

基于星载 POLDER 冰雪数据评价 3 个 BRDF 模型

郭静^{1,2}, 焦子锜^{1,2}, 丁安心^{1,2}, 董亚冬^{1,2}, 张小宁^{1,2,3},
崔磊^{1,2}, 尹思阳^{1,2}, 常雅轩^{1,2}, 谢蕊^{1,2}

1. 北京师范大学 地理科学学部, 遥感科学与工程研究院, 北京 100875;

2. 北京师范大学 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875;

3. 北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875

摘要: 冰雪在短波区域具有很强的各向异性反射特征, 对全球能量平衡及水循环等有重要作用。目前, 国内外学者发展了一系列应用于冰雪的二向性反射分布函数 BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) 模型, 全面比较和评估这些模型对星载多角度遥感产品的业务化模型选择有重要参考价值和指导意义。本文基于全球 POLDER 冰雪多角度反射率数据, 选取 3 个模型, 包括核驱动、半经验的 MODIS 业务化 RTLSR 模型、渐进辐射传输物理模型 ART 以及新发展的 RTLSRS 模型进行了全面比较分析, 研究结果表明: (1) 在拟合所有 POLDER 数据时, RTLSRS 模型都具有最高精度, 对于单组纯雪数据, RTLSRS 模型的最小二乘拟合的均方根误差 (RMSE) 比 ART 模型降低了 45.45%, 仅为 RTLSR 模型的 18.46%。对于非纯雪数据, RTLSRS 模型与 RTLSR 模型的拟合能力总体差别不大, 但其 RMSE 比 RTLSR 模型降低了 67.5%, ART 模型的精度最差。(2) 虽然 RTLSRS 可以高精度拟合所有数据, 但该模型拟合纯雪 ($R^2=0.969$, $RMSE=0.012$) 精度较优于非纯雪 ($R^2=0.926$, $RMSE=0.013$)。 (3) 对 RTLSRS 模型进行简化, 仅保留其各向同性核和雪核 ISM (Isotropic-Snow Model), 验证结果表明: 简化后的模型能够很好地表征雪的二向散射能力, 使用 POLDER 全部纯雪数据进行拟合时, R^2 达到了 0.949, RMSE 为 0.034。本文有助于用户在实际应用冰雪多角度数据时选择更合适的 BRDF 模型, 同时对理解这些模型的误差提供了有价值的参考

关键词: 冰雪, ART, RTLSR, RTLSRS, POLDER, 核驱动 BRDF 模型

引用格式: 郭静, 焦子锜, 丁安心, 董亚冬, 张小宁, 崔磊, 尹思阳, 常雅轩, 谢蕊. 2022. 基于星载 POLDER 冰雪数据评价 3 个 BRDF 模型. 遥感学报, 26(10): 2060-2072

Guo J, Jiao Z T, Ding A X, Dong Y D, Zhang X N, Cui L, Yin S Y, Chang Y X and Xie R. 2022. Evaluation of three BRDF models' performance using spaceborne POLDER snow data. National Remote Sensing Bulletin, 26(10): 2060-2072 [DOI:10.11834/jrs.20210010]

1 引言

地表是非朗伯体, 反射模式随入射和观测方向的变化而变化 (Bréon 和 Maignan, 2017), 二向性反射率分布函数 BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) 用来描述地表反射模式的固有属性 (Schaepman-Strub 等, 2006; Wen 等, 2018)。当前, 对地表二向反射特征的研究已经成为定量遥感的一个重要研究方向 (董亚冬, 2017)。积雪是一种重要的地表覆盖类型, 对全球水循环、辐射收支平衡等研究具有重要意义 (Jiao

等, 2019; 蒋熹, 2006), 精确描述雪的散射特性对深入理解各循环有重要作用。纯雪是反射最强的自然表面之一 (Wiscombe 和 Warren, 1980), 在可见光范围内, 新雪的反射率接近 1 (Singh 等, 2010)。总体上, 雪具有强的前向散射特性, 尤其在大太阳天顶角 SZA (Solar zenith angle) 的情况下 (Peltoniemi 等, 2005; 潘海珠等, 2015; 瞿瑛等, 2016) 在现阶段, 雪表面的多角度测量数据仍然十分缺乏, 尤其在地形复杂或气候恶劣的地区, 雪的野外多角度观测数据很难获取 (Robinson 等, 1993), 对于这些地区, 采用机载

收稿日期: 2020-01-20; 预印本: 2020-06-04

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2018YFA0605503); 国家自然科学基金(编号:41971288, 41571326)

第一作者简介: 郭静, 研究方向为定量遥感、雪的反射率模型等研究工作。E-mail: guojing0404@mail.bnu.edu.cn

通信作者简介: 焦子锜, 研究方向为多角度光学遥感的建模、反演与应用(土壤-植被-冰雪)。E-mail: jiaozt@bnu.edu.cn

或星载多角度传感器是获取多角度数据的主要的手段, 因此, 一些多角度卫星数据, 如 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 和 POLDER (Polarization and Directionality of Earth Reflectances) 等多角度数据已经得到广泛应用 (Lucht 和 Roujean, 2000; Schaaf 等, 2002; Jiao 等, 2016)

除了对冰雪多角度数据的广泛需求, 雪的散射模型是定量解决与雪相关应用的关键因素 (Kokhanovsky 和 Bréon, 2012; Jiao 等, 2019; Ding 等, 2019)。目前, 国内外研究人员已经提出并发展了一系列的二向性反射模型来模拟或重构雪的方向性散射特征, 这些模型主要分为 3 类: (1) 物理模型, 例如, 简化的辐射传输模型—WW 模型 (Wiscombe 和 Warren, 1980)、离散纵坐标辐射传输 (DISORT) 模型 (Stamnes 等, 1988), 根据雪的特性发展的渐进辐射传输物理模型 ART (Asymptotic Radiative Theory) (Kokhanovsky 和 Zege, 2004) 和基于蒙特卡洛光线追踪技术和辐射传输理论提出的 bic-PT 模型 (Xiong 和 Shi, 2014); (2) 经验模型, 例如, 基于统计的线性 Walthall 模型 (Walthall 等, 1985), 一般来说这种模型应用范围较窄; (3) 半经验模型, 例如, RPV 模型 (Rahman-Pinty-Verstraete) (Rahmah 等, 1993) 和 RTLSR 模型 (RossThick-LiSparseReciprocal) (Lucht 和 Roujean, 2000)、Qu 等 (2014) 发展的四核核驱动模型以及 RTLSRS 模型 (RTLSR-Snow) (Jiao 等, 2019)。

RTLSR 模型是 MODIS 反照率产品的业务化算法, 该模型最初针对植被-土壤系统发展而来, 但由于植被-土壤系统和冰雪具有明显不同的散射特性, 该模型对雪反射率的拟合结果并不理想 (Wu 等, 2011; 丁安心等, 2019)。Wu 等 (2011) 曾对该模型拟合冰雪的效果进行验证, 结果表明, 当不约束核权重系数时, 几何光学核的权重系数通常为负值, 此时对雪的散射拟合较好, 在红光波段均方根误差 (RMSE) 为 0.0485, 但此时无法解释负值参数的物理意义。考虑到 MODIS 业务化算法对该模型参数有约束的条件要求 (即各权重系数为非负); 丁安心等 (2019) 对 RTLSR 模型表征雪的二向性散射能力进行了评估, 限制模型的权重系数不为非负值, 利用 ART 模型挑选了 284 个 POLDER 纯雪像元进行拟合, 在红光波段的决定系

数 (R^2) 为 0.2774, RMSE 为 0.0378; Jiao 等 (2019) 利用 RTLSR 模型对南极观测的站点数据进行拟合, 红光波段 RMSE 达到了 0.094, 并且 RMSE 随波长的增加而增大。

ART 模型是 Kokhanovsky 和 Zege (2004) 等根据雪的特征得到的辐射传输模型, 在全球陆表特征参量 (GLASS) 的反照率产品研究中发挥了很大作用。Kokhanovsky 和 Bréon (2012) 使用格林兰岛和南极洲的 POLDER 数据以及南极洲获取的站点数据进行验证, 结果表明, 在大多数情况下, ART 模型的模拟结果与 POLDER 观测数据相关性能达到 0.85 以上, 偏差小于 0.1, 但是该模型在前向大观测角度低估了测量结果。目前, 有两个修正后的核驱动模型考虑了冰雪的反射特征, 即 Qu 等 (2014) 根据 RPV 模型得到的冰雪散射核和 Jiao 等 (2019) 基于 ART 模型修正得到的冰雪散射核。Qu 等 (2014) 发展的四核核驱动模型在太阳角为 35° — 55° 时难以表征冰雪的特征, 而 Jiao 等 (2019) 发展的模型则可以在各个太阳角下均获得较好的结果。

为了更好地用半经验的核驱动模型描述雪的散射特征, Jiao 等 (2019) 对 ART 模型进行校正得到冰雪散射核, 结合 RTLSR 模型发展了 RTLSRS 模型, 该模型能够表征植被-土壤-冰雪系统, 与 ART 模型相比, RTLSRS 模型的冰雪散射核通过引入前向散射调整参数, 更好地表征雪的前向散射特性, 尤其在大角度下。使用 POLDER 数据和南极洲站点数据进行验证, 表现出较高的精度 ($R^2 \approx 0.9$), RMSE 均小于 0.04 (Jiao 等, 2019)。Ding 等 (2019) 的研究也表明, Jiao 等 (2019) 提出的冰雪散射核能够更好地拟合各种冰雪多角度数据。因此本文选取了 ART 模型、RTLSR 模型以及复合了两模型优点的 RTLSRS 模型进行研究。

但是, 上述提到的研究只考虑了用纯雪数据对模型进行验证, 例如, Kokhanovsky 和 Bréon (2012) 对 ART 模型进行验证时, 只选取了格林兰岛中心和南极洲的数据; 丁安心等 (2019) 在对 MODIS 业务化模型进行评估时, 以均质度为 100%、在蓝波段的反射率大于 0.4 以及 ART 模型拟合较好的结果作为前提条件来筛选纯雪数据; Jiao 等 (2019) 在模型验证时选取的数据为南极雪数据以及格林兰岛的数据。对于可能为非纯雪 (即一个像元中包含两种及两种以上地表类型) 的

验证仍然不够,特别是由于POLDER数据有较粗的空间分辨率(天顶方向空间分辨率约为 $6\text{ km}\times 7\text{ km}$)。此外,对这些模型进行系统比较,尤其针对雪的BRDF数据,如何进一步简化RTLSRS模型,使其更容易被用户使用,是模型发展和评估过程中需要考虑的问题。在此研究中,我们进一步量化了最新发展的RTLSRS模型相对于RTLSR模型和ART模型的优势。

本文收集了2006年(649个像元)和2008年(600个像元)的全球POLDER冰雪多角度数据,按该数据库提供的“均质度”(homogeneity)参数将其初步分为纯雪(均质度=100%)和非纯雪(均质度<100%)数据,分别使用上述3个模型对这两种数据进行拟合,根据 R^2 、RMSE和偏差(bias)这3个指标来比较这3种模型对不同数据的拟合能力,为用户在不同情况下选择合适的模型提供依据。同时,考虑到用户对于模型简化的需求,对RTLSRS模型进行简化,仅保留了各向同性散射核和雪核,并对该模型对纯雪的代表能力进行分析和验证。

2 数据

2.1 数据说明

POLDER-3传感器搭载在法国空间研究中心的PARASOL卫星上,空间分辨率较粗,星下点分辨率约为 $6\text{ km}\times 7\text{ km}$,观测天顶角VZA(View zenith angle)可达到 $60^\circ\text{--}70^\circ$,相对方位角RAA(Relative Azimuth Angle)可以覆盖 $0^\circ\text{--}360^\circ$ 的任何方位。POLDER-3辐射计包含一个宽视场透镜的二维CCD矩阵,在沿轨方向的观测角可以达到 $\pm 51^\circ$,交轨方向的观测角可以达到 $\pm 43^\circ$,因此,能获取较大范围的多角度数据。PARASOL为太阳同步卫星,即在不同轨道上获取数据时的太阳角近似不变,该卫星可以实现在不同轨道上经过相同的地表时,获取不同角度的观测数据,每一个像元最多可累积到16个(平均有14个)不同角度的观测(Deschamps等,1994)。因此,POLDER-3仪器能够收集足够多的多角度数据,是地面目标反射率建模验证重要的多角度数据源(Kokhanovsky和Bréon,2012;常雅轩等,2019;丁安心等,2019)

POLDER数据共包括可见光与近红外9个波段,

它们的中心波长分别为443 nm、490 nm、565 nm、670 nm、763 nm、765 nm、865 nm、910 nm和1020 nm,其中490 nm、670 nm和865 nm包含光的偏振信息。早期,Lacaze(2009)构建了POLDER-3辐射计2005年11月至2006年10月的多角度反射率数据库(本文称2006年数据库,<http://postel.mediasfrance.org> [2020-01-20]);最近,Bréon和Maignan(2017)等构建了2008年全年的多角度数据库,该数据库中冰雪数据是根据国际地圈生物圈计划(IGBP)的雪类型得到,只有像元中雪面积明显占优(>75%)的数据才得以保留,对保留的像元利用BRDF模型计算质量得分,每个月筛选得分最高的50个像元形成最终的数据库,以确保数据库中的数据可以覆盖雪主要空间与时相的变化(<https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.864090> [2020-01-20])。POLDER多角度数据均已经过地理编码、辐射定标、大气校正和去云处理,以ASCII格式存放,主要包括像元的经纬度、IGBP类别、NDVI、轨道号、像元均质度、获取日期、太阳天顶角、观测天顶角、相对方位角、各波段的反射率以及角度校正参数等。2006年及2008年POLDER冰雪数据库中标记为纯雪的数据主要分布在南极洲和格林兰岛附近,较少的一部分分布在中高纬地区,而非纯雪数据则主要分布在格林兰岛附近的小岛上,还有一部分数据分布在中纬地区。

2.2 数据预处理

POLDER数据在不同波段的观测角有微小的差异。Bréon和Maignan(2017)建立的数据集中给定的观测天顶角和相对方位角是670 nm波段处的对应角度,其余波段的角度信息可以通过数据文件中的校正公式进行校正。由于本文中使用的数据均为670 nm处的数据,因此无需校正。

本文根据POLDER数据库中雪的“均质度”是否为100%初步分为两类(后文中表述为“纯雪”和“非纯雪”)。“均质度”定义为每个POLDER像元中心对应的 5×5 个MODIS像元中IGBP为雪的像元所占的比例(Bréon和Maignan,2017),将这些数据的ASCII文件进行初步处理得到包含“观测天顶角(θ_e)”、“相对方位角(ϕ_e)”、“太阳天顶角(θ_i)”、“太阳方位角(ϕ_i)”以及各个波段“反射率”的文本形式,分年月按波段存放。综合2006年和2008年的冰雪数

据，纯雪数据共有 897 个像元，非纯雪数据共有 352 个像元。

3 模型与方法

3.1 RTLSR 模型

核驱动模型最早是由 Roujean 等 (1992) 提出用来表征地表二向性反射模式的半经验模型，该模型由 3 个散射组分 (各向同性散射、体散射、几何光学散射) 的线性加权和构成，这些散射组分可以简化为核函数，其值随着观测和光照几何位置的变化而变化。核驱动模型的基本表达式如下：

$$R(\theta_i, \theta_v, \varphi, \lambda) = f_{\text{iso}}(\lambda) + f_{\text{vol}}(\lambda)K_{\text{vol}}(\theta_i, \theta_v, \varphi) + f_{\text{geo}}(\lambda)K_{\text{geo}}(\theta_i, \theta_v, \varphi) \quad (1)$$

式中， $R(\theta_i, \theta_v, \varphi, \lambda)$ 是 λ 波长处的反射率，各向同性核值为 1； $K_{\text{vol}}(\theta_i, \theta_v, \varphi)$ 代表冠层内部多次散射引起的体散射核，目前常用的主要有 Rossthick 核和 Rossthin 核； $K_{\text{geo}}(\theta_i, \theta_v, \varphi)$ 代表离散冠层的单次散射引起的几何光学散射 (阴影效应) 核，主要包括 Roujean 核、LiSparse 核、LiDense 核和 LiTransit 核以及它们的互易形式 (董亚冬等, 2014; Dong 等, 2016; Dong 等, 2018a 和 2018b)，这些核都是关于太阳天顶角 θ_i 、观测天顶角 θ_v 和相对方位角 φ 的函数； $f_{\text{iso}}(\lambda)$ 、 $f_{\text{vol}}(\lambda)$ 和 $f_{\text{geo}}(\lambda)$ 分别为 3 个核的权重系数， $f_{\text{iso}}(\lambda)$ 可以表示为在天顶入照和反射方向的波段反射率值， $f_{\text{vol}}(\lambda)$ 和 $f_{\text{geo}}(\lambda)$ 是模型的各向异性参数，主要表征地表反射的非朗伯性。

MODIS 业务化算法采用的体散射核为 RossThick 核、几何光学散射核为 LiSparseR 核，简称为 RTLSR 模型。RossThick 核基于 Ross 辐射传输理论的单次散射近似假设，针对一维随机分布叶片冠层进行建模，主要用来表征碗状的 BRDF 反射模式 (Jiao 等, 2018a)，LiSparseR 核是 (Li 和 Strahler, 1985; Li 和 Strahler, 1992) 基于的几何光学模型的方法，描述了离散植被三维结构及其阴影作用所产生的几何光学散射，主要表征类似屋顶状的 BRDF 反射模式。RTLSR 模型是针对植被-土壤系统提出的 (Wu 等, 2012; 丁安心等, 2019)，因此能较好拟合植被-土壤系统 BRDF 较强的后向散射特性。

RTLSR 模型中体散射和几何光学核的计算公式如下：

$$K_{\text{RT}} = \frac{(\frac{\pi}{2} - \xi) \cos \xi + \cos \xi}{\cos \theta_i + \cos \theta_v} - \frac{\pi}{4} \quad (2)$$

$$K_{\text{LSR}} = O(\theta_i, \theta_v, \varphi) - \sec \theta'_i - \sec \theta'_v + \frac{1}{2} (1 + \cos \xi') \sec \theta'_i \sec \theta'_v \quad (3)$$

式中，

$$\cos \xi = \sin \theta_i \sin \theta_v \cos \varphi + \cos \theta_i \cos \theta_v \quad (4)$$

$$O(\theta_i, \theta_v, \varphi) = \frac{1}{\pi} (\arccos X - X \sqrt{1 - X^2}) (\sec \theta'_i + \sec \theta'_v) \quad (5)$$

$$\theta' = \arctan(\frac{b}{r} \cdot \tan \theta) \quad (6)$$

$$X = \frac{h}{b} \frac{\sqrt{D^2 + (\tan \theta'_i \tan \theta'_v \sin \varphi)^2}}{\sec \theta'_i + \sec \theta'_v} \quad (7)$$

$$D = \sqrt{\tan^2 \theta'_i \tan^2 \theta'_v - 2 \tan \theta'_i \tan \theta'_v \cos \varphi} \quad (8)$$

式中， ξ 是观测方向与太阳入射之间的相角， $O(\theta_i, \theta_v, \varphi)$ 是重叠函数，表征由于光照阴影和视线阴影重合部分的面积， h/b 和 b/r 分别是描述树冠形状和相对高度的结构参数， h 代表树冠中心到地面的平均高度， b 和 r 分别描述椭圆树冠的长半轴和短半轴。该模型中，这两个比值分别为 $h/b=2$ ， $b/r=1$ 。

根据多角度观测数据，利用最小二乘法反演出最优的 3 个权重系数 f_{iso} 、 f_{vol} 和 f_{geo} ，然后理论上就可以计算任意太阳光入射和观测方向的二向反射率，以及估算地表反照率。最小二乘误差函数如下：

$$e^2(\lambda) = \frac{1}{x} \sum_i \frac{(\rho(\theta_i, \theta_v, \varphi, \lambda) - R(\theta_i, \theta_v, \varphi, \lambda))^2}{\omega_i(\lambda)} \quad (9)$$

式中， x 为自由度，即观测个数与参数个数之差， $\rho(\theta_i, \theta_v, \varphi, \lambda)$ 和 $R(\theta_i, \theta_v, \varphi, \lambda)$ 分别代表模型模拟值和观测值， $\omega_i(\lambda)$ 是每个观测值的权重。当最小二乘误差函数取最小值时的模型参数即为 3 个权重系数的取值 (Roujean 等, 1992; Luch 和 Roujean, 2000)。

3.2 渐进辐射传输模型

渐进辐射传输模型是由 Kokhanovsky 和 Zege (2004) 提出，又称双参数模型，该模型考虑雪粒子为不规则粒子，以雪粒径和污染物两个变量作为主要驱动参数，具体计算公式如下：

$$R(\theta_i, \theta_v, \varphi) = R_0(\theta_i, \theta_v, \varphi) \exp(-\gamma f(\theta_i, \theta_v, \varphi)) \quad (10)$$

式中， θ_i 、 θ_v 、 φ 的意义与式 (1) 同； R_0 表示半无限、非吸收介质表面的反射率，计算公式如下：

$$R_0(\mu_i, \mu_v, \varphi) = \frac{K_1 + K_2(\mu_i + \mu_v) + K_3 \cdot \mu_i \mu_v + P(\xi)}{4(\mu_i + \mu_v)} \quad (11)$$

式中, $K_1 = 1.247$, $K_2 = 1.186$, $K_3 = 5.157$ 。 μ_i 和 μ_v 分别为 $\cos \theta_i$ 和 $\cos \theta_v$ 。

$$P(\xi) = 11.1 \exp(-0.087(180 - \xi)) + 1.1 \exp(-0.014(180 - \xi)) \quad (12)$$

式中的指数项代表雪的光吸收效应导致反射率的下降, 计算公式如下:

$$y = \sqrt{\beta L} \quad (13)$$

$$\beta = 4\pi(\chi + M)/\lambda \quad (14)$$

由式 (13) 和 (14) 可得:

$$y = \sqrt{4\pi L(\chi + M)/\lambda} \quad (15)$$

式中, L 参数与有效雪粒径 d 有关, 近似为 $13d$, M 与雪中污染物的质量浓度成正比。由于较长波长处雪的吸收主要取决于雪粒径, 因此可以利用 1020 nm 处的反射率来计算雪粒径。得到雪粒径后, 较短波长处的反射率就可以用于估算雪中污染物对光的吸收 (即参数 M) (Kokhanovsky 和 Schreier, 2009), 其计算公式如下:

$$L = \frac{\left(\frac{R_0}{K_0} \ln\left(\frac{R_0}{R}\right)\right)^2 \times \lambda_{1020}}{4\pi\chi_{1020}} \quad (16)$$

$$M = \frac{\left(\frac{R_0}{K_0} \ln\left(\frac{R_0}{R}\right)\right)^2 \times \lambda_{490}}{4\pi L} \quad (17)$$

式中, K_0 是逸出函数, 描述了光源在介质中的无限深度处时, 从半无限-非吸收介质层逃逸的光的角度分布 (Kokhanovsky 和 Zege, 2004), 按照经验公式给出:

$$K_0 = \frac{3}{7}(1 + 2\theta) \quad (18)$$

$f(\theta_i, \theta_v, \varphi)$ 是一个与观测-照明几何相关的角度函数:

$$f(\theta_i, \theta_v, \varphi) = \frac{K_0(\theta_i)K_0(\theta_v)}{R_0(\theta_i, \theta_v, \varphi)} \quad (19)$$

由于污染物在 1020 nm 波段的吸收很弱, 因此利用该波段信息来计算 L 时, 可以取 $M=0$ 。 λ_{1020} 为 1020 nm 的波长, χ_{1020} 为 1020 nm 波长对应的冰的复折射指数的虚部; M 值与污染物的复折射指数的虚部成正比, 并且与波长有关 (Kokhanovsky 和 Schreier, 2009), 但是由于这种相关性在可见光和近红外波段范围内非常弱, 可以忽略。利用 490 nm 的波段信息来计算 M , λ_{490} 和 χ_{490} 的含义同

上。部分波长对应的冰的复折射指数的虚部如表 1 所示 (Kokhanovsky 和 Bréon, 2012)。

表 1 部分波长对应的冰的复折射指数虚部

Table 1 Imaginary part of the ice refractive index for partial wavelengths

λ/nm	$\chi(10^{-9})$
490	1.78
565	3.52
670	18.9
765	85.8
865	165
1020	2250

3.3 RTLSRS 模型

Jiao 等 (2019) 基于解析的 ART 模型, 通过对其前向散射进行校正, 提出一个雪散射核, 并应用于核驱动模型 RTLSR 框架中, 简称为 RTLSRS 模型, 使模型可用于“土壤-植被-冰雪”体系, 其公式可以表示为:

$$R(\theta_i, \theta_v, \varphi, \lambda) = f_{\text{iso}}(\lambda) + f_{\text{vol}}(\lambda)K_{\text{vol}}(\theta_i, \theta_v, \varphi) + f_{\text{geo}}(\lambda)K_{\text{geo}}(\theta_i, \theta_v, \varphi) + f_{\text{snw}}(\lambda)K_{\text{snw}}(\theta_i, \theta_v, \varphi) \quad (20)$$

式中, $f_{\text{snw}}(\lambda)$ 代表雪核的权重系数, $K_{\text{snw}}(\theta_i, \theta_v, \varphi)$ 代表雪核, 其他参数的含义与式 (1) 同。雪核的计算公式如下 (Jiao 等, 2019):

$$K_{\text{snw}}(\theta_i, \theta_v, \varphi) = R_0(\theta_i, \theta_v, \varphi)(1 - \alpha \cdot \cos \xi \cdot \exp(-\cos \xi)) + 0.4076\alpha - 1.1081 \quad (21)$$

该雪核是关于观测天顶角、太阳天顶角以及二者相对方位角这 3 个角度的函数, 其中 α 是用于进一步调整雪的前向散射的参数, 其余参数的含义同上。求解 4 个权重系数及最优 α 值的方法与反演 RTLSR 模型参数的方法一致, 但与 RTLSR 求解过程不同的是, 这个模型中的未知数除了 4 个权重系数还有 α 值, 最小二乘误差函数最小时对应的 α 和, 4 个参数即为所求。Jiao 等 (2019) 的研究中表明, α 的最优值约为 0.3, 为了获取更精准的最优值, 在本文中, 重新计算并采用了 0—0.5 范围内的最优 α 值; 以该范围作为前提条件, 使用最小二乘法确定 α 不需要考虑雪的光学和结构特性。

需要说明的一点是, 在本文的研究中, 对核系数进行了非负约束, 这主要是由于核系数为负值时无法解释其物理意义, 同时也避免了该模型反演时的病态问题 (Wu 等, 2011; Jiao 等, 2015)。

对于纯雪而言，体散射和几何光学的贡献通常很小（Jiao等，2019；Ding等，2019），因此，为了便于用户应用该模型，本研究对模型进一步简化，只保留各向同性散射（Isotropic）和雪散射（Snow）两个组分的简化模型（ISM），以探索该简化模型是否能够满足大多数用户对纯雪拟合的精度要求。

3.4 比较方法

在模型比较时，本研究结合了典型数据分析与全体数据统计相结合的分析比较方法。首先，在纯雪数据和非纯雪数据中分别选取一个典型像元，用3个模型分别拟合，根据均方根误差（RMSE）、决定系数（ R^2 ）和偏差（Bias）等指标进行比较分析；然后，分别使用全部纯雪、非纯雪数据进行拟合，比较整体拟合效果。此外，由于670 nm处雪的吸收接近0，并且该波段为可见光范围内的典型波段，因此，整个分析过程均以670 nm处的数据为例。

4 结果与分析

4.1 模型比较与评估

4.1.1 基于典型纯雪的案例分析

在POLDER数据库中选取一组位于南极洲区域比较典型的纯雪数据（74.97°S，119.89°E），编码为IGBP_15_200802BRDF_ndvi02_2970_3800。该像元的归一化植被指数（NDVI）为-0.04，表明红波段比近红外波段有更高的反射，数据获取时间为2008年2月，该像元内总共包括777个多角度反射率观测数据，太阳天顶角分布在61.1°—74.7°范围内，角度分布如图1所示。

图1中，较大的点代表太阳位置，较小的点代表传感器位置，与中心的距离代表观测天顶角的大小，不同的颜色代表一个月中不同日期的观测，横、纵坐标分别代表主平面和垂直主平面，正值代表前向，负值代表后向。从图1中可以看出该像元的观测角范围在0—65°间，主平面与垂直主平面都有足够多的观测值，角度采样很好。取该像元670 nm波段处的信息，使用3个模型分别对这组数据进行拟合，主平面上的比较结果如图2所示，这里选取的主平面上的数据为距离主平面范围10°以内的数据，其中，深粉色的点代表主平面上的观测点，太阳天顶角设置为该像元内观测的

所有太阳天顶角的均值。

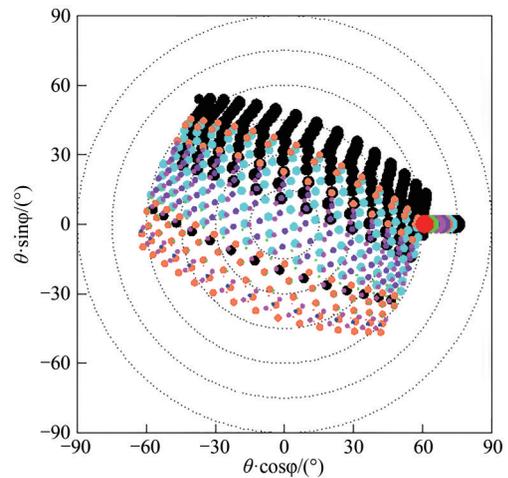


图1 纯雪像元角度分布图，其中 θ 为天顶角， ϕ 为相对方位角，较大的点代表太阳的位置，较小的点代表观测的位置，相同颜色的观测代表是同一天内的观测

Fig. 1 The angle distribution of the pure snow, θ represents the zenith angle, ϕ represents the relative azimuth angle. The larger points are the solaction of sun, and the smaller ones are the viewing positions. Observations of the same color are obtained in one day

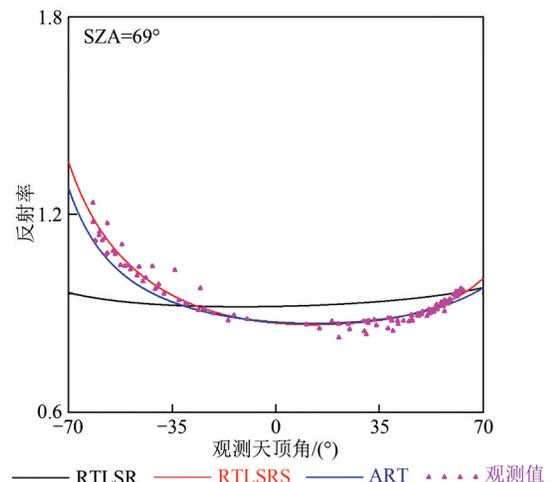


图2 主平面上纯雪数据3种模型拟合结果和观测值

Fig. 2 The fitting result of three models for the pure snow pixel in the principal plane (PP) and its observed value

从图2中可以看出，对于这组典型纯雪数据，在整个观测范围内，RTLSR模型的模拟值与观测值差别最大，基本没有表征出该组纯雪数据在主平面上的基本变化趋势；ART模型模拟值与观测值相比整体趋势一致，但是前向大角度时的拟合略微低估；RTLSRS模型整体拟合最好，相对于ART模型，在前、后向大角度下都可以很准确地拟合这组纯雪反射率，尤其前向大角度更准确地表征出纯雪在大太阳角下较强的前向散射特性。具体的模型参数以及统计值见表2。

表2 3种模型拟合纯雪反射数据的模型参数及统计量

Table 2 Model parameters and statistics for three models in fitting pure snow pixel reflectances

模型名称	模型参数							统计量		
	$L/\mu\text{m}$	M	f_{iso}	f_{vol}	f_{geo}	f_{snw}	α	RMSE	R^2	Bias
ART	0.005	0	—	—	—	—	—	0.022	0.932	-0.008
RTLSR	—	—	0.922	0.039	0	—	—	0.065	0.029	0
RTLSRS	—	—	0.962	0.019	0.008	0.689	0.140	0.012	0.969	0

RTLSR模型的 R^2 仅为0.029,由于对该模型参数反演进行了非负约束,该模型甚至无法拟合观测数据基本趋势的变化。由表2可见,该模型的几何光学核系数为0,说明此时几何光学散射核对反射率无贡献,体散射核系数很小,表明其对反射率的贡献也很小,此时主要是各向同性散射起作用,拟合结果近似朗伯,所以,该模型无法对纯雪的前向散射进行基本变化趋势的描述和预测。对于ART模型,决定系数 R^2 为0.932, RMSE达到了0.022,该模型基本能够表征纯雪的前向散射特征,但在前、向后大的观测天顶角时存在明显的低估,从而导致与观测数据相比仍存在较大的偏差。对于这组纯雪数据,RTLSRS模型拟合精度最高, R^2 达到了0.969, RMSE仅为0.012,偏差基本可以忽略;与其他两个模型相比,该模型拟合的RMSE仅为RTLSR模型的18.46%,比ART模型的RMSE减少了45.45%。由表2可见,RTLSRS的体散射核和几何光学核对反射率的贡献很小,各向同性散射和雪核起主要作用(分别为0.962和0.689),因此,该案例分析表明,RTLSRS模型能够很好地描述纯雪的散射情况。

4.1.2 基于典型非纯雪的案例分析

同样,在POLDER数据库中选取了一组非纯雪典型数据,该数据位于格林兰岛地区边缘经纬度为(80.58°N, 25.3°W),在数据库中的编码为IGBP_15_200807BRDF_ndvi04_0170_3166, POLDER数据库中给出像元“均质度”指标为84%,从地表类型上说明该组数据混入较多非雪的数据成分。该像元反射率获取时间为2008年7月,像元内包括1161个反射率观测数据,太阳天顶角分布在57°—74°之间,角度采样分布如图3,图中标记的含义与图1同。

本文提取该像元670 nm的反射率数据,分别使用3种模型进行拟合,主平面上的观测数据和拟合曲线如图4所示,分析方法上与上述分析纯雪像元一致。

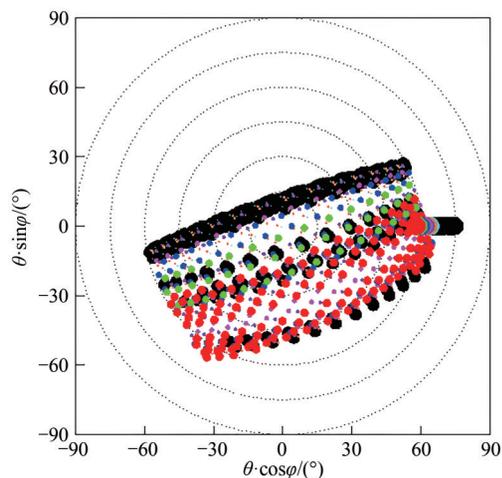


图3 非纯雪像元的角度分布图,其中 θ 为天顶角, φ 为相对方位角,较大的点代表太阳的位置,较小的点代表观测的位置,相同颜色的观测代表是同一天内的观测

Fig. 3 The angle distribution of the impure snow pixel, θ represents the zenith angle, φ represents the relative azimuth angle. The larger points are the solaction of sun, and the smaller ones are the viewing positions. Observations of the same color are obtained in one day

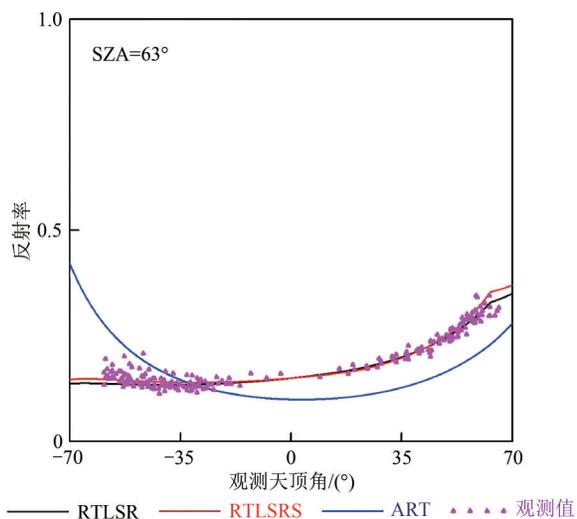


图4 非纯雪数据3种模型在主平面上的拟合结果和观测值
Fig. 4 The fitting result of three models for the impure snow pixel in the principal plane (PP) and its observed value

从图4中可以看出,该组非纯雪数据表现出较强的后向散射,且反射率均低于0.5,仅从反射率

的较小的量值变化基本可以判断出该组数据纯雪的概率很小。此时，RTLSR 模型和 RTLSRS 模型拟合的 BRDF 形状很相似，均能较好地描述该组数据的散射特性，而 ART 模型拟合的 BRDF 曲线仍然

表现出较强的前向散射，与该像元表现出的实际的散射特征完全不一致，表明 ART 模型此时并不能表征该非纯雪像元基本散射特征的变化。具体的模型参数以及统计值如表 3 所示。

表 3 3 种模型拟合非纯雪反射数据的模型参数及统计量

Table 3 Model parameters and statistics for three models in fitting impure snow data

模型名称	模型参数							统计量		
	$L/\mu\text{m}$	M	f_{iso}	f_{vol}	f_{geo}	f_{snow}	α	RMSE	R^2	Bias
ART	0.06	3.69E-06	—	—	—	—	—	0.136	0.016	0.011
RTLSR	—	—	0.194	0.067	0.026	—	—	0.04	0.908	0
RTLSRS	—	—	0.231	0.026	0.042	0.106	0.3	0.013	0.926	0

从表 3 中可以看出，对于这组典型非纯雪数据的拟合，ART 模型的模拟值与 POLDER 观测数据几乎不相关， R^2 接近 0，RMSE 达到了 0.136，且偏差不可忽略；RTLSR 模型的决定系数 R^2 可达到 0.908，RMSE 比 ART 模型降低了 70.58%；RTLSRS 模型的决定系数可达到 0.926，RMSE 为 0.013，比 RTLSRS 模型降低了 67.5%。从表 3 中可以看出，此时，RTLSR 模型的 3 个核系数在起着不同程度的作用，但总体上体散射核和几何光学核反射率的贡献相对较小，各向同性核起主导作用，这表明，对于这组典型的非纯雪像元，反射量值（即 f_{iso} ）在散射中占主导；对于 RTLSRS 模型的拟合，各向同性核与雪核共同起主导作用。

4.1.3 基于所有雪数据的统计分析

使用 3 个模型分别对 POLDER 数据库所有雪数

据进行拟合，所有的纯雪数据包括 897 个像元，12457872 个多角度反射率观测值，所有的非纯雪数据包括 352 个像元，233998 个多角度反射率观测值。同样，仍选用 670 nm 波段，密度散点如图 5 所示，其中深色代表出现频率较高的点，浅色代表频率较低的点，黑色、蓝色、红色分别代表 RTLSRS 模型、ART 模型以及 RTLSR 模型；图 5 (a) 为拟合纯雪的结果，图 5 (b) 为拟合非纯雪的结果。图 5 中有部分反射率值大于 1，这是由于纯雪总体上有很高的反射率，是地球表面具有最高反射率的地表类型；另外，传感器除了接收太阳直射光的反射，还接收散射光造成的反射，这些散射光引起的反射率的变化在 0.01—1 之间 (Peltoniemi 等, 2010)，同时雪具有较强的前向散射，当太阳天顶角较大时，反射率的值可能大于 1，这部分数据对于雪的反射是有效数据。

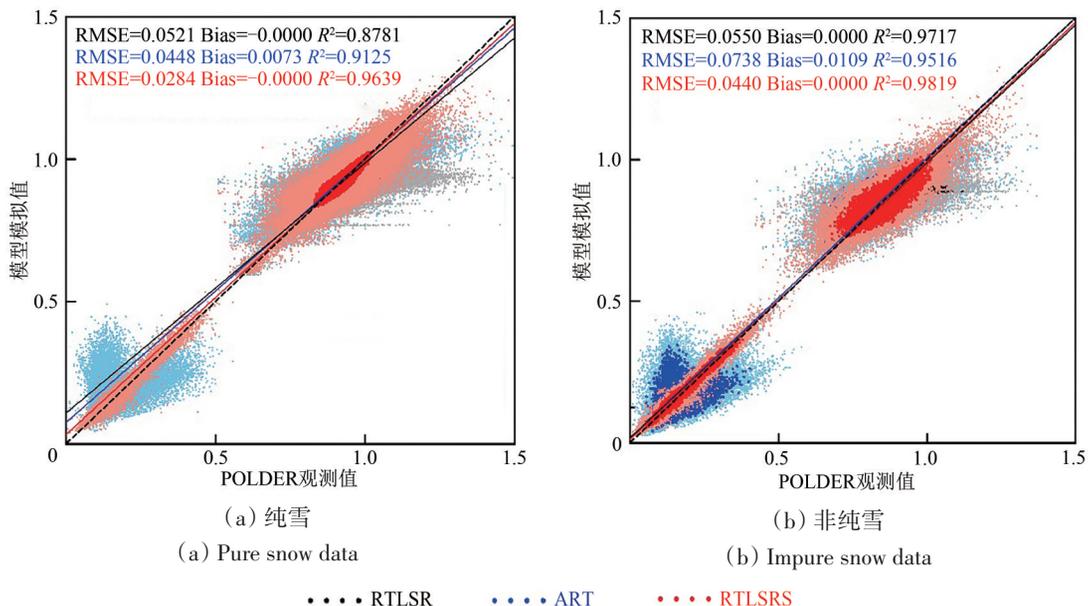


图 5 RTLSR、ART、RTLSRS 模型拟合全部纯雪数据与非纯雪数据的密度散点图

Fig. 5 Density-slice scatter plots for three models in simulating all POLDER snow reflectances

由图5可以看出,在使用全部数据进行拟合时,RTLSRS模型对纯雪和非纯雪数据的拟合都表现得最好,并且对纯雪的拟合精度优于非纯雪。 R^2 接近1,偏差几乎可以忽略,但RMSE对于纯雪像元更小。总体上看,ART模型对纯雪和非纯雪进行拟合时,都表现出较好的拟合,这主要是由于对于POLDER数据库而言,雪数据的选择总体上可信,虽然POLDER像元空间分辨率较大,混合像元效应所导致的非纯雪情况不可能完全避免,但是考虑如何对现有数据库雪的数据进一步优化,对于雪参数的反演和雪散射模型的验证仍是一个迫切需要解决的问题。对于RTLSR模型,拟合非纯雪的能力明显强于ART模型,略弱于RTLSRS模型,这主要是因为增加了雪核,意味着增加了更多的自由参数。但RTLSRS模型和RTLSR模型在表征非纯雪特性时总体上表现出较好的一致性,大部分像元都重合,而在表征纯雪特性时,RTLSR模型存在明显的低估(图5(a)灰色部分);此外,无论对纯雪还是非纯雪,3个模型的差别主要表现在反射率较低的部分,在这部分ART模型的离散程度非常大,而RTLSR和RTLSRS模型在该部分拟合的精度较高。一个主要的原因是因为这部分POLDER观测数据在质量上整体不确定性较大,因此,如何进一步优化这些数据,在现有POLDER数据库的基础上,为用户提供更可靠的POLDER数据是一个重要的工作方向。

4.2 对于纯雪数据的RTLSRS简化模型

从4.1.1节结果分析中可以看出,RTLSRS模型在表征纯雪的二向性反射时,体散射核和几何光学散射核对反射率的贡献很小,甚至可以忽略,为了进一步分析这种情况,对纯雪中897个像元分别进行拟合,各核系数的均值与标准差见表4。

表4 897个纯雪像元的RTLSRS模型核系数参量统计
Table 4 Statistic of the RTLSRS model parameters for 897 pure snow pixel

参量	模型系数			
	f_{iso}	f_{vol}	f_{geo}	f_{snw}
平均值	0.908	0.042	0.010	0.484
标准差	0.136	0.044	0.013	0.255

从表4可以看出,对全部纯雪数据的拟合中,体散射核和几何光学散射核的贡献总体上均明显小于其余两个核,尤其与雪核权重系数相比,平均值约占雪权重系数的约5%。因此,为了用户更简单地使用该模型,本文在此将RTLSRS模型进行简化,仅保留各项同性散射核和雪核两个散射组分。本文将只保留各向同性散射组分(Isotropic)和雪散射组分(Snow)的RTLSRS模型简称ISM模型,并对该模型进行进一步分析评估。

图6中显示的为典型纯雪数据670 nm波段主平面的拟合情况。从拟合结果可以看出,对于纯雪数据,ISM模型与RTLSRS模型总体上具有很好的一致性,这主要是由于雪核有很好的前向散射能力,但是,ISM模型在后向有很小的低估,与ART相比,在前向的拟合能力明显优于ART模型,但在后向大角度的拟合能力比ART模型略差。但考虑到对于纯雪而言,尤其在大太阳和观测角度,用户更关心的是雪前向的散射能力,因此,对于用户而言,虽然使用简化模型会在后向略微损失一点精度,但使用ISM模型也不失为一种较好的选择。

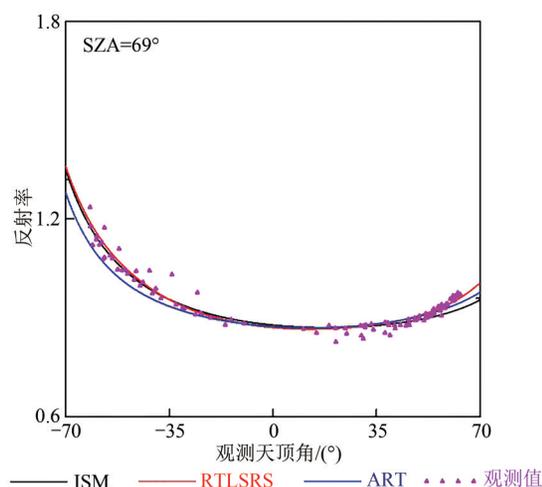


图6 在主平面上纯雪数据拟合ISM模型结果和观测值
Fig. 6 Result of ISM model in simulating the pure snow data in Principal Plane (PP) and its observed value

同样,使用全部数据进行拟合时的结果如图7所示,可以看出,整体拟合精度较高, R^2 达到0.949, RMSE为0.034,虽然RMSE比RTLSRS模型增加了19.4%,但比ART模型减少了24.3%,比RTLSR模型减少更多,误差较大的数据主要出现在反射率较低的部分,在反射率较高的部分拟合程度较好。因此,该结果表明,ISM模型总体上可

以很好地用于纯雪数据的拟合，且表现出比 ART 模型更高的精度。

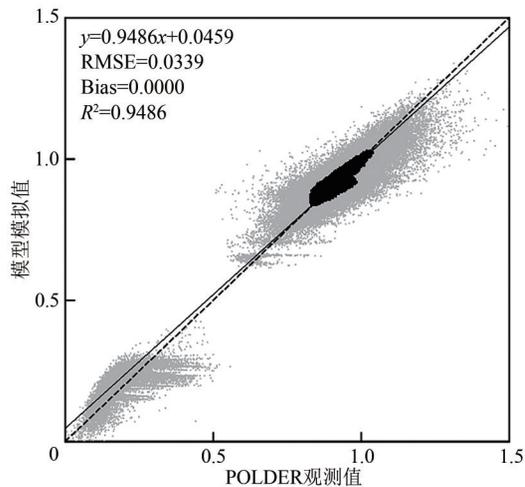


图7 用ISM模型拟合全部纯雪像元的反射率数据

Fig. 7 Scatter plot for ISM model in simulating reflectances of all pure snow pixels

POLDER 冰雪数据质量对冰雪模型的发展、评估、验证和应用有重要影响。我们在研究过程中发现，虽然 POLDER 冰雪数据库总体上有较好的质量，但现有 POLDER 冰雪数据的质量评价指标还不能完全满足用户的应用需求。从图5和图7的总体拟合结果可以看出，对于纯雪，反射率较高的像元出现的频率较高，但仍有一部分像元反射率很低（约占全部数据的4%），在光学波段（本文中选用红波段），在大太阳天顶角的情况下，纯雪的反射往往在天顶观测方向有最小值（图6），即使假设这些反射率的最小量值完全来自于天顶方向，基于定性分析表明，这些反射率在量值上也明显不符合典型纯雪的高反射特性（Qu等，2014）。

同样，在图5（b）中，频率较高的像元有两个比较集中的区域，分别是0.9附近（约占总数据的50%）以及小于0.5范围内（约占总数据的47%），即，有50%的数据方向反射率很高，接近1及以上，这与纯雪的高反射特征很接近。很显然，纯雪和非纯雪数据中均存在一些特例，并且这些特例所占的比例很高，这肯定会对雪散射模型的验证造成一定的不确定性。

造成这样的结果一部分原因是 POLDER 数据分辨率较粗，仅用现有 IGBP 类型作为纯雪的判别不足以准确判定雪的类型，因此，现有 POLDER

数据库中冰雪数据的“均质度”指标很难完全满足用户从该数据库中提取纯雪数据的需求，基于本文的研究结果，考虑如何结合雪的 BRDF 反射特征，发展识别雪的新指标体系是下一步的工作主要研究方向。本文的研究结果为遥感界同行更好应用 POLDER 数据库进行冰雪散射的研究，以及在遥感产品生产过程中模型的选择，有重要的借鉴作用和指导意义。

5 结论

本文主要做了以下几方面研究：第一，基于 POLDER 数据库，分别使用纯雪数据和非纯雪的 BRDF 数据对 ART、RTLSR 和 RTLSRS 这 3 个模型拟合冰雪二向反射特征的能力进行了全面评估；第二，进一步对 RTLSRS 模型进行了简化，得到 ISM 模型，并用 POLDER 纯雪数据对该模型进行了评估和检验；第三，对现有 POLDER 数据库中的冰雪数据质量进行了初步分析，主要得到结论如下：

（1）无论是应用 POLDER 数据库中的纯雪还是非纯雪数据，RTLSRS 模型的拟合精度都是最高的，且该模型表征纯雪的能力强于非纯雪，拟合纯雪的 RMSE 比非纯雪减少了 35.5%。

（2）对于纯雪数据，RTLSR 模型的拟合精度最低，其次是 ART 模型，RTLSRS 模型的拟合精度最高。具体而言，RTLSRS 模型的 RMSE 拟合结果比 ART 模型降低了 45.45%，比 RTLSR 模型降低了 81.54%；对于非纯雪数据，RTLSRS 模型的精度也是最高，决定系数可达 0.982，RMSE 为 0.044，其次是 RTLSR 模型，此时这两者模拟的精度相差不大，ART 模型拟合精度最低。

（3）对于纯雪数据，RTLSRS 模型的几何光学核和体散射核对反射率贡献很小，表明这两个核在模型中的作用很小，因此，对于纯雪 BRDF 数据，RTLSRS 模型可以进一步简化为 ISM 模型，且 ISM 模型纯雪拟合的精度高于 ART 模型。

参考文献 (References)

- Bréon F M and Maignan F. 2017. A BRDF - BPDF database for the analysis of earth target reflectances. *Earth System Science Data*, 9(1): 31-45 [DOI: 10.5194/essd-9-31-2017]
- Chang Y X, Jiao Z T, Dong Y D, Zhang X N, He D D, Yin S Y, Cui L and Ding A X. 2019. Parameterization and correction of hotspot

- parameters of Ross-Li kernel driven models on POLDER dataset. *Journal of Remote Sensing*, 23(4): 661-672 (董亚冬, 焦子铄, 董亚冬, 张小宁, 何丹丹, 尹思阳, 崔磊, 丁安心. 2019. Ross-li 核驱动模型热点参数化及其校正—以 POLDER 数据为例. *遥感学报*, 23(4): 661-672) [DOI: 10.11834/jrs.20198332]
- Deschamps P, Bréon F, Leroy M, Podaire A, Bricaud A, Buriez J and Seve G. 1994. The POLDER mission: instrument characteristics and scientific objectives. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(3): 598-615 [DOI: 10.1109/36.297978]
- Ding A X, Jiao Z T, Dong Y D, Qu Y, Zhang X N, Xiong C, He D D, Yin S Y, Cui L and Chang Y X. 2019. An assessment of the performance of two snow kernels in characterizing snow scattering properties. *International Journal of Remote Sensing*, 40(16): 6315-6335 [DOI: 10.1080/101431161.2019.1590878]
- Ding A X, Jiao Z T, Dong Y D, Zhang X N, He D D, Cui L, Yin S Y and Chang Y X. 2019. Performance assessment of the operational MODIS BRDF model for snow/ice cover type. *Journal of Remote Sensing*, 23(6): 1147-1158 (丁安心, 焦子铄, 董亚冬, 张小宁, 何丹丹, 崔磊, 尹思阳, 常雅轩. 2019. 业务化 MODIS BRDF 模型对冰雪 BRDF/反照率的反演能力评估. *遥感学报*, 23(6): 1147-1158) [DOI: 10.11834/jrs.20198037]
- Dong Y D, Jiao Z T, Ding A X, Zhang H, Zhang X N, Li Y, He D D, Yin S Y and Cui L. 2018a. A modified version of the kernel-driven model for correcting the diffuse light of ground multi-angular measurements. *Remote Sensing of Environment*, 210: 325-344 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.03.030]
- Dong Y D, Jiao Z T, Yin S Y, Zhang H, Zhang X N, Cui L, He D D, Ding A X, Chang Y X and Yang S T. 2018b. Influence of snow on the magnitude and seasonal variation of the clumping index retrieved from MODIS BRDF products. *Remote Sensing*, 10(8): 1194 [DOI: 10.3390/rs10081194]
- Dong Y D, Jiao Z T and Zhang H. 2016. To reconstruct hotspot effect for MODIS BRDF archetypes using a hotspot-corrected kernel-driven BRDF model. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium: 2654-2656 [DOI: 10.1016/j.cageo.2016.06.010]
- Dong Y D, Jiao Z T, Zhang H, Li J Y, Jiao G P and Shi H Y. 2014. Efficient algorithm for improving the hotspot effect of the operational MODIS BRDF product. *Journal of Remote Sensing*, 18(4): 804-825 (董亚冬, 焦子铄, 张虎, 李佳悦, 焦广平, 石涵予. 2014. 改善 MODIS BRDF 产品热点效应的方法研究. *遥感学报*, 18(4): 804-825) [DOI: 10.11834/jrs.20143229]
- Dong Y D. 2017. The improvement of kernel-driven model and its application in estimating clumping index. Beijing: Beijing Normal University: 1-2 (董亚冬. 2017. 核驱动模型的改进及其在估算聚集指数上的应用. 北京: 北京师范大学: 1-2)
- Jiang X. 2006. Progress in the research of snow and ice albedo. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 28(5): 728-738 (蒋熹. 2006. 冰雪反照率研究进展. *冰川冻土*, 28(5): 728-738) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0240.2006.05.016]
- Jiao Z T, Ding A X, Kokhanovsky A, Schaaf C, Bréon F M, Dong Y D, Wang Z S, Liu Y, Zhang X N, Yin S Y, Cui L, Mei L L and Chang Y X. 2019. Development of a snow kernel to better model the anisotropic reflectance of pure snow in a kernel-driven BRDF model framework. *Remote Sensing of Environment*, 221: 198-209 [DOI: 10.16/j.rse.2018.11.001]
- Jiao Z T, Schaaf C B, Dong Y D, Román M, Michael J H, Chen J M, Wang Z S, Zhang H, Saenz E, Poudyal R, Gatebe C, Bréon F M, Li X W and Strahler A H. 2016. A method for improving hotspot directional signatures in BRDF models used for MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 186: 135-151 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.08.007]
- Jiao Z T, Zhang H, Dong Y D, Liu Q H, Xiao Q and Li X W. 2015. An algorithm for retrieval of surface albedo from small view-angle airborne observations through the use of BRDF archetypes as prior knowledge. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(7): 3279-3293 [DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2414925]
- Jiao Z T, Zhang X N, Bréon F M, Dong Y D, Román M, Wang Z S, Cui L, Yin S Y, Ding A X and Wang J D. 2018. The influence of spatial resolution on the angular variation patterns of optical reflectance as retrieved from MODIS and polder measurements. *Remote Sensing of Environment*, 215: 371-385 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.06.025]
- Kokhanovsky A A and Bréon F. 2012. Validation of an analytical snow BRDF model using parasol multi-angular and multispectral observations. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(5): 928-932 [DOI: 10.1109/LGRS.2012.2185775]
- Kokhanovsky A A and Schreier M. 2009. The determination of snow specific surface area, albedo and effective grain size using AASTR space-borne measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 30(4): 919-933 [DOI: 10.1080/01431160802395250]
- Kokhanovsky A A and Zege E P. 2004. Scattering optics of snow. *Applied Optics*, 43(7): 1589-1602 [DOI: 10.1364/AO.43.001589]
- Lacaze P. 2009. POLDER-3/PARASOL BRDF Databases User Manual. POSTEL: 10-16[2019-09-02]. <https://cnes.fr/sites/default/files/migration/smsc/parasol>
- Li X W and Strahler A H. 1985. Geometric-optical modeling of a conifer forest canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23(5): 705-721 [DOI: 10.1109/36.134078]
- Li X W and Strahler A H. 1992. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: effect of crown shape and mutual shadowing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2): 276-292 [DOI: 10.1109/36.134078]
- Lucht W and Roujean J L. 2000. Considerations in the parametric modeling of BRDF and albedo from multiangular satellite sensor observations. *Remote Sensing Reviews*, 18(2/4): 343-379 [DOI: 10.1080/02757250009532395]
- Pan H Z, Wang J and Li H Y. 2015. Accuracy validation of the MODIS snow albedo products and estimate of the snow albedo under cloud over the Qilian Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 37(1): 49-57 (潘海珠, 王建, 李弘毅. 2015. 祁连山区 MODIS 积雪反照率产品的精度验证及云下积雪反照率估算研究. *冰川冻土*, 37(1): 49-57) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2015.0005]
- Peltoniemi J I, Kaasalainen S, Naranen J, Matikainen L and Piironen J. 2005. Measurement of directional and spectral signatures of light reflectance by snow. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote*

- Sensing, 43(10): 2294-2304 [DOI: 10.1109/TGRS.2005.855131]
- Peltoniemi J I, Suomalainen J, Hakala T, Näränen J, Puttonen E, Kaasalainen S, Hirschmugl M and Torppa J. 2010. Reflectance of various snow types: measurements, modeling, and potential for snow melt monitoring. *Light Scattering Reviews*, 5: 393-449 [DOI: 10.1007/978-3-642-10336-0_9]
- Qu Y, Liu Q, Liang S L, Wang L Z, Liu N F and Liu S H. 2014. Direct-estimation algorithm for mapping daily land-surface broadband albedo from MODIS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(2): 907-919 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2245670]
- Qu Y, Liu Q and Liu S H. 2016. A forward kernel function for fitting in situ measured snow bidirectional reflectance factor. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 36(9): 2749-2754(翟瑛, 刘强, 刘素红). 2016. 基于前向散射核函数拟合冰雪反射光谱各向异性. *光谱学与光谱分析*, 36(9): 2749-2754 [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2016)09-2749-06]
- Rahmah H, Pinty B and Verstraete M M. 1993. Coupled surface-atmosphere reflectance (CSAR) model: 2. Semiempirical surface model usable with NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer data. *Journal of Geophysical Research*, 98(D11): 20791-20801 [DOI: 10.1029/93jd02072]
- Robinson D A, Dewey K F and Heimann R R. 1993. Global snow cover monitoring: an update. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74(9): 1689-1696 [DOI:10.1175/1520-0477(1993)074<1689:GSCMAU>2.0.CO;2]
- Roujean J L, Leroy M and Deschamps P Y. 1992. A bidirectional reflectance model of the earth's surface for the correction of remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*, 97(D18): 20455-20468 [DOI:10.1029/92JD01411]
- Schaaf C B, Gao F, Strahler A H, Lucht W, Li X, Tsang T, Strugnell N C, Zhang X, Jin Y, Muller J, Lewis P, Barnsley M, Hobson P, Disney M, Roberts G, Dunderdale M, Doll C, D'Entremont R P, Hu B, Liang S, Privette J L and Roy D. 2002. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 83(1/2): 135-148 [DOI: 10.1016/s0034-4257(02)00091-3]
- Schaepman-Strub G, Schaepman M E, Painter T, Dangel S and Martonchik J. 2006. Reflectance quantities in optical remote sensing—definitions and case studies. *Remote Sensing of Environment*, 103(1): 27-42 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.03.002]
- Singh S K, Kulkarni A V and Chaudhary B S. 2010. Hyperspectral analysis of snow reflectance to understand the effects of contamination and grain size. *Annals of Glaciology*, 51(54): 83-88 [DOI: 10.3189/172756410791386535]
- Stamnes K, Tsay S C, Wiscombe W J and Jayaweera K. 1988. Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media. *Applied Optics*, 27(12): 2502-2509 [DOI: 10.1364/AO.27.002502]
- Walthall C L, Norman J M, Welles J M, Campbell G and Blad B. 1985. Simple equation to approximate the bidirectional reflectance from vegetative canopies and bare soil surfaces. *Applied Optics*, 24(3): 383-387 [DOI: 10.1364/AO.24.000383]
- Wen J G, Liu Q, Xiao Q, Liu Q H, You D Q, Hao D L, Wu S B and Lin X W. 2018. Characterizing land surface anisotropic reflectance over rugged terrain: a review of concepts and recent developments. *Remote Sensing*, 10(3): 370 [DOI: 10.3390/rs10030370]
- Wiscombe W J and Warren S G. 1980. A model for the spectral albedo of snow. I: pure snow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 37(12): 2712-2733 [DOI: 10.1175/1520-0469(1980)037<2712:amftsa>2.0.co;2]
- Wu H Y, Liang S L, Tong L, He T and Yu Y Y. 2012. Bidirectional reflectance for multiple snow-covered land types from MISR products. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(5): 994-998 [DOI: 10.1109/LGRS.2012.2187041]
- Wu H Y, Liang S L, Tong L and He T. 2011. Snow BRDF characteristics from MODIS and misr data. 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2011: 3178-3190 [DOI: 10.1109/IGARSS.2011.6049896]
- Xiong C and Shi J C. 2014. Simulating polarized light scattering in terrestrial snow based on bicontinuous random medium and monte-carlo ray tracing. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 133: 179-189 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2013.07.026]

Evaluation of three BRDF models' performance using spaceborne POLDER snow data

GUO Jing^{1,2}, JIAO Ziti^{1,2}, DING Anxin^{1,2}, DONG Yadong^{1,2}, ZHANG Xiaoning^{1,2,3},
 CUI Lei^{1,2}, YIN Siyang^{1,2}, CHANG Yaxuan^{1,2}, XIE Rui^{1,2}

1. Faculty of Geographical Science, Institute of Remote Sensing Science and Engineering,
 Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Snow and ice scatter solar radiation in a strong anisotropic fashion, especially in shortwave region, which, in turn, causes a significant difference in the study of the global energy balance and water cycles. The remote sensing community has developed a series of reflectance models for various applications in snow surface. Comprehensive comparison and evaluation of these models help in choosing an

algorithm to produce satellite multi-angle remote sensing product. In this paper, we use the Polarization and Directionality of Earth Reflectances (POLDER) multi-angle snow data to compare and evaluate the performance of three models to characterize snow scattering. Three models including the kernel-driven linear Ross Thick-Li Sparse Reciprocal (RTLSR) model as the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) BRDF/Albedo operational algorithm, the Asymptotic Radiative Theory model (ART), and the lately developed RTLSR-Snow (RTLSRS) model have been well used in studies. First, the POLDER data are divided into pure snow data and impure snow data by the using the homogeneity index provided by the POLDER database. We then use three BRDF models to fit (1) a single pure snow BRDF dataset; (2) the entire archive of the pure snow BRDF data; (3) a single impure snow BRDF dataset; and (4) the entire archive of the impure snow BRDF data. We analyze the result on the basis of the R^2 , RMSE and bias. As the volumetric scattering kernel and geometric optical kernel contribute little to pure snow reflectances, we further simplify the RTLSRS model by keeping only isotropic scattering and snow scattering kernel in the kernel-driven model framework (i.e., isotropic and snow-kernel model, ISM). The performance of the ISM model has further been evaluated using the POLDER pure snow data. The results are as follows: (1) The RTLSRS is the most accurate model among all models being considered. For a single pure snow BRDF dataset, the RTLSRS model has an RMSE value that is 45.45% lower than that of ART models and is only 18.46% of that for RTLSR model. For a single impure snow BRDF dataset, the BRDF curve of RTLSRS model is generally similar with RTLSR model's, but the RMSE is 67.5% lower than RTLSR. The RMSE of the ART model is the largest in this case, arriving at 0.136. (2) The accuracy of the RTLSRS model in simulating the pure snow data ($R^2=0.969$, RMSE=0.012) is higher than that of the impure snow data ($R^2=0.926$, RMSE=0.013). (3) The simplified ISM model can characterize the pure snow BRDF data well. The R^2 and RMSE can reach 0.949 and 0.034 for the entire POLDER pure snow data, which is even better than the ART model. RTLSRS has the highest accuracy in fitting various POLDER BRDF snow data. Although the ISM has low accuracy relative to its original RTLSRS model, it shows higher accuracy than the ART model in fitting the POLDER pure snow data. Results present that the index of the "homogeneity" provided by the entire archive of the POLDER snow database cannot necessarily meet the requirement to identify the pure snow pixels of POLDER snow data. Therefore, a new method must be developed to refine the POLDER snow data and provide more details that can improve the understanding for potential users in relation to snow optical scattering.

Key words: snow, ART, RTLSR, RTLSRS, POLDER, kernel-driven BRDF model

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFA0605503); National Natural Science Foundation of China (No. 41971288, 41571326)