

# 光学学报

## 基于高分五号卫星 DPC 和 AERONET 站点数据的地表 BPDF 模型对比分析

提汝芳<sup>1\*</sup>, 樊依哲<sup>1,2</sup>, 黄红莲<sup>1,3</sup>, 刘晓<sup>1,3</sup>, 孙晓兵<sup>1,3\*\*</sup>, 洪津<sup>1</sup>, 刘淑芬<sup>4</sup>

<sup>1</sup>中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

<sup>3</sup>合肥市农业行业首席专家工作室, 安徽 合肥 230031;

<sup>4</sup>山东省泰安生态环境监测中心, 山东 泰安 271018

**摘要** 大气气溶胶卫星偏振遥感探测中,地表偏振反射率估计是最重要的不确定因素之一,是气溶胶反演过程中地气解耦的重要环节。基于高分五号卫星大气气溶胶多角度偏振探测仪(DPC)近红外波段 865 nm 的多角度偏振观测数据,利用全球地基气溶胶监测网(AERONET)站点的气溶胶产品 AOD L2.0 与 DPC 数据进行时空匹配,筛选气溶胶光学厚度(AOD)低值数据,以减小气溶胶的影响,获取地表多角度偏振反射率数据。针对 8 种典型地表类型,基于 DPC 多角度偏振数据定量比较分析了 Nadal-Bréon 模型、Waquet 模型、Maignan 模型、Litvinov 模型和 Xie-Cheng 模型 5 个半经验地表双向偏振反射分布函数(BPDF)模型的性能。研究结果表明,Litvinov 模型和 Nadal-Bréon 模型所得的结果与实测数据可以较好地吻合,两个模型与 DPC 实测数据的相关性系数均值分别为 0.958 和 0.952,均方根误差均值分别为 0.202% 和 0.223%。研究结果为基于 DPC 数据估算地表偏振反射率提供了 BPDF 模型参考,为利用 DPC 多角度偏振数据反演气溶胶参数等应用提供了先验数据支持。

**关键词** 遥感; 多角度偏振探测仪; 双向偏振反射分布函数模型; 地表; 偏振反射率

中图分类号 P407

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1828003

### Comparative Analysis of BPDF Land Surface Models Based on DPC Measurements of Gaofen-5 Satellite and Data of AERONET Sites

Ti Rufang<sup>1\*</sup>, Fan Yizhe<sup>1,2</sup>, Huang Honglian<sup>1,3</sup>, Liu Xiao<sup>1,3</sup>, Sun Xiaobing<sup>1,3\*\*</sup>, Hong Jin<sup>1</sup>,  
Liu Shufen<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

<sup>3</sup>Hefei Chief Expert Studio of Agricultural Industry, Hefei 230031, Anhui, China;

<sup>4</sup>Shandong Tai'an Ecological Environment Monitoring Center, Tai'an 271018, Shandong, China

**Abstract** The polarized reflectance estimation of land surfaces is one of the most important uncertainties in the polarized remote sensing detection of atmospheric aerosol by satellites and thus becomes an important link in the land-atmosphere decoupling during aerosol inversion. The directional polarized measurements of atmospheric aerosol in the near-infrared band (865 nm) by a directional polarimetric camera (DPC) aboard the GaoFen (GF-5) satellite are spatiotemporally matched with the aerosol product AOD L2.0 of the sites of the worldwide ground-based aerosol monitoring website AERONET. Data corresponding to small aerosol optical depth (AOD) values are thereby screened out to reduce the influence of aerosol and further to obtain directional polarized reflectance data of the land surface. The performance of five semiempirical bidirectionally polarized reflectance distribution function (BPDF) models of land surfaces for eight typical land surface types is quantitatively compared using the DPC measurements. The models compared included the Nadal-Bréon model, the Waquet model, the Maignan model, the Litvinov model, and the Xie-Cheng model. The comparison shows that the

收稿日期: 2022-01-13; 修回日期: 2022-02-24; 录用日期: 2022-03-01

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFE0201400)、卫星应用共性关键技术项目(30-Y20A010-9007-17/18)

通信作者: \*tirufang@aiofm.ac.cn; \*\*xbsun@aiofm.ac.cn

results of the Litvinov and Nadal-Bréon models agree well with the DPC measurements. Specifically, the average correlation coefficients of the results of the two models with the DPC measurements reach 0.958 and 0.952, respectively, and the corresponding average root-mean-square errors (RMSEs) are 0.202% and 0.223%, respectively. The research results serve as a reference concerning BPDF models for polarized reflectance estimation of land surfaces with DPC data and provide prior data support for applications such as the inversion of aerosol parameters with DPC data.

**Key words** remote sensing; directional polarimetric detector; bidirectionally polarized reflectance distribution function model; land surface; polarized reflectance

## 1 引言

大气气溶胶直接或间接影响地气辐射收支,并间接影响云的形成以及降水,是全球气候变化的重要影响因素之一<sup>[1]</sup>。对于机载和星载气溶胶偏振遥感探测,传感器接收到的偏振辐射信号包含地表信息和大气信息。为反演气溶胶特性参数,需要将地表信息从总的信号中扣除,即进行地气解耦合。地表的偏振特性弱于大气的偏振特性,但是,地表对大气层顶的偏振贡献不容忽视<sup>[2]</sup>,是影响气溶胶偏振反演精度的关键因素。因此,研究地表偏振反射率分布具有重要意义。

双向偏振反射分布函数(BPDF)描述了地表偏振反射的角度空间分布。海洋表面较为均一,可以用 Cox-Munk<sup>[3-4]</sup>模型计算得到较为精确的偏振反射率值。与海洋相比,陆地表面覆盖物比较复杂,具有时空变化特性。在过去的几十年里,许多研究者对地表偏振反射率进行了研究,在偏振遥感领域发展了多个 BPDF 物理模型和半经验模型。1991 年 Rondeaux 等<sup>[5]</sup>基于农作物的偏振测量和分析中,假设叶片表面的反射是镜像的,遵循 Fresnel 反射定律,提出了一个 BPDF 物理模型,该模型考虑了叶面积指数和叶片角度分布。1995 年,Bréon 等<sup>[6]</sup>提出了两个分别关于植被和土壤的不包含任何经验拟合参数的 BPDF 物理模型;但是,在观测天顶角较大时,物理模型产生的误差不可忽略。相关研究者们基于多角度偏振探测仪(DPC)的机载或者星载实际观测数据构建了多个 BPDF 半经验模型。Nadal 和 Bréon<sup>[2]</sup>利用星载地球反射多角度偏振探测仪(POLDER)于 1996 年 11 月至 1997 年 6 月的在轨多角度偏振观测数据,提出了 Nadal-Bréon 模型。2009 年, Maignan 等<sup>[7]</sup>提出了基于自然地物的单参数的 Maignan 模型。2017 年, Xie 等<sup>[8]</sup>利用 POLDER 数据提出了城市地表的 Xie-Cheng 模型。2009 年, Waquet 等<sup>[9]</sup>利用法国 MICROPOL 飞行试验数据提出了包含阴影函数的 Waquet 模型。2011 年, Litvinov 等<sup>[10]</sup>基于美国偏振扫描仪 RSP 在植被和土壤类型地表上的飞行试验数据,提出了三参数的 Litvinov 模型。相坤生等<sup>[11]</sup>基于 POLDER 过境中国区域的数据研究了 Nadal-Bréon 模型对典型地物的适用性。Yang 等<sup>[12]</sup>基于 POLDER 数据分析了儿种半经验的 BPDF 模型的性能。有研究表明:地表偏振反射率在可见光到近红外波段范围的变化不大<sup>[9]</sup>,因此可以利用受大气分子和气溶胶散射影响较小的近红外波段数据研究地表偏振反射特性。

我国大气气溶胶 DPC 具有多角度偏振探测能力,可以获得同一目标的多角度偏振观测数据,为研究地表 BPDF 提供了科学数据。本文基于 DPC 在轨多角度偏振观测数据,结合 AERONET 地面站点 AOD 产品和中分辨率成像光谱仪(MODIS)地表分类产品,研究了地表偏振反射率的多角度空间分布特征,对比分析了 Nadal-Bréon、Maignan、Waquet、Litvinov、Xie-Cheng 这 5 种常用的半经验地表 BPDF 模型的性能,分析结果对于利用 DPC 数据研究地表偏振反射特性和气溶胶偏振反演具有重要指导意义。MCD12Q1 数据下载链接:<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>, AERONET 数据下载链接:[https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new\\_web/index.html](https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/index.html), 高分五号卫星 DPC 数据下载链接:<https://www.cheosgrid.org.cn/app/search/search.htm>。

## 2 半经验 BPDF 模型

### 2.1 Fresnel 反射定律

理论和经验研究表明,地表反射率的偏振是由微面元的镜面反射产生,满足 Fresnel 反射定律。Fresnel 反射率为

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

$$\sin \alpha_T = \frac{\sin \alpha_i}{n}, \quad (2)$$

式中: $\alpha_i$ 为入射角; $\alpha_T$ 是与折射率  $n$  和  $\alpha_i$  相关的折射角。入射角可以表示为

$$\cos(2\alpha_i) = \cos \theta_s \cos \theta_v + \sin \theta_s \sin \theta_v \cos \varphi, \quad (3)$$

式中: $\theta$ 是天顶角,下角标  $s$  和  $v$  分别表示太阳和传感器; $\varphi$ 是太阳和传感器之间的相对方位角。

### 2.2 Nadal-Bréon 模型

Nadal-Bréon 是基于 POLDER 偏振观测数据提出的半经验 BPDF 模型<sup>[2]</sup>:

$$R_p(\theta_s, \theta_v, \varphi) = \rho \left\{ 1 - \exp \left[ -\beta \frac{F_p(\alpha_i, n)}{\mu_s + \mu_v} \right] \right\}, \quad (4)$$

式中: $R_p$ 为偏振反射率; $\rho$ 和  $\beta$ 是利用 POLDER 实测数据拟合的自由参数,与地表类型和归一化植被指数(NDVI)相关; $\mu_s$ 和  $\mu_v$ 分别是太阳天顶角余弦和观测天顶角余弦。模型中考虑了森林、灌木林地和低植被地表类型,模型与 POLDER 实测数据符合较好。

### 2.3 Maignan 模型

植被叶面不是完全镜像的,而是存在突起或毛发

状的凹陷,会影响镜面反射。Nilson 等<sup>[13]</sup>提出的衰减函数为

$$K(\alpha_1, \kappa) = \exp(-\kappa \tan \alpha_1), \quad (5)$$

式中:  $\kappa$  是粗糙因子,取值范围为 0.1~0.3。

研究表明,地表偏振反射率随植被覆盖度的增加而降低,基于此, Maignan 等<sup>[7]</sup>提出了一个涉及因子  $\exp(-I_{\text{NDV}})$  的 POLDER 测量值的单参数模型:

$$R_p(\theta_s, \theta_v) = \frac{C \exp(-\tan \alpha_1) \exp(-I_{\text{NDV}}) F_p(\alpha_1, n)}{4(\mu_s + \mu_v)}, \quad (6)$$

式中:  $C$  为自由参数,由测量数据拟合得到;  $I_{\text{NDV}}$  为 NDVI。该模型与 PARASOL 数据较好地符合,而且只有一个拟合参数。

## 2.4 Waquet 模型

Waquet 等<sup>[9]</sup>基于 MICROPOL 航空偏振测量数据,提出了包含阴影函数的 BPDF 模型:

$$R_p(\theta_s, \theta_v) = \xi F_p(\alpha_1, n) S(\theta_s) S(\theta_v), \quad (7)$$

$$S(\theta) = \frac{2}{1 + \operatorname{erf}(\rho) + (\rho \sqrt{\pi})^{-1} \exp(-\rho^2)}, \quad (8)$$

$$\rho = (\sigma \sqrt{2})^{-1} \cot \theta, \quad (9)$$

式中:  $\xi$  和  $\sigma$  是两个自由参数;  $S(\cdot)$  为描述阴影影响的函数;  $\operatorname{erf}(\cdot)$  为误差函数;  $\sigma^2$  为地表微面元斜率的均方值,涉及地表粗糙度。该模型考虑了阴影函数及地表粗糙度的影响,结果与 Nadal-Bréon 模型比较接近。

## 2.5 Litvinov 模型

Litvinov 等<sup>[10]</sup>开发了包含三个参数的 BPDF 模型,并使用机载 RSP 偏振测量数据进行了验证。该模型采用高斯函数描述地表坡度方向分布:

$$R_p = \frac{\alpha \pi F_p(\alpha_1, n)}{4\mu_n(\mu_s + \mu_v)} f(\mathbf{n}_s, \mathbf{n}_v) f_{\text{sh}}(\gamma), \quad (10)$$

$$f(\mathbf{n}_v, \mathbf{n}_s) = \frac{1}{\pi \mu_n^3 2\sigma^2} \exp\left(-\frac{1 - \mu_n^2}{\mu_n^2 2\sigma^2}\right), \quad (11)$$

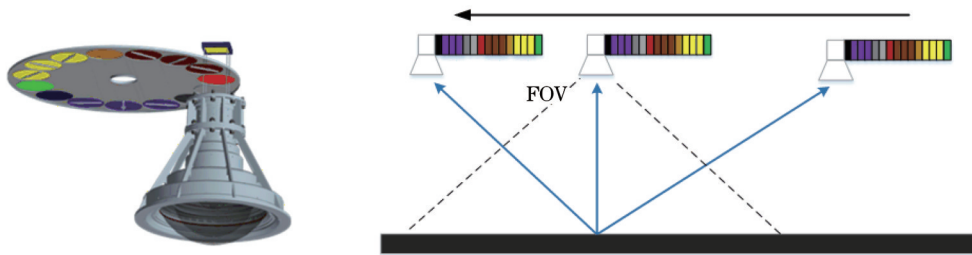


图 1 成像系统和多角度探测示意图

Fig. 1 Imaging system and multi-angle detection diagram

DPC 具有 5 个非偏振通道 (443, 565, 763, 765, 910 nm) 和 3 个偏振通道 (490, 670, 865 nm)。采用分时偏振成像方法获取目标的偏振辐射特性,检偏振角度分别为  $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$ ,如图 1 左图所示。利用三个检偏通道的数据计算 Stokes 矢量,  $I$ 、 $Q$ 、 $U$  分别表示大气

$$f_{\text{sh}}(\gamma, k_r) = \left[ \frac{\cos k_r (\pi - \gamma)}{2} \right]^3, \quad (12)$$

$$\mu_n = \frac{\mathbf{n}_v^z + \mathbf{n}_s^z}{\mathbf{n}_v + \mathbf{n}_s}, \quad (13)$$

$$\begin{cases} \mathbf{n}_s = (\sin \theta_s \cos \varphi_s, \sin \theta_s \sin \varphi_s, \cos \theta_s) \\ \mathbf{n}_v = (\sin \theta_v \cos \varphi_v, \sin \theta_v \sin \varphi_v, \cos \theta_v) \end{cases}, \quad (14)$$

式中:  $\gamma$  是散射角;  $\mathbf{n}_v$  和  $\mathbf{n}_s$  是观测方向和入射光方向的单位矢量,上标  $z$  表示  $\mathbf{n}_v$  和  $\mathbf{n}_s$  的  $z$  分量;  $f(\mathbf{n}_v, \mathbf{n}_s)$  是高斯分布函数;  $f_{\text{sh}}(\gamma, k_r)$  是一个简单的经验阴影函数;  $k_r$  是控制阴影区域在 0 到 1 之间的因素;  $\varphi_s$ 、 $\varphi_v$  分别为太阳方位角和观测方位角。模型考虑了阴影的影响,不足的是拟合系数较多。

## 2.6 Xie-Cheng 模型

Xie 和 Cheng<sup>[8,12]</sup>提出了一个双参数 BPDF 来描述城市地区的偏振反射率分布,并利用 POLDER 观测数据评价了该模型的性能。该模型考虑了阴影和 NDVI 的影响,忽略了坡度的影响:

$$R_p = A \times F_p(\alpha_1, n) \times f_{\text{sh}}(\gamma, k_r) \times \exp(-w \times I_{\text{NDV}}), \quad (15)$$

式中:  $A$  为拟合系数;  $w$  是补偿 NDVI 对偏振反射率影响的参数,取值为 0.7。

## 3 数据获取与处理

### 3.1 DPC 仪器

DPC 于 2018 年 5 月搭载高分五号卫星发射升空<sup>[14-15]</sup>,高分五号卫星所在的太阳同步轨道高度为 705 km,倾角为  $98^\circ$ ,卫星过境地方时为 13:30。DPC 是一种超广角偏振成像仪,沿轨和穿轨方向的视场角 (FOV) 均为  $-50^\circ \sim 50^\circ$ ,空间分辨率为  $3.29 \text{ km} \times 3.29 \text{ km}$ ,配置的 CCD 探测器有效像元数为  $512 \times 512$ ,幅宽为 1850 km,可提供同一目标至少 9 个观测角度的数据。辐射和偏振辐射定标误差分别小于 5% 和 0.02<sup>[16]</sup>,偏振图像配准精度优于 0.1 pixel<sup>[17]</sup>。DPC 的成像系统及多角度探测示意图如图 1 所示。

层顶处的辐亮度  $I$  和偏振辐亮度  $Q$ 、 $U$  分量。DPC 的仪器参数如表 1 所示,其中 P 表示偏振波段。基于海上非装备站点 (SNEs),利用海洋表面双向反射分布函数 BRDF 对 DPC 数据进行了校准<sup>[18]</sup>。

表 1 DPC 仪器参数  
Table 1 DPC instrumental parameters

Parameter	Value
Spectral band /nm	443, 490 (P), 565, 670 (P), 763, 765, 865 (P), 910
Band width /nm	20, 20, 20, 20, 10, 40, 40, 20
Angle of polarization / (°)	0 (P), 60 (P), 120
FOV / (°)	-50-50
Number of multi-angles	9 (along the orbit)
Spatial resolution /km	3.29 (subsattellite point)
Orbit type	Sun synchronous orbit
Orbit altitude /km	705
Local time of ascending node	13:30
Radiative calibration error /%	≤5
Polarization calibration error	≤0.02

### 3.2 AERONET 数据

AERONET 是由 NASA 和 PHOTONS 建立的全球地基气溶胶观测网络,提供了长期连续的气溶胶光学和微物理特性数据产品,AERONET 产品在定标和云检测方面都遵循严格的流程,反演产品具有较高的精度,可用于气溶胶特性研究<sup>[19]</sup>,被广泛用于气溶胶光学厚度的机载和星载试验验证<sup>[20-21]</sup>。本文选择 AERONET 近红外波段 870 nm 的 AOD L2.0 产品,筛选低值气溶胶光学厚度条件下的 DPC 在轨观测数据。

### 3.3 数据处理

光的偏振态可以用 Stokes 矢量 ( $I, Q, U, V$ ) 来描述。自然界中几乎不存在圆偏振分量<sup>[5,22]</sup>,与其他偏振分量相比,自然界中的圆偏振分量可以忽略不计。DPC 测量的大气层顶处的归一化偏振反射率为

$$R_p = \frac{\pi \sqrt{Q^2 + U^2}}{\mu_s E}, \quad (16)$$

式中: $E$  为大气层外的太阳辐射; $Q$  和  $U$  分别是大气层顶的偏振分量。

大气分子和气溶胶对近红外波段 865 nm 测量数据的影响远小于对蓝波段 490 nm 和红波段 670 nm 测量数据的影响,因此本文选择 DPC 在 865 nm 波段的多角度偏振观测数据。结合 DPC 在轨观测数据和 AERONET 气溶胶光学厚度产品,选择无云且气溶胶污染较少时间的观测数据,进行地表偏振反射特性研究。

1) 将 AERONET 站点对应的 DPC 像元进行空间匹配,根据 AERONET 站点的经纬度,在 DPC 全球网格中选取覆盖站点的 DPC 像元进行空间匹配。

2) 确定 DPC 像元的地表类型。采用 MODIS 的国际地质-生物圈项目 (IGBP) 地表分类产品 MCD12Q1 IGBP 的地表分类数据,空间分辨率为 500 m × 500 m,将 7 × 7 个 MCD12Q1 网格数据合并成以 DPC 像元为中心的 3.5 km × 3.5 km 区域块进行空间匹配。当一个区域的土地覆盖类型占比大于 75% 时,认为 DPC 像元的地表类型均一,可进行地表 BPDF 研究。

3) 将 AERONET 站点 AOD L2.0 产品数据和空间匹配的 DPC 像元进行时间匹配,构建对应的数据库。由于同一天内 DPC 观测和 AERONET 测量可能发生在不同的时间,因此需要进行时序数据合并。假设 AOD 在短时间内变化缓慢,以高分五号卫星 DPC 观测时间为中心,前后 0.5 h 的 AERONET 的 AOD 是有效数据,如果有效时间段内具有多个 AOD 值,则取平均值。利用 DPC 490, 670, 865 nm 的数据进行云检测<sup>[23]</sup>。选择 AERONET 在 870 nm 近红外波段的 AOD 小于 0.05 时对应的 DPC 无云像元数据与时空匹配的 AERONET 站点 AOD L2.0 数据构建数据库。

4) 针对上述构建的数据库,对 DPC 865 nm 波段多角度偏振数据进行分子散射校正,得到多个方向的地表偏振反射率实测值;利用遗传算法,以 BPDF 模型模拟值与地表偏振反射率实测值的均方误差为优化目标函数,获取 BPDF 模型参数的最优解。

数据处理流程图如图 2 所示。

## 4 结果与讨论

利用 2018 年 5 月至 2019 年 1 月期间的 DPC 和 AERONET 数据,对上述 5 个半经验 BPDF 模型中的参数进行了反演,并比较分析了这 5 个模型的性能。在 8 种 IGBP 地表类型 (落叶阔叶林、开放灌丛、多木稀树大草原、热带稀树大草原、典型草原、农田、城市建筑、荒地) 中,匹配了 148 个 AERONET 站点。选定的 AERONET 站点主要分布在美洲、南美洲、欧洲、南非和澳大利亚。AERONET 站点和 DPC 数据的统计信息如表 2 所示。

图 3 为表 2 列出的 8 种 IGBP 地表上空,DPC 观测到的地表偏振反射率随散射角的变化,从图中可以看出,偏振反射率随散射角的增大呈现减小趋势。

图 4 为 DPC 在 865 nm 波段观测到的共计 7 d 时间的地表多角度偏振反射率的极化图 (日期可能是不连续的),从图中可以看出:地表偏振反射率呈各向异性且随散射角的增大而减小,在后向散射方向附近有较小的值,这与图 4 描述一致;而地表偏振反射率最大值

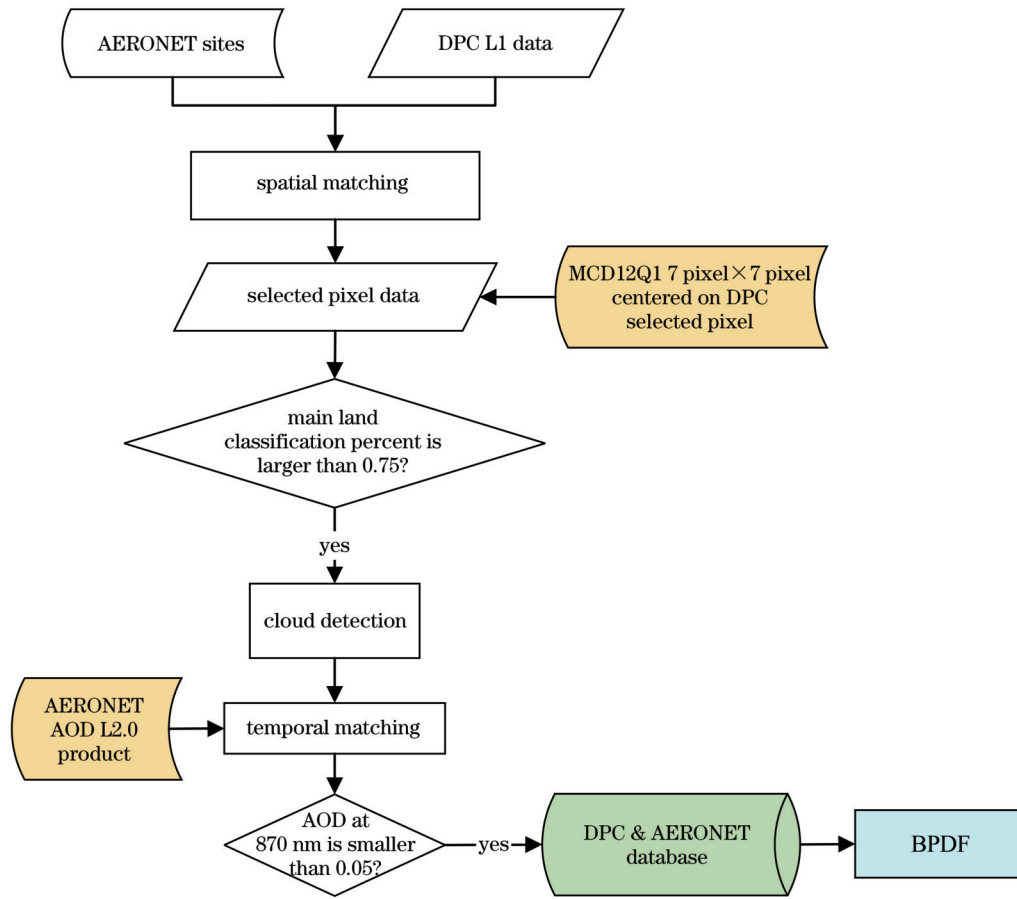


图 2 数据处理流程

Fig. 2 Data processing flow

表 2 AERONET 站点 和 DPC 数据统计

Table 2 AERONET sites and DPC data statistics

IGBP	Classification	Site number	DPC data number	DPC observation
4	Deciduous broadleaf forest	5	56	500
7	Open shrublands	8	236	2118
8	Woody savannas	5	41	357
9	Savannas	7	109	974
10	Grasslands	32	408	3638
12	Croplands	10	145	1287
13	Urban and built-up	66	1259	11028
16	Barren or sparse vegetation	14	334	29225

(如 Upington 和 Gobabeb) 是在前向传输方向。在太阳天顶角和观测角度相似的情况下, 荒地类型的地表偏振光反射率略大于其他地表类型。图 4 中黑色圆圈代表观察角度, 五角星代表太阳辐射。

针对选取的每个站点的 DPC 观测数据, 采用遗传算法获取 5 个 BPDF 模型的参数。然后, 将反演参数代入模型, 模拟实际 DPC 太阳几何、观测几何条件下的地表偏振反射率值。计算 DPC 实际测量值与每个模型和每个选定 IGBP 的模拟值之间的均方根误差 (RMSE)  $E_{RMS}$  和相关性系数  $C_{cor}$  用于评价。

图 5 显示了 8 种典型 IGBP 地表类型的实测值和

BPDF 模型模拟值的散点图。相关性拟合结果的统计值如表 3 所示。

表 3 给出了应用于 DPC 偏振测量的 5 个半经验 BPDF 模型的参数统计和性能分析。由表 3 可知: Litvinov 模型的平均 RMSE 最小, 相关性系数平均值最大, 分别为 0.202% 和 0.958; Nadal-Bréon 模型的性能次于 Litvinov 模型, RMSE 和相关性系数均值分别为 0.223% 和 0.952。在利用 DPC 数据进行气溶胶反演时, 可优先考虑 Litvinov 模型和 Nadal-Bréon 模型计算地表的多角度偏振反射率。

表 4 列出了本文中 8 个 IGBP 类型的 5 个 BPDF 模

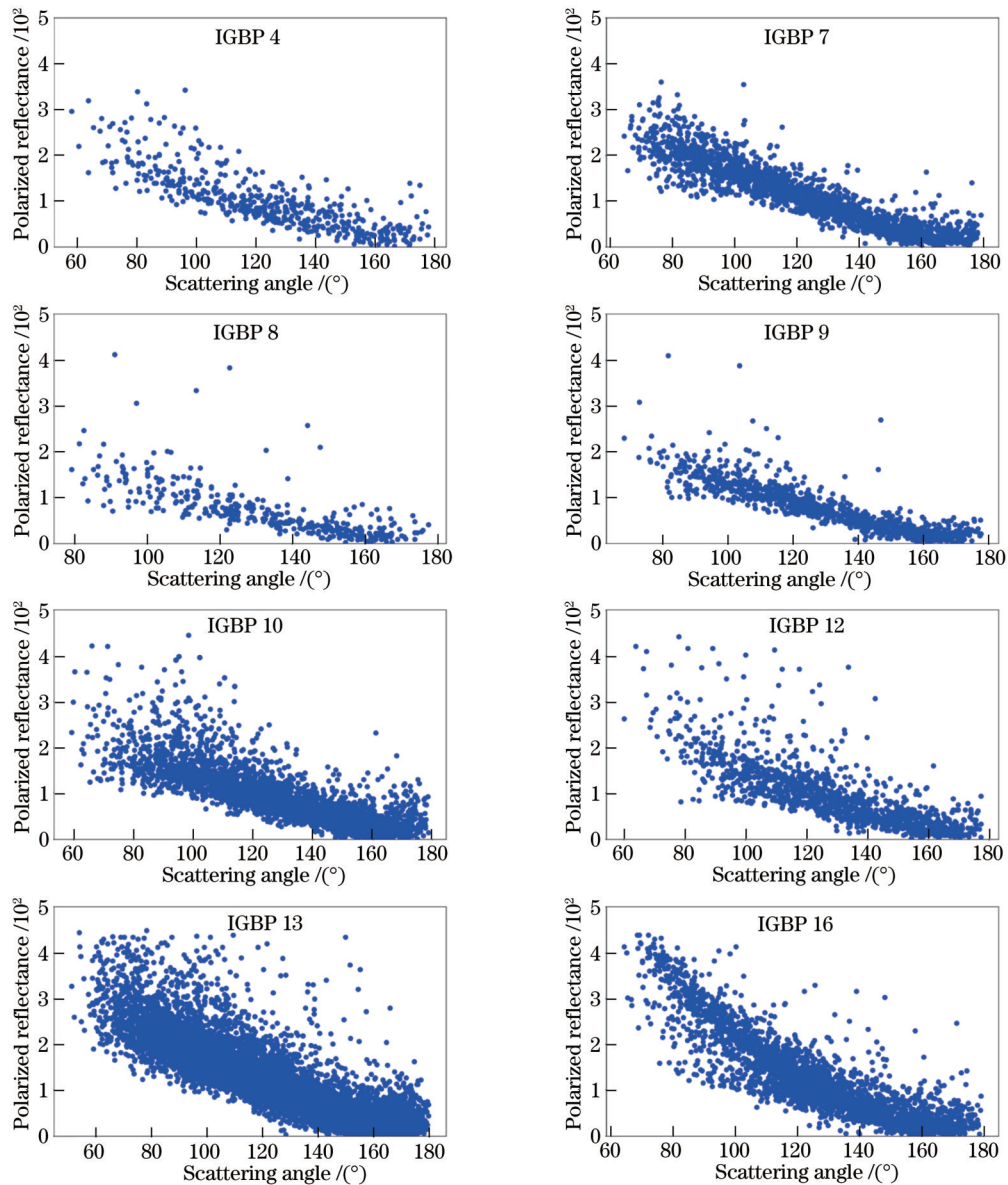


图3 用8种典型IGBP分类得到的散射角绘制偏振反射率

Fig. 3 Polarized reflectance plotted with scattering angle obtained by eight typical IGBP classifications

型中参数的平均值,可用于基于DPC数据的大气气溶胶特性参数偏振反演应用中的地气解耦环节,作为地表BPDF模型参数经验值参考以获取更高精度的地表的多角度偏振反射率。

## 5 结 论

利用DPC在轨观测多角度偏振数据和AERONET数据分析了几种典型陆地地表类型的地表偏振反射率空间分布特性。基于DPC在轨观测数据比较了5个常用的半经验BPDF模型地表偏振反射率模拟值与实测值的相关系数和均方根误差,评估了BPDF模型的性能。分析结果表明,Litvinov模型和Nadal-Bréon模型所得结果与DPC实测数据较好地拟

合,相关性系数均优于0.92, RMSE优于0.23%。在DPC气溶胶参数偏振反演过程中,可优先考虑利用这两个模型估算地表偏振反射率。本文给出了基于DPC数据分析的BPDF模型参数经验值,为地气分离中地表BPDF模型选择提供了数据支持,为利用DPC测量数据定量反演地表气溶胶参数提供了先验知识,这对于DPC在轨观测数据的应用具有重要意义。

**致谢** 感谢NASA研究人员提供的MODIS地表分类产品,感谢AERONET站点负责人对于CE318数据的维护、收集和处理,感谢国家航天局对地观测与数据中心提供的DPC数据。

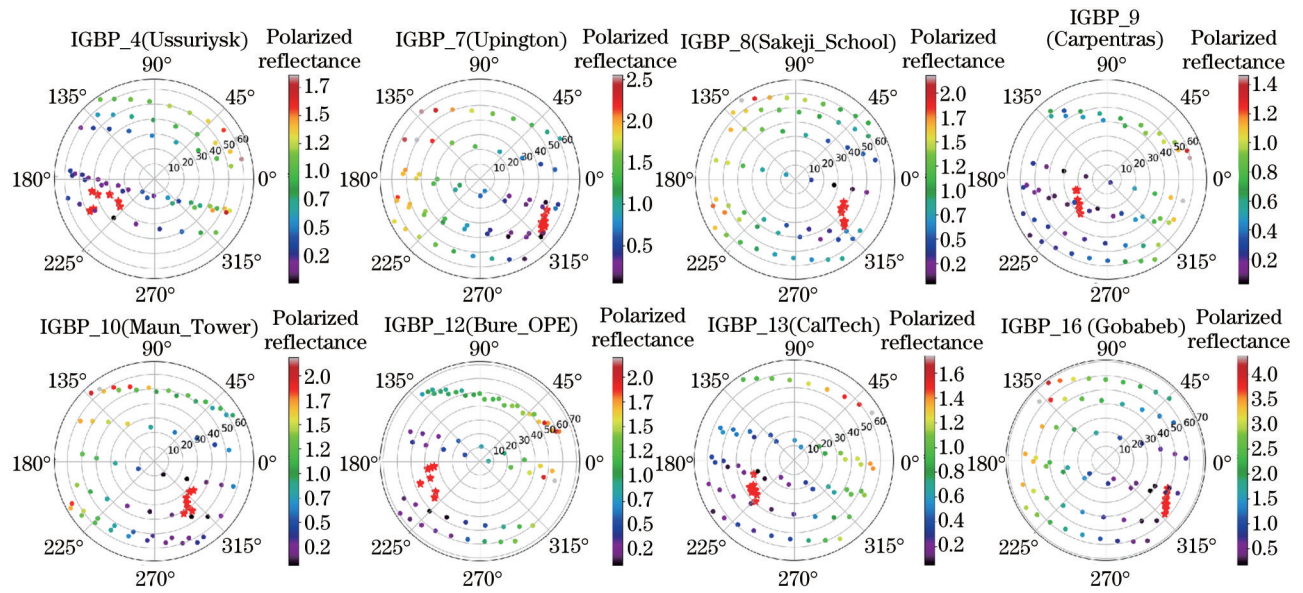


图 4 对应于 8 个典型 IGBP 类的 8 个 AERONET 站点在 865 nm 波段 7 d (可能是非连续的) 偏振反射率数据 ( $\times 100$ ) 的极图  
 Fig. 4 Polar plots of polarized reflectance data ( $\times 100$ ) over seven days (perhaps discontinuous) at 865 nm for eight AERONET sites corresponding to eight typical IGBP types

表 3 5 个 BPDF 模型性能的统计结果

Table 3 Performance statistic results of five BPDF models

IGBP	Nadal-Bréon		Maignan		Waquet		Litvinov		Xie-Cheng	
	$C_{cor}$	$100E_{RMS}$	$C_{cor}$	$100E_{RMS}$	$C_{cor}$	$100E_{RMS}$	$C_{cor}$	$100E_{RMS}$	$C_{cor}$	$100E_{RMS}$
4	0.947	0.228	0.919	0.306	0.920	0.349	0.961	0.190	0.931	0.290
7	0.980	0.156	0.972	0.193	0.948	0.323	0.981	0.140	0.971	0.203
8	0.940	0.200	0.845	0.345	0.837	0.398	0.949	0.188	0.863	0.327
9	0.947	0.184	0.882	0.290	0.927	0.248	0.959	0.154	0.938	0.208
10	0.944	0.228	0.893	0.327	0.916	0.325	0.956	0.198	0.923	0.282
12	0.957	0.212	0.909	0.363	0.874	0.411	0.957	0.207	0.887	0.377
13	0.955	0.246	0.871	0.472	0.908	0.397	0.960	0.227	0.920	0.353
16	0.942	0.327	0.918	0.418	0.907	0.432	0.943	0.311	0.922	0.385
Average	0.952	0.223	0.901	0.339	0.905	0.360	0.958	0.202	0.919	0.303

表 4 基于 DPC 数据的 BPDF 模型参数

Table 4 BPDF model parameters based on DPC data

IGBP	Nadal-Bréon		Waquet		Maignan	Litvinov			Xie-Cheng	
	$100\alpha$	$\beta$	$\xi$	$\sigma$	$\alpha$	$\alpha$	$\sigma^2$	$\kappa\lambda$	$A$	$\kappa_r$
4	1.975	58.645	0.432	0.040	8.616	4.169	0.713	0.651	0.999	0.530
7	2.250	64.928	0.507	0.049	7.699	4.773	0.649	0.657	0.967	0.554
8	1.629	69.543	0.445	0.058	8.256	3.746	0.491	0.678	0.968	0.556
9	1.939	61.664	0.485	0.061	9.342	4.221	0.536	0.683	0.992	0.537
10	1.904	72.559	0.519	0.055	8.188	4.516	0.550	0.722	0.996	0.523
12	2.058	71.361	0.532	0.061	9.613	4.722	0.620	0.710	1.000	0.507
13	2.564	57.604	0.588	0.055	9.081	4.452	0.558	0.652	0.999	0.468
16	3.100	52.578	0.691	0.055	8.916	5.486	0.612	0.618	0.987	0.424

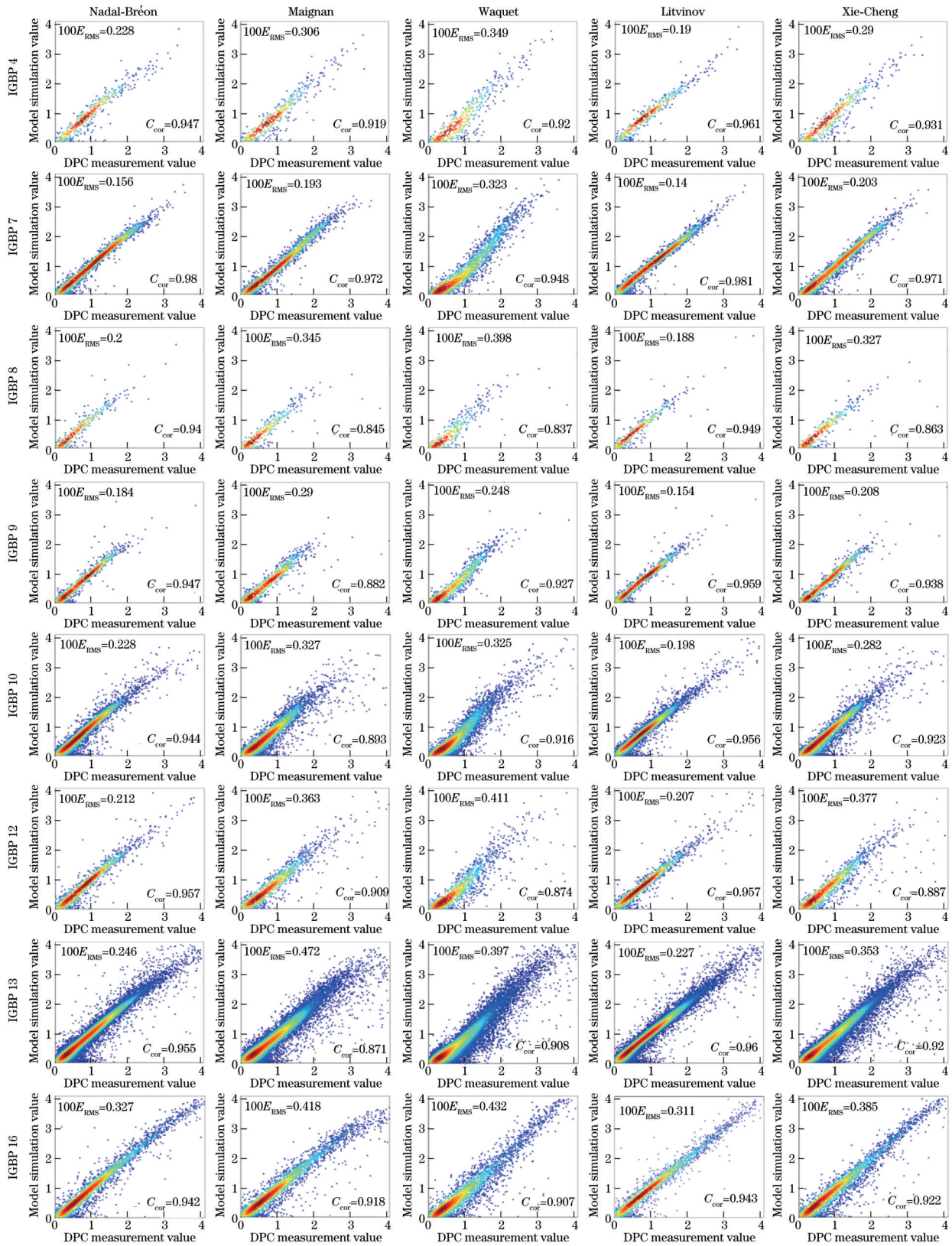


图5 8种典型IGBP地表类型偏振反射率的实测值和模拟值散点图

Fig. 5 Measured and simulated scattering dots of polarized reflectance for eight typical IGBP types

参 考 文 献

[1] Kaufman Y J, Tanré D, Boucher O. A satellite view of aerosols in the climate system[J]. Nature, 2002, 419

(6903): 215-223.

[2] 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.
- [3] Cox C, Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter[J]. Journal of the Optical Society of America, 1954, 44(11): 838-850.
- [4] Cox C. Statistics of the sea surface derived from Sun glitter[J]. Journal of Marine Research, 1954, 13: 198-227.
- [5] Rondeaux G, Herman M. Polarization of light reflected by crop canopies[J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 38(1): 63-75.
- [6] Bréon F M, Tanre D, Lecomte P, et al. Polarized reflectance of bare soils and vegetation: measurements and models[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(2): 487-499.
- [7] Maignan F, Bréon F M, Fedèle E, et al. Polarized reflectances of natural surfaces: spaceborne measurements and analytical modeling[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(12): 2642-2650.
- [8] Xie D H, Cheng T H, Wu Y, et al. Polarized reflectances of urban areas: analysis and models[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 193: 29-37.
- [9] 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): 1228-1236.
- [10] 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.
- [11] 相坤生, 程天海, 顾行发, 等. 基于多角度偏振载荷数据的中国典型地物偏振特性研究[J]. 物理学报, 2015, 64(22): 227801.  
Xiang K S, Cheng T H, Gu X F, et al. Polarized properties of typical surface types over China based on the multi-angular polarized remote sensing measurements [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(22): 227801.
- [12] 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.
- [13] Nilson T, Kuusk A. Approximate analytic relationships for the reflectance of agricultural vegetation canopies[J]. Soviet Journal of Remote Sensing, 1985, 4(5): 814-826.
- [14] Li Z Q, Hou W Z, Hong J, et al. Directional Polarimetric Camera (DPC): monitoring aerosol spectral optical properties over land from satellite observation[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2018, 218: 21-37.
- [15] Huang C, Xiang G F, Chang Y Y, et al. Pre-flight calibration of a multi-angle polarimetric satellite sensor directional polarimetric camera[J]. Optics Express, 2020, 28(9): 13187-13215.
- [16] 涂碧海, 洪津, 姚萍萍, 等. 多角度偏振成像仪偏振探测性能与检测[J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0712003.  
Tu B H, Hong J, Yao P P, et al. Polarization detection performance of directional polarimetric camera[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 0712003.
- [17] 向光峰, 黄禅, 孟炳寰, 等. 多角度偏振成像仪在轨图像配准及性能评估[J]. 光子学报, 2020, 49(8): 0812001.  
Xiang G F, Huang S, Meng B H, et al. In-flight image registration and performance evaluation for directional polarimetric camera[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(8): 0812001.
- [18] 陈斐楠, 樊依哲, 洪津, 等. 高分五号多角度偏振探测仪可见光波段在轨辐射定标研究[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2328001.  
Chen F N, Fan Y Z, Hong J, et al. In-flight radiation calibration of a directional polarimetric camera at visible bands onboard GF-5[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 2328001.
- [19] Omar A H, Won J G, Winker D M, et al. Development of global aerosol models using cluster analysis of Aerosol Robotic Network (AERONET) measurements[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2005, 110(D10): D10S14.
- [20] Holben B N, Eck T F, Slutsker I, et al. AERONET: a federated instrument network and data archive for aerosol characterization[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 66(1): 1-16.
- [21] Holben B N, Tanré D, Smirnov A, et al. An emerging ground-based aerosol climatology: aerosol optical depth from AERONET[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D11): 12067-12097.
- [22] Coulson K L. Polarization and intensity of light in the atmosphere[M]. Hampton: A Deepak Publishing, 1988.
- [23] 常钰阳, 孙斌, 黄禅, 等. 多角度偏振云检测及云参数反演[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1101002.  
Chang Y Y, Sun B, Huang C, et al. Cloud detection and parameter inversion using multi-directional polarimetric observations[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(11): 1101002.