doi: 10.6046/gtzyyg.2017.01.28

引用格式: 王喆,赵哲,闫柏琨,等. 基于 Hapke 模型混合岩矿粉末反射率光谱模拟[J]. 国土资源遥感,2017,29(1):186-191. (Wang Z,Zhao Z,Yan B K, et al. Simulation of bi-directional reflectance on mixed minerals based on Hapke photometric model[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2017,29(1):186-191.)

基于 Hapke 模型混合岩矿粉末反射率光谱模拟

王喆¹,赵哲²,闫柏琨¹,杨苏明¹

(1. 中国国土资源航空物探遥感中心,北京 100083; 2. 河北省煤田地质局,石家庄 050085)

摘要: Hapke 岩矿二向反射率光谱定量模型是研究混合矿物光谱的有利工具,而国内对该模型的基础研究较少。 通过4组室内混合矿物光谱数据来研究该模型在模拟混合矿物光谱时的准确性与存在的问题,进而探讨混合矿物 光谱的特征规律。研究表明,在模拟混合矿物光谱方面不论是各向同性,还是各向异性的 Hapke 模型均有很高的 精度,权重调整后4组各向同性模型的模拟结果均方根误差(*RMSE*)均值为0.0144,相关系数(*R*)均值为0.9947, 4组各向异性模型的模拟结果 *RMSE*均值为0.0084,*R*均值为0.9944,说明该模型是优异的混合光谱分析手段; 但模型对暗色矿物适用性较差,如当混合矿物中含有黑云母时模拟精度较低;混合矿物的光谱谱形需要针对矿物 组成进行具体分析,其中所占质量分数较高的矿物并不一定能主导混合矿物的光谱谱形,而低反射率的矿物在混 合矿物光谱中发挥的作用远大于其质量分数的比重。

关键词: Hapke 模型; 混合光谱; 反射光谱; 模拟光谱; 矿物 中图法分类号: TP 79 文献标志码: A 文章编号: 1001 - 070X(2017)01 - 0186 - 06

0 引言

可见光 - 近红外波段(0.4~2.5μm)是研究地 球表面矿物组成和含量的重要波段范围,随着高光 谱技术逐渐普及,在该波段区间可获取更加丰富的 土壤、岩石理化等信息。由于传感器空间分辨率的 限制以及自然界地物的复杂多样性,混合像元普遍 存在于遥感图像中^[1]。裸露地表也多是由不同类 型土壤和矿物等混合而成^[2]。混合矿物光谱通常 是非线性混合的,并且非常复杂^[3]。如何提升对混 合光谱的认识,研究混合矿物光谱的规律,以便更好 地分析地物光谱特征是遥感人员需要面对的问题。

作为研究混合矿物光谱的有利工具, Hapke 岩 矿二向反射率光谱模型^[4-5](简称 Hapke 模型)是 以 Chandrassekhar 辐射传输理论^[6]为基础,考虑了 多次散射和粒子相互阴影效应的用于行星表面风化 土体光散射特性研究的二向性反射模型^[7]。其主 要用途为:①通过光谱模拟作为影像标准参考光谱 或进行图像光学校正;②混合光谱解混,估算矿物 组成和丰度;③推测土体表面物理性质^[8-9]。混合 矿物二向反射率光谱模拟为 Hapke 模型的正用方 式(forward model),而后2点利用该模型进行矿物 丰度等方面的定量分析则属于逆用方式(inverse model)。虽然正用方式是逆用方式的基础,但在实 际应用中常侧重后2点的作用而忽视了该模型在模 拟混合矿物光谱方面的优势。Li 等^[10] 对月壤样品 反射率光谱开展了模拟,结果表明模拟光谱和实测 光谱相关系数优于 0.99, 均方根误差 (root mean square errors, RMSE) 最大为 0.008 49; Mustard 等[11]对月壤常见矿物的混合光谱进行模拟,结果显 示模拟光谱与真实光谱误差在 7% 以内; Cheek 等[12] 对月壤常见矿物进行两两混合测试,结果表明 模拟光谱中含有橄榄石的一组误差大于 10%。从 以上前人研究结果可以看出,虽然该模型应用范围 较广,但对模型模拟精度与可靠性的研究较少,研究 结果也存在一定分歧,且多以行星表面矿物为研究 对象^[8-10]。行星表面矿物与地表常见矿物有较大 差异,如月壤主要矿物以橄榄石、辉石、斜长石、钛铁 矿和熔融玻璃为主^[13]。

基于上述思考,本文以石英、斜长石、黑云母、辉 石、橄榄石和透闪石等地表常见矿物粉末样品为研 究对象,主要针对 Hapke 模型在模拟混合矿物光谱 方面的准确性进行研究。在实验室中通过对多组混

收稿日期: 2015-09-08;修订日期: 2015-11-03

基金项目:中国地质调查局地质调查项目"高光谱地质调查技术方法研究"(编号:12120115040801)资助。

第一作者:王 喆(1989 -),助理工程师,主要从事遥感地质应用研究。Email: wangzhe_cnbj@163.com。

通信作者: 闫柏琨(1977 -),博士,高级工程师,主要从事高光谱与遥感地质应用研究。Email: yanbokun_2006@ yahoo. com. cn。

合矿物反射率光谱进行测试,采用 Hapke 各向同性 模型(IMSA)和各向异性模型(AMSA)分别对混合 矿物光谱进行模拟及评价。从而加深对该模型参数 的理解,掌握其在模拟地表混合矿物光谱方面的优 势与不足,为混合光谱研究提供理论依据。

1 Hapke 模型

1.1 Hapke IMSA 和 AMSA 模型参数

Hapke 模型由 Hapke 于 1981 年首次提出,其原

$$r(i,e,g) = \begin{cases} \frac{\omega}{4} \frac{1}{\mu_0 + \mu} H(\mu_0) H(\mu) &, \text{ IMSA } \notin \mathbb{Z} \\ \frac{\omega}{4} \frac{1}{\mu_0 + \mu} \{ [1 + B(g)] p(g) + M(\mu_0,\mu) \} &, \text{ AMSA } \notin \mathbb{Z} \end{cases},$$
(1)

分别为

式中:*i*, *e* 和 *g* 分别表示入射光天顶角、出射光天顶 角和相位角, 如图 1 所示。



图 1 双向反射几何原理 Fig. 1 Schematic diagram of the geometry used in deriving the bi – directional reflectance

ω 表示单次散射反照率(average single – scattering albedo); $\mu_0 = \cos i$; $\mu = \cos e$; H(x) 为计算颗粒 多次散射部分的函数,在 AMSA 模型中做出了改 进,表现为更接近辐射传输方程精确解的近似表达 式,即

 $H(x) \approx [1 - \omega x (r_0 + \frac{1 - 2r_0 x}{2} \ln \frac{1 + x}{x})]^{-1}, (2)$ 式中: x 表示入射光天顶角或出射光天顶角的余弦 值; r_0 = (1 - \gamma)/(1 + \gamma), \gamma = \sqrt{1 - \omega}.

B(g)表示后向散射函数(backscatter function), 代表后向效应对光谱的作用,后向效应主要用于描述小相位角时传感器接收反射能量出现非线性增加 的现象^[16],其为后向效应宽度 h、相位角 g 以及后 向效应振幅 B_0 的函数,即

$$B(g) = B_0 / [1 + (1/h) \tan(g/2)]$$
 (3)

(g) + M(μ₀,μ) , AMSA 模型
 p(g)是单次散射相函数(phase function),用来
 描述散射能量在不同方位角的分布规律;反映了颗
 粒散射特性。依据物质表面的特性,相函数通常符
 合各向同性散射、前向散射和后向散射。其表达式
 经常采用一阶或二阶勒让德多项式或单参数、双参数
 数 Henyey - Greenstein 函数表示,本文采用二阶勒
 让德多项式拟合函数,计算公式为

始模型为各向同性多次散射近似 Hapke 模型,其多次散射部分是基于粒子表面反射各向同性的假设;

2002 年 Hapke 模型对多次散射部分采用各向异性

多次散射近似解^[14-15],考虑了颗粒各向异性对光散

射的影响,从而提高了多次散射部分的模拟精度。

但是,IMSI模型中散射相函数(p(g))为1,后向效

应函数(B(g))经常被忽略或简化,因此 IMSA 模型

公式要比 AMSA 模型公式简化许多。基于 Hapke IMSA 和 AMSA 模型矿物反射率 r(i, e, g)的表达式

$$p(g) = 1 + b\cos(g) + c\left[\frac{3}{2}\cos^2(g) - \frac{1}{2}\right]_{\circ} \quad (4)$$

M(μ₀,μ)是 AMSA 模型中新引入的计算多次散 射的函数,具体表达式参见文献[14]。

1.2 混合矿物光谱模拟与评价方法

由于 ω 表征一束光线照射到单个矿物颗粒表 面时散射能量与入射能量之比,不包含多次散射辐 射,遵循线性混合规律^[17]。求解混合矿物光谱反射 率时,需要先求解出每个矿物端元的ω,之后带入式 (5),即

$$\omega = \sum_{i=1}^{m} \left(\frac{M_i \omega_i}{\rho_i d_i} \right) / \sum_{i=1}^{m} \left(\frac{M_i}{\rho_i d_i} \right) \quad , \qquad (5)$$

式中: M_i , ω_i , ρ_i 和 d_i 分别为第 i种矿物质量分数、 单次散射反照率、密度和平均粒径; m为混合矿物 中矿物种数。

混合矿物光谱模拟结果与实测结果采用 RMSE 和相关系数(R)进行评价,用以确定模型模拟结果 的准确性。

RMSE 是用来衡量观测值同真值之间的偏差。 公式为

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1} (\hat{y}_i - y_i)^2}{n-1}} , \qquad (6)$$

式中: \hat{y}_i 为实测光谱反射率值; y_i 为模拟光谱反射

率值; n 为波段数。

R 是用以反映变量之间相关关系密切程度的统计指标。公式为

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y}) (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}} , \quad (7)$$

式中: \hat{y} 为模拟光谱 y_i 的平均值; \hat{y} 为实测光谱 \hat{y}_i 的平均值。

2 材料和实验

2.1 岩矿粉末样品准备

为了测试 Hapke 模型对混合矿物反射率光谱 模拟的准确性,针对地球表面常见矿物,选取实验室 中4组比例不同、矿物成分不同的混合样品进行测 试(表1)。4组混合矿物使用不同的矿物组合、质 量分数、粒径和矿物组成数,有利于更准确、全面客 观地评价该模型的模拟结果。

表1 各组矿物端元组成

Tab. 1 End – member minerals compositions

| 11 40 | | 氏县/ | 质量分数/ | *** 亿 / | 密度/ |
|-------------|--------------|------|-------|---------|---------------------|
| 分组 | 瑜兀伊 彻 | 庾重/g | wt % | 枢控/μn | $(g \cdot cm^{-3})$ |
| AAX 1 441 | 斜长石 | 60 | 40 | 300 | 2.67 |
| 第 1组 | 辉石 | 90 | 60 | 300 | 3.10 |
| Mt a 4H | 斜长石 | 90 | 60 | 125 | 2.67 |
| 弗 4 组 | 辉石 | 60 | 40 | 125 | 3.10 |
| | 石英 | 30 | 25 | 115 | 2.70 |
| *** ~ 111 | 辉石 | 30 | 25 | 115 | 3.10 |
| 弗 3组 | 透闪石 | 30 | 25 | 115 | 3.10 |
| | 橄榄石 | 30 | 25 | 115 | 3.30 |
| | 石英 | 60 | 50 | 160 | 2.70 |
| 第4组 | 斜长石 | 45 | 37.5 | 160 | 2.67 |
| | 黑云母 | 15 | 12.5 | 160 | 3.00 |

由式(5)可知,模型中矿物混合需要使用质量 分数计算,根据选取好的混合矿物组成,使用天平秤 对矿物颗粒质量进行精准称量,并放入器皿中充分 混合摇匀。之后装入半径为4 cm,深为2 cm 的深 色容器中,以消除容器过浅对矿物光谱波动性和离 散性的影响^[18]。最后使用直尺轻轻将样品表面刮 平,保证样品表面足够平整。

2.2 室内岩矿粉末样品二向反射率光谱测定

在实验室黑暗环境中,使用美国 ASD FieldSpec FR Pro 便携式分光辐射光谱仪对岩矿粉末二向反 射率光谱进行测量。在实验室光谱数据采集时,需 要同时测量白板和岩矿样品反射辐射。白板由硫酸 钡(BaSO₄)等材料压制或烧制而成,当观测天顶角 小于 45°时接近朗伯体,其性能稳定、表面均匀,具 有各向同性^[19]。将矿物样品水平置于光学角度自 动调整仪上(图2),25°视场角探头距样品表面垂直 距离为12 cm,50 W 卤光灯距离样品表面直线距离 为40 cm。光学角度自动调整仪可通过软件操作对 各光学角度进行精确调整,最大程度保证光源天顶 角、探头天顶角和方位角的准确性。由于本次光谱 采集不涉及多种光学角度的二向反射率问题,因此 仅设定1组角度:入射光天顶角为30°,探头天顶角 为0°。每组混合矿物光谱数据均采集5次,对5组 数据取均值以减少误差。由于光谱仪存在噪声,需 将光谱重采样至0.4~2.25 μm 之间。



图 2 光学角度自动调整仪 Fig. 2 Automatic instrument of geometry adjusted

3 结果和分析

3.1 混合矿物反射率光谱模拟结果

分别采用 Hapke IMSA 和 AMSA 模型对 4 组混 合矿物的二向反射率进行模拟。为更加直观展现混 合矿物光谱非线性混合的特性,在对比结果中加入 按照质量分数进行线性混合的模拟反射率光谱曲 线。并利用 *RMSE* 和相关系数为(*R*) 2 个指数进行 评价,误差统计结果如表 2 所示。模拟结果如图 3 所示。

| | 表 | 2 | 模扎 | 以结 | 课误差统证 | + |
|------|---|----|-----|----|------------|---------|
| Tab. | 2 | Er | ors | of | simulation | results |

| 分组 | 模型 | RMSE | R |
|-----|---------|----------|---------|
| 第1组 | IMSA | 0.007 4 | 0.985 3 |
| | AMSA | 0.002 9 | 0.983 3 |
| | 线性模拟 | 0.128 3 | 0.902 6 |
| 第2组 | IMSA | 0.014 7 | 0.9967 |
| | AMSA | 0.005 5 | 0.996 4 |
| | 线性模拟 | 0.1497 | 0.977 7 |
| | IMSA | 0.022 7 | 0.998 6 |
| 第3组 | AMSA | 0.016 6 | 0.999 6 |
| | 线性模拟 | 0.121 0 | 0.977 3 |
| | IMSA | 0.186 6 | 0.995 1 |
| | AMSA | 0.201 2 | 0.993 7 |
| 第4组 | 线性模拟 | 0.3608 · | 0.642 2 |
| | IMSA 调整 | 0.012 9 | 0.998 2 |
| | AMSA 调整 | 0.008 7 | 0.998 2 |



从表2和图3中可以看出,与线性混合模拟结 果相此、IMSA 与 AMSA 模型在4 组模拟结果中均具 有较高的精度。其中,前3组 IMSA 模型模拟结果 的 RMSE 和 R 均值分别为 0.014 9 和 0.993 5,前 3 细 AMSA 模型模拟结果的 RMSE 和 R 均值分别为 0.008.3和0.993 1,模拟精度极高。而第4 组模拟 精度明显低于前3组数据,主要原因在于混合矿物 中加入了黑云母,而 Hapke 模型中 ω 仅对透明矿物 (折射系数虚部 k <<1)适用性良好^[20],因此混合矿 物中含有暗色矿物会降低模拟精度、黑云母是片状 矿物也可能是导致误差较大的原因之一。但研究中 发现只需调整黑云母在式(5)中的权重值,即可提 升模型模拟的精度,可见模型低估了不透明矿物的 作用。黑云母权重调整后 IMSA 和AMSA模型 RMSE 和 R 均值分别为 0.010 8 和 0.998 2, 模拟精度较之前 有了很大提升。通过以上结果可知:: ①虽然 Hapke AMSA 模型比 IMSA 模型复杂很多, 但在模拟单一 角度混合矿物反射率光谱时,2 种模型模拟结果差 异很小,选择 IMSA 模型可大大简化计算量。但应 注意到,当涉及到多种角度的二向反射率模拟时, AMSA 模型的模拟精度会更高; ②Hapke 模型对黑 云母(不透明矿物)的模拟结果并不理想,后续研究 应着重解决此问题以提升模型对暗色矿物的模拟精 度; ③Hapke 模型在模拟混合矿物反射率光谱方面 准确性非常高,其模拟结果具有很高的参考价值。

3.2 混合矿物反射率光谱特征分析

以第1 细和第2 组混合矿物为例(表1),第1 组混合矿物中斜长石为40 wt%,辉石为60 wt%,第 2 组混合矿物中斜长石提升为60 wt%,辉石降低为 40 wt%。纵图4 中可以看出,不论斜长石质量分数 为40 wt%或60 wt%,混合矿物反射率光谱都与辉 石谱形极为相似,只是混合矿物反射率略高于辉石 反射率,仿佛斜长石并没有在混合矿物光谱中发挥 作用似的。





从图 4 中可知,斜长石在 1.9 μm 和 2.2 μm 处 均有非常明显的吸收特征,但在实测的混合光谱中 并没有明显的体现。人们主观判断混合矿物光谱往 往与线性混合结果非常相似,常常认为由于斜长石 在1.9 μm 和2.2 μm 有吸收特征,在混合光谱中也 一定会有明显的吸收特征,但图4真实混合光谱与 线性混合光谱存在着很大差异。斜长石与辉石在 1.4 μm 处均有显著吸收特征,混合光谱在该波段处 并没有因为2种矿物均有吸收而有所加强。以上结 果表明:①混合矿物的光谱是非线性的,简单以质 量分数进行线性混合的结果与真实反射率差异很 大,不能用惯性的线性思维去思考; ②某一矿物在 某一波段有强烈吸收,并不一定会对混合矿物光谱 造成吸收特征;③多种矿物在某一波段均有明显吸 收特征,并不表示混合矿物光谱在此处吸收特征会 增强,至于是哪种矿物主导该处的吸收或反射特征, 需要进行深入分析;④在混合矿物光谱中,质量分 数占有较高权重的矿物并不一定能主导混合矿物的 光谱谱形,应针对混合矿物组成、含量等进行具体分 析; ⑤混合矿物中低反射率的矿物所发挥的作用远 大于其质量分数的比重,具体原因仍有待深入研究。

4 结论

针对地表常见矿物,在实验室内对4组混合矿物二向反射率光谱进行测定,采用 Hapke 模型对混合矿物反射率光谱进行模拟,通过均方根误差 RMSE 和相关系数 R 对模拟结果进行评价,得出以下结论:

1) Hapke 模型在模拟混合矿物反射率光谱方面 具有很高的精度,虽然 AMSA 模型模拟准确性略高 于 IMSA 模型,但采用 IMSA 模型可简化计算量,提 升计算效率。

2)当混合矿物中含有黑云母时,模型模拟精度 较低,表明该模型对暗色矿物适用性较差。

3)混合矿物反射率光谱是非线性混合的,光谱的吸收谷与反射峰位置需要针对矿物组成和含量进行具体分析,质量分数所占较高的矿物并不一定能 主导混合矿物的光谱谱形,低反射率的矿物在混合 矿物光谱中所发挥的作用大于其质量分数的比重。

本文对 Hapke 模型在模拟混合矿物反射率光 谱方面进行了初步研究,但实验中仍存在一些不足, 如仪器噪声、模拟的矿物种类较少、仅有黑云母一种 低反射率片状矿物等。未来研究将进一步改进模 型,以提升其在模拟含有黑云母等暗色矿物的混合 矿物光谱时的准确性。

参考文献(References):

- [1] 代晶晶,李庆亭. 基于 Hapke 和 Shkuratov 模型的斑岩铜矿蚀变 带混合波谱研究[J]. 地质与勘探,2013,49(3):505 - 510.
 Dai J J,Li Q T. Study on mixed spectra of alteration zones in porphyry copper deposits based on the Hapke and Shkuratov models
 [J]. Geology and Exploration,2013,49(3):505 - 510.
- Foody G M, Cox D P. Sub pixel land cover composition estimation using a linear mixture model and fuzzy membership functions[J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(3):619-631.
- [3] Clark R N, Swayze G A, Livo K E, et al. Imaging spectroscopy: Earth and planetary remote sensing with the USGS Tetracorder and expert systems [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108 (E12):5131.
- [4] Hapke B. Bidirectional reflectance spectroscopy: 1. Theory [J].
 Journal of Geophysical Research, 1981, 86(B4): 3039 3054.
- [5] Hapke B, Wells E. Bidirectional reflectance spectroscopy:2. Experiments and observations [J]. Journal of Geophysical Research, 1981,86(B4):3055-3060.
- [6] Chandrasekhar S. Radiative Transfer[M]. New York: Dover Publications, 1960.
- [7] 徐元柳.基于裸露地表辐射传输模型的粗糙度反演与地形校正[D].北京:中国地质大学(北京),2009.
 Xu Y L. Roughness Retrieval and Topographic Correction Based on Bare Surface Radiative Transfer Model[D]. Beijing:China University of Geosciences(Beijing),2009.
- [8] Shepard M K, Helfenstein P. A test of the Hapke photometric model[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(E3): E03001.
- [9] Ciarniello M, Capaccioni F, Filacchione G, et al. Hapke modeling of Rhea surface properties through Cassini - VIMS spectra[J]. Icarus, 2011, 214(2):541 - 555.
- [10] Li S, Li L. Radiative transfer modeling for quantifying lunar surface minerals, particle size, and submicroscopic metallic Fe[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116(E9): E09001.
- [11] Mustard J F, Pieters C M. Photometric phase functions of common geologic minerals and applications to quantitative analysis of mineral mixture reflectance spectra [J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94 (B10); 13619 - 13634.
- [12] Cheek L C, Pieters C M. Reflectance spectroscopy of plagioclase dominated mineral mixtures: Implications for characterizing lunar anorthosites remotely [J]. American Mineralogist, 2014, 99 (10): 1871 – 1892.
- [13] Papike J J, Simon S B, Laul J C. The lunar regolith: Chemistry, mineralogy, and petrology [J]. Reviews of Geophysics, 1982, 20 (4):761-826.
- [14] Hapke B. Bidirectional reflectance spectroscopy; 5. The coherent backscatter opposition effect and anisotropic scattering[J]. Icarus, 2002,157(2):523-534.
- [15] Hapke B. Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy [M]. New York: Cambridge University Press, 2005.
- [16] 陈 明. 基于分形理论的岩矿光谱模型研究[D]. 武汉:华中科技大学,2010.
 Chen M. Study on the Spectral Model of Rocks and Minerals Based on Fractal[D]. Wuhan; Huazhong University of Science and Tech-

nology,2010.

[17] 闫柏琨,李建忠,甘甫平,等. 一种月壤主要矿物组分含量反演的光谱解混方法[J]. 光谱学与光谱分析,2012,32(12):3335-3340.

Yan B K, Li J Z, Gan F P, et al. A spectral unmixing method of estimating main minerals abundance of lunar soils [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(12); 3335 - 3340.

- [18] 程街亮,史 舟,李洪义.不同类型土壤的二向反射光谱特性及 模拟[J].光谱学与光谱分析,2008,28(5):1007-1011.
 Cheng J L,Shi Z,Li H Y. Observation and simulation of bi - directional spectral reflectance on different type of soils[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2008,28(5):1007-1011.
- [19] 田 丰. 全波段(0.35~25μm)高光谱遥感矿物识别和定量化 反演技术研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2010.
 Tian F. Identification and Quantitative Retrival of Minerals Information Integrating VIS - NIR - MIR - TIR(0.35~25μm) Hyspectral Data[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing),2010.
- [20] Lemelin M, Morisset C E, Germain M, et al. Ilmenite mapping of the lunar regolith over mare australe and mare ingenii regions: An optimized multisource approach based on Hapke radiative transfer theory[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2013, 118 (2):2582-2593.

Simulation of bi – directional reflectance on mixed minerals based on Hapke photometric model

WANG Zhe¹, ZHAO Zhe², YAN Bokun¹, YANG Suming¹

China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China;
 Hebei Bureau of Coal Geological Exploration, Shijiazhuang 050085, China)

Abstract: Hapke photometric model is a useful tool for studying the spectra of mixed minerals. However, there are still some improvable things, and domestic research still lags far behind that of foreign countries. This paper focuses on the characteristics of surface minerals through 4 groups of spectroscopic tests in laboratory, and then discusses and points out the accuracy of the Hapke photometric model when simulating the spectra of mixed minerals. The mean of root mean square errors (RMSE) of the 4 groups by using IMSA model is 0.014 4, and the mean of correlation coefficients (R) is 0.994 7. The mean of RMSE of the 4 groups by using AMSA model is 0.008 4, and the mean of R is 0.994 4. These data suggest that IMSA model and AMSA model have a very high precision and can be a good means to simulate spectral mixture of mixed minerals. Nevertheless, the experiment results show that, when the mixed minerals contain biotite, the accuracy is not satisfactory, but the accuracy of simulation can be improved by adjusting the weight of biotite. Spectral shape of mixed minerals needs a specific analysis of compositions of the mixed mineral, for instance, a particular mineral which possesses a higher mass fraction in the mixed minerals may not play the leading role in the spectral shape, while the mineral of low reflectivity may play a more important role.

Keywords: Hapke model; mixed spectra; reflectance spectra; simulation spectra; mineral

(责任编辑:陈理)