

基于地表偏振反射模型的植被冠层偏振反射特性研究

孙仲秋 赵云升

东北师范大学地理科学学院, 吉林 长春 130024

摘要 基于野外与实验室多角度偏振测量信息与偏振反射物理机理,分析了不同植被冠层的偏振反射特性,同时得到了两个地表偏振反射模型的参数。结果发现,植被冠层的偏振反射比值与入射、探测几何相关;植被冠层的偏振反射具有明显的各向异性特征,且与植被冠层的结构形态相关;地表测量的植被冠层偏振反射比可达0.095,远大于以往结果;偏振反射模型可以有效地计算出一般植被冠层的偏振反射信息,但是对于完全平展型且有光滑叶片的冠层却会出现较大误差。

关键词 遥感; 偏振遥感; 植被冠层; 偏振反射模型

中图分类号 TP72 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.102802

Polarized Reflectance Characteristics of Vegetation Canopies Based on Polarization Reflection Model

Sun Zhongqiu Zhao Yunsheng

School of Geographical Science, Northeast Normal University, Changchun, Jilin 130024, China

Abstract The polarized reflectance characteristics of different vegetation canopies are analyzed based on field and laboratory multi-angle polarization measurements and physical mechanism of polarized reflectance. The parameters of two polarized reflectance models are obtained respectively. The results show that the polarized reflectance factors of vegetation canopies depend on the geometry of viewing and incident angle, the distribution of polarized reflectance of vegetation canopies is anisotropic and related to the structure of canopies. The polarized reflectance ratio reaches 0.095, much larger than the previous results. The polarized reflectance factors of vegetation canopies are effectively calculated by the polarized reflectance models, but there will be a large error when for flat-type and smooth blade canopies.

Key words remote sensing; polarized remote sensing; vegetation canopies; polarized reflectance model

OCIS codes 280.4991; 290.5855; 290.1483

1 引言

植被是全球生态系统、气候变化、水文循环以及地表能量平衡研究中重要的指示性指标,不仅在区域尺度范围内开展了关于植被的研究,而且随着植被研究所受的关注程度逐渐增加,该研究已经扩展到全球尺度范围^[1]。植被覆盖地表区域的特征参数可以通过植被反射光谱信息直接或者间接地反演,该依据促使遥感监测与反演技术成为研究全球植被特征的重要手段^[2]。除了反射强度信息之外,光学遥感中的偏振信息已成为表征地表物理特征的另一有效信息^[3]。偏振信息可以用于区分植被类型,估算植被的生物量以及评价植被冠层的叶片倾斜角度^[4-5]。一系列关于植被单叶片与植被冠层偏振反射特性的研究主要针对植被叶片的偏振反射特性^[6-8]。另外,植被冠层的几何形态特征也会对其偏振反射特性产生影响^[7-8],叶片产生的镜面反射是引起植被冠层偏振特性的主要原因,叶片的方向又会改变植被冠层偏振反射的大小^[4-8]。这些研究结果不仅解释了植被冠层产生偏振信息的原因,而且说明了偏振信息在植被遥感研究中的重要意义^[9]。

收稿日期: 2016-06-20; **收到修改稿日期:** 2016-06-23; **网络出版日期:** 2016-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(41401379)

作者简介: 孙仲秋(1986—),男,博士,讲师,主要从事偏振光遥感与定量遥感方面的研究。E-mail: sunzq465@nenu.edu.cn

目前,已经有航空与航天偏振探测器可以直接获取地表的偏振信息,其中包括 RSP^[10] 以及 POLDER^[11], 虽然后者已不再工作,但其获取的偏振信息成为了偏振遥感研究发展过程中重要的参考依据。与 POLDER 相似的 PARASOL 也成为另一个获取地表和大气偏振信息的偏振探测器,并且已经开始对地表植被等其他地物进行探测与分析^[12]。基于上述偏振探测器,研究者在分析地表偏振反射过程中发现,将实际测的偏振测量信息与偏振反射模型相结合,对植被自身反射特性的解释以及研究植被对大气偏振影响的研究具有重要意义^[12-14]。中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室^[15-17] 以及中国科学院合肥物质科学研究院中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室^[18-19] 的研究中包括了植被在内的大部分地物,对于促进偏振遥感的发展具有重要作用。

关于地表植被偏振遥感的研究均利用高空平台获取的偏振信息进行分析,该探测过程中植被冠层所产生的偏振信息是经过大气偏振影响而到达传感器的。因此,所获得的偏振信息并不是完全由植被冠层所产生的。若想得到最真实的偏振反射信息,开展地表野外测量与实验室测量必不可少。现阶段,只有芬兰大地测量研究所报道过在地表开展的野外与实验室植被冠层偏振测量研究^[6,20],但其仅分析了植被冠层的偏振反射特性,并没有与偏振反射模型结合。由于偏振反射模型是与入射、探测几何相关的函数,可以通过测量适量方位的偏振反射信息来拟合模型参数,并利用模型计算未进行测量方向的偏振反射信息,即可得到任意方向的偏振反射信息,从而建立地表特征参数与特殊方向偏振信息之间的关系,或者将地表偏振信息与大气偏振信息进行分离。

本文基于野外与实验室植被冠层偏振测量结果分析植被冠层偏振反射特性,并结合偏振反射模型,给出植被冠层对应的模型参数。该研究将为植被偏振遥感以及植被背景下大气偏振特性的研究提供科学、可靠的参考依据。

2 基本原理

选择两个最为常用的偏振反射模型,分别是文献[14]和文献[12]提出的偏振反射模型,两者均已应用在地表偏振反射特性研究过程中,并且在大气偏振研究中利用这两个模型将地表贡献进行剥离^[13-14]。其中,采用菲涅耳偏振反射系数 $F_p(\alpha, n)$ 表示植被冠层的偏振反射特性^[4-5,7-9,12-14]。

$$F_p(\alpha, n) = 0.5 \left[\frac{\sin^2(\alpha_t - \alpha)}{\sin^2(\alpha_t + \alpha)} - \frac{\tan^2(\alpha_t - \alpha)}{\tan^2(\alpha_t + \alpha)} \right], \quad (1)$$

$$\sin \alpha_t = \sin \alpha / n, \quad (2)$$

$$\cos 2\alpha = \cos \theta_s \cos \theta_v + \sin \theta_s \sin \theta_v \cos(\varphi_s - \varphi_v), \quad (3)$$

式中 θ_s 为入射天顶角, θ_v 为探测天顶角, φ_s 为入射方位角, φ_v 为探测方位角, α 为反射角,等于相角的一半, α_t 为折射角, n 为植被的折射率,取值 1.5^[12-14]。Breon 等^[21] 基于菲涅耳偏振反射系数提出了植被冠层的偏振反射模型,该模型假设植被冠层是均匀分布的,即

$$R_p(\theta_s, \theta_v; \varphi_s, \varphi_v) = \frac{F_p(\alpha, N)}{4(\cos \theta_s + \cos \theta_v)}. \quad (4)$$

Nadal 等^[14] 在分析 POLDER 数据过程中,将该模型修改为包含两个自由参数(D 与 B)的半经验偏振反射模型,即 NB 模型,

$$R_p(\theta_s, \theta_v; \varphi_s, \varphi_v) = D \left\{ 1 - \exp \left[-B \frac{F_p(\alpha, N)}{\cos \theta_s + \cos \theta_v} \right] \right\}. \quad (5)$$

为了将(5)式表示为 NB 偏振模型, Maignan 等^[12] 基于 PARASOL 数据提出了另一个偏振反射模型,即 M 模型,

$$R_p(\theta_s, \theta_v; \varphi_s, \varphi_v) = \frac{C \cdot \exp(-\tan \alpha) \cdot \exp(-\nu) F(\alpha, n)}{4(\cos \theta_s + \cos \theta_v)}, \quad (6)$$

该模型为单参数偏振反射模型,只包含一个自由参数 C , 式中 ν 为植被指数,可以采用归一化植被指数 (NDVI) 代替^[13]

$$\nu_{\text{NDVI}} = \frac{R_{865} - R_{670}}{R_{865} + R_{670}}, \quad (7)$$

式中 R_{865} 与 R_{670} 分别为 865 nm 和 670 nm 的反射比值。将(6)式表示为 M 偏振模型。本文以 NB 和 M 偏振反射模型为主,基于野外与实验室测量结果得到模型参数。

3 实验系统及测量结果

3.1 实验材料

实验测量包括野外测量与实验室测量。野外测量的植被为茶条槭冠层(植被 A),实验室测量的植被为菜豆树(植被 B)以及豆叶九里香(植被 C)。测量过程以及样品的照片如图 1 所示。野外选择的植被冠层为城市郊区的绿化植被,同时也是林区的主要作物之一。实验室内的植被冠层为盆栽植物,其中菜豆树以及豆叶九里香植被均为幼树。选择这 3 种植被冠层是由于它们为阔叶树,而且叶片无毛,有较厚的蜡质层覆盖,其中植被 A 与植被 B 的冠层属于近近平展型的,而植被 C 为完全平展型。



图 1 测量植被冠层示意图。(a)茶条槭;(b)菜豆树;(c)豆叶九里香

Fig. 1 Pictures of vegetation canopies. (a) *Acer ginnala* Maxim; (b) *Radermachera sinica* Hemsl; (c) *Murraya euchrestifolia* Hayata

3.2 测量设备

野外测量过程中,测量地点在长春市北郊区,测量时间为 2014 年 7 月 16 日 10:40 至 13:10,天空晴朗无云。所使用的设备有野外多角度测量装置、ASD 地物光谱仪(350~1000 nm 波段范围)以及偏振探头,如图 1(a)所示。野外多角度测量装置由基座与旋转半圆弧组成,其中基座为直径 0.8 m 的圆环,旋转半圆弧的直径也为 0.8 m,安装在基座上,可以实现 360°全方位旋转(1°精度),而且半圆弧可以在任意方位实现 $\pm 90^\circ$ 探测天定方向的测量,精度为 2°。理论上可以在任意方向探测目标的反射信息,不过由于多角度装置自身结构的限制,在主平面后向散射方向只能探测到相角大于 10° 的范围。

冠层偏振信息测量过程中,在探测器光纤前端增加汤普森棱镜。野外测量过程中,探测天顶角每 10° 间隔测量,测量范围为 $0^\circ \sim 70^\circ$,探测距离为 0.4 m;方位角每隔 15° 测量一次,并且假设植被冠层的反射具有对称性^[6,12,14]。因此,共获取了 91 个方向的偏振信息以及反射信息。太阳入射天顶角在 $38.5^\circ \sim 41^\circ$ 之间变化,在模型输入时将其定为 40° ,因此,主平面内后向散射方向探测天顶角为 40° 时没有进行探测。该偏振信息将作为本文的主要参考依据。

实验室测量主要使用东北师范大学地理科学学院自行研制的多角度测量装置^[22-24],该系统已经测量了土壤、冰雪以及水体这些典型地物的双向反射和偏振反射特性,为了与室外实验进行匹配,在实验室内测量时,将入射天顶角固定为 40° 、方位间隔为 15° ,探测天顶角范围为 $0^\circ \sim 60^\circ$,探测距离为 0.4 m 共在 78 个方向进行了测量。测量过程中,通过调整载物台的高低,使植被冠层处在测量基准面上,以确保测量的准确性,同时,利用水准泡调整测量装置基座与大地水平面水平,保证测量基准面水平。无论是在野外测量还是实验室测量,视场角均为 8° 。

3.3 数据测量

在描述反射光的偏振信息过程中,斯托克斯参量的测量可以实现定义反射光偏振状态所需要的参数为^[3]

$$\begin{cases} I = (I_{0^\circ} + I_{90^\circ} + I_{45^\circ} + I_{135^\circ})/2 \\ Q = I_{0^\circ} - I_{90^\circ} \\ U = I_{45^\circ} - I_{135^\circ} \\ V = I_r - I_l \end{cases}, \quad (8)$$

式中 I_{0° 、 I_{90° 、 I_{45° 、 I_{135° 、 I_l 、 I_r 分别为偏振片透光轴方向在相对本地子午面 0° 、 90° 、 45° 、 135° 方向上的由探测器获得的线偏光以及左旋和右旋圆偏振光的强度,一般在研究自然地物的偏振反射光过程中, V 参量忽略不计^[3]。本文主要考虑测量的偏振反射比 R_{pm} ,参照双向反射比值的定义^[25],偏振反射比值可以表示为在相同入射与探测环境下,目标偏振反射光与理想朗伯体反射光之间的比值

$$R_{pm} = \frac{I_p}{L} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{L}, \quad (9)$$

式中 L 为标准白板的反射辐射亮度值, I_p 为植被冠层的偏振反射辐射亮度值,两者的测量环境相同。除了偏振反射比之外,在野外测量了植被冠层的半球方向反射比值(HDRF)以及实验室内的双向反射比值(BRF)^[25],可分别表示为

$$R_{HDRF} = \frac{L_v(\theta_s, \theta_v, 2\pi; \phi_s, \phi_v)}{L(\theta_s, \theta_v, 2\pi; \kappa_s, \phi_v)}, \quad (10)$$

$$R_{BRF} = \frac{L_v(\theta_s, \theta_v; \phi_s, \phi_v)}{L(\theta_s, \theta_v; \phi_s, \phi_v)}, \quad (11)$$

式中 L_v 为植被冠层的反射辐射亮度值。

4 结果与分析

4.1 植被冠层反射特性

为了确保测量信息的可靠性,在分析植被冠层偏振反射比值之前,对其 BRF 进行分析。图 2 所示为不同植被冠层的反射光谱特性,野外与实验室测量时的入射天顶角均为 40° 。可见,3 种植物均在绿光波段具有一个相对反射峰值,最高反射出现近红外波段,这一特征符合植被冠层反射光谱特性^[1-2]。图 3 所示为不同植被冠层在 865 nm 波段的双向反射分布特性,入射天顶角为 40° ,其中 0 和 180 分别表示后向和前向散射方向,图中心为垂直探测方向。可见,植被冠层具有明显的各向异性特征,而且存在热点效应,这是由于后向散射方向探测时,植被本身会遮挡其产生的阴影,从而使反射信息增加;在其他方向均会有叶片自身产生的阴影进入到探测器探测范围之内,降低反射^[26]。基于反射测量,在相同探测环境下对不同植被冠层偏振反射信息进行测量。

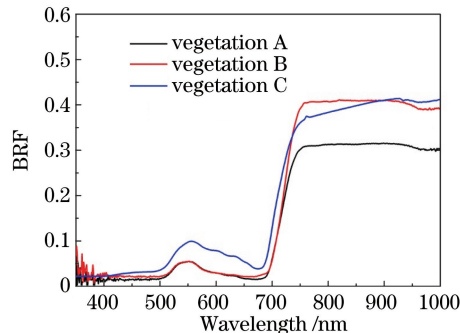


图 2 不同植被冠层的反射光谱特性

Fig. 2 Reflectance spectrum of different vegetation canopies

4.2 植被冠层偏振反射特性

依据(9)式给出的植被冠层偏振反射比值的方法,首先在图 4 中给出不同植被冠层偏振光谱反射特性,图中入射天顶角为 40° ,在前向散射方向的主平面内以 50° 探测天顶角获取的偏振信息。从图中可见,在 440 nm 之后,偏振反射比值几乎与波长无关,这是由于偏振信息是由镜面反射产生的,而镜面反射是将所有波段的能量均按照相同的比例反射出去,从而不会产生随波长变化而改变的现象,该现象已得到证

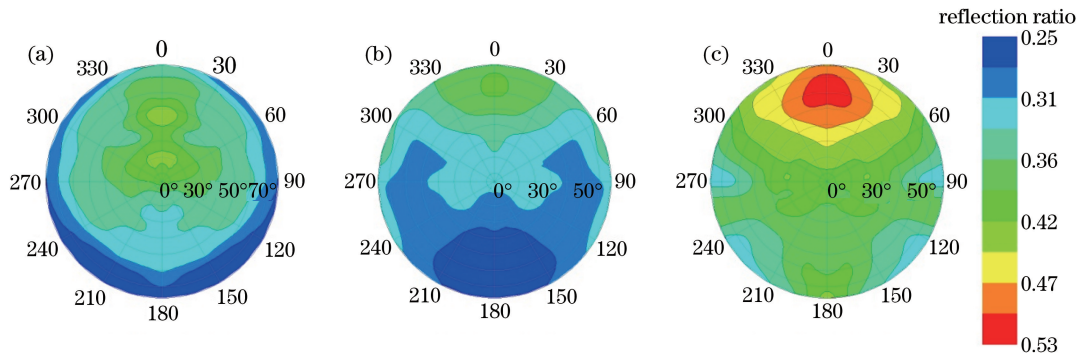


图3 不同植被冠层在 865 nm 的双向反射比值分布特性。(a) 植被 A; (b) 植被 B; (c) 植被 C

Fig. 3 Distribution of BRF with different vegetation canopies at 865 nm. (a) Vegetation A; (b) vegetation B; (c) vegetation C

明^[5-8,12-14]。不过,在350~440 nm波段范围内,偏振反射比值随波段的增加而变大,这一现象无论是在实验室内测量还是在野外测量均存在。然而,在以往国内外关于植被偏振测量的研究中,均没有在该波段获得偏振信息。但是,通过分析汤普森棱镜的透射光谱曲线可以发现,棱镜本身会在350~440 nm具有强吸收特性,可以很好地解释该测量结果。依据图4还可以清晰地发现,植被A与B的偏振反射比值小于植被C,这是由于植被C的冠层属于平展型^[26],叶片形状最规则,叶片表面粗糙起伏程度最小、叶片表面蜡质层明显,而且叶片倾斜角度最大,几乎为平面,如图1所示。这就意味着植被C的冠层更容易产生镜面反射^[26],从而使偏振反射比值最大,结果如图4所示。

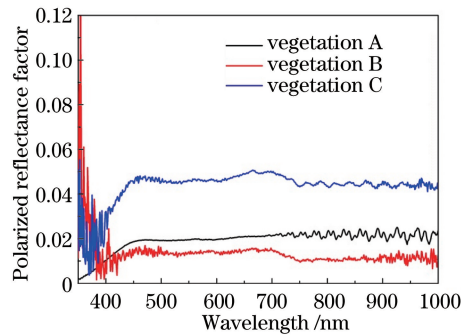


图4 不同植被冠层偏振光谱特性

Fig. 4 Polarization spectral characteristics of different vegetation canopies

对偏振反射比值分布特性的研究主要集中在560、670、865 nm这3个波段,这是由于POLDER以及RSP均可以在这3个波段获取地表偏振信息^[10-11]。植被冠层的偏振反射比随波长的变化非常小^[12-14],因此,以670 nm为代表,分析不同植被冠层偏振反射分布特性,结果如图5所示。可见,所有植被冠层偏振反射比的最大值均出现在前向散射方向,而且随着相角的变化逐渐减小,这一变化规律与以往研究结果相同^[4-9,12-19]。此规律可以依据菲涅耳偏振反射系数公式很好地解释,如(1)式所示。不过,研究中植被冠层C的偏振反射比可以达到0.095,远超过了Nadal等^[14]提出的植被冠层偏振反射比在小于0.02的范围之内。这是由于,以航空偏振测量平台测量地表植被冠层,无论在多么晴朗的天空,均会受到探测器与地表之间大气偏振的干扰。而在野外与实验室测量获取的植被冠层偏振反射信息,探测距离均为0.4 m,可以忽略探测器与植被冠层之间大气偏振的影响,获得的偏振信息均是植被冠层固有的偏振特性。其他两个波段的偏振反射比值与670 nm的分布特性相似,此处不再表述。

4.3 偏振反射模型参数与模拟结果

为了对比测量值与模型计算值,利用最小二乘拟合法反演模型参数,其中,均方根误差(RMSE)作为拟合测量值与模型计算值的差异,可表示为

$$E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_{\text{pm}} - R_{\text{pmd}})^2}{n}}, \quad (12)$$

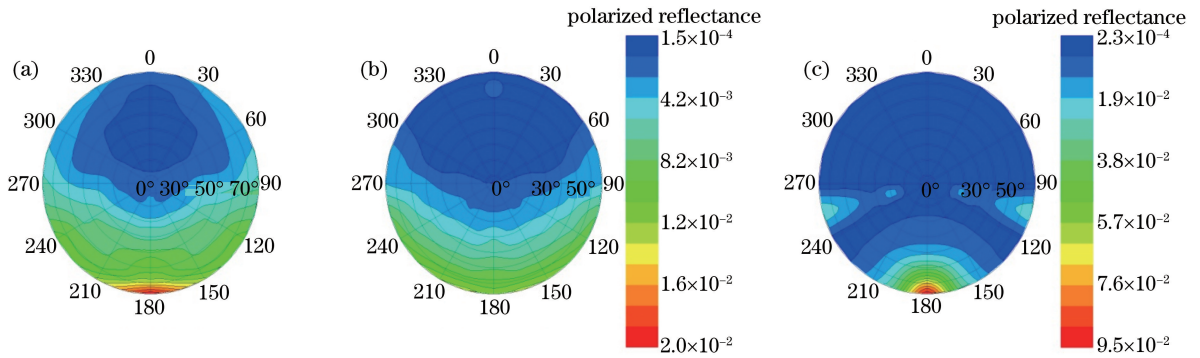


图 5 不同植被冠层在 670 nm 的偏振反射分布特性。(a) 植被 A; (b) 植被 B; (c) 植被 C

Fig. 5 Polarized reflectance distributions of different vegetation canopies at 670 nm.

(a) Vegetation A; (b) vegetation B; (c) vegetation C

式中 R_{pm} 为实际测量值, R_{pmd} 为模拟计算值, n 为测量总数减去模型参数的数量。模型参数如表 1 与表 2 所示, 其中, 表 1 为 NB 偏振反射模型在不同波段对应的模型参数, 表 2 为 M 偏振反射模型在不同波段对应的模型参数。Nadal 等^[14] 在应用中提到 $D \times B$ 的范围为 $[0.78, 1.17]$, 相坤生等^[17] 指出该范围为 $[0.998, 1.73]$, 而研究中该值范围为 $[0.325, 1.22]$ 。近期关于地表偏振反射特性的研究表明, $D \times B$ 的范围不能用来确定地表类型, 这是由于 NB 模型为非线性模型, D 与 B 在拟合过程中会出现多解使测量值与计算值吻合。与 NB 偏振反射模型不同之处在于, M 偏振反射模型为线性模型, 模型参数 C 增加, 计算的偏振反射比值变大, 因此, 表 2 中植被 C 对应的参数应大于植被 A 与植被 B。同时, 植被 A 与 B 对应的模型参数与 Maignan 等^[12] 的研究结果相似, 这是由于植被 A 与 B 的偏振反射比均小于 0.02, 但是植被 C 具有非常强的镜面反射, 使偏振反射比值增加到了 0.095, 因此不在其测量结果范围之内。

表 1 不同植被冠层在不同波段对应的 NB 偏振反射模型参数

Table 1 NB polarized reflectance model parameters for different vegetation canopies at different wavelengths

Type	Wavelength /nm	D	B	RMSE
Vegetation A	560	0.0151	28.59	0.00094
	670	0.0166	28.094	0.001
	865	0.0081	118.235	0.0012
Vegetation B	565	0.0358	9.088	0.0007
	670	0.036	10.27	0.0004
	865	0.005	180.83	0.0017
Vegetation C	565	8.754	0.0778	0.0068
	670	9.27	0.0805	0.0029
	865	0.0366	33.458	0.0084

表 2 不同植被冠层在不同波段对应的 M 偏振反射模型参数

Table 2 M polarized reflectance model parameters for different vegetation canopies at different wavelengths

Type	Wavelength /nm	NDVI	C	RMSE
Vegetation A	560		6.295	0.001
	670	0.823	7.183	0.0012
	865		6.871	0.0016
Vegetation B	565		6.5454	0.001
	670	0.91	7.371	0.0008
	865		6.055	0.0017
Vegetation C	565		14.403	0.0075
	670	0.908	15.769	0.0079
	865		19.435	0.0082

在确定模型参数之后, 图 6、7 分别为 NB 偏振反射模型以及 M 偏振反射模型对 3 种植被冠层在 670 nm

波段偏振反射比的计算结果,使用的是表1与表2中对应670 nm的模型参数。与图5中的结果对比可以发现,模型计算的偏振反射比值分布在前向散射方向最大,后向散射方向最小,尤其是植被A与B计算结果与测量值非常的接近。不过,在模型模拟植被C的偏振反射比时发现,NB模型计算的最大值为0.032,M模型计算的最大值为0.021,远小于测量最大值0.095,这是由于两个模型均假设植被冠层的叶片是均匀分布的,因此,模拟结果不会出现明显的镜面反射峰值。

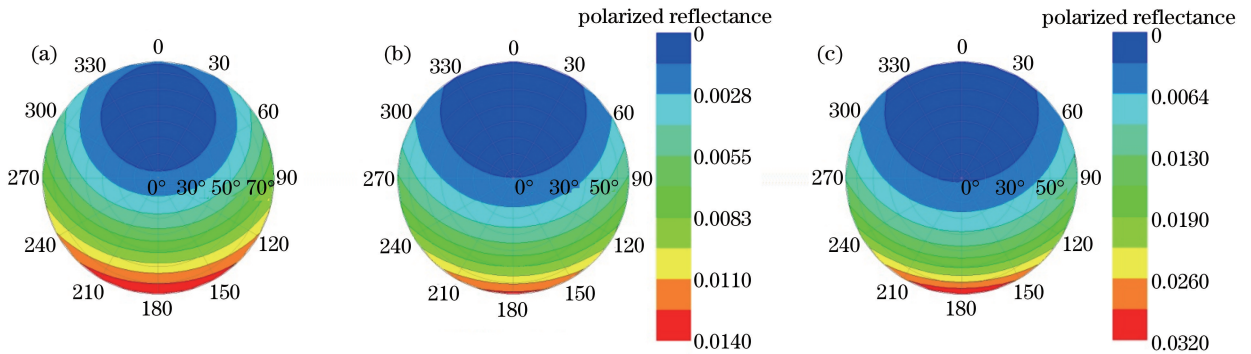


图6 在670 nm处NB偏振反射模型的计算结果。(a)植被A;(b)植被B;(c)植被C

Fig. 6 Calculating results of NB polarized reflectance model at 670 nm. (a) Vegetation A; (b) vegetation B; (c) vegetation C

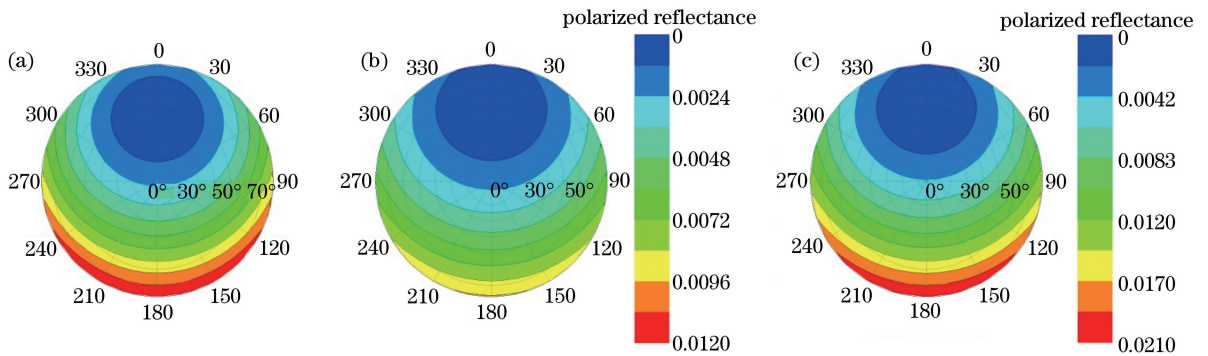


图7 在670 nm处M偏振反射模型的计算结果。(a)植被A;(b)植被B;(c)植被C

Fig. 7 Calculating results of M polarized reflectance model at 670 nm. (a) Vegetation A; (b) vegetation B; (c) vegetation C

为了进一步对比测量结果与偏振反射模型计算值,图8给出了不同植被冠层在560、670、865 nm波段的测量值与模型计算值对比结果。从图中可见,植被A与B在任何波段的测量值都可以很好地利用给出的偏振反射模型计算出来,但是植被C却在镜面反射方向出现了最大偏振反射比值,导致模型计算值与测量值出现较大的差异,相对差异会达到300%。综上所述,3种植被冠层中,植被C的偏振反射比值最高,植被A次之,植被B最低,而且3种植被冠层的偏振反射比值都出现了随相角增加而变大的趋势,这说明无论是在地表测量还是基于航空与航天偏振探测器^[12-14,17],植被冠层偏振反射比随着相角的变化具有固定的规律。

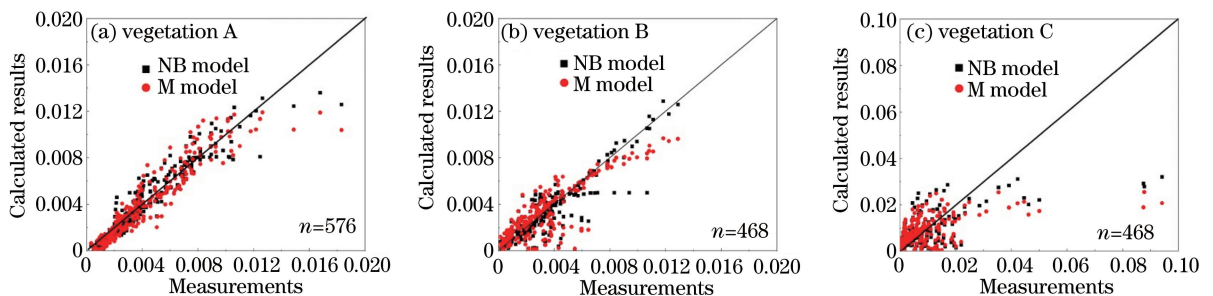


图8 不同植被冠层的测量值与计算值之间对比图。(a)植被A;(b)植被B;(c)植被C

Fig. 8 Comparison between measurements and calculated value of different vegetation canopies.

(a) Vegetation A; (b) vegetation B; (c) vegetation C

5 结 论

基于野外与实验室测量结果,分析了不同植被冠层的偏振反射光谱特性及其偏振反射比分布特性,研究表明,植被冠层的偏振反射比与入射、探测几何有关。叶片形状越规则,叶片表面粗糙度越不明显,蜡质层越明显,冠层越平整,产生的偏振反射比值越大,最大值出现在主平面的前向散射方向,并且随着相角的降低而逐渐变小,菲涅耳偏振反射系数可以合理地解释这一现象。平展型植被冠层产生的偏振比值达到了 0.095,远大于以往研究中给出的植被冠层的偏振反射比值 0.02,这是由于地基测量得到的是地物本质的偏振反射信息,而基于星载或机载测量会受到大气的影响,从而改变植被冠层的偏振反射比值;另一方面,九里香属于比较特殊的平展型植被冠层,本身就会产生较大的偏振信息。

基于 NB 和 M 偏振反射模型可以将测量的偏振反射信息准确计算,对于类似植被 C 这样的平展型植被冠层,两个模型均不能在主平面向散射方向模拟测量值,产生的相对误差达到 300%,这说明现今最常用的两个偏振反射模型对于平展型植被冠层的模拟精度低。由于这两个模型均属于半经验模型,得出的模型参数不具有真实的物理意义,但可以作为未来关于植被冠层偏振反射研究的参考依据。尤其是 M 偏振反射模型中的参数 C,它在 NDVI 值不变的情况下,会随着偏振反射比的增加而变大。这意味着,该参数的变化可以反映出植被冠层偏振反射比值的大小,间接说明冠层形态。

自然界植被冠层的形态各异,无论是利用偏振信息直接反映植被冠层信息,还是基于地表偏振信息来确定其对大气偏振的影响,都应该从地表测量做起,这样才能得到地表植被冠层最真实的偏振特性,从而为天气系统的反演提供科学可靠的支撑。同时,在未来关于植被偏振反射模型的研究中,应该考虑较大偏振反射比值的状况,这样才能真正实现偏振模拟计算,进而实现偏振遥感的应用。由于只考虑了 3 种植被冠层,未来的研究中将会考虑粗糙不平的冠层以及类似针叶树的冠层,但研究思路以及得到的模型参数可以作为参考依据。

参 考 文 献

- 1 Huete A, Justice C, Liu H. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 49(3): 224-234.
- 2 Asner G P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 64(3): 234-253.
- 3 Talmage D A, Curran P J. Remote sensing using partially polarized light [J]. *Internal Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(1): 47-64.
- 4 Curran P. The relationship between polarized visible light and vegetation amount [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1981, 11: 87-92.
- 5 Vanderbilt V C, Grant L, Biehl L L, *et al.* Specular, diffuse, and polarized light scattered by two wheat canopies [J]. *Applied Optics*, 1985, 24(15): 2408-2418.
- 6 Suomalainen J, Hakala T, Puttonen E, *et al.* Polarised bidirectional reflectance factor measurements from vegetated land surface [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, 110(17): 1044-1056.
- 7 Rondeaux G, Herman M. Polarization of light reflected by crop canopies [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 38(1): 63-75.
- 8 Woessner P, Hapke B. Polarization of light scattered by clover [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1987, 21(3): 243-261.
- 9 Curran P J. Polarized visible light as an aid to vegetation classification [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1982, 12(6): 491-499.
- 10 Cairns B, Russel E E, Travis L D. The research scanning polarimeter: Calibration and ground-based measurements [C]. *SPIE*, 1999, 3754: 186-196.
- 11 Deuzé J L, Bréon F M, Devaux C, *et al.* Remote sensing of aerosols over land surfaces from POLDER-ADEOS-1 polarized measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D5): 4913-4926.
- 12 Maignan F, Bréon F M, Fédèle E, *et al.* Polarized reflectance of natural surfaces: Spaceborne measurements and analytical modeling [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(12): 2642-2650.

- 13 Litvinov P, Hasekamp O, Cairns B. Models for surface reflection of radiance and polarized radiance: Comparison with airborne multi-angle photopolarimetric measurements and implications for modeling top-of-atmosphere measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 781-792.
- 14 Nadal F, Bréon F M. Parameterization of surface polarized reflectance derived from POLADER spaceborne measurements [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(3): 1709-1718.
- 15 Xie D H, Gu X F, Cheng T H, *et al.* Initial research on the polarized reflectance of typical urban surface types measured by the directional polarimetric camera[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54 (8): 1199-1205.
- 16 Xie Donghai, Gu Xingfa, Cheng Tianhai, *et al.* Research on the bidirectional reflectance of typical urban surface types measured by the directional polarimetric camera[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(7): 077801.
谢东海, 顾行发, 程天海, 等. 基于多角度偏振相机的城市典型地物双向反射特性研究 [J]. *物理学报*, 2012, 61(7): 077801.
- 17 Xiang Kunsheng, Cheng Tianhai, Gu Xingfa, *et al.* Polarized properties of typical surface types over China based on the multi-angular polarized remote sensing instruments[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(22): 227801.
相坤生, 程天海, 顾行发, 等. 基于多角度偏振载荷数据的中国典型地物偏振特性研究 [J]. *物理学报*, 2015, 64(22): 227801.
- 18 Wang Han, Sun Xiaobing, Sun Bin, *et al.* Evaluation of land surface polarization models based on airborne advanced atmosphere multi-angle polarization radiometer measurements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0128002.
王 涵, 孙晓兵, 孙 斌, 等. 基于航空多角度偏振辐射计遥感数据评估陆地表面偏振反射模型 [J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0128002.
- 19 Wang H, Sun X, Sun B, *et al.* Retrieval of aerosol optical properties over a vegetation surface using multi-angular, multi-spectral, and polarized data[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, 31(4): 879-887.
- 20 Peltoniemi J I, Gritsevich M, Puttonen E. Reflectance and polarization characteristics of various vegetation types[M]. Heidelberg: Springer, 2015, 9: 257-294, .
- 21 Breon F M, Tanre D, Lecomte P, *et al.* Polarized reflectance of bare soils and vegetation: Measurements and models[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(2): 487-499.
- 22 Sun Z Q, Wu Z F, Zhao Y S. Semi-automatic laboratory goniospectrometer system for performing multi-angular reflectance and polarization measurements for natural surfaces [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(1): 014503.
- 23 Sun Z Q, Lv Y F, Tong Z J. Effects of particle size on bidirectional reflectance factor measurements from particulate surfaces[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): A612-A634.
- 24 Sun Z Q, Lv Y F, Lu S. An assessment of the bidirectional reflectance models basing on laboratory experiment of natural particulate surfaces[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2015, 163: 102-119.
- 25 Schaepman-Strub G, Schaepman M E, Painter T H, *et al.* Reflectance quantities in optical remote sensing—definitions and case studies[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 103(1): 27-42.
- 26 Sandmeier S, Muller C, Hoogood B, *et al.* Physical mechanisms in hyperspectral BRDF data of grass and watercress[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(2), 222-233.