

基于权重光谱角制图的高光谱矿物填图方法

何中海, 何彬彬*

电子科技大学地表空间信息技术研究所, 四川 成都 611731

摘要 分析光谱角制图方法缺陷的基础上, 提出权重光谱角制图(weight spectral angle mapper, WSAM)方法。其基本思路为: 在相似波谱曲线差异较大的特征区间设置权重, 以增大它们相似度之间的差异。当识别某种矿物时, 可找到参考波谱与其相似性矿物波谱差异较大的特征区间, 并在此区间设置权重, 从而使相似性矿物波谱与参考波谱的相似度降低, 增加其与目标矿物的区分度。通过 AVIRIS 高光谱数据的实验证明, 权重光谱角制图方法通过设置目标矿物和其相似性矿物的差异特征区间, 降低了相似矿物波谱与目标矿物标准波谱的相似性, 增加了相似性矿物的视区区分能力, 能够较为准确地地区分出目标矿物和其相似性矿物。

关键词 光谱角制图; 权重光谱角制图; 高光谱; 区分度

中图分类号: TP75 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)08-2200-05

引言

目前, 比较成熟的高光谱相似性度量方法包括基于波谱曲线整体相似性^[1-5]、波谱曲线的局部特征匹配^[6-8]和混合多元分解技术^[9-11]。其中光谱角制图(spectral angle mapper, SAM)是基于波谱曲线整体相似性的一种算法, 它通过计算光谱之间的夹角判断它们之间的相似性。光谱之间的夹角越小, 说明两者的相似性越大。光谱角制图(SAM)计算方便, 并可以减弱波谱照度和地形的影响^[12], 在地质填图应用中较为广泛。但是, 这种基于波谱曲线整体相似性的算法对局部特征变化表达不明显, 当两种物质的光谱曲线相似时, 区分效果较差^[13,14]。本文提出一种新的光谱相似性度量方法——权重光谱角制图(weight spectral angle mapper, WSAM), 利用局部细节信息增加相似性矿物的区分度。

1 权重光谱角制图方法(WSAM)

光谱角制图(SAM)是利用测试光谱与参考光谱之间的夹角表示它们之间的相似性。它的计算式如下^[2]

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{\sum xy}{\sqrt{\sum (x)^2 \sum (y)^2}} \quad (1)$$

式中: α 为两个光谱之间的夹角, 即光谱角, x 和 y 分别为参考光谱和测试光谱的波谱曲线。 α 的取值范围在 $[0, \pi/2]$ 之间, 其值越小, 代表测试光谱与参考光谱的相似性越高, 归类的概率和精度也就越高。光谱角的大小只跟两个比较的光谱矢量方向有关, 与其辐射亮度无关, 这就减弱了照度和地形对相似性度量的影响。

SAM 在计算两条波谱曲线的相似性时, 波段之间是可以相互弥补的, 无法突出光谱特征的局部信息, 因此对比较相似的光谱曲线区分效果较差。为了提高相似光谱之间的区分度, 进行如下改进: 在相似波谱曲线差异较大的特征区间设置权重, 以增大它们相似度之间的差异。假设设置差异较大的特征区间包含有 N_a 个波段(此区间中参考光谱和测试光谱的反射率值用 x_i, y_i 表示), 普通区间有 N_b 个波段(此区间中参考光谱和测试光谱的反射率值用 x_p, y_p 表示, $N_a + N_b = N$, N 表示光谱曲线的总波段数)。对差异特征区间设置权重 $k, k > 1$, 则原相似性度量计算式变化为等式(2)。

收稿日期: 2010-06-07, 修订日期: 2010-10-15

基金项目: 国家(863 计划)项目(2007AA12Z227)和国家自然科学基金项目(40701146)资助

作者简介: 何中海, 1987 年生, 电子科技大学地表空间信息技术研究所硕士研究生 e-mail: hzh112@126.com

* 通讯联系人 e-mail: binbinhe@uestc.edu.cn

$$\cos\alpha' = \frac{\sum xy + (k^2 - 1) \sum_{i=0}^{N_a} x_{ij} y_{ji}}{\sqrt{(\sum (x_i)^2 + (k^2 - 1) \sum_{i=0}^{N_a} (x_{ii})^2) \cdot (\sum (y_i)^2 + (k^2 - 1) \sum_{i=0}^{N_a} (y_{ii})^2)}} \quad (2)$$

设置权重后的 WSAM 算法可以看成把数据转化到突出局部特征信息的新的特征空间(不进行投影转换,保留了原始波段的物理含义),然后在这个特征空间中利用 SAM 方法计算相似性,满足相似性度量的条件。下面通过计算对

WSAM 和 SAM 进行比较。

设 $\sum xy = f > 0$, $\sqrt{\sum (x_i)^2} = F_1 > 0$, $\sqrt{\sum (y_i)^2} = F_2 > 0$, 则

$$\begin{aligned} \theta = \cos\alpha' - \cos\alpha &= \frac{f + (k^2 - 1) \sum_{i=0}^{N_a} x_{ij} y_{ji}}{\sqrt{(F_1^2 + (k^2 - 1) \sum_{i=0}^{N_a} (x_{ii})^2) \cdot (F_2^2 + (k^2 - 1) \sum_{i=0}^{N_a} (y_{ii})^2)}} - \frac{f}{F_1 F_2} \\ &= \frac{(k^2 - 1) \sum_{i=0}^{N_a} x_{ij} y_{ji} + \cos\alpha \left(F_1 F_2 - \sqrt{F_1^2 F_2^2 + F_1^2 (k^2 - 1) \sum_{i=0}^{N_a} (y_{ii})^2 + F_2^2 (k^2 - 1) \sum_{i=0}^{N_a} (x_{ii})^2 + (k^2 - 1)^2 \sum_{i=0}^{N_a} (x_{ii})^2 \sum_{i=0}^{N_a} (y_{ii})^2} \right)}{\sqrt{(F_1^2 + (k^2 - 1) \sum_{i=0}^{N_a} (x_{ii})^2) \cdot (F_2^2 + (k^2 - 1) \sum_{i=0}^{N_a} (y_{ii})^2)}} \quad (3) \end{aligned}$$

(1) 为了得到 WSAM 相对 SAM 的变化特征, 即 θ 的变化, 对(3)式做不等式变形得

$$\begin{aligned} \theta &\leq \frac{(k^2 - 1) \sum_{i=0}^{N_a} x_{ij} y_{ji} + \cos\alpha \left(F_1 F_2 - \sqrt{F_1^2 F_2^2 + 2(k^2 - 1) F_1 F_2 \sqrt{\sum_{i=0}^{N_a} (x_{ii})^2 \sum_{i=0}^{N_a} (y_{ii})^2} + (k^2 - 1)^2 \sum_{i=0}^{N_a} (x_{ii})^2 \sum_{i=0}^{N_a} (y_{ii})^2} \right)}{\sqrt{(F_1^2 + (k^2 - 1) \sum_{i=0}^{N_a} (x_{ii})^2) \cdot (F_2^2 + (k^2 - 1) \sum_{i=0}^{N_a} (y_{ii})^2)}} \\ &= \frac{(k^2 - 1) \left(\sum_{i=0}^{N_a} x_{ii} y_{ii} - \cos\alpha \sqrt{\sum_{i=0}^{N_a} (x_{ii})^2 \sum_{i=0}^{N_a} (y_{ii})^2} \right)}{\sqrt{(F_1^2 + (k^2 - 1) \sum_{i=0}^{N_a} (x_{ii})^2) \cdot (F_2^2 + (k^2 - 1) \sum_{i=0}^{N_a} (y_{ii})^2)}} = \frac{\sum_{i=0}^{N_a} x_{ii} y_{ii} - \cos\alpha \sqrt{\sum_{i=0}^{N_a} (x_{ii})^2 \sum_{i=0}^{N_a} (y_{ii})^2}}{\sqrt{\left(\frac{F_1^2}{k^2 - 1} + \sum_{i=0}^{N_a} (x_{ii})^2 \right) \cdot \left(\frac{F_2^2}{k^2 - 1} + \sum_{i=0}^{N_a} (y_{ii})^2 \right)}} \end{aligned}$$

体相似度的时候, $\theta < 0$, 即利用 WSAM 后图像光谱与参考光谱的相似度会降低, 并且随着 k 值的增大这种变化的最小值会逐步提升(趋近于 $(\cos\alpha_t - \cos\alpha)$), 这为区分相似性矿物提供了一个很好的条件。当识别某种矿物时, 可找到它与其相似性矿物差异较大的特征区间(在此区间 $\cos\alpha_t < \cos\alpha$), 并给其设置权重 k , 从而使相似性矿物与参考波谱的相似度降低, 增大其与目标矿物的区分性。

(2) 为进一步探讨当 $\cos\alpha_t$ 大于 $\cos\alpha$ 时 WSAM 相对 SAM 的变化特征, 对式(3)做不等式变形得

$\cos\alpha_t$ 表示波谱在差异较大的特征区间的相似度, 从式(4)可见, 当 $\cos\alpha_t < \cos\alpha$ 时, 即当特征区间的相似度小于整

$$\begin{aligned} \theta &\geq \frac{(k^2 - 1) \sum_{i=0}^{N_a} x_{ij} y_{ji} + \cos\alpha \left(F_1 F_2 - \left(F_1 F_2 + (k^2 - 1) \sqrt{\sum_{i=0}^{N_a} (x_{ii})^2 \sum_{i=0}^{N_a} (y_{ii})^2} + \left| \sqrt{k^2 - 1} F_1 \sqrt{\sum_{i=0}^{N_a} (y_{ii})^2} - \sqrt{k^2 - 1} F_2 \sqrt{\sum_{i=0}^{N_a} (x_{ii})^2} \right| \right) \right)}{\sqrt{(F_1^2 + (k^2 - 1) \sum_{i=0}^{N_a} (x_{ii})^2) \cdot (F_2^2 + (k^2 - 1) \sum_{i=0}^{N_a} (y_{ii})^2)}} \\ \text{设 } 1 + \left| \frac{F_1}{\sqrt{k^2 - 1} \sqrt{\sum_{i=0}^{N_a} (x_{ii})^2}} - \frac{F_2}{\sqrt{k^2 - 1} \sqrt{\sum_{i=0}^{N_a} (y_{ii})^2}} \right| &= \lambda \geq 1, \text{ 则} \end{aligned}$$

$$\theta \geq \frac{(k^2 - 1)(\cos \alpha_i - \lambda \cos \alpha) \sqrt{\sum_{i=0}^{N_a} (x_i)^2 \sum_{i=0}^{N_a} (y_i)^2}}{\sqrt{(F_1^2 + (k^2 - 1) \sum_{i=0}^{N_a} (x_i)^2) \cdot (F_2^2 + (k^2 - 1) \sum_{i=0}^{N_a} (y_i)^2)}} \quad (5)$$

从式(5)可以看出,当 $\cos \alpha_i > \lambda \cos \alpha$ 的时候, $\theta > 0$,也就是当特征区间的相似度与整体相似度的差异满足上面的条件时,利用 WSAM 方法,图像光谱与参考光谱的相似度会增加。但在 $\cos \alpha_i > \cos \alpha$ 时有部分象元相似度会降低,也有部分相似度会增加,这种不确定性对进行相似度测量不利,因此进行权重光谱角制图时不对 $\cos \alpha_i > \cos \alpha$ 的像元进行处理,保持原光谱角制图的相似度计算结果。

根据上面的讨论 WSAM 方法总结为以下几个步骤:(1)找目标矿物波谱与其相似性矿物波谱差异较大的特征区间,并使相似性矿物与目标矿物在此区间满足 $\cos \alpha_i < \cos \alpha$;(2)在此差异区间设置一个权重值 k ;(3)当 $\cos \alpha_i \geq \cos \alpha$ 时,利用原 SAM 方法计算相似度值;当 $\cos \alpha_i < \cos \alpha$ 时,利用 WSAM 方法计算相似度值,并且为了增大相似度的改变值,可以将其相似度值做适当放大处理。

2 实验与分析

2.1 数据

研究中使用美国内华达州铜矿区(Cuprite)的 AVIRIS 高光谱数据(图 1)结合美国地质勘察波谱库(usgs_min_sli)进行试验。遥感数据经过大气校正和去噪处理^[15],得到反射率图像。

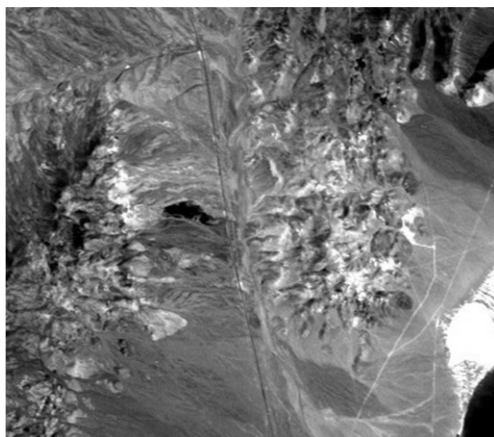


Fig 1 Cuprite, Nevada (AVIRIS color composite)

Cuprite 矿区被 95 号公路分成东西两个南北向拉长的蚀变区。东边区域主要出露岩层有第三系火山岩和第四系冲积岩,而西边区域主要出露层有寒武纪变质沉积岩、第三系火山岩和第四系冲积岩。经过 Ashley 和 Abrams 等人的填图结果可知此区域的蚀变区域主要可以分为硅化带,蛋白石化带和泥化带。硅化区主要蚀变矿物为大量的石英以及部分方解石、少量的明矾石和高岭石;蛋白石化带分布广泛,主要是蛋白石和一定数量的明矾石和高岭石;泥化带主要有高岭石、蒙脱石和少量蛋白石。除上面提到的矿物外,在蛋白石

化带和泥化带中还含有低于 5% 的赤铁矿^[16,17]。实验区岩石出露良好,矿物组合多样,加上气候干燥,交通便利,从 20 世纪 70 年代起就成为地质研究的重要实验区。

2.2 实验结果

Cuprite 铜矿区相似矿物中比较典型的的就是高岭石和白云母(标准波谱曲线见图 2)。图 3 中实线、点线波谱曲线分别为标准波谱库中的高岭石和白云母的波谱曲线,虚线和虚点线波谱曲线分别为与高岭石和白云母匹配较好的光谱曲线。

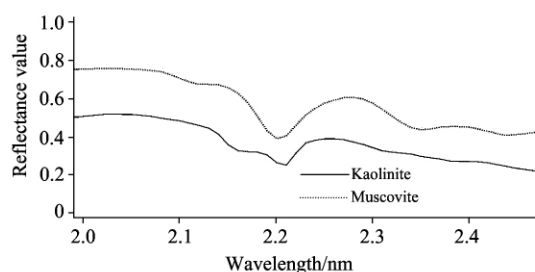


Fig 2 The similar library spectra of kaolinite and muscovite

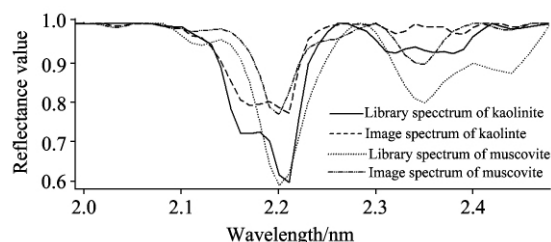


Fig 3 The continuum removal spectra of kaolinite and muscovite from spectral library and image

首先利用 SAM 方法和 WSAM 方法进行相似度计算,结果见表 1。在 WSAM 方法中,提取高岭石时,根据白云母图像光谱与高岭石标准波谱曲线进行比较,采用差异区间特征区间 2 060 9~2 180 9 μm ,此区间中高岭石在 2 17 μm 左右有一相对较弱的吸收峰;提取白云母时,根据高岭石图像光谱与白云母标准波谱曲线进行比较,采用差异区间特征区间 2 060 9~2 479 0 μm ,此区间中白云母在 2 35 μm 左右有较强的吸收峰。其中 k 值采用 2.0 与 4.0 作比较。

Table 1 The result of SAM and WSAM

光谱	SAM 夹角	WSAM 夹角	
		$k=2.0$	$k=4.0$
高岭石标准光谱/白云母图像光谱	0.093 310 3	0.097 740 3	0.099 958 7
白云母标准光谱/高岭石图像光谱	0.083 596 1	0.090 489 5	0.092 508 5

从表中可以看出,在提取高岭石矿物时,图像中与白云母匹配较好的图像光谱与标准的高岭石波谱曲线的相似度随着 k 值的增大而逐渐降低;同样,在提取白云母矿物时,图像中与高岭石匹配较好的图像光谱与标准的白云母波谱曲线的相似度随着 k 值的增大而逐渐降低。也就是 WSAM 方法

可以通过对相似性矿物波谱与目标矿物波谱差异较大的特征区间设置权重,降低相似矿物波谱与目标参考波谱的相似度,以增大相似性矿物的区分度。图 4 为利用美国内华达州铜矿区的 AVIRIS 高光谱数据分别进行 WSAM 方法和 SAM 方法的矿物填图结果。

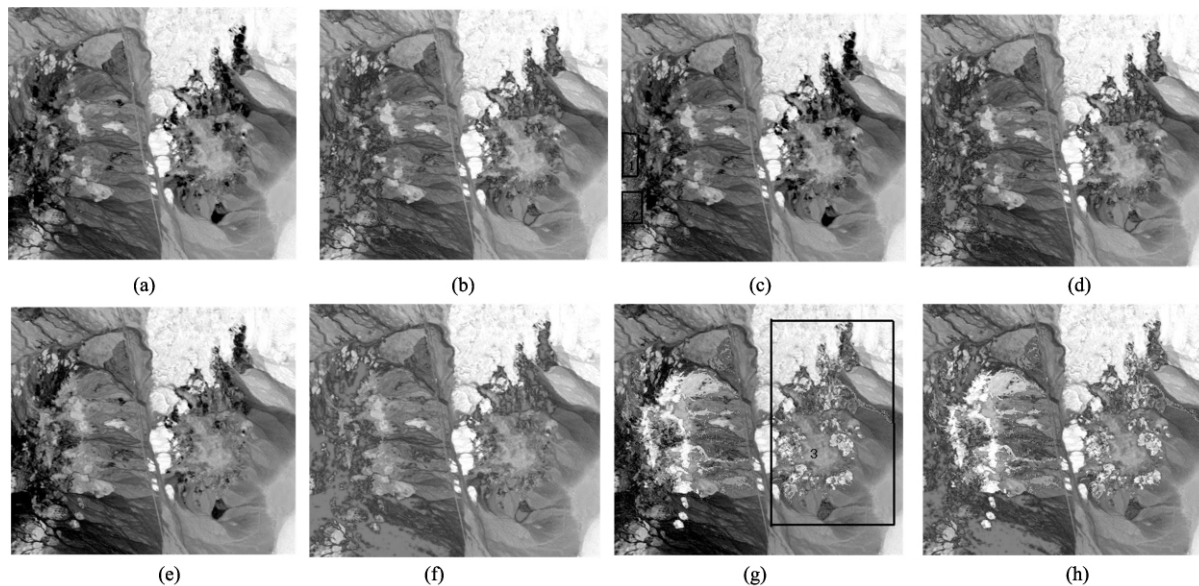


Fig 4 The results of hyperspectral mineral mapping over cuprite area based on SAM and WSAM

(a): The result of SAM similarity match for kaolinite; (b): SAM mineral mapping result for kaolinite when slice threshold value equals to 0.12 (red area); (c): The result of weight SAM similarity match for kaolinite when k equals to 4.0 and the difference range is between 2.060 9 and 2.180 9 μm ; (d): Weight SAM mineral mapping result for kaolinite when slice threshold value equals to 0.12 (red area); (e): The result of SAM similarity match for muscovite; (f): SAM mineral mapping result for muscovite when slice threshold value equals to 0.12 (red area); (g): The result of weight SAM similarity match for muscovite when k equals to 4.0 and the difference range is between 2.060 9 and 2.479 0 μm ; (h): Weight SAM mineral mapping result for muscovite when slice threshold value equals to 0.12 (red area)

3 讨论与结论

从图 4 可以看出,在进行高岭石提取时,差异地区主要在图 4(c)的黑色框 1 和 2 中。根据对此地区光谱提取的结果(图 5)可以看出,黑色框内的物质主要应该是白云母,而 SAM 方法进行计算时此地区与高岭石相似度较高,不易区分,而采用 WSAM 方法时,此地区相似度降低,目视的区分能力增加,在提取时也能较为准确地与高岭石区分开来。在进行白云母提取时,差异地区主要在图 4(g)的黑色框 3 中,

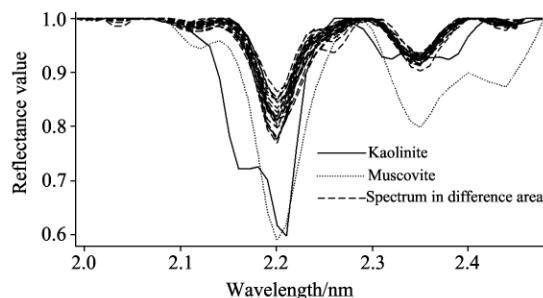


Fig 5 The pixel spectra in the difference area when we extract kaolinite

根据对此地区光谱提取的结果(图 6)可知差异地区主要是高岭石,采用 WSAM 方法时,相似性矿物的区分性也得到了提高。

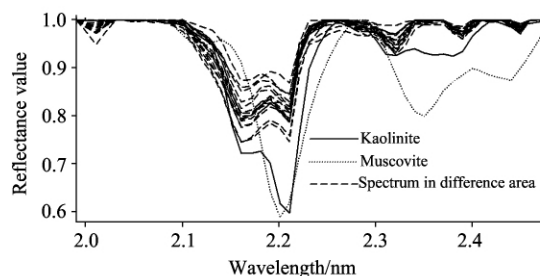


Fig 6 The pixel spectra in the difference area when we extract muscovite

将 WSAM 和 SAM 的填图结果和 Clark 和 Swayze 利用 AVIRIS 数据在此地区填图结果^[7]进行比较,WSAM 得到的结果相当吻合,而 SAM 得到的结果对相似性矿物的区分较差。

综上所述,WSAM 方法通过在目标矿物和其相似性矿物的差异特征区间上设置权重,降低了相似矿物与目标矿物标准波谱曲线的相似性,增加了相似性矿物的目视区分能力,并能够较为准确地地区分出目标矿物和其相似性矿物。

References

- [1] Kruse F A, Lefkoff A B, Dietz J B. Remote Sensing of Environment, 1993, 44(2): 309.
- [2] Kruse F A, Lefkoff A B, Boardman J W, et al. Remote Sensing Environment, 1993, 44(2): 145.
- [3] de Carvalho Jr O A, Menese P R. JPL publication, 2000, 65: 74.
- [4] Baugh W M, Kruse F A, Atkinson W W, et al. Remote Sensing Environment, 1998, 65(3): 292.
- [5] van der Meer F, Bakker W. Remote Sensing of Environment, 1997, 61(3): 371.
- [6] Roger N Clark, Andrea J Gallagher, Gregg A Swayze. JPL Publication, 1990, 176.
- [7] Roger N Clark, Gregg A Swayze, et al. Journal of Geophysical Research Version, 2002.
- [8] WANG Jin-nian, ZHENG Lan-fen, TONG Qing-xi(王晋年, 郑兰芬, 童庆禧). Remote Sensing of Environment China(环境遥感), 1996, 11(1): 20230.
- [9] Harsanyi J C, Chen-I Chang. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(4): 779.
- [10] Changshan Wu, Murray A T. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(4): 493.
- [11] Van Der Meer F, De Jong S M. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(15): 2781.
- [12] Christopher Hecker, Mark van der Meijde, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(12): 4162.
- [13] van der Meer F. Int. J. Appl. Earth Observation Geoinformation, 2006, 8(1): 3.
- [14] Crosta A P, Sabine C, Taranik J V. Remote Sensing of Environment, 1998, 65(3): 309.
- [15] Green A A, Berman M, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 26(1): 65.
- [16] Chen Xianfeng, Warner Timothy A, Campagna David J. Remote Sensing of Environment, 2007, 110: 344.
- [17] Roger N Clark, Joe Boardman, et al. IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium, 2006.

Weight Spectral Angle Mapper (WSAM) Method for Hyperspectral Mineral Mapping

HE Zhong-hai, HE Bin-bin*

Institute of Geology Spatial Information Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China

Abstract On the basis of analyzing the deficiency of spectral angle mapper (SAM), an improved similarity measure called weight SAM (WSAM) is proposed in the present paper. The fundamental idea is to set a weight in the “difference range” to increase the discriminability between the similar minerals. When we distinguish some kind of mineral, the authors can find the “difference range”, in which the difference in spectral feature between the similar mineral spectrum and the reference spectrum is huge, and gives weight k to the spectrum in this range to reduce the similarity and increase the discriminability between similar minerals. The experiment results of spectra and AVIRIS data indicate that the WSAM method reduces the similarity of target mineral and its similar mineral and increases our ability of visual interpretation.

Keywords Spectral angle mapper (SAM); Weight spectral angle mapper (WSAM); Hyperspectral; Discriminability

(Received Jun. 7, 2010; accepted Oct. 15, 2010)

* Corresponding author