## 表面粗糙度对黑云斜长片麻岩不同探测角偏振度波谱影响研究

相  $云^{1,2}$ ,晏  $磊^{1*}$ ,赵云升<sup>3</sup>,勾志阳<sup>1</sup>,陈 伟<sup>1</sup>

- 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,河北省气象与生态环境重点实验室,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

关键词 岩石;表面粗糙度;偏振度;探测天顶角;探测方位角

中图分类号: TP701 文献标识码: A DOI: 10. 3964/j. issn 1000-0593(2011)12-3423-06

## 引言

偏振是相伴多角度探测而生的,是光的一种基本属性。偏振反射中蕴含了地物的自身特性信息,作为一种新的遥感信息源逐渐获得了大家的关注。偏振遥感在国内起步较晚,但近年来发展很快[1]。赵云升[2-4]、杨之文[3]等经过测量大量自然及人工地物目标,发现偏振反射比与探测几何,探测波长位置,偏振角度及地物自身的物理化学特性如化学组成、表面粗糙度、纹理等关系密切。已有研究对入射不受组成、表面粗糙度、纹理等关系密切。已有研究对入射天顶角[6-7]、探测方位、密度等因素的影响进行了分析。赵虎研究[8]指出岩石表面反射能量在水平方向分布呈椭圆形,认为主要是由于岩石表面镜面反射和漫反射的共同作用。赵乃卓写对岩石表面镜面反射和漫反射进行定量研究表明,光线入射天顶角会对两种反射起到一定的影响,且影响的强弱与岩石表面光滑程度和相对探测方位角相关。

本研究以装饰市场上常见的"万年青石"为例,探讨了表面粗糙度因素对不同探测天顶角及方位角岩石偏振度探测的

影响,并进行了定量分析。

## 1 实验样本及测量方法

#### 1.1 实验样本及测量

岩石经研磨所能达到的光滑程度与自身构成斑晶的硬度有关。为了研磨后的表面粗糙度尽量均匀一致,且抛光后光洁度高,要求样本质地较均匀、坚硬。最后选取的实验样本采自河北省石家庄市灵寿县岔头镇牌房村中山,地质上为黑云斜长片麻岩,当地称为"万年青石"。该岩石为深绿色,结构均匀、质地坚硬、抛光后光洁度极高,是装饰市场上常见的一种岩石,但经常被装饰市场称为花岗岩的一种。作者在文献[10]中也将其称为"花岗岩"。将一块岩石样本切割为薄板,再分为 5 块。分别用粒度  $120^{\sharp}$  (粒径  $125\sim100~\mu\mathrm{m}$ )、 $240^{\sharp}$  (粒径  $63\sim50~\mu\mathrm{m}$ )、W40(粒径  $40\sim28~\mu\mathrm{m}$ )、W28(粒径  $28\sim20~\mu\mathrm{m}$ ) 金刚砂研磨。剩余一块样本进行抛光处理。分别编号为 h1,h2,h3,h4 和 h5。光谱测量完成后利用针描法表面粗糙度仪测量表面粗糙度,每块岩石表面选取 7 个测量

收稿日期: 2010-11-14, 修订日期: 2011-05-08

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

作者简介:相 云,女,1975年生,河北省气象局工程师 e-mail: yunvee@sina.com

\*通讯联系人 e-mail: lyan@pku. edu. cn

点,每点测量 10 次,再进行平均,最终得到的表面粗糙度评定参数——轮廓算术平均差  $R_a$  为  $h1:4.08~\mu m$ , $h2:2.91~\mu m$ , $h3:1.47~\mu m$ , $h4:0.86~\mu m$ , $h5:0.33~\mu m$ 。

以上的表面粗糙度是依据其本身的几何参数给出的。表观粗糙度判断表面是"光滑"还是"粗糙"的,大家提出的标准并不唯一。下面是一种表面粗糙度的划分标准:光滑表面  $\left(h < \frac{\lambda}{25\cos\theta}\right)$ ; 中等粗糙表面  $\left(\frac{\lambda}{25\cos\theta} < h < \frac{\lambda}{8\cos\theta}\right)$ ; 粗糙表面  $\left(h > \frac{\lambda}{8\cos\theta}\right)$ 。 (h 表示表面上两点的相对高度, $\lambda$  为入射光波长, $\theta$  为入射角度)[11] 上面的判据标准可以用本研究测量的 R。来代替 h,对于本文所使用的天顶角  $50^\circ$ 及实验波段  $350 \sim 2~500~\mathrm{nm}$ ,经过比对,h5 在  $350~\mathrm{nm}$  起的部分波段可以算做中等粗糙表面,其余 4 块岩石是粗糙表面。

多角度光谱测量依托室内多角度测量装置完成,测量装置及方法、测量几何详细说明、偏振度计算公式可详见文献 [10]中的相关介绍。装置探测端搭配 ASD FieldSpec 3 光谱仪。探测端在光谱仪光纤镜头前配备偏振棱镜。不使用偏振棱镜时可测定多角度无偏光谱,使用偏振棱镜时可测量不同偏振态的光谱。测量几何定义如下图所示。探测方位角为与光源所在方位的相对方位,因此  $180^{\circ}$ 探测方位为镜面反射发生方位。天顶角较大时适于测量地物表面偏振[10],由此将光源入射天顶角固定设为  $50^{\circ}$ ,分别测量岩石样品在不同天顶角及方位角的偏振  $90^{\circ}$ 及  $0^{\circ}$ 反射光谱。偏振度 DOP(degree of polarization)利用样本  $90^{\circ}$ 偏振反射辐亮度相对于白板  $90^{\circ}$ 偏振反射辐亮度的反射比( $R_{90}$ ) 190 。

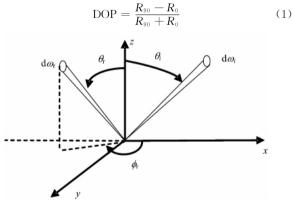


Fig. 1 Defining the BRDF geometry

 $\theta_i$ : Incident zenith;  $\theta_r$ : Scatter zenith;  $\varphi_r$ : Scatter azimuth

## 2 实验结果及分析

## 2.1 偏振度随探测天顶角及方位角变化规律

图 2 和图 3 给出了最粗糙的岩石 h1 和最光滑的 h5 在 180°测量方位角(镜面反射方位)处随不同探测天顶角偏振度的变化。从图中可以看出,粗糙岩石 h1 在探测天顶角 0°时偏振度值最低,波谱平缓,随探测天顶角增大偏振度逐渐增高,探测天顶角 60°和 70°偏振度几乎相等,达到最大值,到 80°又下降。整体波谱形态变化较小。光滑的岩石 h5 偏振度

在天顶角 0°时值最小,波谱几近于 0,信噪比低,噪声大。随探测天顶角增高偏振度增大较快,到 50°天顶角时偏振度值最高,形态为近似一条直线,光谱最大最小值之差在  $350\sim2~500~\mathrm{nm}$  区间仅为 0.046,可见因为镜面反射作用强烈导致该天顶角处偏振波谱几乎不反映地物自身特性信息。50°~80°之间偏振度又快速下降。

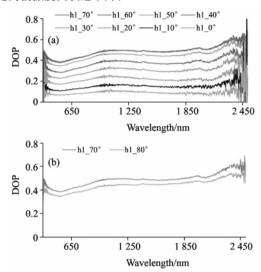


Fig. 2 DOP of rock h1for varying viewing zenith with  $\theta_i = 50^\circ$ ,  $\varphi_r = 180^\circ$ 

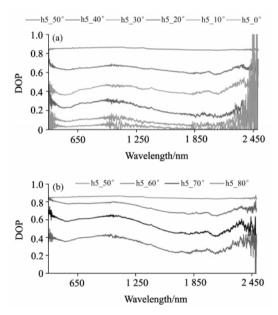


Fig. 3 DOP of rock h5 for varying viewing zenith with  $\theta_i = 50^\circ$ ,  $\varphi_r = 180^\circ$ 

其他三块岩石随探测天顶角变化的规律是一样的,0°~80°之间先是上升,到达最高值后又开始下降。但达到峰值的高低及对应的探测天顶角存在差异。

图 4 与图 5 列出了岩石 h1 与 h5 在镜面反射方位探测天顶角  $50^{\circ}$ 时偏振度随探测方位角变化的情况。岩石 h1 偏振度以  $180^{\circ}$ 方位时最大,向两侧逐渐降低,逐渐降到非常小的负

数。这主要是系统的背景误差造成的。此时光信号非常微小,信噪比差,应认为此时偏振度为 0。h5 岩石 180°方位角时由于镜面反射的作用偏振度最大,到 220°附近时已趋近于 0。此时信噪比低,光谱形态趋于平缓,值趋于 0。其他三块岩石变化的规律与 h1 和 h5 一致,即偏振度以 180°方位时最大,向两侧随探测方位离 180°越远逐渐降低,并趋于 0。

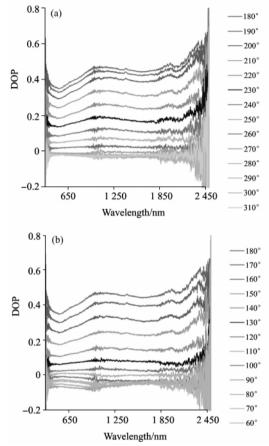


Fig. 4 DOP of rock h1 for varying viewing azimuth with  $\theta_i = 50^\circ$ ,  $\theta_r = 50^\circ$ 

(a):  $180^{\circ} \sim 310^{\circ}$ ; (b):  $180^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 

## 2.2 镜面反射方位所在的典型角度分析

图 6 给出了发生典型镜面反射的天顶角度及探测方位——50°探测天顶角、180°探测方位角——时 5 块岩石的偏振度对比情况。可以看出,h1~h5 岩石随表面粗糙度减小,偏振度也依次增高。表面粗糙度因子的影响作用非常明显。

## 2.3 表面粗糙度对不同探测天顶角偏振度的影响分析

为了定量地分析表面粗糙度与偏振度两者的关系,特选取了岩石偏振度波谱的一个特征波段 520~nm 附近。该波长附近有一个偏振度谷。因为该种岩石呈绿色,含有浅绿与深绿的斑晶。将 520~nm 附近 $\pm 10~\text{nm}$  的偏振度值进行平均,以去除测量噪声的影响。5~块岩石在该波长处的偏振度值见图 7。由图  $7~\text{可以看出岩石偏振度受表面粗糙度的影响在不同天顶角表现的一般特征。岩石越光滑如 h5,偏振度峰值越高,在 <math>0^\circ \sim 80^\circ$ 探测方位角范围偏振度形成的峰的宽带窄;岩石越粗糙如 h1,偏振度峰值越低,在测量的方位角范围内偏

振度形成的峰的宽度宽。

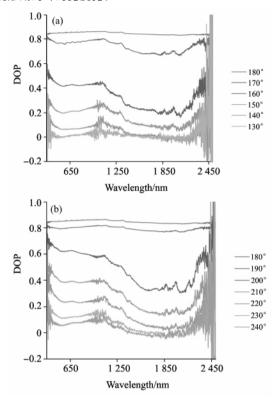


Fig 5 DOP of rock h5 for varying viewing azimuth with  $\theta_i = 50^\circ$ ,  $\theta_r = 50^\circ$  (a):  $180^\circ \sim 130^\circ$ ; (b):  $180^\circ \sim 240^\circ$ 

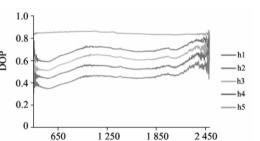


Fig 6 DOP values for h1 ~ h5 with  $\theta_i = 50^{\circ}$ ,  $\theta_r = 50^{\circ}$ , and  $\varphi_r = 180^{\circ}$ 

Wavelength/nm

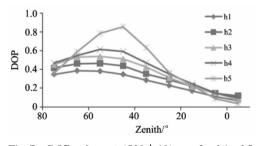


Fig 7 DOP values at  $(520\pm10)$  nm for h1~h5 with  $\theta_i = 50^\circ$  and  $\varphi_r = 180^\circ$ 

将测量的五块岩石的偏振度峰值与粗糙度进行相关分

### 析,发现他们呈幂函数关系。

#### 回归方程为

$$y = 0.604x^{-0.297} \tag{2}$$

可决系数  $R^2$  为 0.9854。对该回归模型进行 F 检验,发现偏振度峰值与粗糙度之间存在显著的相关关系。

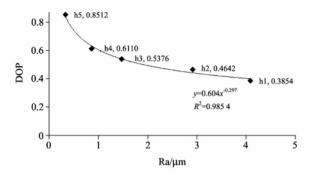


Fig 8 Relationship between peak DOP values and surface roughness of five rocks

偏振度峰值所在的角度从图 7 中可以读出, $h1 \sim h5$  依次为: $60^\circ \sim 70^\circ$ , $60^\circ$ , $60^\circ$ , $60^\circ$ 和  $50^\circ$ 。h1 的峰值为  $60^\circ$ 和  $70^\circ$ 相等,可插值为  $65^\circ$ ,其偏振度值由图 9 所示。同样测得 h4 在天顶角  $60^\circ$ 时与  $55^\circ$ 测量曲线一致,可插值为  $57.5^\circ$ 。综合评价峰值的角度精度在  $5^\circ$ 以内。

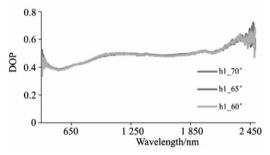


Fig. 9 DOP values of h1 for viewing zenith 60°, 65° and 70°

分析峰值所在角度与表面粗糙度的关系,表面粗糙度无限趋近于 0 时,其峰值对应角度趋近于 50°时,接近 100%镜面反射。当表面粗糙度无限大时,偏振度表现为无峰值,接近朗伯面。自然界的表面均界于朗伯面与完全镜面之间,一般表现为表面粗糙度越大,峰值对应角度越高,当然角度值需<90°。如此峰值所在角度与表面粗糙度相关模型为

$$y = 3.4194x + 51.584, y < 90^{\circ}$$
 $y = 3.4194x + 51.584, y < 90^{\circ}$ 
 $y = 3.4194x + 51.584$ 
 $x = 20.8177$ 
 $y = 3.4194x + 51.584$ 
 $x = 20.8177$ 
 $x = 3.4194x + 51.584$ 
 $x = 20.8177$ 
 $x = 3.4194x + 51.584$ 
 $x = 20.8177$ 

Fig 10 Relationship between zenith angles corresponding to peak DOP values and surface roughness of five rocks

模型可决系数  $R^2$  为 0.8177,对该回归模型进行 F 检验,发现偏振度峰值所在角度与粗糙度之间存在显著的相关关系。

### 2.4 表面粗糙度对不同探测方位角偏振度的影响分析

为了定量地分析表面粗糙度与偏振度两者的关系,同样选取岩石偏振度波谱的 520 nm 附近特征波段。将 520 nm 附近生 10 nm 的偏振度值进行平均,以去除测量噪声的影响。5块岩石在该波长处的偏振度值见图 11。由图 11 大致可以看出岩石偏振度受表面粗糙度的影响在不同方位角表现的一般特征。岩石越光滑如 h5,偏振度峰值越高,在方位角变化范围内偏振度形成的峰宽带窄;岩石越粗糙如 h1,偏振度峰值越低,在测量的方位角范围内偏振度形成的峰宽度宽。但峰的宽窄现象对于本研究的 5 块岩石来说不是很明显。可能有两个原因:一是样品制备的梯度不够大,不足以使其宽窄拉开距离;另一个原因就是如前所述,在离方位角 180°较远的区域,光微乎其微,测量值已落入系统测量误差范围,信噪比太低,导致这些区域光谱值误差较大。因此在此不对其峰的宽度进行定量分析。

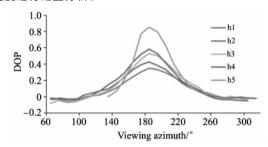


Fig 11 DOP values at  $(520\pm10)$  nm for h1~h5 with  $\theta_i = 50^\circ$  and  $\theta_r = 50^\circ$ 

将 180°方位的偏振度峰值与表面粗糙度进行相关分析, 发现他们呈幂函数关系。回归方程为

$$y = 0.582 \ 2x^{-0.333} \tag{4}$$

可决系数  $R^2$  为 0.9843。对该回归模型进行 F 检验,发现偏振度峰值与粗糙度之间存在显著的相关关系。

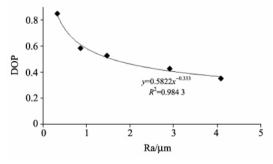


Fig 12 Relationship between azimuth angles corresponding to peak DOP values and surface roughness of five rocks

## 3 结 语

非镜向峰值现象出现的必要条件是表面粗糙度大于等于 光波波长 $(\delta/\lambda \ge 1)^{[12\cdot13]}$ 。本文测量的 5 块岩石轮廓算术平均 偏差  $R_a$  相对于研究的  $520\,$  nm 波段, $h4\sim h1$  应产生非镜向 峰值,这与已经观测到的现象符合。本研究中 50°天顶角、180°方位角对应的探测位置是发生镜面反射处,其反射比最高,偏振度也最大。说明抛光的 h5 岩石表面是比较光滑的,未抛光的岩石在该处就观测不到异常高反射峰。同时该岩石h5 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来衡量还是粗糙的。

岩石表面介于理想镜面与理想的朗伯面之间,其散射特征为镜面反射和漫反射分量的叠加。岩石表面的跨度很广,

既有接近理想镜面的,也有接近理想朗伯面的。但是同一种岩石受自身物理特性与加工条件的制约,其表面粗糙程度所能跨越的范围是有限的。后续研究中可针对表面粗糙度的范围对岩石进行有针对性的遴选,以求全面总结概括岩石表面粗糙度对偏振度测量的影响。定量研究表面粗糙度因子对偏振测量的影响,将进一步完善偏振遥感理论,对于发挥偏振遥感的作用进行岩石识别分类和矿物填图、人工建筑识别等提供了理论依据和可行性验证。

### References

- [1] YAN Lei, XIANG Yun, LI Yu-bo, et al(晏 磊,相 云,李宇波,等). Journal of Atmospheric and Environmental Optics(大气与环境光学学报), 2010, 5(3); 162.
- [2] ZHAO Yun-sheng, JIN Lun, SONG Kai-shan, et al(赵云升,金 伦,宋开山,等). Journal of Northeast Normal University Natural Science Edition(东北师范大学学报•自然科学版), 2000, 32(4): 103.
- [3] ZHAO Yun-sheng, HUANG Fang, JIN Lun, et al(赵云升, 黄 方, 金 伦, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2000, 4(2): 131.
- [4] ZHAO Yun-sheng, JIN Lun, ZHANG Hong-bo, et al(赵云升,金 伦,张洪波,等). Journal of Northeast Normal University Natural Science Edition(东北师范大学学报•自然科学版), 2000, 32(4): 93.
- [5] YANG Zhi-wen, GAO Sheng-gang, WANG Pei-gang(杨之文, 高胜钢, 王培纲). Acta Optica Sinica(光学学报), 2005, 25(2): 241.
- [6] DU Jia, ZHAO Yun-sheng, SONG Kai-shan, et al(杜 嘉,赵云升,宋开山,等). Scientia Geographica Sinica(地理科学), 2007, 27 (5); 707.
- [7] ZHAO Hu, XU Lei, MA Wei-yu(赵 虎,徐 磊,马未宇). Remote Sensing Review(遥感信息), 2008, (4): 3.
- [8] Zhao H Y, Zhao H, Yan L, et al. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(3): 843.
- [9] ZHAO Nai-zhuo, ZHAO Yun-sheng, YAN Lei, et al(赵乃卓,赵云升,晏 磊,等). J. Infrared Millim. Waves(红外与毫米波学报), 2007, 26(4): 284.
- [10] XIANG Yun, YAN Lei, ZHAO Yun-sheng, et al(相 云, 晏 磊, 赵云升, 等). Geography and Geo-Information Science(地理与地理信息科学), 2011, 27(1): 25.
- [11] XIE Ming, XU Hui, ZOU Yong, et al(谢 鸣,徐 辉,邹 勇,等). Journal of Engineering Thermophysics(工程热物理学报), 2005, 26(4): 683.
- [12] Torrance K E, Sparrow E M. Journal of the Optical Society of American, 1967, 57(9): 1105.
- [13] Ourlier C, Berginc G, Saillard J. Waves in Random Media, 2001, 11(1): 91.

# Influence of Surface Roughness on Degree of Polarization of Biotite Plagioclase Gneiss Varying with Viewing Angle

XIANG Yun<sup>1,2</sup>, YAN Lei<sup>1\*</sup>, ZHAO Yun-sheng<sup>3</sup>, GOU Zhi-yang<sup>1</sup>, CHEN Wei<sup>1</sup>

- 1. Beijing Key Lab of Spatial Information Integration & Its Applications, Peking University, Beijing 100871, China
- 2. Hebei Meteorological Institute & Hebei Key Lab of Meteorology and Eco-environment, Shijiazhuang 050021, China
- 3. College of Urban and Environmental Science, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

Abstract Polarized reflectance is influenced by such factors as its physical and chemical properties, the viewing geometry composed of light incident zenith, viewing zenith and viewing azimuth relative to light incidence, surface roughness and texture, surface density, detection wavelengths, polarization phase angle and so on. In the present paper, the influence of surface roughness on the degree of polarization (DOP) of biotite plagioclase gneiss varying with viewing angle was inquired and analyzed quantitatively. The polarized spectra were measured by ASD FS3 spectrometer on the goniometer located in Northeast Normal University. When the incident zenith angle was fixed at 50°, it was showed that on the rock surfaces with different roughness, in the specular reflection direction, the DOP spectrum within 350~2 500 nm increased to the highest value first, and then began to decline varying with viewing zenith angle from 0° to 80°. The characterized band (520±10) nm was picked out for further analysis. The correlation analysis between the peak DOP value of zenith and surface roughness showed that they are in a power function relationship, with the regression equation; y=0,  $604x^{-0.297}$ ,  $R^2=0$ , 985 4. The correlation model of the angle where the peak is in and the surface roughness is y = 3.419 4x + 51.584,  $y < 90^{\circ}$ ,  $R^2 = 0.817$  7. With the detecting azimuth farther away from 180° azimuth where the maximum DOP exists, the DOP lowers gradually and tends to 0. In the detection azimuth 180°, the correlation analysis between the peak values of DOP on the  $(520\pm10)$  nm band for five rocks and their surface roughness indicates a power function, with the regression equation being  $y=0.582\ 2x^{-0.333}$ ,  $R^2=0.984\ 3$ . F tests of the above regression models indicate that the peak value and its corresponding viewing angle correlate much with surface roughness. The study provides a theoretical base for polarization remote sensing, and impels the rock and city architecture discrimination and minerals mapping.

Keywords Rock; Surface roughness; Degree of polarization; Viewing zenith; Viewing azimuth

(Received Nov. 14, 2010; accepted May 8, 2011)

\* Corresponding author