卷(Volume)35,期(Number)4,总(SUM)131
页(Pages) 603~611,2011,11(November, 2011)

大地构造与成矿学
Geotectonica et Metallogenia

西昆仑北部地区铅锌铜矿带遥感构造蚀变信息提取与成矿预测

周灵洁[1,2],张正伟[1],程远[3],沈能平[1],张中山[1,2],游富华[1,2]

(1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室,贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院 研究生院,北京 100049; 3. 河南省有色金属地质矿产局 第五地质大队,河南 郑州 450016)

摘 要:根据遥感异常信息提取的需要,在西昆仑北部地区的典型矿区——铁克里克-卡兰古铅锌铜矿带采集地表蚀变岩石样品,应用短波红外矿物分析技术对其矿物组合进行波谱分析,以 ASTER 和 ETM$^+$ 数据为基础提取矿化蚀变信息;同时通过图像增强等多种数据处理方法提取研究区的线性构造及环形构造,得到研究区 1:100000 的遥感异常图。从已知矿点在空间的分布情况看出,西昆仑北部地区铅锌铜矿带不但受地层层位的明显控制,构造控矿作用也十分明显。因此,结合矿化蚀变强烈程度、地层层位和该区赋矿层位吻合情况、构造活动强烈程度等综合情况,圈定出一级成矿预测区 3 个,二级成矿预测区 4 个。

关键词:遥感;矿化蚀变;线性构造;环形构造;西昆仑

中图分类号:P627; P612 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-1552(2011)04-0603-009

西昆仑北部地区位于塔里木盆地的西南边缘,地处高寒缺氧区,地形切割十分强烈,植被覆盖稀少,环境恶劣,野外地质工作难度较大。该地区山前地带铅锌矿化遍布,是我国重要的铅锌矿成矿带。长期以来,许多地质工作者对此开展了大量的调查研究工作,取得了一系列的成果,主要集中在物质来源和成矿系统的建立(祝新友等,2000;匡文龙等,2002a,2002b;匡文龙和刘文伟,2006;印建平等,2003;周志坚等,2004)、区域地质历史和构造运动对成矿作用的影响(姜耀辉等,2001;董永观等,2003;张正伟等,2009)、矿床地球化学研究(祝新友等,1999;王书来等,2001,2002;杨向荣等,2009;沈能平等,2010)等方面。然而,对西昆仑铅锌铜矿带的成矿类型,还具有争议。有观点认为是 MVT 型(王书来等,2001;匡文龙等,2002a,2002b;匡文龙和刘文伟,2006),也有观点认为是沉积-改造型的构造控矿(张正伟等,2009)。到底构造运动对成矿作用具有怎样的影响,通过传统的矿床地质勘探方法,很难从宏观上把握构造运动与成矿规律的关系。而遥感图像可以提供新的视野,对矿点的分布及其与断裂构造的相互联系提供可靠的科学依据,同时为成矿预测提供快速准确的技术指导。

由于西昆仑地区植被覆盖程度很低,前人已对西昆仑其它地区,如恰尔隆、大同一带(赵玲等,2008;朱余银,2009)、塔什库尔干地区(王晓鹏等,2002;王彪等,2011)等应用遥感找矿进行了尝试,取得了一定进展。但是从遥感数据的选用和图像处理的程度上看,前人工作还不够深入。本文选择西昆仑北部地区——铁克里克-卡兰古铅锌铜矿带为研究区(图 1),以 ETM$^+$ 和分辨率较高的 ASTER 两种数据为基础,利用已知矿区的地表氧化帽——

收稿日期:2010-09-28;**改回日期**:2011-06-21

项目资助:国家自然科学基金(41073042)、国家自然科学青年基金(40903021)、矿床地球化学国家重点实验室自主研究课题。

第一作者简介:周灵洁(1986-),女,硕士研究生,矿床地球化学专业方向。Email: evelynzlj@163.com

通讯作者:张正伟,Email: zhangzhengw@hotmail.com

"铁帽",进行岩石波谱测试分析,将测试结果通过计算机处理,提取西昆仑北部地区铅锌铜矿带的矿化蚀变信息、线性构造和环形构造,并叠加岩性、地层信息圈定成矿预测区。

1 区域地质概况

研究区位于西昆仑地区北部沿铁克里克-卡兰古一带,地理坐标范围:76°00′E~76°30′E,37°50′N~38°40′N。本区大地构造单元包括塔里木板块的铁克里克陆缘断隆和西昆仑构造带,西昆仑铅锌铜矿带从构造上属于塔里木盆地西南缘和西昆仑造山带结合部位,已发现铅锌铜矿床(点)、矿化点 40 余个,总体呈 NNW-SSE 向展布(沈能平等,2010)(图 1)。从矿床的赋矿地层可以看出,矿床(点)受晚古生代泥盆纪和石炭纪地层控制明显,泥盆系主要为一套浅变质的海相陆源碎屑岩;石炭系岩性相对稳定,和上覆二叠系整合接触,总体为中厚层碳酸盐岩,夹少量碎屑岩沉积。中泥盆统克孜勒陶上亚组(D_2k^b)、下石炭统卡拉巴西塔克组(C_1kl)和下石炭统霍什拉甫组(C_1h)等三个层位 Cu、Pb、Zn 含量非常高,为 Cu、Pb、Zn 矿的主要赋存层位。岩浆活动除在卡兰古等地发现有一些辉长岩脉外,未见到其它火成岩出现。前人研究认为,该区铅锌铜的矿化作用和岩浆活动关系不紧密(匡文龙和刘文伟,2006;张正伟等,2009)。

西昆仑北部地区深大断裂十分发育,并控制了次级断裂的发育,制约了区内岩浆侵入活动、火山作用及沉积建造。构造格架主要受三叠纪羌塘-扬子板块与塔里木板块沿康西瓦断裂拼合并发生的造山运动(陆-陆碰撞)的影响,形成 NNW 向构造形迹的断裂和褶皱(印建平等,2003)。区域断裂构造主要分为昆仑山前断裂、卡库亚断裂、克孜勒陶-库斯拉甫断裂、柯岗断裂(又称库地北断裂);区域上克孜勒陶-库斯拉甫断裂与东侧一些断裂组成叠瓦状断裂带,燕山期后的大规模推覆构造和逆冲断层作用,使塔里木西南缘的晚古生代-新生代地层上翘甚至发生倒转,因此,现在观察到的往往是层间断层、推覆面以及区域褶皱的轴向破裂面等构造面在地表的出露线(张正伟等,2009)。从图 1 中,可以看出已知矿床(点)定向的沿断层呈串珠状展布,如阿巴列克铅铜矿集区。这表明成矿作用受到一定的构造控制。

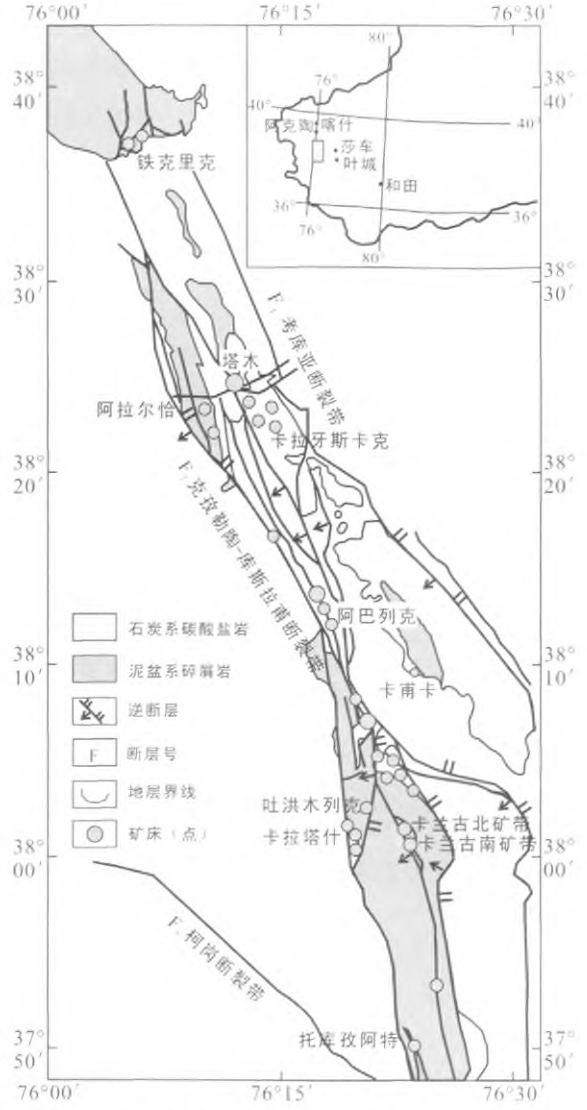


图 1 西昆仑北部地区铅锌铜矿带地质矿产简图

(修编自 1∶100000 地质矿产图,2004)

Fig. 1 The regional geological map of the northern part of West Kunlun Pb-Zn-Cu ore belt

(after 1∶100000 map of geological and mineral resources, 2004)

2 研究技术和方法

蚀变遥感信息提取和遥感构造信息提取技术的发展与地物光谱特征的研究密不可分。地面上的各种岩石,特别是矿体的地表蚀变岩石——俗称"地表氧化帽"或"矿帽"有其独特的光谱特征,可以作为指示矿床和矿带的存在(欧阳京等,2010)。因此,本文以已知矿点地表蚀变岩石的波谱特征为参考样本,提取矿化蚀变信息;同时应用图像增强的方法提取研究区的线性构造和环形构造。本次研究使用了轨道号分别为 148-34、149-34,接收时间为 1999

年 6 月、1999 年 9 月的 Landsat ETM$^+$ 多光谱两景图像(空间分辨率为 30 m),以及对应研究区的 ASTER Level 1B 在 2001 年 5 月接收的两景图像(空间分辨率为 15 m)。下面分别介绍蚀变矿物的波谱测试以及 ASTER 和 ETM$^+$ 数据的处理过程。

2.1　地表蚀变岩石的波谱特征测试与分析

蚀变矿物构成的蚀变岩石与周围岩石的反射光谱特征存在较大差异(赵同阳等, 2009),由蚀变矿物引起的光谱异常不会因为其它矿物的混入而改变(张佩民等, 2009),所以由蚀变矿物构成的蚀变岩石的光谱异常为遥感图像的信息提取提供了理论依据。

本次共采集已知铅锌铜矿床(点)地表蚀变岩石样品共 12 件,包括塔木锌铅矿床 3 件,卡拉牙斯卡克铅铜矿床 2 件,卡兰古铅矿床的北矿带、南矿带分别为 3 件和 1 件,阿巴列克铜铅矿床 3 件。这 12 件样品均采自矿床(点)的地表,有较一致的岩性特征:灰褐色 - 灰黄色块状碳酸盐岩,主要矿物为方解石、白云石、硬石膏、石膏、菱铁矿、褐铁矿等,以及少量后期风化蚀变形成的黏土矿物。

本次波谱测试所用的光谱区间为红外区,最实用的是短波红外区(Short Wavelength Infrared),主要观测的是含水或含羟基的矿物以及某些硫酸盐和碳酸盐类(杨凯, 2001①)。样品测试使用便携式短波红外矿物分析仪(Portable Infrared Mineral Analyser, 简称 PIMA),其波谱分辨率为 7 ~ 10 nm;波谱取样间距为 2 nm。测试过程中,对样品的各表面均进行了测试,每完成一次波谱数据采集后均重新进行白板校正,以减少误差保证每次数据的准确度。样品波谱特征分析采用波谱分析软件 PimaView 3.1, 该软件能自动识别蚀变矿物种类、相对含量以及测试数据的可接受程度。本文选取了接受程度为"一般接受"和"完全接受"两个级别的数据作为有效数据,并对这些数据在 ASTER 和 ETM$^+$ 对应波段上积分求和(图 2),从图 2 中可以直观地看出样品在各波段的吸收反射强度。

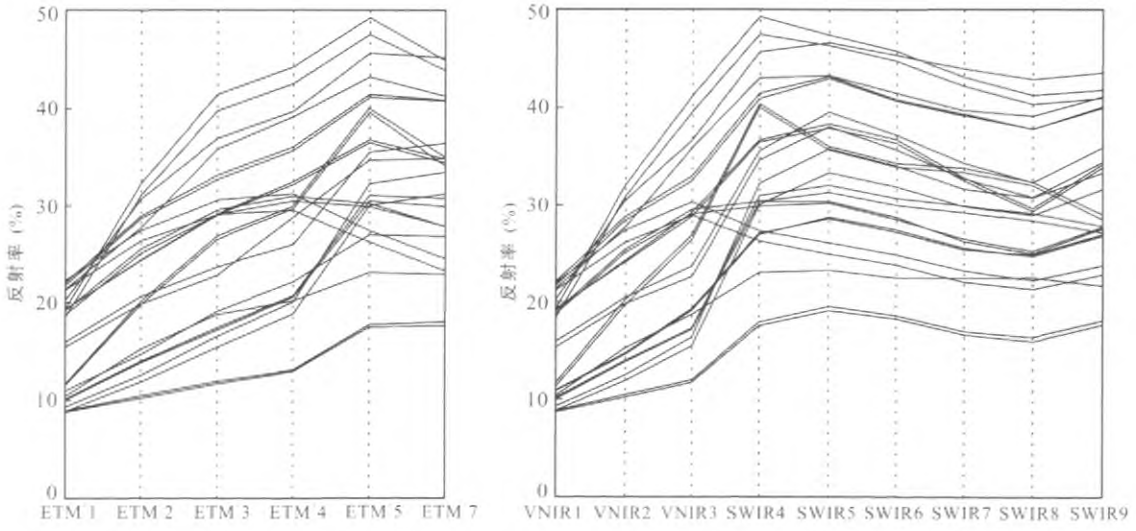


图 2　部分地表氧化帽样品在 ETM$^+$ 和 ASTER 对应波段的波谱反射率

Fig. 2　ETM$^+$ and ASTER band spetra of reflection coefficient for outcrop oxidized caps

2.2　ASTER 和 ETM$^+$ 遥感图像处理

首先,对原始的 ASTER 和 ETM$^+$ 图像分别进行了预处理,包括图像镶嵌、图像裁剪、辐射校正、几何校正。其次,通过有针对性的比值运算分别计算出云、雪、植被、阴影区等干扰因素的干扰窗,然后将各个干扰窗叠加形成总干扰窗图像。最后,将总干扰窗图像从基础图像中过滤掉,得到遥感预处理图像,为后续的矿化蚀变信息提取作准备。

ASTER 图像选取了 VNIR3, VNIR2, VNIR1 三个波段进行 RGB 彩色合成,反差扩展、彩色增强、变换增强等方法,扩大图像中地物间的灰度差别,提高解译标志的判别能力。处理后得到的影像图色彩鲜艳,清晰直观,突出了图像上明显异常的图斑,有利于人工目视解译构造信息。ETM$^+$ 图像选取了相关

①杨凯. 2001. 高光谱遥感在地质调查与矿产勘探上的应用//中国地质调查局. 矿产资源调查与方法技术论文集: 118 - 125.

系数较小的第 7、4、3 三个波段进行 RGB 彩色合成，通过反差扩展等多种图像增强方法得到了纹理清晰、色彩丰富的遥感彩色图像，用以辅助分辨率较高的 ASTER 影像的解译工作。

在 MAPGIS 软件上，将处理后的遥感影像、矢量化后的地质图进行归一化的坐标转换，为进一步的异常信息提取做准备。

3 遥感异常信息提取

遥感异常信息的提取主要包括蚀变遥感信息、构造和特殊岩性的提取(杨建民等，2007)。本文主要应用前两个遥感信息提取技术，识别西昆仑北部地区的铅锌铜矿带的矿化蚀变分布——即地表氧化帽的分布，以及构造信息提取。

3.1 矿化蚀变信息提取

根据 PIMA 分析测试的结果，本次测试共统计出地表氧化帽中的有效矿物 7 种，按照频数从高到低依次为硬石膏、白云石、菱铁矿、石膏、方解石、伊利石和蛋石，这和实际观测的地表氧化帽矿物组合相似。因此，认为 PIMA 分析测试的结果是可靠的，可以作为西昆仑北部地区铅锌铜矿带矿化蚀变信息提取的基础数据。

从图 2 中可以看出，样品波谱数据在 ASTER 的 SWIR6(2185 ~ 2225 nm)波段、SWIR8(2295 ~ 2365 nm)波段为特征吸收波段，VNIR1(520 ~ 600 nm)波段和 VNIR2(630 ~ 690 nm)波段作为提取矿化蚀变异常信息的参考波段；样品波谱数据在 ETM$^+$的第 7 波段(2080 ~ 2350 nm)均有较强烈吸收。根据室内试验结果，方解石在 ASTER 的 SWIR8 波段有吸收，白云石在 ASTER 的 SWIR8 有吸收，伊利石在 ASTER 的 SWIR6、SWIR8 有吸收。因此，以上波谱特征的吸收情况可以看作是硬石膏、白云石、菱铁矿、石膏、方解石、伊利石和蛋石这些矿物组合所引起。Hunt(1977)、Hunt & Salisbury(1978)提出岩石波谱是组成岩石的纯矿物波谱的线性组合，但某种矿物的吸收特征的强弱不但取决于其含量，还取决于辐射能量的可接近程度。因此，有理由认为西昆仑北部地区铅锌铜矿带在 ASTER 的 SWIR8 波段强烈吸收，SWIR6 波段吸收，ETM$^+$的第 7 波段吸收是合理的。

根据地表氧化帽的波谱测试分析结果，选择了 ASTER 的 SWIR6、SWIR8 波段为特征波段，ASTER 的 VNIR1、VNIR2 波段为参考波段，对经过预处理的 ASTER 图像进行了主成分分析和光谱角分类，并以标准离差 σ 作为异常切割尺度，最后加以最优化处理，提取出研究区的矿化蚀变信息。ETM$^+$遥感数据选取了第 1、4、5、7 波段提取羟基蚀变信息，第 1、3、4、5 波段提取铁染异常信息。通过人工目视解译消除了因水体、含水量高的植被、第四纪沉积物等所造成的假羟基异常；并结合地质图剔除了蚀变岩石因剥蚀搬运造成的异地假蚀变异常，主要表现为大面积零乱分散覆盖在中生代 - 新生代地层表面的蚀变图斑。

从 ASTER 和 ETM$^+$提取出的矿化蚀变信息图斑在地质图的分布情况可以看出(图 3)，已知矿化点几乎均出现了矿化蚀变；其次，尽管存在地质图和遥感图地理坐标之间的一些系统误差，但在整体上，

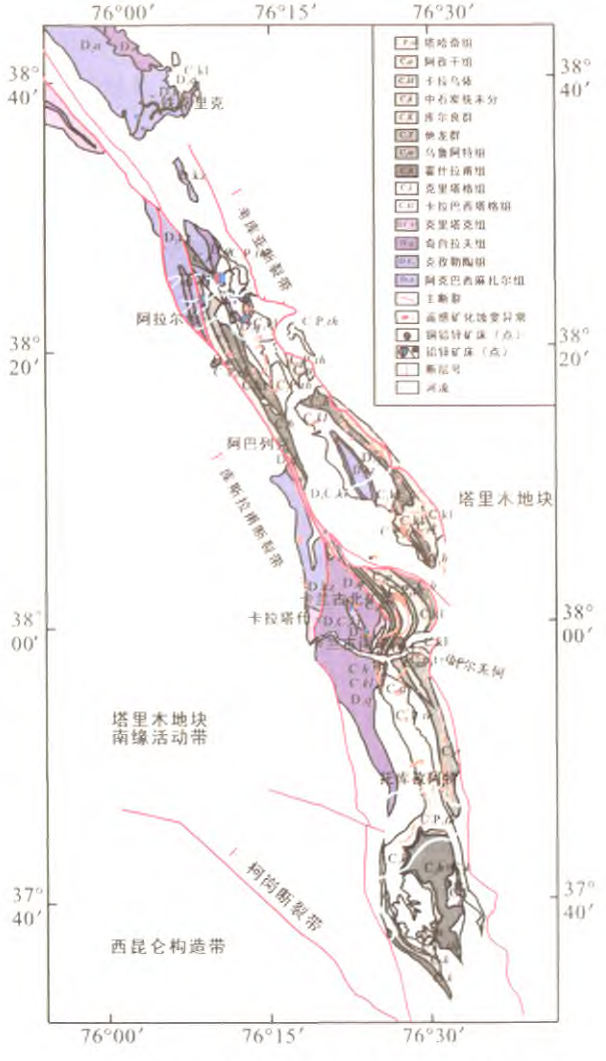


图 3 遥感矿化蚀变信息提取部分示意图

Fig. 3 Map of alteration and mineralization distribution extracted from remote sensing

由于地表氧化帽主要为石炭纪地层岩石的矿化蚀变产物，因此石炭系的展布也被很好地提取出来。以上两点是遥感矿化蚀变信息提取成功的有力证明。

遥感矿化蚀变信息还发现了一些有意义的矿化蚀变分布，比如，卡拉塔什北部出现了明显的矿化蚀变带、卡兰古和叶尔羌河以南的赋矿层位—卡拉巴西塔格组也出现较明显的带状矿化蚀变带（图 3）。这些信息，都为将来的成矿预测提供了可靠依据。

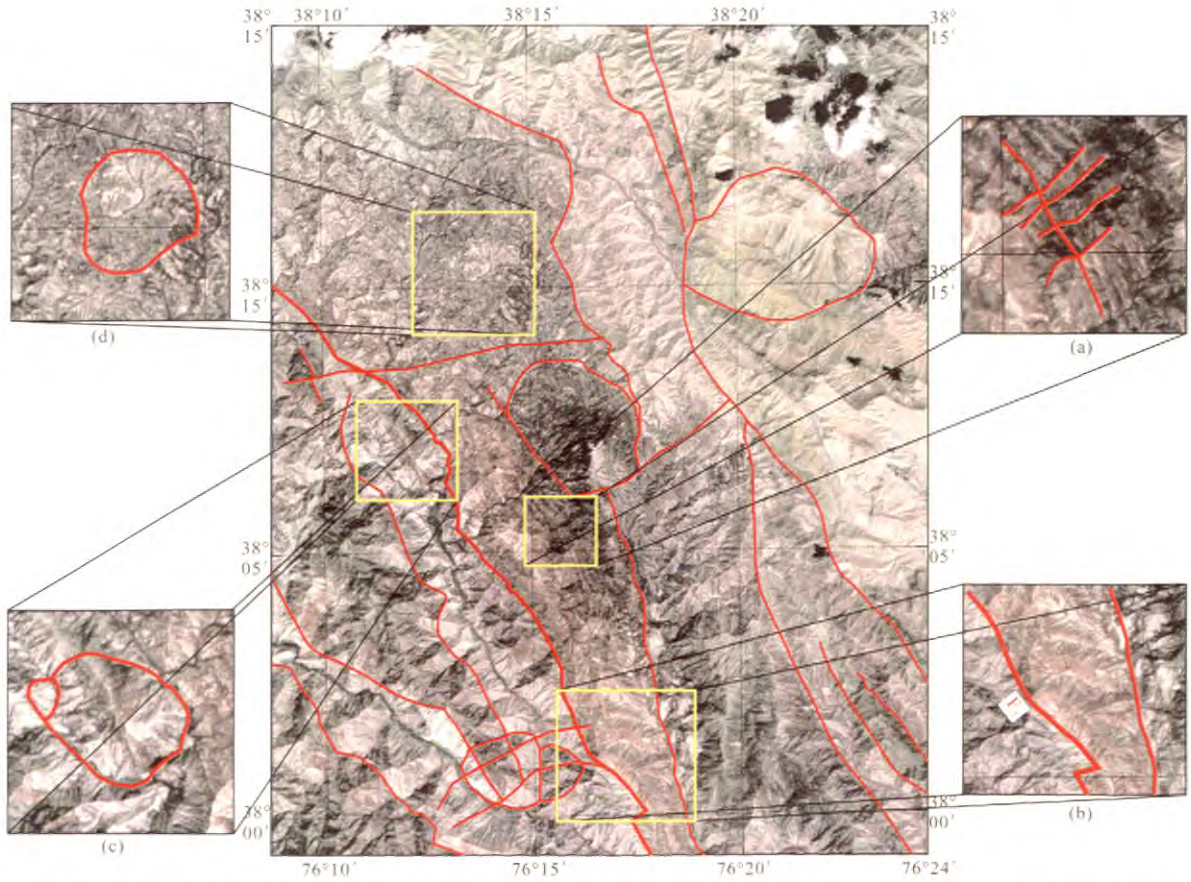
3.2　遥感构造解译

同一幅遥感图像采用不同波段组合或者不同图像处理方法可能造成提取构造信息的效果各有优势（Raharimahefa and Kusky, 2009）。由于 ASTER 图像的分辨率和波段分辨率均要优于 ETM$^+$ 图像，两类遥感影像的处理方法也不完全一致，因此，人工目视解译图像上的线性构造和环形构造是在经过不同处理方法的两种遥感影像上交互解译出的。本文按照遥感影像上异常特征明显的强弱以及展布延伸范围，将全区的线性构造和环形构造分别分为了一级和次级构造，见后文图 5。

3.2.1　线性构造

研究区内大量发育线性构造异常，并且解译标志明显：岩石组合出现色调异常线性特征、水系出现近直角拐弯水系（“弓”字形）、河道突然变直或变宽或变窄、山脊呈直线状延伸或被切断。特别地，叶尔羌河表现出多个“弓”字形拐弯曲流及河道的突然变宽和变窄，表明其受多组不同方向断裂构造控制，属于“构造追踪”曲流。

研究区内卡库亚断裂带 F_1、库斯拉甫断裂带 F_2、柯岗断裂带 F_3 三条主断裂带在遥感影像上清晰可辨。本区主要发育 NNW 向、NE 向、近 EW 向的线性构造：其中 NNW 向最引人注目，线性影像清晰，纹理明显，几乎贯穿整个研究区，控制了整个区域的构造格局；多数 NNW 向和 NE 向常显示出相近的影像特征，如延伸范围和异常带宽度，且没有表现出相互的控制作用，因此可以认为有此类特征的 NNW 向和 NE 向为共轭节理，其形成的节理网络反



（a）. 多条异常的折线且拐弯处受控于另一相交异常线——断裂构造反应构造活动期次；（b）. 色调异常界面、东侧河流在一平直线上突然变窄——断裂构造；（c）. 环形水系，地形隆起——环形构造；（d）. 色调异常、汇聚状水系——环形构造。

图 4　F_2 库斯拉甫断裂带 ASTER 遥感影像构造解译示意图

Fig. 4　Structural interpretation for F_2 Kusilafu fault zone based on ASTER remote sensing

映近EW向的挤压应力;NNW向和近EW向断裂在本区中发现彼此间均有控制作用,大多数为近EW向断裂切割NNW向断裂,但库斯拉甫乡北部10 km处解译出明显的NNW向断裂切割多条近EW向断裂(图4a),说明本区发生了多期的构造变形,这和前人的地质资料相符(张正伟等, 2009);区内的线性构造还控制了该区的环形构造,卡兰古东部5 km处有明显的串珠状环形构造沿NNW向断裂展布。综上所述,本区构造活动强烈,并控制了本区以近南北走向山脉为主的地貌特征。

3.2.2 环形构造

研究区内环形构造最主要的影像特征为放射状或汇聚状或环形水系:从遥感影像中可以解译出明显的水系呈圆弧状、及多条树枝状冲沟成汇聚或发散状,如图4c-d。环间相互的几何关系主要为大环套小环、两个以上近等大的环相切或相交、多个环密集出现在某一区域。从遥感构造解译图中,可以看出小环受大环控制明显,主要表现在大环周围伴生多个小环,这可能是早期形成的大型隐伏侵入体为后期的岩体侵入提供了空间。还有的环形构造表现出呈串珠状的多个小环沿线性构造某侧排列分布,这可能是线性断裂为后期深部的岩浆侵入提供了低应力区。

4 遥感地质解译在成矿预测中的应用

资料显示,我国内生矿床有70%以上分布在环形构造的边部,特别是环形和线性构造的交汇地带(范永香和阳正熙, 2005)。本研究区内断裂特征明显:切割较深、平行断裂和配套断裂发育、活动频繁,同时还具有挤压推覆性质,为本区深源物质交换、运移、聚集、储存及成矿创造了良好的条件。结合遥感影像上解译出来的矿化蚀变信息、线性构造、环形构造,发现研究区内的主要矿点,如塔木锌铅矿床、卡拉塔什铅锌矿床等均集中在矿化蚀变信息强、线性和环形构造线密集的地区。

以研究区内的已知矿床——卡兰古和吐洪木列克为例,从图中可以明显看出通过地表氧化帽提取出的矿化蚀变信息非常强,范围也比较大,其周围NNW向线性构造及伴生的串珠状环形构造十分发育(图5)。结合前人资料,该地区在经过多次的挤压拉张等应力作用后,断裂作用活跃,为成矿流体的运移提供了通道和容矿空间,因此,我们有理由推断卡兰古及其吐洪木列克所处的两大NNW向的带状范围具有明显的成矿特征,是重要的找矿预测区。

西昆仑北部地区铅锌铜矿的成因机制一直是争论的焦点。MVT成矿模式中灰岩的白云石化、有机质的存在、以及上覆下伏地层的岩性等方面对成矿具有至关重要的意义(Spirakis and Heyl, 1995; 李发源等, 2002; Harper and Borrok, 2007; Anderson, 2008),构造控矿并不显著,更强调碳酸盐岩的溶解坍塌的角砾化过程对矿体的控制(张长青等, 2005, 2009);而沉积-改造型成矿模式中,强调矿化和层位的一致性——同沉积作用,以及三叠纪陆-陆碰撞的造山过程中对矿体的改造(张正伟等, 2009)。从矿化蚀变信息提取和构造解译的综合结果中,明显看出已知的40余个矿床(点)、矿化点的分布不仅受层位控制,而且构造控矿作用也十分显著。因此,遥感的解译结果对西昆仑北部地区铅锌铜矿带的矿床成因探讨及成矿预测具有重要的实际意义。

将遥感解译蚀变和构造信息叠加上地层岩性后,可按照矿化蚀变强烈程度、地层层位和该区赋矿层位吻合情况,以及构造活动强烈程度等综合情况,圈定出一级成矿预测区3个:Ⅰ-1卡拉塔什靶区、Ⅰ-2卡兰古靶区、Ⅰ-3阿克奇靶区;在矿化蚀变、构造活动程度一般,但地层层位吻合的地段圈定出4个二级成矿预测区:Ⅱ-1考库亚南靶区、Ⅱ-2考库亚北靶区、Ⅱ-3卡兰古-叶尔羌河以南靶区、Ⅱ-4鲁克也尔靶区。以上7个预测区,特别是一级成矿预测区极具找矿潜力,应作为以后工作的重点。

5 结 论

本次研究不仅按照常规的铁染蚀变、羟基蚀变提取研究区遥感影像中的矿化信息,更为重要的是,实地从已知矿床(点)采集了地表具有矿化蚀变矿物组合的岩石——地表氧化帽,以该类岩石独特的反射光谱数据为矿化信息提取的基础——硬石膏、白云石、菱铁矿、石膏、方解石、伊利石和霰石等矿物组合形成的蚀变岩石反射光谱,将该区具有此独特反射光谱数据的图斑提取出来。试验证明,这种做法是有效的:从遥感解译图中可以看出,提取出的矿化蚀变信息不仅与已知矿床(点)有很高的匹配度,而且能将下石炭统的赋矿层位很好的表现出来。

通过遥感图像增强等技术手段突出了图像中的线性和环形构造,提高目视解译能力。按照遥感影像上异常特征明显的强弱以及展布延伸范围,划分

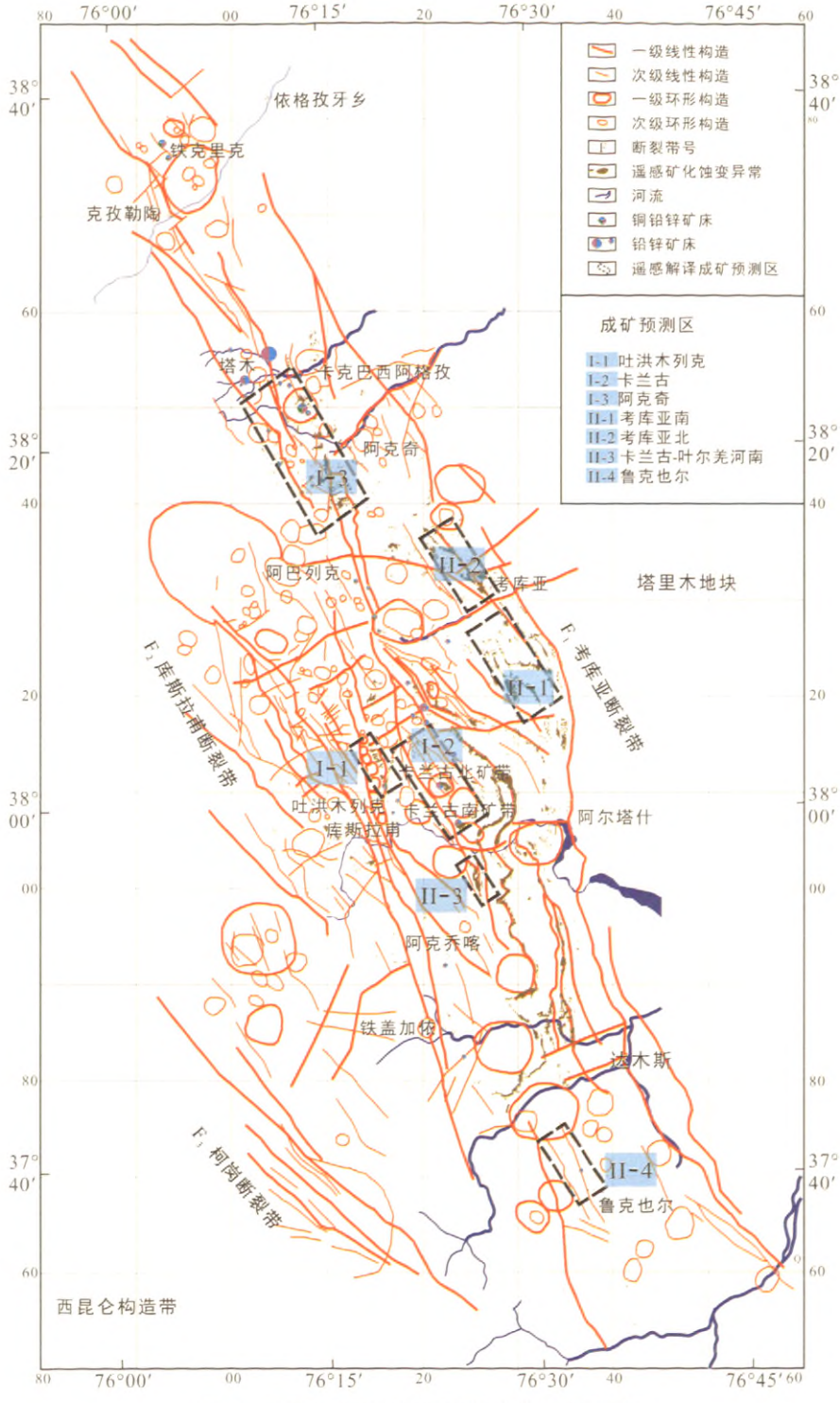


图 5　西昆仑北部地区铅锌铜矿带遥感解译图

Fig. 5　The remote sensing interpretation for the Pb-Zn-Cu ore belt in the northern part of West Kunlun

出一级线性构造和一级环形构造、次级线性构造和次级环形构造。其中，前者对矿床(点)分布的控制作用明显。

研究认为，西昆仑北部地区铅锌铜矿床(点)不仅受地层层位控制明显，同时也表现出明显的构造控矿作用。最后，作者圈定出了一级成矿预测区 3 个，二级成矿预测区 4 个。一级成矿预测区具有极大的找矿潜力。

致谢：矿化蚀变信息异常的光谱数据处理，得到了中国地质科学院矿产资源研究所杨建民研究员、姚

佛军博士的指导和帮助。野外考察期间得到了新疆维吾尔自治区人民政府国家305项目办公室的大力支持。在此一并表示最诚挚的谢意！

参考文献(References):

董永观，郭坤一，肖惠良，张传林. 2003. 西昆仑地区成矿远景. 中国地质，30(2)：173－178.

范永香，阳正熙. 2005. 成矿规律与成矿预测. 徐州：中国矿业大学出版社：69－76.

姜耀辉，芮行健，郭坤一，何菊瑞. 2001. 西昆仑构造格架与成矿堆积环境. 火山地质与矿产，22(1)：1－11.

匡文龙，高珍权，印建平，朱自强，刘石华. 2002a. 西昆仑地区塔木MVT型铅锌矿床成矿作用和成矿物质来源探讨. 矿物岩石地球化学通报，21(4)：253－257.

匡文龙，刘继顺，朱自强，刘石华. 2002b. 西昆仑地区卡兰古MVT型铅锌矿床成矿作用和成矿物质来源探讨. 大地构造与成矿学，26(4)：423－428.

匡文龙，刘文伟. 2006. 西昆仑地区密西西比河谷型铅锌矿床成矿地质条件分析与成矿远景预测. 北京：地质出版社：1－171.

李发源，顾雪祥，付绍洪，章明. 2002. 有机质在MVT铅锌矿床形成中的作用. 矿物岩石地球化学通报，21(4)：272－276.

欧阳京，第鹏飞，王晓伟，于漫，王怀涛，赵志雄. 2010. 基于新疆喀拉通克地区成矿预测的遥感地质解译. 甘肃科技，26(3)：41－44.

沈能平，张正伟，彭建堂，肖加飞，朱笑青，游富华，张中山，王富东. 2010. 西昆仑阿巴列克地区地层样品稀土元素地球化学特征. 矿物岩石地球化学通报，29(4)：388－399.

王彪，陈利燕，王核，任广利，吴玉峰，黄朝阳，付王伟. 2011. 遥感蚀变信息定量提取方法在成矿预测中的应用——以西昆仑塔什库尔干地区为例. 大地构造与成矿学，35(3)：372－377.

王书来，汪东坡，祝新友. 2001. 塔里木西南缘MVT型铅锌矿床流体包裹体研究. 矿产与地质，15(4)：238－242.

王书来，汪东坡，祝新友，王京彬，彭省临. 2002. 新疆塔木－卡兰古铅锌矿床成矿流体地球化学特征. 地质地球化学，30(4)：34－39.

王晓鹏，谢志清，伍跃中. 2002. 西昆仑塔什库尔干地区遥感找矿异常提取方法研究. 地质找矿论丛，17(2)：136－139.

杨建民，张玉君，姚佛军. 2007. 利用遥感技术进行尾亚杂岩体的岩性识别. 岩石学报，23(10)：2397－2402.

杨向荣，彭建堂，胡瑞忠，戚华文，刘燊. 2009. 新疆塔木铅锌矿成矿流体特征与矿产成因. 地球化学，38(6)：536－548.

印建平，田培仁，戚学祥，陈克强. 2003. 西昆仑塔木－卡兰古铅锌铜矿带含矿岩系的地质地球化学特征. 现代地质，17(2)：143－150.

张长青，毛景文，吴锁平，李厚民，刘峰，郭保健，高德荣. 2005. 川滇黔地区MVT铅锌矿床分布、特征及成因. 矿床地质，24(3)：336－348.

张长青，于金杰，毛景问，芮宗瑶. 2009. 密西西比型(MVT)铅锌矿床研究进展. 矿床地质，28(2)：195－210.

张佩民，张建国，杨自安，刘碧虹，肖文进，唐淑梅，郑跃鹏. 2009. 滇东罗平县雄武镇地区遥感蚀变信息提取及成矿预测. 地质通报，28(6)：769－775.

张正伟，彭建堂，肖加飞，朱笑青，沈能平，张中山，游富华. 2009. 塔西南缘沉积岩层控型铅－锌矿带区域构造控矿作用. 矿物岩石地球化学通报，28(4)：318－329.

赵玲，王核，刘建平，任广利. 2008. 西昆仑地区恰尔隆、大同一带ETM遥感影像构造解译. 大地构造与成矿学，32(4)：470－474.

赵同阳，陈川，杜晓畋，徐仕琪，韩婧. 2009. 西准葛尔包古图V号岩体围岩蚀变的特征及ETM+蚀变信息的提取. 地质通报，28(2)：289－296.

周志坚，曾志钢，陈世平. 2004. 新疆西昆仑塔－卡铅锌矿区成矿特征及找矿方向. 矿产与地质，2(18)：128－133.

朱余银. 2009. 新疆恰尔隆地区化探与遥感信息综合应用和找矿预测. 矿产与地质，23(1)：80－85.

祝新友，汪东坡，王书来. 1999. 新疆塔里木盆地西南缘铅锌矿找矿潜力分析. 有色金属矿产与勘查，8(6)：413－416.

祝新友，汪东坡，王书来. 2000. 新疆阿克陶县塔木－卡兰古铅锌矿带矿体地质特征. 地质与勘探，36(6)：32－35.

Anderson G M. 2008. The mixing hypothesis and the origin of Mississippi Valley-type ore deposits. *Economic Geology*, 103: 1683－1690.

Harper D D and Borrok D M. 2007. Dolomite fronts and associated zinc-lead mineralization, USA. *Economic Geology*, 102: 1345－1352.

Hunt G R. 1977. Spectral signature of particular minerals, in the visible and infrared. *Geophysics*, 42: 501－513.

Hunt G R and Salisbury J W. 1978. Assessment of landsat filers for rock type discrimination, based on intrinsic information in laboratory spectra. *Geophysics*, 43: 738－747.

Raharimahefa T and Kusky T M. 2009. Structural and remote sensing analysis of the Betsimisaraka Suture in northeastern Madagascar. *Gondwana Research*, 15(1): 14－27.

Spirakis C S and Heyl A V. 1995. Evaluation of proposed precipitation mechanisms for Mississippi Valley-type deposits. *Ore Geology Reviews*, 10(1): 1－17.

The Comprehensive Interpretation of Remote Sensing Information and Prospecting for the Pb-Zn-Cu Ore Belts in the Northern Part of West Kunlun Orogen

ZHOU Lingjie[1,2], ZHANG Zhengwei[1], CHENG Yuan[3], SHEN Nengping[1], ZHANG Zhongshan[1,2] and YOU Fuhua[1,2]

(1. *State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry; Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang* 550002, *Guizhou, China*; 2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*; 3. *No. 5 Geology Team, Henan Provincial Non-ferrous Metals Geological and Mineral Resources Bureau, Zhengzhou* 450016, *Henan, China*)

Abstract: The Pb-Zn-Cu ore belts in the northern part of West Kunlun are important Pb-Zn ore belts in China. They are located in the Tiekelike – Kalangu area, inbetween the southwest of Tarim Basin and west Kunlun orogen. The deposits occurring in the belt are controlled obviously by the Devonian terrestrial clastic sedimentary and Carboniferous carbonate sediments. We investigated the correlation between mineralization distribution and the fault system through remote sensing image interpretation on the alteration information and comparison with known deposits.

The spectra of altered minerals were interpreted by infrared short wave mineralogical analysis technology. Meanwhile, ore-related alteration information was extracted from ASTER and ETM$^+$ data, while the linear and annular structures were abstracted through data processing such as image intensification. These results show that the Pb-Zn-Cu ore belts in the northern part of West Kunlun orogen appear in the areas with high tectonic activities, and are subjected to Middle Devonian and Lower Carboniferous strata. Therefore, the delimitation of metallogenic prognosis areas is under the limitation of mineralized alteration degree, tectonic activity intensity and the distribution ranges of the ore-bearing layers.

Keywords: remote sensing; ore-related alteration; linear structure; annular structure; West Kunlun