

文章编号:1001-9014(2010)04-0316-05

三因素及其交互作用对植物叶片多角度 偏振高光谱特征的影响

韩 阳^{1,2}, 李 潜^{1,3}, 赵云升^{1*}, Wang Yeqiao², 陈春林¹, 张莉莉⁴

(1. 东北师范大学 城市与环境科学学院, 吉林 长春 130024;

2. 罗得岛州大学 自然资源科学系, 美国 金斯敦 02881;

3. 东北师范大学 国家环境保护湿地生态与植被恢复重点实验室, 吉林 长春 130024;

4. 吉林省国土资源勘测规划研究院, 吉林 长春 130061)

摘要:在反射、散射和透射电磁辐射的过程中,植物叶片表面将产生与它们自身性质有关的偏振特征,完全可以作为遥感信息中有价值的信息来源.多角度对地观测能获得更为详细可靠的地面目标三维空间结构参数,使定量遥感成为可能.对植物叶片的多角度偏振高光谱探测成为定量遥感中的一种新手段.在分析植被叶片的多角度偏振高光谱特征基础之上,设计了一个3因素2水平的正交试验.通过对实验数据的方差分析发现,偏振角、入射天顶角、叶绿素以及三个因素之间的交互作用都可以对植物叶片的偏振反射产生影响,偏振角和入射天顶角对植物叶片的影响特别显著,二者的交互作用也有显著的影响.因此在今后的研究中,既要考虑单因素本身对植被叶片的偏振反射的影响,还要考虑到交互作用所起到的影响.

关键词:多角度;偏振;高光谱;交互作用

中图分类号:TP72 文献标识码:A

EFFECTS OF THREE INTERACTIVE FACTORS ON THE MULTI-ANGLE POLARIZED HYPERSPECTRUM OF VEGETATION LEAVES

HAN Yang^{1,2}, LI Qian^{1,3}, ZHAO Yun-Sheng^{1*}, Wang Ye-Qiao², CHEN Chun-Lin, ZHANG Li-Li⁴

(1. College of Urban and Environmental Science, Northeast Normal University, Changchun 130024, China;

2. Department of Natural Resource Science, University of Rhode Island, Kingston RI 02881, USA;

3. Key laboratory of Wetland Ecology and Vegetation Restoration of National Environmental Protection, Northeast Normal University, Changchun 130024, China;

4. Jilin Land Surveying and Planning Institute, Changchun 130061, China)

Abstract: Polarized features, which come from the surface of vegetation leaves in the process of reflectance, scattering and transmission of electromagnetic radiation, can be considered as the valuable information source in remote sensing information. The multi-angle earth observation can obtain more detailed and reliable 3-D spatial structure parameters of earth target, which makes the quantitative remote sensing possible. Multi-angle polarized hyperspectrum of vegetation leaves becomes new way for quantitative remote sensing detection. In this study, an orthogonal and two level test containing three factors was designed on the basis of analyzing the characteristics of multi-angle polarized spectrum of vegetation leaves. Analysis of data variance shows that polarized angle, incidence viewing azimuth, the chlorophyll and their interaction effects all have impacts on the polarized reflectance of leaves. The influences of polarized angle, incidence viewing azimuth and their interaction are particularly significant. Hence, not only some single factors but also their interaction effects should be considered in the future studies of vegetation leaves polarized reflectance.

Key words: multi-angle; polarization; hyperspectral; interaction effects

收稿日期:2009-04-11,修回日期:2009-09-25

Received date: 2009-04-11, revised date: 2009-09-25

基金项目:国家自然科学基金(40771153);东北师范大学科技创新平台培育项目(106111065202);国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB426305);中央高校基本科研业务费专项资金(09SSXT130)

作者简介:韩 阳(1983-),女,哈尔滨市人,博士研究生,现主要研究方向为定量遥感与偏振光遥感,E-mail:hany025@nenu.edu.cn.

* 通讯作者: E-mail:zhaos975@nenu.edu.cn.

引言

随着遥感应用的深入研究,人们越来越注意到角度信息可能在遥感影像识别和分类中所做的贡献.美国科学家 Suits、Hapke 等及中国的李小文等人对二向性反射做了分布函数(BRDF)的研究,以期实现对目标地物的空间结构的识别与反演^[1~3].偏振反射是二向反射的孪生姊妹,人们在对二向反射进行研究的同时也势必要对它的偏振反射进行一定的研究^[4,5].法国空间研究中心(CNES)对偏振光遥感的机理、仪器设计、模型建立等方面进行了研究,于1992年成功研制出POLDER^[6].高光谱遥感具有窄波段、多通道、图像与光谱合二为一的优点,它以纳米级的超高光谱分辨率和几十或几百个波段同时对地表地物成像,能够获得地物的连续光谱信息.高光谱遥感的发展,为定量分析植被叶片与光谱特征的关系提供了有力的工具^[7].

考虑以上因素的同时,还考虑到因素间的交互作用^[8].交互作用是要素之间互相影响、互相关联的关系.影响因素的交互作用在自然界中是普遍存在的,在医药学、农学、化工等领域,交互因素都是被重点研究的对象.那么,在影响植物叶片偏振反射的各因素之间,是否也存在着交互作用呢?以丁香叶片为例,分析其多角度、偏振、高光谱特征,对影响叶片偏振反射的偏振角度、入射天顶角及叶片的叶绿素含量进行综合的比较研究,并验证这三个影响因素之间存在着对偏振反射的交互影响作用.

1 实验方法及交互实验设计

1.1 实验方法

本实验从2008年8月20日开始,在东北师范大学校园内每隔5~7天采集一次样本,每次采集6组样本,到10月18日进行最后一组试验.为了排除其他条件的影响,所有叶片都采自同一棵丁香树,采集时间均为早上8点左右.叶片采集过程如下:每片叶子采下后立即装进自封袋封好,用湿毛巾包上,并对其进行编号;将叶片带到实验室后,用清水轻轻洗去表面的灰尘,再用吸水纸吸干;用剪刀沿叶脉将叶片一分为二,一半用来测叶绿素含量,另一半在偏振光谱实验室测量光谱反射率.

叶绿素含量采用80%丙酮溶液实验室萃取法获取.取新鲜叶片约0.2g左右,用分析天平(精度0.0001g)称量其精确质量.放入研钵中,加少量碳酸钙粉及80%丙酮溶液,研成匀浆,至组织变白后静

置3~5min.将匀浆过滤到25ml容量瓶中定容.用分光光度计分别在波长665nm和649nm下测定吸光度.根据式(1)、(2)计算出叶绿素a、b的浓度(Ca、Cb:mg/L),二者之和为叶绿素总浓度.再根据式(4)计算出植物叶片叶绿素含量(mg/g)

$$Ca = 13.95 \times A_{665} - 6.88 \times A_{649} \quad , \quad (1)$$

$$Cb = 24.96 \times A_{649} - 7.32 \times A_{665} \quad , \quad (2)$$

$$\text{叶绿素的浓度} = Ca + Cb \quad , \quad (3)$$

$$\text{叶绿素含量(mg/g)} = (\text{叶绿素的浓度} \times \text{提取液体积} \times \text{稀释倍数}) / \text{样品鲜重} \quad (4)$$

实验中采用中国科学院长春光学精密机械研究所研制的二向反射光度计(专利号:96239489.0)和Ocean Optics公司生产的USB2000系列高光谱仪进行光谱测量.二向反射光度计主要由三大部分组成:光源系统、二向反射光度计系统和控制系统.可从多个观测点全方位地测量地物反射辐射,该光度计以镍钨灯作为光源,在0°~70°范围内每隔10°为一个光源入射天顶角;在探测架上设有0°~60°的7个探测头,间隔为10°.光源与探测器之间从0°~360°每隔10°为一个探测方位(180°是镜面反射方向).该设备还配有偏振镜头,能够任意角度旋转.高光谱的波长探测范围是200~1100nm,探测光纤的视场角为25°,积分时间为3ms~65s,每13ms数据传输速率刷新内存一次,启动USB2000型光谱仪时将自动读取波长校准参数及OOIBase32TM操作软件数据.

1.2 交互实验设计

试验设置三个因素,分别为偏振角度(A)、入射天顶角(B)和叶绿素浓度(C).因素A有两个水平,分别为A1=0°和A2=90°;因素B有两个水平,分别为B1=30°和B2=50°;因素C有两个水平,以任意选择两个叶片为例,其浓度分别为C1=1.9787mg/g和C2=3.2495mg/g.正交设计方案如表1所示.

实验中,我们要上面所示的3个因素之间两两

表1 因素水平表

Table 1 Levels of factors

水平 \ 因素	偏振角 A	入射天顶角 B	叶绿素含量 C
1	0°	30°	1.9787 mg/g
2	90°	50°	3.2495 mg/g

表2 正交实验表头设计方案

Table 2 Design of the orthogonal test

列号	1	2	3	4	5	6	7
因素	A	B	A×B	C	A×C	B×C	

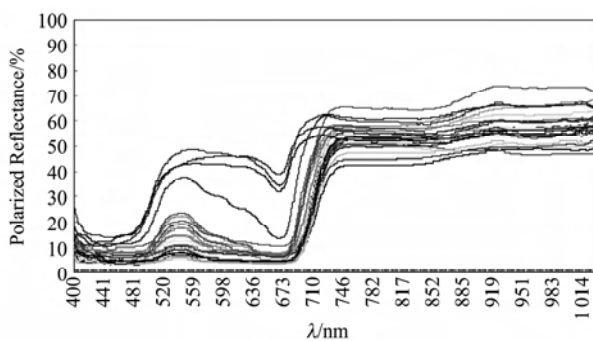


图1 0°偏振时的丁香叶片多角度高光谱特征图
Fig. 1 Curves of multi-angle hyperspectra for clove leaves when the polarized angle is 0°

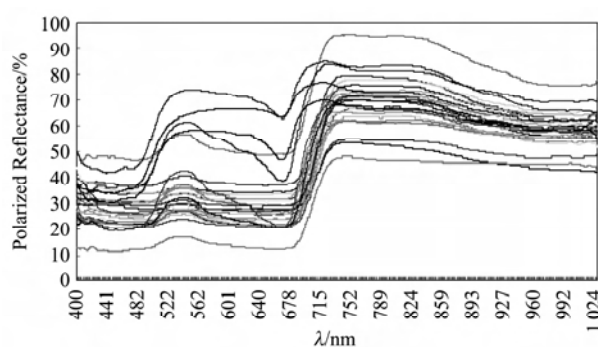


图2 90°偏振时的丁香叶片多角度高光谱特征图
Fig. 2 Curves of multi-angle hyperspectra for clove leaves when the polarized angle is 90°

交互作用,那么一共就要有6个因素.为了科学地反映各因子之间的关系,我们需要进行正交实验^[8].由正交表 L8(27)得实验表头设计方案,如表2.

2 结果与讨论

2.1 丁香叶片多角度偏振高光谱特征分析

2.1.1 不同偏振状态下的丁香叶片多角度高光谱特征分析

图1和图2是0°和90°偏振状态时丁香叶片样本在相同入射天顶角度(50°)下的高光谱反射率图.这与传统的垂直入射角度的高光谱反射率图相似:在470nm和670nm附近有两个明显的吸收谷,分别为蓝紫谷和红谷,550nm处附近为绿峰,在约680nm处反射开始率迅速升高,形成在720~770nm的近红外高反射平台.而且,90°偏振状态时明显要比0°偏振时的反射率要高,其平均值与BRDF值相近.这是由于90°偏振方向为透光轴方向,而0°偏振方向为消光轴方向,所以在相同光源下,90°偏振方向所获得的能量要多于0°偏振方向,其90°偏振状态下的反射率高于相对应的0°偏振状态的值.

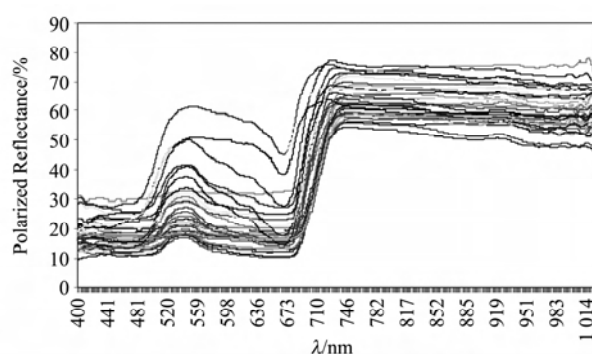


图3 入射天顶角与探测方位角相等且都为30°时的丁香叶片高光谱偏振反射特征图

Fig. 3 Curves of hyperspectra polarized reflectance for clove leaves when incidence angles and viewing zenith angles both are 30°

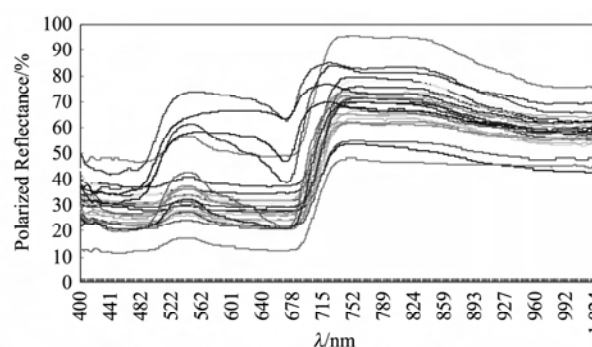


图4 入射天顶角与探测方位角相等且都为50°时的丁香叶片高光谱偏振反射特征图

Fig. 4 Curves of hyperspectra polarized reflectance for clove leaves when incidence angles and viewing zenith angles both are 50°

2.1.2 不同入射天顶角、探测方位角下的丁香叶片偏振高光谱特征分析

图3和图4是丁香叶片样本在入射天顶角为50°和30°时,探测方位角和入射天顶角相同时的高光谱反射率图.可以看出,在50°时的偏振反射比30°时要大,这是因为入射天顶角越大,越接近垂直方向,所获能量也会越多,所以50°入射天顶角时叶片所获得的能量比30°大,相应的50°时的偏振反射率大于30°时的偏振反射率.

2.2 丁香叶片微分光谱特征

在太阳光的大气窗口范围内,遥感所测得光谱(波谱)是众多地物吸收光谱及大气吸收和散射光谱的混合光谱,一般是以反射率的数据图像表达.为了正确地解译遥感数据图像,从中提取目标物的特征信息,并且消除大气和背景的影响,人们使用微分光谱技术,光谱微分技术在一定程度上可以减少大气和背景对光谱的影响.微分光谱是针对高光谱而

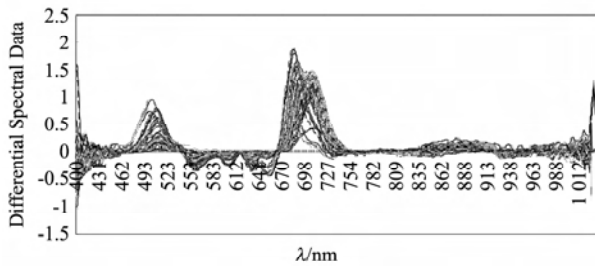


图5 全部样本微分光谱曲线图

Fig.5 Curves of the differential spectrum for whole samples

言的,一阶微分的计算公式如下:

$$R(\lambda_i)' = \frac{R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_{i-1})}{\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}}, \quad (5)$$

其中, λ_i 是波段 i 的波长值, $R(\lambda)$ 是波段 λ 的反射率.

依照式(5),计算光谱曲线的一阶导数.如图5所示,为全部样本的一阶导数图.红边就是植物反射光谱曲线上斜率最大时所对应的波长,位于 680 ~ 740nm 之间.研究表明,红边在反射率的一阶导数曲线里很重要.当植物生物量、叶绿素含量高,生长力旺盛时,红边会向长波方向“红移”;而当植物受到污染和病虫害等原因导致植物长势不好时,红边就会向短波方向“蓝移”.

2.3 交互作用影响定量分析

2.3.1 数据的采集结果

根据实验设计方案,测量了各种因素不同水平组合下的多角度高光谱偏振反射率,各因素对偏振反射的影响用红边的反射率定量表示,如表3.其中 K1、K2 为各因素不同水平的均值, R 为极差,“1”和“2”分别代表各因素的水平.虽然 $A \times B$ 、 $A \times C$ 和 $B \times C$ 三列中的“1”和“2”没有实际意义,但它们计算的极差 R 是有统计意义的.

2.3.2 数据的直观比较分析

极差越大则该因素对偏振反射的影响就越大.按照表3中的极差大小,得到3个因素和它们交互作用的主次关系如下:

主 $\xrightarrow{B \quad A \quad A \times B \quad C \quad B \times C \quad A \times C}$ 次

表3 不同偏振角、入射天顶角和叶绿素含量下的正交实验计算结果

Table 3 Calculation results of the orthogonal test data for different polarized angles, incidence viewing azimuths, and the chlorophyll contents

	A	B	A×B	C	A×C	B×C
K1	70.4406	67.9845	97.4470	86.4493	90.0617	88.4644
K2	110.9502	113.4063	83.9438	94.9415	91.3292	92.9265
R	40.5096	45.4217	13.5033	8.4921	1.2675	4.4621

表4 方差分析表

Table 4 Variance analysis of the orthogonal test data

方差来源	平方和	自由度	均方	F	显著性
B	257.8917	1	257.8917	29.6732	特别显著
A	205.1288	1	205.1288	23.6023	特别显著
A×B	22.7923	1	22.7923	2.6225	显著
C	9.0145	1	9.0145	1.0372	有一定的影响
B×C	2.4888	1	2.4888	0.2864	
A×C	0.2008	1	0.2008	0.0231	
误差	8.6911	1	8.6911		
总和	506.2080	7			

2.3.3 数据的方差分析

对这3个因素和它们交互作用因素进行方差分析,在此约定一个因素(或交互作用)的 F 值,如大于 1% F 表上的数,该因素影响特别显著;如介于 5% 和 1% F 表上值之间,该因素影响显著;如介于 20% 和 5% F 表上值之间,该因素对偏振反射有一定的影响;如小于 20% F 表上值,可认为该因素对偏振反射没有多大影响.由上面的3个因素及其交互作用主次关系和表4我们可知,入射天顶角和偏振角对叶片的偏振反射的影响最大,其次是它们的交互作用对偏振反射的影响,之后才是叶绿素、叶绿素和其它因素的交互作用的影响.偏振角和入射天顶角对叶片的偏振反射起到的影响特别显著,二者的交互作用比叶绿素的含量对植物叶片的影响要大.

3 结论

上述丁香叶片的偏振多角度高光谱特征和正交实验及方差分析可以得出以下结论:

(1) 在相同入射天顶角下,丁香叶片多角度高光谱图中 90° 偏振状态的偏振反射比大于 0° 偏振状态的偏振反射比;

(2) 在相同偏振状态下,不同入射天顶角度的偏振高光谱图中,入射天顶角越大,其偏振反射比也越大,这与其获得的能量有关;

(3) 偏振角、入射天顶角、叶绿素以及三个因素之间的交互作用都可以对植物叶片的偏振反射产生影响;

(4) 偏振角和入射天顶角对植物叶片的红边反射率的影响特别显著;偏振角和入射天顶角的交互作用对植物叶片的红边反射率影响显著;叶绿素对植物叶片的红边反射率具有一定影响;

(5) 偏振角、入射天顶角及二者的交互作用对植物叶片的红边反射率的影响比叶绿素、叶绿素和

其它因素的交互作用的影响大。

根据本文研究的结果,建议在进行植物叶片的偏振反射及二向反射的研究时要注意以上几种因素的影响作用,尤其是这些因素的交互影响作用。孤立地考虑这些因素对植物叶片偏振反射的影响是不全面的,进而对于现有遥感传感器在植被偏振遥感器的设计提供理论依据。

REFERENCES

- [1] Suits G H. The cause of azimuthal variations in directional reflectance[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1972, **2**: 175—182.
- [2] Hapke B W. *Theory of Reflectance and Emission Spectroscopy*[M]. Cambridge, U. K.: Cambridge Univ. Press, 1993.
- [3] Li X W, Strahler A H. Geometric optical modeling of acorniferous forest canopy[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, **23**(2): 207—221.
- [4] HAN Yang, ZHAO Yun-Sheng, ZHAO Nai-Zhuo, *et al.* Effects of multi-angle hyperspectral polarized reflection by forest soil[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*(韩阳, 赵云升, 赵乃卓, 等. 森林土壤多角度高光谱偏振反射影响研究初探. *光谱学与光谱分析*), 2009, **29**(3): 702—706.
- [5] HAN Yang, ZHAO Yun-Sheng, ZHANG Li-Li, *et al.* Study on the modeling of hyperspectral polarized reflection of clove lamina with chlorophyll content[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*(韩阳, 赵云升, 张莉莉, 等. 丁香叶片叶绿素含量偏振高光谱数学模型反演研究. *光谱学与光谱分析*), 2009, **29**(6): 1595—1598.
- [6] Deschamps P Y, Breon F M, Leroy M, *et al.* The POLDER Mission: instrument characteristics and scientific objectives [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, **32**(3): 598—615.
- [7] WAN Yu-Qing, TAN Ke-Long, ZHOU Ri-Ping, *et al.* *Hyperspectral Remote Sensing Application and Investigation*[M](万余庆, 谭克龙, 周日平, 等. *高光谱遥感应用研究*. 北京: 科学出版社), 2006: 137—141.
- [8] FANG Kai-Tai, MA Chang-Xing. *Even experiment and orthogonal experiment*[M]. (方开泰, 马长兴. *均匀实验与正交实验*. 北京: 科学出版社), 2001, 35—77.
- [8] Zhang J K, Rivard B, Rogge D M. The successive projection algorithm(SPA), an algorithm with a spatial constraint for the automatic search of endmembers in hyperspectral data[J]. *Sensors*, 2008, **8**(2): 1321—1342.
- [9] LUO Wen-Fei, ZHONG Liang, ZHANG Bing, *et al.* An spectral unmixing algorithm for hyperspectral image based on the distance to subspace[J]. *Progress in Natural Science*(罗文斐, 钟亮, 张兵, 等. 基于子空间距离的高光谱图像光谱解混算法, *自然科学进展*), 2008, **18**(10): 1175—1180.
- [10] Zhang Xian-Da. *Matrix analysis and applications*[M]. Beijing: Tsinghua University Press(张贤达. *矩阵分析与应用*. 北京: 清华大学出版社), 2004, 344-358.
- [11] Abrams M, Ashley R, Rowan L, *et al.* Mapping of hydrothermal alteration in the Cuprite Mining District, Nevada, using aircraft scanner images for the spectral region 0.46 to 2.36 mm[J]. *Geology*, 1997, **5**(12): 713—718.

(上接 311 页)