

光谱角度填图方法及其在岩性识别中的应用

王志刚 朱振海 王红梅 刘庆生

(中国科学院遥感应用研究所 北京 100101)

摘 要 光谱角度填图(SAM)是成像光谱图像处理技术中,对岩石矿物进行谱形识别的主要方法之一,但其应用效果并不十分理想。以内蒙古渣尔泰山为实验区,从岩石实验室反射光谱的相似系数聚类分析入手,研究了光谱角度填图方法的优劣,及其产生的原因。探讨了利用均值图像参与分类的处理方案,从而改善了光谱角度填图方法中易于产生“异类同谱”的不足,获得良好的岩性识别效果。

关键词 成像光谱, 岩性识别

80年代至今,美国GERIS、AVIRIS等成像光谱仪已执行了数百次航空遥感试验及商业性飞行,许多是针对蚀变矿物的识别进行应用研究。然而岩石是矿物的集合体,在自然界的分布远比单矿物地质体普遍,因此基于单矿物特征吸收的特征提取方法便显得难以奏效。光谱角度填图技术^[1]是建立在矢量空间,谱型分析基础上的一种方法,适合于岩石谱形总体相似性分析的图像分类,可以改善高光谱数据因照度和地形引起的光谱变异,其优越性是显而易见的。但由于仅考虑谱形,不考虑岩石的相对反射差异,就难以区分不同岩石非选择性吸收的特征。因此在应用中不同岩类有时具有相似的谱形,很难区分“异类同谱”的岩石。岩石实验室反射光谱的相似系数聚类分析和光谱角度填图方法均采

用矢量空间夹角作为统计量,统计分类原理是一致的。分析结果表明,利用简单的均值图像参与分类,可以改善光谱角度填图方法的不足,产生较好的应用效果。

实验区位于内蒙古渣尔泰山,属于干旱半干旱地区。岩石出露条件良好,主要由元古界渣尔泰山群的泥质灰岩、石英岩、板岩及晋宁期花岗岩组成,但蚀变岩分布很少。数据获取采用中国科学院上海技术物理研究所研制的机载MAIS成像光谱仪,成像时间为1995年9月;实验设置的32个波段及波长范围如表1。短波红外波段仪器的信噪比较低,因此合并了部分波段。数据处理采用PCI图像处理系统完成。

表1 MAIS的波段参数
Table 1 Main parameters of MAIS

波段宽度/nm	波段	波长/ μm	波段	波长/ μm	波段	波长/ μm	波段	波长/ μm
20	1	0.44—0.46	2	0.50—0.52	3	0.52—0.54	4	0.54—0.56
	5	0.56—0.58	6	0.62—0.64	7	0.64—0.66	8	0.66—0.68
	9	0.68—0.70	10	0.76—0.78	11	0.78—0.80	12	0.80—0.82
	13	0.82—0.84	14	0.84—0.86	15	0.86—0.88	16	0.88—0.90
	17	0.90—0.92	18	0.92—0.94	19	1.02—1.04		
32	20	1.609—1.640	21	1.640—1.671	22	2.018—2.050	23	2.050—2.082
	24	2.082—2.114	25	2.114—2.146	26	2.146—2.178	27	2.178—2.210
	28	2.120—2.242	29	2.242—2.274				
62	30	2.247—2.336	31	2.336—2.398				
93	32	2.398—2.491						

收稿日期: 1998-02-24; 收到修改稿日期: 1998-08-20

1 岩石实验室反射光谱的相似系数聚类分析

聚类分析是多元变量统计分析中的一种方法, 其中 Q 型分析是依据标本的测定数据, 定量确定标本间存在的相似性或亲疏关系, 构成分类谱系图。实验室光谱曲线的相似性不外乎表现在以下 3 个方面: (1) 光谱之间反射率的接近程度, 可以用 n 维欧氏空间中两点之间的距离系数表示; (2) 光谱之间反射率的成比例程度, 可以用 n 维向量空间中的相似系数表示; (3) 光谱之间反射率相互消长的密切程度, 可以用相关系数表示。我们对 53 个岩石样品分别进行上述 3 种方法的聚类分析实验, 结果表明相似系数方法能够反映岩石的谱型特征, 聚类效果更适合于成像光谱技术的应用。

1.1 相似系数聚类分析方法

53 个样品均取自内蒙古乌拉山—渣尔泰山地区, 包括岩浆岩、沉积岩和变质岩中常见的主要岩石类别。用高精度的 CARY-5 实验室光谱仪进行 $0.4\text{--}2.5\mu\text{m}$ 的反射光谱测试, 获得分析数据。相似系数的定义, 是将每个标本看成是 n 维空间中的一个向量, 于是第 i 个向量与第 j 个向量之间存在一个夹角 θ_{ij} , 称 $\cos\theta_{ij}$ 为相似系数^[2]:

$$\cos\theta_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n X_{ik}X_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n X_{ik}^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^n X_{jk}^2}} \quad (1)$$

其中 k 为变量 ($1, 2, 3, \dots, n$); i, j 为样品数 ($1, 2, 3, \dots, N$); X 为样品的值。可以看出, 相似性的量度仅考虑 n 维空间中矢量夹角的余弦值, 而不考虑矢量绝对值的大小。具体到光谱曲线问题是仅考虑 n 维波长空间中谱形的相似性而不考虑每条曲线反射率的总体水平。认识到这种聚类特征是十分重要的。

图 1(a—j) 是依据相似系数聚类谱系图的分组^[3], 对样品进行谱形归类的结果, 可以直观看出类别之间总体反射特征的差异。第 1 类(图 1a): 包括 10 种岩石, 总体特征是在可见光波段 $0.5\mu\text{m}$ 以下电荷迁移引起的强吸收普遍存在; $0.5\text{--}0.7\mu\text{m}$ 的曲线斜率较大, 但在 $0.8\text{--}1.9\mu\text{m}$ 较平缓, 反映出 3 价铁含量较高的特征。第 2 类(图 1b): 仅有浅色蚀变岩一个样品, 最大值位于 $1.5\text{--}1.6\mu\text{m}$; 在

$0.8\text{--}0.9\mu\text{m}$ 存在明显的铁氧化矿物的宽缓吸收。第 3 类(图 1c): 也仅有一个样品, 为金矿的原生矿石。因铁的硫化物含量高, 具有明显的黄铁矿谱形特征。第 4 类(图 1d): 包括 6 种岩石, 大多为黑云母片岩和暗色蚀变岩; 最大值位于 $2.1\mu\text{m}$ 附近, 并普遍存在 $1\mu\text{m}$ 附近 2 价铁的宽缓吸收, 这是不同于其它类别的一个鲜明特征。第 5 类(图 1e): 包括 8 种岩石, 总体特征是可见光短波段电荷迁移引起的吸引弱, 红外波段除少量样品存在 $1.4\mu\text{m}$ 附近的 OH^- 吸引之外, 均为平直的单调降曲线, 没有水及特征矿物的明显吸收。这类样品含铁少, 富含长英质及碳质等无特征吸收的矿物, 但包含了多种岩类, 平均反射率差异较大。这种聚类结果恰恰反映了方法本身的特点和不足。第 6 类(图 1f): 仅有白色白云质大理岩一种样品, 总体特征与前一类相似, 除具有第 5 类更为鲜明的特征之外, 在 $1.9\mu\text{m}$ 存在液态水的吸收, 在 $2.35\mu\text{m}$ 存在白云石的特征吸收。第 7 类(图 1g): 明显特征是均在可见光短波段存在电荷迁移引起的强吸引, 但红外波段曲线为平缓的单调降趋势。此外, 在 $2.2\mu\text{m}$ 附近存在粘土矿物的 Al-OH 特征吸收。该类岩石以含 3 价铁和钾长石为主的矿化蚀变岩和钾长石脉居多。第 8 类(图 1h): 曲线是不规则的上拱形轮廓, 高反射位于 $1.5\text{--}1.8\mu\text{m}$ 之间, 并普遍存在 $1.9\mu\text{m}$ 附近的液态水吸收, 此外在 $2.36\mu\text{m}$ 和 $2.2\mu\text{m}$ 存在碳酸盐矿物和 Al-OH 粘土矿物的特征吸收。第 9 类(图 1i): 包括碳酸盐岩、花岗岩和石英脉等 11 个样品。曲线在可见光波段铁的吸收适中, 在红外波段总体为较平直的单调降趋势, 与第 5 类的区别在于 $2.0\text{--}2.5\mu\text{m}$ 区间普遍存在碳酸盐矿物 ($2.36\mu\text{m}$) 和粘土矿物 ($2.2\mu\text{m}$) 的特征吸收。与第 8 类的区别仅在于红外波段曲线的升降趋势以及液态水的含量 ($1.9\mu\text{m}$ 的吸收)。第 10 类(图 1j): 仅有灰白色的沸石岩一个样品, 其高反射和沸石孔隙水在 $1.4\mu\text{m}$ 和 $1.9\mu\text{m}$ 引起的强烈吸收是一目了然的。

1.2 相似系数聚类分析的意义

矿物的光谱识别可以采用基于矿物标形谱的特征匹配提取。然而岩石是矿物的集合体, 不能简单套用上述方法。目前成像光谱技术的岩性识别实质上仍然是矿物识别的模型为主。而遥感应用中面临的大量问题是没有特征吸收带或特征吸收很弱的岩石光谱信息。因此基于谱形总体相似性的识别就显得十分有意义。

相似系数方法不考虑样品的总体反射水平, 因此不易区别“异类同谱”现象。如第 5 组包容了石英闪长斑岩, 结晶大理岩和炭质板岩 3 个截然不同的岩石类别, 反映在图 1e 中谱形相似水平很高, 而反射率平均值差异却很大。这一现象部分解释了光谱角度填图方法在实际应用中效果不理想的原因。另一方面, 岩石和土壤中的有机质会产生极为敏感的光谱“淬火效应”(quenching effect)^[4], 当有机质含量达到 0.1% 以上即可强烈压抑吸收和反射强度。磁铁矿等不透明金属矿物以及岩石的不同风化程度也对光谱具有类似的压抑作用。上述影响类似于物体的灰体吸收, 使同类岩石的总体反射水平发生变异, 但基本谱形不变; 因此, 仅仅依据光谱的矢量角度就难以区分这种差异。为解决这些问题, 选取反射率平均值(P_m) 和方差(P_v) 两个统计量, 可以对同类样品进一步加以区分(图 1k)。这两个统计量参与图像处理过程, 将有助于改善光谱角度填图方法的不足。

2 成像光谱数据的预处理

成像光谱数据预处理的目的是要消除各种几何畸变, 大气影响, 辐射畸变, 传感器噪声以及波长位移等影响因素, 将图像转换成视反射率或绝对辐射量图像, 以便进行各种分析应用。由于数据的光谱分辨率较低, 未进行波长校正; 大气影响主要通过地面经验线性方法纠正。

2.1 几何校正及辐射校正

由于飞机航速不均匀, 沿飞行方向存在着图像的几何畸变。沿飞行方向的几何校正, 通常要借助于飞行平台的飞行姿态参数。由于缺乏飞机的飞行姿态参数, 故对这部分几何畸变采用地形图进行几何校正。由于扫描角度的变化, 从图像中心到边缘图像扫描行中, 每个像元对应的地面分辨率逐渐降低, 对这部分畸变采用常规的正切纠正处理。

成像光谱图像中辐射畸变的来源比较复杂, 扫描仪扫描角度的变化, 太阳—仪器—目标三者间几何关系的变化, 大气影响, 地形起伏以及传感器本身的噪声都会引起图像辐射畸变。对由于扫描角度, 太阳方位角和太阳高度角引起的辐射量畸变, 采用统计方法进行了边缘辐射校正, 基本去除了图像的边缘减少

2.2 视反射率图像转换

视反射率的转换是成像光谱数据应用分析的前提, 目前常用的方法有平滑域纠正法, 对数残差法, 地面经验线性法及大气传输模型法等。试验区数据采用的是地面经验线性法。用野外光谱仪实地同步测量了典型地物的光谱, 求出图像 DN 值和地面相对反射率 P 值的转换公式: $DN_b = A_b P(\lambda) + B_b$ 。其中 DN_b 为波段 b 中给定像元的数值, $P(\lambda)$ 为波段 b 在波长 λ 对应的地面反射率。 A_b 为增益, 反映了大气传输及仪器设备的放大比等乘法性因素, B_b 为偏移项, 反映了大气程辐射及仪器的零点偏移等加法性因素。由此可看出, 进行相对反射率转换的同时, 也对传感器及大气影响所引起的辐射畸变进行了纠正。地面定标数据主要采用河滩、沸石、玄武岩、流纹岩, 4 类地物进行经验线性反演, 得到视反射率图像。反射率反演的质量 1—19 通道(0.45—1.03 μm) 的效果较好, 20—32 通道(1.6245—2.445 μm) 的效果差, 主要原因是缺少机上定标数据, 及短波红外区间仪器的信噪比较低所致。

3 光谱角度填图(SAM)及其方法的改善

光谱角度填图方法将光谱数据视为多维空间的矢量, 利用解析方法计算像元光谱与光谱数据库光谱或像元训练光谱之间矢量的夹角, 根据夹角的大小来确定光谱间的相似程度, 以达到识别地物的目的。其定义与前述相似系数公式(1)类同, 区别仅在于 SAM 为角度, 而相似系数为角度的余弦。因此实验室光谱分析中获得的结果, 同样适用于定性评价光谱角度填图方法。由于与矢量的模无关, 光谱角度对增益是不敏感的, 从而能够减弱因地形和照度引起的增益变化, 因此训练光谱可以直接和像元光谱相比较^[9]。光谱角度图像的结果, 是对像元赋予 0—180° 的角度值, 给出像元光谱与训练光谱之间相似性的定量估计。

填图实验区为 4km×4km, 分布有花岗岩, 闪长岩, 石灰岩, 石英岩, 板岩等 5 种岩类 11 种岩性。由于视反射率的谱形与实验室光谱差异较大, 因此采用已知像元训练光谱。用 12 种岩性的已知像元光谱建立用户光谱数据库, 构成岩性填图的基本依据。

图 2 是 12 个已知像元训练光谱, 及其均值和标准离差曲线。可以直观看出 20—32 波段(对应于

2.0—2.5 μm 区间) 曲线相关性较差, 是蚀变矿物特征吸收带的分布区, 因此是分段光谱角度填图较理想的可选波段。但由于 MAIS 在 2.0—2.5 μm 的短波红外区间信噪比低, 分段光谱角度填图的效果不好, 因此采用曲线相关较差的 10—29 波段进行处理。封三图版 I 图 3(a—f) 是光谱角度选择 5° 为阈值的岩类 SAM 图像结果; 封三图版 I 图 3g 是无阈值分类后的彩色密度分割图像。封三图版 I 图 4 是得到 5° 为阈值分类图像进行彩色密度分割, 黑色为光谱角度大于 5° 未参加分类的像元。

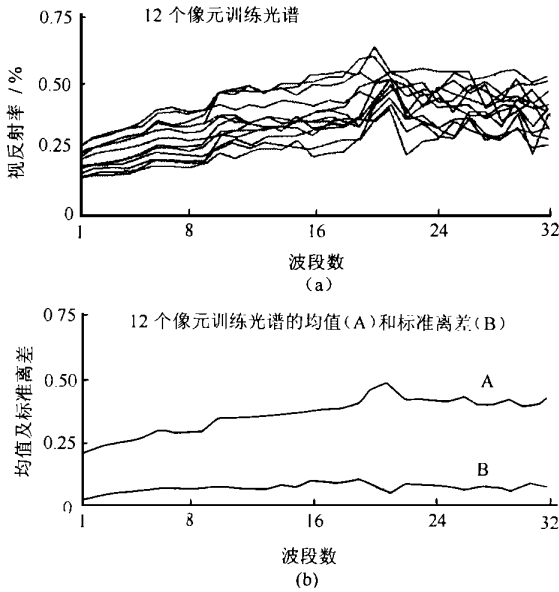


图 2 像元训练光谱及其均值

Fig. 2 Pixel spectra and average pixel spectrum in spectra database

如前所述, 光谱角度填图方法仅依据谱形的相似性识别岩石, 而不考虑非选择性吸收的相对强弱, 因此难以区分谱形相似, 亮度差异较大的不同岩类。为改善这一不足, 选用均值图像参与处理过程。从图 2 看出, 10—19 波段(对应于 0.76—1.04 μm) 是训练光谱均值和谱形差异小, 但离差最大的区段, 能够充分反映不同岩类总体反射水平的差异, 因此制作了 10—19 波段的均值图像。封三图版 I 图 5 是两种均值图像和光谱角度图像的合成结果。对比封三图版 I 图 5 和封三图版 I 图 4 可以看出, 在均值-光谱角度合成图像中, 可以区分出原来混淆的浅色石英岩和花岗岩; 不同色调的板岩以及不同成分的泥质灰岩均能够反映出来。这是由于它们具有相似的光谱角度, 但存在反射强度的差异。像元的波段均值反映了这种差异, 使图像获得改善。

4 结果讨论

相似系数聚类分析提供了一种建立在全波段基础上的谱形相似性统计方法。需要强调, 岩石的谱形是其组成矿物的电磁波非线性叠加的总体特征。区分岩石的电磁波属性和岩石学分类属性两个不同的概念是十分必要的。同时, 认识特征矿物的选择性吸收, 以及非选择性吸收物质对岩石波谱的影响也是很重要的。聚类分析揭示了它们之间的区别和联系。

相似系数聚类分析与成像光谱角度填图方法采用相同的统计指标, 即向量夹角作为谱形分析的依据; 分析了“同类异谱”和“同谱异类”的现象, 为成像光谱图像处理提供了很有意义的应用基础。对训练光谱进行统计, 选取最佳的通道范围制作均值图像, 可以改善光谱角度填图方法的不足。当然, 像元光谱角度受地物本身、环境辐射以及空间分辨率等诸多因素的影响, 仅依据实验室光谱分析是不全面的。本文提供的是一种思路和分析方法, 供应用者借鉴。

参 考 文 献 (References)

- 1 Kruse, F. A., *et al.* The Spectral Image Processing System (SIPS)-Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data. *Remote Sens. Environ.*, 1993, **44**: 145—163.
- 2 Edit by Chengdu Geological Institute. Probability and Mathematical Statistics. Geology Press, 1981, 294—298. (In Chinese) [成都地质学院编. 概率论与数理统计. 北京: 地质出版社, 1981, 294—298.]
- 3 Wang Zhigang, Lui Qingsheng *et al.* Similarity Coefficient Cluster Analysis on Rock Laboratorial Reflectance Spectra. *Remote Sensing Technology and Application*, 1998, **13**(1). (In Chinese) [王志刚等. 岩石实验室反射光谱的相似系数聚类分析. 《遥感技术与应用》, 1998, **13**(1).]
- 4 Clark, R. N. Spectral properties of mixtures of montmorillonite and dark carbon grains; Implications for remote sensing minerals containing chemically and physically absorbed water. *J. Geophys. Res.*, 1983, **88**: 10635—10644.
- 5 Freek van der Meer. Imaging Spectrometry and the Ronda peridotites. Printed in the Netherlands by Grafisch Service Centrum Van de, 1994, 132.

作 者 简 介

王志刚, 男, 1952 年 4 月生, 高级工程师。1982 年毕业于河北地质学院地质系, 多年来从事遥感土地利用调查、遥感地质、遥感找矿及成像光谱技术等应用研究, 发表论文约 10 篇。

Applications of Spectral Angle Mapping Method in Lithological Identification

WANG Zhi-Gang ZHU Zhen-Hai WANG Hong-Mei LIU Qing-Sheng

(*Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Science Beijing 100101*)

Abstract The method of imaging spectral angle mapping (SAM) is one of the main methods of mineral spectra identification in imaging spectra image processing technique, but its application result is not very good. The advantages, disadvantages and their causes are studied and discussed in this paper using clustered analysis of similarity coefficients of lithological lab spectra. The test area is located in the Zhaertai Mountain region of northern China. The imaging spectrometer data were collected using the Medium Resolution Airborne Imaging Spectrometer (MAIS) developed by Chinese Academy of Sciences. The paper emphasizes that a spectrum of rock is non-linear mixture of minerals' spectra that include either selective absorption or non-selective absorption, and affection of non-selective absorption to result of SAM classification. A simple average image is suggested to use in the lithology mapping technique integrated with SAM image, to solve the problem of "different objects having the same spectra" which is often produced in the classification of imaging spectra angle mapping method, thereby obtaining better lithological mapping results.

Key words Imaging spectra, Lithology mapping