

基于航空多角度偏振辐射计遥感数据评估陆地表面偏振反射模型

王 涵^{1,2} 孙晓兵¹ 孙 斌^{1,2} 洪 津¹

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 运用新研制的大气多角度偏振辐射计(AMPR)获得航空遥感数据并结合实验室测量数据对常用的三种地表偏振模型进行评估,分析地表偏振反射率的波段响应和角度响应特征。实验发现偏振反射率对波段变化的响应很小,该结论得到 85%以上飞行数据的气溶胶反演结果支持。实验室数据中,波长变化 1 nm 的黄棕壤和红沙土的偏振反射率改变量仅分别为 2.43×10^{-6} 和 1.47×10^{-6} 。在角度响应特征上,三种模型都与实验数据符合得很好,高植被覆盖率时三种模型与实际测量数据的偏差较小。分别对三种模型的航空数据进行拟合,Nadal 和 Bréon (NB)开发的地表偏振反射率模型与飞行数据符合得最好,拟合偏差约是其他两个模型的一半,NB 模型能够更精确地描述地表偏振反射的特性。

关键词 遥感;大气多角度偏振辐射计;航空测量;地表偏振反射率

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0128002

Evaluation of Land Surface Polarization Models Based on Airborne Advanced Atmosphere Multi-Angle Polarization Radiometer Measurements

Wang Han^{1,2} Sun Xiaobing¹ Sun Bin^{1,2} Hong Jin¹

(¹ *Kay Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China*
² *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract Three models of land surface polarized reflectance are evaluated using data obtained from newly developed advanced atmosphere multi-angle polarization radiometer (AMPR) and laboratory. The spectral and angular responses are analyzed. It is found that the spectral response is very little, and 85% of AMPR aerosol retrievals support the result. For the data from laboratory, the changes of polarized reflectance of yellow brown soil and red sandy soil are just 2.43×10^{-6} and 1.47×10^{-6} as the wavelength changes 1 nm. Angular responses of all three models match the measured data well with less difference between the high vegetation coverage data and models. After fitted, the model developed by Nadal and Bréon (NB) agrees with the measurements best, and the difference is about 1/2 of the other two models. NB model can describe the surface polarization more exactly.

Key words remote sensing; atmosphere multi-angle polarization radiometer; airborne measurement; land surface polarized reflectance

OCIS codes 280.1310; 280.4991; 010.1285; 010.1100

1 引 言

在航空和航天观测中,地表反射率模型被广泛应用于气体与气溶胶产品的反演之中。地表的模型

是对地表反射状况的一种近似描述,这种近似的描述会给大气和地物遥感带来影响,合适的模型可以减少模型带来的误差。

收稿日期: 2013-07-29; 收到修改稿日期: 2013-08-23

基金项目: 国家大科学工程航空遥感系统、中国科学院重点资助项目(KGFZD-125-13-006)

作者简介: 王 涵(1986—),男,博士研究生,主要从事偏振遥感方面的研究。E-mail: ms.h.wang@163.com

导师简介: 孙晓兵(1966—),男,博士,研究员,主要从事偏振遥感方面的研究。E-mail: xbsun@aiofm.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

大气顶或者某一高度以上的辐射量被卫星和航空遥感用来反演大气的光学特性参数。但是对地观测的辐射量包含了大气分子散射和气溶胶散射成分、地表反射成分和地气耦合的成分^[1-2]。反演大气参数就要从总的辐射量中分离出地表影响的部分进而计算大气散射成分。因此大气产品的反演精度严重依赖于对地表反射量估计的精确度。

由于地表反射率的时空敏感性特别大,特别是对于不能直接获取实时地表信息的传感器来说,想要获取足够精确的地表反射率非常困难。单一的高度探测,地表反射的辐射量远大于气溶胶和大气分子散射的辐射量,气溶胶和大气分子的信息被地表反射掩盖,从总的辐射量中较为精确地分离出大气散射成分比较困难,误差也比较大。对偏振来说,它对气溶胶和大气分子的敏感性要强于对地表的敏感性^[3-4],因此,偏振探测器获得的信息主要是大气散射信息,这就使得在估计地表信息时所带来的误差减小。另外偏振还具有较小的波段和空间相关性^[5-6],这也是本文要研究的问题。综上可知,偏振在大气气溶胶探测中的优势明显,因此研究地表偏振特性及偏振反射率模型意义重大。

实际上,很多研究人员都对地表双向偏振反射分布函数(BPDF)模型进行了深入的研究,现在遥感上应用的地表偏振模型也有很多种。为了验证不同地表模型在大气参数获取中的影响,Waquet等^[6]运用气溶胶反演的方法对不同地表偏振模型进行了评估。发现包含Nadal等^[7]开发的地表偏振模型的反演方法对气溶胶反演结果带来的偏差最小,证实了在气溶胶遥感中Nadal和Bréon(NB)模型有较好适用性。为了更加广泛地对比和评估,本文介绍了三种在气溶胶遥感中较为常用的模型,通过航空测量数据对这三种模型进行评估,得到每一种模型对实际地物偏振模拟的近似程度。

2 地表 BPDF 模型和观测高度偏振辐射

2.1 地表 BPDF 模型

实验和研究表明,地表偏振反射率主要是由地表单次镜面反射决定^[8]。可以认为地表是由一些随机取向的反射单元组成,目前已经发展了不同的地表 BPDF 模型。本文对比和分析了三个较为常用的模型。

假定植被叶子各向同性排布、土壤表面为随机

粗糙表面,可以得到简单的密集植被^[9-10]和裸土^[10]的 BPDF 表达式。该表达式与法国里尔大学大气光学实验室研制的地表 BPDF 测量仪(REFPOL)测量数据符合得较好。

$$R^{\text{veg}}(\theta_s, \theta_v, \Delta\varphi) = \frac{F(\gamma)}{4(\mu_s + \mu_v)}, \quad (1)$$

$$R^{\text{soil}}(\theta_s, \theta_v, \Delta\varphi) = \frac{F(\gamma)}{4\mu_s\mu_v}, \quad (2)$$

式中 $\gamma = (\pi - \Theta)/2$ 为入射角, Θ 为散射角, F 为 Fresnel 系数, μ_s 是太阳天顶角 θ_s 的余弦, μ_v 为观测天顶角 θ_v 的余弦, φ 为相对方位角。(1)式和(2)式的线性组合[下文中用 Vegetable + Soil(VS)模型表示]经常被用在一些遥感应用中^[3,11]。

Waquet等^[1]运用与 Fresnel 反射率成正比的表达式[即(3)式]表示地表偏振反射率,并运用 RSP (Research Scanning Polarimeter)数据进行了验证和气溶胶反演,得到了较为精确的反演结果(简称 FR 模型)。比例系数 ξ 通过和测量结果拟合得到:

$$R^{\text{surf}}(\theta_s, \theta_v, \Delta\varphi) = \xi F(\gamma). \quad (3)$$

Nadal等^[7]运用1996年11月和1997年6月的 POLDER (Polarization and Directionality of Earth's Reflectance)观测数据开发出了一个地表偏振反射率[即(4)式]的半经验模型(简称 NB 模型)。这种模型被广泛应用于 POLDER 的产品反演中,反演结果得到了地面同步数据的验证^[12]:

$$R^{\text{surf}}(\theta_s, \theta_v, \Delta\varphi) = \rho \left\{ 1 - \exp \left[-\beta \frac{F(\gamma)}{\mu_s + \mu_v} \right] \right\}, \quad (4)$$

式中 ρ 和 β 是经验系数,由归一化植被指数(NDVI)和 IGBP (International Geosphere and Biosphere Project)给出的地表典型分类^[13]决定。

此外,Cairns等^[14]发展了一种考虑阴影影响的模型,这种模型加入阴影系数忽略了表面粒子阴影影响,也得到了实验数据的支持。由于它在目前的遥感产品中应用不是很广泛,本文不对它进行评估。

2.2 观测高度的偏振反射率

归一化偏振反射率 R 用 Stokes 矢量为

$$R = \frac{\pi \sqrt{Q^2 + U^2}}{\mu_s E_0}, \quad (5)$$

式中 E_0 是大气顶辐射通量密度, Q 和 U 分别是 Stokes 矢量的第二和第三个参数,表示两个相互垂直方向上的偏振强度分量。

传感器接收的大气向上的偏振反射率可以表示为^[12,14]

$$R^{\text{meas}}(G, a) = R^{\text{atmo}}(G, a) + T_1(G, a)R^{\text{surf}}(G)T_2(G, a), \quad (6)$$

式中 G 是观测几何关系,包括观测高度 z 、观测天顶角 θ_v 、太阳天顶角 θ_s 和相对方位角 φ 。字母 a 表示大气气溶胶和大气分子光学特性。 R^{atmo} 是大气偏振反射率, R^{surf} 是地表偏振反射率。 T_1 和 T_2 分别是向下和向上的传输透射率,即

$$T_1 = \exp\left[-\frac{\psi\tau^{\text{m}}(0) + \zeta\tau^{\text{a}}(0)}{\mu_s}\right], \quad (7)$$

$$T_2 = \exp\left[-\frac{\psi\tau^{\text{m}}(z) + \zeta\tau^{\text{a}}(z)}{\mu_v}\right], \quad (8)$$

式中 ψ 和 ζ 为与气溶胶特性有关的参数^[15]。

大气顶到高度为 z 处的分子和气溶胶光学厚度(AOT)可以由整层大气分子 $\tau^{\text{m}}(0)$ 和气溶胶 $\tau^{\text{a}}(0)$ 的光学厚度表示为

$$\tau^{\text{m}}(z) = \exp(-z/H_m) \cdot \tau^{\text{m}}(0), \quad (9)$$

$$\tau^{\text{a}}(z) = \exp(-z/H_a) \cdot \tau^{\text{a}}(0), \quad (10)$$

式中 H_a 和 H_m 分别设定为 2 km 和 8 km^[5] [本文中,架次(ID)2、3 和 4 所运用的 H_a 与 H_m 由机载激光雷达测量的大气廓线获取]。把(7)~(10)式代入(6)式,经过转换可以计算得到 R^{surf} 。

3 实验与数据选取

3.1 仪器与实验介绍

获取表面偏振反射率的实验包括两部分,一部分是大气多角度偏振辐射计(AMPR)飞行实验(包括地面同步测量),一部分是在实验室内对采集的样品进行直接测量。

AMPR 是中国科学院安徽光学精密机械研究所(AIOFM)新研制的机载探测器,如图 1 所示。它主要是用来探测气溶胶和云进而获取气溶胶和云的光学特性。由于气溶胶和云的光学特性较为复杂,AMPR 采用多波段多角度和偏振探测,加入偏振探测有利于减小地面反射对探测精度的影响。

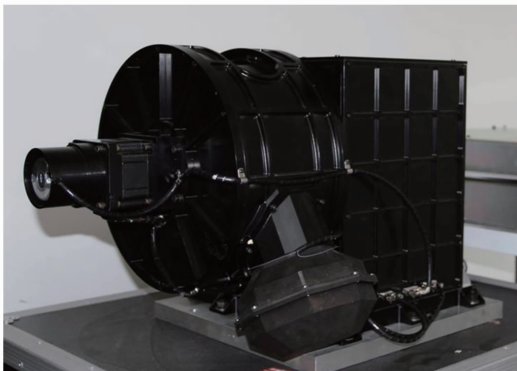


图 1 AMPR 整机照片
Fig. 1 Picture of AMPR

AMPR 设计了 490、555、665、865、960、1640 nm 六个波段,其中 960 nm 用来探测水汽,其余波段用来探测云和气溶胶。所有六个波段都可以获取多角度偏振信息。AMPR 通过一对 Wollaston 棱镜在 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四个方向上实现偏振检测。多角度信息通过探测器扫描获取,一个周期扫描 111 个角度(从天底方向 $-55^\circ \sim +55^\circ$ 每 1° 采样一次)。同时,AMPR 安装有在轨定标器,在一个扫描周期(约 0.863 s)中,约 1/3 的时间扫描探测目标,其余时间 AMPR 进行暗电流测量和定标,每一周期都可以获取暗电流和定标数据^[16-19]。

为了探测天津地区气溶胶和地表偏振特性,分别于 2012 年 8 月(一个架次)和 2013 年 4 月(三个架次)进行了 AMPR 的飞行实验。实验选取晴朗无云的天气,以天津滨海机场为起点,飞行区域覆盖渤海湾一角和天津、唐山地区,如图 2 所示,其中白色五角星为地基同步观测站点,也是本文数据的采集区域。飞行实验参数如表 1 所示。数据采集区域是农田,架次 1 实验进行时是夏季,地面植被覆盖率较高。架次 2、3 和 4 实验进行时是早春,地面植被覆盖较少。据此可以分析不同植被覆盖率对地表偏振模型的影响情况。飞行实验中 AMPR 的姿态和位置数据由 POS(相关仪器介绍列于表 2)提供。

在飞行实验前后都对 AMPR 进行了实验室定标,以获取较为准确的定标系数,结果显示 AMPR 的辐射精度优于 5%,偏振度定标精度优于 0.005^[20-21]。实验室定标和飞行过程的在轨定标结果表明仪器在飞行过程中工作稳定。

地基同步观测站(N39.1773°,E118.3404°)架设有自动太阳光度计 CE318 同步测量。它可以提供测量波段的光学厚度、折射率以及粒子尺度谱分布等气溶胶基本参数^[22-24]。为了作更广泛的对比,在第 2、3 和 4 架次中,机载激光雷达与 AMPR 同时工作。激光雷达可以提供 532 nm 处的气溶胶后向散射和吸收系数^[25-26],进而可以得到气溶胶光学厚度。经过对比,地面实验站和机载激光雷达与 AMPR 结果非常接近,证明了 AMPR 测量结果的可靠性。

另外,在实验室内,对采集到的不同地表样品在可见与近红外波段进行观测。用装了偏振片(碘偏振片,消光比大于 10^4)的 SVC HR-1024(小于 1000 nm 光谱采样间隔为 1.5 nm,大于 1000 nm 光谱采样间隔为 3.9 nm)对比标准白板获取样本表面偏振反射率。



图 2 实验飞行区域情况与架次 1 轨迹(架次 2、3 和 4 与架次 1 轨迹基本一致)

Fig. 2 Flight track of sortie 1 and experimental area (tracks of sorties 2, 3, and 4 are similar with sortie 1)

表 1 飞行过程主要参数

Table 1 Main characteristics of the flight

Flight ID	Date	Time	Altitude /km	Viewing angle /($^{\circ}$)
1	2012-08-10	01:49~02:53	3.1	$29 < \theta_s < 42, 0 < \theta_v < 38$
2	2013-04-29	02:31~04:38	3.7	$24 < \theta_s < 31, 0 < \theta_v < 45$
3	2013-04-30	01:30~04:02	3.7	$24 < \theta_s < 41, 0 < \theta_v < 45$
4	2013-05-01	01:53~04:18	3.7	$24 < \theta_s < 36, 0 < \theta_v < 45$

表 2 相关实验仪器

Table 2 Instruments used in the experiment

Instrument	Brief introduction
CE318	Provide AOT, complex refractive index, size distribution, made by Cimel Company
Lidar	Provide profiles of volume backscatter and extinction coefficients made by AIOFM
POS	Position and pose recorder made by Applanix Company
SVCHR-1024	Portable spectroradiometer made by Spectra Vista Company

3.2 数据选取

飞行中,在地面观测站点上空进行了多次往返观测,以获取更多的观测数据。选取观测点周围数据,扣除探测到水面的点。CE318 与 AMPR 波段对应关系如表 3 所示,因此在 490、665、865、1640 nm 波段分析偏振反射率的波段响应与角度响应特征。架次 1 测量数据为高植被覆盖率数据,架次 2、3 和 4 测量数据为低植被覆盖率结果。

表 3 AMPR 与 CE318 波段对应表

Table 3 Relative wavelength bands of AMPR and CE318

AMPR band /nm	CE318 band /nm
490	500
665	675
865	870
1640	1640

4 实验结果

在计算中,结合 AMPR 测得的偏振反射率和 CE318 测得的大气分子与气溶胶光学特性参数,通过(6)式得到地表偏振反射率。其中用到的大气参数数据由地面同步观测的 CE318 获取,辐射传输由逐次散射法(SOS)^[27]计算。图 3~5 为 CE318 同步测量得到的光学厚度、复折射指数和粒子尺度谱分布(以体积谱分布表示,其中 V 为粒子体积密度, r 为粒子半径)。CE318 产品并没有给出 490 nm 的折射指数,由图 4 可以看出,折射率随波段没有太大变化,因此 490 nm 波段折射率由 440 nm 折射率代替。

4.1 地表偏振反射率的波段响应特征

在对飞行实验获取的地表偏振反射率进行分析

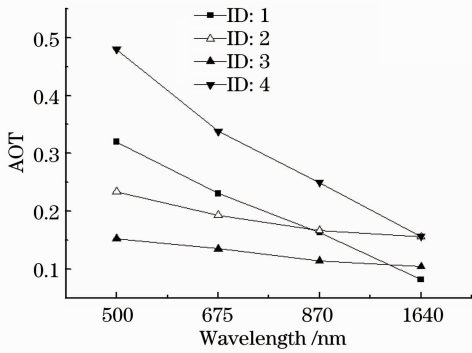


图3 CE318测得的地面观测点上空气溶胶光学厚度随波段分布图

Fig. 3 AOT distribution obtained by CE318 versus wavelength

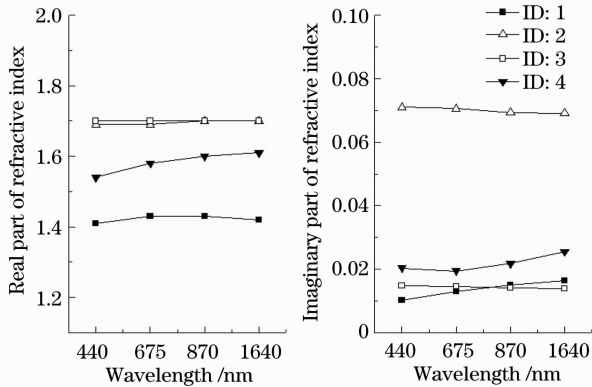


图4 CE318测得的地面观测点上空气溶胶复折射指数随波段分布图

Fig. 4 Aerosol complex refractive index distribution by CE318 versus wavelength

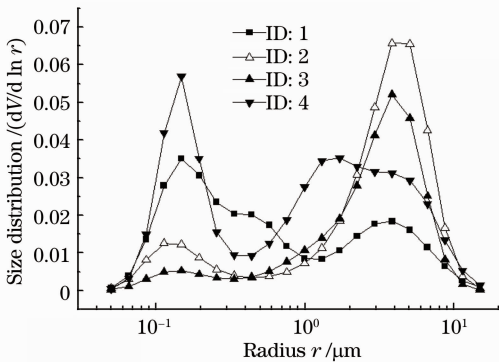


图5 CE318测得的地面观测点上空气溶胶粒子尺度谱分布图

Fig. 5 Aerosol size distribution obtained by CE318

发现,不论是高植被覆盖率还是低植被覆盖率,在相同的观测条件下,偏振反射率对波段的变化是很不敏感的。按照(11)式对不同波段的偏振反射率进行转换,得到490、665、865 nm三个波段偏振反射率和1640 nm偏振反射率的相对偏离 Δ 。然后对 Δ 进

行统计,通过直方图发现, Δ 的直方图明显趋于中心为零的高斯分布。因此对直方图按(12)式进行了高斯拟合,其中 x_c 为高斯分布中值, σ 为标准差,如图6~8所示。高斯曲线的参数列于表4中。表中最后一列列出了一 $0.1 < \Delta < 0.1$ 范围内的概率(在常规大气和地表偏振反射率为0.01的情况下, $\Delta=0.1$ 与 $\Delta=0$ 时气溶胶反演的结果偏差为0.04,这个结果满足AMPR对反演精度的要求)。结果表明,490、665、865 nm三个波段偏振反射率相对于1640 nm偏振反射率偏差在 $\pm 10\%$ 范围内的概率均大于85%。

$$\Delta = \frac{R^\lambda - R^{1640}}{R^{1640}}, \quad (11)$$

$$y = y_0 + \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - x_c)^2}{2\sigma^2}\right], \quad -\infty < x < +\infty. \quad (12)$$

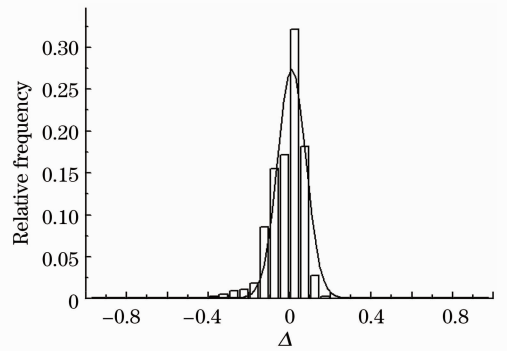


图6 $\lambda=490$ nm时 Δ 分布直方图与高斯拟合结果

Fig. 6 Histogram of Δ when $\lambda=490$ nm and the Gaussian fitting results

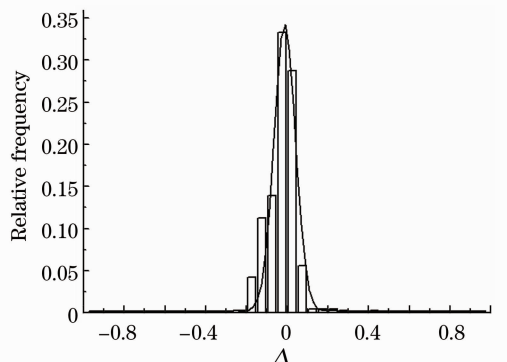


图7 $\lambda=665$ nm时 Δ 分布直方图与高斯拟合结果

Fig. 7 Histogram of Δ when $\lambda=665$ nm and the Gaussian fitting results

同样在实验室中通过对黄棕壤和红沙土两种样品的观测,得到偏振反射率随波长变化的数据,如图9所示。从黄棕壤的数据来看,波长在400~750 nm之间时偏振反射率有一个轻微的上扬过程,大于750 nm基本保持水平趋势,整体上保持水平。红沙土从400~

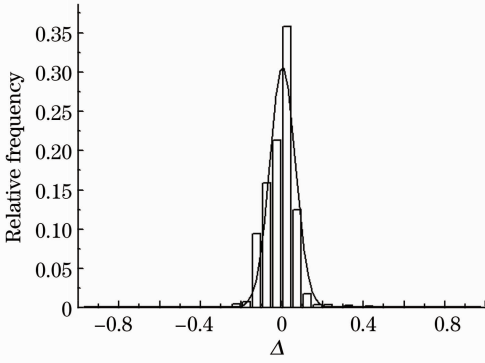


图 8 $\lambda=865\text{ nm}$ 时 Δ 分布直方图与高斯拟合结果

Fig. 8 Histogram of Δ when $\lambda=865\text{ nm}$ and the Gaussian fitting results

1800 nm 基本保持水平状态。拟合直线表达式列于图中, 它们的斜率分别是 $2.43 \times 10^{-6}\text{ nm}^{-1}$ 和 $1.47 \times 10^{-6}\text{ nm}^{-1}$ 左右。可以看出, 偏振反射率整体上随波段变化变化非常小。

表 4 拟合高斯曲线参数和 $-0.1 < \Delta < 0.1$ 的概率

Table 4 Parameters of the Gaussian curves and probability of $-0.1 < \Delta < 0.1$

Gaussian curve	y_0	x_c	σ	$-0.1 < \Delta < 0.1$
$\lambda=490\text{ nm}$	0.00124	0.00948	0.06541	86.9%
$\lambda=665\text{ nm}$	0.00255	-0.01272	0.05275	93.5%
$\lambda=865\text{ nm}$	0.00107	0.00246	0.06232	89.1%

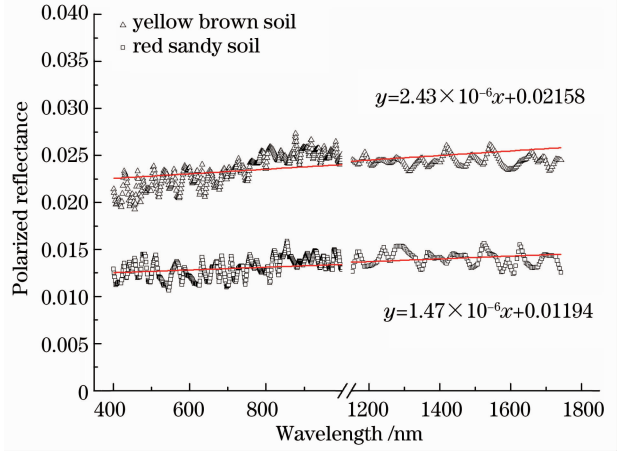


图 9 实验室观测到的土壤表面偏振反射率

($\theta_v=40^\circ, \gamma=30^\circ, \varphi=0^\circ$)

Fig. 9 Soil surface polarized reflectance measured in the laboratory ($\theta_v=40^\circ, \gamma=30^\circ, \varphi=0^\circ$)

4.2 地表偏振反射率角度响应特征与评估

图 10 和图 11 为航空实验测量的地表偏振反射率随散射角变化曲线, 图中包括三个模型的拟合曲线。由于偏振反射率对波段不敏感, 只选取 865 nm 数据作为代表, 其他波段也能给出相似的结果, 在这里不逐一给出。结果表明, 三个模型的角度响应特征基本一致, 与 AMPR 测量数据相符。

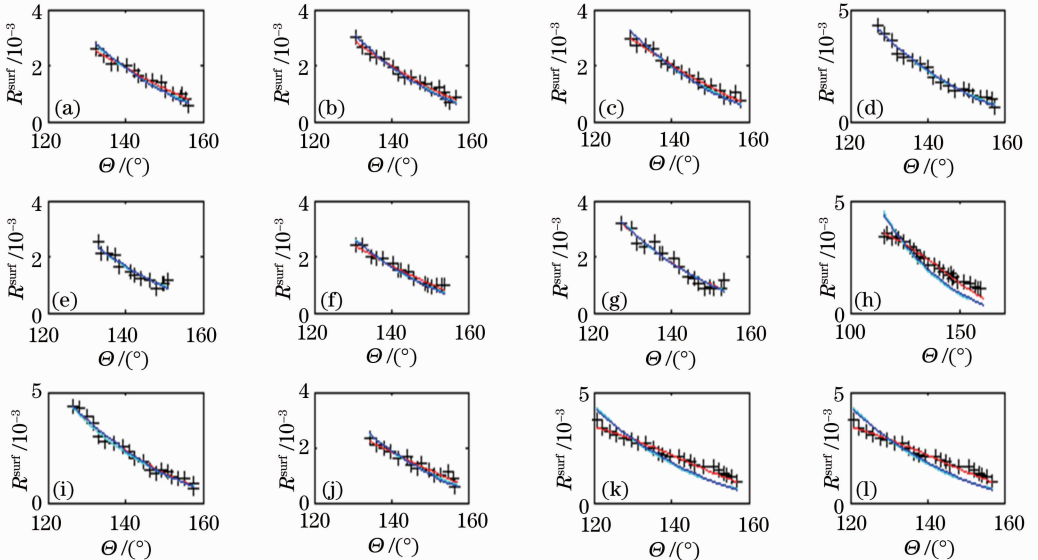


图 10 高植被覆盖率下的地表偏振反射率随散射角分布情况(+为测量结果, 红色、青色和蓝色的曲线分别为 NB、VS 和 FR 模型拟合结果)

Fig. 10 Polarized reflectance responses of scattering angle of high vegetation coverage. (“+” is measuremental results; red, cyan and blue lines are for the fitting lines of NB, VS and FR models)

为了表明模型拟合的程度, 表 5 中列出了不同模型对测量数据拟合的平均残差 r_m 。平均残差的计算公式如(13)式所示:

$$r_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (R_{\text{meas}}^{\text{surf}} - R_{\text{model}}^{\text{surf}})^2}{M}}, \quad (13)$$

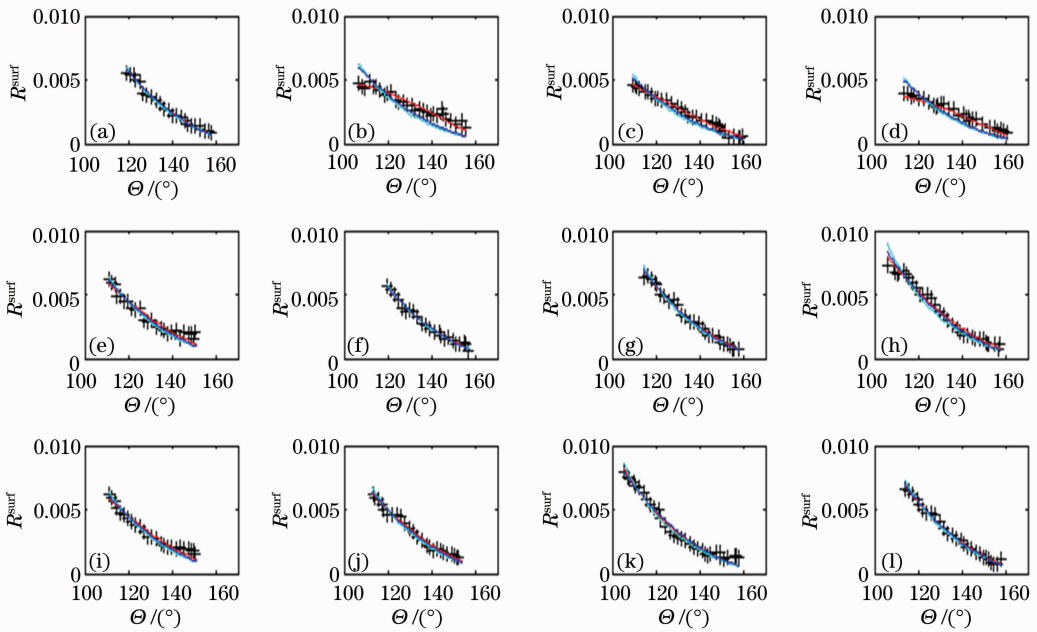


图 11 低植被覆盖率下的地表偏振反射率随散射角分布情况(“+”为测量结果,红色、青色和蓝色的曲线分别为 NB、VS 和 FR 模型拟合结果)

Fig. 11 Polarized reflectance responses of scattering angle of low vegetation coverage. (“+” is measuremental results; red, cyan and blue lines are for the fitting lines of NB, VS and FR models)

式中 M 是角度数。

所有拟合的残差都处在 10^{-4} 量级(大约为地表总偏振反射率的 1/10)。在两种覆盖率情况下,NB 模型拟合的残差均大约为另外两种模型的 1/2。

表 5 测量与拟合偏振反射率之间的平均残差

Table 5 Mean residual between the measured and fitting polarized reflectance

Model	Mean residual / 10^{-4}	
	High vegetation coverage	Low vegetation coverage
NB	1.3146	2.4476
VS	2.9340	4.5024
FR	2.8242	3.8168

5 结 论

运用 AMPR 做了四个架次的航空飞行实验,扣除大气分子和气溶胶散射与吸收影响,得到目标区域地表偏振反射率数据,经过分析发现地表偏振反射率随波段变化的敏感性极小。依照上述结论进行气溶胶反演,有大于 85% 的测量数据给出的结果满足反演要求。另外,在实验室中,对采集到的两种样本进行偏振观测,得到两种样品表面反射率随波段变化情况。经过拟合,两种样品偏振反射率对波段的斜率仅分别为 $2.43 \times 10^{-6} \text{ nm}^{-1}$ 和 $1.47 \times 10^{-6} \text{ nm}^{-1}$ 左右。这说明地表偏振反射率对波段改

变的响应极小。

利用航空测量数据对三个常用地表偏振模型进行分析和评估,发现三个模型都很好地反映了地表偏振随波段和角度的变化情况。从角度响应拟合结果来看,三种模型对高植被覆盖率地表测量数据的拟合偏差要小于对低植被覆盖率的拟合偏差,说明模型对高植被覆盖率地表表面偏振特性的描述更接近植被特性。另外,VS 和 FR 模型拟合结果对实际测量值的偏差约为 NB 模型的 2 倍,说明 NB 模型对地表偏振特性的描述近似程度高于另外两种模型。由于测量数据有限,进一步的验证和分析需要更多的实验和理论支持。

参 考 文 献

- 1 F Waquet, B Cairns, K Knobelspiesse, *et al.*. Polarimetric remote sensing of aerosols over land [J]. *J Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D1): D01206.
- 2 O Dubovik, M Herman, A Holdak, *et al.*. Statistically optimized inversion algorithm for enhanced retrieval of aerosol properties from spectral multi-angle polarimetric satellite observations [J]. *Atmos Meas Technol*, 2011, 4(5): 975–1018.
- 3 J L Deuzé, F M Bréon, J L Roujean, *et al.*. Analysis of POLDER (polarization and directionality of earth’s reflectances) airborne instrument observations over land surfaces [J]. *Rem Sens Env*, 1993, 45(2): 137–154.
- 4 Hao Zengzhou, Gong Fang, Pan Delu, *et al.*. Scattering and polarization characteristics of dust aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0101002.

郝增周, 龚 芳, 潘德炉, 等. 沙尘气溶胶粒子群的散射和偏振

- 特性[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0101002.
- 5 F Waquet, P Goloub, J L Deuzé, *et al.*. Aerosol retrieval over land using a multiband polarimeter and comparison with path radiance method [J]. *J Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D11): D11214.
 - 6 F Waquet, J F Léon, B Cairns, *et al.*. Analysis of the spectral and angular response of the vegetated surface polarization for the purpose of aerosol remote sensing over land [J]. *Appl Opt*, 2009, 48(6): 1228–1236.
 - 7 F Nadal, F M Bréon. Parameterization of surface polarized reflectance derived from POLDER spaceborne measurements [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(3): 1709–1718.
 - 8 K Coulson, G Bourcius, E Gray. Optical reflection properties of natural surfaces [J]. *J Geophys Res*, 1965, 70(18): 4601–4611.
 - 9 G Rondeaux, M Herman. Polarization of light reflected by crop canopies [J]. *Rem Sens Env*, 1991, 38(1): 63–75.
 - 10 F M Bréon, D Tanré, P Lecomte, *et al.*. Polarized reflectance of bare soils and vegetation: measurements and models [J]. *IEEE Trans Geosci Rem Sens*, 1995, 33(2): 487–499.
 - 11 O P Hasekamp, J Landgraf. Retrieval of aerosol properties over land surfaces: capabilities of multiple-viewing-angle intensity and polarization measurements [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(16): 332–3344.
 - 12 J L Deuzé, F M Bréon, C Devaux, *et al.*. Remote sensing of aerosols over land surfaces from POLDER-ADEOS-1 polarized measurements [J]. *J Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D5): 4913–4926.
 - 13 T R Loveland, A S Belward. The IGBP-DIS global 1 km land cover data set, DIScover; first results [J]. *Int J Rem Sens*, 1997, 18(15): 3289–3295.
 - 14 B Cairns, L D Travis, E E Russell. An analysis of polarization: ground-based upward looking and aircraft/satellite-based downward looking measurements [C]. *SPIE*, 1997, 3220: 103–114.
 - 15 B Lafrance. Simplified Model of the Polarized Light Emerging from the Atmosphere, Correction of the Stratospheric Aerosol Impact on POLDER Measurements [D]. Lille: Université des Sciences et Techniques de Lille, 1997.
 - 16 Cui Wenyu, Zhang Yunjie, Yi Weining, *et al.*. System design and implementation of multi-angle polarimeter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0828003.
崔文煜, 张运杰, 易维宁, 等. 多角度偏振辐射计系统设计与实现[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0828003.
 - 17 Song Maoxin, Yang Benyong, Yuan Yinlin, *et al.*. Structure design and test of onboard calibration integration sphere of multi-angle polarimetric radiometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(11): 2338–2344.
宋茂新, 杨本永, 袁银麟, 等. 多角度偏振辐射计星上积分球结构设计及检测[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2338–2344.
 - 18 Wang Yi, Hong Jin, Yang Weifeng, *et al.*. Light resource of on-board calibration for multi-angle polarized radiometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2480–2483.
王羿, 洪津, 杨伟锋, 等. 多角度偏振辐射计星上定标光源[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2480–2483.
 - 19 Yang Weifeng, Song Maoxin, Hong Jin. Opto-mechanical design of multi-angle polarimeter [J]. *J Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, 5(3): 232–238.
杨伟锋, 宋茂新, 洪津. 多角度偏振辐射计的光机设计[J]. 大气与环境光学学报, 2010, 5(3): 232–238.
 - 20 Song Maoxin, Sun Bin, Sun Xiaobing, *et al.*. Polarization calibration of airborne multi-angle polarimetric radiometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(6): 1153–1158.
宋茂新, 孙斌, 孙晓兵, 等. 航空多角度偏振辐射计的偏振定标[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1153–1158.
 - 21 Yuan Yinlin, Xu Jun, Zhai Wenchao, *et al.*. Design and test of a spectrally tunable integrating sphere reference light source with large exit aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0712004.
袁银麟, 徐骏, 翟文超, 等. 大孔径可调光谱积分球参考光源研制和检测[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0712004.
 - 22 O Dubovik, M D King. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements [J]. *J Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(D16): 20673–20696.
 - 23 Z Li, P Goloub, C Devaux, *et al.*. Retrieval of aerosol optical and physical properties from ground-based spectral, multi-angular, and polarized sun-photometer measurements [J]. *Rem Sens Env*, 2006, 101(4): 519–533.
 - 24 Gao Fei, Zhu Jianhua, Yang An'an, *et al.*. Analysis of the aerosol optical characteristics on PY30-1 platform in South China Sea [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(s1): s101004.
高飞, 朱建华, 杨安安, 等. 南海 PY30-1 平台上空气溶胶光学特性分析[J]. 光学学报, 2013, 33(s1): s101004.
 - 25 J D Klett. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns [J]. *Appl Opt*, 1981, 20(2): 211–220.
 - 26 Meng Xiangqian, Hu Shunxing, Wang Zhenzhu, *et al.*. Vertical distribution of aerosol extinction coefficient detection in boundary layer using CCD lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0801003.
孟祥谦, 胡顺星, 王珍珠, 等. CCD激光雷达探测边界层气溶胶消光系数垂直分布[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0801003.
 - 27 J Lenoble, M Herman, J L Deuzé, *et al.*. A successive order of scattering code for solving the vector equation of transfer in the earth's atmosphere with aerosols [J]. *J Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2007, 107(3): 479–507.

栏目编辑: 王晓琰