

雷达与多光谱图像融合技术在矿产勘查中的应用研究

赵珍梅^{1,2}, 李祥强², 雷 华², 李银海²

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国冶金地质勘查工程总局遥感技术应用中心 100029)

[摘 要]文章阐述了雷达图像与 ETM 图像的特性, 重点介绍了在几何精校正的基础上, 雷达图像与 ETM 图像进行 HIS 融合变换的原理与方法。经融合处理后生成的图像, 既反映出 ETM 图像多光谱信息丰富的特点, 又反映出雷达图像上丰富的结构信息, 从而大大提高了对地物的识别和判读能力。图像融合技术在地质和矿产勘查中有更广阔的应用空间。

[关键词]雷达图像 多光谱图像 融合 数字微分校正 对比分析 矿产勘查

[中图分类号]P627 **[文献标识码]**A **[文章编号]**0495-5331(2007)02-0082-06

0 前 言

该次研究选用的工作区位于新疆阿勒泰地区东部, 阿尔泰山脉中段, 属富蕴县管辖, 是重要的黑色金属成矿带, 著名的蒙库铁矿就在区内。研究区地形复杂、山高坡陡、交通不便, 被一定的雪和植被覆盖。单一雷达和光学遥感方法在该地区的应用, 均不能取得较好的效果。因此, 该次研究采用了先进的多源遥感图像融合技术, 综合了雷达图像和多光谱图像各自的优势, 突出了成矿区带的地物和地质构造信息, 有利于地物目标的判读与分析, 为地质找矿提供了更多的信息。

1 研究区地质概况

研究区位于阿尔泰山脉中段, 北高南低, 为阿勒泰山脉高山区向中山区过渡部位, 山势陡峭, 高山之间夹带坡度较缓的山地, 沟谷狭窄, 阴坡多生长茂盛的植被, 阳坡一般植被较少, 基岩裸露普遍^[1]。

研究区出露地层主要有奥陶系(O)、志留系(S)、泥盆系(D)和第四系(Q)(图1)。

奥陶系(O)主要分布在研究区东北部, 成片出露, 以一套富含微斜长石的各种混合岩和片麻岩为主, 夹浅粒岩和黑云母石英片岩, 其原岩为砂岩、泥质粉砂岩, 但后期岩石混合岩化强烈, 因此变质程度较深。该地层多分布有伟晶岩型云母及稀有金属矿产。

志留系(S)主要分布在工作区中部, 多呈北西向条带状展布, 该地层与上覆泥盆纪地层多呈断层接触, 由一套绿片岩、片麻岩、混合岩组成, 属地槽型的泥页岩建造, 原岩为砂岩、页岩(泥岩)等。由于后期剧烈的多期构造运动, 和华力西中、晚期大规模的岩浆活动, 使该地层发生了强烈的变质, 形成了不同程度的变质岩, 地层颜色多为浅灰色、灰色、灰绿色, 局部呈灰黑色、绿色。在该套地层和其混合岩化的边缘地带中, 普遍含有铁矿、铜矿、铅锌矿等多金属元素。

泥盆系(D)是工作区分布最广的地层, 主要分布在区内的中部和南部, 与下伏志留系呈断层接触。该区的泥盆系为下泥盆统(康布铁堡组)和中泥盆统(阿勒泰组), 前者分布范围较小, 主要出露在研究区中东部, 多呈北西向条带状展布; 而后者分布广泛, 主要出露在区内西南部, 呈北西向展布。上泥盆统岩性主要由一套灰白色、灰色、灰绿色浅变质的酸性火山熔岩和火山碎屑岩组成, 中间夹正常沉积岩透镜体或薄层。在岩体接触带和断裂带附近, 岩石普遍遭受不同程度的变质, 形成一些绿片岩、片麻岩、混合岩、大理岩等, 但其变质程度相差较大, 远离岩体接触带和断裂挤压带的地层变质较浅, 而近者则相对变质较深。中泥盆统岩性为由一套灰色砂岩、硅质泥岩、大理岩等沉积的复理式建造, 由于区域变质和接触变质等作用的影响, 局部地区变质较深, 出现有片岩、片麻岩和混合岩。

[收稿日期]2006-12-04; **[修订日期]**2007-01-08; **[责任编辑]**韩进国。

[第一作者简介]赵珍梅(1963年—), 女, 1991年毕业于中国海洋大学, 获硕士学位, 高级工程师, 现主要从事遥感与GIS在资源与环境评价与调查中的应用研究工作。

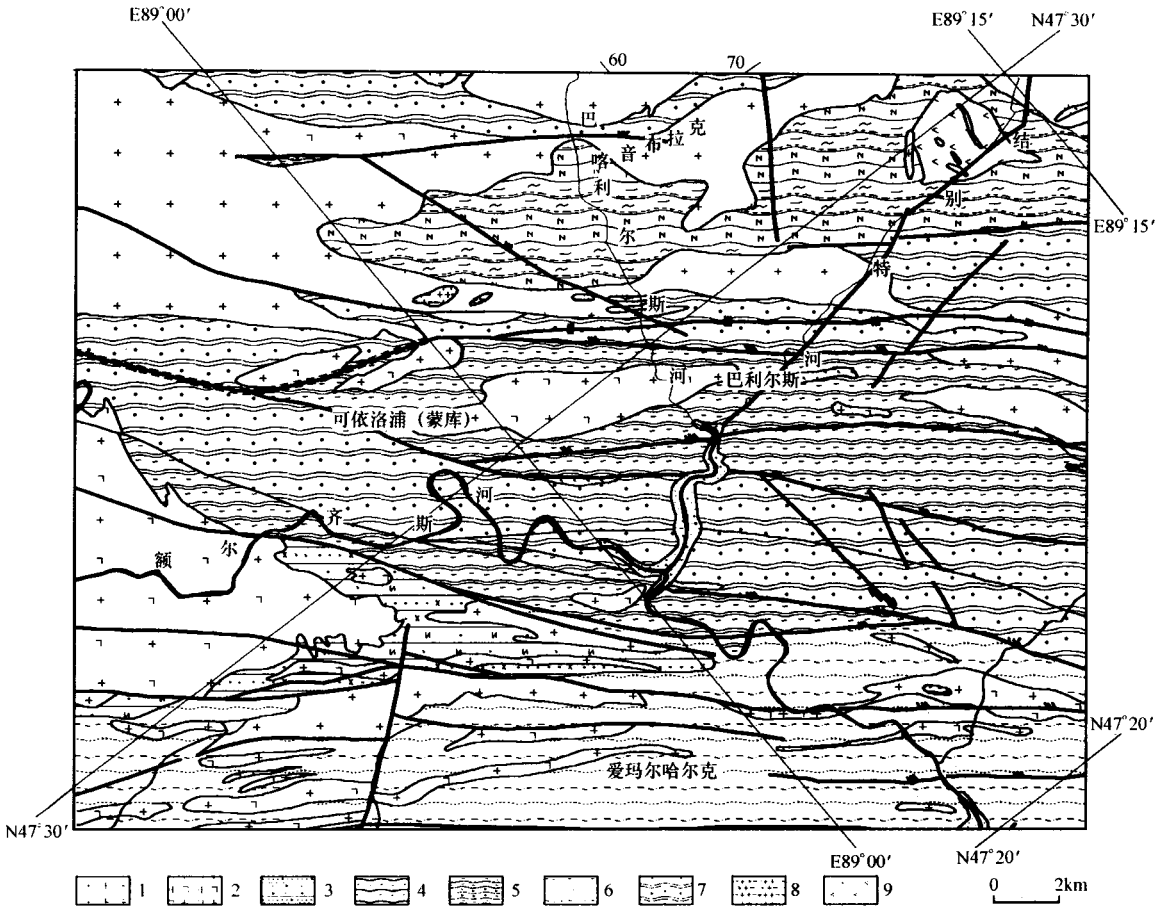


图 1 研究区地质图

1—黑云母花岗岩;2—二云母花岗岩;3—变质泥岩;4—云英片岩、千枚岩;5—二云母混合岩;6—灰色砂岩、泥岩;7—黑云堇青石英片岩;8—黑云母花岗混合花岗岩;9—斜长角闪岩

区内第四系分布甚少,仅在水系较密集和河道较宽处出露一些冲积、风积和残坡积层,岩性多为砂岩、砾石和砂质黏土等。

区内岩浆活动发育,主要是侵入岩分布广泛(图 1),以规模巨大的华力西中期侵入的灰色中粒黑云母花岗岩、片麻状黑云母花岗岩和晚期的灰色中细粒黑云母花岗岩、灰色肉红色细粒花岗岩为主,成大片状分布在区内北部和成条带状或斑块状分布在区内西南部。区内蚀变主要以绿泥石化、绿帘石化和绢云母化为主。

由于该地区处于蒙古阿尔泰复杂构造带内,在地质史上经历了多期次的构造运动,所形成的构造形迹相当复杂(图 1)。一系列的俯冲断层以及侵入岩体分布都呈现出近北西—南东向展布,并具有向西撒开和向东收敛的趋势。相伴生的北东、北北西向扭动断裂也很明显,在区域上总体呈现出以北西向构造体系为主体的构造格架。该地区多期多次构造运动,对区内的岩层出露、岩浆活动和矿产分布皆起着重要的控制作用。

区内断裂构造发育,主要为北西向断裂,其穿越研究区两侧,成带分布,规模大小不一。另外,还分布有少量近 SN 向和 NE 向构造。

2 数据预处理

2.1 数据准备

该次研究选用的数据为加拿大 RadarSat 星提供的雷达图像(SAR)数据和美国 Landsat 星提供的 ETM⁺ 多光谱图像数据,其特点如表 1 所示:

表 1 SAR 和 ETM 数据特点

	SAR 数据	ETM 数据
成像模式	侧视成像	星下点成像
数据格式	16 位无符号整形	8 位无符号整形
成像波段数/个	1	8
波长	0.56cm	0.4 ~ 10.26μm
地图投影	N/A	SOM
地球模型	KRASOVSKY	WGS84
空间分辨率/m	30	30
成像时间	2001-10-03	1999-10-07

2.1.1 雷达图像数据

雷达图像是地面目标对入射微波后向散射信号的灰度显示形式,其实质是微波特定波段能量的编码与展示。

影响地面目标后向散射信号强弱的因素主要有两个方面:一是来自雷达系统的某些参数,比如发射波的波长、极化方式、俯角、探测方向等;二是地面目标特征,包括目标形状、粗糙度、体散射、介电常数、地形等。对雷达图像地学用户而言,普遍而重要的两项参数指的是目标的粗糙度和复介电常数。影响目标介电常数的最重要因素是湿度^[2]。

雷达遥感是一种主动微波遥感技术。由于它是主动发射能量,成像不受光照和天气的影响,因而具有全天候、全天时对地观测能力,在一定条件下,长波长微波还具有对地物一定的穿透能力^[3-4]。

雷达成像为侧视成像,与星下点成像的光学图像相比,它具有独特的几何特点:① 图像用斜距或地距显示,空间分辨率标准模式下 RADARSAT 是 30m;② 图像会产生透视收缩(雷达图像上量得的地面斜坡的长度都比实际长度短)、叠掩(当目标高出地面时,顶部先于底部成像的现象)和阴影(当雷达波束受到山峰等高大目标阻挡时,这些目标的背面接收不到微波,因此也不会产生回波,结果在图像的相应位置上出现暗区)^[5];③ 雷达图像上反映的结构信息优于多光谱图像,但因只是单波段成像,其反映的地物的波谱信息只是单波段微波信息。

2.1.2 多光谱图像数据

多光谱遥感接收的是地物反射太阳辐射到地面的电磁波和地面发射辐射的电磁波信息,是一种被动遥感,所以其图像数据很容易受天气变化的影响,因而在某些方面的应用也受到限制。

多光谱遥感具有光谱分辨率高、提供地物丰富的多光谱信息的特点。同时,由于其技术上实现相对容易,所以目前世界各国普遍使用。数字成像技术和高分辨率传感器的发展,更大大地拓展了它的应用。

2.2 数据处理

2.2.1 雷达图像处理

雷达图像处理不同于光学图像处理,有其特殊性。这是因为雷达是一种主动式传感器,工作在微波波段,成像机理复杂,靠相干波成像,易产生特殊的辐射和几何畸变。因此,信息形成的机理与提取的方法也有很大的不同^[6]。

一幅雷达图像在使用前,必须进行斑点噪声去除、辐射校正和几何校正。斑点是雷达图像的固有特征,严重影响图像的解释,辐射畸变由天线方向图

引起,其几何校正在概念和算法上与光学遥感有较大差别。从地面站购买的 SAR 图像数据,虽已经过辐射校正和系统级几何校正,但仍不能直接与 ETM 图像数据进行融合处理,需经过几何精校正、斑点噪声去除、投影变换等一系列处理之后方可应用。现分述如下:

1) 几何校正

由于雷达图像是侧视成像,与星下点成像的光学图像相比,其几何畸变要严重得多。雷达图像的几何校正方法有:多项式校正法、数字微分校正法和模拟图像校正法。每种方法各有其应用范围与优点,该次研究中采用精度较高、适合地形起伏变化地区的数字微分校正法。

雷达图像数字微分校正的基本原理是:将原始雷达图像划分为很多微小的区域,逐一根据有关参数和数字高程模型(DEM),利用雷达图像数据构成的数学模型,或按一定的数学模型用控制点解算,将原始雷达图像变换为正射图像。该次研究采用 RADARSAT 提供的专用模型(RSM),利用 RadarSat 星的相关参数数据,提取数字高程模型(DEM),并对雷达影像进行数字微分纠正,生成正射影像。

2) 辐射校正与斑点噪声去除

雷达图像辐射畸变给 SAR 图像的判读、识别、分类、图像匹配等带来极大的困难。因此,必须对雷达影像进行辐射校正。产生雷达图像辐射畸变的因素有雷达成像系统和光斑效应引起的斑点噪声(speckle)。对雷达成像系统引起的辐射畸变可通过辐射定标来消除,一般由地面站完成;对光斑效应引起的相干斑点噪声可通过成像前的多视平滑预处理(效果不好)和成像后的滤波处理来去除。近年来,成像后的去斑点噪声滤波技术研究已成为高分辨率雷达图像处理的主流。该次研究采用改良 K-均值自适应滤波方法消除图像斑点噪声。

经过上述处理的 SAR 图像如图 2 所示。

2.2.2 多光谱图像处理

从地面站购买的 ETM 数据精度较低,不能直接与 SAR 图像进行融合,需进行几何精校正以及增强处理。为了能与雷达图像进行较精确配准,该课题以生成的数字高程模型(DEM)对 ETM 图像进行正射校正,这样处理后的 ETM 就可以与 SAR 图像进行较好的配准。经正射校正与增强处理后生成试验区的假彩色合成图像如图 3 所示。

3 融合处理方法的基本原理与应用

3.1 多源信息融合的概念

遥感多源信息融合是指在同一地区不同类型数

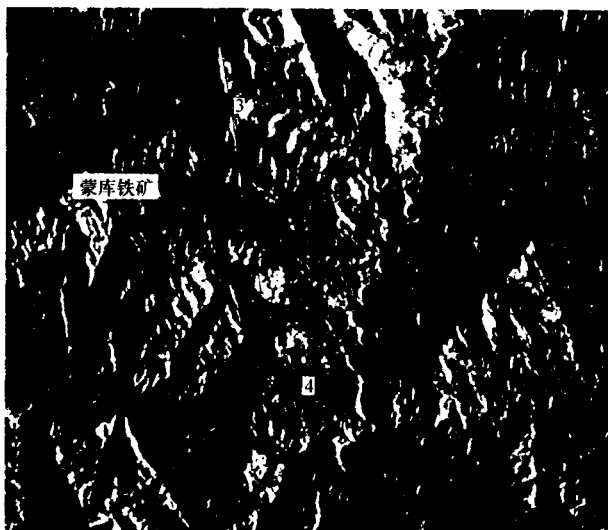


图2 经几何校正、辐射校正、噪声去除处理后的 SAR 图像

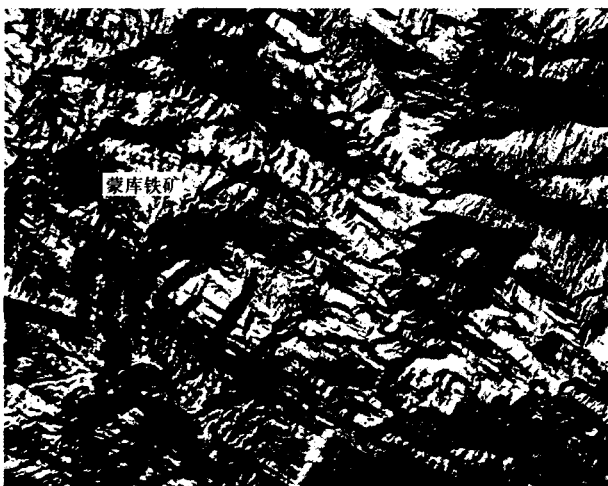


图3 ETM741 合成图像

据进行空间配准的基础上,用一定的算法对各数据中所含的信息优势进行有机综合,产生比直接从众多信息源得到的信息更简洁、更少冗余、更为优化的信息表征的数据技术,是近几年来国际遥感界研究的热点,并成为解决多源海量数据融合,提取有用信息的关键技术之一^[7]。

3.2 图像融合的方法

ETM 图像反映了较丰富的地物光谱信息,雷达图像以侧视成像为特点,反映了更多的结构信息。将两种图像在校正、配准的基础上进行融合,可以弥补单一数据源反映信息的不足和片面性。图像数据融合的方法很多:有图像的算术运算,有高通滤波、基于多分辨率的小波分析、IHS 变换、主成分分析等融合方法^[3,6],每种方法都有各自的优势。该次研究为了突出研究区构造及含矿信息,选用 HIS(彩色)变换融合方法,其基本原理如下:

HIS 变换是三原色 RGB(红、绿、蓝)和 HIS(色度、亮度、饱和度)系统之间的变换。该方法是一种图像显示、增强和信息融合的方法,具有灵活实用的优点,因此,该方法是多源遥感图像数据融合中常用的方法。

由于 RGB 颜色模型与颜色的基本属性模型 HIS(色度、亮度、饱和度)没有直接的联系,即 R、G、B 的数值并不能直接描述彩色,因此,在遥感图像数据融合中,首先要将颜色空间变换到 HIS(色度、亮度、饱和度)空间,并在此空间调整亮度或饱和度后,再返回到 RGB 空间进行彩色合成^[4,7]。常用的变换模型有三角形、六棱锥等,该次研究采用三角形变换模型。

HIS 变换融合可分为 I(亮度)融合、S(饱和度)融合、IS(亮度、饱和度)融合方法。其中 I 融合的方法是最常用的方法,也是该次研究中使用的方法,下面将重点加以介绍。

SAR 图像与 ETM 图像进行 I 融合的方法是:先求出 ETM 合成图像的 HIS 值,然后以 SAR 图像数据代替 HIS 中的 I(用 I' 表示)分量,再将 HIS 作反变换,生成新的 R、G、B(用 R' 、 G' 、 B' 表示),由这 3 个分量合成的图像就是 I 融合图像。I 融合彩色变换流程如图 4 所示:

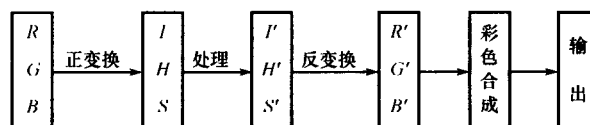


图4 I 融合处理流程图

图 4 中表示 RGB 与 HIS 之间的变换,采用三角形正、反变换模型进行变换。经 I 融合变换处理后生成新的 RGB 图像,其中 H 和 S 色度指标与原 ETM 合成图像相同,由于用 SAR 数据取代 I 分量,每个像素的亮度取决于 SAR 数据的大小,因此,融合图像的亮度差异量是 SAR 信息的反映。这样,由于亮度变化,将会引起图像明暗层次的变化,而图像的空间分辨率,即为 SAR 图像的空间分辨率。经 I 融合处理后生成的图像见图 5。

4 雷达、ETM 图像与融合图像应用效果的对比分析

4.1 雷达图像与融合图像的对比分析

4.1.1 SAR 图像

图 2 是蒙库铁矿区及其外围的雷达影像图,总体来看,其纹理密集,亮暗色调相间,且有明显规律。其纹理总体突出了南北向的信息(与雷达卫星扫描

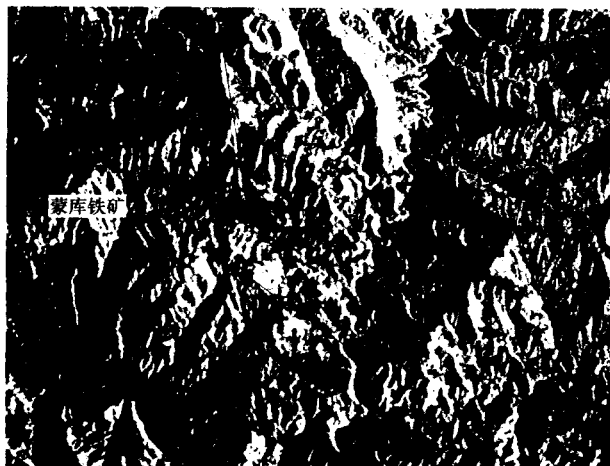


图5 SAR与ETM经I融合后生成的图像

方向有关);暗色调与植被覆盖较多、湿度大以及山体阴影有关;亮色调则反映出植被覆盖少、湿度小、表层裸露等特点。以数字标出的线性体:线性体3推测为一条近南北向的构造线,而且延伸较长;线性体4为一条北西向的断裂。

4.1.2 融合图像

图5是蒙库铁矿区及其外围的融合影像图,与雷达图像相比,不仅保留了雷达图像结构信息丰富的特点(如线性构造体3、4),同时色调丰富,这给岩性和地层解释提供了更多的信息。

4.2 ETM图像与融合图像的对比分析

4.2.1 ETM图像

ETM741彩色合成图像如图3所示,图像色彩丰富,地貌特征明显,其中的蓝色条带为喀拉额尔齐斯河,绿色区为不同程度的植被覆盖,偏红色调部位是不同程度的基岩裸露和土壤风化层,在阴影明显和纹理粗大的部位多为侵入岩体出露区。

1) 构造展布明显,主要是北西向构造,集中在矿区两侧,延伸长,规模大,尤其在矿区南侧,成带分布。

2) 图像中色调纹理的不同,反映出该区地层岩性的变化。

3) 矿区中的矿脉明显呈暗灰色调,条带分布,NW走向,与外围地层的色调纹理有明显不同。

4.2.2 融合图像

与ETM图像相比,融合图像除基本保留了ETM图像丰富的色调信息外,结构信息明显优于ETM图像,从而使融合图像的地质解释效果优于未融合的ETM或SAR图像。构造地貌和风化地貌均显示更为清晰,有利于识别侵入体和地层,以及岩性差别明显增加的层状岩石。线性构造信息增强尤为显著,图中线性体4与多光谱图像一致,但是线性体3在

融合图像上清晰可见,在ETM图像上不明显。还有许多NW和NNW走向的线性构造信息得到更清晰更真实地展现。这说明融合图像反映了更多的结构信息。

蒙库铁矿的成矿与中泥盆统的岩性、层间构造和次级裂隙关系密切,并与花岗岩类的侵入有一定关系。ETM与SAR的融合图像含有丰富的上述与成矿有关的信息,通过地质解译预测铁矿带的展布,结合后期找矿实践,取得了良好效果。

5 融合技术在矿产勘查中的应用分析

相比雷达图像与ETM图像而言,融合图像兼有结构信息和色彩信息丰富的优点,大大提高了对地质体的识别精度和可解性,在矿产勘查中将会有很大的应用空间,其显著的优势主要表现为:

1) 在融合图像上不同地质体边缘清晰、界限分明,更有利于岩性解译。该研究区主要由泥盆纪地层和与其成断层接触的下伏志留纪地层组成,矿床主要产于泥盆纪地层之中。由于后期剧烈的多期构造运动和华力西中、晚期大规模的岩浆活动,以及区域变质和接触变质等作用的影响,两类地层的岩石普遍遭受强烈变质,形成不同程度的变质岩、混合岩,使得地层的光谱比较接近,在一般的遥感影像上岩性不易区分。利用融合图像结构、色彩丰富的特点,就可以比较好地区分其岩性。比如在融合图像上,由于该区泥盆纪地层的影像不如志留纪地层的影像色彩丰富、纹理粗大和密集,因此使得图像上所显示的这两类地层边缘比较清晰、界限分明,其含矿层位亦容易圈定。

2) 融合图像的线性体丰富,更易于构造解译,并有可能发现新的构造。融合图像把雷达所能探测到的丰富的构造信息叠加到ETM图像上,使得ETM图像上明显走向的构造带得到增强更易于识别,而ETM图像上未能显示出的其他方向的构造和被高山阴影遮挡的构造带延伸部位,以及某些地表下的浅覆构造,都有可能在融合图像上得到显示。在该区的构造解译过程中,融合图像上显示的NW向主构造带更加明显,同时比较清楚地显示出ETM图像上所未能显示出的矿区NW—NNW走向的若干次级构造,而这些次级构造恰恰是该矿区的控矿构造带。

3) 融合图像保留了多光谱图像的色彩特征,能显示出矿化蚀变信息。在该研究区内,蒙库铁矿床产于中泥盆纪地层的浅地表层,与围岩相比,植被覆盖较少,山顶可见已风化蚀变的铁矿露头,成脉状,

多显暗红色,含少量浅色,且有多处已成颗粒状风化面。在融合图像上,其光谱特征与围岩有明显的差异,即在偏绿色的背景上呈现为一条长约十几公里,宽约几公里的暗蓝红色的色彩异常条带,成NW走向展布,其与已探明和正开采的十几条矿脉分布有相当一致的吻合性,且在该异常条带向SE延伸的部位又发现多处新的矿脉。

4) 在融合图像上,岩体信息得到增强,色彩、纹理信息更加突出。该研究区的侵入岩分布广泛,以规模巨大的华力西中期侵入的灰色中粒黑云母花岗岩、片麻状黑云母花岗岩和晚期的灰色中细粒黑云母花岗岩为主,主要分布于矿区的北部和东南部。由于其受后期构造强烈活动的影响,切割剧烈,多形成高峰深谷。其阴坡山势较陡,多生长茂盛的植被;而阳面较平缓,植被较少,裸露的岩石和风化砂土层成片出露。因此,在遥感图像上阴坡多是宽大灰暗的阴影区,而阳坡构造解译标志的陡坎线多被淹没,造成图像解译的困难。利用融合图像色彩、纹理信息丰富的优势,既使得ETM图像中的阴影区得到改善,突出了岩体阴影区的纹理色彩,又增强了阳坡的岩性结构特征。因此,融合图像色彩、纹理信息丰富的这一特点,为在识别岩体、解译构造以及在最终圈定与构造和岩体有关的成矿预测区工作中,可提供更有利的依据。

6 结 语

文章阐述了雷达图像数据与ETM图像数据的特性。重点介绍了雷达图像几何精校正方法,雷达

图像与ETM图像融合的原理与方法。通过对比分析研究区雷达图像、ETM图像和二者融合后生成的融合图像,得出融合图像既反映出了ETM多光谱图像色彩丰富的特点,也反映出了雷达图像结构信息丰富的特点,如地质体边缘清晰、界线分明、构造信息丰富、易于解译并发现新的细小构造。其次,使ETM图像中的阴影区信息得到改善,突出了阴影区的纹理结构信息,从而提高了研究区地物及找矿信息的识别与判读,更好地为地质找矿服务。

另外,该研究还发现,雷达与ETM图像融合后生成的融合图像,其清晰度不如原ETM图像,这可能与融合的方法有关,至于采用何种方法才能最大限度的保留原光学图像的光谱信息,还有待进一步研究。

[参考文献]

- [1] 郭华东,李林,董品亮,等.新疆北部地质矿产遥感[M].北京:科学出版社,1995:111-140.
- [2] 郭华东,王长林,邵芸,等.雷达对地观测理论与应用[M].北京:科学出版社,2000:140-233.
- [3] 肖国超,朱彩英.雷达摄影测量[M].北京:地震出版社,2001:29-94.
- [4] Jensen John R. Remote Sensing of the Environment [M]. Prentice Hall, New Jersey, 2000,285-229.
- [5] Richards John A. Remote Sensing Digital Image Analysis [M]. Berlin: Springer - Verlag Heidelberg,1995.
- [6] Jensen John R. Introductory Digital Image Processing - A Remote Sensing Perspective (Third Edition) [M]. New Jersey Prentice Hall, 2004.
- [7] 刘纯平,夏德深.遥感中的多源融合研究与应用[A].全国地方遥感应用协会2001年年会论文集[C].2001,21-22.

APPLICATION OF FUSING TECHNOLOGY OF RADAR AND MULTISPECTRAL IMAGES ON ORE EXPLORATION

ZHAO Zhen - mei^{1,2}, LI Xiang - qiang², LEI Hua², LI Yin - hai²

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083;

2. Center of Remote Sensing, China Bureau of Exploration and Engineering, Beijing 100029)

Abstract: Characteristics of radar and multispectral images are discussed, and principle and methods of fusion and transformation of radar and multispectral images are especially introduced on the base of geometrical precise correction. The images after fusing reflected not only rich multi - spectral characteristics of multispectral images, but also plentiful structures on radar images. Thus, the fusing images increased largely identification and readability of land - over, and can be applied widely in the fields of geology and ore exploration.

Key words: radar images, multispectral images, fusion, data differential coefficient correction, comparing analysis, ore exploration