

文章编号:1001-8166(2011)01-0013-17

遥感和光谱地质进展及其对矿产勘查的实践应用^{*}

燕守勋¹, 武晓波¹, 周朝宪², 刘朝晖³, 庄永成⁴, 曹春香¹, 魏欣欣¹, 于彩虹¹, 肖春生¹

(1. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012;

3. 青海西部资源公司, 西宁 青海 810000; 4. 青海省地质调查院, 西宁 青海 810012)

摘要:根据2009年 *Economic Geology* 出版的专辑 *Remote Sensing and Spectral Geology*, 近年来发表的相关文献以及研究和应用的实践, 对遥感与光谱地质进行了综述。内容从测谱学、TM/ETM 和 ASTER 宽波段遥感应用, 到地面和航空高光谱遥感应用与热红外遥感。传统的信息填图主要是解译, 现代遥感不仅能提取地质和蚀变信息, 还能进行其他手段无法进行的有效填图, 结合地球物理、地球化学、野外和实验室光谱等, 还能加深对矿床成因的理解。现代光谱地质结合 XRF 和 GPS 能够对矿物和蚀变带原地定量填图。TM/ETM 从铁氧化物和含羟基矿物来提取矿化蚀变信息, 大区域快速圈定成矿靶区。ASTER 在粘土区 SWIR 的5个波段, 提供了区分粘土矿物类型和一些硫酸盐、碳酸盐的能力, 可以区分粘土、高级粘土、绢英岩和青盘岩, 以及方解石和白云石。短波区的3个铁波段可以区分黄钾铁矾与赤铁矿和褐铁矿。障碍是需要校正到反射率来区分这些矿物组合, 没有辅助数据很难做到这点, 这极大地限制了该仪器作为常规勘探工具的能力。Crosta 提供了多元统计方法对蚀变带填图, 不需要大气校正。ASTER 有5个热波段, 像元大、信/噪比低。有能力对硅质岩和碳酸盐填图, 但噪音多, 并不总是有效。航空高光谱具有矿物填图的实用信/噪比。但航天高光谱 Hyperion 的信/噪比不能满足勘探和填图的要求。热红外是正在发展、尚未应用的勘探工具, 其前景是可对硅质、硅酸盐类和碳酸盐填图。高分辨率遥感图像也为矿区快速评价、矿产勘查以及矿山建设提供了有效的技术支持。最后, 结合国内外研究进展, 讨论了勘查中的数据选择, 给出了建设性的结论。

关键词:遥感地质; 光谱地质; Crosta 技术; 可见光—近红外—短波红外—热红外; 矿产资源勘查
中图分类号: P624; P627 **文献标志码:** A

1 前言

自1983年 *Economic Geology* 遥感论文^[1]发表以来, 26年过去了。

那时是搭载在卫星上的仅几个波段、大像元的多光谱扫描仪, 仅对地表形成概览, 图像处理仅是对结构的增强和构造解译, 发现大构造和伪科学的线性构造分析。现代遥感不仅能提取地质和蚀变信

息, 还能进行其他手段无法进行的有效填图, 结合地球物理、地球化学、野外和实验室光谱等, 还能加深对矿床成因的理解。

传统的信息填图主要是解译, 现代光谱地质结合 XRF 和 GPS 能够对矿物和蚀变带原地定量填图^[2]。

2009年, *Economic Geology* 出版了专辑 *Remote Sensing and Spectral Geology*。本文根据该专辑的主

^{*} 收稿日期: 2010-04-22; 修回日期: 2010-08-24。

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目“低概率蚀变岩及相关地质体的亮光谱遥感探测机理与方法研究”(编号: 40672198) 和“黔西南红粘土型金矿光谱指数研制与 ASTER 填图研究”(编号: 40772199); 青海省重大科技攻关项目“青海省东昆仑成矿遥感快速探测技术和主要矿产成矿规律研究”(编号: 2006-6-160-01) 资助。

作者简介: 燕守勋(1961-), 男, 江苏沛县人, 研究员, 主要从事遥感地质与矿产资源勘查与应用。E-mail: yansx@irsa.ac.cn

要内容、近年来发表的相关文献以及我们矿产资源遥感勘查的实践,写出了该论文。

2 测谱学基础

反射光谱是化学家和矿物学家在 1900 年就开始应用的技术,W W Coblenz 1905—1910 年出版了矿物红外光谱数据,40 年代中期已有用于矿物学研究的红外光谱仪;Lyon^[3]和 Moenke^[4]最早综述了矿物光谱;Farmer^[5]出版了理论和实用方面的专著,Marel 等^[6]编纂了粘土矿物光谱;Hunt 等^[7]出版了主要是土壤中的矿物的光谱,包括氢氧化物,氧化物,层状硅酸盐,碳酸盐和硫酸盐;Hunt 等^[8~12]编辑了矿物短波红外光谱,目前被广为应用;Clark 等^[13]做了扩展;Hauff^[14]做了商业参考库;NASA 喷气推进实验室做了添加^[15];燕守勋等^[15]对此进行了综述。目前的光谱库可在网站上检索:<http://speclab.cr.usgs.gov>, <http://speclib.jpl.nasa.gov>。中国建立了“863”岩矿光谱数据库。

除 VNIR-SWIR 识别的铁氧化物赤铁矿、针铁矿、褐铁矿和硫酸盐黄钾铁矾外,Thompson 等^[16]综述了用 PIMA-II 进行蚀变矿物填图的技术与实例。PIMA-II 主要识别粘土矿物、碳酸盐矿物和硫酸盐矿物(表 1,2)。没有识别铁氧化物的波段,不如 ASD 光谱仪全面。

3 宽波段遥感

TM/ETM 是我们工业的“驮马”,主要识别粘土矿物和铁氧化物。1999 年发射升空的 ASTER,在粘土区 SWIR 有 5 个波段,提供了区分粘土矿物类型

表 1 SWIR 识别矿物的勘查应用实例^[16]
Table 1 Examples of the use of SWIR in exploration^[16]

矿物	蚀变	勘查应用
明矾石	高级粘土化	高硫化物环境,绕高硫化物的分带,低硫化物蒸汽加热的带
迪开石	高级粘土化	绕高硫化物的分带,沉积岩容矿的金矿化
高岭石	高级粘土化和风化岩石	高硫化物,沉积岩容矿的金,分带
迪开石,叶腊石,水铝石	高级粘土化	深度估计
绿泥石	青盘岩化,绿泥石化	VMS 分带,U 矿分带
伊利石,蒙皂石	粘土化	高和低硫化物,分带,U 矿,分带
碳酸盐	碳酸盐化	中温成矿,分带

表 2 用于矿产勘查的在 SWIR 有特征吸收的矿物
(黑体字为关键矿物)^[16]
Table 2 Summary of infrared-active minerals, with distinctive spectra in the SWIR^[16] (key minerals are in bold)

形成环境	标准术语	SWIR 活跃的矿物组合
与侵入岩有关的	钾的(富黑云母的), K 硅酸盐,黑云母的	黑云母(金云母) ,阳起石,绢云母,绿泥石,绿帘石,白云母,硬石膏
	钠的,钠—钙的	阳起石 ,单斜辉石(透辉石),绿泥石,绿帘石,方柱石
	绢英岩化的,绢云母的	绢云母 (白云母—伊利石),绿泥石,硬石膏
	中等泥化的,绢云母—绿泥石—粘土,泥化	绢云母(伊利石—蒙皂石),绿泥石, 高岭石 (迪开石), 蒙脱石 ,方解石,绿帘石
	高级泥化的	叶腊石 ,绢云母,水铝石,明矾石,黄玉,电气石,蓝线石,氯黄晶
	云英岩	黄玉 ,白云母,电气石
	矽卡岩	单斜辉石,钙硅石,阳起石—透闪石,维苏威石。绿帘石,蛇纹石—滑石,方解石,绿泥石,伊利石—蒙皂石,绿脱石
高硫化物浅成热液矿化	青盘岩	绿泥石,绿帘石,方解石,阳起石,绢云母,粘土
	高级粘土—硫酸盐	高岭石 ,迪开石,明矾石,水铝石,页腊石,氯黄晶
	粘土的,中级粘土的	高岭石 ,迪开石,蒙脱石,伊利石—蒙皂石
低硫化物浅成热液矿化	青盘岩	绿泥石,绿帘石,方解石,绢云母,粘土
	冰长石—绢云母,绢云母的	绢云母,伊利石—蒙皂石,高岭石,玉髓,蛋白石,蒙脱石,方解石,白云石
	高级粘土—硫酸盐(蒸汽加热)	高岭石 ,明矾石,方石英(蛋白石,玉髓),黄钾铁矾
中温的	青盘岩的,沸石的	绿帘石,方解石,斜钙沸石,绿泥石,伊利石—蒙皂石,绿脱石
	碳酸盐	方解石,铁白云石,白云石,白云母(富 Cr/V),绿泥石
	绿泥石的	绿泥石 ,白云母,阳起石
沉积岩容矿的金矿	黑云母的	黑云母 ,绿泥石
	粘土的	高岭石,迪开石,伊利石
火山块状硫化物	绢云母的	绢云母,绿泥石,硬绿泥石
	绿泥石的	绿泥石,绢云母,黑云母
	碳酸盐	白云石,菱铁矿,铁白云石,方解石,白云母,绿泥石
沉积岩容矿的块状硫化物	电气石岩	电气石 ,白云母
	碳酸盐	铁白云石,菱铁矿,方解石,白云母
	绢云母的	绢云母,绿泥石
	钠长石的	绿泥石,白云母,黑云母

和一些硫酸盐、碳酸盐的能力;短波区的3个铁波段对硅质岩和碳酸盐填图(图1)。可以区分铁氧化物;ASTER有5个热波段,有能力

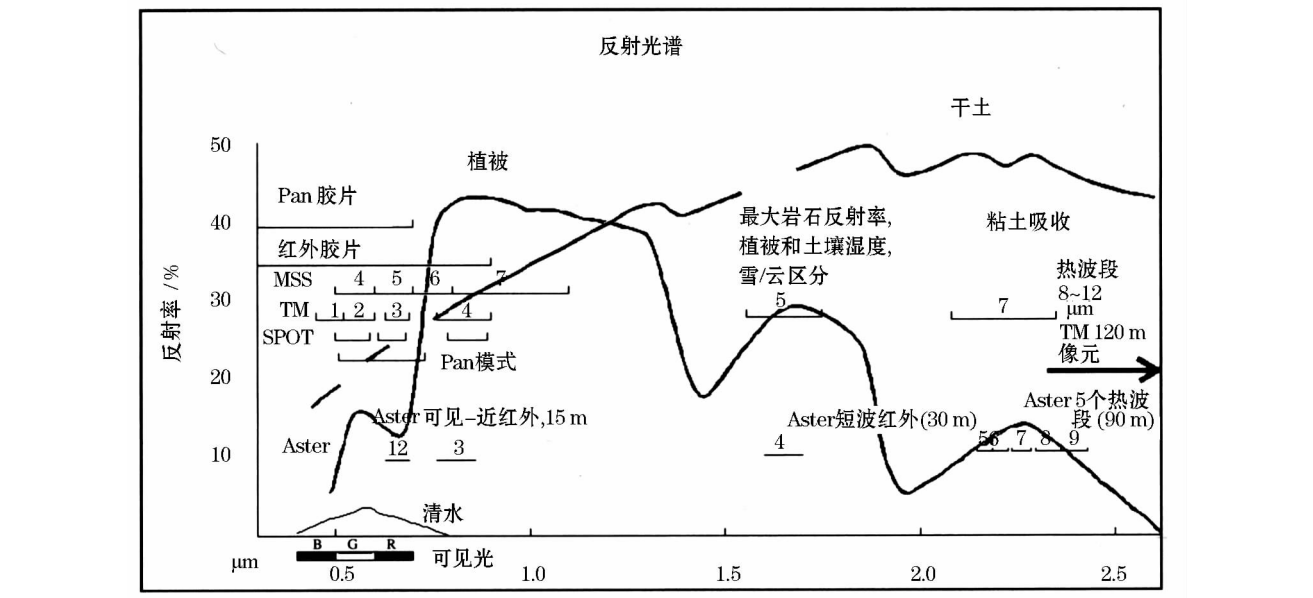


图1 宽波段传感器的波段^[17]

Fig.1 The bands of the broad-band sensors in remote sensing from Pan film, IR film, MSS, TM, SPOT to ASTER^[17]
X轴表示从可见光到短波红外的波长(mm),Y轴表示相对反射率。肉眼可见的波段0.4~0.7mm,特别表示了植被和干燥土的光谱。
短线表示不同传感器的不同波段。为对比做了垂直移动,不代表探测到的能量的变化。注意胶片获取的Pan波段覆盖的宽波段范围。
类似的,为增加信/噪比,数字Pan单波段在可见光到近红外范围

3.1 Landsat TM 信息提取技术

用于蚀变填图和区域地质概览和靶区选择。1972年发射MSS,80m分辨率,没有SWIR波段,能探测铁氧化物和区域地质概览,Landsat1-4类似;1982年发射的Landsat5有30m分辨率,在SWIR有7波段;1999年发射的Landsat7加上了15m分辨率的Pan波段,探测简单的铁氧化物和粘土;2003年因扫描线校正仪(SLC)故障,ETM不再接收。但全球覆盖的TM/ETM数据可从<http://glcfapp. umi-acs. umd. edu:8080/esdi>免费下载。

Sabine^[18]对处理技术进行了综述,Crosta等^[19]综述了主要的处理技术如下:

- (1) Abrams 波段比值算法(Abrams ratio algorithm):使用指定的影像创建RGB合成图。R图层对应粘土比率(Band 5/Band 7),G图层对应铁比率(Band 3/Band 2),B图层对应植被比率(Band 4/Band 3)。
- (2) 特征导向的主成分分析(Feature-oriented principal component analysis,即Crosta技术):用Crosta技术增强ETM数据,提取岩石蚀变信息的过程为,第一步,分别对1、3、4、5波段和1、4、5、7波段

数据做主成分分析;第二步,选1、3、4、5波段处理结果中原始波段1、3的载荷较大且符号相反的主成分为铁化分量,通常为第4主成分,选1、4、5、7波段处理结果中原始波段5、7的载荷较大且符号相反的主成分为羟基分量,通常也为第4主成分;第三步,以铁化分量为红波段,羟基分量为绿波段,铁化分量羟基分量的均值为蓝波段进行彩色合成,形成岩石蚀变信息图像;第四步,在岩石蚀变信息图像上叠加地质矿产图,对所提取的蚀变信息进行遥感地质分析。Crosta技术也可对铁氧化物和含羟基矿物各自产生灰度图像。

- (3) 选择性主成分分析(Selective Principal Component Analysis,SPCA):选择2个波段做主成分分析;选择Band1和Band3做PCA变换,其中第二主成分PC2代表铁比率;如果PC2中Band1对应的成分为负值,应该对PC2*(-1),这样才能使像素值大的像元对应高铁比率;选择Band5和Band7做PCA变换,其中第二主成份PC2代表粘土比率;如果PC2中Band5对应的成分为负值,应该对PC2*(-1),这样才能使像素值大的像元对应高粘土比率。
- (4) 定向主成分分析(Directed Principal Com-

ponent Analysis, DPCA): 将 Band4/Band3 的结果和 Band5/Band7 的结果进行 PCA 变换, 其中第二主成分 PC2 代表粘土比率; 将 Band3/Band1 的结果和 Band4/Band1 的结果进行 PCA 变换, 其中第二主成分 PC2 代表铁比率。

3.2 TM/ETM 应用

3.2.1 Crosta 技术的国外应用

Crosta 技术是 TM 数据处理的成功突破, 可避免如植被等假信息, 保留原始信/噪比。自 Crosta 技术提出以来, 该技术被持续应用于矿床蚀变岩增强中^[20~33]。

Loughlin^[20,21] 率先成功应用, 在美国 Nevada Gold Bar 金矿床发现了 5 个矿体, 叫做金棒拓展矿床。

内华达 PascoCanyon 是新发现的金矿区。用 Crosta 技术在详细地质填图的密集勘探区, 新发现了表生蚀变带: 400 m × 600 m 的沸腾脉群, 即方解石后的叶片状石英和角砾。这里从未被填图出来和立桩标界与钻探, 2004 年首选钻探。表明 1982 年来的 TM 仍可导致新的发现^[17]。

其他文献^[22~33] 的应用不再详述。

3.2.2 我们的应用新发现

统计青海东昆仑^[3]、内蒙赤峰、新疆东天山、西昆仑、东非等地的 700 多个矿床(点), 发现 Crosta 彩色合成图像上, 高含铁氧化物的暗红图斑主要与铁、铅锌、金、铜、钼矿有关, 高含铁氧化物与高含羟基矿物的亮白图斑主要与内生铜矿有关, 总相关率达 45%。图 2 是几个典例示意图。

图 2a 高雪西二八五铜矿点: 位于西段昆南成矿带、含高羟基和高铁氧化物矿物亮白色调边部, 容矿岩石是元古代金水口群变质岩, 受 NW 西向断层控制。

图 2b 江巴尔日当金铜矿: 处在昆南构造带、半环形亮白色调高含羟基矿物和氧化铁矿物火山机构中, 围岩为石碳—二叠系碳酸盐岩及火山岩, 受北西西向断裂带控制。主要沿亮白色调环火山机构和暗红色调区寻找热液脉型和矽卡岩型金铜铁矿。

在青海东昆仑还有多处位于亮白图斑或条带边部的铜矿点, 如牙马托、高雪山等铜矿带, 都是未来勘探的目标^[4]。

图 2c 景忍一虎头崖多金属矿区: 位于西段祁曼踏格昆北成矿带, 暗红色调氧化铁矿物区为矽卡岩化碳酸盐岩, 出露岩石为元古代金水口群变质岩、石碳系碳酸盐岩、海西期花岗岩类, 北西、东西向断层。

在暗红色调氧化铁矿物区及其外围有多处矽卡岩型和 SEDEX 型多金属矿。

图 2d 小洪山铁矿: 处在西段拉陵灶火区昆北成矿带, 暗红色调铁氧化矿物区为矽卡岩化碳酸盐岩, 矿化位于石碳系大干沟组碳酸盐岩与海西期花岗岩类接触带, 受北西向断层控制。

在暗红色调氧化铁矿物矽卡岩化碳酸盐岩区寻找矽卡岩型铁、铜、铅锌矿。

图 2e 赤峰敖伦花斑岩中型铜钼矿(黄点): 地质条件是: 上二叠统林西组中的中性火山岩, 燕山期花岗斑岩, NE、近 SN、NW、EW 向断层。暗红图斑处为火山机构: 一个 NE 向长纺锤形红色图斑, 暗红色调在中偏西部, 外围色调变浅。该图斑 S、N 边部受 EW 向断层控制, 西边受 NW 向断层控制, 东边受 NE 向断层控制, 一条 SN 向断层穿过图斑中部, 暗红图斑在该 SN 向断层的两侧。暗红图斑的 S、N 边界也是 EW 向小断层, E、W 边界是 SN 向小断层。钼矿位于暗红图斑的南缘。

图 2f 赤峰半拉山隐爆角砾岩型中型钼矿(黄点): 燕山期花岗闪长岩, 下二叠统大石寨组中性火山岩, 上侏罗统白音高老组流纹质火山岩—火山碎屑岩, NE、NW、EW 向断层。暗红图斑是火山机构, 处在分开大石寨组与白音高老组的 NE 向断裂上。整体是一个圆环形的红斑, 暗红色调在中部沿断裂带分布, 向外色调变浅。外围在大石寨组中有一铜矿。

图 2g 埃塞俄比亚 Adola 金矿田^[34,35]: 南部 Adola 金矿田(唯一的采矿区, 1980 年发现后又发现 PG01 Lega Dembi 和 PG02 Sakaro 金矿)。Lega Dembi 62 t, Megado 23.76 t, Sakaro > 3 t。造山型中温矿床。1979—1981 年的勘探项目发现了 Lega Dembi, Sakaro 金矿床和 PG03 Wollene, PG04 Kumudu 等金矿点及其他矿化, 进行了填图、坑探、槽探、钻探、地球物理、地球化学等勘探。图上符号 AG 都是砂金矿, 这些原生金矿全都处在近 SN 向铁氧化物暗红图斑的东南边缘。

(1) Lega Dembi 金矿(PG01): 1979 年发现含金石英脉, 金品位 26.7 g/t。1988 年露天开采, 年产 3 t。200 m 以上储量 62 t, 平均品位 4 g/t。矿脉产在南北向剪切带中, 处在低级变质岩(石英—云母片岩、透闪石—阳起石片岩、滑石片岩)与高级花岗片麻岩(石英—长石—云母和黑云母—白云母片麻岩)接触带。北部石英脉地面出露长达 2 000 m, 宽 85 m; 中部有 21 条石英脉, 厚 0.1 ~ 0.7 m, 最厚 65 m;

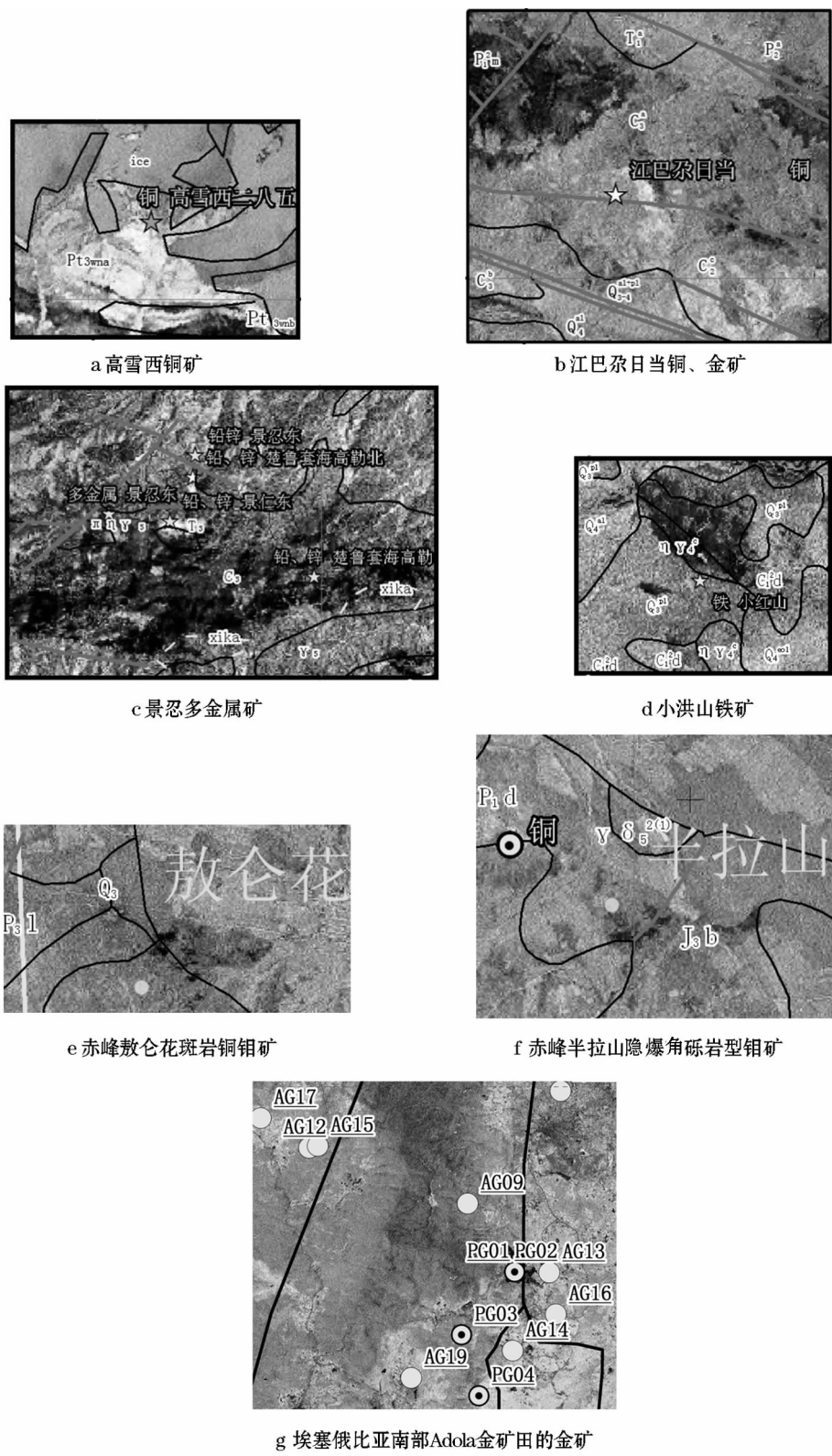


图 2 Crosta 彩色合成图像上的亮白与暗红图斑与矿床(点)的关系示意图
Fig.2 Examples showing the relationships of the white and wine color patches in the Crosta images with the metallic deposits or occurrences

南部 6 条石英脉,长 840 m,平均厚 3.4 m。南部矿脉北东西向断层向东错断,有 0.5 ~ 5 mm 的明金。

(2) Sakara 金矿 (PG02):在残积层中发现砂金后,在山脊上追索到含金石英脉。初次分析金品位 0.5 ~ 25 g/t,银品位 2.2 ~ 203.5 g/t,1979—1980 年勘探。矿床产在 SN 向 Megado-Digati 地轴向斜边部 Adola 组石英—云母片岩、角闪片岩、石墨片岩、透闪石—阳起石片岩中,有石英脉和基性岩脉。剪切带处在斜长角闪岩与变质沉积岩接触带。4 个 NE 向石英细脉群延伸 770 m,厚 2 ~ 9.3 m。金品位从微量到 52.3 g/t,平均 4.8 g/t。

(3) Wollena (PG03):4 条走向 SN、NW-SE 倾向西的石英脉和细脉、脉线和硅化带赋存在斜长角闪岩、石英—云母片岩和石墨片岩中。地表最大出露长度石英脉为 300 m,硅化带为 400 m,厚 7 ~ 20 m。金品位从微量到 0.8 g/t。

(4) Kumudu (PG04):该矿处在浅色花岗片麻岩、滑石、透闪石、角闪片岩之下,少量石英—云母和石英—石墨片岩。SN 向构造伴有石英细脉、硅化带和石英—电气石脉。A 类乳白色石英脉含金微量,含方铅矿、黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿;B 类透镜状石英脉赋存在含滑石的岩石中,长 40 ~ 220 m,宽达 4 m,金品位 12.6 g/t;C 类小石英透镜体和细脉,长 10 ~ 20 m,宽 10 cm,与 B 类相伴;D 类为石英网脉,赋存在片麻岩中,经常含 0.01 ~ 1 mm 的明金,金品位可达 20.5 g/t。

(5) 野外找矿试验:2009 年 5 月,我们对新疆东天山的 Crosta 图像上的 5 个暗红图斑进行了找矿验证(图 3),结果如下:

用一天时间验证琼河坝钾长花岗岩中的小暗红图斑。在暗红图斑中部 NWW 向构造带中的若干小石英脉中发现黑钨矿,但无云英岩化,可能剥蚀程度较高(图 3a),图 3b 为含黑钨矿石英脉野外照片。

用一个上午在双峰山验证暗红图斑,发现这里是 NE40° 的硅质岩、石英斑岩、流纹岩带,有褐铁矿化,在斑岩与大理岩接触带的矽卡岩中发现赤铁矿囊(图 3c),在暗红图斑处有有色 704 队挖的探槽(图 3c,d),有 NE 向褐铁矿化、硅化角砾岩构造带,图 3d 为暗红图斑处的探槽;图 3e 为赤铁矿矿囊野外照片。

用一天验证暗红图斑。追索其南缘 NWW 向闪长岩—硅化构造带,在钾化、绿帘石化闪长岩中发现铜矿化及转石(图 3f)。图 3g 为发现的孔雀石化野外照片,在南部近沟口还发现磁铁矿石转石,证明这

里有铜、铁矿成矿条件与矿化。

验证另外 2 处,没有发现矿化。野外共验证 5 处暗红图斑,有 3 处有铜铁、钨(锡?)、金矿化,找矿效能较高。

3.2.3 在森林地区与雷达数据复合应用

Teodoro 等^[36]用 TM 数据探测了巴西热带雨林区小生境植被光谱异常与浅成热液高硫化物金矿蚀变带的关系。采用的步骤是:第一步用波段比值增强植被色素、叶绿素、湿度、生物化学组成等参数。具体参数为:TM2/TM1、TM2/TH3、TM4/TM1、TM4/TM2 这 4 个参量代表叶子绿度,TM4/TM5 为叶绿素和叶面指数,TM4/TM5 为叶子湿度,TM4/TM7 和 TM4/(TM5*TM7)为叶子生物化学成分;第二步对这些参数做主成分分析;第三步对 NIR 和 SWIR (TM4,5,7 波段)做主成分分析,PC1 作为富结构信息的照度图像;第四步选择第二步做出的主成分进行低通卷积滤波。最终图像显示了不同类型的植被覆盖。将地面勘探的蚀变信息与图像植被信息叠合,发现色调与蚀变吻合近乎完美。尽管该技术不能直接提供岩石类型、矿物及蚀变等的信息,但从生物地理异常圈定矿物分布的变化区域,是没有岩石、土壤等出露的植被近完全覆盖区矿产勘查规划的重要辅助手段。

在森林地区,用 TM、SAR 数据和地球物理数据复合可以推进地质填图^[37]。

Grunsky 等^[38]采用 Radarsat-1 和 Landsat TM-7 数据,结合雷达数据对地表粗糙度等结构信息的探测优势和 ETM 对光谱信息的探测优势,对加拿大北部的 Schultz 湖地区进行了地表物质分类填图。该技术在边远地区矿产草根勘查具有重要用途。

3.3 ASTER 应用和 ASTER 与 TM/ETM 联合应用

ASTER 提供 UTM 投影,但需要线性移动 200 m 保证精度。ASTER 矿物提取要结合野外光谱测量。用经验线法等大气校正后的光谱与原始像元光谱往往有大的差异。在发射仅 2 年后的 2001 年在 Nevada 识别了石膏及其 2 个矿物种,鼓舞人心^[17],后继续应用^[39~44]。

Perry 等^[45]根据 Vincent^[46]对 TM 波段的亮度和波段比值编码技术,对 USGS 矿物波谱数据库进行十进制编码。该技术较光谱角、光谱匹配、拟合及 MNF、PCA 等技术更为简便,在地面数据少的地区进行岩性填图与矿产前期勘查尤为有用。

Caceres 等^[47]用 ASTER 数据在 Bolivia 对 Lipez 盐湖的盐类矿物进行了填图,依据的是氯酸盐、硫酸



图 3 新疆东天山 Crosta 图像上的暗红图斑与野外找矿验证照片

Fig. 3 The wine color pitches in the Crosta images used for mineral exploration test in eastern Tianshan mountains, Xinjiang, additional with field photos collected during the test

图中的黄方块和黄三角分别代表野外观测 GPS 点和采样位置

盐、硼酸盐、碳酸盐矿物的诊断吸收光谱,采用的技术是首先用地面光谱定标,将图像转换为反射率数据;然后,采用 MNF, PPI, n-D, iD 等高光谱矿物填图的技术流程^[48]进行填图分类。指导进一步勘探。

Crosta 等^[49]用 TM, ASTER 和地面光谱在阿根廷 Patagobia 北部 60 000 km² 的广大地区勘查浅成热液型金矿。勘查分 3 个阶段:第一阶段采用 TM 数据和 Crosta 技术与 Loughlin^[21]的技术从铁氧化物和含羟基矿物信息在区域上圈定靶区,结果 80% 以上的靶区含金大于 0.1 g/t 或大于 1 g/t,后继验证它们大都含高品位金矿。第二阶段采用 ASTER 数据在区域靶区上进行蚀变矿物填图:首先是 Crosta 技术在 ASTER 数据上的应用,用 ASTER1、3、5、7 波段填明矾石,1、3、5、6 波段填伊利石,1、4、6、9 波段填高岭石和蒙皂石,1、4、6、7 波段填高岭石;然后,用 ACORNTM软件大气校正后,采用高光谱数据矿物填图的技术流程^[48]进行矿物填图^[50]。结果,明矾石、伊利石、高岭石等可以填出。高结晶度高岭石不能与有类似光谱的中结晶度高岭石和迪开石区分。第三阶段是用 PIMA 光谱仪对主要蚀变带进行地面验证,验证结果与用 ASTER 矿物填图结果吻合。该研究表明:采用 TM/ETM 和 ASTER 宽波段数据可以在区域到矿床尺度上有效圈定勘探靶区。

Seoane 等^[51]用 ASTER 数据和 Crosta 技术^[50]对由基性—超基性岩风化形成的红土型镍矿进行了矿物丰度填图,采用 ASTER2、4、5、8 波段,1、4、2 主成分,圈定了异常靶区,若干靶区正由勘探公司勘探。

国内学者广泛应用 TM/ETM 和 ASTER 数据开展矿产资源调查,取得了丰硕成果^[52~56]。

4 高光谱遥感

4.1 高光谱技术的发展

过去 40 年,测谱学、机载、星载传感器技术和软件技术长足发展,使高光谱成为常规的矿产勘查技术。50 多种热液蚀变矿物端元谱可以识别,若干商家可常规获取高光谱数据用于矿产勘探;低成本商业软件可在台式或手提电脑上处理数据;经过训练的地球科学家可以有效地进行矿物填图,圈定勘探靶区。高光谱与其他勘探手段一起在 GIS 平台上被有效应用^[57]。

(1) 实验室和野外光谱测量学:20 世纪 60~70 年代 Hunt 等^[7]开始岩矿光谱测量,目前的光谱库可在网站上检索:<http://speclab.cr.usgs.gov>, <http://speclib.jpl.nasa.gov>。

20 世纪 70 年代开始用 TM 探测粘土矿物和铁氧化物;80 年代 JPL 开发了 50 kg 重至少 2 人操作的野外光谱仪:PFERS, GER 也开发了很重的红外智能野外光谱仪:IRIS;10 年后, JPL 又开发了便携式红外辐射计:PFES;90 年代私人公司开发了轻便的光谱仪:ASD、PIMA, D&P 开发了野外热辐射光谱仪;野外测量光谱用于定标机载和星载光谱数据。

(2) 高光谱传感器的发展:60 年代,光机成像扫描仪可用几个宽波段测量地面反射;70 年代机载非成像辐射计能测量更细的光谱;70 年代后,固态成像技术用光机扫描仪在 10 余个窄波段成像;80 年代后,传感器能在百余个窄波段成像,但这些测量要求像元大小为 10~20 m,因为辐射分辨率的限制;90 年代后,更高信噪比传感器以 14-bit 辐射量子在 20 m 地面、10 nm 光谱分辨率测量。

80 年代,休斯圣巴巴拉研究中心 Aram Mika 用高光谱(Hyperspectral)来描述数百窄波段,以与宽波段区分,用超光谱(ultraspectral)来描述数千波段。

(3) 高光谱数据:高光谱数据量在 1 景 10 km² 以 1 m 分辨率、最小 12-bit 辐射分辨率要获取 5 GB 数据,只有 90 年代后的计算机才可处理,数据需要定标、校正,需要 ENVI 这样的软件处理。

(4) 高光谱测量科学:过去 20 年的经验表明:10 nm 光谱分辨率 1 000/1 信噪比适合探测大部分端元矿物。但总存在光谱与空间分辨率的交易(Trade-off)。还有大气的影响,应用 4 款软件进行大气校正:ATREM、ACORN、FLAASH、MODTRAN。

(5) 政府高光谱传感器的发展:Collins 红外辐射计和 SMIRR;哥伦比亚大学在 70~80 年代发展了 Collins 红外辐射计,在 400~2 400 nm 有 550 个波段,10~20 m 地面航迹;1981 年 Goetz 指导, JPL 发展了 SMIRR,10 个窄波段,太空梭在 256 km 高空飞行,可识别碳酸盐和粘土矿物,该试验导致 TM7 波段的设定,并鼓励 NASA 继续发展高光谱。

AIS-1 和 AIS-2:800~2 400 nm 有 128 波段, NASA C-130 飞机,图像幅宽 1 km,空间分辨率 10 m。开发了 SPAM 分析软件。探测粘土矿物、明矾石,发现胺长石(buddingtonite)。

AVIRIS:1987 年 JPL 开发,400~2 400 nm 有 224 波段,10 nm 分辨率, NASA ER-2 飞机,飞行高度 20 km,图像幅宽 1 km,空间分辨率 20 m。Kruse 用 IDL 开发了 ENVI 软件。可识别 64 个端元矿物;Clark 开发了 Tetracorder 矿物填图软件。

HYDICE, HIRIS, EIS:美国海军开发了 HYDICE,

搭载 Convair580 飞机,0.75 ~ 3.75 m 地面分辨率,210 个波段,10 nm 分辨率。不允许非美国公民接近数据。

HIRIS:JPL 建议搭载 EOS 平台,未成。

EIS:休斯圣巴巴拉研究中心建议 90 kg 仪器入轨,未成。

Hyperion:星载。

(6) 商业高光谱传感器的发展:Hy Vista 公司的 Probe HyMap、Pima;ITRES 研究公司的 CASI , VIS /NIR SASI SWIR TASI TIR (<http://www.itres.com>); SpecTIR 和 LLC (HyperSpecTIR, ProSpecTIR), 2005 年由芬兰开发; Eagle-HawK、LIDAR, 2006 年加拿大和芬兰开发。

(7) 多光谱和高光谱热红外传感器的发展:多光谱热红外传感器:TIMS 和 MASTER。80 ~ 90 年代 NASA 发展 TIMS 用于地质填图。1996 年 NASA 发展 MODIS 和 ASTER;MASTER 在长波红外有 10 个波段,10 m 空间分辨率。

SEBASS:1960 年建立的美国航空集团在冷战期间开始开发,用于国防,90 年代鼓励军民两用,1998 商业飞行。2 个固态面阵,在中红外和长波红

外有 128 波段,2 000/1 信噪比能对水、岩、土壤等微细识别,2006 年提供民用数据,不提供给非美国公民。

结论:40 多年的发展证明高光谱是成熟的矿产勘查技术。需要地质学家熟知并结合 XRD、XRF、GPS 等技术综合应用。

高光谱遥感是我国遥感技术与应用领域最早跻身国际前沿行列的技术之一^[5]。立足国内开展国际合作,足迹踏及美国、前苏联、法国、澳大利亚、日本、马来西亚。我国高光谱成像仪主要技术指标见图 4。

4.2 地面高光谱应用

Thompson 等^[58]用岩芯扫描系统 Hylogger™ 和 TIR-Logger 研究了瑞典、西澳大利亚 3 个火山块状硫化物矿床的白云母、绿泥石的光谱与化学成分。识别矿物的地面光谱仪包括高分辨率、高信/噪比的 VNIR/SWIR ASD-FieldSpec™、SWIR PIMA-SP™ 和热红外 TIR-Logger。矿物识别的原理是白云母有 Al-OH2 200 nm 吸收,从钠云母—白云母—多硅白云母吸收带变化范围为 2 100 ~ 2 222 nm,绿泥石有 Fe-OH 2 250 nm 吸收。用 ASD-FieldSpec™ 和 SWIR PIMA-



图 4 我国成像光谱仪主要技术指标^[5]

Fig. 4 The major technical parameters of the hyperspectral imaging sensors in China^[5]

SPTM 获取含水矿物的 VNIR/SWIR 光谱;用 TIR-Logger 获取无水硅酸盐矿物和碳酸盐矿物热红外光谱;用光谱地质学家(The Spectral Geologist, TSGTM) 软件识别矿物。结合矿物成分和模式含量的 XRD 分析,可以获得下列信息:从吸收深度获得矿物丰度和蚀变强度信息;从矿物含量与成分信息圈定蚀变分带信息;根据含水和无水矿物蚀变格局,获取感兴趣勘探区的信息,并增进对矿床成因的理解。该研究表明:地面光谱不仅仅用于矿物识别,还可研究矿物成分与含量,圈定蚀变分带,从而决定感兴趣勘探区。

Cudahy 等^[59]采用 CSIRO 开发的热红外岩芯编录系统 TIRLogger 对西澳太古代金矿 2 个金刚石钻孔岩芯的斜长石成分和其他矿物进行了测量,通过与实验室 MicroFTIRTM 发射率测量以及 XRD、XRF 和电子探针成分测量的比较,结果表明:Ca 斜长石和白云石与石英形成在高含 Au 异常区,而钠长石和方解石在非蚀变岩石中;TIRLogger 数据可以精确地提取硅酸盐、碳酸盐等矿物的丰度与成分信息;岩石类型可以从硅酸盐 Reststrahlen 峰的波长位置填出;TIRLogger 测量出了其他光谱手段无法测出的斜长石的成分特征。

Yan^[60]用地面光谱研究了伊利石结晶度与其在 2 200 nm 吸收迁移的关系和分划极低级变质带的作用。

4.3 航空高光谱应用

以往大量 AVIRIS, HyMap 的应用不再赘述,本文归纳最新的进展。

Coulter 等^[61]用航空高光谱数据,采用像元分解技术,填制了 Colorado 渐新世火山口的酸性排除物。对黄钾铁矾、针铁矿、赤铁矿等铁氧化物和伊利石、高岭石、迪开石、叶腊石等填图,还填出了高 Al 伊利石(小于 2 200 nm),中 Al 伊利石(2 200 ~ 2 208 nm),低 Al 伊利石(大于 2 210 nm)。

Zamudio^[62]在植被覆盖达 50% 的 New Mexico Capitan 金—铂族元素与铁矿区,用 Probe-1 航空高光谱数据进行了矿物填图。圈定了几个赤铁矿/针铁矿与方解石、硅酸盐矿物异常,野外验证发现金、铂异常,是未来钻探等勘探的靶区。

Rogge 等^[63]用 Prob-1 航空高光谱数据在加拿大极地区 Baffin 岛进行岩性单元填图,产生了预测性地质图。

热红外遥感的物理基础是 Planck 定律, Wien 置换定律和 Kirchoff 定律。光谱范围为 2.5 ~ 14 μm 。

热红外传感器从宽波段、多波段、高光谱测量地表热发射。宽波段热红外测量地面温度和热惯量,多波段和高光谱作发射率填图。传感器包括 TIMS、MODIS、MASTER、ASTER、SEBASS。应用于火山、地热温度填图,岩石、土壤物理性质分析,岩、矿和火山气体成分分析。闫柏琨等^[64]对此进行了综述。

热红外遥感对硅酸盐、碳酸盐、硫酸盐、磷酸盐、粘土等进行地表矿物填图,识别蚀变带,具有岩矿红外波谱库(<http://speclab.cr.usgs.gov>; <http://speclib.jpl.nasa.gov>; <http://speclib.asu.edu>)。数据处理流程是 ENVI 软件上的高光谱数据处理流程^[48,65]。

国内高光谱矿产资源遥感也取得了长足进展^[66~68]。

5 高分辨率图像

高分辨率卫星和航空遥感图像在抗震抗洪救灾、国土资源监测和调查中起着巨大作用。其具有的高分辨率和实时性其他手段所无法比拟的。在此领域,除了航空遥感飞机,近年和目前使用的高分辨率卫星性能具体参见表 3。值得一提的是 QuickBird 高分辨率遥感卫星和 WorldView-2 卫星。

QuickBird 高分辨率遥感卫星是由美国 DigitalGlobe 公司于 2001 年 10 月 18 日发射成功的高分辨率的商用遥感卫星。QuickBird 遥感卫星影像在空间分辨率(0.61 m)、多光谱成像(1 个全色通道、4 个多光谱通道)、成像幅宽(16.5 km × 16.5 km)。WorldView-2 卫星发射于 2009 年 10 月 8 日,多光谱分辨率为 1.8 m,全色波段分辨率为 0.46 m。2010 年 1 月 5 日 WorldView-2 卫星达到了运营要求,开始正式向客户提供影像。

我们在内蒙古乌拉特后旗三贵口超大型锌铅矿床的勘查和矿山建设设计中制作了 1:5000 和 1:2000 比例尺 QuickBird 图像(图 5),在图像中,可以清晰地看到不同的岩石地层单元、断层分布、钻机机台、车辆以及以前施工的探槽等,为勘查钻孔等工程的布设以及矿井选厂布设以及建设提供了强有力的依据。另外,在坦桑尼亚一些矿权区为新区,工作程度很低,借助高分辨率遥感图像,对矿区的快速评价以及下一步的勘查部署起到事半功倍的作用,节省了大量的人力、物力和时间。也就是说高分辨率遥感图像对无论是工作程度很低的地区、高级勘查区以及矿山建设都可以提供快捷有效的帮助。

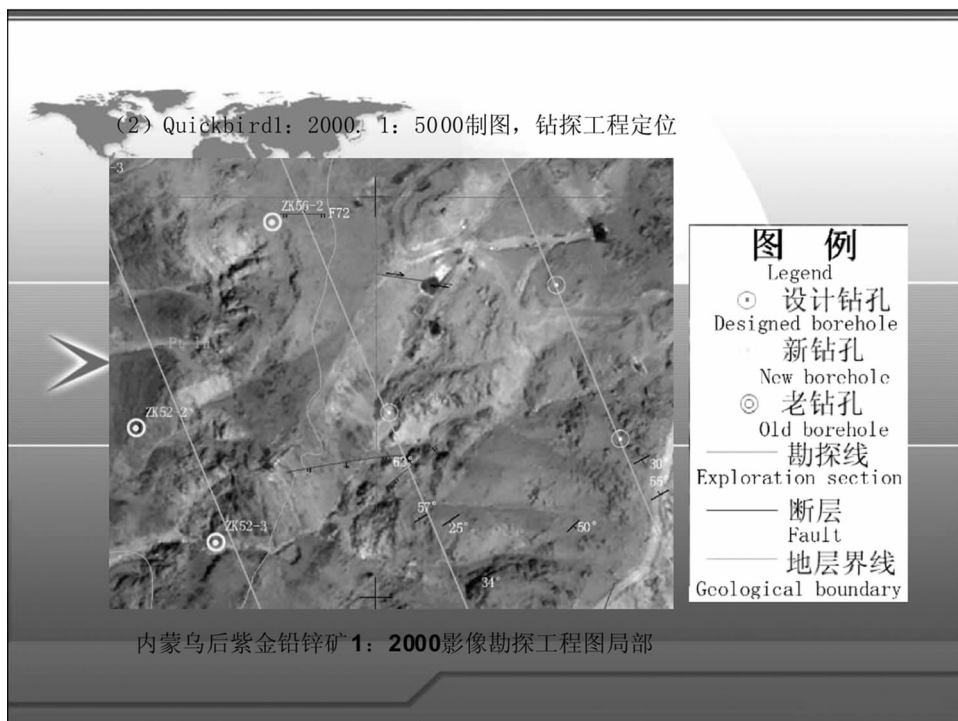


图 5 紫金乌拉特后旗三贵口超大型锌铅矿床 Quickbird 影像,用于勘探工程部署
Fig.5 QuickBird image used for exploration allocation in the Sanguikou super-large lead-zinc deposit in Wulate county, Inner Mongolia by the Zijin Mining company

6 讨论与结语

6.1 讨论

TM/ETM 从铁氧化物和含羟基矿物来提取矿化蚀变信息,大区域快速圈定成矿靶区;ASTER,在粘土区 SWIR 的 5 个波段,提供了区分粘土矿物类型和一些硫酸盐、碳酸盐的能力,可以区分粘土、高级粘土、绢英岩和青盘岩,以及方解石和白云石。短波区的 3 个铁波段可以区分黄钾铁矾与赤铁矿和褐铁矿。障碍是需要校正到反射率来区分这些矿物组合,没有辅助数据很难做到这点,这极大地限制了该仪器作为常规勘探工具的能力。Crosta 等^[49,50]提供了多元统计方法对蚀变带填图,不需要大气校正。ASTER 有 5 个热波段,像元大、信/噪比低。有能力对硅质岩和碳酸盐填图,但噪音多,并不总是有效。希望能发展从热波段提取更多地质信息的处理技术。

航空高光谱具有矿物填图的实用信/噪比。但航天高光谱 Hyperion 的信/噪比不能满足勘探和填图的要求^[69]。

热红外是正在发展、尚未应用的勘探工具,其问题是信/噪比太低,长波热红外需要将探测器冷却,费用昂贵。其前景是可对硅质、硅酸盐类和碳酸盐

填图,黎明前的数据可对隐伏构造和高热惯量的岩石(如:玉髓)填图。

ASTER 和高光谱数据都需要大气校正后提取矿物信息。有先验知识不一定要大气校正^[2]。

选择数据源需要根据工作目标并考虑数据的性价比(表 3)。宽波段遥感 TM/ETM 和 ASTER 数据成本最低,高空间、高光谱数据费用相对高、处理相对复杂。

6.2 结语

(1) 以往的测谱学研究,虽没有新的突破,所建立的岩矿光谱数据库,成为当今矿产资源遥感应用的坚实基础。

(2) Loughlin^[21]发现的金棒拓展矿床的 5 个金矿体、2004 年用 TM 在 PascoCanyon, Nevada 的新发现^[17]、Crosta 等^[49]和 Coulter 等^[61]的应用和我们的新发现(图 2,3)都表明:采用 TM/ETM 和 ASTER 宽波段遥感数据和 Crosta 技术,哪怕在详细填图的矿区、矿带,遥感都可以有新的发现,更何况是用地面和航空高光谱数据^[62]。对主要成矿带需要在国际矿业股市、国内矿产需求牵引下,在新技术、新方法、新理论的驱动下反复勘探,在勘查程度与时运的双重作用下,发现新矿床。如挂着澳大利亚第一产金

表 3 遥感平台比较表^[17]

Table. 3 A comparison of remote sensing platforms^[17]

卫星光谱	波段	像元 /m	刈幅	成本 / \$ US	网站
WorldView-2 4.45 ~9.0 4.5 ~9.0	1 4	0.5 ~1 2 ~5		Vacation Package 150 000	www. digitalglobe. com
QuickBird 4.45 ~9.0 4.5 ~9.0	1 4	0.5 ~1 2 ~5		22.50 sq/km 25.00 sq/km	www. digitalglobe. com
IKONOS 0.45 ~9.0 0.45 ~0.85	1 4	1 4		18.00 sq/km 15.00 sq/km	www. intecameri- cas. com/satpric- es. com
SPOT5 0.48 ~0.71 0.5 ~0.89 1.58 ~1.75	1 3 1	2.5 10 20	60 km ×60 km	670 000 270 000	www. spotimage. fr
TM 0.45 ~2.35 10.45 ~12.5	7 1	30 120	180 km ×180 km	42 500	Edcimswww. cr. usgs. gov/pub/im- swelcome
ETM 0.45 ~2.35 0.52 ~0.9 10.4 ~12.5	6 1 1	30 15 60	180 km ×180 km	60 000	Landsat7. usgs. gov
ASTER 0.6 ~1.2 1.5 ~2.5 8 ~12	3 6 5	15 30 90	60 km ×60 km	5 500	Asterweb. jpl. nasa. gov
Hyperspectral Satellite Hyperion 0.4 ~2.5	220	30	7.5 km ×100 km	250.00	Eol. usgs. gov/in- stru/hyperion. asp
Hyperspectral Airborne AVIRIS 0.38 ~2.5	224	20 ~5	10 km 宽	500.00/航线	Aviris. jpl. nasa. gov/html/aviris. quicklooks. html
SpecTIR 4.5 ~2.45	2270	0.5 ~5		13.00 sq/km	www. spectir. com
HyMap 0.45 ~2.5	126				www. intspec. com

省桂冠的 Central Victorian Bendigo 型金矿, 2.5×10^6 kg(80×10^6 盎司)黄金产量,自 1851 年 9 月历经 107 年的反复勘查开发,不同的公司几经成败,使这里成为澳大利亚黄金主产地^[70]。那种“地表矿床已经找完,只能深部找矿”的说法尚需斟酌。

(3) 80 年代中期, TM 加上了粘土波段,提供了粘土蚀变的填图能力。后来,该能力被吹嘘过度,许多假异常导致矿产勘查界的怀疑。TM 波段比值不能直接应用原数据,需要用黑像元减法去除路径辐射,尤其是增强铁的 3/1, 3/2; 目前, ASTER 波段比值技术^[42,71], Crosta 技术都有虚假信息。例如, Crosta 技术填制的是铁氧化物和含羟基矿物,依据

的是铁氧化物和含羟基矿物的光谱特征,这两类矿物非热液蚀变所专有,区域背景岩石中也含该类矿物。因此,区分 Crosta 技术和波段比值技术提取的真假蚀变与异常是需要攻克的难题,是提高遥感靶区精度的需求所在。否则,仍然会导致矿产勘查界的怀疑或不信任。

(4) 圈定成矿靶区,铁氧化物和含羟基矿物同样重要,仅仅用具有 SWIR 波段的 PIMA 探测粘土矿物等尚嫌不足, ASD 更为全面; ALI (Advanced Land Imager) 在 VNIR 有 6 个波段,在识别含铁矿物方面特别有效。Hubbard 等^[72,73]将 ALI-VNIR 和 ASTER-SWIR 波段合成为 13 个反射成像立方体,与 Hyperion 一起用于矿物填图,在高光谱数据源瓶颈下,这是一种提高分辨率与图像覆盖范围的折中方案。

(5) 地面高光谱结合 XRD, XRF, GPS 等手段可以对蚀变矿物及其成分与分带进行精准定量填图,服务于钻孔定位等工程勘探。

(6) 王润生^[74]对我国矿产资源遥感应用现状和发展战略进行了综述。我国一方面需要研发传感器,攻克高光谱数据源瓶颈;另一方面需要继续研发岩矿光谱识别的软件系统。目前,中国科学院遥感应用研究所开发了 HYPS 高光谱数据处理软件,国外有 Spectral Geologist (TSGTM) 和 Tricorder^[75~78]、Spectrometer Independent Mineral Identification Software (SIMIS) 等软件。

(7) 我们的实践体会是:应用 Crosta 等技术找矿,需要围绕主成矿带,系统研究成矿背景、普适与局部成矿模型,选择能形成大富矿床的工业类型,作为找矿目标,运用 ETM、ASTER、ALOS、Quickbird 等数据和地面、航空高光谱,系统制图,凝炼靶区,集中在不大的重点区,开展系统深入的野外验证工作。找到矿床,野外是关键。而且,野外人员与数据处理人员需要互动,仅仅是室内图像处理,像“纸上谈兵”;还需注重:有矿未必有图 2、3 中的那种亮白或暗红图斑,但有这类图斑,往往有矿,而且,矿大都在相对小图斑的边部。

(8) 遥感技术主要应用于前期勘查,但目前的宽波段、高光谱、高分辨遥感数据也可以应用于“新区开拓”、“老区扩边”、“攻深找盲”、勘探工程规划部署等各个环节。例如,“攻深找盲”需要从地面开始,遥感可以从成矿靶区的圈定明确从地面开始的目标;高空间遥感数据,如 Quickbird,可以应用于 1:5 000, 1:2 000 大比例尺制图,应用于大比例尺

勘探和勘探工程部署。尤其是在主成矿区(带),在不同的矿产勘查、勘探阶段,可以运用从宽波段到高光谱、高分辨遥感数据,从 1:100 000 到 1:2 000 系统填图、勘查。

参考文献(References):

- [1] Goetz A F H, Rock B N, Rowan L C. Remote sensing for exploration: An overview[J]. *Economic Geology*, 1983, 78:573-590.
- [2] Bedell R, Crosta A P, Crunsky E. Remote sensing and spectral geology[C]. Society of Economic Geologists, Inc., 2009, 16:xv-xix.
- [3] Lyon R J P. Minerals in the Infrared—A Critical Bibliography[M]. Stanford: California, Stanford Research Institute, 1962: 76.
- [4] Moenke H. Spektralanalyse Von Mineralien Und Gesteinen, Eine Anleitung Zur Emissions-Und Absorptionsspektroskopie[M]. Leipzig, Akademie Verlagsges, 1962(in German).
- [5] Farmer V C. The Infrared Spectra of Minerals[M]. Mineralogical Society of London, Dorking, Surrey, Adlard and Son Ltd., Monograph 4, 1974: 539.
- [6] Marel H W, Beutelspacher H. Atlas of Infrared Spectroscopy of Clay Minerals and Their Admixtures[M]. Msterdam: Elsevier, 1976:396.
- [7] Hunt G R, Ashley R P. Spectra of altered rocks in the visible and near infrared[J]. *Economic Geology*, 1979, 74:1 613-1 629.
- [8] Hunt G R, Salisbury J W. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks:I Silicate minerals[J]. *Modern Geology*, 1971, 1:23-30.
- [9] Hunt G R, Salisbury J W. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks:II. Carbonates[J]. *Modern Geology*, 1970, 2:283-300.
- [10] Hunt G R, Salisbury J W, Lenhoff C J. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks:III. Oxides and hydroxides[J]. *Modern Geology*, 1971, 2:195-205.
- [11] Hunt G R, Salisbury J W, Lenhoff C J. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks:IV. Sulfides and sulfates[J]. *Modern Geology*, 1971, 3:1-14.
- [12] Hunt G R, Salisbury J W, Lenhoff C J. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks:V: Additional silicates[J]. *Modern Geology*, 1971, 4:85-106.
- [13] Clark R N, King T, Klefwa M, et al. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95(B-8):12 653-12 680.
- [14] Hauff P L. SPECMIN™ Mineral Identification System and Spectral Library[M]. USA:Arvada, Colorado, Spectral International, Inc., 1993, 1/2:600.
- [15] Yan Shouxun, Zhang Bing, Zhao Yongchao, et al. A review on the VSWIR spectral of minerals and rocks[J]. *Remote Sensing Techniques and Application*, 2003, 18(4):191-201. [燕守勋,张兵,赵永超,等.矿物和岩石的可见—近红外光谱综述[J].遥感技术与应用,2003,18(4):191-201.]
- [16] Tompson A J B, Phoebe L H, Audrey J R. Alteration mapping in exploration application of Short-Wave Infrared (SWIR) spectroscopy, SEG newsletter[C] //Number 39. Reprint in Reviews in Economic Geology, Remote Sensing and Spectral Geology, 1999, 16:12-23.
- [17] Richard Bedell. Remote sensing in mineral exploration, SEG News letter, reprint in 2009 by remote sensing and spectral geology[J]. *Review in Economic Geology*, 2004, 16:3-10.
- [18] Sabine C. Remote sensing strategies for mineral exploration[C] //Rencz C, ed. Remote Sensing for the Earth Sciences—manual of Remote Sensing, 3rd ed New York: John Wiley and Sons and American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), 1999, 3:375-447.
- [19] Crosta A P, Carlos Roberto De Souza Filho. Mineral exploration with landsat Thematic Mapper(TM)/Enhanced Thematic Mapper plus (ETM+) : A review of the foundations, characteristics, data processing, and case studies[C] // Review of Economic Geologists, Review in Economic Geology, 2009, 16:59-82.
- [20] Loughlin W P. Geological exploration in western United states by use of airborne scanner imagery[C] //Legg C, ed. Remote Sensing: An Operational Technology for the Mining and Petroleum Industries. London, Institute of Mining and Metallurgy, 1990:223-241.
- [21] Loughlin W P. Principal components analysis for alteration mapping[J]. *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*, 1991, 57: 1 163-1 170.
- [22] Crosta A P, Moore J M. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais state, Brazil: A prospecting case history in Greenstone belt terrain[C] //7th Thematic Conference: Remote Sensing for Exploration Geology. Proceedings, ERIM, Calgary, 1989:1 173-1 187.
- [23] Crosta A P. Mapping of Residual Soils by Remote Sensing for Mineral Exploration in SW Minas Gerais State, Brazil[D]. Imperial College, University of London, 1990:452.
- [24] Crosta A P, Rabelo Antonio. Assessing landsat /TM for hydrothermal alteration mapping in central-western Brazil[C] //Ninth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing Proceedings, Pasadena, California, USA, 1993:1 053-1 061.
- [25] Rutz-Armenta J R, Prol-Ledesma R M. Techniques for enhancing the spectral response of hydrothermal alteration minerals in thematic Mapper images of central Mexico[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19: 1 981-2 000.
- [26] Conradsen K, Harpoth O. Use of landsat multispectral scanner data for detection and reconnaissance mapping of iron oxide staining in mineral exploration, central east Greenland[J]. *Economic Geology*, 1984, 79:1 229-1 244.
- [27] Majid H T, Farid M. Iron oxide and hydroxyl enhancement using the crosta method: A case study from the zagros belt, fars prov-

- ince, Iran[J]. *JAG*, 2000, 2(2):140-146.
- [28] Tangestani M H, Moore F. Comparison of three principal component analysis techniques to porphyry copper alteration mapping: A case study, Meiduk area, Kerman, Iran[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2001, 27(2):176-182.
- [29] Tangestani M H, Moore F. Porphyry copper alteration mapping at the Meiduk area, Iran[J]. *International Journal Remote Sensing*, 2002, 23(22):4 815-4 825.
- [30] Carranza E J M, Hale M. Mineral imaging with thematic mapper data or hydrothermal alteration mapping in heavily vegetation terrain[J]. *International Journal Remote Sensing*, 2002, 23(22):4 827-4 852.
- [31] Ramadan T, Kontny A. Mineralogical and structural characterization of alteration zones detected by orbital remote sensing at Shalatein district, SE desert, Egypt[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2004, 40:89-99.
- [32] Ranjbar H, Honarmand M Z. Moezifa application of the crosta technique for porphyry copper alteration mapping, using ETM data in the southern part of the Iranian volcanic sedimentary belt [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, 24:237-243.
- [33] Aydal D, Arda E, Dumanlilar Ö. Application of the Crosta technique for alteration mapping of granitoidic rocks using ETM + data: Case study from eastern Tauride belt (SE Turkey)[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(17):3 895-3 913.
- [34] Tadesse S. Geology and mineral potential of Ethiopia: A note on geology and mineral map of Ethiopia[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2003, 36(4):273-313(41).
- [35] Masresha G S, Wolf U R. A review of the metallic mineral resource potential of Ethiopia[J]. *Chronique De La Recherche Miniere*, 2000, 540:11-32.
- [36] Teodoro IsnardRibeiro De Almeida, Carlos Roberto De Souza Filho, Caetano Juliani, *et al.* Application of remote sensing to geobotany to detect hydrothermal alteration facies in epithermal high-sulfide gold deposits in the Amazon region[C]//Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology, 2009, 16:135-142.
- [37] Teruiya R K, Paradella W R, Dos Santos A R, *et al.* Integrating airborne SAR, Landsat TM and airborne geophysics data for improving geological mapping in the Amazon region: The Cigano Granite, Carajás province, Brazil[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(13):3 957-3 974.
- [38] Grunsky E, Jeff H, Isabelle M. Predictive mapping of surfacial materials, Schultz lake area (NTS66A), Nunavut, Canada[C]//Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology, 2009, 16:177-198.
- [39] Rowan L C, Mars J C, Simpson C J. Lithologic mapping of the Mordor, NT, Australia ultramafic complex by using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer (ASTER)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 99:105-126.
- [40] Galvão L S, Almeida-Filho R, Vitorello I. Spectral discrimination of hydrothermally altered materials using ASTER short-wave infrared bands: Evaluation in a tropical savannah environment [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2005, 7:107-114.
- [41] Hellman M J, Ramsey M S. Analysis of hot springs and associated deposits in Yellowstone national park using ASTER and AVIRIS remote sensing[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2004, 135:195-219.
- [42] Ninomiya Y, Fu B, Cudahy T J. Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared “radiance-at-sensor” data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 99:127-139.
- [43] Vaughan R G, Hook S J, Calvin W M, *et al.* Surface mineral mapping at Steamboat Springs, Nevada, USA, with multi-wavelength thermal infrared images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 99:140-158.
- [44] Yu Caihong, Wu Xiaobo, Yan Shouxun, *et al.* Information extraction of red clay and siliceous limestone in red clay-type gold deposit in southwestern Guizhou, China, using SWIR reflectance data of ASTER[C]//Presented to The International Conference on Geoinformatics, 18-20th, June, Beijing, China, 2010.
- [45] Perry J L, Vincent R K. ASTER brightness and ratio codes for minerals: Application to lithologic mapping in the west-central Powder river basin, Wyoming[J]. *Reviews in Economic Geology*, 2009, 16:143-168.
- [46] Vincent R K. Fundamental of Geological and Environmental Remote Sensing[M]. New York: Prentice Hall, 1997:400.
- [47] Caceres F, Ali-Ammar H, Pirard E. Mapping evaporitic minerals in Sud Lipez salt lakes, Bolivia, using remote sensing[C]//Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology, 2009, 16:199-208.
- [48] Yan Shouxun, Zhang Bing, Zhao Yongchao, *et al.* A review on the technical flow chart and the major techniques of rock and mineral identification with hyperspectral remote sensing[J]. *Remote Sensing Techniques and Application*, 2004, 19(1):52-63. [燕守勋, 张兵, 赵永超, 等. 高光谱遥感岩矿识别填图的技术流程与主要技术方法综述[J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(1):52-63.]
- [49] Crosta A P, Ducart D F, Carlos Roberto De Souza Filho. Mineral exploration for epithermal gold in northern Patagonia, argentina: From regional to deposit-scale prospecting using LandsatTM and terra ASTER[C]//Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology, 2009, 16:97-108.
- [50] Crosta A P, Souza Filho C R, Azevedo F, *et al.* Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argetina, using ASTER imagery and principal component analysis[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24:4 233-4 240.
- [51] Seoane J C S, Castro N A, Osako L S, *et al.* Multispectral imagery applied to nickel laterite exploration: The conceicao do araguaia discovery[C]//Society of Economic Geologists, Reviews in E-

- conomic Geology, 2009, 16:109-122.
- [52] Ma Jianwen. A research on the method of quickly extract alteration information using TM data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, (3):22-26. [马建文. 利用 TM 数据快速提取含矿蚀变带方法研究[J]. 遥感学报, 1997, (3):22-26.]
- [53] Yang Jinzhong. A research on the technical method system to extract remote sensing anomaly using multiple spectral remote sensing[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2007, (4):43-47. [杨金中. 多光谱遥感异常提取技术方法体系研究[J]. 国土资源遥感, 2007, (4):43-47.]
- [54] Zhang Yujun, Yang Jianmin. The extracting method of alteration information in the background rock outcropped areas using remote sensing[J]. *National Resource Remote Sensing*, 1998, (2):46-53. [张玉君, 杨建民. 基岩裸露区蚀变遥感信息的提取方法[J]. 国土资源遥感, 1998, (2):46-53.]
- [55] Zhang Yujun, Yang Jianmin, Chen Bi. A research and application of alteration information extracting method using ETM—Geological pursuant and spectral precondition[J]. *National Resource Remote Sensing*, 2002, (4):30-36. [张玉君, 杨建民, 陈蔽. ETM (TM) 蚀变遥感异常提取方法研究与应用——地质依据和波谱前提[J]. 国土资源遥感, 2002, (4):30-36.]
- [56] Wu Dewen, Zhu Guchang, Zhang Yuanfei, et al. Multiple data analysis and mineralized alteration information extracting model with remote sensing[J]. *National Resource Remote Sensing*, 2006, 67(1):22-30. [吴德文, 朱谷昌, 张远飞, 等. 多元数据分析与遥感矿化蚀变信息提取模型[J]. 国土资源遥感, 2006, 67(1):22-30.]
- [57] Taranik J V, Aslett Z L. Development of hyperspectral imaging for mineral exploration[C]//Society of Economic Geologists, Review in Economic Geology, 2009, 16:83-95.
- [58] Thompson A, Scott K, Huntington J, et al. Mapping mineralogy with reflectance spectroscopy: Examples from volcanogenic massive sulfide deposits[C]//Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology, 2009, 16:25-40.
- [59] Cudahy T, Hewson R, Caccetta M, et al. Drill core logging of plagioclase feldspar composition and other minerals associated with archean gold mineralization at Kambalda, western Australia, using bidirectional thermal infrared reflectance system[C]//Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology, 2009, 16:223-235.
- [60] Yan Shouxun. A comparative research to illite crystallinity and clay mineral spectral index for subdivision of very low-grade metamorphic belt along a geological section in the Youjiang sedimentary basin, Guangxi Zhuang Autonomous region, southwest of China[J]. *Science in China*, 2005, 47(9):834-845.
- [61] Coulter D W, Hauff P L, Sares M A, et al. Hyperspectral remote sensing of a mineralized system in the grizzly peak caldera, Colorado: Implications for exploration and acid drainage baseline[C]//Society Of Economic Geologists, Review in Economic Geology, 2009, 16:123-124.
- [62] Zamudio J A. Focusing field exploration efforts, using results from hyperspectral data analysis of the EI capitan gold-plantinum group metals-iron deposit, New Mexico[C]//Society Of Economic Geologists, Review in Economic Geology, 2009, 16:169-176.
- [63] Rogge D M, Rivard B, Harris J, et al. Application of hyperspectral data for remote predictive mapping, Baffin Island, Canada[C]//Society Of Economic Geologists, Review in Economic Geology, 2009, 16:209-222.
- [64] Yan Baikun, Wang Runsheng, Gan Fuping, et al. The progress of research on rock and mineral information extraction using TIR[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(10):116-126. [闫柏琨, 王润生, 甘甫平, 等. 热红外遥感岩矿信息提取研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(10):116-126.]
- [65] Taranik J V, Coolbaugh M F, Vaughan R G. A overview of thermal infrared remote sensing and mineral exploration in the Great Basin, western United States[C]//Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology, 2009, 16:41-57.
- [66] Gan Fuping, Wang Runsheng, Ma Yenai, et al. Alteration extraction method based on spectral matching and filtering[J]. *China Image and Graphics Journal*, 2003, 8(2):147-150. [甘甫平, 王润生, 马蔼乃, 等. 基于光谱匹配滤波的蚀变信息提取[J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(2):147-150.]
- [67] Zhang Zonggui, Wang Runsheng, Guo Dahai, et al. A Research on Mineral Identification Method and Technique with Hyperspectral Remote Sensing and Analysis to the Affect Factors[M]. Beijing: Geological Publication House, 2006. [张宗贵, 王润生, 郭大海, 等. 成像光谱岩矿识别方法与技术研究和影响因素分析[M]. 北京:地质出版社, 2006.]
- [68] Zhang Jieli. A research on uranium resource identification technique using Hhyperspectral remote sensing[C]//Li Ziyang, eds. Compilation of Theses on Nuclear Science and Technique. Beijing: Geological Publishing House, 2009: 211-219. [张杰林, 铀矿资源高光谱信息识别技术研究[C]//李子颖主编:核地质科技论文集. 北京:地质出版社, 2009:211-219.]
- [69] Wei Xinxin, Yan Shouxun. Comparative research on the demonstration of the target detection arithmetic to detect the geological small target[J]. *Remote Sensing Technique and Application*, 2010, 25(1):77-83. [魏欣欣, 燕守勋. 比较研究目标探测算法在地质小目标探测上的性能[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(1):77-83.]
- [70] Newmont Australia Co, Ltd, Jones D G. Gold Deposits in Central Victorian, Australia[M]. Australia: Western Australia Press, 1988:13.
- [71] Kalinnowski A, Olive S. ASTER Mineral Index Processing Manual[M]. Remote Sensing Applications, Geoscience Australia, 2004.
- [72] Hubbard B E, Crowley J K. Mineral mapping on the Chilean-Bolivian Altiplano using co-orbital ALI, ASTER and Hyperion imagery: Data dimensionality issues and solutions[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 99:173-186.

- [73] Hubbard B E, Crowley J K, Zimbelman D R. Comparative alteration mineral mapping using visible to shortwave infrared (0.4-2.5 μm) Hyperion, ALI and ASTER imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41: 1 401-1 410.
- [74] Wang Runsheng. Strategic consideration to the development of the geological remote sensing[J]. *National Resource Remote Sensing*, 2008, 75(1): 1-12. [王润生. 遥感地质技术发展的战略思考[J]. 国土资源遥感, 2008, 75(1): 1-12.]
- [75] Clark R N, Gallagher A J, Swayze G A. Material absorption band depth mapping of imaging spectrometer data using a complete band shape least-squares fit with library reference spectra [C]//Proceedings of the Second Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, JPL Publication, 1990; 90-54, 176-186.
- [76] Clark R N, Swayze G A, Gallagher A, *et al.* Mapping with imaging spectrometer data using the complete band shape least-squares algorithm simultaneously fit to multiple spectral features from multiple materials[C]//Proceedings of the Third Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, JPL Publication 1991: 91-28, 2-3.
- [77] Clark R N, Swayze G A. Mapping minerals, amorphous materials, environmental materials, vegetation, water, ice and snow, and other materials: The USGS tricorder algorithm[C]//Green R O, ed. Summaries of the Fifth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, January 23- 26, 1995, JPL Publication 95-1, 39-40.
- [78] Swayze G A, Clark R N. Spectral identification of minerals using imaging spectrometry data: Evaluating the Effects of signal to noise and spectral resolution using the tricorder Algorithm[C]//Green R O, ed. Summaries of the Fifth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, 1995, January 23- 26, JPL Publication 95-1, 157-158.

Remote Sensing and Spectral Geology and Their Applications to Mineral Exploration

Yan Shouxun¹, Wu Xiaobo¹, Zhou Chaoxian², Liu Zhaohui³, Zhuang Yongcheng⁴,
Cao Chunxiang¹, Wei Xinxin¹, Yu Caihong¹, Xiao Chunsheng¹

(1. *Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences Beijing 100101, China;*

2. *China Geological Survey of Nonferrous Metal Resources, Beijing 100012, China;*

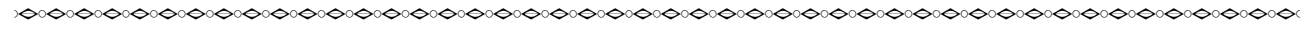
3. *Qinghai Western Resources Corporation, Xining 810000, China;*

4. *Qinghai Geological and Mineral Exploration Company, Xining 810012, China)*

Abstract: Based on the papers published in journals including the Review in Economic Geology, Volume 16, 2009. Remote Sensing and Spectral Geology, combined with our new achievements in mineral exploration with Crosta method, a review of remote sensing and spectral geology and their applications to mineral exploration are presented in this paper. Here the spectroscopy, broad-band remote sensing with TM/ETM and ASTER, hyperspectral remote sensing including surface spectral geological application and airborne hyperspectral geological application, additional with thermal infrared geological application are discussed. The traditional information mapping is mainly interpretation. Modern remote sensing can not only extract the geological and alteration information, but also conduct effective mapping, which is unable to do so with other methods. Through combining with geophysics, geochemistry and field and laboratory spectra, modern remote sensing techniques can be used to improve the understanding of the metallogenesis. Spectral geology combined with XRF and GPS can quantitatively map minerals and alteration in the fields. TM/ETM can be used to extract mineralized alteration information from the iron-oxide minerals and hydroxyl minerals to outline the targets on large scale. ASTER has five bands in SWIR, which can distinguish argillic from advanced argillic, phyllic, and propylitic assemblages as well as calcite from dolomites. Shorter wavelength bands were designed to distinguish iron oxides. Jarosite can be distinguished from hematite and limonite. A major technical hurdle is that it must be corrected to reflectance to distinguish these assemblages. Crosta

(2009) presents a method by which ASTER can be used for alteration mapping without the need of atmospheric correction, by applying multivariate statistics. ASTER has five thermal bands, but the pixels is 90m, too large, and the signal to noise is poor. Silica and carbonates can be mapped with the thermal bands, but it is noisy and does not always work well. Airborne hyperspectral sensors have effective signal-to-noise ratio for mineral mapping. The space-borne Hyperion has poor signal-to-noise ratio, and can not be effectively used for mineral exploration and mapping. The thermal data is an underappreciated and underutilized exploration tool. It has the potential for mapping silica, silicates, and carbonates. High spatial resolution image is useful to rapid assessment for new grass-root exploration area, advanced mineral exploration and mine design and construction. At last, the platform and data selection is discussed, and constructive conclusions are presented.

Key words: Geological remote sensing; Spectral geology; Crosta technique; VNIR-SWIR-TIR; Mineral exploration.



《地球科学进展》“973 项目研究进展”专栏公告

为了配合宣传国家重点基础研究发展规划对我国基础研究发展所取得的辉煌成就,进一步展示资源环境领域“973”项目的原创性研究成果,扩大交流,提升项目的科学价值,《地球科学进展》编辑部自 2005 年第 11 期开辟“973 项目研究进展”专栏,我们希望继续不断得到广大“973”项目首席科学家的大力支持和踊跃投稿,扩大刊登“973”项目中有关资源环境和全球变化方面的项目介绍、最新研究成果和进展。该专栏文章可包括以下几方面内容:

- (1) 对已结题的项目,主要围绕该项目取得的研究成果及其应用价值、发展前景、与国际水平的差距等内容。
- (2) 对正在进行的项目,主要就项目研究的现状、进展、新成果及发展前景等内容。
- (3) 对刚申请批准的项目,围绕该项目研究的目的、意义、关键科学问题及其要达到的目标等内容。

凡是无项目首席科学家署名的来稿,最好经首席科学家的同意和认可,并签署意见。撰写的文章要求客观、公正、实事求是,内容完整,数据翔实,应有必要的文献、英文文摘等内容。具体格式要求参阅《地球科学进展》的投稿须知。

投稿时请注明“973 项目研究进展”栏目,栏目稿件经审核达到发表要求的将尽快刊出,免收审稿费,酌收一定的版面费并致稿酬,同时免费赠送全年期刊一套(1~12 期)。

欢迎从事“973”项目研究的科学家、学者赐稿。谢谢对我们工作的支持和帮助。

《地球科学进展》编辑部