

文章编号 1004-924X(2026)11-1684-09

基于多角度偏振反射模型反演叶片粗糙度

李潇, 孙仲秋*, 卢珊*

(东北师范大学长白山地理过程与生态安全教育部重点实验室, 吉林 长春 130024)

摘要: 基于叶片多角度偏振反射特性, 提出一种叶片表面粗糙度反演方法。通过在现有偏振反射模型中引入非偏振分量, 改进偏振反射模型, 建立叶片反射系数与表面粗糙度之间的定量关系。基于5种不同叶片结构植被的19个样本, 结合主平面多角度观测数据, 对模型的反射模拟能力与粗糙度反演精度进行了系统评估。结果表明, 改进模型能够准确模拟350~2500 nm内的叶片反射系数, 整体拟合精度较高(R^2 达0.99), 且在不同探测天顶角下表现稳定(相对均方根误差低于5%)。在粗糙度反演方面, 模型在多数波段均具有较好性能(R^2 普遍大于0.5), 其中450 nm和550 nm精度最高(R^2 超过0.7), 能够有效区分不同叶片表面结构并反映粗糙度变化。敏感性分析表明, 粗糙度与入射-观测几何共同控制偏振反射的强度及角度分布。其中, 粗糙度主要控制偏振反射系数的幅度衰减及峰值位置偏移。本研究突破了传统基于反射强度的建模方法对叶片表面结构参数刻画能力有限的局限, 为植被结构参数反演提供了新的技术路径, 并为拓展至冠层尺度奠定了基础。

关键词: 偏振反射模型; 叶片粗糙度; 多角度观测; 叶片参数反演

中图分类号: P424 文献标识码: A

doi: 10.37188/OPE.20263411.1684 CSTR: 32169.14.OPE.20263411.1684

Multi-angle polarized reflectance model-based for retrieving leaf surface roughness

LI Xiao, SUN Zhongqiu*, LU Shan*

(Key Laboratory of Geographical Processes and Ecological Security of Changbai Mountains (Ministry of Education), Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

* Corresponding author, E-mail: sunzq465@nenu.edu.cn; lus123@nenu.edu.cn

Abstract: A method for retrieving leaf surface roughness based on a multi-angular polarized reflectance model is proposed. By incorporating a non-polarized component into the Litvinov polarized reflectance model, an improved model was developed to establish a quantitative relationship between the leaf reflectance factor and surface roughness. Nineteen leaf samples from five plant species with distinct surface structures were used, and multi-angular leaf measurements in the principal plane were conducted to systematically evaluate the model performance in reflectance simulation and roughness inversion. The results showed that the improved model accurately reproduced the leaf reflectance factor across the 350-2500 nm

收稿日期: 2026-04-20; 修订日期: 2026-06-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 42571418, No. 42471377, No. 42501429); 吉林省科技发展计划资助项目(No. 20240101047JC, No. 20240402034GH); 国家资助博士后研究人员计划资助项目(No. GZB20250085); 中国博士后科学基金资助项目(No. 2024M760406); 中央高校基本科研业务费专项资金(No. 2412025QD024); 吉林省在站博士后研究人员择优资助

spectral range, with high overall accuracy ($R^2=0.99$) and strong stability under varying viewing zenith angles (relative root mean square error $<5\%$). For roughness retrieval, robust performance was achieved across most wavelengths (R^2 generally >0.5), with the highest accuracy observed at 450 and 550 nm ($R^2>0.7$). Differences in leaf surface structure were effectively distinguished, and relative variations in roughness were reliably captured. Sensitivity analysis indicated that leaf surface roughness and illumination-viewing geometry jointly controlled the magnitude and angular distribution of the polarized reflectance factor. Specifically, roughness was found to govern the magnitude and angular distribution of the leaf reflectance factor in the principal plane. This study demonstrates the feasibility of retrieving leaf surface roughness using a polarized reflectance-based model. The proposed approach overcomes the limitations of conventional intensity-based methods in characterizing surface structural parameters and provides a new pathway for vegetation structure retrieval, with potential extension to canopy-scale applications.

Key words: polarized reflectance model; leaf surface roughness; multi-angular observation; leaf parameter inversion

1 引 言

叶片粗糙度由表面毛状体(大小、形状和密度)、叶脉结构、表皮细胞的排列方式以及表皮蜡层等共同决定^[1],可以反映植物种类、发育阶段及生长环境的变化,对植被的生理状态具有重要指示意义。此外,表皮蜡和毛状体对非生物与生物胁迫(如干旱、病虫害等)具有显著响应^[2-4]。因此,叶片粗糙度作为关键的叶片表面结构参数,可为传统生化参数反演提供补充信息,从而支撑植被分类与健康监测。

偏振反射特性与表面微观形态及介质光学性质密切相关^[5]。对于植被而言,偏振反射主要来源于叶片表面的单次散射^[6],与叶片表面的粗糙度密切相关。因此,利用偏振观测建立叶片反射与表面粗糙度之间的物理联系,为获取植被微观结构信息提供了可能。然而,尽管偏振信号在理论上对表面结构高度敏感,其在叶片尺度结构反演中的应用仍然有限。在观测层面,现有叶片尺度研究多以生化参数反演为目标,通常假设偏振效应较弱,主要依赖单角度的反射强度进行研究。然而,叶片粗糙度主要通过改变反射的角度分布模式及其强度来体现,单一观测角度难以有效捕捉这一特征,从而限制了粗糙度信息的提取。在模型层面,现有叶片尺度辐射传输模型及经验光谱指数大多基于反射强度构建^[7-8],并未考虑与表面结构相关的偏振分量,难以直接用于粗

糙度反演;而现有的偏振反射模型大多用于冠层或更大尺度,通常忽略非偏振散射分量的影响,并未考虑非偏振反射的影响^[9-11]。因此,如何基于偏振反射模型,从实际可获取的反射强度中反演叶片粗糙度,仍是亟待解决的问题。

随着多角度观测技术的发展,在不同观测几何条件下获取反射信息成为可能^[12-13],为叶片粗糙度反演提供了数据基础。虽然现有偏振反射模型已在冠层尺度建立了偏振反射系数与粗糙度之间的物理联系^[14],为利用偏振信息反演表面结构参数提供了重要理论基础,但该模型尚未充分考虑非偏振(漫反射)分量对总反射信号的贡献,难以直接适用于基于反射强度的实际观测数据。因此,现有研究虽在观测和建模两方面取得进展,但仍缺乏一种与反射强度匹配反演叶片粗糙度的有效方法。

基于上述问题,本文在现有偏振反射模型基础上引入非偏振分量,构建改进的偏振反射模型,建立叶片反射系数与表面粗糙度之间的定量关系。在此基础上,利用多角度观测数据实现叶片粗糙度反演,并系统评估模型的反射模拟能力及反演精度。通过敏感性分析揭示粗糙度及观测几何对偏振反射特征的影响机制,探讨基于偏振信息反演叶片表面结构参数的可行性,为进一步拓展至冠层尺度的结构参数反演提供理论依据。

2 研究数据

2.1 叶片多角度反射数据

2024年9~10月,在中国吉林省长春市植物园及室内环境中随机采集5个物种共19个叶片样本(表1)。所选样本具有不同表面结构特征,包括表面具毛、粗糙度较高的红瑞木(*Swida alba* Opiz),表面网状脉络不明显的五叶地锦(*Parthenocissus quinquefolia* (L.) Planch.),以及表面较光滑、粗糙度较低的昆士兰伞木(*Schefflera microphylla* Merr)、发财树(*Pachira aquatica*)和绿萝(*Epipremnum aureum*)。样本设计以覆盖广泛的表面粗糙度梯度为主要目标,通过多物种组合构建从光滑到粗糙的序列。由于多角度反射测量和粗糙度测量过程具有较高的时间与操作成本,这里并未强调单一物种的统计重复性,而是在保证粗糙度变化范围充分覆盖的前提下进行了样本数量的合理控制,以满足模型验证需求。为减少生化参数变化,样本采集后立即在4℃条件下冷藏运输,并用湿纸巾包裹叶柄以降低水分损失。

表1 五种叶片样本粗糙度统计

Tab. 1 Statistics of measured roughness of leaf samples from five species

物种	数目	粗糙度测量值		
		最大值	最小值	均值
五叶地锦	4	0.80	0.32	0.52
昆士兰伞木	4	0.31	0.21	0.24
发财树	4	0.27	0.15	0.22
红瑞木	3	0.71	0.61	0.68
绿萝	4	0.35	0.25	0.30
总计	19	0.80	0.15	0.38

叶片双向反射系数(Bidirectional Reflectance Factor, BRF)采用东北师范大学角度光谱测量系统获取^[15]。该系统由平行光源(卤素灯)、步进电机驱动的测角装置及ASD FieldSpec4光谱仪组成,测量波段为350~2 500 nm,光谱间隔为1 nm。测量时入射天顶角设为40°,多角度观测在主平面内进行,覆盖前向散射60°至后向散

射60°,间隔10°。受仪器限制,后向40°方向未测量,共获得12个观测角度。探测器与样本距离为20 cm,视场角为6°,以保证观测区域完全位于照明范围内。样本置于覆盖黑色胶带的平台上,其BRF小于0.05且近似不随波长变化。每个光谱为同一叶片5次独立测量的平均值。利用ViewSpec软件对1 000 nm和1 800 nm处的不连续性进行校正,并采用Savitzky-Golay滤波(2阶多项式,窗口宽度19 nm)进行平滑处理^[16]。最终分析波段为400~2 500 nm。

2.2 叶片表面粗糙度

叶片表面粗糙度采用Keyence VHX-5000数字显微镜系统进行测量。测量时,显微镜放大倍数为200×,测量范围约为2 mm×2 mm^[1,17]。粗糙度(σ)根据Cook和Torrance(1981)定义的表面结构均方根坡度计算^[18]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L \left(\frac{dZ(x)}{dx} \right)^2 dx}, \quad (1)$$

其中: L 为水平测量路径总长度, Z 和 x 分别为高度和长度坐标。每个叶片样本进行3次重复测量并取平均值作为最终粗糙度。测量的粗糙度用于验证模型反演结果的准确性。

3 研究方法

3.1 改进的偏振反射模型

本研究拟改进研究人员提出的三参数偏振反射模型,使它能够与实测叶片反射系数匹配,并实现表面粗糙度反演。叶片反射系数可近似分解为偏振反射(BPRF)和非偏振反射(NPRF)。其中,BPRF由Litvinov模型描述^[14]:

$$BPRF = \frac{\alpha \pi F_p(\theta_i, n)}{4 \cos \vartheta (\mu_s + \mu_v)} f(\sigma, \vartheta) f_{sh}(\gamma, k_r), \quad (2)$$

$$\cos \vartheta = \frac{\mu_s + \mu_v}{\mu_i}, \quad (3)$$

$$\cos 2\theta_i = \cos \theta_s \cos \theta_v + \sin \theta_s \sin \theta_v \cos \varphi_v, \quad (4)$$

其中: α 和 k_r 为自由参数, σ 为表面粗糙度, n 为折射率,通常固定为1.5; μ_s, μ_v ,和 μ_i 分别为入射天顶角(θ_s)、探测天顶角(θ_v)和相角(θ_i)的余弦值; φ_v 为探测方位角,这里入射方位角假设为0; F_p 为菲涅尔函数, f 为粗糙度相关项, f_{sh} 为阴影相关项,

表达式如下:

$$F_p(\theta_i, n) = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{n\mu_t - \mu_i}{n\mu_t + \mu_i} \right)^2 - \left(\frac{n\mu_i - \mu_t}{n\mu_i + \mu_t} \right)^2 \right], \quad (5)$$

$$f(\sigma, \vartheta) = \frac{1}{\pi \cos^3 \vartheta \cdot 2\sigma^2} \exp\left(-\frac{\tan^2 \vartheta}{2\sigma^2}\right), \quad (6)$$

$$f_{sh}(\gamma, k_r) = \left(\frac{1 + \cos 2k_r \theta_i}{2} \right)^3, \quad (7)$$

其中: μ_i 表示相角对应的折射角(θ_i)的余弦值,其计算公式为:

$$\sin(\theta_t) = \sin(\theta_i)/n. \quad (8)$$

为描述叶片整体反射特性,在 Litvinov 模型中引入非偏振反射项(R_{NPRF}),构建叶片双向反射系数模型。非偏振反射系数用于表征叶片反射信号中的非偏振散射分量,可近似视为叶片光学反射中的漫反射分量,主要来源于叶片内部的多次散射过程。该分量近似显示各向同性,其变化主要由叶片生化参数控制,具有明确光谱特征。非偏振反射系数作为背景散射项引入 Litvinov 模型,用于表征非偏振能量贡献,实现对偏振反射中与叶片表面微结构相关分量的分离:

$$BRF = BPRF + NPRF = \frac{\alpha \pi F_p(\theta_i, n)}{4 \cos \vartheta (\mu_s + \mu_v)} f(\sigma, \vartheta) f_{sh}(\gamma, k_r) + R_{NPRF}. \quad (9)$$

改进的模型包含 4 个参数:自由参数 α 和 k_r , 粗糙度 σ , 以及非偏振反射参数 R_{NPRF} 。基于这些参数,可以模拟叶片的多角度反射系数,不同波段对应不同的参数组合。

3.2 模型模拟和反演评估

本文从粗糙度反演精度和反射模拟能力两方面对模型进行评估。模型参数通过最小化代价函数进行反演,即单波段的反射误差平方和^[19]。代价函数表示为:

$$J(C) = \sum_{VZA=1}^{12} [BRF_M(\theta_v, \varphi_v) - BRF_S(\theta_v, \varphi_v)]^2, \quad (10)$$

其中: BRF_M 为测量的叶片反射系数, BRF_S 是在给定观测几何条件和参数(α, k_r, σ , 和 R_{NPRF})下由改进的 Litvinov 模型模拟的反射, VZA 为观测角度的数量,这里为 12。参数反演采用 MATLAB 中“lsqcurvefit”函数实现。参数初始值及取值范围参考文献^[9, 20],如表 2 所示。通过对比反演粗糙度与实测值,评估模型的反演精度。

表 2 模型反演参数设置

Tab. 2 Parameter settings for model inversion				
参 数	符号	初始值	最小值	最大值
自由参数 1	α	0.01	0	50
自由参数 2	k_r	0.5	0	10
粗糙度	σ	0.1	0.01	1
非偏振反射系数	R_{NPRF}	0.1	0	2

模型反射模拟采用光谱重建方法^[21-22]。首先,根据单一波段测量的叶片反射系数,通过最小化代价函数反演自由参数(α, k_r, σ , 和 R_{NPRF})。将反演参数代入式(9)重建叶片反射系数,并与实测值进行对比。利用主平面 12 个观测角的多角度反射数据评估模型重建效果,并采用均方根误差(RMSE)和相对均方根误差(RRMSE: RMSE/均值)量化模型性能。

3.3 模型敏感性分析

本研究基于改进模型开展局部敏感性分析,量化叶片表面粗糙度及入射-观测几何对叶片反射的影响。考虑到非偏振反射与几何条件及粗糙度相关性较弱,本文仅量化粗糙度及入射-观测天顶角对偏振反射系数的影响,采用以下两种策略进行分析:

(1)固定入射天顶角为 40° ,量化粗糙度引起的主平面上偏振反射系数的变化。探测角为前向散射 60° 至后向散射 60° ,间隔 1° 。在保持其他 3 个自由参数不变的条件下,仅改变粗糙度(0.1~0.7,间隔 0.1)。自由参数 α 和 k_r 分别设置为 10 和 0.5,非偏振反射参数 R_{NPRF} 设置为 0。

(2)分析入射天顶角变化对偏振反射系数的影响。入射天顶角在 $10^\circ \sim 60^\circ$ 内变化(间隔 10°)。固定粗糙度 σ 为 0.1。探测角、自由参数 α 和 k_r 以及非偏振反射参数 R_{NPRF} 的设置同上。

4 结果与讨论

4.1 叶片反射系数模拟表现

基于光谱重建方法,利用改进的 Litvinov 偏振反射模型,对叶片在主平面 12 个观测角度下 350~2 500 nm 波段的反射系数进行了模拟。通过对比模拟值与实测值,评估模型对叶片反射的

刻画能力,如图 1 所示。结果表明,在 19 个样本、12 个观测角度的反射光谱数据上,模拟值与实测值具有较好的一致性,决定系数(R^2)达到 0.99,相对均方根误差低于 3%。说明改进的 Litvinov 偏振反射模型能够准确描述叶片多角度反射特性。

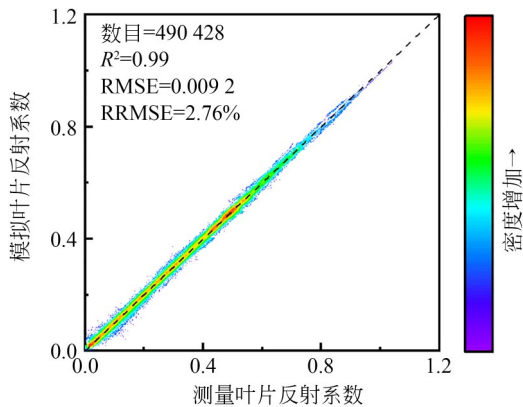


图 1 测量与模型模拟叶片反射系数对比

Fig. 1 Comparison between measured and simulated leaf reflectance factor

进一步分析不同探测天顶角条件下的模拟精度(图 2),结果显示模型表现稳定, R^2 均接近 1,相对均方根误差(RRMSE)稳定在 5% 以内。由此表明,该模型在多角度条件下仍保持较高精度和稳定性。

本研究基于改进的 Litvinov 偏振反射模型分离了偏振反射系数和非偏振反射系数,并分析了

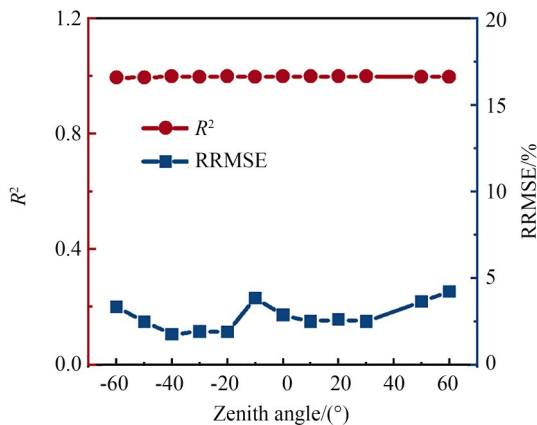


图 2 不同探测天顶角下叶片反射系数的模拟精度

Fig. 2 Leaf reflectance factor simulation accuracy at different viewing zenith angles

二者的波段依赖性和角度分布特征(图 3)。偏振反射系数随波段变化不明显,如图 3(a)所示。非偏振反射系数具有显著的光谱特征,主要表现为叶绿素等色素相关的红光和蓝光波段的吸收谷和绿光波段的反射峰,以及 1 450 nm 和 1 950 nm 附近的水吸收谷。这些偏振反射系数的反射特征与以往研究显示的叶片反射系数光谱特征相似,如图 3(b)所示。在角度响应方面,偏振反射系数在主平面上表现显著的角度差异,最大值出现在镜面方向(-40° ,图 3(c));非偏振反射系数在主平面不同观测角度下变化较小,近似为各向同性(图 3(d)),这一现象主要源于叶片内部多次散射过程导致的方向信息弱化。这些结果说明,非偏振反射参数主要承载叶片生化信息,对表面结构变化不敏感。

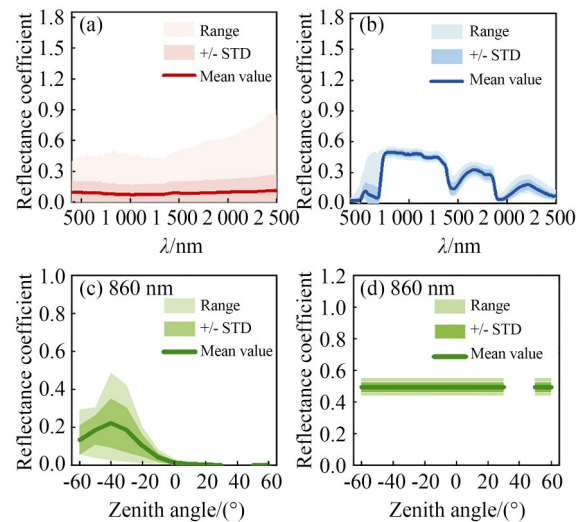


图 3 860 nm 重建的偏振与非偏振反射系数光谱特征及主平面角度分布

Fig. 3 Spectral characteristics and principal-plane angular distributions of reconstructed polarized and non-polarized reflectance coefficients at 860 nm

4.2 叶片粗糙度反演精度

在验证模型正演能力的基础上,进一步评估其对叶片表面粗糙度的反演性能。在随机选择的九个波段上进行粗糙度反演,其精度如表 3 所示。结果表明,粗糙度反演精度在可见光的 450 nm 和 550 nm 最高, R^2 大于 0.7;在其他波段,精度略有下降,但多数仍保持在 0.5 以上。整体来看,改进的偏振反射模型在较宽光

表 3 在任选的 9 个波段上模型反演粗糙度的精度
Tab. 3 Surface roughness inversion accuracy among nine random selected wavelengths

波段/nm	R ²	RMSE
400	0.66	0.14
450	0.72	0.14
500	0.73	0.14
560	0.60	0.19
670	0.63	0.17
860	0.54	0.21
1200	0.55	0.21
1680	0.53	0.23
2200	0.55	0.22

谱范围内均能够实现对叶片粗糙度的有效反演。

进一步在 4 个波段上(500, 670, 860 nm 和 1 680 nm)对比分析反演结果,如图 4 所示。结果显示,500 nm 波段反演精度最高,回归斜率接近 1(图 4(a));在 670,860 和 1 680 nm 波段,尽管斜率存在一定偏差,但仍能较好反映粗糙度变化趋

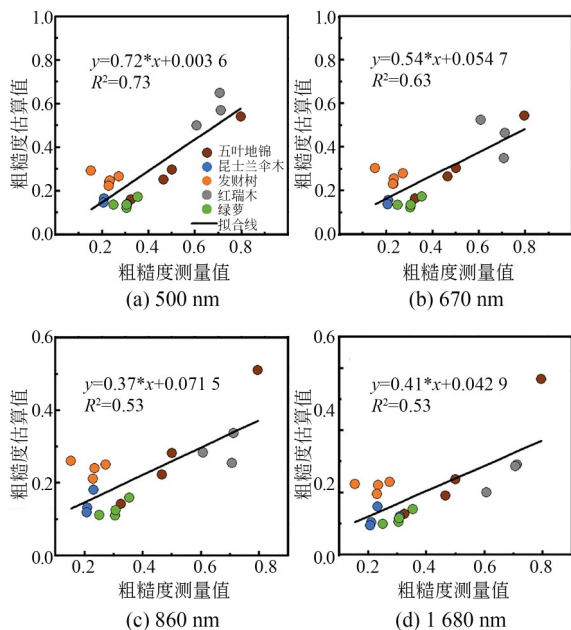


图 4 不同波段上测量和估算粗糙度的对比

Fig. 4 Comparison between measured and estimated roughness at different wavelengths

势(图 4(b)~4(d))。从不同样本来看,粗糙度较高的红瑞木对应较大的反演值(图 4(a)~4(d), >0.6);粗糙度中等的五叶地锦分布范围较广(图 4(a)~4(d), 约 0.3~0.8),且与实测值较为一致;而表面较为光滑的昆士兰伞木、发财树和绿萝样本的反演粗糙度较低(图 4(a)~4(d), <0.4)。该结果表明,模型不仅具有较好的反演精度,同时能够有效区分不同表面结构特征的叶片类型。

4.3 模型敏感性分析结果

基于改进的 Litvinov 偏振反射模型,开展局部敏感性分析,量化偏振反射系数在主平面上的强度及角度分布对叶片粗糙度和入射-观测几何的响应特征,结果如图 5 和图 6 所示。

图 5 展示了入射天顶角固定为 40°时,不同粗糙度条件下偏振反射系数在主平面各探测天顶角上的变化。总体来看,偏振反射系数在天底及后向散射方向较小,而在前向散射方向随观测角增大显著增强。当粗糙度较低($\sigma=0.1$)时,偏振反射系数随观测角增大呈“先升后降”趋势,并在接近入射天顶角(约 40°)处出现明显峰值,最大值约为 2。随着粗糙度增加($\sigma=0.3\sim0.7$),峰值逐渐向更大的前向散射角(约 60°)偏移,同时峰值幅度显著降低,当 σ 增至 0.7 时,最大值接近 0。

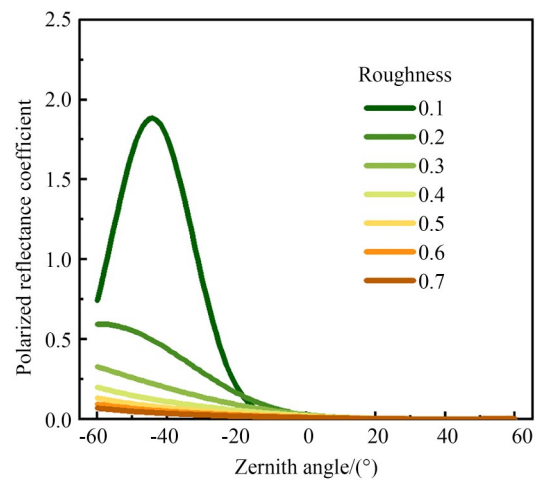


图 5 主平面上(负号表示前向散射方向)叶片反射系数随粗糙度变化的趋势

Fig. 5 Variation of leaf reflectance factor with leaf surface roughness in principal plane (“-” indicate forward-scattering direction)

上述结果表明,粗糙度不仅影响偏振反射强度,还显著改变其角度分布特征。这种随粗糙度变化的角度分布特征和强度变化,为基于偏振反射特征反演叶片粗糙度提供了关键物理依据。

图 6 为粗糙度固定($\sigma=0.1$)时,不同入射天顶角条件下偏振反射系数在主平面上的变化。结果表明,偏振反射峰值始终出现在与入射天顶角对应的前向散射方向。随着入射天顶角由 10° 增加至 60° ,偏振反射系数的最大值显著增大(由约 0.2 增至约 4.5),且前向散射方向上的变化由平缓逐渐转为陡峭(图 6)。这一结果显示,说明入射天顶角同样对偏振反射的强度和角度分布具有显著影响。因此,在基于偏振反射模型反演叶片粗糙度时,入射几何条件需作为先验信息加以约束,以保证反演结果的可靠性。

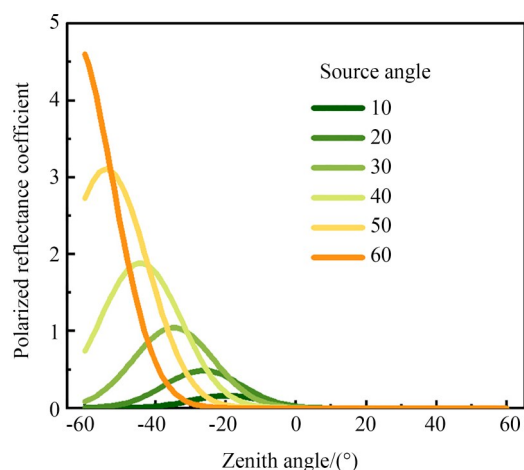


图 6 主平面上(负号表示前向散射方向)叶片反射系数随入射天顶角变化的趋势

Fig. 6 Variation of leaf reflectance factor with source zenith angle in principal plane (“-” indicate forward-scattering direction)

5 结 论

本文在现有偏振反射模型基础上引入非偏

振反射分量,构建了改进的偏振反射模型,从物理机制上建立了叶片反射系数与叶片表面粗糙度之间的定量关系。该模型参数简洁,仅包含 4 个关键参数。基于 5 种不同表面结构植被的 19 个叶片样本及其多角度反射观测数据,模型对 350~2 500 nm 内叶片反射系数的模拟精度较高(R^2 达 0.99),且在不同探测天顶角条件下均表现稳定(RRMSE 低于 5%)。在此基础上开展的粗糙度反演结果表明,该模型可在大多数波段实现有效反演(R^2 普遍大于 0.5),其中在 450 和 550 nm 最高(R^2 超过 0.7),并能够稳定表征不同叶片间的粗糙度差异。敏感性分析进一步表明,叶片粗糙度与入射-探测几何共同决定偏振反射系数在主平面上的强度及角度分布特征。其中,粗糙度主要控制偏振反射的幅度衰减及峰值位置偏移,而入射天顶角则主导峰值出现的位置及变化幅度。两者在角度分布上的耦合效应表明,在进行粗糙度反演时需将观测几何参数作为先验条件加以约束,以提高反演结果的稳定性与可靠性。

综上,本文提出的改进偏振反射模型不仅能够高精度重建叶片多角度反射特性,还可实现对叶片表面粗糙度的有效反演,为利用叶片反射中的偏振信息反演植被表面结构参数提供了新的方法框架。该方法突破了传统基于反射强度的经验模型对结构信息刻画能力不足的限制,凸显了偏振反射模型在植被建模和表面结构反演中的独特优势。未来可将该方法拓展至冠层尺度,支撑植被其他结构参数的反演应用。

作者贡献声明:

李 潇:数据管理,模型验证,初稿写作;

孙仲秋:论文构思,获取资助,论文审核与编辑;

卢 珊:提供资源,研究指导,论文审核与编辑。

参考文献:

[1] BOIZE L, GUDIN C, PURDUE G. The influence of leaf surface roughness on the spreading of oil spray drops[J]. *Annals of Applied Biology*, 1976,

84(2): 205-211.

[2] LEWANDOWSKA M, KEYL A, FEUSSNER I. Wax biosynthesis in response to danger: its regulation upon abiotic and biotic stress[J]. *New Phytolo-*

- gist*, 2020, 227(3): 698-713.
- [3] BAKER E A. The influence of environment on leaf wax development in brassica oleracea var. gemmifera [J]. *New Phytologist*, 1974, 73 (5) : 955-966.
- [4] ZHAO Q, CHEN X Y. Development: a new function of plant trichomes[J]. *Nature Plants*, 2016, 2: 16096.
- [5] MYNENI R B, ROSS J. *Photon-Vegetation Interactions: Applications in Optical Remote Sensing and Plant Ecology*[M]. Springer Science & Business Media, 1991.
- [6] COULSON K L, BOURICIUS G M, GRAY E L. Optical reflection properties of natural surfaces [J]. *Journal of Geophysical Research* (1896-1977), 1965, 70(18): 4601-4611.
- [7] FÉRET J B, BERGER K, DE BOISSIEU F, *et al.* PROSPECT-PRO for estimating content of nitrogen-containing leaf proteins and other carbon-based constituents[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 252: 112173.
- [8] 田庆久, 闵祥军. 植被指数研究进展[J]. *地球科学进展*, 1998, 13(4): 327-333.
TIAN Q J, MIN X J. Advances in study on vegetation indices[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1998, 13(4): 327-333. (in Chinese)
- [9] YANG B, ZHAO H M, CHEN W. Semi-empirical models for polarized reflectance of land surfaces: Intercomparison using space-borne POLDER measurements[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, 202: 13-20.
- [10] NADAL F, BREON F M. Parameterization of surface polarized reflectance derived from POLDER spaceborne measurements[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(3): 1709-1718.
- [11] WAQUET F, LÉON J F, CAIRNS B, *et al.* Analysis of the spectral and angular response of the vegetated surface polarization for the purpose of aerosol remote sensing over land[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(6): 1228.
- [12] DUBOVIK O, LI Z Q, MISHCHENKO M I, *et al.* Polarimetric remote sensing of atmospheric aerosols: Instruments, methodologies, results, and perspectives[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 224: 474-511.
- [13] SUOMALAINEN J, HAKALA T, PELTONIEMI J, *et al.* Polarised multiangular reflectance measurements using the Finnish geodetic institute field goniospectrometer [J]. *Sensors*, 2009, 9 (5) : 3891-3907.
- [14] 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.
- [15] 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: 014503.
- [16] SAVITZKY A, GOLAY M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures [J]. *Analytical Chemistry*, 1964, 36 (8): 1627-1639.
- [17] PETERS R D, NOBLE S D. Characterization of leaf surface phenotypes based on light interaction [J]. *Plant Methods*, 2023, 19(1): 26.
- [18] NAKAR D, FEUERMANN D. Surface roughness impact on the heat loss of solar vacuum heat collector elements (HCE) [J]. *Renewable Energy*, 2016, 96(PA): 148-156.
- [19] FÉRET J B, FRANÇOIS C, GITELSON A, *et al.* Optimizing spectral indices and chemometric analysis of leaf chemical properties using radiative transfer modeling[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(10): 2742-2750.
- [20] BOUSQUET L, LACHÉRADE S, JACQUEMOUD S, *et al.* Leaf BRDF measurements and model for specular and diffuse components differentiation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98(2/3): 201-211.
- [21] FERET J B, FRANÇOIS C, ASNER G P, *et al.* PROSPECT-4 and 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008,

112(6): 3030-3043.

- [22] JIANG J Y, COMAR A, WEISS M, *et al.*
FASPECT: a model of leaf optical properties ac-

counting for the differences between upper and lower faces [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 253: 112205.

作者简介:



李 潇(1996—),女,四川南充人,博士研究生,研究方向为植被高光谱遥感。E-mail: lix980@nenu.edu.cn

通讯作者:



卢 珊(1976—),女,吉林长春人,博士,研究方向主要包括偏振遥感建模与分析、高光谱遥感及其应用。E-mail: lus123@nenu.edu.cn

通讯作者:



孙仲秋(1986—),男,吉林磐石人,博士,教授,研究方向主要包括偏振遥感建模及遥感技术应用。E-mail: sun-zq465@nenu.edu.cn