

文章编号 1004-924X(2026)18-2809-11

不同雪面结构的偏振反射特性分析及 典型偏振反射模型评估

吴迪*, 白新伟, 尤金凤, 于光
(空军航空大学, 吉林 长春 130022)

摘要: 积雪对地球能量平衡、水文循环和气候变化具有重要影响, 其反射特性是表征地表辐射传输过程的重要基础, 积雪同时也是冬季战场最主要的地物背景之一。自然积雪表面常受风场和下垫面地形影响形成雪垄等宏观结构, 改变光线传播路径和散射方向, 并进一步影响积雪的偏振反射特性。然而, 雪垄等宏观结构对积雪偏振反射特性及偏振反射模型适用性的影响仍缺乏系统认识。为此, 本文以平坦雪面和雪垄雪面为研究对象, 通过改变太阳入射方向与雪垄走向的相对关系, 构建平坦雪面、雪垄垂直于入射方向和雪垄平行于入射方向三种观测情形。利用多角度偏振观测系统测量三种情形下半球空间偏振反射系数的角度分布特征, 并基于观测数据评估两种典型偏振反射模型——Litvinov 模型和 Nadal-Breon 模型的模拟能力。结果表明, 平坦雪面及雪垄平行于入射方向时, 偏振反射在半球空间内呈现较为规律分布特征, 主要表现为前向散射方向的显著增强; 而雪垄垂直于入射方向时, 前向散射方向的偏振反射幅度明显减弱, 后向散射方向的偏振反射则有所增强。模型评估结果显示, Litvinov 模型与 Nadal-Breon 模型在平坦雪面条件下均表现出较高的模拟精度, R^2 分别为 0.86 和 0.84, 相对均方根误差均低于 29%。然而, 在雪垄结构条件下, 模型精度显著下降: 对于雪垄平行于入射方向的情形, R^2 分别降至 0.73 和 0.64, 相对均方根误差约为 39%; 在雪垄垂直于入射方向的情形下, 由于前向和后向散射方向偏振反射分布的差异性变化, 偏离了模型假设, 表现出最差精度, R^2 分别为 0.43 和 0.44, 相对均方根误差约为 50%。综上, 本文揭示了雪面结构对偏振反射特性的显著影响, 并指出现有偏振反射模型在描述雪垄结构时存在明显局限性, 从而表明在复杂地表条件下开展偏振遥感应用仍存在不确定性, 同时为后续雪面偏振反射模型的改进与构建提供了依据。

关键词: 多角度偏振反射; 积雪; 雪垄; 偏振反射模型

中图分类号: P424 文献标识码: A

doi: 10.3724/OPE.20263418.2809

CSTR: 32169.14.OPE.20263418.2809

Study of polarized optical properties over flat and ridged snow surfaces and validation of existing polarized reflectance models

WU DI*, BAI Xinwei, YOU Jinfeng, YU Guang

(Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: wudi1915@126.com

Abstract: Snow plays an important role in the Earth's energy balance, hydrological cycle, and climate system, and its reflection characteristics are fundamental to characterizing radiative transfer processes at the land surface. Snow also serves as one of the primary ground feature backgrounds on winter battlefields. In

收稿日期: 2026-06-20; 修订日期: 2026-07-08.

基金项目: 空军装备综合研究项目 (No. KJ2023C020111-06)

natural environments, snow surfaces are often shaped by wind and underlying terrain, forming macroscopic structures such as snow ridges, which can alter photon propagation paths and scattering directions, thereby affecting the polarized reflection of snow. However, the effects of such macroscopic structures on snow polarized reflection and the applicability of existing polarized reflectance models remain poorly understood. To address this issue, this study investigated both flat snow surfaces and snow-ridge surfaces. Three observation scenarios were designed by changing the relative orientation between the solar incidence direction and the ridge direction: a flat snow surface, ridges parallel to the incidence direction, and ridges perpendicular to the incidence direction. A multi-angular polarimetric observation system was used to measure the hemispherical distribution of the polarized reflectance factor under these three scenarios. Based on the measurements, the performance of two widely used polarimetric reflectance models, the Litvinov model and the Nadal - Bréon model, was evaluated. The results show that for flat snow surfaces and snow ridges parallel to the incident direction, the bidirectional polarized reflectance factor exhibits relatively regular hemispherical distributions, primarily characterized by a pronounced enhancement in the forward-scattering direction. When the snow ridges were oriented perpendicular to the illumination direction, the polarized reflectance in the forward scattering direction was substantially weakened, while the polarization was improved in part of the backward scattering direction. Model evaluation indicates that both the Litvinov and Nadal-Breón models achieve high simulation accuracy for flat snow surfaces, with R^2 values of 0.86 and 0.84, respectively, and relative root mean square errors (RRMSEs) below 29%. However, model performance significantly decreases for ridged snow surfaces. For snow ridges parallel to the incident direction, R^2 values decrease to 0.73 and 0.64, with RRMSEs of approximately 39%. When the snow ridges were perpendicular to the illumination direction, the weakened forward-scattering and the improved backward-scattering polarization caused the angular distribution of polarized reflectance to deviate from the assumptions of the models. Consequently, both models failed to accurately reproduce the angular distribution of polarized reflectance and exhibited their poorest performance, with R^2 values of 0.43 and 0.44, respectively and RRMSEs of approximately 50%. Overall, this study reveals the significant influence of snow surface structure on polarized reflectance characteristics and highlights the limitations of existing polarized reflection models in representing ridged snow surfaces. These findings indicate uncertainties in the application of polarimetric remote sensing under complex surface conditions and provide a basis for improving and developing snow polarized reflectance models.

Key words: multi-angular polarized reflectance; snow cover; snow ridges; polarized reflectance models

1 引言

积雪是冬季陆地表面最重要的覆盖类型之一,其反射辐射特性直接影响地表能量收支与区域水循环过程^[1-2]。积雪作为冬季战场最主要的地物背景之一,其反射辐射特性也影响基于高光谱的战场目标侦察。积雪反射信号不仅受太阳入射光谱和观测几何条件控制,还显著依赖其自身的物理与结构特征^[3-5]。准确表征积雪光学性质对于多尺度遥感反演雪层参数具有重要意义^[6-7]。偏振观测能够提供区别于传统辐射强度

的附加信息,对于理解陆气系统辐射传输过程具有重要意义。近年来,随着地基、机载及星载偏振观测的发展^[8-10],越来越多的研究表明,不同观测天顶角和波长下的积雪偏振特性对于刻画积雪光学性质是必要的。基于实测和模拟的积雪偏振特性发现:积雪双向偏振反射系数具有较强的光谱中性特征^[11-12],这在一定程度上拓展了传统气溶胶偏振反演方法在积雪区域的应用潜力^[13]。此外,偏振信息能够刻画目标的散射机制与各向异性特征,对表面结构变化具有较高敏感性,在冰雪探测领域具有重要应用价值^[14-19]。准

确刻画积雪表面的偏振反射特性,对于拓展偏振遥感在积雪研究中的应用具有重要意义。

然而,现有研究主要集中于积雪特征参数对偏振反射的影响,对于积雪宏观表面结构的作用认识仍然不足^[20-22]。在实际自然环境中,积雪往往并非理想平坦表面,而是受风场与下垫面地形共同作用,形成如雪垄等具有明显方向性的宏观结构。在平原地区,尤其是东北地区典型农田场景中,冬季积雪常覆盖于具有明显微地形起伏的田垄之上。这种雪垄结构可能显著改变光线在雪层中的传播路径与散射方向分布,影响偏振反射的变化,增加偏振反射模型的表征准确性。

目前,已有偏振反射模型主要基于少量参数对土壤等典型地表的偏振反射特性进行描述,并在一定范围内取得了较好应用效果^[23],具有拓展至积雪表面的潜力。然而,在复杂积雪条件下,尤其是存在明显雪垄结构的情形中,其模型适用性尚未得到系统验证。因此,有必要针对雪垄结构积雪开展系统的偏振观测与模型评估研究,以明确现有模型的适用范围及其局限性。

基于上述研究背景,本文以平坦雪面和雪垄结构积雪为研究对象,构建不同入射方向与雪垄相对几何关系下的三种典型积雪表面(平坦雪面、雪垄垂直于入射以及雪垄平行于入射),并开展多角度偏振观测,获取对应的半球空间偏振反射系数。在此基础上,分析积雪表面结构对偏振反射角度分布的影响特征,并进一步评估两种典型偏振反射模型在不同积雪表面结构条件下的

模拟能力与适用性。通过对比实测与模拟结果,定量揭示现有模型在平坦雪面和雪垄结构的性能差异。研究结果旨在明确现有偏振反射模型的适用边界,并为面向真实复杂积雪表面的偏振反射建模与遥感应用提供理论依据与方法参考。

2 研究数据

2.1 积雪样本

本研究设置了平坦雪面与雪垄结构积雪表面,并分析入射方向对偏振反射特性的影响。野外实验于2017年2月8日开展,积雪覆盖时间为5~6天,在积雪覆盖的平坦场地进行实验(43.9155°N,125.3949°E)。实验场地内构建了两种典型积雪表面结构:平坦表面和雪垄表面,如图1所示。首先选取自然状态下的平坦积雪样本(图1(a))。实验期间积雪深度约为0.45 m。其次,为研究表面起伏结构对偏振反射特性的影响,于0.5 m×0.5 m的观测区域内人工构建规则雪垄结构,形成深约1.5 cm、宽约1 cm、间距约1 cm的平行脊状雪垄(图1(b)~1(c))。该结构用于模拟自然环境中风场作用或下垫面微地形影响下形成的具有方向性的雪面起伏特征,同时减少复杂随机结构带来的干扰。通过调整雪垄方向与入射天顶方向的相对关系,分别设置雪垄垂直于入射方向和雪垄平行于入射方向两种情形,以系统分析入射几何对偏振反射特性的影响。

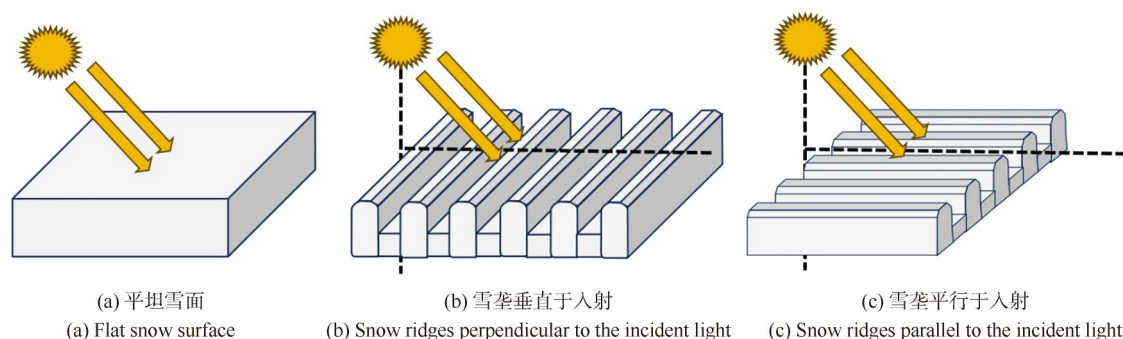


图1 不同雪面结构设置

Fig. 1 Different snow surface structure configurations

2.2 多角度偏振反射系数数据

积雪光学实验在野外夜间条件下进行,以减

弱环境光变化对测量结果的影响。考虑到低温条件下冰晶生长速率较慢(温度低于-16℃时变

化可忽略^[24]),可认为实验过程中积雪表面性质保持相对稳定。

实验照明采用 1 000 W 卤素灯(Oriel, Newport Corporation, Irvine, CA, USA),光源安装于半径 1.5 m 的 90°圆弧轨道上,并结合离轴抛物面镜系统,使入射光近似为平行光,从而模拟太阳光照条件(图 2)。入射天顶角设定为 65°。

积雪表面的多角度偏振特性通过旋转臂式测角系统获取(图 2),该系统由旋转臂与半径 0.4 m 的圆形底座组成^[12]。测量过程中,假设主平面两侧偏振反射特性近似对称,因此在方位角 0°~180°范围内以 30°间隔进行观测,并在 15°与 165°处加密采样。观测天顶角范围为 0°~60°,步长为 10°。在此基础上,利用几何对称性扩展至完整半球空间,最终获得 17 个方位角(0°~360°,以 30°为间隔,包含 15°和 165°及其对称角)与 7 个天顶角组合,共计 119 个观测方向的偏振反射数据。传感器视场角为 6°,探测器与雪面距离为 0.45 m,对应地面探测足迹由约 4.2 cm 圆形区域扩展为约 8.4 cm 椭圆区域。

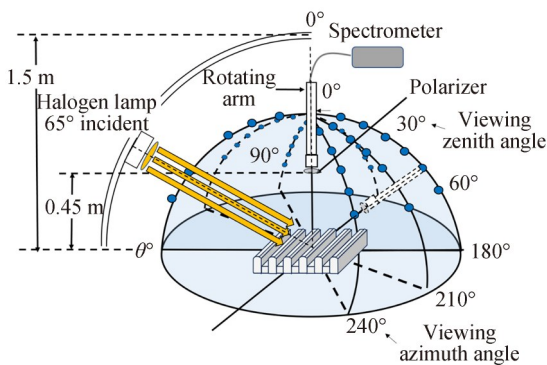


图 2 多角度偏振反射测量装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the multi-angle polarized reflectance measurement apparatus.

光谱测量采用 ASD 光谱仪完成。在光纤前端安装波段范围 350~2 300 nm 的 Glan-Thompson 棱镜偏振器,并以 1°步长旋转偏振片,在 0°~360°不同偏振方向上测量雪面反射的偏振辐亮度。

在每个观测几何下,分别记录四个偏振方向(0°,45°,90°和 135°)的辐亮度($L_0^\circ, L_{45}^\circ, L_{90}^\circ, L_{135}^\circ$)。偏振参考平面定义为仪器子午面。在此基础上计算 Stokes 参数(I, Q, U, V)用于描述积雪偏振

特性,其中 I 表示总辐射强度, Q 与 U 描述偏振状态的幅度与方向, V 在地表反射情况下通常可忽略^[25]:

$$I = (L_{0^\circ} + L_{45^\circ} + L_{90^\circ} + L_{135^\circ})/2, \quad (1)$$

$$Q = L_{0^\circ} - L_{90^\circ}, \quad (2)$$

$$U = L_{45^\circ} - L_{135^\circ}, \quad (3)$$

$$R_p = \sqrt{Q^2 + U^2}, \quad (4)$$

其中, R_p 为雪面反射的偏振辐亮度。

积雪的反射系数定义为相同入射-观测几何条件下,雪面的 I 参量反射系数与参考表面反射辐亮度之比。

偏振反射系数(BPRF)用于表征积雪偏振反射特性,定义为在相同入射-观测几何条件下,雪面偏振反射辐亮度($dR_{p, \text{snow}}$)与参考表面反射辐亮度($dL_{\text{reference}}$)之比^[26]:

$$\text{BPRF} = \frac{dR_{p, \text{snow}}(\lambda, \theta_s, \varphi_s; \theta_v, \varphi_v)}{dL_{\text{reference}}(\lambda, \theta_s, \varphi_s; \theta_v, \varphi_v)} \rho_\lambda. \quad (5)$$

考虑到偏振反射系数在不同波段的变化规律较为一致,本研究选取 8 个典型波段(445, 560, 670, 865, 960, 1 590, 1 880, 2 250 nm)用于后续分析。

3 研究方法

3.1 偏振反射模型

为评估现有偏振反射模型在不同积雪表面结构条件下的适用性,本研究选取两种被广泛应用于陆地表面偏振反射模拟的偏振反射模型进行分析。这两种模型均假设地表近似平坦,在具有明显方向性起伏结构(如雪垄)条件下的适用性尚不明确。通过对这两类典型模型开展评估,有助于揭示宏观表面结构对偏振反射建模的影响及现有模型的局限性。

第一种为修正菲涅耳模型(Litvinov 模型),该模型通过引入表面坡度分布和阴影效应,描述陆地表面偏振反射模拟^[27],该模型表示为:

$$\text{BPRF}(\theta_s, \varphi_s; \theta_v, \varphi_v) = \frac{H\pi F(\alpha, n)}{4\cos\beta(\cos\theta_s + \cos\theta_v)} f(\sigma, \beta) f_{sh}(\gamma), \quad (6)$$

$$f(\sigma, \beta) = \frac{1}{\pi \cos^3 \beta 2\sigma^2} \exp\left(-\frac{\tan^2 \beta}{2\sigma^2}\right), \quad (7)$$

$$f_{sh}(\gamma) = \left(\frac{1 + \cos k_s(\pi - \gamma)}{2} \right)^3, \quad (8)$$

$$\cos \beta = \frac{\cos \theta_v + \cos \theta_s}{2 \cos \alpha}. \quad (9)$$

该模型包含三个参数: H , σ 和 k_s 。其中, σ^2 表示微面元坡度均方值, $f(\sigma, \beta)$ 为微面元分布的函数, 根据以往的研究假定服从高斯分布, $f_{sh}(\gamma)$ 为阴影函数^[27]。

第二种为 Nadal - Breon 偏振反射模型(Nadal-Breon 模型)以较少参数实现对地表偏振反射的有效表征, 已广泛应用于地表偏振反射系数模拟, 其表达式为^[28]:

$$BPRF(\theta_s, \varphi_s; \theta_v, \varphi_v) = D \left[1 - \exp \left(-B \frac{F_p(\alpha, n)}{\cos \theta_s + \cos \theta_v} \right) \right], \quad (10)$$

其中, D 和 B 为 Nadal-Breon 模型参数。

3.2 模型模拟和评估指标

本研究用于评估 Litvinov 与 Nadal-Breon 对不同积雪表面结构偏振反射系数的模拟能力。通过构建测量值与模拟值之间的误差函数进行参数优化, 其目标函数定义为:

$$J(C) = \sum_{\text{角度}=1}^{119} \left[BPRF_{\text{测量}}(\theta_v, \varphi_v) - BPRF_{\text{模拟}}(\theta_v, \varphi_v) \right]^2, \quad (11)$$

其中: $BPRF_{\text{测量}}$ 为实际测量的积雪偏振反射系数, $BPRF_{\text{模拟}}$ 是 Litvinov 模型和 Nadal-Breon 模型在入射-探测几何已知情况下的模拟值参数优化采用 MATLAB 中的“lsqcurvefit”函数实现, 通过

最小化目标函数确定最优参数组合。模型参数的初始值及约束范围参考已有研究设定^[29], 如表 1 所示。

表 1 反演参数上下限和初始值设置

Tab. 1 Setting the upper and lower limits and initial values for inversion parameters

模型	符号缩写	下限	上限	初始值
Litvinov	H	0	50	0.01
	σ	0.01	1	0.1
	σ	0	10	0.5
Nadal-Breon	D	0	0.05	0.01
	B	0	100	50

本研究采用模拟和测量偏振反射系数计算的可决系数(R^2), 均方根误差(RMSE), 以及相对均方根误差(RMSE/测量的均值, RRMSE)对模型的性能进行评估。

4 结果与讨论

4.1 不同表面结构的积雪反射光谱特性

平坦雪面、雪垄垂直于入射方向以及雪垄平行于入射方向的反射系数如图 3 所示。

三种表面结构下, 反射光谱均表现出一致的基本特征, 即在可见光波段反射较高, 并随波长增加逐渐减小。

在角度分布上, 三种情形均表现出相似的

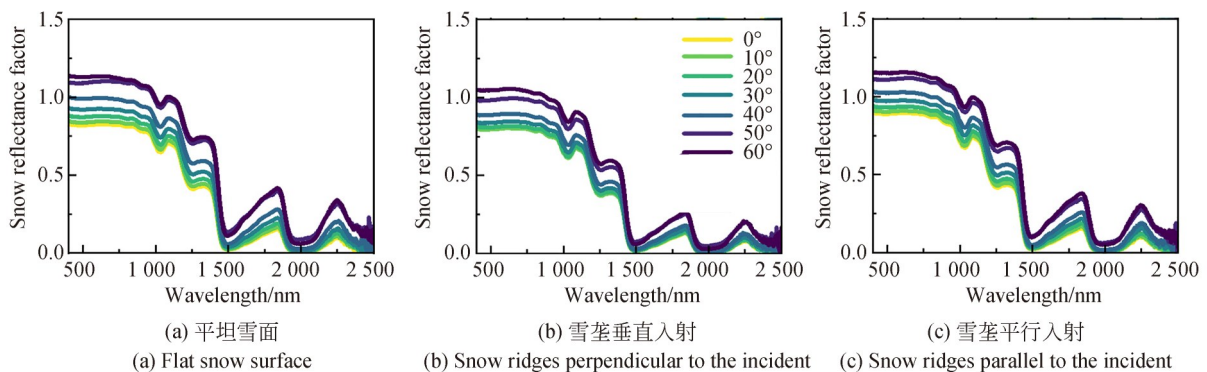


图 3 在前向散射方向的不同角度上, 不同积雪表面的反射系数光谱。

Fig. 3 Spectral reflectance of different snow surface structures at various viewing zenith angles in the forward-scattering direction

总体趋势:随着观测方向由垂直方向逐渐转向前向散射方向,反射系数逐渐增加,与以往的研究一致^[30]。然而,不同表面结构下的角度响应幅度存在差异。其中,平坦雪面与雪垄平行于入射方向时,其在前向 60° 及 0° 方向的反射增强幅度明显大于雪垄垂直于入射方向的情形。

总体而言,积雪反射系数的强度变化及其角度分布特征受表面结构显著控制,尤其在引入雪垄结构后,其前向散射增强行为表现出一定差异性。为深入刻画这种结构差异对反射的影响,本

研究进一步分析不同积雪表面的偏振反射角度分布特征。

4.2 不同表面结构的积雪偏振反射及模型模拟表现

平坦雪面、雪垄垂直于入射方向以及雪垄平行于入射方向在 670 nm 处的偏振反射系数角度分布如图4第一行所示。

平坦雪面偏振反射系数随散射方向变化呈现较为规律的分布特征,整体表现为由后向散射方向($0^\circ\sim 90^\circ$ 及 $270^\circ\sim 360^\circ$)逐渐向前向散射方向($90^\circ\sim 270^\circ$)增加,并在前向散射方向的大探测天

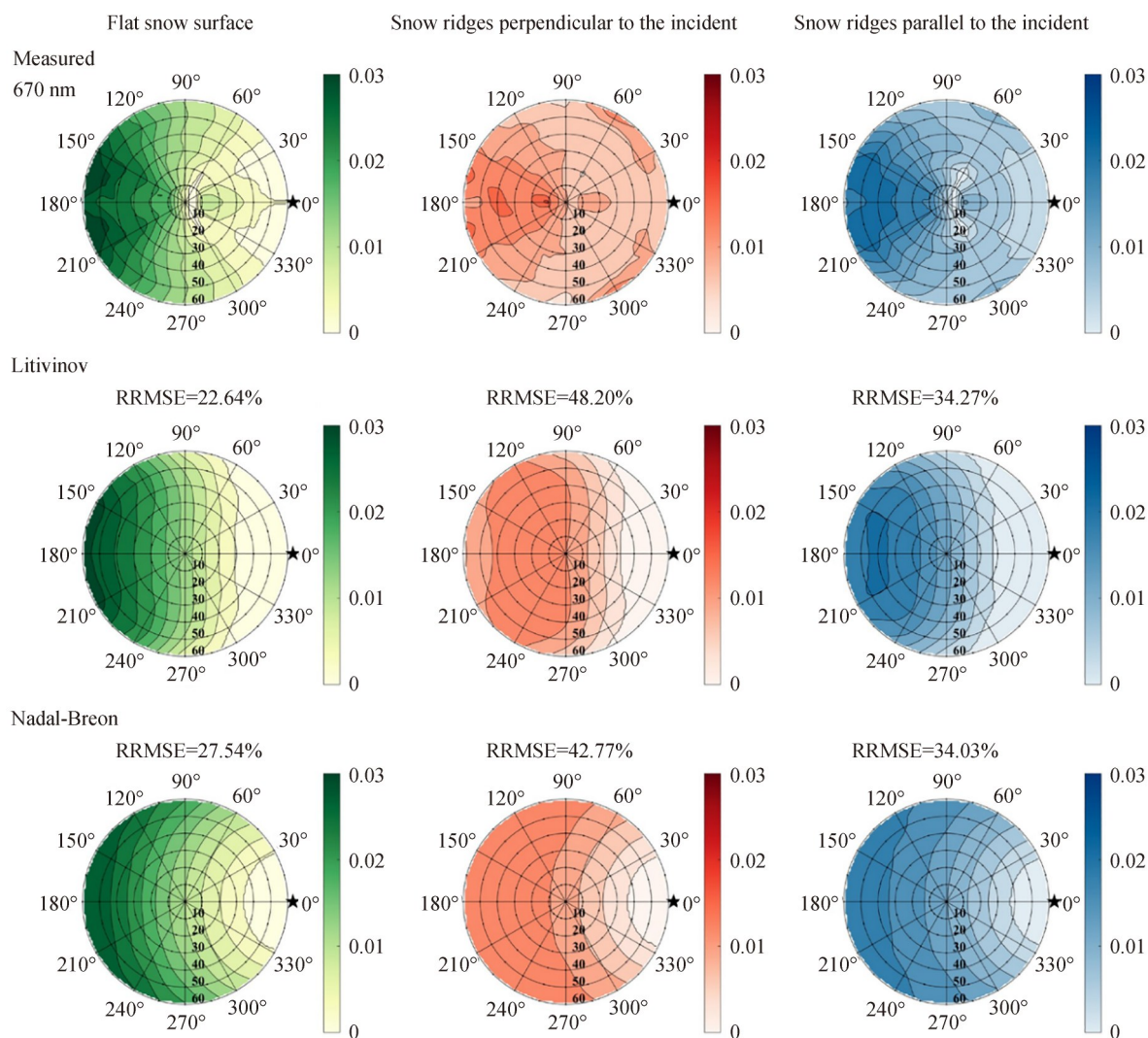


图4 在 670 nm ,平坦雪面,雪垄垂直于入射和雪垄平行于入射的测量偏振反射系数角度分布,以及Litvinov模型和Nadal-Breton模型的模拟角度分布及精度。

Fig. 4 Angular distributions of measured bidirectional polarized reflectance factor at 670 nm for a flat snow surface, snow ridges perpendicular to the incident direction, and snow ridges parallel to the incident direction, together with the simulated angular distributions and accuracies of the Litvinov and Nadal-Breton models.

顶角处达到最大值。这与其他地物的偏振反射分布一致^[29]。

雪垄平行于入射方向时,其角度分布特征与平坦雪面总体一致,仅在局部角度范围内出现轻微扰动。这可能与该几何条件下,虽然雪垄引入了部分阴影效应,但对整体散射影响有限有关。

相比之下,雪垄垂直于入射方向时积雪表面偏振反射的分布表现出明显差异:相对平坦积雪表面,前向散射方向表现出降低的趋势,而后向散射方向则表现出增强趋势。前向散射方向是由于在雪垄方向垂直入射情况下,雪垄自身的阴影增加造成单次散射的数量降低,从而使偏振反射变小。后向散射方向出现的偏振反射峰值,是由后向散射方向的偏振反射主要受相干后向散射过程控制^[31]。对于雪垄垂直入射方向的积雪表面,入射光在后散射方向会与更多的积雪颗粒相互作用,同时会以不同的相位角被探测器获取。因此,相对平坦积雪表面会产生更多的多重散射次数,增加了雪垄在后向散射方向的相干后向散射能力,导致偏振反射变大。在雪垄垂直于入射方向时,雪垄结构显著改变了偏振反射的空间分布特征,这种变化主要是后向相干散射机制引起的^[31]。

基于上述半球空间观测结果(图4),本研究验证了 Litvinov 与 Nadal-Breon 对偏振反射系数角度分布的模拟能力(图4第二和第三行)。在平坦雪面以及雪垄平行入射情况下,两种模型均能够较好再现偏振反射角度分布特征,对应 RRMSE 低于 28% 和 35%。然而,在雪垄垂直入射条件下,前向散射方向的偏振反射增强幅度明显减弱,后向散射方向的偏振反射幅度有所增强,导致偏振反射的空间分布偏离了典型的前向散射增强特征。由于 Litvinov 模型和 Nadal-Breon 模型均基于平坦雪面的散射假设,仅能描述以前向散射增强为主的偏振反射角度分布,因此难以准确再现雪垄地形引起的后向散射分布变化,导致全角度拟合误差显著增大,RRMSE 分别上升至 42% 和 48.2%。综上, Litvinov 与 Nadal-Breon 能够较好模拟平坦雪面的偏振反射角度分布,但在雪垄结构条件下,由于前后向散射方向偏振反射的空间分布特征差异

性明显,两个模型无法有效刻画偏振反射的分布特性,使得模型误差显著增加。结果表明,现有模型对具有显著微地形结构的积雪表面适用性有限。未来需进一步研究雪垄结构对偏振散射机制的影响机理,并发展能够表征复杂积雪表面结构的偏振反射模型,以提高模拟精度与适用范围。

4.3 偏振反射模型的模拟表现

本研究进一步综合不同波段,评估现有偏振反射模型。图4给出了两种模型在三种积雪表面结构(平坦雪面、雪垄垂直入射和雪垄平行入射)上的整体模拟结果(基于8个波段在119个探测角度上的综合数据,共952个样本)。所选波段覆盖可见光、近红外和短波红外区域,能够反映积雪在不同吸收和散射机制主导下的光学响应特征。此外,这些波段与 POLDER/ PARASOL, Research Scanning Polarimeter (RSP) 等卫星与机载传感器的典型观测波段相近。

结果表明,在平坦雪面条件下, Litvinov 与 Nadal-Breon 均能够较好模拟观测结果,散点基本分布在 1:1 线附近,对应 R^2 分别为 0.86 和 0.84, RRMSE 均低于 29%(图4(a)~4(b))。

图5为现有偏振反射模型对三种不同积雪表面的偏振反射系数的模拟表现。第一至第三行表示不同积雪表面包括平坦表面、雪垄垂直于入射,以及雪垄平行于入射的结果。第一列和第二列为 Litvinov 和 Nadal-Breon 模型。散点数目为 952(8个波段×119个探测方向)。当存在雪垄结构时,模型性能明显下降。与平坦雪面相比,雪垄结构导致偏振反射系数整体幅度由 0~0.035 降低至 0~0.025,同时模拟误差显著增加。在雪垄垂直于入射方向时,散点偏离 1:1 线最为明显,两种模型 R^2 分别降至 0.43 和 0.44, RRMSE 约为 50%(图5(c)~5(d))。在雪垄平行于入射方向时,模型性能介于两者之间, Litvinov 与 Nadal-Breon 的 R^2 分别为 0.72 和 0.64, RRMSE 约为 39%(图5(e)~5(f))。

上述结果表明,雪垄结构显著降低了现有模型对积雪偏振反射的表征能力。

不同波段(445, 560, 670, 865, 960, 1 590, 1 880, 2 250 nm)下的模型统计结果如图6所示。

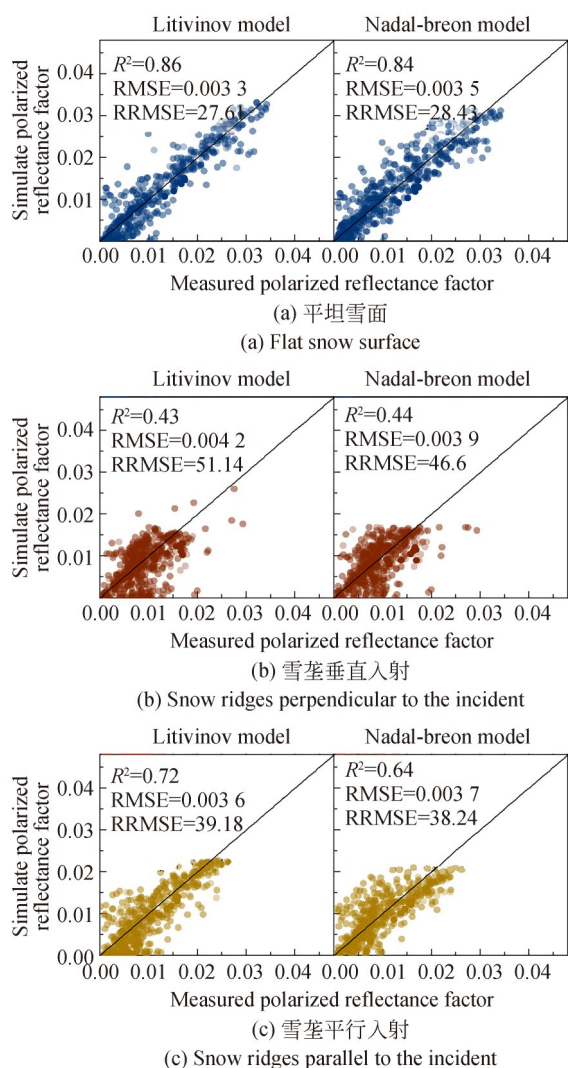


图5 现有偏振反射模型对三种不同积雪表面的偏振反射系数的模拟表现

Fig. 5 Performance of existing polarized reflection models in simulating bidirectional polarized reflectance factor over three snow surface types

结果与图5总体一致:在各波段上,平坦雪面的模拟精度最高, R^2 均值接近0.9,相对均方根误差(RRMSE)均值低于30%。雪垄平行于入射方向时,模型性能次之, R^2 均值约为0.7,RRMSE均值约为35%。而在雪垄垂直于入射方向时,模型表现最差, R^2 均值降至约0.3,RRMSE均值超过40%。

以上结果表明,现有偏振反射模型在平坦雪面条件下具有较好的模拟性能,但在雪垄结构条件下模拟精度明显下降,表现不理想。

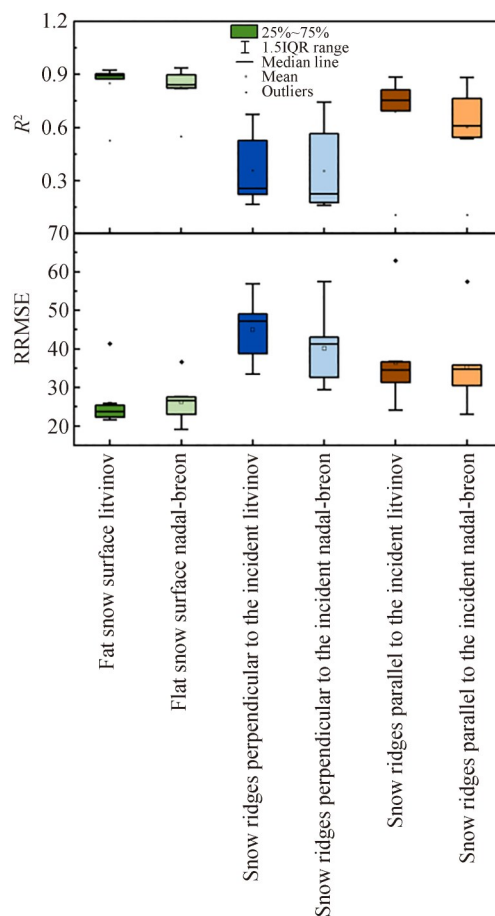


图6 现有偏振反射模型(Litvinov和Nadal-Breton模型)在不同波段上(445,560,670,865,960,1 590,1 880以及2 250 nm)对三种不同积雪表面的模拟结果统计

Fig. 6 Statistical evaluation of the Litvinov and Nadal-Breton models for simulations of three snow surface types at wavelengths of 445, 560, 670, 865, 960, 1 590, 1 880, and 2 250 nm

5 结 论

本文通过设置不同积雪表面结构及其与入射方向的相对关系,包括平坦雪面、雪垄垂直于入射方向以及雪垄平行于入射方向,测量了其多角度偏振反射系数,并在此基础上评估了现有偏振反射模型对不同积雪表面偏振反射特性的表征能力。

结果表明,平坦雪面的偏振反射系数主要表现为前向散射增强;当雪垄平行于入射方向时,其空间分布特征与平坦雪面较为相似;而在雪垄垂直于入射方向时,前向散射方向的偏振反射幅度由于阴影效应明显减弱,后向散射方

向偏振反射由于相干后向散射机制有所增强,使其偏振反射空间分布偏离了典型的前向散射增强特征。

模型评估结果显示,Litvinov 与 Nadal-Breon 在平坦雪面条件下均具有较高模拟精度($R^2 > 0.8$, RRMSE $<28\%$)。然而,由于雪垄微地形改变了偏振反射的空间分布,使其偏离了模型的平坦雪面散射假设,模型精度明显下降:雪垄平行于入射方向时 RRMSE 升至约 35%,在雪垄垂直于入射方向时进一步升至约 42%~48%。

综上,存在雪垄结构的积雪表面与平坦表面在偏振反射特性上存在显著差异,现有偏振反射模型难以对其进行有效表征。该结果揭示了现

有模型的适用边界,并表明为满足复杂积雪条件下偏振遥感应用需求基于高光谱的战场侦察需求,有必要进一步构建适用于垄状积雪表面的物理一致性偏振反射模型。

作者贡献声明:

吴迪:数据测量,处理与实验,论文构思和撰写;

白新伟:测量方法提出,论文构思和撰写;

尤金凤:测量实验的设计及数据整理和分析;

于光:参与模型优化与算法实现,论文审核与编辑写作。

参考文献:

- [1] GAILLARD M, VIONNET V, LAFAYSSE M, *et al.* Improving large-scale snow albedo modeling using a climatology of light-absorbing particle deposition[J]. *The Cryosphere*, 2025, 19(2): 769-792.
- [2] PALOMAKI R T, RITTGER K, LENARD S J P, *et al.* Assessment of methods for mapping snow albedo from MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2025, 326: 114742.
- [3] DUMONT M, ARNAUD L, PICARD G, *et al.* *In situ* continuous visible and near-infrared spectroscopy of an Alpine snowpack[J]. *The Cryosphere*, 2017, 11(3): 1091-1110.
- [4] KOKHANOVSKY A A, ZEGER E P. Scattering optics of snow[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(7): 1589.
- [5] LV Y F, WU D, SUN Z Q. Effect of black carbon concentration on the reflection property of snow: a comparison with model results[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(11): 6823-6840.
- [6] DOMBROVSKY L A, KOKHANOVSKY A A, RANDRIANALISOA J H. On snowpack heating by solar radiation: a computational model[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 227: 72-85.
- [7] SINGH S, BARROS A P. Improving surface property retrievals in boreal seasonal snowpacks through multiscale modeling of subgrid reflectance [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2026, 19: 10635-10657.
- [8] CHEN W, YAN L, CHANDRASEKAR V. Optical polarization remote sensing[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(13): 4849-4852.
- [9] KOKHANOVSKY A. *Remote Sensing of Snow* [M]. Snow Optics. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025: 105-140.
- [10] PELTONIEMI J I, JÄRVINEN J, ZUBKO N, *et al.* Spectropolarimetric characterization of pure and polluted land surfaces[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(13): 4865-4878.
- [11] MAIGNAN F, BRÉON F M, FÉDÈLE E, *et al.* Polarized reflectances of natural surfaces: Spaceborne measurements and analytical modeling [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(12): 2642-2650.
- [12] SUN Z Q, WU D, LV Y F. Optical properties of snow surfaces: multiangular photometric and polarimetric hyperspectral measurements [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 4301516.
- [13] TSIKERDEKIS A, SCHUTGENS N A J, FU G

- L, *et al.* Estimating aerosol emission from SPEX-one on the NASA PACE mission using an ensemble Kalman smoother: observing system simulation experiments (OSSEs) [J]. *Geoscientific Model Development*, 2022, 15(8): 3253-3279.
- [14] DINER D J, XU F, MARTONCHIK J V, *et al.* Exploration of a polarized surface bidirectional reflectance model using the ground-based multiangle SpectroPolarimetric imager [J]. *Atmosphere*, 2012, 3(4): 591-619.
- [15] VANDERBILT V C, GRANT L. Plant canopy specular reflectance model[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, GE-23(5): 722-730.
- [16] TYO J S, GOLDSTEIN D L, CHENAULT D B, *et al.* Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5453.
- [17] PELTONIEMI J, HAKALA T, SUOMALAINEN J, *et al.* Polarised bidirectional reflectance factor measurements from soil, stones, and snow[J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, 2009, 110, 1940-1953.
- [18] BRADLEY C L, DINER D J, XU F, *et al.* Spectral invariance hypothesis study of polarized reflectance with the ground-based multiangle SpectroPolarimetric imager[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(10): 8191-8207.
- [19] SUN Z Q, ZHANG J Q, ZHAO Y S. Laboratory studies of polarized light reflection from sea ice and lake ice in visible and near infrared[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(1): 170-173.
- [20] YANG B, ZHAO H M, CHEN W. Modeling polarized reflectance of snow and ice surface using POLDER measurements[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 236: 106578.
- [21] ROBLEDANO A, PICARD G, DUMONT M, *et al.* Unraveling the optical shape of snow[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 3955.
- [22] SUN Z Q, ZHAO Y S. The effects of grain size on bidirectional polarized reflectance factor measurements of snow [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011, 112(14): 2372-2383.
- [23] SUN Z Q, PENG Z Y, WU D, *et al.* Photopolarimetric properties of leaf and vegetation covers over a wide range of measurement directions[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, 206: 273-285.
- [24] COLBECK S C. Ice crystal morphology and growth rates at low supersaturations and high temperatures [J]. *Journal of Applied Physics*, 1983, 54(5): 2677-2682.
- [25] TALMAGE D A, CURRAN P J. Remote sensing using partially polarized light[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(1): 47-64.
- [26] SUN Z Q, HUANG Y H, BAO Y L, *et al.* Polarized remote sensing: a note on the stokes parameters measurements from natural and man-made targets using a spectrometer[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(7): 4008-4021.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] JIAO Z T, DING A X, KOKHANOVSKY A, *et al.* Development of a snow kernel to better model the anisotropic reflectance of pure snow in a kernel-

driven BRDF model framework[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 221: 198-209.

[31] MISHCHENKO M I, DLUGACH J M, LIU L.

Azimuthal asymmetry of the coherent backscattering cone: Theoretical results[J]. *Physical Review A*, 2009, 80(5): 053824.

通讯作者:



吴 迪(1983—),女,黑龙江佳木斯人,硕士,副教授。2009年毕业于东北师范大学物理学院。主要从事空中侦察、光学遥感方面研究,参与完成了10余项军内科研项目和省级科研项目。
E-mail:wudi1915@126.com

作者简介:



白新伟(1982—),女,吉林省吉林市人,硕士,副教授。2008年毕业于长春理工大学检测技术与自动化装置专业。主要从事航空中侦察方面的研究,参与完成了10余项军内科研项目和省级科研项目。E-mail:39373008@qq.com