

抛光花岗岩的二向反射比与偏振度的波谱关系

相云^{1,2}, 晏磊^{1*}, 赵云升³, 陈伟¹

(1. 北京大学地球与空间科学学院空间信息集成与 3S 工程应用北京市重点实验室, 北京 100871;
2. 河北省气象科学研究所, 河北省生态环境监测实验室, 河北 石家庄 050021; 3. 东北师范大学城市与环境科学学院, 吉林 长春 130024)

摘要:传统遥感定义“双向反射率分布函数”(BRDF)的概念,用以表达目标物空间反射的多角度分布特征,但其测量多偏重于单波长的微波及激光。偏振伴随多角度探测而生,蕴涵了目标物的自身特性。该文就城市常见地物——抛光的花岗岩,分别测量了其在 350~2 500 nm 范围内的二向反射比和偏振度的波谱,分析并比较了两者波谱随探测角度的变化规律,并从定义上分析了两者的波谱关系,发现其随探测天顶角及方位角的变化规律一致,而且二向反射比和偏振度的波谱在一定程度上呈反比关系。

关键词:花岗岩;二向反射比;偏振度

中图分类号:TP70 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-0504(2011)01-0025-04

0 引言

自然地表的反射不但与所测地物的几何结构及自身特性有关,还与入射—观测方向的遥感几何有关,因此遥感的多角度信息逐渐引起学界的关注。Nicodemus 等首次提出了“双向反射率分布函数”(BRDF)的概念^[1],用以表达目标物的空间反射分布特征。BRDF 在目标光散射特性、地物遥感、计算机图像处理等多个领域都有广泛的应用。在遥感领域,目标光散射特性研究偏重于单波长的微波及激光,如谢鸣等在 0.6328 μm 及 1.34 μm 两个波长测量了中等粗糙度花岗岩的 BRDF^[2]。在可见光遥感领域,对于典型地物植被的多角度散射特征研究较为深入,已发展了统计模型、物理模型等多种模型,是遥感科学的一个重要研究领域。

偏振是相伴多角度探测而生,作为光的一种基本属性,也反映了地物的自身性质,其作为一种遥感信息源得到人们的关注。偏振遥感在国内起步较晚,但近年来发展很快^[3]。由于花岗岩结构均匀、质地坚硬、强度高、抗风化、耐腐蚀、耐磨损、吸水率低而被广泛用于建筑装饰、露天雕刻,是城市路面的主要装饰材料;对其进行研究,对于遥感人工建筑识别、岩矿探测有重要意义。赵虎等对粗糙花岗岩的多角度偏振反射光谱进行了探讨^[4];赵乃卓等对不同粗糙度花岗岩表面二向性镜面反射分量和漫反射分量进行了比较研究^[5]。以上研究基于二向反射光度计^[6]的 A(630~690 nm)、B(760~1 100 nm)两

个波段进行了单值测量,随着仪器的改进、性能的提高,在较宽波段进行波谱测量成为现实,而波谱也表现了更为精细的特征。本研究以抛光的花岗岩为研究对象,测定了其在可见光—近红外波段(350~2 500 nm)的二向反射光谱及偏振度,对其多角度的波谱特征进行了分析,并讨论了二者的波谱共性及区别。

1 实验样本及测量方法

1.1 实验样本

本文实验样本采自河北省石家庄市灵寿县岔头镇牌房村中山,当地称为“万年青石”,为装饰材料市场上常见的一种花岗岩。对该样本进行了抛光处理,得到城市常见花岗岩建筑形态。按文献^[2]所采用的表面粗糙度划分标准,该样本属于中等粗糙度表面。

1.2 测量方法

多角度测量平台采用由东北师范大学赵云升教授课题组联合长春光学精密机械研究所研制开发的室内大型 BRDF 测量装置;仪器主要由 3 部分组成:光源系统、探测架和控制系统,其都可以以载物平台中心点为球心转动。采用常用的典型实验用近红外光源——卤钨灯为照射光源,可以从天顶角 $0^\circ\sim 90^\circ$ 任意角度照射样品,其刻度精确到 0.5° 。探测架理论上可以从天顶角 $-90^\circ\sim 90^\circ$ 探测,但在与光源同侧时仪器自身有遮挡,因此部分角度不能探测。同理方位角除与光源有重叠阴影的角度不能探测外,其

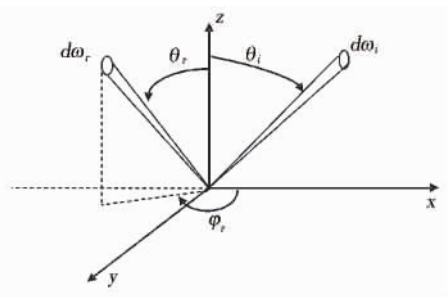
收稿日期:2010-09-13; 修订日期:2010-11-09

基金项目:国家自然科学基金项目(40572167,60808035,60971086)

作者简介:相云(1975-),女,博士研究生,研究方向为遥感机理及应用。*通讯作者 E-mail:lyan@pku.edu.cn

余 360°范围内角度均可探测,其刻度精确到 0.5°。控制系统采用电机控制,可控制探测架变换方位角及天顶角;可搭配 ASD FieldSpec3 光谱辐射仪测定反射光谱。该光谱仪有效波段范围为 350~2 500 nm,分辨率在 350~1 000 nm 为 3 nm、1 000~2 500 nm 为 10 nm。光谱仪光纤镜头前配备有偏振棱镜,不使用偏振棱镜时可测定 BRDF,使用偏振棱镜时可测定偏振 90°及 0°光谱。为减少光线干扰,测量时在暗室进行。

由于光的互易性,本实验中天顶角 10°入射 50°反射的光谱曲线与 50°入射 10°反射的光谱曲线一致,因此仅设置了光源入射天顶角为 50°,分别测量了花岗岩样品在不同探测天顶角和不同方位角的无偏反射光谱、偏振 90°及 0°反射光谱。探测天顶角以垂直向下为 0°,光的前向方向为正,后向方向为负;探测方位角以光源所在方位为 0°,顺时针旋转。其测量几何如图 1 所示。



注: θ_i 为入射天顶角; θ_r 为探测天顶角; φ_r 为探测方位角。

图 1 测量几何示意
Fig. 1 Defining the BRDF geometry

1.3 二向反射比

由于 BRDF 难以直接测量,因此常用双向反射率因子(BRF)来代替,原理为^[7]:

$$BRF = \frac{L_T(\theta_r, \varphi_r, \lambda)}{L_P(\theta_r, \varphi_r, \lambda)} \quad (1)$$

其中: $L_T(\theta_r, \varphi_r, \lambda)$ 与 $L_P(\theta_r, \varphi_r, \lambda)$ 分别代表相同观测条件下目标物和理想朗伯参考面的反射辐射亮度。在此朗伯参考面使用 Spectralon® 白板。本研究将相同观测条件下测量样本的辐亮度值除以白板的辐亮度,称为相对白板的反射比。因为对于光滑的岩石表面,其反射辐射亮度会高出白板许多,比值会大于 1,不适用于反射率的定义。

1.4 偏振度

偏振度 DOP(Degree of Polarization)表示为^[8]:

$$DOP = \frac{I_M - I_m}{I_M + I_m} = \frac{I_{90} - I_0}{I_{90} + I_0} = \frac{R_{90} - R_0}{R_{90} + R_0} \quad (2)$$

其中: I_M 和 I_m 分别为相位不相关且相互正交的两个特殊方向上所对应的最大和最小光强,在本实验

中分别对应 90°及 0°偏振。利用 90°偏振相对于白板反射比(R_{90})与 0°偏振相对于白板反射比(R_0)计算。

2 实验结果及分析

需指出的是,ASD 光谱仪 350~2 500 nm 有效波段范围由 3 个分光谱探测器构成,分别是 VNIR 350~1 000 nm、SWIR1 1 001~1 830 nm 及 SWIR2 1 831~2 500 nm、1 000 nm 和 1 830 nm 是三段光谱的连接处,有时由于仪器探测性能的影响,在连接处会出现光谱跳跃现象。本文数据根据“应以 SWIR1 波段数据为准进行连接校正”的原则,将 350~1 000 nm 及 1 831~2 500 nm 区间的结果与 1 001~1 830 nm 进行连接纠正,达到平滑连接三段光谱曲线的目的。

2.1 二向反射比随天顶角及方位角变化的波谱

由图 2(见封 2)可知,在 180°方位上,探测天顶角 50°附近对应发生镜面反射,突出一个反射比最大值;50°以下花岗岩的反射比随探测天顶角减小而降低。在 -20°~20°范围内,反射比差距极小,光谱比较稳定的 400~2 400 nm 区间其差值最大为 0.030。说明在 -20°~20°区间空间朗伯性较好。

从光谱看,天顶角较小时,光谱形态较好,不同天顶角只对光谱值的高低产生影响,而不影响其形态。30°天顶角以上,其它一些系统因素、环境因素对光谱影响增强。由于大部分光谱探测器采用参考板为参照标准计算反射比,对于较光滑的表面,如本实验所用的抛光的岩石、水面等,镜面反射光强远超出参考板所反射光强,甚至超出仪器响应,为探测带来很大不确定性。镜面反射比太高也使反射光谱中地物自身特性信息所占比例降低。因此,传统遥感一般选择避开镜面反射峰所在的方位。

由图 3(见封 2)可以看出,50°天顶角处花岗岩的反射比在探测方位角 180°时为最大;探测方位离 180°越远,反射比越低,210°以后下降非常缓慢,近乎相等,但光谱形态较好。

2.2 偏振度随天顶角及方位角变化的波谱

由图 4(见封 2)可以看出,方位角 180°时,50°天顶角对应发生镜面反射。50°以下偏振度随天顶角降低而减小。10°天顶角以下偏振度趋于 0,因此传统遥感中一般采用垂直向下探测地表,认为水平均匀地表的偏振度常小于 20%^[9,10],通常忽略偏振的影响。就偏振度的光谱形态而言,天顶角越小时,整个波谱的偏振度均趋于 0,信噪比低,几乎不反映地物的自身信息。50°时偏振度光谱变化很小,其光谱均值在 350~2 500 nm 区间为 0.847,最大值 0.873,

最小值 0.827, 差异为 0.046, 可见 50° 时由于强烈的镜面反射作用, 偏振波谱蕴涵的地物自身特性信息也较少, 同样不适宜于地物遥感。偏振遥感对光滑地物表面也应避开镜面反射角度。

由图 5(见封 2)可以看出, 50° 天顶角时偏振度随方位角的增大而降低, 到 220° 附近时已趋近于 0。 180° 方位角时由于镜面反射的作用偏振度最大, 而由于表面粗糙度及探测视场不能达到理想无限小等影响因素, 180° 方位角附近 10° 范围内偏振度均很高, 比较集中。偏振度越低时信噪比越低, 光谱形态趋于平缓, 值趋于 0。

2.3 其它角度的情况分析

以上在列举实验结果时, 仅列出了典型天顶角 50° 及典型方位角 180° 的测量结果。实验中对前向散射范围内其它方位角和其他天顶角也进行了测量, 发现其它天顶角 10° 以下时不同方位角的反射比差异较小; 偏振度信噪比低, 趋近于 0, 其它能明显区分的天顶角所表现的随不同方位角变化的规律是一致的。 210° 方位角以上时反射比几乎无变化, 偏振度趋于 0。其它能明显区分的方位角所表现的随不同天顶角变化的规律与 180° 方位角相同。

理论上方位角 $180^\circ \sim 270^\circ$ 与 $180^\circ \sim 90^\circ$ 两侧区间以 180° 镜面反射方位为中心对应角度一定时反射光强相同, $0^\circ \sim 90^\circ$ 与 $360^\circ \sim 270^\circ$ 两侧以光源入射方位 (0° 或 360°) 为中心对应角度一定时反射光强相等。由于观测平台在 0° 左右很大范围内均有遮挡, 因此本实验只测量了 $180^\circ \sim 270^\circ$ 一侧的反射光强。实际探测时由于地物对象为岩石, 是由各种矿物组成的混杂体, 在本实验探测所涉及的尺度上并不是严格均匀的, 因此两侧探测光强存在一些差异, 但随方位角及天顶角变化的规律一致。

3 反射比与偏振度的波谱关系

对比反射比与偏振度的波谱结果, 发现方位角一定时, 50° 天顶角发生镜面反射值最高, 50° 以下天顶角都满足随天顶角减小而降低的规律; 天顶角一定时, 除 180° 方位角发生镜面反射值最高外, 其它方位角在前向散射范围内都满足离 180° 越远值越低的规律。

仔细观察反射比与偏振度的波谱, 可发现反射比是波峰处, 偏振度一般对应波谷; 反射比是波谷, 偏振度一般对应波峰。这可以由偏振度的基本定义来解释。自然光照射到电介质表面, 被物体表面反射及折射, 一般变成了部分偏振光。偏振度的基本

定义是部分偏振光的总强度 ($I_{\text{总}}$) 中完全偏振光 (I_p) 所占的比例。即:

$$DOP = I_p / I_{\text{总}} \quad (3)$$

式中: $I_{\text{总}}$ 为传统方法所测量的光强。因此偏振度与传统光强反射比有一定的反比关系。但是由于 I_p 随波长、测量角度而变化以及受系统测量误差的影响, 因此其波谱表现的反比关系并不恒定。

4 结论与讨论

(1) 传统遥感测量的二向反射比与偏振遥感测量的偏振度的波谱在前向散射范围内随探测天顶角与探测方位角的变化规律一致。对于表面抛光的岩石, 传统遥感测量二向反射比时, 其适宜探测的天顶角为小角度, 方位角应避开镜面反射峰方位; 测量偏振度时, 其适宜探测的天顶角为大角度, 但天顶角、方位角也应避开镜面反射高峰对应角度。镜面反射峰的出现及高低由表面粗糙度的大小决定。本文中 50° 天顶角、 180° 方位角对应的位置是发生镜面反射处(抛光的岩石表面), 其反射比最高, 偏振度也最大, 未抛光的岩石在该处则观测不到异常高反射峰。同时该抛光的岩石表面在镜面反射对应角度附近一定范围内峰值也很高, 说明抛光的岩石表面其微观起伏若以光波长为单位衡量尚显粗糙, 其典型的散射特征是准镜反射、漫反射^[11]。

(2) 双向反射比波谱在波峰处, 偏振度波谱一般对应波谷; 反射比波谱在波谷处, 一般偏振度波谱对应波峰; 其反比关系并不恒定。从文中的测量结果也可看出, 由于偏振测量使用了偏振检偏器件, 透过的光强减少, 使得在小天顶角或相对于 180° 方位较远方方位角探测时, 仪器噪声较大。因此偏振遥感对仪器的光谱响应及信噪比要求很高。但是偏振度在大天顶角或小方位探测时, 相对于值较低的无偏反射比能得到很高的偏振度数值, 这也是偏振遥感探测低反射比目标的一项优势。

参考文献:

- [1] NICODEMUS F E, RICHMOND J C, HSIA J J, et al. Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance[R]. National Bureau of Standards, 1977.
- [2] 谢鸣, 徐辉, 邹勇, 等. 花岗岩表面双向反射分布函数实验研究[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(4): 683-685.
- [3] 晏磊, 相云, 李宇波, 等. 偏振遥感研究进展[J]. 大气与环境光学学报, 2010, 5(3): 162-174.
- [4] 赵虎, 晏磊, 赵云升. 花岗岩的多角度偏振反射光谱研究[J]. 矿物岩石, 2004, 24(2): 9-13.
- [5] 赵乃卓, 赵云升, 晏磊, 等. 花岗岩表面二向性镜面反射分量和

- 漫反射分量的比较研究[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(4): 284—288.
- [6] 金锡峰, 乔德林, 周素香. 漫反射体三维空间光分布的测量装置 CN96239489. 0[P]. 1998—03—04.
- [7] SANDMEIER S, SANDMEIER W, ITTEN K I, et al. The Swiss Field-Goniometer System (FIGOS); International Geoscience and Remote Sensing symposium, 1995. IGARSS'95. 'Quantitative Remote Sensing for Science and Applications'[Z]. 1995, 3: 2078—2081.
- [8] 叶玉堂, 饶建珍, 肖峻, 等. 光学教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [9] ZHAO H Y, ZHAO H, YAN L, et al. Model of reflection spectra of rock surface in 2π space[J]. ACTA Geologica Sinica, 2004, 78(3): 843—847.
- [10] 吴太夏, 晏磊, 相云, 等. 垂直观测时水平粗糙地表偏振反射作用研究[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(2): 151—155.
- [11] 郑小兵. 随机表面光散射的数值分析[D]. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 1998.

Spectral Relationship between Bidirectional Reflectance and Degree of Polarization of Polished Granite

XIANG Yun^{1,2}, YAN Lei¹, ZHAO Yun-sheng³, CHEN Wei¹

(1. Beijing Key Lab of Spatial Information Integration & Its Applications, Peking University, Beijing 100871;

2. Hebei Meteorological Institute & Hebei Eco-environmental Monitoring Laboratory, Shijiazhuang 050021;

3. College of Urban and Environmental Science, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

Abstract: The Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) is used in modern optical engineering to characterize the spectral and geometrical scatter of materials, which is measured popularly on a certain wavelength in microwave band or with laser. Polarization occurs when light is reflected and scattered by surface which contains object characteristics. Bidirectional reflectance and Degree of Polarization (DOP) of polished granite were measured in the reflective solar band between 350 nm and 2 500 nm at 50° incident over a range of scatter angles from about 0° to 50° zenith and from 180° to about 230° azimuth every 10°. It is shown that both bidirectional reflectance and DOP increases with the increase of zenith from 0° to 50° at the certain azimuth angle 180° and decreases when farther away from the specular reflection azimuth (180° azimuth angle) in the forward scatter region at the certain zenith angle 50°. Bidirectional reflectance and DOP are inverse shown in both spectra to some extent, i. e. peak on one spectrum corresponding to valley on the other.

Key words: polished granite; bidirectional reflectance; Degree of Polarization

(上接第 24 页)

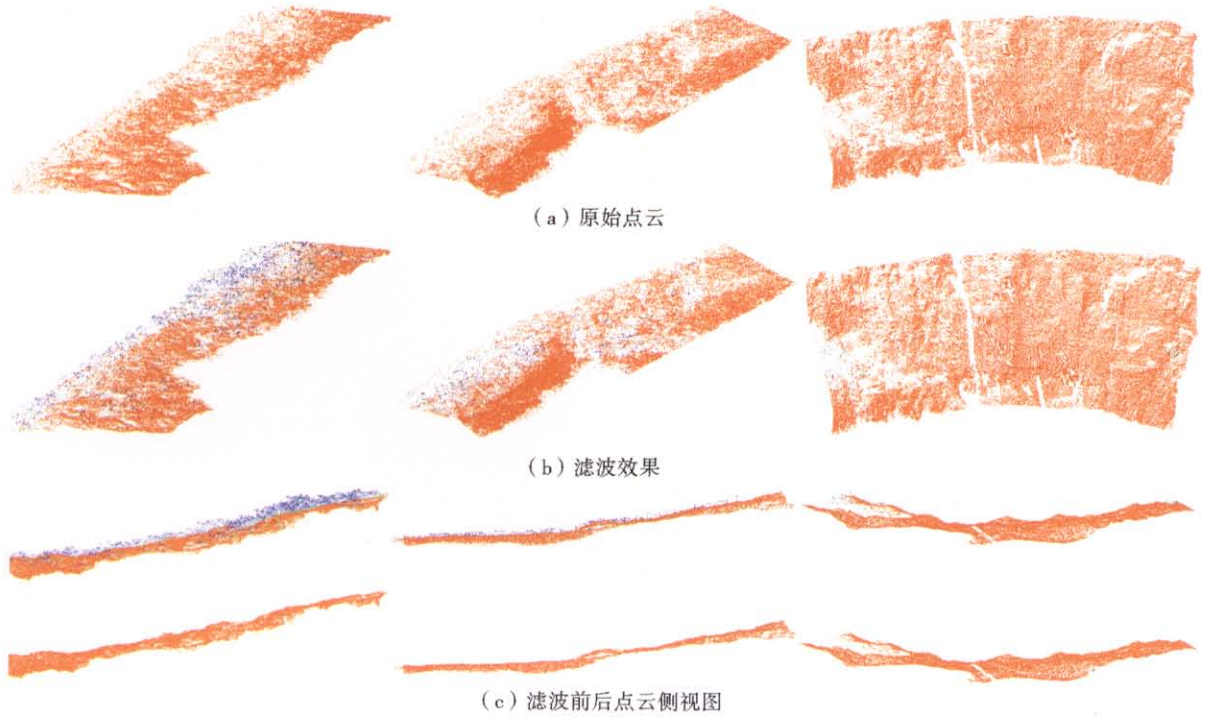
Normalization of Digital Satellite Image Histogram Based on Unchanged Pixels

WANG Yu-ming, LI Chong-wei, MAO Jian, HU Miao

(College of Urban & Environment Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300384, China)

Abstract: Normalization of histogram is often required in image preprocessing stage such as multi temporal remote sensing image matching and land-use change detection. The normalization can also minimize different imaging condition effects in analysis and rectify radiometric differences derived from solar/sensors location, atmospheric effects between adjacent images in such a way as if they have been acquired at the same imaging conditions. Relative radiometric normalization which is normally applied in image preprocessing stage does not remove all unwanted effects. In this paper, a method has been developed based on regression applied on unchanged pixels. The proposed method is based on efficient selection of unchanged pixels through image difference histogram modeling using available spectral bands and calculation of relevant coefficients for dark, gray and bright pixels in each band. The coefficients are applied to produce the normalized image. The idea has been implemented on two TM image datasets. The capability of the approach in taking in to account the imaging condition differences and effectively excluding real land change pixels from the normalization process has shown better performance in the evaluation stage.

Key words: unchanged pixels; remote sensing; digital images; normalization of histogram



注: 蓝色点为粗滤波得到的明显非地形点, 绿色点为精滤波得到的不明显非地形点。

图 2 陡坡点云滤波效果

Fig. 2 Result of filtering dense LiDAR point cloud with steep slope

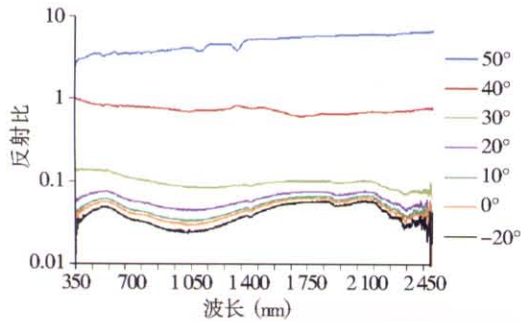


图 2 $\theta_i = 50^\circ, \varphi_r = 180^\circ$, 不同天顶角 θ_r 测量得到的反射比
Fig. 2 Bidirectional reflectance at different scatter zenith with $\theta_i = 50^\circ, \varphi_r = 180^\circ$

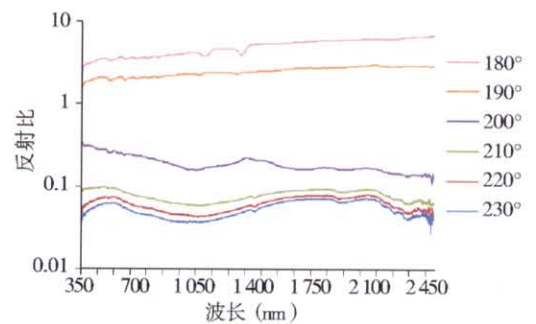


图 3 $\theta_i = 50^\circ, \theta_r = 50^\circ$, 不同方位角 φ_r 测量得到的反射比
Fig. 3 Bidirectional reflectance at different scatter azimuth with $\theta_i = 50^\circ, \theta_r = 50^\circ$

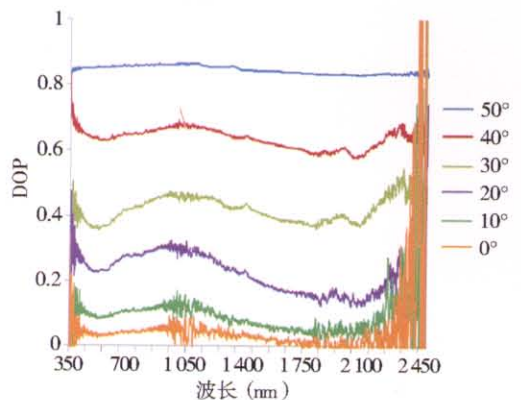


图 4 $\theta_i = 50^\circ, \varphi_r = 180^\circ$, 不同天顶角 θ_r 测量的偏振度
Fig. 4 DOP at different scatter zenith with $\theta_i = 50^\circ, \varphi_r = 180^\circ$

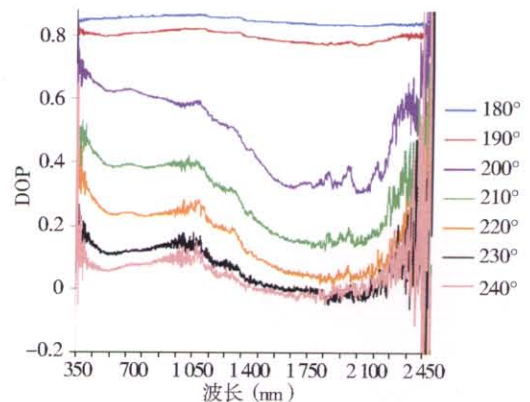


图 5 $\theta_i = 50^\circ, \theta_r = 50^\circ$, 不同方位角 φ_r 测量的偏振度
Fig. 5 DOP at different scatter azimuth with $\theta_i = 50^\circ, \theta_r = 50^\circ$