

黑松冠层反射光谱方向特征分析

夏秀丽, 潘洁*, 高晓倩, 吴辰辰

南京林业大学林学院, 江苏 南京 210037

摘要 松萎蔫病是松属树种的一种毁灭性病害, 小范围甚至单木水平的森林病虫害的早期诊断对森林资源保护与可持续发展尤为重要。以感染松萎蔫病的黑松为研究对象, 通过采集不同感病时期的黑松冠层的多角度光谱数据, 分析不同特征波段的方向反射特征, 总结不同感病程度黑松的冠层特征波段反射率的变化规律。结果显示: (1) 在俯视观测时, 在主平面方向的后向散射方向的反射率大于前向散射方向的反射率, 并且在后向散射方向, 四个波段的四个感病时期约在 40° 的观测天顶角出现热点效应; 无论在主平面还是主垂面, 蓝光波段(450 nm)与近红外波段(810 nm)的黑松冠层 0° 天顶角反射率呈现出感病初期>健康>感病中期>感病末期的变化规律, 红光波段(680 nm)和绿光波段(560 nm)的黑松冠层 0° 天顶角反射率呈现出健康 \approx 感病初期>感病中期 \approx 感病末期的变化规律。在所有方位角, 冠层反射率随着观测天顶角的增加而增大。(2) 在仰视观测时, 在主平面方向的后向散射方向的反射率小于前向散射方向的反射率, 并且在方位角为 0° 时, 4个波段反射率都是较大的; 无论在主平面还是主垂面, 蓝光波段(450 nm)绿光波段(560 nm)和红光波段(680 nm)的冠层反射率的大小呈现出感病初期>健康>感病末期>感病中期的变化规律, 近红外波段(810 nm)冠层反射率的大小呈现出感病初期>健康>感病中期>感病末期的变化规律; 在所有方位角, 冠层反射率随着观测仰角的增加而减小。(3) 黑松冠层反射光谱在俯视和仰视观测时, 各个特征波段的二向性反射率的各向异性最强的是主平面, 最弱的是主垂面, 且主垂面的前向和后向反射率会呈现对称性, 即“镜面反射”; 各个特征波段在感病末期, 黑松冠层反射率随观测天顶角的变化幅度较大, 其他几个时期反射率随观测天顶角的变化幅度不明显。研究结果显示的树冠的不同角度的波段反射方向性特征为以后不同尺度的无人机监测的准确性与可靠性奠定基础, 也为发展近地面便携式森林病虫害实时监测系统打下了基础。

关键词 多角度; 高光谱; 方向性特征; 松萎蔫病; 黑松

中图分类号: S43 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)08-2540-06

引言

高光谱遥感是利用很多很窄的电磁波波段从感兴趣的物体上获取有关光谱数据, 其优势在于所获取的数据能够呈现为一条完整而连续的曲线, 这是常规遥感所不具有的^[1]。多角度遥感就是通过获取地物多个方向的遥感反射信息, 获取比单一方向的观测数据更为详细可靠的地面目标的三维结构参数, 从而为定量遥感提供新的手段^[2]。

植被冠层光谱反射率大小与观测时太阳高度角、太阳方位角、观测天顶角以及观测方位角等有着紧密联系。Wang^[3]等联合离散各向异性辐射传输模型和变色龙模型来模拟森林的树冠双向反射分布因子, 并与8个植被指数结合找到了

490 nm/ -55° , 530 nm/ -55° 和 697 nm/ -55° 的敏感波段和角度。Song等^[4]通过冬小麦在不同栽培条件下研究了不同观测角度下太阳主平面(SPP)和垂直平面(PP)土壤氮含量与小麦冠层光谱数据的关系, 得出在同一观测平面的不同观测角处的相关系数的差异显著, 其中 -30° 和 -40° 的角的相关系数比其他角度的高。张东彦等^[5]利用多角度观测系统采集田间不同生育期大豆冠层的图谱数据, 得出反演叶绿素密度的最优角度是 40° 天顶角, 0° 方位角。虽然国内外学者针对植被冠层光谱反射率大小随太阳高度角与观测角度的变化规律进行了大量的试验与分析, 但是对于病虫害监测方面比较匮乏, 针对病虫害的相关研究主要是基于松材线虫的繁衍、防治和分布^[6-8], 病虫害的监测也主要是基于航摄影像^[9-11]。这些研究主要是分析林木冠层单一垂直方向的反射特征, 很少

收稿日期: 2018-10-09, 修订日期: 2019-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(31470579, 31100414)和江苏省高校优势学科建设工程项目资助

作者简介: 夏秀丽, 1993年生, 南京林业大学林学院硕士研究生 e-mail: xxl_nancy@163.com

* 通讯联系人 e-mail: panjie_njfu@126.com

考虑冠层的辐射传输特性,无法真正的实现精准垂直监测。

本研究通过近地面多角度高光谱测量获取林木冠层综合光谱信息,分析不同角度不同感病程度的黑松冠层的反射光谱特征,结合植被辐射传输理论,分析不同角度光谱反射特征间的相关关系,尝试找出最佳观测视角,进而应用于林木病虫害诊断预测,为今后开发不同尺度下的无人机高空监测的准确性与可靠性提供参数。

1 实验部分

1.1 研究区概况

试验主要是在江苏省南京市溧水区白马国家农业科技园区南京林业大学白马教学科研基地进行。南京的地貌特征为丘陵地,以低山缓岗为主,属于亚热带湿润气候,四季分明,春温和风和日丽;梅雨时节阴雨绵绵;夏季炎热;秋天干燥凉爽;冬季寒冷、干燥。雨水充沛,平均降水量 1 073.8 mm,相对湿度 76%。年平均温度 15.4 °C,年极端气温最高 39.7 °C,最低 -13.1 °C,温差较大。

1.2 试验设计

选择 5 棵相同林龄相似冠幅大小的自然健康生长的黑松,其中 3 棵进行松材线虫的接种,2 棵健康树用作对照,而松材线虫的接种选择接种量为 3 000 条/1 mL/株的人工皮接方法,并用封口膜将其包裹好^[12]。在黑松感病后,根据黑松感染松材线虫的时间以及松针褪绿、枯黄、变红等情况,将其分为 4 级:0 级为健康;I 级为感病初期,即感染松材线虫后一周,肉眼看不出松针颜色的变化;II 级为感病中期,即感染松材线虫后一个月,松针开始变黄;III 级为感病末期,即感染松材线虫后两个月,松针开始变红^[13]。

1.3 高光谱数据采集

使用 ASD 便携式地物波谱仪对实验对象进行冠层多角度光谱测量,同一时刻同一角度的天空光的测量,下垫面光谱的测量以及在黑布上测量松针光谱。测量时为避免因光线及光量问题带来的误差,尽量选择晴朗无风无云或少云天气,于 10:00—14:00 进行多角度光谱的测量。每个测量角度重复测量 10 次。每隔 5 min 进行一次标准白板的校正,减少天气变化带来的误差,时间间隔视具体情况而定。

1.4 数据处理

1.4.1 高光谱数据预处理

光谱数据预处理在光谱分析过程中具有至关重要的作用。对光谱数据进行有效的预处理,可以尽可能地减少或消除噪声等无关信息对数据的影响,纯化光谱信号,能够最大程度地反映黑松冠层本身的光谱特征,为后续的光谱分析提供更加可靠的数据源。光谱数据预处理主要包括:异常数据的剔除、跳跃点校正、光谱平滑去噪等步骤。根据本课题组的研究表明 810 与 450 nm 两波段的比值光谱指数 $RVI_{(810, 450)}$ 可以用来进行马尾松是否感染松萎蔫病的早期判别^[10]; $NDVI$, $NDVI_{(810, 450)}$, $NDVI_{(810, 680)}$, RVI , $RVI_{(810, 680)}$, $RVI_{(810, 560)}$, PRI , $SAVI$ 和 $SIPI$ 等植被指数与马尾松黑松的类胡萝卜素以及胡萝卜素含量密切相关^[14]等,本文选取与叶绿素含量变化密切相关的可见光波段的蓝光波段 450 nm、

绿光波段 560 nm、红光波段 680 nm 以及与植物健康状况的红边位置波段 810 nm 开展进一步的多角度分析研究。

1.4.2 地表二向反射特性和各向异性指数

植被的光谱反射特征不但与植被自身的几何结构和光谱特性有关,还与入射方向和观测角度密切相关。根据地表二向反射特性,分析了多观察角度下黑松冠层的二向反射特性。在定量分析黑松冠层某一观测平面中二向性反射率的各向异性特征时,使用各向异性指数(anisotropy index, ANIX)进行描述^[15],其定义如下

$$ANIX(\lambda, \theta_i) = \frac{R_{\max}(\lambda)}{R_{\min}(\lambda)}$$

其中, R_{\max} 和 R_{\min} 分别为某一观测平面中最大反射率和最小反射率。各向异性指数可以定量的描述不同观测平面内各向异性特征。

2 结果与讨论

主平面和主垂面两个方向分别进行分析。在主平面方向,天顶角为正表示观测方向与太阳入射方向一致(方位角为 180°),即后向散射方向,天顶角为负表示观测方向与太阳入射方向相反(方位角为 0°),即前向散射方向;在主垂面方向,天顶角为正表示观测方位角为 90°,天顶角为负表示观测方位角为 270°。

2.1 黑松不同感病时期俯视图观测时冠层反射光谱方向特征分析

分析黑松不同感病时期俯视图观测下冠层的反射率随观察方位角变化产生的差异,建立黑松各个特征波段不同感病时期冠层反射率随观测天顶角及观测方位角的变化曲线。

图 1 为黑松四个波段的冠层反射率在不同感病时期和不同的方位角随观测天顶角的变化曲线。在黑松不同感病阶段的主平面方向,观测方向与太阳入射方向一致时(方位角 180°),出现“热点效应”,出现热点效应的观测天顶角均在 40°左右,这主要是由于试验所在地以及所处时间的太阳高度角决定的;无论在主平面还是主垂面,蓝光波段和近红外波段在黑松冠层 0°天顶角反射率呈现出感病初期 > 健康 > 感病中期 > 感病末期的变化规律,绿光波段和红光波段在黑松冠层 0°天顶角反射率相似,呈现出健康 ≈ 感病初期 > 感病中期 > 感病末期的变化规律,这种变化形成的原因是由于在黑松感染松萎蔫病初期,叶绿素分泌增多,但在感病中后期,随着松材线虫的进一步入侵繁殖,使得针叶逐渐失水、失绿褐变,叶绿素含量大幅度下降。在感病末期,黑松冠层反射率随观测天顶角的变化幅度较大,其他几个时期反射率随观测天顶角的变化幅度不明显。

2.2 黑松不同感病时期仰视图观测时冠层反射光谱方向特征分析

图 2 为黑松仰视图观测下的不同感病时期在蓝光波段(450 nm)、绿光波段(560 nm)红光波段(680 nm)以及近红外波段(810 nm)的冠层反射率随观测仰角和方位角的变化曲线。可以看出,在黑松不同感病阶段,均在前向散射方向,即观测方向与太阳入射方向一致时(方位角 0°),反射率较大;在黑

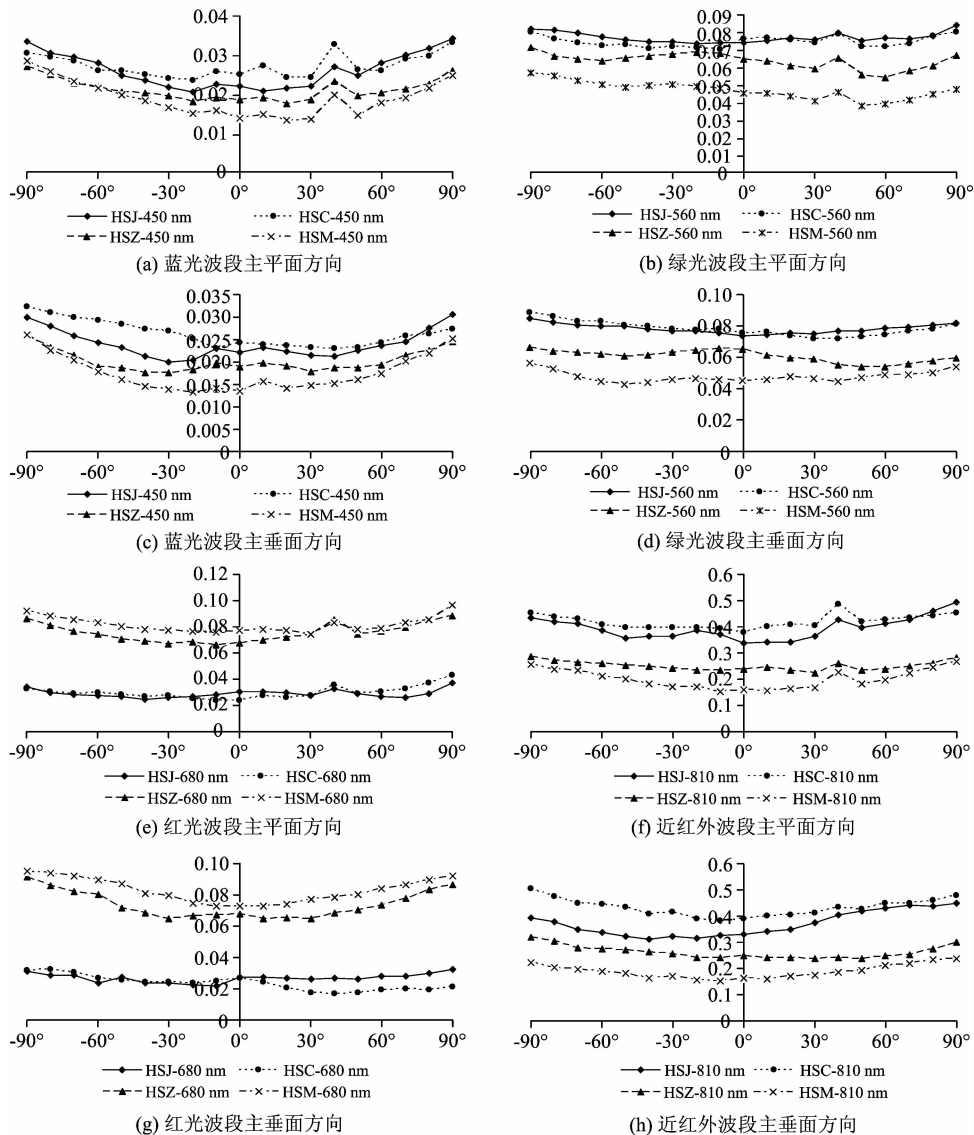


图 1 黑松不同感病时期和不同方位角冠层光谱反射率随观测天顶角的变化曲线

(a): 蓝光波段主平面方向; (b): 绿光波段主平面方向; (c): 蓝光波段主垂面方向;
 (d): 绿光波段主垂面方向; (e): 红光波段主平面方向; (f): 近红外波段主平面方向;
 (g): 红光波段主垂面方向; (h): 近红外波段主垂面方向

注: X 轴为观测天顶角, Y 轴为光谱反射率; HSJ, HSC, HSZ 以及 HSM 分别代表健康黑松、感病初期黑松、感病中期黑松以及感病末期黑松

Fig. 1 The change curves of the different periods of infected black pine canopy spectral reflectance with the observed angle and azimuth

(a): The principal plane of blue band; (b): The principal plane of green band;
 (c): The principal vertical plane of blue band; (d): The principal vertical plane of green band;
 (e): The principal plane of red band; (f): The principal plane of near-infrared band;
 (g): The principal vertical plane of red band; (h): The principal vertical plane of near-infrared band

Note: X-axis: the zenith angle of observation, Y-axis: the spectral reflectance; HSJ, HSC, HSZ and HSM are represent the healthy black pine, the early disease black pine, the metaphase disease black pine, and the end disease black pine

松不同感病阶段, 主垂面各向异性最弱, 且主垂面的前向和后向反射率呈现一定的对称性; 在所有方位角, 除近红外波段在非 0°方位角呈现出反射率随着仰角的增加而增大的趋势, 其他波段的冠层反射率随着观测仰角的增加而减小, 这是因为近红外波段受太阳光的影响较小。在黑松不同感病阶

段仰视观测下的冠层反射率不同波段的主平面和主垂面的总体趋势相似, 其大小呈现出感病初期 > 健康 > 感病末期 > 感病中期的变化规律, 感病初期反射率最大的原因是由于黑松感染松萎蔫病感病初期叶绿素分泌增多, 随着松材线虫的进一步入侵繁殖到感病中后期, 针叶逐渐失水、失绿褐变, 叶

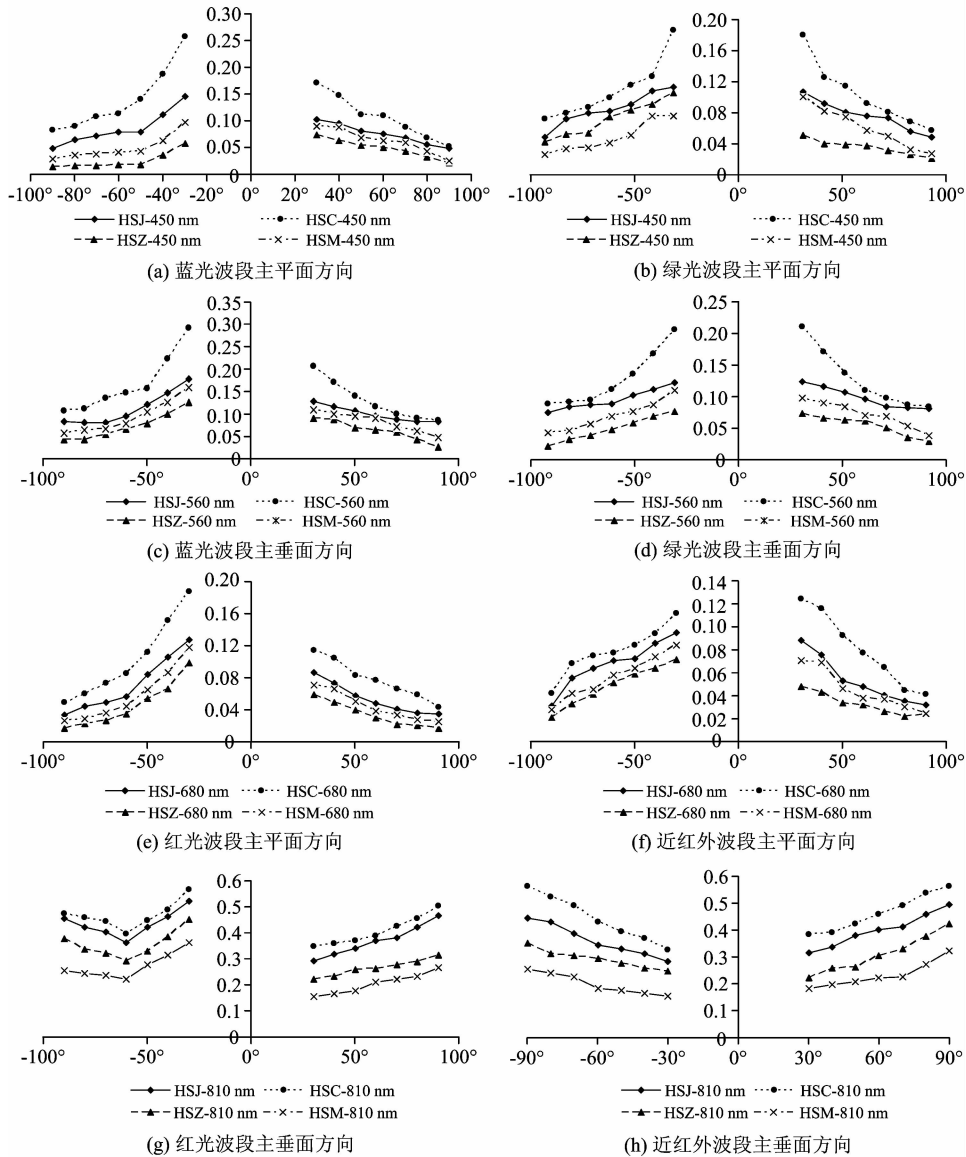


图 2 黑松不同感病时期冠层光谱反射率随观测仰角和方位角变化曲线

(a): 蓝光波段主平面方向; (b): 绿光波段主平面方向; (c): 蓝光波段主垂面方向; (d): 绿光波段主垂面方向; (e): 红光波段主平面方向; (f): 近红外波段主平面方向; (g): 红光波段主垂面方向; (h): 近红外波段主垂面方向

注: X 轴为观测天顶角, Y 轴为光谱反射率;

HSJ, HSC, HSZ 以及 HSM 分别代表健康黑松、感病初期黑松、感病中期黑松以及感病末期黑松

Fig. 2 The change curves of the different periods of infected black pine canopy spectral reflectance with the observed elevation and azimuth

(a): The principal plane of blue band; (b): The principal plane of green band;

(c): The principal vertical plane of blue band; (d): The principal vertical plane of green band;

(e): The principal plane of red band; (f): The principal plane of near-infrared band;

(g): The principal vertical plane of red band; (h): The principal vertical plane of near-infrared band

Note: X-axis: the zenith angle of observation, Y-axis: the spectral reflectance; HSJ, HSC, HSZ and HSM are represent the healthy black pine, the early disease black pine, the metaphase disease black pine, and the end disease black pine

绿素含量大幅度下降, 反射率也相应的下降。与许章华^[1]等得出不同虫害等级光谱反射率存在极为显著的差异, 即健康 > 轻度 > 中度 > 重度的结果相近。

2.3 黑松不同感病时期观测时不同波段反射率的各向异性指数

为更加准确的描述仰视观测下冠层反射率的方向性特

性,在分析黑松仰视观测下不同感病时期冠层反射率随观测仰角及方位角变化趋势的基础上,进一步计算黑松不同感病时期冠层特征波段反射率在不同观测平面的各向异性指数,定量分析各向异性特征,其计算结果列表如表 1 所示。

表 1 黑松不同感病时期观测时不同波段反射率的各向异性指数

Table 1 The anisotropy index of the spectral reflectance of the different periods of infected black pine within some wavebands

视角	感病状况	平面	波段/nm			
			450	560	680	810
俯视	主平面	健康	1.67	1.15	1.52	1.06
		初期	1.51	1.45	1.43	1.29
		中期	1.75	1.33	1.41	1.34
		末期	2.13	1.71	1.55	1.68
	主垂面	健康	1.53	1.14	1.47	1.05
		初期	1.37	1.23	1.35	1.31
		中期	1.58	1.23	1.34	1.28
		末期	1.98	1.55	1.51	1.45
仰视	主平面	健康	2.97	2.18	3.79	1.15
		初期	3.15	2.72	3.83	1.19
		中期	3.19	3.02	4.00	1.29
		末期	3.44	2.79	4.70	1.42
	主垂面	健康	2.35	1.65	2.65	1.11
		初期	2.57	2.36	2.88	1.00
		中期	2.53	2.5	3.03	1.21
		末期	3.05	3.6	3.53	1.47

由表 1 可见,无论仰视还是俯视在不同感病阶段的黑

松,其主平面的各个波段的各向异性指数均大于主垂面的各向异性指数;无论在主平面还是主垂面,健康、感病初期和感病中期各个波段的各向异性指数差别不大,各向异性指数均随着感病情况的加深而增大,感病末期的各向异性指数相比其他几个时期稍微偏大;另外,近红外波段处的各向异性指数普遍小于几个可见光波段;除近红外波段外,其他波段的仰视时的各向异性指数均大于俯视时的。

3 结 论

植被冠层的二向反射特征是研究不同观测角度下冠层光谱反射特征的理论基础。通过分析黑松冠层多角度反射光谱方向特征,得出如下主要结论:(1)不同感病时期黑松的主平面的二向性反射率的各向异性都最强。俯视观测时的主平面方向在天顶角 40° 左右出现热点效应,在仰视主平面观测时,方位角 0° 反射率最大。(2)无论是俯视观测还是仰视观测,主垂面的各向异性较弱,主平面的各向异性强,不利于分析研究冠层光谱的方向性特征,但是近红外波段处的各向异性指数普遍小于几个可见光波段。(3)发现了黑松的四个波段在不同感病阶段的光谱发射率规律,为以后对较高松树的研究和不同尺度的无人机监测提供参考。

主要研究了黑松冠层倾斜角度测量反射率的方向特征探讨更便捷的基于多角度高光谱遥感监测黑松松萎病的研究方法,为其他森林病虫害高光谱遥感监测提供了参考。但是,在结合高空卫星跟踪监测,对受感染的植株进行实时采集,与物联网相结合实现信息的快速发布,以此实现受感染植株的早期监测与预警方面,还需进一步研究。

References

- [1] YANG Han, LI Xiao-run, ZHAO Liao-ying, et al(杨 韩, 厉小润, 赵辽英, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2018, 38(9): 129.
- [2] CHEN Ping-ping, SHEN Cheng-cheng, WU Zhuo-lin, et al(陈平平, 沈橙橙, 吴卓琳, 等). South China Agriculture(南方农业), 2018, 12(19): 15.
- [3] Wang Qiang, Pang Yong, Li Zengyuan, et al. Remote Sensing, 2016, 8(11): 891.
- [4] Song X, Xu D, He L, et al. Precision Agriculture, 2016, 17(6): 721.
- [5] ZHANG Dong-yan, Coburn C, ZHAO Jin-ling, et al(张东彦, Coburn C, 赵晋陵, 等). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2013, 44(2): 205.
- [6] WU Fan, WU Xiao-qin(吴 凡, 吴小芹). Journal of Nanjing Forestry University · Natural Science Edition(南京林业大学学报·自然科学版), 2018, 42(5): 59.
- [7] PAN Yan-yi, HUANG Lin, WU Xiao-qin(潘妍毅, 黄 麟, 吴小芹). Journal of Nanjing Forestry University · Natural Science Edition(南京林业大学学报·自然科学版), 2018, 42(5): 65.
- [8] WANG Hua-guang, LI Liang, JU Yun-wei, et al(王华光, 李 良, 巨云为, 等). Journal of Nanjing Forestry University · Natural Science Edition(南京林业大学学报·自然科学版), 2018, 42(6): 137.
- [9] Lausch A, Heurich M, Gordalla D, et al. Forest Ecology and Management, 2013, 308: 76.
- [10] ZHANG Heng, PAN Jie, JU Yun-wei, et al(张 衡, 潘 洁, 巨云为, 等). Journal of Northeast Forestry University(东北林业大学学报), 2014, 42(11): 115.
- [11] XU Zhang-hua, LIU Jian, YU Kun-yong, et al(许章华, 刘 健, 余坤勇, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2013, 33(2): 428.
- [12] MA Jing, ZHANG Xue-jian(马 菁, 张学俭). Guizhou Agricultural Sciences(贵州农业科学), 2016, 43(3): 65.

- [13] MA Yue, LÜ Quan, ZHAO Xiang-tao, et al(马 跃, 吕 全, 赵相涛, 等). Journal of Shanxi Agricultural Sciences(山西农业科学), 2012, 44(11): 12.
- [14] LIU Wen-ya, PAN Jie(刘文雅, 潘 洁). Chinese Journal of Applied Ecology(应用生态学报), 2017, 28(4): 1128.
- [15] LI Qiang, ZHAO Yan-wei, YU Yan-ming, et al(李 强, 赵彦伟, 俞燕明, 等). Progress in Geophysics(地球物理学进展), 2015, 30(3): 1298.

Analysis of the Directional Characteristics of the Reflection Spectrum of Black Pine Canopy

XIA Xiu-li, PAN Jie*, GAO Xiao-qian, WU Chen-chen

College of Forest, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

Abstract Pine wilt disease is a devastating disease of pine tree species, thus, early diagnosis of forest pests and diseases in small forest lands even single wood level is particularly important for forest resources protection and sustainable development. This study used black pine as the research object and the multi-angle hyperspectral data from specific black pines canopy were collected through different infected periods, then, we analyzed the spectral characteristics by directional reflectance. The main results were as follows: (1) the reflectance of the backward scattering direction was greater than that of forward scattering direction in the principal plane when viewed from the top, in addition, in the backward scattering direction, during the four periods of infection, the four bands had hotspot effect at about 40° of zenith angle. Both in the principal plane and the orthogonal principal plane, the reflectance of pine canopy in the blue wavelengths (450 nm) and the near infrared wavelengths (810 nm) showed a change rule at the azimuth angle of 0° , that were, the early > the health > the metaphase > the end, the red light band (680 nm) and the green light band (560 nm) were the early \approx the health > the metaphase \approx the end. At all azimuth angles; the canopy reflectivity increased with the increase of observed zenith angle. (2) on upward observation, the reflectance of the forward scattering direction was greater than that of the backward scattering direction in the principal plane, in other words, the reflectance was bigger when the azimuth angle was 0° ; Both in the principal plane and the orthogonal principal plane, the blue light band (450 nm) and the red light band (680 nm) and the green light band of pine canopy reflectance in azimuth angle were 0° , presenting the early > the health > the end > the metaphase, and the near infrared wavelengths (810 nm) is the early > the health > the metaphase > the end; For all azimuth angles, canopy reflectance decreased with the increase of observed zenith angle. (3) the anisotropy of the bidirectional reflectance of each feature band was the strongest in the principal plane and was the weakest in the main vertical plane, and the forward and backward reflectance of the main vertical surface presented symmetry, namely "mirror reflection"; the reflectance of the canopy of black pine changed significantly with the observed zenith angle at the end of infection period, while it did not change significantly with the observed zenith angle in other periods. The reflection characteristics of the canopy at different bands and angles can promote the accuracy and reliability of UAV remote sensing to monitor forest diseases at different scales, also promote the construction of portable and real-time diagnosis system for forest diseases, and achieve the rapid acquisition of hyperspectral data at single wood level.

Keywords Multi-angle; Hyperspectral; Directional characteristics; Pine wilt disease; Black pine

(Received Oct. 9, 2018; accepted Feb. 20, 2019)

* Corresponding author