级市,地处黄海之滨,胶东半岛中

部。属于暖温带季风气候,四季分明、冬暖夏凉、雨量充沛、日照充足。年平均气温为 11.8 ℃,年平均降水量约 700 mm。实验区在栖霞市桃村镇北部,地理坐标为 37°16′ — 37°19′N,121°8′— 121°11′E,区域内主要树种包括油松(*Pinus tabuliformis* Carrière)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.)、马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)等针叶树和刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、柞树(*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.)、榆树(*Ulmus pumila* L.)等阔叶树,以及规模较大的苹果(*Malus pumila* Mill.)种植园。



(a) 实验区位置示意图　　(b) 句芒号影像及验证区

图 1　实验区及陆地生态系统碳监测卫星(句芒号)影像

Fig. 1 Study area and Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite(Goumang) imagery

1.2　卫星数据

在实验区健康林木未变色的松材线虫病变色松木关键监测期[10,17-18],获取句芒号卫星多光谱影像并进行正射校正和大气校正预处理。卫星数据拍摄时间为 2022 年 9 月 8 日上午 10:41(北京时间)。句芒号卫星多光谱影像包括前后 5 个观测角度,单景幅宽大于 20 km,重访周期为精密轨控 5 d、非轨控51 d。为了保证最高的空间分辨率,本研究使用了多光谱相机星下点数据,其空间分辨率为 1.7 m,波段参数如表 1 所示。利用数字高程模型开展了句芒号卫星多光谱影像的正射校正处理,采用了一种通用的成像传感器模型——有理函数模型方法,进行位置校正,以消除卫星影像因成像几何和地形高差而引起的偏移。大气校正采用了 ENVI 软件的 FLAASH 方法,通过输入卫星多光谱辐射定标数据、波段参数以及大陆型大气模式参数,并输入MODIS C6气溶胶光学厚度产品的实验区平均气溶胶含量,实现星上辐亮度数据的大气辐射补偿,获得了实验区句芒号多光谱地表反射率数据。

表 1　句芒号卫星多光谱相机波段设置

Tab. 1 Band settings of multispectral camera on Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite(Goumang)

波段号	波段名称	中心波长/nm	波长范围/nm
B1	蓝	485	450 ~ 520
B2	绿	555	520 ~ 590
B3	红	660	630 ~ 690
B4	近红外	830	770 ~ 890

1.3　检验数据

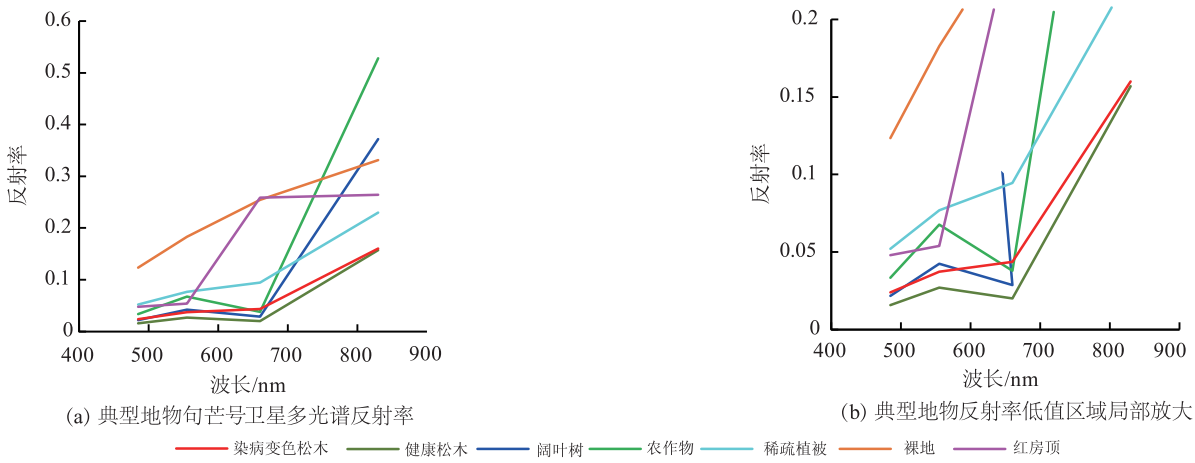
选择 3 个卫星识别验证区,验证区内存在不同离散程度的松材线虫病变色松木分布,且地形条件各异。利用谷歌地球(Google Earth,GE)平台高分

辨率卫星多时相影像，根据松材线虫病变色松木与健康松林、阔叶林的光谱物候期差异[19]，结合地面和无人机调查数据，进行多时相数据对比人工解译，提取验证区松材线虫病变色松木树冠的矢量范围，总计获得 153 株松材线虫病变色松木的树冠真值标识。

2 研究方法

2.1 基于植被指数阈值的松材线虫病变色松木识别流程

实验区典型地物的句芒号卫星多光谱反射率（图 2）显示，红房顶和土壤具有极低生物量对应的较高红波段和近红外反射特征。相反，绿色作物和阔叶林具有较高的近红外反射率和较低的红波段反射率，其高生物量特点与高的归一化差异植被指数（Normalized Difference Vegetation index，NDVI）[20]数值相对应。针叶林冠层阴影组分比例大，导致近红外反射率较低[21-22]，随着变色松木的针叶叶绿素含量减少，其红波段反射率较健康针叶林略高。由于大部分变色松针未凋落，当年发病的松材线虫病树仍保留较高的生物量，与之对应的 NDVI 值将保持较高的水平。稀疏植被光谱表现出土壤和绿色纯植被的混合效应，绿色波段反射率则高于健康林木和变色松木。变色松木与其他地物之间的可见光—近红外光谱特征差异，为句芒号多光谱卫星识别变色松木提供了物理基础。



(a) 典型地物句芒号卫星多光谱反射率　(b) 典型地物反射率低值区域局部放大

图 2 松材线虫病变色松木等地物句芒号卫星多光谱反射率

Fig. 2 Goumang Satellite multispectral reflectance of pine wild disease discolored trees and other ground objects

综合利用植被生物量相关的 NDVI 和色素相关植被指数，有助于实现松材线虫病变色松木的卫星遥感有效识别。本研究中松材线虫病变色松木卫星识别流程如图 3 所示，先从句芒号卫星反射率影像中提取生物量相关 NDVI 和色素相关植被指数等。然后，确定 NDVI 和色素相关植被指数的识别阈值，采用靠近健康树方向的松材线虫病变色松木直方图单边阈值，将松材线虫病变色松木目标与健康树背景进行有效分割。之后，将植被指数图像进行二值化分割，得到松材线虫病变色松木目标的掩膜图像。最后，对识别结果进行综合评估，优选最佳的松材线虫病变色松木卫星识别指标和策略。

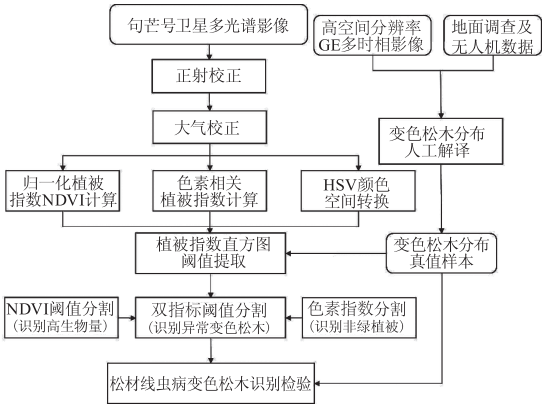


图 3 基于植被指数阈值法的松材线虫病变色松木卫星识别流程

Fig. 3 Flow chart of satellite identification of pine wild disease discolored trees based on vegetation index threshold method

2.2　HSV 颜色空间变换与植被光谱指数

卫星可见光反射率可以反映松材线虫病变色松木的颜色特征,而由色调(Hue,H)、饱和度(Saturation,S)、明度(Value,V)组成的 HSV 颜色模型可以突出地物的颜色差异,提高图像视觉效果和信息量。在 HSV 颜色模型中,色调在区分地物颜色方面更加稳定,常被用于区分松材线虫变色立木和健康松木[6]。首先,将卫星可见光反射率转换为红绿蓝(Red-Green-Blue,RGB)颜色空间。然后,将 RGB 颜色空间转换为 HSV 颜色空间,从可见光反射率中转换获得 H 变量。HSV 颜色空间与 RGB 颜色空间转换[23]的数学公式为:

$$V = \max(R,G,B) \tag{1}$$

$$S = \frac{V - \min(R,G,B)}{V} \tag{2}$$

$$H = \begin{cases} 0, V = \min(R,G,B) \\ (60° \times \dfrac{G - B}{V - \min(R,G,B)} + 360°) \bmod 360°, V = R \\ 60° \times \dfrac{B - R}{V - \min(R,G,B)} + 120°, V = G \\ 60° \times \dfrac{R - G}{V - \min(R,G,B)} + 240°, V = B \end{cases} \tag{3}$$

式中:H,S,V 分别表示色调、饱和度、明度;R,G,B 分别表示红、绿、蓝波段反射率。

除了通过 H 表征色素颜色变化之外,三角绿度指数(Triangular Greenness Index,TGI)[24]和归一化绿红差值指数(Normalized Green Red Difference Index,NGRDI)[25]是色素相关的可见光植被指数,还有绿色叶绿素指数(Green Chlorophyll Index,CI_{green})[26],归一化枯萎病指数(Normalized Wilt Index,NWI)[27]以及本研究提出的松材线虫病指数(Pine Wilt Disease Index,PWDI),均为能够反映色度颜色影响的可见光 - 近红外植被指数。TGI 通过计算植被蓝绿红反射率的 3 个顶点构成三角形面积大小,来评估植物叶片绿色程度变异,其数值越小,绿色程度越小。NGRDI 是基于绿 - 红反射率差值的归一化指数,绿色植被的 NGRDI 为正值,红色植被其数值为负值。CI_{green} 是通过计算近红外和绿光比值变换而来,常被用于评估植物叶绿素含量。NWI 综合考虑了变色植被高 NDVI 和低 NGRDI 特征,用以突出红黄变色植被。由于植被和裸地的混合效应,稀疏植被光谱具有中等 NDVI 值和低 NGRDI 值,易造成与变色松木的 NWI 值分布范围部分重叠。本研究考虑到稀疏植被绿波段的高反射率特点,将负的 NGRDI 和 NDVI 的乘积与绿波段反射率的比值,作为新构建的松材线虫病害指数 PWDI,以增强多光谱卫星影像中变色松木的识别度。利用句芒号卫星多光谱数据的植被光谱指数计算公式如表 2 所示。

表 2　句芒号卫星多光谱数据的植被指数计算

Tab. 2 Calculation of vegetation index from Goumang Satellite multispectral data

指数名称	缩写	计算公式	参考文献
Normalized difference vegetation index	NDVI	NDVI = (B4 - B3)/(B4 + B3)	[20]
Triangular greenness index	TGI	TGI = -0.5 × ((660 - 485) × (B3 - B2) - (660 - 555) × (B3 - B1))	[24]
Normalized green-red difference index	NGRDI	NGRDI = (B2 - B3)/(B2 + B3)	[25]
Green chlorophyll index	CI_{green}	CI_{green} = B4/B2 - 1	[26]
Normalized wilt index	NWI	NWI = - NGRDI × (NDVI + NGRDI)	[27]
Pine wilt disease index	PWDI	PWDI = - NGRDI × NDVI/B2	本研究

注:表中 B1,B2,B3,B4 分别表示句芒号多光谱相机的蓝、绿、红、近红外波段反射率

2.3　识别精度评估方法

为了评估句芒号卫星识别松材线虫病变色松木的准确性,本研究将 3 个验证区域的样本数据与卫星识别结果进行对比。召回率 R(Recall)、准确率 P(Precision)、总体精度 F_1 被用来全面评估识别结果的性能。召回率表示识别结果中正确的样本比例,即识别的完备性;准确率表示识别结果中正确的样本占总识别结果的比例,即识别的准确性。总体精度综合反映了召回率和准确率两个方面。计算公式为:

$$R = \frac{T_P}{T_P + F_N} \tag{4}$$

$$P = \frac{T_P}{T_P + F_P} \tag{5}$$

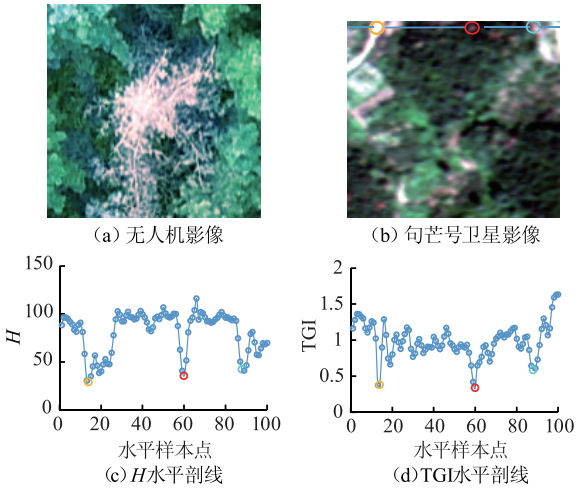
$$F_1 = \frac{2 \times R \times P}{R + P} \tag{6}$$

式中：T_P 表示正确识别的样本数量，F_P 表示错误识别的样本数量，F_N 表示漏检的样本数量。召回率的计算采用统计树冠株数的方式，将卫星识别结果栅格图像与真实样本矢量进行匹配，以获得正确识别的树冠数量，并将其与真值样本的总树冠个数进行比较。由于某些非树冠像素（如裸地）存在被卫星误识别为变色病树的问题，该部分像素难以通过树冠个数的形式表示，因而通过统计像素个数计算准确率。

3 结果与分析

3.1 植被指数及阈值提取结果

与无人机获取的病树影像［图（4a）］分辨率较低相比，句芒号卫星获取的病树影像［图 4（b）］（红圈）能明显区分松材线虫病变色松木与周边健康林木。6 个色素相关植被指数的水平剖线［图 4（c）—（h）］亦显示该样点与健康森林有很好的识别度，但其 H，NGRDI 以及 CI_{green} 数值位于裸土（棕色圈）和稀疏植被（浅蓝圈）之间，TGI，NWI 值接近裸土和稀疏植被，PWDI 值则大于裸土和稀疏植被。对绝大部分色素相关指数来说，有必要与生物量相关指数 NDVI 进行协同识别，以提高松材线虫病变色松木像素与裸地、稀疏草地等低生物量地类的可分性。



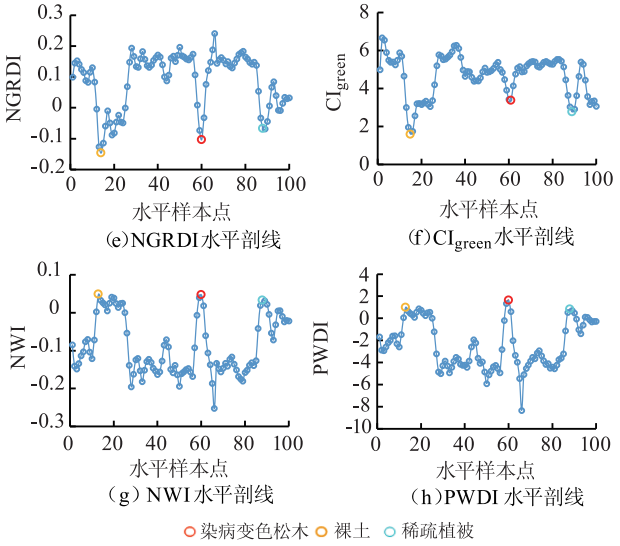


图 4 松材线虫病变色松木无人机、卫星影像及对应植被指数水平剖线

Fig. 4 The UVA imagery, satellite imagery, and vegetation index horizontal profile at the location of a pine wild disease discolored tree

双指数散点图结果（图 5）显示，NDVI 具备区分植被和非植被的能力。松材线虫病变色松木其 NDVI 水平较高，通过确定其 NDVI 下限阈值，可以排除稀疏植被、裸土、红房顶等低生物量地物类型。然而，由于稀疏植被类型存在较大的生物量变异，NDVI 阈值难以完全排除所有此类型像素。TGI 和 CI_{green} 在区分松材线虫病变色松木和健康针叶林、稀疏植被方面存在困难。*H* 和 NGRDI 亦难以与部分稀疏植被像元有效分割。相比其他地物类型，松材线虫病变色松木的 PDWI 和 NWI 处于极大值位置，特别是 PDWI 对松材线虫病变色松木与稀疏植被的区分度更大，这有助于实现基于单一阈值的松材线虫病变色松木分割。

以上结果说明，色素相关植被指数在识别松材线虫病变色松木方面具有主导作用，而 NDVI 起到排除红色人工建筑、土壤及部分稀疏植被像素的辅助作用。在阈值设置时，本研究采用直方图 2% 和 5%，分别获取 NDVI 和色素相关植被指数阈值，避免因NDVI 阈值过窄而影响对病树色素相关植被指数的识别。本研究将松材线虫病变色松木识别 NDVI 阈值设置为 0.5；*H*，TGI，NGRDI，CI_{green}，NWI，PWDI 阈值依次为 46.8，0.63，−0.042，4.98，0.25，0.75。

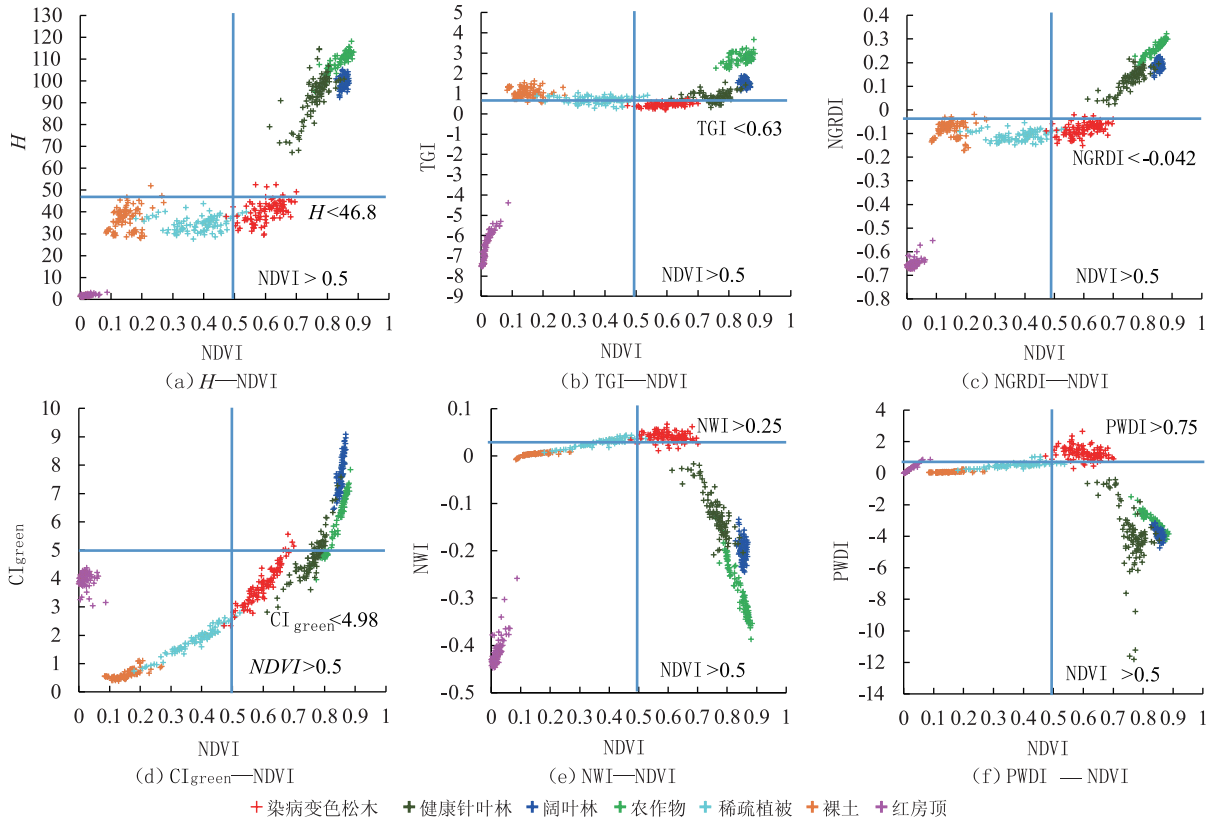


图 5　双植被指数散点图及分割阈值

Fig. 5 Scatter plots and segmentation thresholds of double vegetation index

3.2　识别及精度检验结果

表 3 对比了单、双指数组合策略和不同植被指数的松材线虫病变色松木识别精度。结果显示,PWDI 和 NDVI 组合的识别能力最强,总体精度达到 84.5%。NWI,NGRDI,H,TGI 与 NDVI 组合的总体识别精度依次降低。CI_{green} 与 NDVI 组合的总体识别精度最低,这是因极低的准确率造成的。在双指数识别策略下,NWI,NGRDI,H 和 TGI 识别结果的召回率比准确率更高,说明其查全能力较强,而查准方面略有欠缺。PWDI 和 NDVI 组合的召回率(81.6%)位于所有组合的第 5 位,准确率则达到最高(87.6%),这表示其查准能力最强,识别结果更稳定可靠。

表 3　不同植被指数及组合的松材线虫病变色松木识别精度对比

Tab. 3 Comparison of identification accuracyof pine wild disease discolored trees with different vegetation indexand combinations　%

色素相关植被指数	单一植被指数策略			与 NDVI 指数组合策略		
	召回率	准确率	总体精度	召回率	准确率	总体精度
H	83.6	62.3	71.4	83.6	70.5	76.5
TGI	77.6	66.5	71.6	77.6	74.4	76.0
NGRDI	85.5	62.3	72.1	85.5	69.9	76.9
CI_{green}	87.5	8.0	14.7	87.5	7.8	14.4
NWI	84.9	69.5	76.4	84.9	72.8	78.4
PWDI	81.6	85.8	83.6	81.6	87.6	84.5

分析单一指数策略识别结果，发现6个色素相关指数的总体识别精度排序依次为PWDI > NWI > NGRDI > TGI > H > CI_{green}。相比双指数策略，各色素相关植被指数（CI_{green}除外）识别结果的总体精度都有所降低，降低幅度依次为H（5.1%）> NGRDI（4.8%）> TGI（4.4%）> NWI（2.0%）> PWDI（0.9%）。由此可以看出，本研究提出的双指数识别策略的性能更优。在所有测试的色素相关指数中，PWDI指数在单指数策略和双指数策略下的总体识别精度均为最高。

图6显示了松材线虫病变色松木检验点位和3个最优植被指数组合（NGRDI—NDVI，NWI—NDVI，PWDI—NDVI）的卫星识别填图结果。在查全能力评估方面，3个组合能够正确识别松材线虫像素的空间分布基本一致，但PWDI－NDVI组合的病树目标识别像素数目较NGRDI－NDVI组合、NWI－NDVI组合略少（如图6蓝圈所示），这是由于PWDI对松材线虫病变色松木树冠外围的部分像素未识别。由于本研究以树冠个数为单元计算召回率，变色松木树冠的部分外围像素未识别而中心像素被正确识别，这种情况未对PWDI结果的召回率计算造成较大影响。如表3所示，无论是单指数还是双指数组合策略，基于PWDI的查全能力指标——召回率仍然与NGRDI，NWI接近。

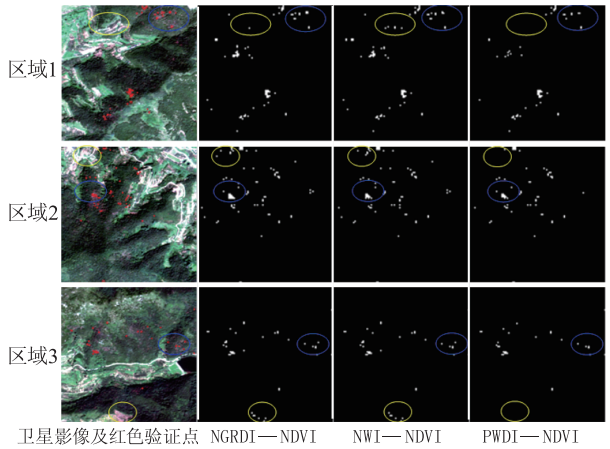


图6 基于优选指数组合的松材线虫病变色松木卫星填图结果

Fig. 6 Satellite mapping results of pine wild disease discolored trees based on the optimal vegetation index combinations

在查准能力评估方面，部分稀疏植被像元（如图6黄圈所示）被NGRDI－NDVI，NWI－NDVI阈值分割方法误判为松材线虫病变色松木，而PWDI－NDVI则能够减少乃至避免此类误判，识别准确率比NGRDI－NDVI，NWI－NDVI组合结果显著提高（如表3所示）。总体来说，在查全能力相近的情况下，PWDI更易区分松材线虫病变色松木和稀疏植被像素，导致其在查准能力方面相比其他指数更优。

4 结论与讨论

本研究针对传统的单一指数阈值分割识别松材线虫病树存在的问题，提出了由表征生物量的NDVI和色素相关植被指数联合的双指数组合专家决策识别策略，并根据变色病树多光谱特征设计了松材线虫病指数PWDI，实现基于句芒号卫星数据的松材线虫病变色松木识别。结果表明，相较于单一指数策略，双指数策略的识别精度更高，且不论单、双指数组合，在所有色素相关植被指数中，PWDI获得的松材线虫病变色松木识别总体精度均为最高，具有突出的查准性能。本研究结果证实了我国句芒号卫星在松材线虫病筛查方面具有良好的应用潜力，能够支持松材线虫病媒介天牛非羽化期内（一般是当年11月至翌年4月）的择伐清理病死松树业务，也为其他多光谱卫星的松材线虫病识别应用提供技术借鉴。

然而，当前2 m左右空间分辨率的多光谱卫星数据对松树树冠轮廓的精细刻画存在困难，同时部分混合像元也导致松材线虫病树卫星识别存在一定的漏检现象。未来，应加强空天信息联合，既充分发挥卫星遥感的大范围覆盖、成本低的特点，又利用无人机遥感的灵活机动性和超高空间分辨率信息优势，实现对松材线虫病的全面、精细、高效监测。鉴于卫星数据大气校正存在一定的不确定性，还应加强基于反射率的松材线虫病树识别指标测试以及指标阈值自适应识别算法研究。另外，应进一步挖掘空间信息、多时相信息和针叶林小班分布等先验知识，同时融合多源更高分辨率卫星数据，这将有助于进一步提高句芒号卫星识别松材线虫病变色松木的查全能力和准确性，以及促进松材线虫病树发病初期识别的探索研究。

参考文献:

[1] 叶建仁. 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] 国家林业和草原局. 全国松材线虫病疫情防控五年攻坚行动计划(2021—2025)[EB/OL]. (2021 – 07 – 07)[2023 – 06 – 10]. http://www. forestry. gov. cn.

[3] 陶欢,李存军,程成,等. 松材线虫病变色松树遥感监测研究进展[J]. 林业科学研究,2020,33(3):172 – 183.

[4] 方国飞,黄文江,牟晓伟,等. 松材线虫病疫情精准监测实践与展望[J]. 中国森林病虫,2022,41(4):16 – 23.

[5] 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.

[6] 陶欢,李存军,谢春春,等. 基于 HSV 阈值法的无人机影像变色松树识别[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2019,62(3):99 – 106.

[7] 刘顺利,刘昌华,张雷,等. 基于改进 SSD 的无人机影像松材线虫病变色木检测[J]. 林业资源管理,2022(3):135 – 141.

[8] 杨国峰,何勇,冯旭萍,等. 无人机遥感监测作物病虫害胁迫方法与最新研究进展[J]. 智慧农业,2022,4(1):1 – 16.

[9] 亓兴兰,曹祖宁,刘健,等. 基于卫星遥感影像的森林病虫害监测研究进展[J]. 林业资源管理,2020(2):181 – 186.

[10] 乔睿,唐娉,石进,等. WorldView – 2 影像的红叶松树识别研究[J]. 北京林业大学学报,2015,37(11):33 – 40.

[11] 秦琳,孟先进,张水花,等. 北京三号卫星数据在松材线虫病遥感监测中的应用评价[J]. 林业资源管理,2022(4):126 – 133.

[12] 覃先林,李增元,易浩若. 高空间分辨率卫星遥感影像树冠信息提取方法研究[J]. 遥感技术与应用,2005,20(2):228 – 232.

[13] 刘玉锋,潘英,李虎. 基于高空间分辨率遥感数据的天山云杉树冠信息提取研究[J]. 国土资源遥感,2019,31(4):112 – 119.

[14] 张晓东,杨皓博,蔡佩华,等. 松材线虫病遥感监测研究进展及方法述评[J]. 农业工程学报,2022,38(18):184 – 194.

[15] 张新伟,黄缙,贺涛,等. 陆地生态系统碳监测卫星总体设计[J]. 航天返回与遥感,2022,43(6):16 – 26.

[16] 徐华潮,骆有庆,张廷廷,等. 松材线虫自然侵染后松树不同感病阶段针叶光谱特征变化[J]. 光谱学与光谱分析,2011,31(5):1352 – 1355.

[17] 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.

[18] 山东省自然资源厅. 山东省松材线虫病防治技术规范(2022 年版)[EB/OL]. (2022 – 02 – 18)[2023 – 06 – 10]. http://dnr.shandong. gov. cn/zwgk _ 324/xxgkml/fzjz/lyyhswgl/202202/t20220218_3860246. html.

[19] Wu Dewei, Yu Linfeng, Yu Run, et al. Detection of the monitoring window for pine wilt disease using multi-temporal UAV-based multispectral imagery and machine learning algorithms[J]. Remote Sensing, 2023, 15(2):444.

[20] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS[C]. Third ERTS-1 Symposium NASA, NASA SP-351, Washington DC, USA:1974.

[21] 于泉洲,王绍强,黄昆,等. 基于 Hyperion 高光谱数据的温带森林不同冠层结构的光谱特征分析[J]. 光谱学与光谱分析,2015,35(7):1980 – 1985.

[22] Brown L, Chen J M, Leblanc S G, et al. A shortwave infrared modification to the simple ratio for LAI retrieval in boreal forests: An image and model analysis[J]. Remote sensing of environment, 2000, 71(1):16 – 25.

[23] Jain A K. Fundamentals of digital image processing[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1989.

[24] Hunt E R, Doraiswamy P C, Mcmurtrey J E, et al. A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale[J]. International Journal of Applied Earth Observations & Geoinformation, 2013, 21(1):103 – 112.

[25] Pearson R L, Miller L D, Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short grass prairie[C]. Eighth International Symposium on Remote Sensing of Environment, University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA:1972.

[26] Gitelson A A, Gritz Y, Merzlyak M N, Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves[J]. Journal of Plant Physiology, 2003, 160(3):271 – 282.

[27] Uto K, Kosugi Y, Ogata T. Hyperspectral analysis of Japanese oak wilt to determine normalized wilt index[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2008), Boston, MA, USA:2008.