

基于 Hapke 和 Shkuratov 模型的 斑岩铜矿蚀变带混合波谱研究

代晶晶^{1,2}, 李庆亭³

(1. 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 中国科学院对地观测与科学中心, 北京 100094)

[摘要] 矿物光谱混合模型研究对于蚀变带蚀变矿物的信息提取具有重要意义。本文基于目前两种主流的非线性光谱混合模型 Hapke 和 Shkuratov 模型, 通过对两者特性的对比分析, 提出了一种综合利用这两种模型进行矿物或岩石光谱混合模拟的思路, 并针对斑岩型铜矿典型蚀变分带现象, 进行钾化带、绢英岩化带、泥化带、青磐岩化带等典型蚀变带矿物组合光谱的模拟实验。本研究提取结果可以为斑岩铜矿蚀变带研究提供理论依据。

[关键词] Hapke 模型 Shkuratov 模型 斑岩铜矿 蚀变带 混合波谱

[中图分类号] TP79 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2013)03-0505-6

Dai Jing-jing, Li Qing-ting. 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.

高光谱岩矿信息的探测和识别是高光谱遥感最能发挥其优势且最成功的应用领域之一。由于传感器的空间分辨力限制, 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, 即使裸露的地表(无植被或少植被覆盖)也是不同类型土壤、矿物等的混合光谱(Gillespie, 1992; Foody, 1994)。岩石的光谱表现远比矿物复杂, 岩石的光谱本质上是矿物的混合光谱, 并受其结构、构造和表面形态等因素的影响, 因而矿物光谱的混合问题成为制约高光谱岩矿信息提取精度的重要因素之一。光谱混合模型研究主要针对不同端元, 通过建立相应的模型, 模拟不同端元组合、不同比例混合状态下的光谱效应。利用矿物混合模型的矿物组合光谱模拟模型, 在矿物光谱库的基础上模拟, 得到矿物组合的混合光谱, 进而提取其光谱的精细特征, 成为高光谱遥感地质应用中的前沿和热点问题。前人研究表明, 矿物光谱的混合效应是非线性的, 为描述这种非线性混合, 之前的学者提出了很多算法和模型, 其中 Hapke 和 Shkuratov 光谱混合模型是两种目前主要的非线性

模型(童庆禧等, 2006)。斑岩型铜矿床是世界上重要的铜矿成矿类型, 占世界铜资源储量的一半以上, 斑岩铜矿系统的热液蚀变和蚀变矿物组合分带已经得到较为成熟的研究。本文利用 Hapke 和 Shkuratov 光谱混合模型, 通过对斑岩铜矿典型蚀变带矿物混合波谱的模拟, 建立了典型蚀变带的矿物组合波谱信息, 这为斑岩铜矿蚀变带的光谱模拟建立了理论基础, 同时为此类矿床蚀变信息提取的研究提供了理论依据, 可服务于蚀变矿物组合及分带信息的高光谱遥感直接提取, 将会对提高遥感岩矿信息的识别能力和地质应用水平起到重要作用。

1 混合模型简介

针对岩矿混合模型研究, 端元主要指的是不同的矿物。目前光谱混合模型包括线性光谱混合模型和非线性混合模型。矿物和岩石的光谱混合是非线性的, 而非线性光谱模型主要包括 Hapke 和 Shkuratov 光谱混合模型。

1.1 Hapke 混合光谱理论

密切混合体系的反射率是非线性混合的, 混合

[收稿日期] 2012-08-24; [修订日期] 2012-12-28; [责任编辑] 郝情情。

[基金项目] 国家科技支撑计划重点项目(编号 2006BAB01A05), 中国地质调查工作项目(编号 212010818097), 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金资助项目(编号 K1011)联合资助。

[第一作者] 代晶晶(1982年-), 女, 2007年毕业于中国科学院遥感应用研究所, 获硕士学位, 在读博士, 助研, 现主要从事遥感地质研究工作。E-mail: daijingjing863@sina.com。

物的平均单次散射反照率 w 为各端元组分单次散射反照率的线性结合,有:

$$w = \left(\sum_i \frac{M_i}{\rho_i D_i} \omega_i \right) \left(\sum_i \frac{M_i}{\rho_i D_i} \right)^{-1} \quad (1)$$

其中, M_i 、 ρ_i 、 D_i 、 ω_i 分别为混合物中第 i 种成分的质量分数、颗粒密度、平均有效颗粒大小及单次散射反照率(吴昀昭等,2010;柳丹等,2011)。

在原模型中(Hapke,2005;2008),单次散射反照率被精确的计算,在各向同性多次散射的近似模型中,光线入射天顶角 i ,出射天顶角 e ,相位角为 g 时,平坦半无限颗粒介质的双向反射率 r 为:

$$r(i, e, g) = \frac{w}{4\pi\mu_0 + \mu} \{ [1 + B(g)]P(g) + H(\mu_0)H(\mu) - 1 \} \quad (2)$$

$$H(x) \approx \left[1 - wx \left(r_0 + \frac{1 - 2r_0x}{2} \ln \frac{1+x}{x} \right) \right]^{-1},$$

$$r_0 = \frac{1 - \sqrt{1-w}}{1 + \sqrt{1-w}} \quad (3)$$

其中, w 为单次散射反照率, $r_0 = (1-r)/(1+r)$, x 为光线入射角, μ_0 和 μ 分别为入射角和出射角的余弦, B 为反向效应, P 为粒子散射相函数, H 为多次散射相贡献。许多研究表明,当相角 $> 20^\circ$ 时,反向效应可以忽略。当粒子远大于入射光波长并且随机方位分布时,可以假定表面一级散射是各向同性的,即 $P=1$,基于此,式(2)可以简化为:

$$r(i, e, g) = \frac{w}{4\pi\mu_0 + \mu} H(\mu_0)H(\mu) \quad (4)$$

从上面公式中可以看出,对于 Hapke 光谱理论,反射率光谱混合是非线性的,而矿物的单散射反照率是线性混合的,因此可以利用 Hapke 理论定量计算矿物中各组分的含量。

1.2 Shkuratov 混合光谱理论

在 Hapke 模型中,利用光线散射一维模型来估计单次散射反照率,其中,颗粒内部的多次反射被认为是一维介质中的多次散射,在一定入射角度下利用特定参数来表示反射参数。在 Shkuratov 模型中,一个主要的思想就是将这种单次散射反照率的求取方法应用于颗粒表面反照率,并将颗粒散射系统改为等效平板散射系统,如图 1 所示。该模型忽略了所有角度对反射率的影响,在相位角很小时,假设所计算的一维反射率可以作为三维介质的反射率。实验表明,在相位角大约 5° 时所测的反照率可以认为是通过一维模型得到的反照率(反射率)(Shkuratov *et al.*, 1999)。

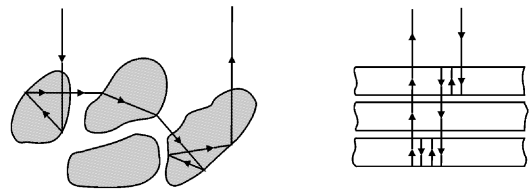


图 1 Shkuratov 等效平板散射系统

Fig.1 Shkuratov equivalent flat scattering system

Shkuratov 模型的辐射传输示意图如图 2 所示, R_e 为外表面平均反射率, R_i 为颗粒内表面平均反射率,颗粒大小 S 。 W_m 是第 m 次散射前向和后向出射的可能性(概率)。进入板层的光的一部分 $T_e = 1 - R_e$, 由于吸收而衰减。此影响用内部透射系数 $\exp(-\tau)$ 来定量表示, $\tau = 4\pi kS/\lambda$, k 为消光系数, S 定义为光线在颗粒两次内部反射间传输的路径长度,其大致等于颗粒的直径,这一点与 Hapke 模型不同,对光谱模拟的结果有一定的影响。然后透过板层的一部分 R_i 被内部反射,余下的 $T_i = 1 - R_i$ 被折射出去。整个过程沿箭头一直继续。

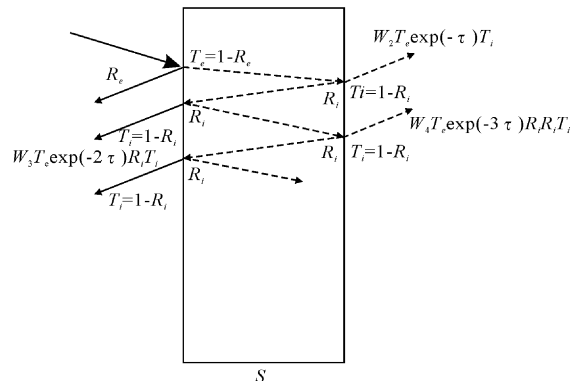


图 2 Shkuratov 模型的辐射传输示意图

Fig.2 Sketch showing radiation transfer of the Shkuratov model

1.3 Hapke 和 Shkuratov 模型对比

对比 Hapke 和 Shkuratov 光谱混合模型,可发现二者相似点主要包括:(1) 二者处理过程基本分为三步:第一步,得到颗粒的单次散射反照率;第二步,获得颗粒表面的反射率;第三步,计算混合光谱。(2) 模型的最大一个相似点就是单次散射反照率的计算方法和模型。因为两种模型都认为单次散射反照率与颗粒属性和等效平板模型有关,所以单次散射反照率应该相差不会太大。

不同点主要包括:(1) 模型的方向性。Hapke 模型考虑到了光线角度的影响(入射角、出射角和相位角),基于模型可以得到任意角度的双向反射率,但是在 Shkuratov 模型中,忽略了所有角度对反

射率的影响,只是在相位角很小时,假设所计算的一维反射率可以作为三维介质的反射率。实验表明,在相位角大约 5° 时所测的反照率可以认为是通过一维模型得到的反照率(反射率)。(2) 模型的可逆性。Shkuratov 模型的一个很重要特征即可逆性,例如,如果反射率已知,并对其他参数做出估计,就可以反算表面物质的折射率的虚部。但是 Hapke 模型不具有可逆性,虽然可以通过查找表建立反射率和单次散射反照率的关系,但是操作起来所产生的数据量大,运行效率低,使用起来也不便捷。

2 混合模拟思路

(李庆亭,2009)等研究发现 Hapke 和 Shkuratov 模型具有非常好的一致性,即在相同的物理参量下,模型计算出的反射率光谱相差很小,由于 Shkuratov 模型要求相位角很小,因此以上的对比和分析都是在入射角 0° 和出射角 0° 的条件下进行的,并且假设矿物颗粒各向同性。Hapke 模型的二向性和 Shkuratov 模型的可逆性为岩石和矿物混合光谱的模拟方法提供了思路。即:利用 Shkuratov 模型的可逆性求取矿物的物理参数(主要为复折射系数),建立矿物的物理参数模拟库,在此基础上考虑入射角、出射角和相位角,利用 Hapke 模型模拟矿物及其混合物(岩石和土壤)的双向反射率光谱。光谱模拟模型的整个流程如图 3 所示。

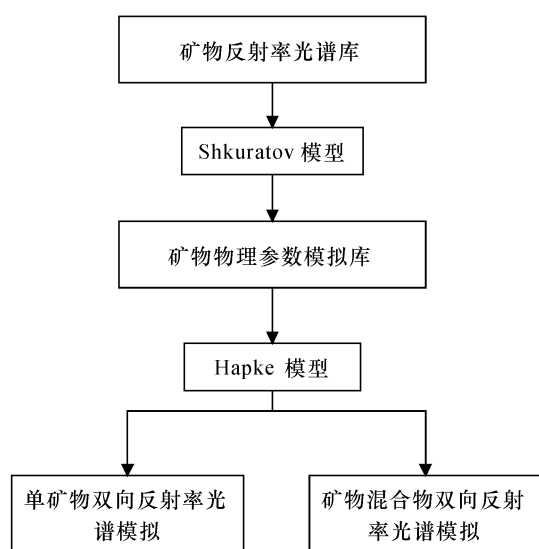


图3 岩石和矿物混合光谱模拟模型

Fig.3 A mixed spectral model of mineral assemblages and rocks

3 斑岩型铜矿蚀变带波谱模拟

矿物混合光谱特征分析是成像光谱依据矿物波形特征识别矿物及其组分的过程中最为复杂的问题,矿物混合光谱效应会产生光谱的谱带漂移、谱带的组合和叠加、特征掩匿和吸收强度的变化(甘甫平等,2004),因此在具体的矿物识别中要根据工作区的具体情况分析混合类型,得到矿物或岩石的混合光谱。本文在对蚀变带矿物物理性质(粒度、充填度、混合比例等)的初步了解或假设的情况下,在美国 USGS 矿物标准光谱库的基础上,利用基于 Hapke 模型和 Shkuratov 模型的矿物光谱非线性混合模型,模拟蚀变带的光谱,建立不同矿物共生组合的模拟光谱。由于各蚀变带次要矿物含量极少,对于混合波谱特征的影响较小,故本研究只针对各蚀变带主要蚀变矿物混合进行了波谱模拟。

斑岩型铜矿系统的热液蚀变和蚀变矿物组合分带已经得到较为成熟的研究。按蚀变成因划分,斑岩铜矿的蚀变主要由以下四种水岩反应形成:(1)挥发份加入(青磐岩化);(2)水解反应(绢英岩化、高级泥化和中等泥化蚀变);(3)碱交代(如钾化和 Na-Ca 蚀变);(4)硅质加入(硅化)。斑岩铜矿的蚀变可延伸到斑岩铜矿外围数百米,理想的同心环状带分带从中心向外分别为:钾化带(石英-钾长石-黑云母)→绢英岩化带(石英-绢云母-黄铁矿)→泥化带(石英-高岭石-蒙脱石)→青磐岩化带(绿帘石-方解石-绿泥石)(Lowell *et al.*, 1970; 薛春纪等,2007;杨志明等,2008)。

钾化为斑岩铜矿的早期蚀变,基本蚀变矿物是钾长石和黑云母,并伴有大量石英以及石膏等。钾化带所涉及的主要矿物有钾长石(Orthoclase)、黑云母(Biotite)、石英(Quartz)、石膏(Gypsum),对其相对含量做了如下估计,钾长石 40%、黑云母 30%、石英 15%、石膏 15%,得到的蚀变矿物混合光谱如图 4。蚀变带的主导光谱特征吸收位于 $1.94\mu\text{m}$ 、 $2.21\mu\text{m}$ 附近,为石膏的光谱特征所致,而波谱整体上升的形态基本保留了黑云母的特征。

绢英岩化蚀变为晚期蚀变类型,基本蚀变矿物为石英、绢云母、黄铁矿。绢英岩化带所涉及的主要矿物有绢云母(Muscovite)、石英(Quartz)、黄铁矿(Pyrite),对其相对含量做了如下估计,绢云母 30%、石英 50%、黄铁矿 20%,得到的蚀变矿物混合光谱如图 5。蚀变带的主导光谱特征吸收位于 $1.4\mu\text{m}$ 、 $2.2\mu\text{m}$ 附近,为绢云母的光谱特征所致。

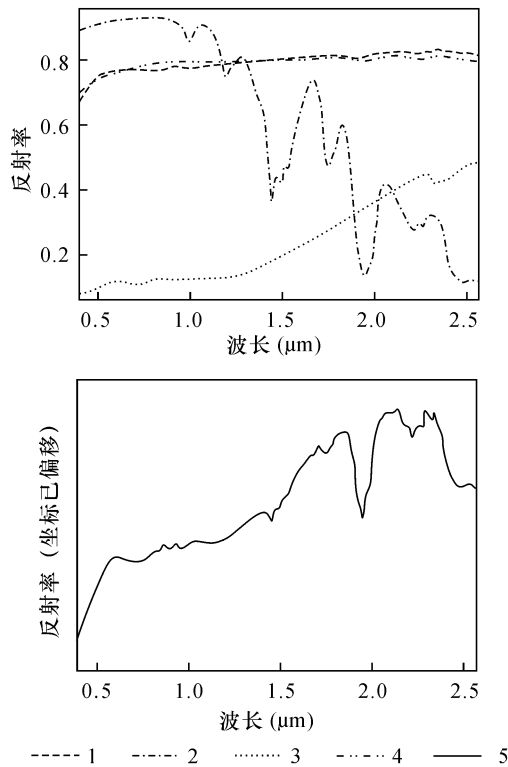


图4 钾化带蚀变矿物及其混合光谱模拟
Fig.4 Alteration mineral assemblage of a potassic zone and its mixed spectral simulation
1 - 钾长石; 2 - 石膏; 3 - 黑云母; 4 - 石英; 5 - 混合光谱
1 - orthoclase; 2 - gypsum; 3 - biotite; 4 - quartz;
5 - mixed spectral

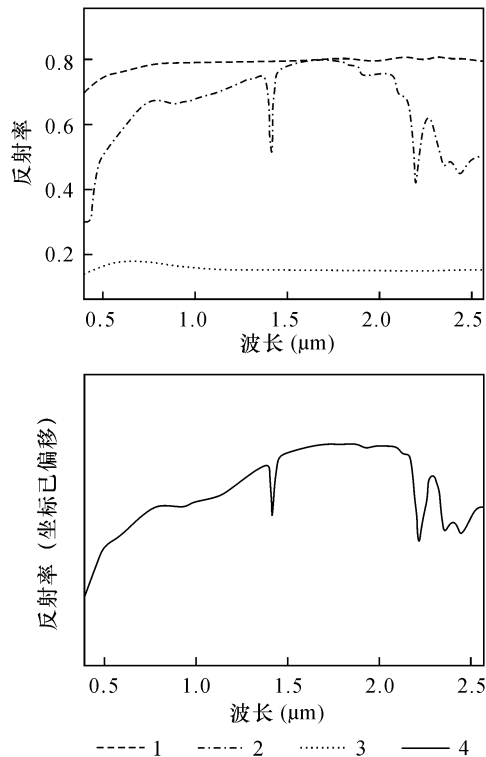


图5 绢英岩化带蚀变矿物及其混合光谱模拟
Fig.5 Alteration mineral assemblage of a phyllitic zone and its mixed spectral simulation
1 - 石英; 2 - 绢云母; 3 - 黄铁矿; 4 - 混合光谱
1 - quartz; 2 - muscovite; 3 - pyrite; 4 - mixed spectra

泥化带蚀变为晚期蚀变类型,主要蚀变矿物为石英、高岭石、蒙脱石等。泥化带所涉及的主要矿物有石英(Quartz)、高岭石(Kaolinite)和蒙脱石(Montmorillonite)。对其相对含量做了如下估计,石英20%、高岭石40%、蒙脱石40%,得到的蚀变矿物混合光谱如图6。蚀变带的主导光谱特征吸收位于 $1.4\mu\text{m}$ 、 $1.9\mu\text{m}$ 、 $2.2\mu\text{m}$ 附近,为高岭石和蒙脱石的波谱特征所致。

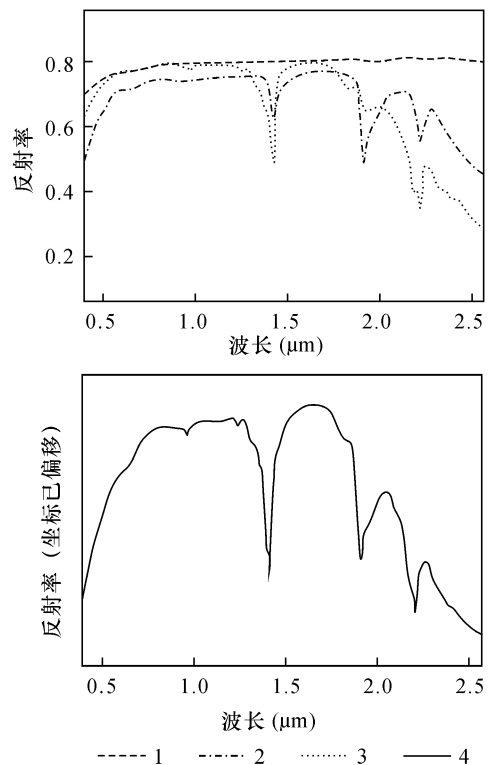


图6 泥化带蚀变矿物及其混合光谱模拟
Fig.6 Alteration mineral assemblage of an argillic zone and its mixed spectral simulation

1 - 石英; 2 - 蒙脱石; 3 - 高岭石; 4 - 混合光谱
1 - quartz; 2 - montmorillonite; 3 - kaolinite; 4 - mixed spectral

青磐岩是由绿泥石、绿帘石、方解石、阳起石以及黄铁矿的暗绿到浅绿色致密块状的热液蚀变岩石。青磐岩化带所涉及的主要矿物有绿泥石(Chlorite)、绿帘石(Epidote)、方解石(Calcite),对其相对含量做了如下估计,绿泥石33%、绿帘石34%、方解石33%,得到的混合光谱如图7,蚀变带的主导光谱特征吸收位于 $2.335\mu\text{m}$ 附近,为绿泥石、绿帘石、方解石所致,整体波谱形态基本为绿泥石和绿帘石的形态。

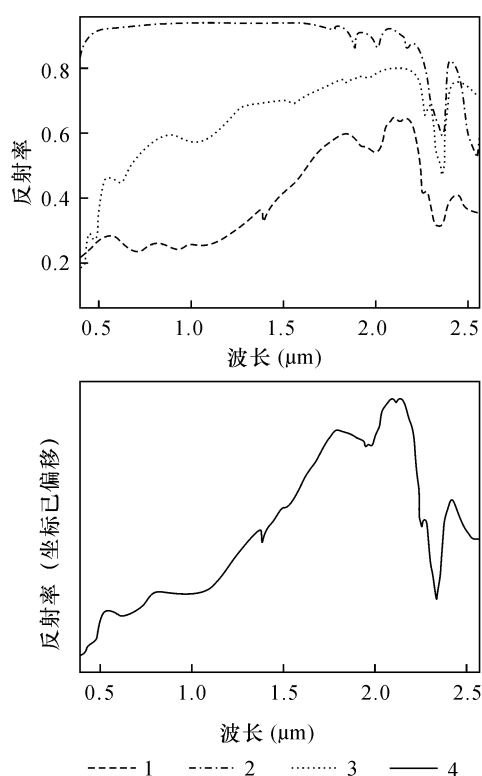


图7 青磐岩化带蚀变矿物及其混合光谱模拟

Fig.7 Alteration mineral assemblage of a propylitic zone and its mixed spectral simulation

1 - 绿泥石; 2 - 方解石; 3 - 绿帘石; 4 - 混合光谱

1 - chlorite; 2 - calcite; 3 - epidote; 4 - mixed spectral

4 结论

根据具体的地质成矿规律确定端元矿物,端元矿物可以是单一或多种矿物,也可以是某种矿物组合,进而利用矿物光谱模拟得到目标的二向性光谱,确定地质目标精确的参考光谱,用以进行光谱特征分析,可服务于高光谱遥感蚀变信息提取。本文基于 Hapke 和 Shkuratov 光谱混合理论,针对斑岩型铜矿典型蚀变带蚀变岩进行矿物光谱混合的模拟实验,得到了斑岩铜矿床四个典型蚀变带蚀变岩的光谱,这对于此类型矿床示矿信息提取具有一定的理论意义。但是由于斑岩铜矿蚀变分带并非均为定式,使得岩矿光谱混合模拟研究也比较复杂,今后建议针对具体研究区开展相应的蚀变岩矿物混合光谱研究,建立研究区蚀变配置模式,为区域找矿预测提供理论依据。

[References]

Foody G C. 1994. Sub-pixel land cover composition estimation using a linear mixing model and fuzzy membership functions[J]. International Journal of Remote Sensing, 15(3):619-631

- Gan Fu-ping, Wang Run-sheng. 2004. Remote sensing principle and technology for rocks and minerals information extraction [M]. Beijing: Geological Publishing House; 1-123 (in Chinese)
- Gillespie A R. 1992. Spectral mixture analysis of multispectral thermal infrared images[J]. Remote Sensing of Environment, 42(2):137-145
- Hapke B. 2005. Theory of reflectance and emittance spectroscopy[M]. Cambridge: Cambridge University Press;1-513
- Hapke B. 2008. Bidirectional reflectance spectroscopy VI: Effects of porosity[J]. Icarus, 195: 918-926
- Li Qing-ting. 2009. The hyperspectral information extraction of minerals and rocks based on spectral diagnosis and target detection[D]. Beijing: Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences;1-145 (in Chinese)
- Liu Dan, Zhao Yong-qiang, Chen Chao, Cheng Yong-mei, Pan Quan. 2011. Effects of spectral polarimetric BRDF by soil[J]. Infrared and Laser Engineering, 40(2): 293-298 (in Chinese with English abstract)
- Lowell J D, Guilbert J M. 1970. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits [J]. Economic Geology, 65: 373-408
- Shkuratov Y, Starukhina L, Hoffmann H, Arnold G. 1999. A model of spectral albedo of particulate surfaces: implications for optical properties of the Moon[J]. Icarus, 137: 235-246
- Tong Qing-xi, Zhang Bin, Zheng Lan-fen. Hyperspectral remote sensing-principle, technology and application [M]. Beijing: Higher Education Press; 246-262 (in Chinese)
- Wu Jun-zhao, Zheng Yong-chun, Zhou Yong-liao, Xie Zhi-dong, Xu Xi-sheng. 2010. Research of the optical effects of space weathering on lunar regolith based on the nonlinear mixing model [J]. Chinese Journal of Space Science, 30(2): 154-159 (in Chinese with English abstract)
- Xue Chun-ji, Qi Si-jing, Huai He-ming. 2007. Basis of ore deposits [M]. Beijing: Geological Publishing House; 91-101 (in Chinese)
- Yang Zhi-ming, Hou Zeng-qian, Song Yu-cai, Li Zhen-qing, Xia Dai-xiang. 2008. Qulong superlarge porphyry Cu deposit in Tibet: Geology, alteration and mineralization[J]. Mineral Deposits, 27(3): 219-318 (in Chinese with English abstract)
- [附中文参考文献]
- 甘甫平,王润生. 2004. 遥感岩矿信息提取基础与技术方法研究 [M]. 北京:地质出版社:1-123
- 李庆亨. 2009. 基于光谱诊断和目标探测的高光谱岩矿信息提取方法研究[D]. 北京:中国科学院对地观测与科学中心:1-145
- 柳丹,赵永强,陈超,程咏梅,潘泉. 2011. 土壤偏振光谱二向反射影响研究[J]. 红外与激光工程, 40(2): 293-298
- 童庆禧,张兵,郑兰芬. 2006. 高光谱遥感-原理、技术与应用 [M]. 北京:高等教育出版社:246-262
- 吴昉昭,郑永春,邹永廖,谢志东,徐夕生. 2010. 基于非线性混合模型研究太空风化对月壤光谱的影响[J]. 空间科学学报, 30(2): 154-159
- 薛春纪,祁思敬,槐合明. 2007. 基础矿床学[M]. 北京:地质出版

社: 91-101

杨志明, 侯增谦, 宋玉财, 李振清, 夏代祥, 潘凤雏. 2008. 西藏驱

龙超大型斑岩铜矿床: 地质、蚀变与成矿[J]. 矿床地质, 27
(3): 219-318

Study on Mixed Spectra of Alteration Zones in Porphyry Copper Deposits Based on the Hapke and Shkuratov Models

DAI Jing-jing^{1,2}, LI Qing-ting³(1. *MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;**2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083;**3. Center for Earth Observation and Digital Earth Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094)*

Abstract: Spectral mixture models for minerals play an important role in extraction of alteration information. The Hapke and Shkuratov models are two important non-linear spectral mixture models. This paper analyzes the characteristics of these two models, and puts forward a new method for simulating mixed spectral of mineral assemblages and rocks based on them. And we simulate the spectra of typical mineral assemblages of the alteration zones (potassic, phyllic, argillic and propylitic zones), taking the alteration zones in porphyry copper deposits as examples. The results can provide a theoretical basis for studies of alteration zones in porphyry copper deposits.

Key words: Hapke model, Shkuratov model, porphyry copper deposit, alteration belt, mixed spectrum

