

引 用 格 式: ZHANG Teng, YOU Dongqin, WEN Jianguang, *et al.* The optimal angular sampling for bi-directional reflectance distribution function retrieval[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2023, 38(1): 66-77. [张腾, 游冬琴, 闻建光, 等. 二向反射遥感反演最优角度采样方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2023, 38(1): 66-77.] DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2023.1.0066

二向反射遥感反演最优角度采样方法研究

张 腾^{1,2}, 游冬琴¹, 闻建光^{1,2}, 唐 勇¹

(1. 中国科学院空天信息创新研究院 遥感科学国家重点实验室, 北京 100083;

2. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 地物具有二向反射特性, 可由二向反射分布函数(Bi-directional Reflectance Distribution Function, BRDF)刻画, 它是光学定量遥感反演的基础。BRDF的反演依赖于多角度观测, 由于卫星、航空和地基观测的角度有限, 如何设计可行的稀疏角度采样, 对实现BRDF的高质量反演至关重要。研究引入角度信息量, 基于模型模拟和传感器观测的多角度数据, 通过计算不同角度组合用于核驱动模型BRDF反演的角度信息量与反演误差, 探究了角度信息量与反演误差之间的关系, 确定了BRDF反演的最优观测平面和角度数目, 进而得到不同太阳天顶角对应的优选角度组合。验证结果表明: 优选出的角度组合在大多数地表上可实现高质量的BRDF反演。研究成果可为多角度观测实验、多角度卫星载荷设计以及地表二向反射反演提供重要参考。

关 键 词: BRDF; 核驱动模型; 遥感反演; 角度采样

中图分类号: TP75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2023)01-0066-12

1 引 言

地表对电磁波的反射具有各向异性, 反射率与入射方向和观测方向有关, 一般用BRDF(Bi-Directional Reflectance Distribution Function)来表达。BRDF是光学定量遥感的基础, 在后续的遥感应用中发挥了重要作用: 用于冠层三维结构^[1]、植被理化参数^[2-3]、反照率^[4]、土壤粗糙度^[5]、雪粒径等^[6]等地表参数反演; 也可以用于遥感数据的角度归一化^[7], 减小因观测角度不同而引起的反射率差异, 在遥感分类、长时间遥感监测等方面起到重要的作用^[8-9]。

目前BRDF的遥感反演一般利用传感器的多角度观测数据来拟合半经验BRDF模型参数。如MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) BRDF产品的AMBRALS(the Algorithm for Modeling Bidirectional Reflectance Anisotropies

of the Land Surface)算法采用了半经验的RTLSR(RossThick-LiSparse-Reciprocal)核驱动模型, 将多天里积累的多角度观测用于反演核系数^[10]。BRDF的反演精度依赖于多角度数据的质量和角度分布。由于不够精准的大气校正和传感器自身的因素, 观测数据中都存在一定程度的误差。当参与反演的角度数目过少时, 这些误差会显著降低反演精度^[11]。同时, BRDF刻画了整个半球空间的入射、出射特征, 角度离散分布的采样相对于分布集中的采样更能有效反演BRDF; 而且相近的角度包含的遥感信号的相关性也更强, 这会放大观测中噪声的影响, 降低反演的稳定性^[12]。因此, 实现高精度的BRDF反演不仅对角度数量有要求, 也依赖于角度采样的分布。Barnsley等^[13-14]基于卫星轨道和传感器设计, 分析了现有传感器的角度采样能力, 评估了各种角度采样方式对获取BRDF的影响。针对

收稿日期: 2022-02-18; 修订日期: 2022-11-28

基金项目: 中国科学院战略性先导专项 A 类项目(XDA15012102), 国家自然科学基金项目(41971316), 高分辨率对地观测系统重大专项(21-Y20B01-9001-19/22)。

作者简介: 张 腾(1997—), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事BRDF反演研究。E-mail: zhangteng192@mailsucas.ac.cn

通讯作者: 游冬琴(1987—), 女, 江西抚州人, 助理研究员, 主要从事BRDF和反照率建模与反演研究。E-mail: youdq@aircas.ac.cn

核驱动模型, Lucht 等^[15]设计了分析角度组合敏感性(不确定性)的指标, 用来评估不同角度组合用于反演的目标参数的置信度。但如何定量地评价用于反演的组合, 判断其反演结果是否准确可靠仍待深入探究。相关研究表明, 将数目充足且分布均匀的观测角度组合用于半经验或经验的 BRDF 模型能够达到很好的反演效果^[16-17]。但受限于天气状况、观测成本、航线申请及卫星固定轨道等因素, 在较大空间尺度上进行密集的采样往往难以实现。因此, 需要设计遥感测量可实现的稀疏角度采样, 以在有限投入的条件下得到可靠的反演结果。

基于模型模拟和遥感实测构成的多角度数据集, 引入角度信息量的概念, 通过建立信息量与反演误差之间的统计关系, 确定出最优观测平面和观测角度个数。在此基础上, 结合不同组合在多场景中的反演误差, 确定出最优的角度采样组合。研究结论可以支持航空、无人机和地基的多角度观测, 提供简单可行、同时可以保证 BRDF 高精度反演的角度采样方案。

2 多角度数据集

由于实际遥感观测数据的角度有限且分布不均, 研究采用 PROSAIL 模型和 LESS (Large-Scale remote sensing data and image simulation framework over heterogeneous 3D scenes) 模型模拟植被冠层的多角度反射率, 结合 POLDER (Polarization and Directionality of Earth Reflectance) 传感器的观测数据, 进行角度采样的研究。并使用地面观测数据和模型模拟数据对优选出的角度组合进行验证。

2.1 模拟数据

采用 PROSAIL 模型^[18]进行连续植被冠层反射率的模拟, 其中输入的叶片参数来自 LOPEX93 (Leaf Optical Properties Experiment 93) 数据集。构建不同叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI) 下, 各种叶倾角分布类型的植被冠层场景。在波段选择上, 因为红和近红外波段在植被和生态研究中使用最为广泛^[19], 所以模拟了红和近红外波段的反射率。在太阳—观测几何的设置上, 由于天顶角过大的观测对应传输路径长, 受大气和气溶胶影响严重, 且过大的观测天顶角 (View Zenith Angle, VZA) 对应观测的足迹变化很大, 所以将太阳天顶角 (Sun Zenith Angle, SZA) 和观测天顶角的范围设置为 $[0^\circ, 60^\circ]$ 。PROSAIL 输入参数见表 1。

PROSAIL 模型只能模拟连续均匀分布的冠层场景, 对于非连续分布的植被场景, 研究使用了 LESS 模型进行模拟。入射—观测几何设置与 PROSAIL 一致 (见表 1 中的角度)。分别模拟了 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 范围内呈泊松分布的、不同密度的灌木和乔木冠层的反射率。

地表反射率的观测受到多重因素的影响, 特别是云和云阴影, 加之大气校正的误差, 使得获取的数据中包含一定程度的噪声, 通常观测天顶角越大对应的噪声越多^[20]。本研究在模拟的不同观测天顶角的数据中添加不同程度的噪声, 以对真实的遥感观测进行模拟。其中, 对 $0^\circ \sim 20^\circ$ 的角度添加 5% 随机分布的噪声, 对 $20^\circ \sim 40^\circ$ 的角度添加了 10% 随机分布的噪声, 对 $40^\circ \sim 60^\circ$ 的角度添加了 20% 随机分布的噪声。添加噪声前后玉米场景模拟数据见图 1。

表 1 PROSAIL 模型输入参数

Table 1 The input parameters of PROSAIL model

参数	输入
叶片生化参数	LOPEX93 数据集
叶倾角分布	喜平型, 喜直型, 倾斜型, 球面型, 均匀型
叶面积指数	0~4, 间隔为 0.5; 4~8, 间隔为 1
波段	红 (645 nm)、近红外 (858 nm)
太阳天顶角	$0^\circ \sim 60^\circ$, 间隔为 10°
观测天顶角	$0^\circ \sim 60^\circ$, 间隔为 5°
相对方位角	$0^\circ \sim 360^\circ$, 间隔为 10°

2.2 POLDER 数据

POLDER 传感器提供了丰富的角度采样, 本研究选用了 BREON 和 Maignan^[21]发布的多角度反射率精选数据集。其中本文数据来自 POLDER-3 于 2008 年间的观测, 观测对象皆为均质地表, 地面场景按照 IGBP 标准进行了分类, 观测角度在半球空间分布均匀。其红波段中心波长为 670 nm, 近红外波段中心波长 865 nm, 与模拟数据基本一致。研究选用了不同太阳天顶角下的多种地表类型的场景, 包含林地、灌丛、湿地、草地等。

2.3 地面观测数据

相较于模拟数据和 POLDER 观测, 地面观测数据的角度较少且只分布于几个特定平面, 主要用于对优选结果的验证。研究使用的验证数据来自测绘地物波谱本底数据库 (Ground Object Spectral Library, GOSPEL)^[22], 包括 4 种地表类型, 分别是甘肃省张掖市黑河遥感实验站的荒漠植被和玉米场景、新疆维吾尔自治区阿勒泰市的积雪场景及吉

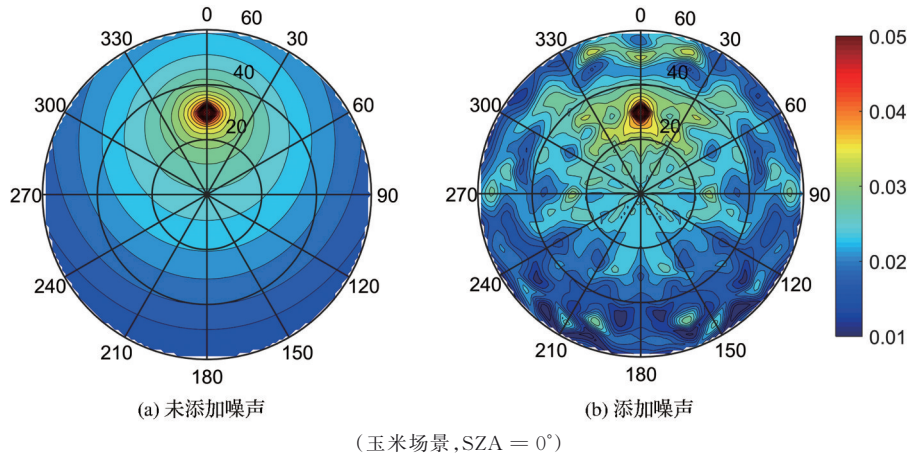


图1 PROSAIL模拟的红波段反射率

Fig.1 Red band reflectance simulated by PROSAIL

林省长春市净月潭遥感实验站的裸土场景。观测在晴空下进行,利用多角度观测架进行观测角度的控制,在短时间内完成一个观测平面上的角度采样。VZA范围为 $[-60^\circ, 60^\circ]$,间隔为 10° 。图2为各种地表类型在太阳主平面上红和近红外波段的反射率。

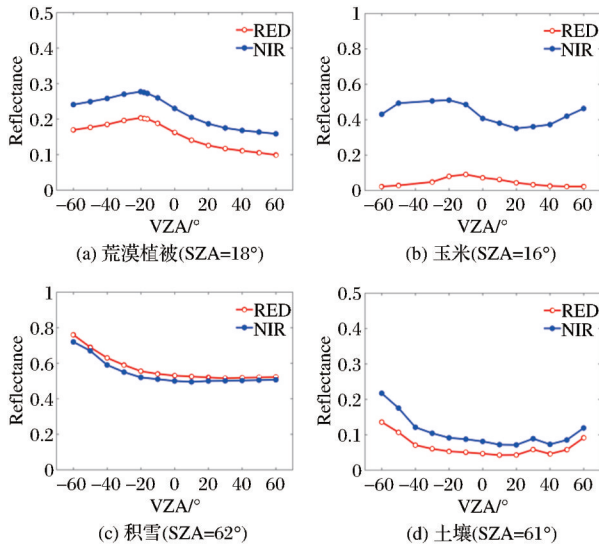


图2 各类地表在太阳主平面上的反射率

Fig.2 The reflectance of various land cover types in the principal plane

3 研究方法

BRDF的反演精度与参与反演的观测数据的角度个数和分布有关,这些与角度相关的信息对反演的贡献可以被定量地表达为角度信息量。研究结合了角度信息量与反演误差对角度采样方案进行设计。定义的角度信息量只与角度有关,与反射率幅值无关。因此,本文对角度采样的研究对具体场

景的依赖较小,结论更具普适性。

3.1 角度信息量

研究选用应用最为广泛的RTLSR核驱动模型开展角度采样研究。核驱动模型由各向同性核、几何光学核和体散射核线性加权得到,见式(1)^[23]。

$$R(\theta_i, \theta_v, \varphi, \lambda) = f_{iso}(\lambda) k_{iso} +$$

$$f_{vol}(\lambda) k_{vol}(\theta_i, \theta_v, \varphi) + f_{geo}(\lambda) k_{geo}(\theta_i, \theta_v, \varphi) \quad (1)$$

其中: k_{iso} 是各向同性核(取值为1); k_{vol} 是体散射核; k_{geo} 是几何光学核; f_{iso} 、 f_{vol} 、 f_{geo} 分别是对应3个核的系数; θ_i 表示太阳天顶角; θ_v 表示观测天顶角; φ 表示相对方位角(Relative Azimuth Angle, RAA); λ 表示波长。若存在n次观测,核驱动模型方程的组合可表示为矩阵形式:

$$M_{n \times 1} = K_{n \times 3} X_{3 \times 1} + E_{n \times 1} \quad (2)$$

其中: M 为n个不同观测几何下反射率; K 表示核矩阵; X 表示核系数矩阵; E 表示测量误差。

研究对核系数的反演采用最小二乘法,其核心思想是使观测值和模拟值之间的残差平方和最小,由此构建代价函数:

$$J(X) = (M - KX)^T C_E^{-1} (M - KX) \quad (3)$$

其中: C_E 为观测噪声的协方差矩阵。

核系数X的协方差矩阵为:

$$C_X = (K^T C_E^{-1} K)^{-1} \quad (4)$$

对代价函数求最小值,得到核系数的解析解:

$$X_{3 \times 1} = (K^T C_E^{-1} K)^{-1} K^T C_E^{-1} M \quad (5)$$

针对核驱动模型的最小二乘反演方法, Jin等^[12]提出了信息指数来表达BRDF反演中信息量和观测误差的影响。假设观测误差独立分布且方差 σ^2 相等,核函数的解为:

$$X_{3 \times 1} = (K^T K)^{-1} K^T M \quad (6)$$

协方差矩阵见式(7):

$$C_X = (K^T K)^{-1} \sigma^2 \quad (7)$$

将核系数的协方差矩阵取逆,可以用来表达反演的信息。

$$C_X^{-1} = \frac{K^T K}{\sigma^2} \quad (8)$$

对 $K^T K$ 进行因式分解:

$$K^T K = G V G \quad (9)$$

其中: V 为特征值对角线矩阵; G 为 $K^T K$ 的特征向量。

由于难以获取观测数据的误差的方差,假设所用 BRDF 模型是准确的,用观测值和模型的模拟值之间的均方误差 MSE 来近似方差,即 $MSE = \sigma^2$ 。参考信息论中熵的形式^[24-25],定义信息指数 (Information Index, Π):

$$\Pi = \ln \lambda_1 + \ln \lambda_2 + \ln \lambda_3 - \ln (MSE) \quad (10)$$

其中: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 是特征矩阵 V 的对角线元素。

如果不考虑观测和反演的误差项,可得到一个只与角度有关的值^[26],即角度信息量 (Angular Information Content),下文简称为信息量,用 I 来表示:

$$I = \ln \lambda_1 + \ln \lambda_2 + \ln \lambda_3 \quad (11)$$

3.2 最优角度采样

为了获取观测的最优角度组合,需要回答观测的角度数目和角度分布这两个问题。对于在观测平面内的角度采样,角度分布问题又可以分解成确

定观测平面 (RAA) 和确定具体 VZA 组合这两部分。研究对角度采样进行研究基于角度信息量和反演误差。首先,需要得到角度信息量与反演精度的关系,确定出满足反演精度要求的最小角度信息量。其次,利用角度信息量进行分析,确定观测平面和角度个数。最后,结合角度组合在场景中的反演误差,确定具体的 VZA 分布。流程图如图 3 所示。

角度组合中信息量的大小与角度的个数和分布有关,角度数目越多,分布越离散角度信息量就越大。前人研究表明,角度数目多且分布范围大的组合往往能够实现 BRDF 的高精度反演^[27],所以角度信息量与反演精度之间应该存在某种关系。为了定量地描述这种关系,从多个场景的观测半球空间上随机选取不同的角度组合,计算各组合对应的信息量与反演误差,并利用一元二次多项式拟合两者关系。其中,用到的场景包含了部分模型模拟的植被冠层类型和部分 POLDER 的观测。核驱动模型含有 3 个待求解的核系数,至少需要 3 个角度构建方程求解。目前的实际遥感数据反演结果统计表明 7 个角度能够达到比较稳定的反演^[10]。因此,本研究将角度组合中的个数范围设置为 3~8 个。考虑到不同场景的反射率大小存在差异,反演误差用相对的均方根误差 (Relative Root Mean Squared Error, RRMSE) 来表达。RRMSE 的计算使用了除参与反演的角度之外的其余角度,表达式见式(12)。

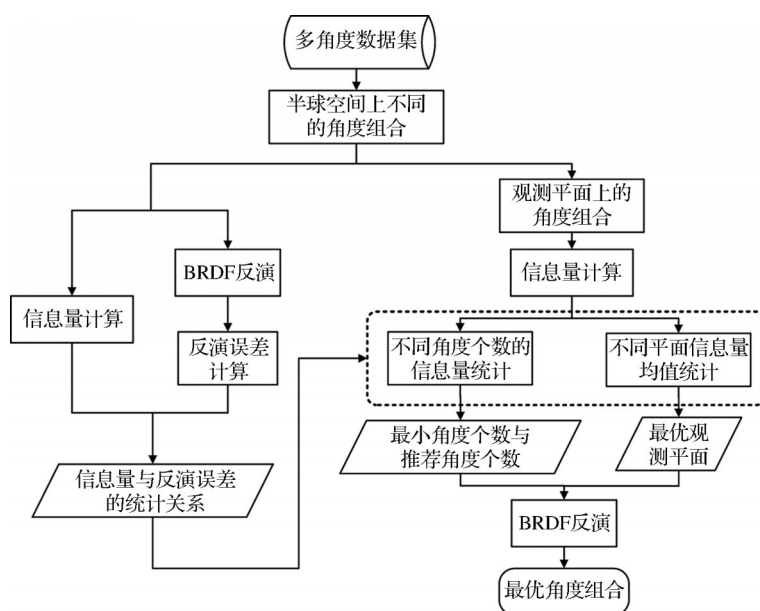


图 3 角度采样研究技术路线图

Fig.3 The flowchart of angular sampling research

$$\begin{aligned} \text{RRMSE} &= \frac{\text{RMSE}}{\bar{R}(\Theta)} \\ &= \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (R_m(\Theta_n) - R(\Theta_n))^2}{N}} \end{aligned} \quad (12)$$

其中: R_m 表示通过反演获取的反射率; R 表示模拟或观测反射率; Θ_n 表示第 n 个观测的观测几何; \bar{R} 表示半球反射率的平均值; N 为参与统计的角度个数。

在探究信息量与反演误差的统计关系的过程中, 由于实际的遥感观测数据误差难以确定, 从以下3个层次的噪声设定来展开研究: 首先, 使用未添加噪声的模拟数据获取理想观测情况下的统计关系(由于模拟数据模型和反演模型的差异, 尽管未添加噪声, 模型误差仍旧存在); 然后使用添加噪声的模拟数据获取模拟真实观测下的统计关系; 最后使用 POLDER 观测数据得到真实观测下的统计关系, 对比模拟数据的结果, 验证其可信度。根据各种情况下所能达到的反演精度, 设定高精度反演的误差阈值, 进而确定最小角度信息量, 即信息量阈值。

在实际的遥感观测中, 受限于飞行航线的申请、地面仪器的设计和有限的观测时间等因素, 角度采样一般是沿着固定平面进行的, 不同平面对应不同 RAA。因此研究主要讨论观测平面上的角度采样。对核驱动模型来说, 关于太阳主平面对称的两个角度在计算信息量时是等价的, 这意味着 VZA 相同的角度组合在关于主平面对称的观测平面上的信息量也相同。因此, 设置 RAA 步长为 10° , 获取由主平面到垂直主平面的 10 个平面进行研究。选择各 SZA 下, 每个观测平面上 3~8 个角度的组合, 计算每个组合对应的信息量。统计各平面内所有

组合对应的信息量的均值, 根据均值大小确定最优的观测平面。在最优观测平面上, 统计不同角度个数组合对应的信息量的四分位数, 结合信息量阈值进行分析, 确定最少观测角度个数和推荐的观测个数。

提取最佳观测平面上最小观测个数和推荐观测个数的所有组合, 获取各组合对应的红波段和近红外波段上的 RRMSE。观测半球上的反射率分布随 SZA 变化, 所以不同 SZA 下的最优的角度采样也可能存在差异。因此, 接下来的研究将在各个 SZA 下开展。首先根据角度信息量进行筛选, 其次计算剩余组合在所有场景中的 RRMSE 均值, 选出红波段和近红外波段上 RRMSE 较小的两个组合的集合。最后, 对两个波段对应集合中的组合进行匹配, 找到它们共有且反演误差最小的角度组合, 即观测的最优角度组合。

4 结果与分析

4.1 信息量与反演误差的关系

使用未添加噪声的模拟数据计算不同角度组合对应的角度信息量和反演误差, 组合的散点图如图4所示。图中每个点代表一个特定的角度组合, 点的颜色表示密度, 红线为 RRMSE 与信息量关系曲线, 通过一元二次多项式拟合得到。从中可以看出, 反演误差与角度信息量有明显的负相关关系, 信息量大的角度组合对应着更小的反演误差。其中, 红波段上 RRMSE 普遍较大, 这是因为植被场景对应的红波段反射率本身的价值较低, 微小的反射率误差也对应着较大的 RRMSE。拟合得到红波段上的 RRMSE 与 I 的统计关系为 $\text{RRMSE} = 0.0052I^2 + 0.0074I + 0.1283$, 近红外波段上的统计关系为 $\text{RRMSE} = 0.0012I^2 + 0.0016I + 0.0256$ 。

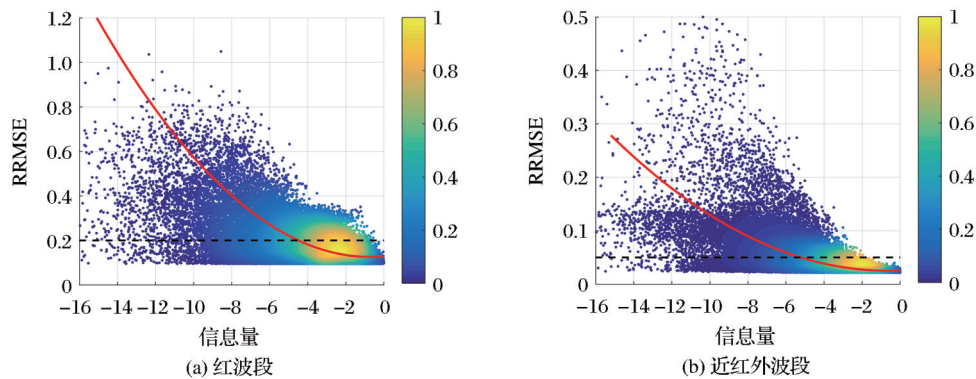


图4 未添加噪声的模拟数据对应的统计关系

Fig.4 The statistical relationship of simulated data without adding noise

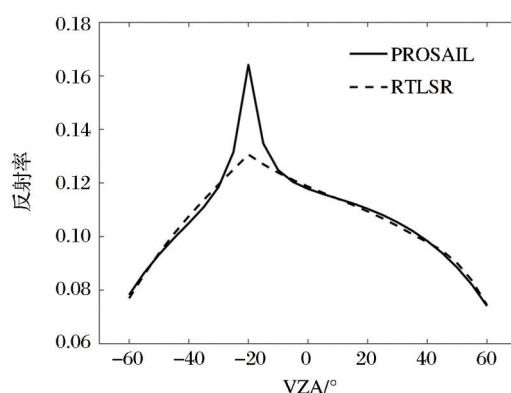
图 4 中 RRMSE 的最小值并不是零,在红波段上是 0.09 附近,近红外波段在 0.03 附近。为探究原因,提取对应 RRMSE 很小的 7 角度组合,将其在太阳主平面上的拟合结果与 PROSAIL 模拟值进行对比,见图 5。发现除热点方向以外,反演结果和模拟值都很接近,反演误差来自模型之间对于热点刻画

的差异。

其次,使用添加噪声的模拟数据进行反演,得到结果如图 6 所示。可以发现,数据中噪声的存在使得反演误差变大,但整体上依然保持了上述的趋势。拟合得到红波段的曲线为 $RRMSE = 0.0080I^2 + 0.0057I + 0.1138$, 近红外的曲线为 $RRMSE = 0.0020I^2 + 0.0012I + 0.0294$ 。

然后使用在观测半球空间中角度分布均匀的 POLDER 数据进行反演,结果见图 7。得到红波段的拟合曲线为 $RRMSE = 0.0063I^2 + 0.0109I + 0.1118$, 近红外波段的拟合曲线为 $RRMSE = 0.0024I^2 + 0.0028I + 0.0288$ 。

由模拟数据和观测数据所得结果显示了相似的统计关系,即反演误差随信息量增大而减小的速度逐渐放缓,当达到某个信息量值时反演误差趋于稳定。在红波段上,0.2 已接近 RRMSE 最小值;在近红外波段,0.05 也已接近最小值,所以设置高质量



($SAZ=20^\circ$, $LAI=1$ 的玉米场景)

图 5 模拟数据与反演结果在主平面上的比较

Fig.5 Comparison between simulated data and inversion results in principal plane

反演的误差阈值为红波段 RRMSE 小于 0.2, 近红外波段小于 0.05。根据得到统计关系,由 RRMSE 阈值计算红波段和近红外波段上相应的信息量。对于未添加噪声的模拟数据,与反演误差阈值相应的信息量值为 -4.5 和 -5.3;对于添加噪声的模拟数据,相应的信息量值为 -3.6 和 -3.5;对于 POLDER 数据,相应的信息量值为 -4.7 和 -3.6。综合以上结果,选择其中最大的信息量 -3.5 作为阈值,该值可作为一种质量保证,用来判断现有的遥感观测是否可以得到可靠的反演结果。

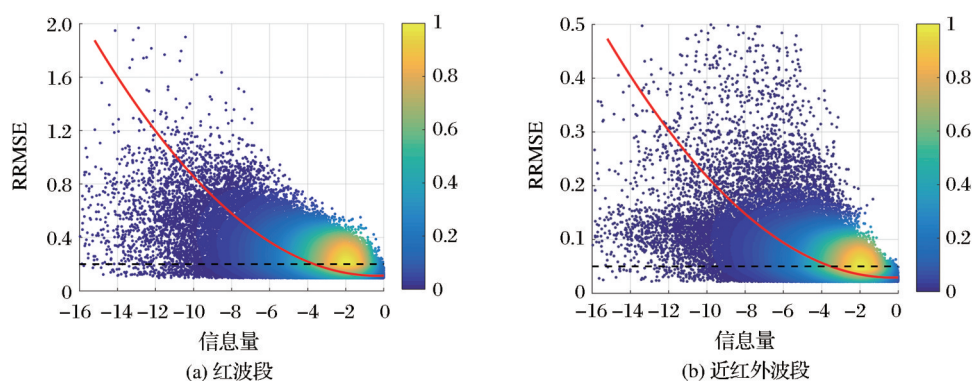


图 6 添加噪声的模拟数据对应的统计关系

Fig.6 The statistical relationship of adding noise simulated data

4.2 最优观测平面和最小角度个数

图 8 统计了由各个观测平面上组合的信息量均值,在同一角度个数下,组合的信息量均值从主平面到垂直主平面依次递减。其中从主平面到 $RAA=40^\circ/220^\circ$ 平面的范围内递减缓慢,从 $RAA=60^\circ/240^\circ$ 的平面到垂直主平面对应的信息量均值快速减小。根据信息量与反演误差的统计关系,相同 VZA 的组合在主平面上有着最小的 RRMSE,所以最优

观测平面为主平面。故而在实际的遥感观测中,应尽量选择 RAA 在 $0^\circ/180^\circ \sim 40^\circ/220^\circ$ 的范围区间进行角度采样。

由所有观测平面上不同个数角度组合的信息量统计(图 9)可见,随角度个数的增加,信息量的上四分位数、中位数和下四分位数都在变大。在角度数目小于 5 时,信息量增速较快,角度数目大于 5 时,增速减缓,说明角度数目较少时,增加观测角度

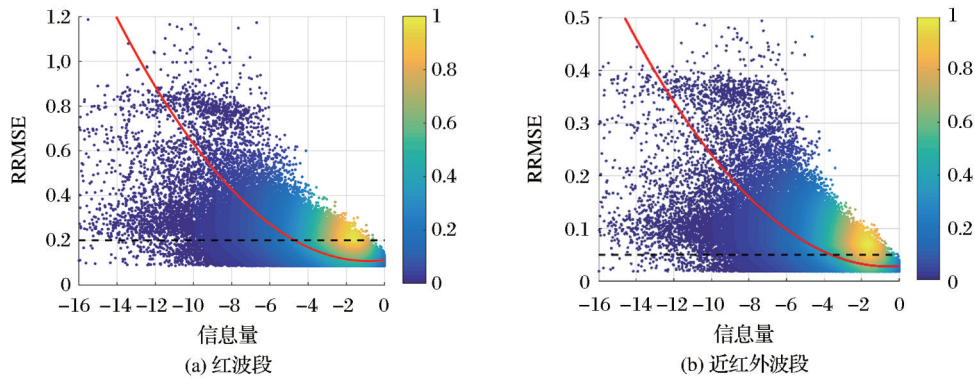


图 7 POLDER 数据对应的统计关系

Fig.7 The statistical relationship of POLDER data

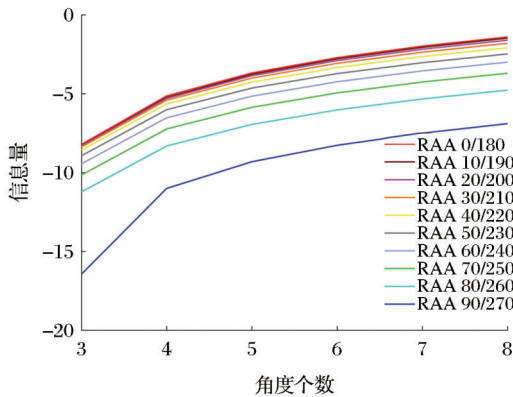


图 8 观测平面上不同角度个数组合对应的平均信息量

Fig.8 The average information content of different angle combinations in the observation plane

对于提高 BRDF 反演精度有着显著的作用。其中, 4 角度组合的信息量上四分位数是-4.1, 5 角度组合的信息量上四分位数是-2.9, 结合-3.5 的信息量阈值, 再考虑实际观测的成本和时间, 确定最小角度个数为 5, 推荐的观测个数为 6 或 7。此外, 四分位距随角度个数从 3 到 6 逐渐减小, 3 角度时四分位距是 5.4, 到达 6 角度稳定在 3.9 左右, 这说明随角度个数增加, 观测组合的角度信息量愈发集中, BRDF 的反演也愈发稳定。

4.3 优选的角度组合

在多个模拟场景中, 将不同太阳天顶角主平面上角度个数为 5、6、7 观测角度的组合用于反演, 经过筛选和波段匹配, 得到最优的角度采样方案, 结果见表 2~表 4。

以 6 角度优选组合为例, 利用 PROSAIL 模拟的玉米场景的主平面反射率数据作角度优选组合分布图(图 10)。从图中可以看出, 不同太阳天顶角下优选组合的分布存在一定模式: 总体上看, VZA 的分布较为均匀; 在热点方向附近 10° 以内都存在观

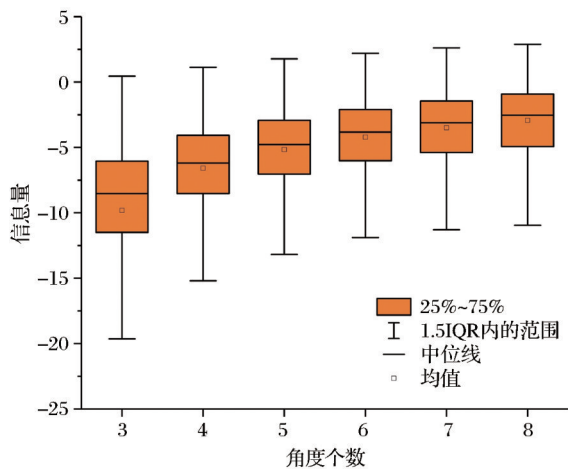


图 9 不同角度个数的组合对应的信息量

Fig.9 The information content of combinations of different angles

表 2 角度个数为 5 的优选组合

Table 2 The optimal combinations of 5 angles

SZA	组合
0°	-60°、-45°、-5°、15°、55°
10°	-60°、-20°、0°、20°、60°
20°	-60°、-30°、-10°、25°、55°
30°	-60°、-40°、-15°、25°、55°
40°	-60°、-45°、-25°、15°、60°
50°	-60°、-40°、-10°、20°、60°
60°	-50°、-20°、0°、15°、55°

测角度, 且分布在热点两侧(SZA 为 60° 时除外); 大多数的优选组合在近红外反射率最低点对应的观测天顶角度前后 15° 以内还有观测。植被冠层 BRDF 最明显特征之一就是热点效应, 在热点附近进行角度采样有利于表达该特征。但优选组合中没有直接包含热点方向, 而是热点前后 10° 左右, 这里设计了实验来探讨。基于 PROSAIL 模拟的叶面积指数为 1 的玉米场景, 将 SZA=30° 的六角度优选

表 3 角度个数为 6 的优选组合

Table 3 The optimal combinations of 6 angles

SZA	组合
0°	-50°、-15°、-5°、5°、15°、50°
10°	-60°、-45°、-20°、0°、25°、60°
20°	-60°、-30°、-10°、5°、25°、55°
30°	-60°、-40°、-20°、0°、25°、55°
40°	-60°、-45°、-30°、0°、35°、55°
50°	-60°、-45°、-30°、10°、40°、60°
60°	-50°、-20°、0°、15°、40°、55°

表 4 角度个数为 7 的优选组合

Table 4 The optimal combinations of 7 angles

SZA	组合
0°	-60°、-45°、-25°、-5°、5°、25°、55°
10°	-60°、-45°、-20°、0°、15°、30°、60°
20°	-60°、-45°、-30°、-10°、15°、30°、55°
30°	-60°、-40°、-20°、-5°、20°、40°、60°
40°	-60°、-45°、-25°、-10°、25°、45°、60°
50°	-60°、-40°、-25°、0°、20°、45°、60°
60°	-50°、-30°、-10°、10°、25°、40°、55°

组合(-60°、-40°、-20°、0°、25°、55°)用于红波段上 BRDF 反演,再把靠近热点的-20°改为热点位置-30°,将新组合用于反演,得到主平面的反演结果如图 11,并计算 RRMSE。由图可见,新组合反演得到的反射率在热点方向上更高,与模拟反射率更接近,但其他方向上的明显高于模拟值,RRMSE 为 0.128 6;而优选组合的反演结果虽未能像新组合反演拟合反射率结果一样突出热点,但在其他方向上更加接近原始模拟值,RRMSE 为 0.081 5。由于 RTLSR 核驱动模型与模拟模型(PROSAIL 和 LESS)对热点的刻画不一致。相较于 RTLSR 核驱动模型的拟合结果,模拟模型的热点宽度更小、高度更大。直接使用模拟数据的热点参与反演,会使 RTLSR 拟合的除热点方向之外的大部分的半球反射率大于模拟值,降低整体的精度。

5 优选组合的验证

为了分析优选出的组合在红和近红外波段上的反演效果,以及对各种地表类型的适用性,分别使用模拟数据(未参与第 4 节分析的数据)和地面实测数对其进行验证。

5.1 模拟数据的验证

将优选组合应用于模拟场景的 BRDF 反演。对不同 SZA 对应的角度组合,分别统计其在添加噪声的模拟数据中和未添加噪声的模拟数据中的

RRMSE 均值,如图 12 所示。

结果显示,对于未添加噪声的模拟数据,不同角度个数的组合都取得了较高反演精度。在红波段,大多数组合对应的 RRMSE 在 0.15 以下;在近红外波段,大多数组合对应的 RRMSE 在 0.05 之下。这说明优选组合能够同时刻画红波段和近红外波段的 BRDF 特征,对两个波段上的反演误差进行有效控制。此外,在相同的 SZA 下,随着角度个数增加,RRMSE 逐渐减小。

相比于未添加噪声的数据,添加噪声数据的反演得到的 RRMSE 普遍有所增加,但随着 SZA、角度个数而变化的趋势没有发生改变。整体上仍保持了高质量的反演,红波段的 RRMSE 均值在 0.2 以下,近红外波段的 RRMSE 均值在 0.05 以下。

5.2 地面实测数据的验证

除模拟的植被场景以外,研究也使用了不同地表类型的地面实测数据对优选角度组合进行验证,得到反演误差均值见表 5。

整体来看,优选的角度组合在荒漠草地、玉米和土壤场景中都实现了很好的反演效果,红波段上的 RRMSE 低于 0.14,近红外波段上的 RRMSE 低于 0.046。分类来看,土壤场景在近红外波段上的 RRMSE 与玉米场景相当,而在红波段上的 RRMSE 比玉米场景偏低较多,这主要是因为土壤在红波段上的反射率均值相较于玉米场景而言较大。与玉米和土壤相比,荒漠草地的反演误差更小,优选的角度采样可能更适用于具有热点效应的地表。但优选组合在冰雪场景上的反演效果不佳,近红外波段上的 RRMSE 均值超过了 0.05,可能的原因是 RTLSR 核模型自身对冰雪地表适用较差^[27]。

6 结 语

地表 BRDF 的遥感反演需要多角度观测数据的支持,反演精度依赖于角度的数量和分布。针对航空、近地面和地面观测,本文研究了如何进行角度采样,以实现 BRDF 的高精度反演。为了摆脱角度采样方案对具体场景的依赖,让结果更具普适性,研究引入了只与角度有关的信息量的指标。研究选择应用最为广泛的 RTLSR 核驱动模型来进行角度信息量分析,尽管不同模型对于不同地表的反射特征刻画能力有异,RTLSR 模型本身也在部分场景(如冰雪)拟合能力不足;但是该模型已经在全球产品生产中被广泛应用验证,在大多数场景下具

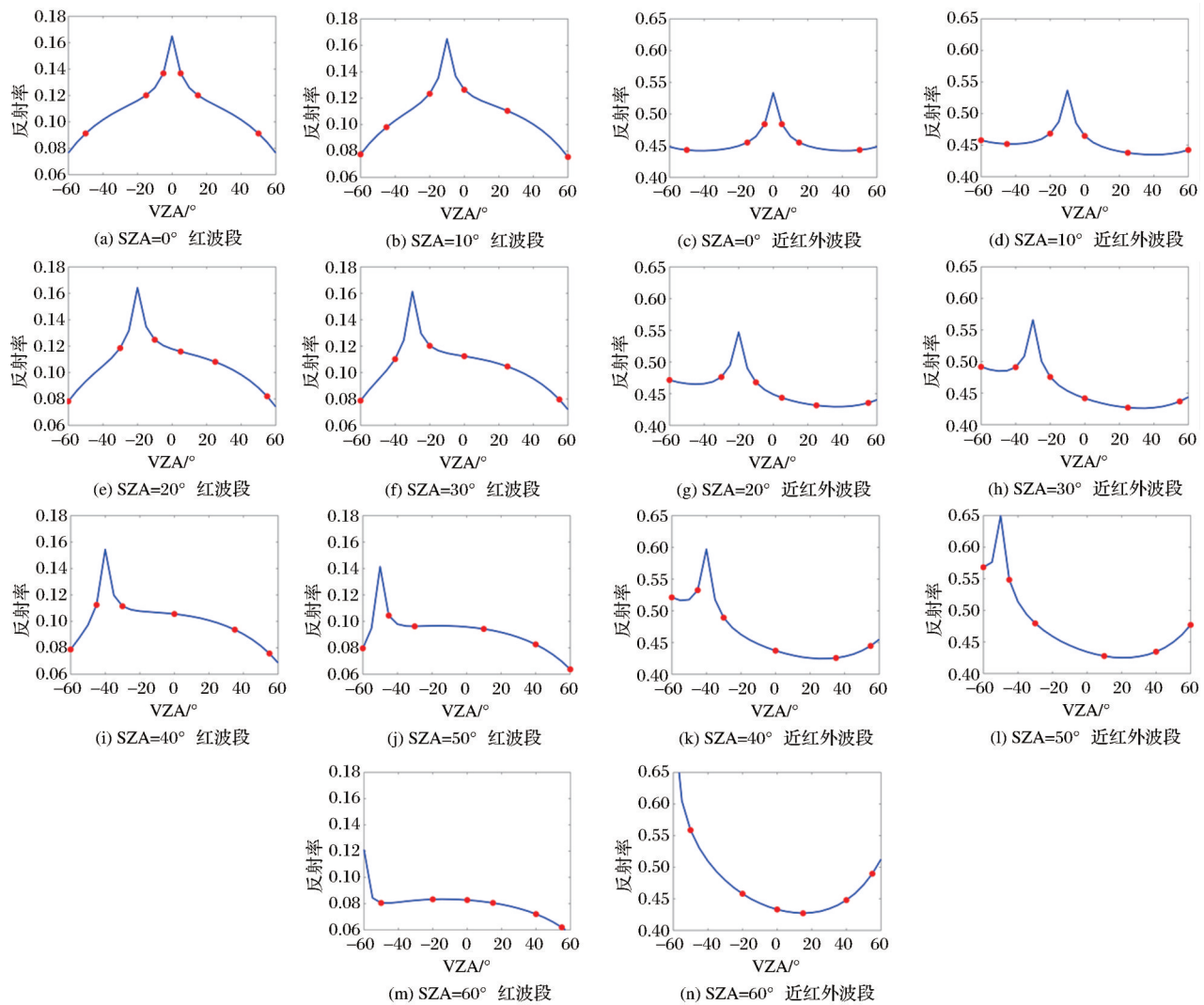


图10 6角度最优角度采样(玉米场景, LAI=1)

Fig.10 The optimal angular sampling of 6 angles

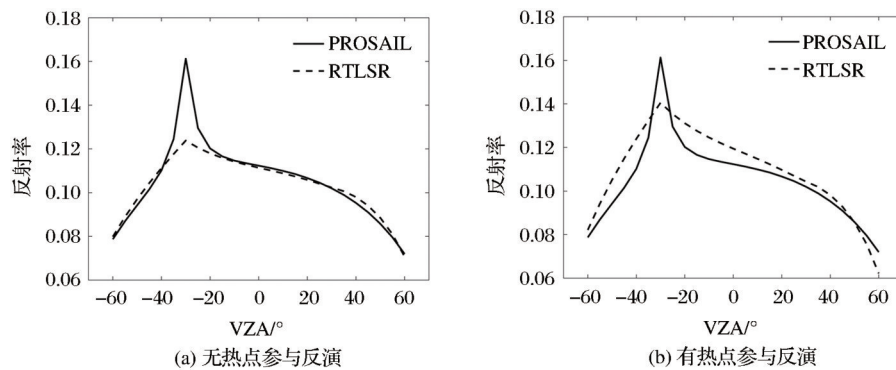


图11 有无热点参与反演的结果比较(LAI=1,玉米冠层, SZA=30°,红波段)

Fig.11 The comparison of inversion results with and without hot spots

有较高精度。因此,本研究结果可以适用于大多数应用场景。通过统计分析,得到角度组合的信息量与反演误差的关系,结合反演误差阈值,确定出实现高质量反演的信息量阈值为-3.5。基于此,对各观测平面上不同角度个数组合的信息量的分析,确

定最优的观测平面为太阳主平面,最少观测角度个数为5,推荐观测个数为6和7。再结合多个场景的反演误差,分析得到不同太阳高度角对应的最优角度组合。

优选组合在观测平面上的角度范围很大, VZA

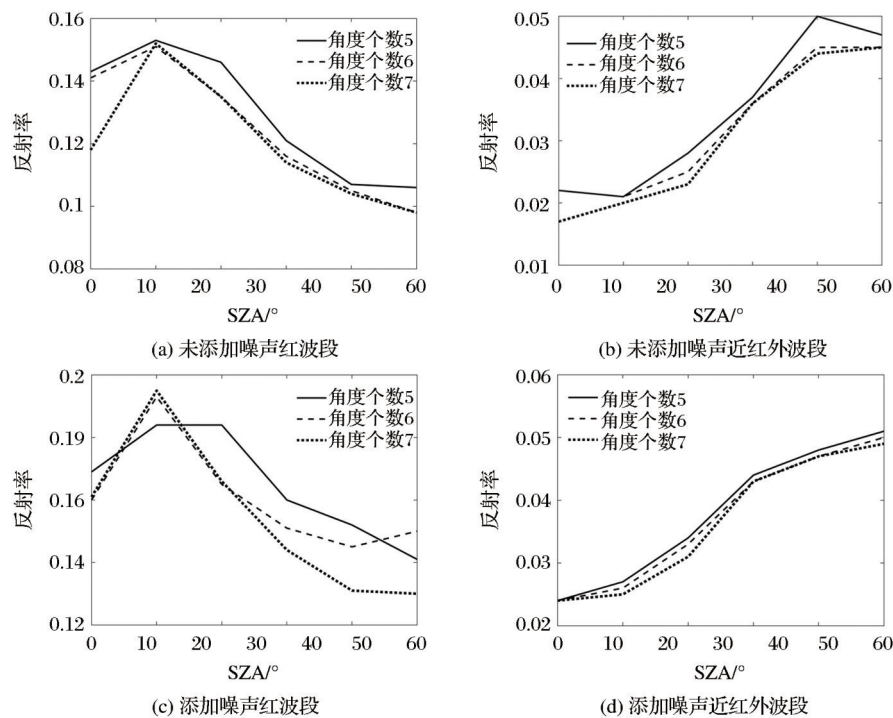


图 12 添加噪声和未添加噪声的模拟数据的反演误差

Fig.12 Fitting errors by the kernel-driven model in the simulated data without/with noise

表 5 不同地表类型对应的反演误差 (RRMSE) 均值

Table 5 The mean RRMSE corresponding to different land cover types

波段	RED			NIR		
角度个数	5	6	7	5	6	7
沙漠草地	0.041 7	0.040 4	0.039 2	0.038 9	0.035 8	0.034 9
玉米	0.131 5	0.091 3	0.083 4	0.046 0	0.043 1	0.035 9
土壤	0.045 8	0.044 2	0.034 4	0.044 4	0.037 6	0.035 9
冰雪	0.134 3	0.114 9	0.093 3	0.135 6	0.117 5	0.098 9

(包括前向和后向)的跨度在 100° 以上,且分布相对均匀,这与之前的研究相符合^[28],说明BRDF反演需要大范围离散的角度采样。其中,角度分布存在一定的模式——在热点方向的前后 10° 附近存在两个角度,大多数组合在近红外反射率最低点附近也存在观测角度。对于反射率高值和低值的描述,有利于刻画植被冠层的BRDF特征。经由模拟数据和地面实测数据的验证,发现除冰雪之外,优选组合在大多数场景中都可以实现高精度的反演,红波段的RRMSE在0.14以下,近红外RRMSE在0.046以下,且最适用于热点效应明显的稀疏植被场景。

除航空、无人机和地基观测的角度采样应用之外,本文成果可以支持新一代多角度卫星载荷的研发,为观测的角度个数和角度分布的设计提供参考。此外,还可依据角度信息量的大小判断观测组合对反演BRDF的可靠性。参考本文选择出的角

度组合对参与反演的角度赋予不同权重,进而提高反演质量。但研究仍存在一些问題。其中,确定具体角度组合时基于的是模拟场景,没有深究模拟数据与现实地表之间的反射率差异对反演的影响。另外,在实际的遥感观测中,受限于飞行航线和传感器控制等因素,有时难以严格按照优选组合中的角度进行观测,需要对角度进行调整,这要求对角度采样间隔的影响进行更充分的研究。

参考文献 (References):

- [1] CHOPPING M, NORTH M, CHEN J Q, *et al.* Forest canopy cover and height from MISR in topographically complex southwestern US landscapes assessed with high quality reference data [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2012, 5(1):44-58.
- [2] HE L, SONG X, FENG W, *et al.* Improved remote sensing of leaf nitrogen concentration in winter wheat using multi-angular

- hyperspectral data[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 174:122-133.
- [3] HILKER T, HALL F G, TUCKER C J, *et al.* Data assimilation of photosynthetic light-use efficiency using multi-angular satellite data: II Model implementation and validation[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 121:287-300.
- [4] WU X D, WEN J G, XIAO Q, *et al.* Accuracy assessment on MODIS (V006), GLASS and MuSyQ land-surface albedo products: A case study in the Heihe River Basin, China [J]. Remote Sensing, 2018, 10(12):2045-2069.
- [5] WANG Z J, COBURN C A, REN X M, *et al.* Effect of surface roughness, wavelength, illumination, and viewing zenith angles on soil surface BRDF using an imaging BRDF approach [J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(19): 6894-6913.
- [6] ZEGE E P, KATSEV I L, MALINKA A V, *et al.* Algorithm for retrieval of the effective snow grain size and pollution amount from satellite measurements [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(10):2674-2685.
- [7] ROY D P, ZHANG H K, JU J, *et al.* A general method to normalize Landsat reflectance data to nadir BRDF adjusted reflectance [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 176: 255-271.
- [8] NAGOL J R, SEXTON J, KIM D H, *et al.* Bidirectional effects in Landsat reflectance estimates: Is there a problem to solve [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 103:129-135.
- [9] DANAHER T, WU X L, CAMPBELL N, *et al.* Bi-directional reflectance distribution function approaches to radiometric calibration of Landsat ETM plus imagery[C]// IGARSS 2001: Scanning the Present and Resolution the Future, 2001, 1-7:2654-2657.
- [10] STRAHLER A H, WANNER W, SCHAAF C B, *et al.* MODIS BRDF/albedo product: Algorithm theoretical basis document[EB/OL]. https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod09.pdf, 2021.
- [11] LYAPUSTIN A, MARTONCHIK J, WANG Y J, *et al.* Multiangle Implementation of Atmospheric Correction(MAIA): 1. Radiative transfer basis and look-up tables [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2011, 116(D3):1-9.
- [12] JIN Y F, GAO F, SCHAAF C B, *et al.* Improving MODIS surface BRDF/Albedo retrieval with MISR multiangle observations [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(7):1593-1604.
- [13] BARNESLEY M J, STRAHLER A H, MORRIS K P, *et al.* Sampling the surface Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF): 1. Evaluation of current and future satellite sensors[J]. Remote Sensing Reviews, 1994, 8(4):271-311.
- [14] ZHANG H K, ROY D P, KOVALSKYY V. Optimal solar geometry definition for global long-term landsat time-series bi-directional reflectance normalization [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(3):1410-1418.
- [15] LUCHT W, LEWIS P. Theoretical noise sensitivity of BRDF and albedo retrieval from the EOS-MODIS and MISR sensors with respect to angular sampling[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(1):81-98.
- [16] SANDMEIER S, SANDMEIER W, ITTEN K I, *et al.* Acquisition of bidirectional reflectance data using the Swiss Field-Goniometer System (FIGOS) [C]// 15th EARSel Symposium on Progress in Environmental Research and Applications, 1995:55-61.
- [17] SANDMEIER S. Acquisition of bidirectional reflectance factor data with field goniometers [J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 73(3):257-269.
- [18] JACQUEMOUD S, BARET F. PROSPECT - A model of leaf optical-properties spectra [J]. Remote Sensing of Environment, 1990, 34(2):75-91.
- [19] SHARMA R C, KAJIWARA K, HONDA Y. Estimation of forest canopy structural parameters using Kernel-driven bi-directional reflectance model based multi-angular vegetation indices [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, 78:50-57.
- [20] WU S B, WEN J G, LIN X W, *et al.* Modeling discrete forest anisotropic reflectance over a sloped surface with an extended GOMS and SAIL model[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 57(2):944-957.
- [21] BREON F M, MAIGNAN F. A BRDF-BPDF database for the analysis of earth target reflectances [J]. Earth System Science Data, 2017, 9(1):31-45.
- [22] ZHONG Shouyi, XIAO Qing, WEN Janguang, *et al.* Design and realization of ground object background spectral library for surveying and mapping [J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(6):701-716. [钟守熠, 肖青, 闻建光, 等. 测绘地物波谱本底数据库 [J]. 遥感学报, 2020, 24(6):701-716.]
- [23] ROUJEAN J L, LEROY M, DESCHAMPS P Y. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1992, 97(D18):20455-20468.
- [24] SHANNON C E. A mathematical theory of communication [J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27(3):3-55.
- [25] JOHN C Price. Comparison of the information content of data from the Landsat-4 thematic mapper and the multispectral scanner [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1984, 22(3):272-281.
- [26] YOU Dongqin. Retrieval of land surface BRDF/Albedo by combining multi-sensory remote sensing data [D]. Beijing:

- Chinese Academy of Sciences, 2015.[游冬琴. 多源遥感数据联合反演地表 BRDF/Albedo 模型研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.]
- [27] DING Anxin, JIAO Ziti, DONG Yadong, *et al.* Performance assessment of the operational MODIS BRDF model for snow/ice cover type[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(6): 1147-1158.[丁安心, 焦子颀, 董亚冬, 等. 业务化 MODIS BRDF 模型对冰雪 BRDF/反照率的反演能力评估[J]. *遥感学报*, 2019, 23(6):1147-1158.]
- [28] SANDMEIER S, MULLER C, HOSGOOD B, *et al.* Sensitivity analysis and quality assessment of laboratory BRDF data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 64(2):176-191.

The Optimal Angular Sampling for Bi-directional Reflectance Distribution Function Retrieval

ZHANG Teng^{1,2}, YOU Dongqin¹, WEN Jianguang^{1,2}, TANG Yong¹

(1.State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

2.College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The anisotropic land surface reflectance is characterized by Bi-directional Reflectance Distribution Function (BRDF), which is the basis of quantitative optical remote sensing. The inversion of BRDF relies on multi-angular observations. Due to the limited observations from satellites, aerocrafts and goniometers, it is very critical to design a feasible sparse angular sampling to achieve high-quality BRDF inversion. In this study, based on RossThick-LiSparse Reciprocal (RTLSR) kernel-driven model, we designed the optimal angular sampling by using the PROSAIL model simulated reflectance and observations from POLDER and *in situ* by employing the angular information content to quantify the information which the observation geometry can contribute to the inversion. Firstly, the information content and BRDF inversion accuracy with different angle combinations are calculated. The relationship between them is then obtained, and the angular information threshold for high-precision inversion is -3.5. Secondly, the optimal observation plane and the least angles required in BRDF inversion were found out by analyzing the angular information content of combinations in each observation plane. It shows that the optimal plane is the principal plane, and the minimum number angles is 5 while the recommended number is 6 and 7. Thirdly, the optimal angle combinations under different solar zenith angles are found as relatively regularly distributed in the forward and backward scattering, and there should be two angles around the hot spot within $\pm 10^\circ$. The validation finally proves that the optimal angle combinations are suitable for most land surface cover types except the snow/ice case and especially good for sparse vegetation, with RRMSE (Relative Root Mean Squared Error) of 0.14 in red band, and 0.046 in Nir band. The results of this study are useful for multi-angular satellite sensor design, multi-angular reflectance observation experiment and angular weights assigning in BRDF inversion.

Key words: BRDF; Kernel-driven BRDF model; Remote sensing inversion; Angular sampling