热烈庆祝中国地质学会成立100周年
1922～2022
Pre-pub. on line: www.geojournals.cn/georev

高分遥感数据在胶东水道地区金成矿远景区圈定中的应用研究

邹键[1),唐文龙[2),王凤华[3),胡峰[1),薄军委[1),王志新[1),刘治[1),魏绪峰[1),李勇[1)

1)山东省第三地质矿产勘查院,山东烟台,264004;
2)中国地质调查局天津地质调查中心,天津,300170; 3)山东省地质测绘院,济南,250013

内容提要:近年来遥感技术在分辨率、蚀变信息提取和覆盖能力方面有了大幅提升,已成功应用于国内外自然资源调查领域,并取得了不错的效果,遥感解译正成为地质调查工作中不可或缺的一种工作手段。水道地区位于华北克拉通东南缘与苏鲁造山带东北缘的衔接部位,是胶东牟平—乳山金矿带的核心地段,金矿资源丰富,目前运用遥感解译及信息提取技术开展该区的地质找矿工作较为薄弱。笔者等利用 ENVI5.3 遥感图像处理与分析软件对 ASTER(先进星载热辐射与反射辐射计, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)、GF-1 共 9 景遥感数据进行处理,使制作的图像信息逼真、线性构造明显,共解译线性构造 929 条、环形构造 89 个、韧性剪切带 15 条,其中北北东向断裂、环形构造和韧性剪切带边缘地段是金矿床产出的有利部位;基于 ASTER 数据采用"去干扰异常主分量门限技术"进行主成分分析,提取了铝、镁羟基和铁染异常信息,圈定异常浓集区 36 处,金矿床产出位置一般发育较强铝、镁羟基(Al—OH、Mg—OH)异常;结合区域金矿成矿规律开展了成矿预测,圈定金成矿远景区 12 处,经野外查证,新发现金矿点 2 处。遥感技术可为区域矿产地质调查提供强有力的技术支撑。

关键词:GF-1 和 ASTER 遥感数据;地质构造解译;遥感异常信息提取;成矿预测;胶东半岛; 牟平—乳山金矿带

遥感技术以其超强宏观性、信息丰富且提取快速的特点已被成功应用于地质填图和找矿研究(侯德华等,2018),特别是对于海拔高、植被覆盖严重、人员难以抵达的复杂环境区域,遥感找矿更是一种快捷高效的方法。国产卫星虽较国外卫星(法国、德国、美国等)在波普覆盖密度、超高空间分辨率影像、单颗卫星应用率上有较大差距,但在独有波段方面已超出国外(马玥等,2016;李娜等,2021),通过近几年的发展,国产卫星(如资源一号 02C、资源三号、高分一号、高分二号卫星等)的遥感数据在空间、光谱以及时间分辨率和数据覆盖能力方面得到了极大提升(郑雄伟等,2021),并具有较高的应用潜能。现阶段,遥感技术在自然资源调查领域已广泛应用,运用高光谱数据图像在热带雨林覆盖区、高山峡谷区、植被覆盖区、基岩区指导地质填图(胡官兵等,2019;王烜等,2019;程三友等,2021;李娜等,2021);利用国产高分一号卫星数据在伊朗南部铬铁矿富集地区开展不同尺度的遥感地质矿产解译工作,圈定了成矿有利地区(蒋校等,2021);通过对国产高分二号卫星数据在西藏桑耶地区进行预处理和影像增强,成功开展了岩性—构造遥感解译(侯德华等,2018);采用 Landsat 5TM 数据,在西藏尼木地区利用遥感单窗算法进行温度反演,有效地提取了地热异常(杨俊颖等,2021);以 Worldview-2 高空间分辨率数据为信息源进行图像增强处理,结合 ASTER(先进星载热辐射与反射辐射计, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)数据提取遥感异常,在西昆仑大红柳滩—俘虏沟地区开展地质矿产遥感解译,发现 4 种矿化类型并圈定找矿靶区 11 处(王辉等,2018);利用 ASTER 遥感影像,采用成像光谱法和主成分分析法提取矿化蚀变信息,扩大了青海虎头崖矿区的找矿规模,并发现了矿化富集地段,显示出 ASTER 数据对矿化蚀变信息有较强的敏感性,能提取较多矿

注:本文为中国地质调查局地质调查项目(编号:DD20160044、DD20190155),山东省地质矿产局科技攻关项目(编号:KY201501),烟台市自然资源和规划局战略性矿产勘查项目(编号:SDYTSJ2021-0105-02-1)和山东省 2020 年度省级地质勘查项目(编号:SDGP370000202002001782-A16)的成果。
收稿日期:2022-02-27;改回日期:2022-08-28;网络首发:2022-09-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.09.001
作者简介:邹键,男,1981 年生,硕士,高级工程师,从事矿产勘查及成矿规律研究工作;Email:zouj3472@163.com。通讯作者:唐文龙,男,1979 年生,正高级工程师,主要从事地质矿产调查与区域成矿规律研究工作;Email: twl011562@126.com。

化异常信息(程三友等,2020)。现阶段,国内外都在探索研究航空高光谱热红外遥感技术,我国利用航空热红外成像系统(TASI)在甘肃和新疆局部地区获取了高光谱热红外遥感数据,以热红外大气校正与光谱重建技术成功对规模较小的石英脉—硅化带进行了提取与区分(刘常德等,2018)。遥感解译技术在不断发展更新,正成为地质调查工作中不可或缺的一种工作手段。

胶东是我国最重要的黄金资源基地,累计探明金矿资源量已超 4500 t(于学峰等,2016),该区自西向东由 3 条金矿带组成:招远—莱州金矿带、栖霞—蓬莱—福山金矿带和牟平—乳山金矿带(于学峰等,2018)。近年来,随着烟台辽上新类型(黄铁矿碳酸盐岩型)金矿床的发现(李国华等,2017)和栖霞地区金矿(笏山、西陡崖、金山等大中型金矿床)(Yang Kuifeng et al., 2018;戚静洁等,2018;智云宝等,2020)不断取得找矿突破,为该区金矿勘查注入了新的活力。水道地区地处牟平—乳山金矿带核心地段,是该成矿带金矿床主要发育地区。研究区植被繁茂,为该区矿产地质调查工作带来了较大阻碍。笔者等采用 GF-1 和 ASTER 数据协同处理的方式,对工作区构造进行解译,对铝羟基、镁羟基和铁染蚀变信息进行提取,结合区域地质背景、控矿构造、成矿作用特征及金矿床的空间分布,圈定遥感金成矿远景区,为该区开展矿产地质调查、金矿勘探开发提供技术资料,同时为牟平—乳山金矿带遥感探测提

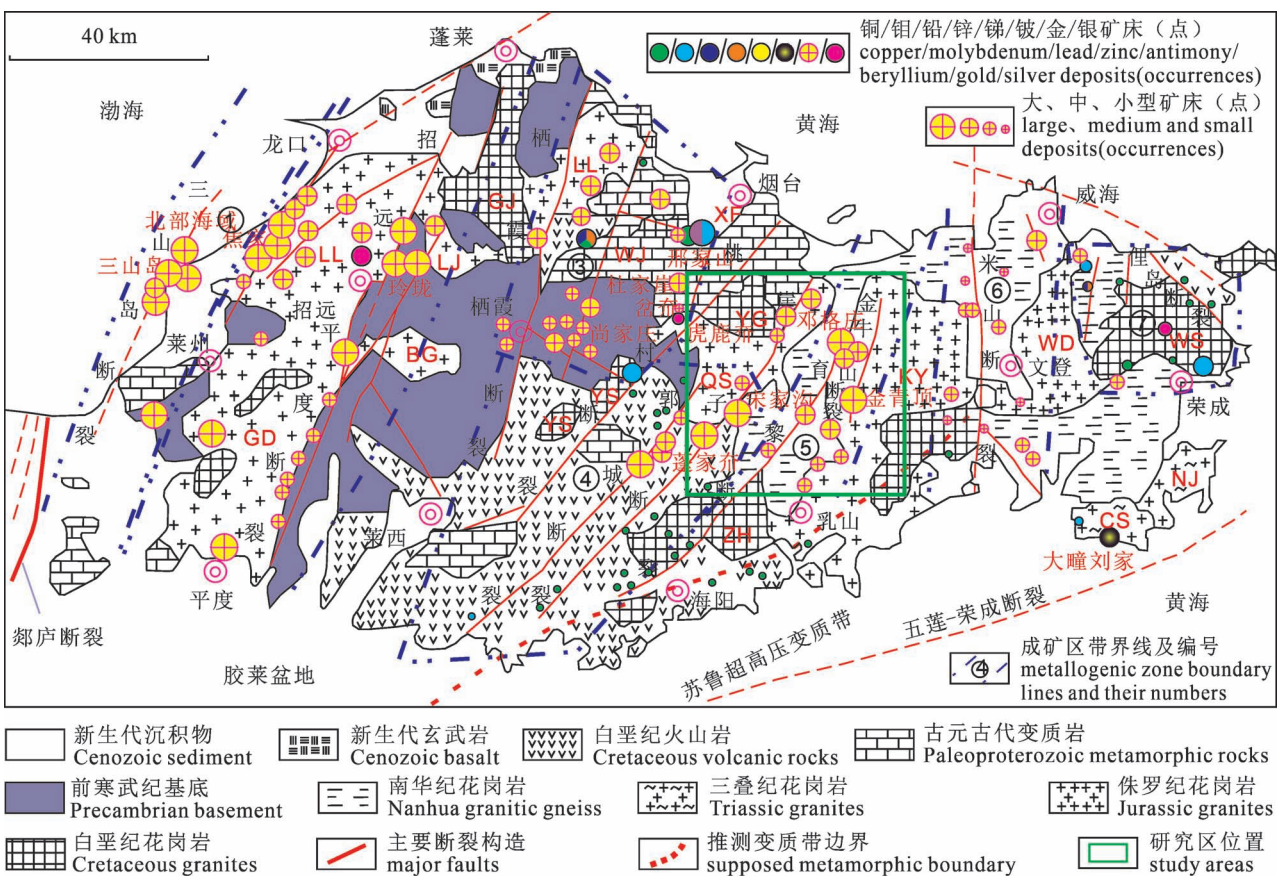


图 1 胶东地区地质简图及有色、贵金属矿分区带分布图(据丁正江等,2012 修改)

Fig. 1 Geological sketch map of Jiaodong Peninsula and distribution map of nonferrous and precious metals ore zones (modified from Ding Zhengjiang et al., 2012&)

中生代侵入岩:LL—玲珑岩体;GD—郭家店岩体;LJ—滦家河岩体;BG—毕郭岩体;WJ—王家庄岩体;XF—幸福山岩体;QS—鹊山岩体;WD—文登岩体;KY—昆嵛山岩体;GL—郭家岭岩体;YS—牙山岩体;YG—院格庄岩体;ZH—招虎山岩体;SF—三佛山岩体;WS—伟德山岩体。成矿区(带):① 莱州西部成矿带;② 招远—平度成矿带;③ 栖霞—蓬莱—福山成矿区;④ 胶莱盆地东北缘成矿区;⑤ 牟平—乳山成矿带;⑥ 威海—文登成矿带;⑦ 荣成成矿区

Abbreviations for Mesozoic granitoid intrusions: LL—Linglong; GD—Guojiadian; LJ—Luanjiahe; BG—Biguo; WJ—Wangjiazhuang; XF—Xingfushan; QS—Queshan; KY—Kunyushan; WD—Wendeng; GL—Guojialing; YS—Yashan; YG—Yuangezhuang; ZH—Zhaohushan; SF—Sanfoshan; WS—Weideshan. Metallogenetic zones (regions): ① western Laizhou; ② Zhaoyuan—Pingdu; ③ Qixia—Penglai—Fushan; ④ northeastern Jiaolai basin; ⑤ Muping—Rushan; ⑥ Weihai—Wendeng; ⑦ Rongcheng

供理论依据。

1　区域地质背景及矿床概况

研究区地处华北克拉通东南缘与苏鲁造山带东北缘的衔接部位,牟平—乳山金矿带内(图 1),主要出露古元古界荆山群一套浅海相变质沉积碎屑岩及碳酸盐岩建造、中生代莱阳群一套碎屑沉积岩建造,新元古代和中生代花岗岩类岩体以及广泛发育的闪长岩、辉绿玢岩、煌斑岩等岩脉,断裂主要呈北东向、北北东向、北西向和近东西向展布。区内金矿床主要受控于北北东向低级别高角度断裂带(自西向东主要有唐家沟断裂、金牛山断裂、岔河断裂、将军石断裂、石城断裂),且于同一断裂呈串珠状产出。金矿体具北东侧伏、尖灭再现、平行斜列的特征,整体走向 5°~15°,倾向南东,局部反倾,倾角 75°~85°,矿体长度 40~1030 m(包含隐伏矿体),最大斜深 1300 m,赋存标高 +120~-1220 m。厚度 0.30~12.00 m,品位 2.10~12.29 g/t(吴凤萍等[1],2021)。矿床成因类型为岩浆期后中低温热液裂隙充填型,矿石工业类型主要为黄铁矿石英脉型(薛建玲等,2019),成矿年龄为 115~125 Ma(李洪奎等,2013;唐文龙等,2021)。受挤压—伸展构造作用影响,矿体及围岩普遍发育钾化、钠长石化、褐铁矿化、硅化、绢云母化、碳酸盐化、绿泥石化等蚀变(赛盛勋等,2020),且蚀变范围往往为矿体范围的数倍至数十倍,这些热液蚀变生成的矿物通常含有 Mg—OH、Al—OH、CO_3^{2-} 和 Fe^{3+} 离子(基团)信息(吕凤军等,2009;李娜等,2021),各离子基团均兼具有不同的波普特征,它们代表着不同的蚀变或者多种蚀变的叠加,可利用遥感异常信息发现矿化蚀变线索(韩海辉等,2020)。

2　数据源及数据处理

2.1　数据源及影像处理

高分一号卫星是我国高分辨率对地观测系统的第一颗卫星,卫星全色分辨率是 2 m,多光谱分辨率为 8 m,主要用于构造信息的解译。ASTER 数据有 14 个波段:可见光、近红外和短波红外到热红外,光谱分辨率较高, 特别是在短波红外有 6 个波段、热红外有 6 个波段,它们分别对粘土矿物、碳酸盐和硅酸盐类矿物具有较好的识别能力(杨日红等,2012)。

本次利用国产 GF-1(分辨率为 2m,4 个波段)和 ASTER 遥感数据(分辨率 15 m,6 个短波红外波段)为信息源,共计 9 景,卫星轨道号、时相及主要用途见表 1。要求图像无云层遮挡,影像清晰、层次丰富、色调均匀、反差适中。相邻景图像之间有不小于图像宽度 4% 的重叠。选择信息量大、相关性小的 3 个多光谱波段合成,波段之间配准误差不大于 0.2 mm,图像套合误差不大于 0.3 mm。

利用美国 ENVI5.3 遥感图像处理与分析软件对图像进行处理,处理方法主要有辐射定标、大气校正、波段组合、几何校正、图像融合、增强、数字镶嵌等。对工作区遥感数据进行主成分分析和光谱统计分析,依据不同图像各波段的相关性及地物光谱特征,采用 ASTER—B631 和 GF1—B431 组合,使影像反映的地物清晰、水体突出、林草分明、信息结构逼真、线性构造明显;选取控制点进行几何校正,控制图像精度在一个像素元的误差范围内。同时,采用 HIS、PC Spectral sharpening 处理方法将多光谱数据与全色数据融合,使地形地物界线更为清晰,圆滑状的地物边界纹理特征更明显。工作区跨多景遥感数据,对相邻两景影像作数据镶嵌和色彩调整,镶嵌后的影像图几何保真度高、畸变小、无漏缝、无重叠、色调自然匀称、纹理清晰(图 2)。

2.2　遥感构造解译

研究区构造控矿作用明显,分析构造与矿化蚀变之间的关系对热液矿床研究具有重要的意义。本次利用 ASTER—B631 和 GF1—B431 遥感影像数据,对区内断裂、韧形剪切带和环形构造进行解译。线性断裂主要表现为不同色调的线性色异常(图 3a)或呈宽带状直线型展布(图 3b),北东向和北北东向断裂规模大、延伸长、分布广且数量多,表现为大型冲沟、陡坎等,北西向断裂表现为北西向的线状冲沟,排列的陡坎等,局部地段控制了现代地形地

表 1 胶东水道地区卫星遥感数据一览表

Table 1 List of satellite remote sensing data in Shuidao area of Jiaodong Peninsula

序号	数据名称	轨道号及时相	分辨率(m)	数量	主要用途
1	ASTER	ASTL1A_20050416024651	15	1 景	1∶5 万卫星影像图制作、遥感地质解译、异常提取
2		ASTL1A_20050416024642	15	1 景	
3		ASTL1A_20060309025226	15	1 景	
4	国产 GF-1	GF1_ 20141007_903147	2	1 景	1∶5 万卫星影像图制作和遥感地质解译
5		GF1_ 20141007_903105	2	1 景	
6		GF1_ 20141007_903141	2	1 景	
7		GF1_ 20131126_116855	2	1 景	
8		GF1_ 20141007_903120	2	1 景	
9		GF1_ 20141007_ 903097	2	1 景	

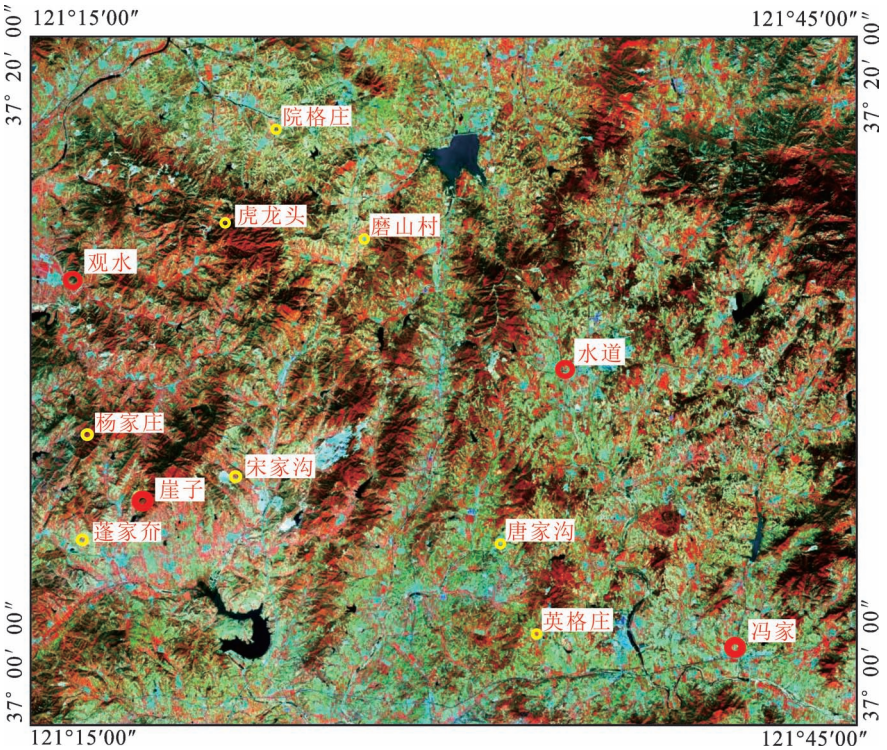


图 2 胶东水道地区 GF-1 遥感影像图(2013 年 11 月、2014 年 10 月成像)

Fig. 2 GF-1 Remote sensing image in Shuidao area of Jiaodong Peninsula (mapped in November, 2013 and October, 2014)

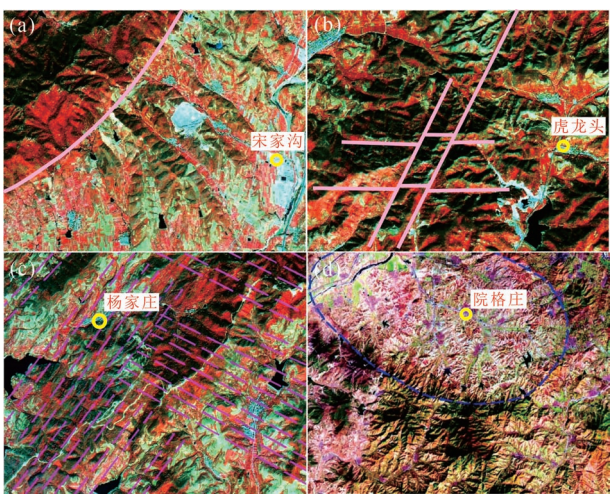


图 3 胶东水道地区四处构造影像特征

Fig. 3 Characteristics of structural image in Shuidao area of Jiaodong Peninsula

(a)宋家沟村两类地貌单元线性色异常;(b)虎龙头村断裂呈宽带状直线型展布;(c)杨家庄韧性剪切带影像特征;(d)院格庄镇环形构造影像特征

(a) Linear color anomalies of two types of geomorphological units in Songjiagou village; (b) the Hulongtou Village fault is distributed in a wide band straight line;

(c) image characteristics of ductile shear zone in Yangjiazhuang;

(d) image characteristics of ring structure in Yuangezhuang Town

貌,并显示为张性断裂特征;韧性剪切带呈密集的细线纹理、条带状延伸,连续性较好,呈联排线状凸起(图 3c);环形构造在地表的变现特征为放射状水系、环形水系、环状排列的水点,或环形山脊、环形冲沟、环状色调异常(图 3d)。

2.3 ASTER 数据遥感异常提取

基于 ASTER 数据,本次采用“去干扰异常主分量门限技术”提取铝羟基、镁羟基和铁染等细微的矿物异常信息,异常提取流程包括预处理、信息提取和后处理三大部分(图 4)。

2.3.1 预处理

首先对数据进行筛选,选择的数据时相在 10 月至 5 月间,为地表植被不发育、无冰雪覆盖等受干扰较小的季节,且选择该空域的云雾雪较少的时段;其次是去边框,将 B1~B8 波段做“与”运算,得到全边框的掩膜数据,应用掩膜方法,使数据覆盖范围一致;再者是大气校正,采用 FLASH 模型消除大气和光照等因素对地物反射的影响,反演地物真实反射率;最后是去植被、水体、阴影干扰,结合其波普特征,采用 Band3/Band2 方法去除植被效果好,采用低端切割可消除水体和阴影的干扰。

2.3.2 信息提取

矿致遥感异常信息的提取以克罗斯塔主分量分析为主,比值法为辅。克罗斯塔主分量分析从模式识别(或分类)的角度,进行统计决策,其所获各主分量之间不相关,在各主分量之间信息没有重复或冗余,而比值法可增强热液蚀变典型矿物的光谱响应,能圈定与成矿相关的蚀变矿物的遥感异常(付丽华和张策,2020)。异常提取还需进行门限化分级、滤波去除孤立点。各异常类型的主分量特征矩阵见表 2。

铝羟基(Al—OH)异常:白(绢)云母、高岭石、蒙脱石和伊利石等含铝羟基蚀变矿物对应 ASTER 数据的 B5 和 B6 波段,选用 B1、B3、B4、B6 波段组合进行主成分分析,以 3σ 做为主分量输出的动态范围,本征向量为 B4 与 B6 贡献系数符号相反,B4

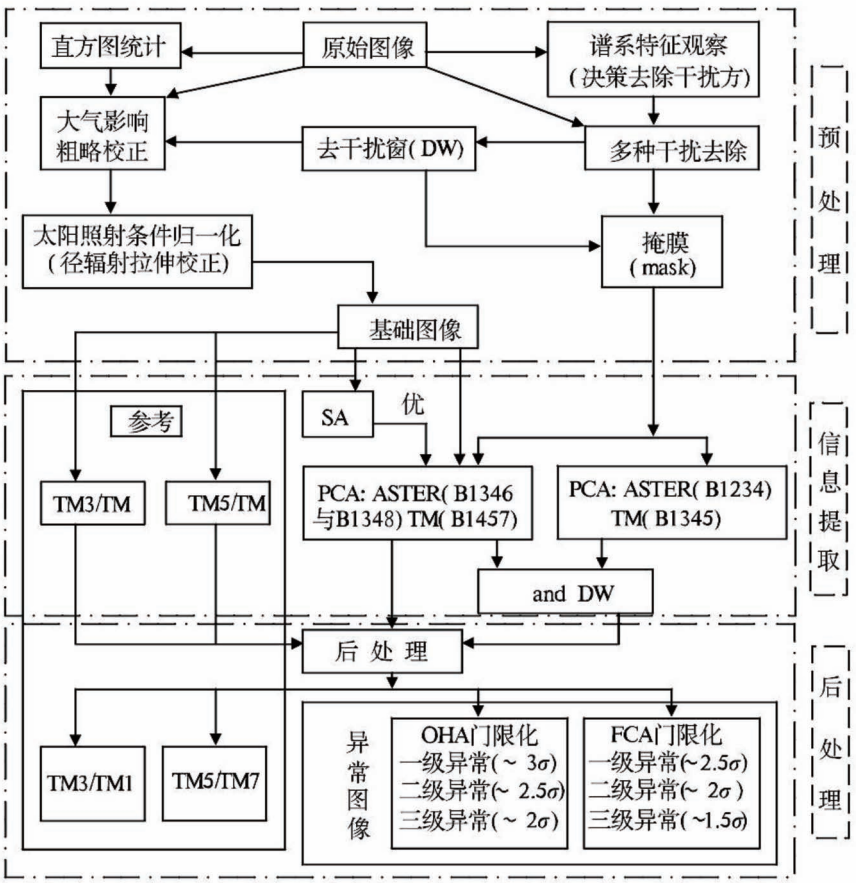


图 4 异常提取流程图

Fig. 4 Flowchart of exception extraction

OHA 即 HA—羟基异常; FCA 即 FA—铁染异常

OHA, HA—hydroxyl anomaly; FCA, FA—iron stain anomaly

表 2 ASTER 数据 Crosta 主分量特征矩阵

Table 2 Crosta main component feature matrix of ASTER data

异常类型	主分量	本征向量			
		B1	B3	B4	B6
铝羟基	PC1	0.511653	0.508552	0.510035	0.509755
	PC2	0.798054	−0.138767	0.733166	−0.733166
	PC3	0.502953	−0.561458	−0.436080	0.491566
	PC4	−0.070014	−0.559324	0.756450	−0.001374
		B1	B3	B4	B8
镁羟基	PC1	0.181335	0.505653	0.644869	0.543669
	PC2	−0.217025	−0.813635	0.361735	0.400058
	PC3	0.910865	−0.245569	−0.248654	0.219528
	PC4	0.300571	−0.148355	0.625670	−0.704404
		B1	B2	B3	B4
铁染	PC1	0.235684	0.362321	0.598857	0.674200
	PC2	0.645595	0.516287	0.063081	−0.559174
	PC3	0.260260	0.278528	−0.797469	0.467686
	PC4	−0.678177	0.724288	0.037871	0.118525

取正,B6 为负,其中 PC3 效果最佳;镁羟基(Mg—OH)异常:绿泥石、绿帘石、角闪石、蛇纹石等含镁羟基蚀变矿物对应 ASTER 数据的 B8 波段,选用 B1、B3、B4、B8 波段组合进行主成分分析,以 3σ 做为主分量输出的动态范围,本征向量为 B4 与 B8 贡献系数符号相反,B4 取正,B8 为负,采用 PC4 提取异常效果较好。铁染异常:含铁蚀变矿物吸收谷与 ASTER 数据 B1 和 B3 波段相对应,选用 B1、B2、B3、B4 波段组合进行主成分分析,以 3σ 做为主分量输出的动态范围,本征向量为 B1 与 B2 贡献系数符号相反,B1 取负,B2 为正,采用 PC4 提取与含 Fe^{3+}(褐铁矿、黄钾铁矾等矿物)相关的铁染异常,效果最佳。遥感异常分级和滤波处理:采用均值加 3 倍标准离差切割进行异常分级,由强至弱划分为一、二、三级,对 3 个级别异常进行中值滤波处理,去除孤立点,使异常更为集中,一级异常采用“3×3”,二、三级异常均采用“5×5”。

2.3.3 后处理

在对多种干扰进行去除时,可能会删除了有价值信息,或保留了残余干扰造成的假异常。对提取的异常进行进一步观察,采取数字手段通过后处理保留矿致异常,排除湖边湿地、干河道、冲积区、薄云等的干扰。

3 控矿信息解析

3.1 控矿构造遥感解译

本次在研究区共解译断裂 929 条,大体可以分为 4 组:北东向、北北东向、北西向和近东西向,已知金矿床多与北北东向断裂密切相关(图 5)。解译环形构造 89 个,最大的环形构造直径约 14.6 km,小者约 1.5 km,一般为 3~5 km。从空间分布看,区内环形构造多分布在断裂附近或断裂交汇处,具有成群分布特点。环形构造形态呈椭圆形、近圆形,主要分布在双山屯—宋家沟和西直格庄—唐家沟一带,

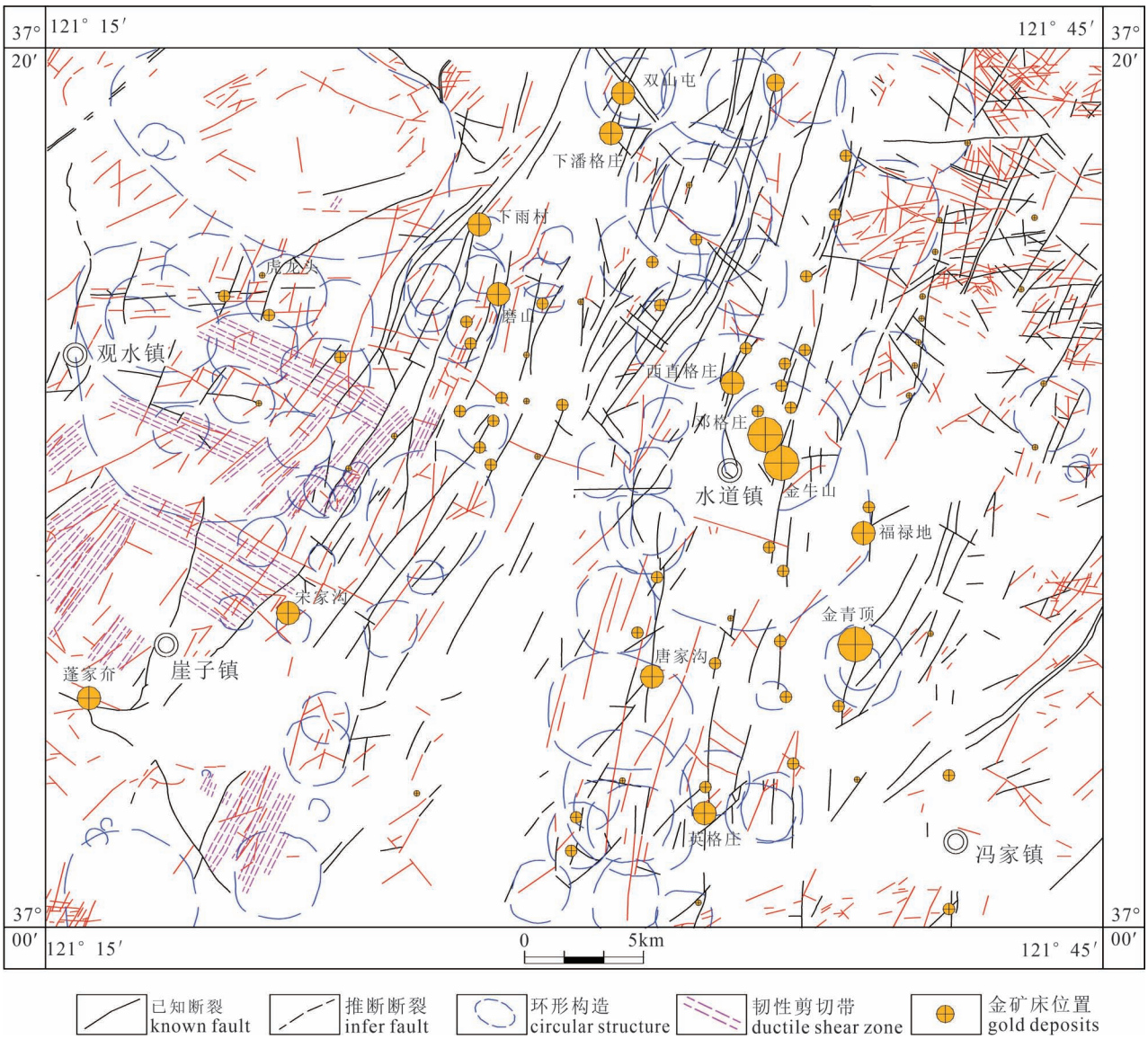


图 5 胶东水道地区构造遥感解译图

Fig. 5 Remote sensing interpretation in Shuidao area of Jiaodong

发育于早白垩世二长花岗岩、晚侏罗世二长花岗岩中,环间关系有单环、同心环、复合环,已发现金矿床多位于环形构造内部及边缘,位于环心以金牛山、邓格庄、双山屯和金青顶等大中型金矿床为代表,下潘格庄、磨山、福禄地等金矿床分布于环形边缘。解译韧性剪切带 15 条,分布在观水—崖子一带,呈北东向、北西向展布,最长 6.0 km,最宽 3.4 km。经调查,地表出露岩性为眼球状花岗质糜棱岩和糜棱岩化黑云母二长花岗岩,主界面近于水平,运动方向由西向东,面理、线理均发育形成以糜棱岩为主的 S 型构造岩。韧性剪切带边缘与北东向断裂的交汇部位是金矿床产出的有利部位,以宋家沟金矿、蓬家夼金矿为代表。

3.2 遥感蚀变异常信息分析

研究区构造—岩浆活动强烈,岩浆热液与围岩发生交代的过程中产生了大量的蚀变矿物,影响着成矿作用方式、矿体产状、规模及矿种。区内遥感蚀变异常多呈北东向、北北东向展布,与断裂带方向一致,且一、二、三级均有分布。对提取的羟基、铁染异常信息开展叠加分析,把成矿地质背景一致或同一类型、空间上紧密相连的遥感蚀变异常圈定为遥感异常浓集区。全区共圈定各类异常浓集区 36 处(图 6),其中铁染异常浓集区 10 处,羟基异常浓集区 26 处。浓集区的展布与断裂带和金矿床分布基

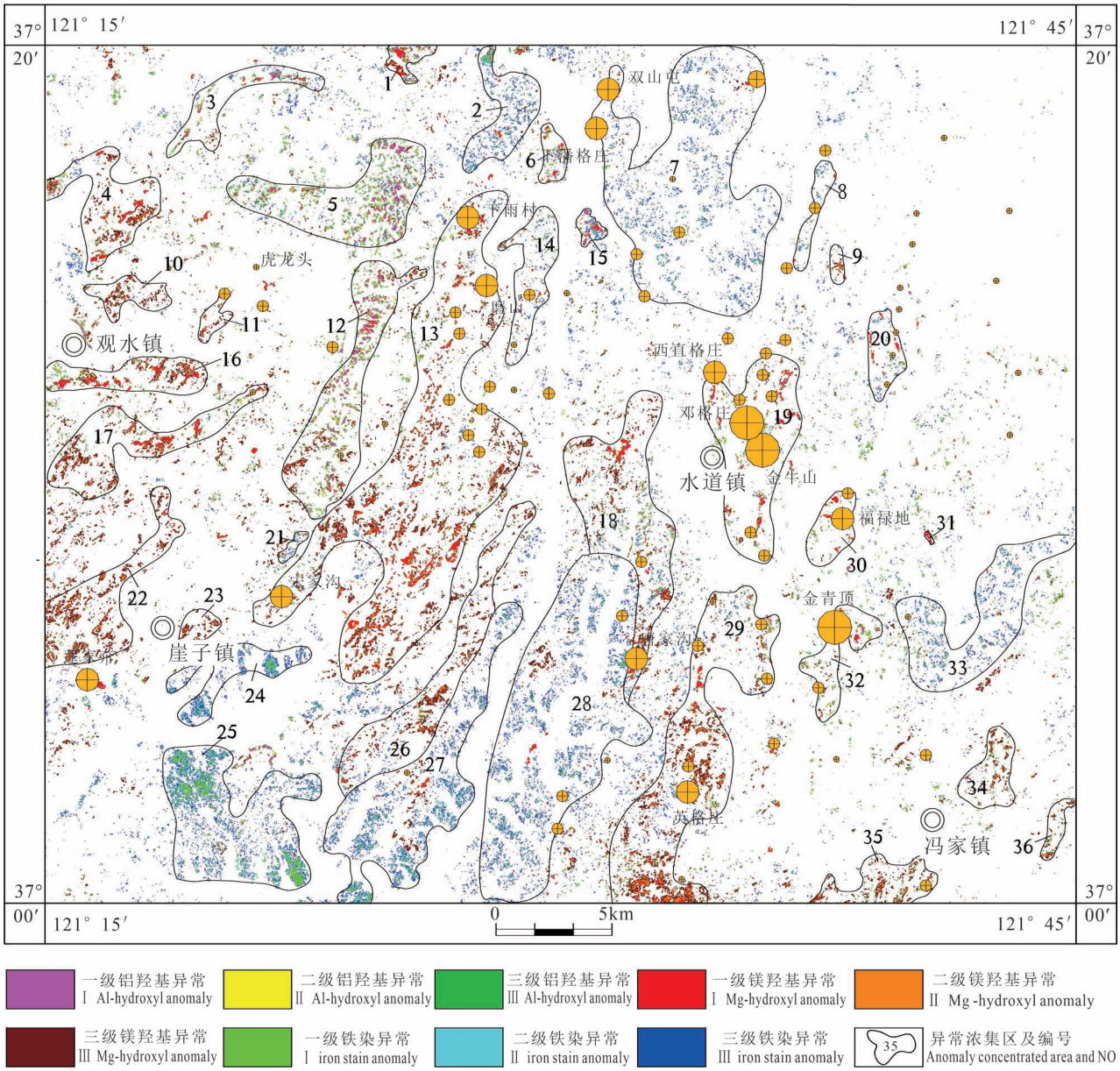


图 6 胶东水道地区遥感羟基、铁染异常分布图

Fig. 6 Remote sensing hydroxyl and iron-stained anomaly distrbution map in Shuidao area of Jiaodong Peninsula

本吻合,而浓集区以外的异常分布较分散,局部呈断续线状或点状展布,以镁羟基蚀变为主,铝羟基和铁染异常次之。

铁染异常主要发育于研究区南部和北部,规模较大,强度以三级为主,其内金矿床分布较少。野外现场调查可见大面积古元古代荆山群浅海相变质碎屑沉积岩、碳酸盐岩和中生代莱阳群碎屑沉积岩出露,示矿性不明。铝、镁羟基异常主要分布在研究区中部,与断裂构造、环形构造产出位置相关,呈条带状和弧带状展布,推测为断裂带内蚀变矿物引起,该异常分布区可见多处金矿床产出;块状或点状分布的遥感异常推测由岩体引起。

选择两个具有代表性的遥感解译断裂和蚀变信息的区域开展实地调查。唐家沟地区,位处 18 号异常浓集区,内有中型金矿床 1 处,遥感解译的北东向与北北东向断裂与实地相符,其控矿断裂(唐家沟断裂)西侧的古元古界变质地层与铁染异常对应,断裂带内岩石发育高岭土化、绢云母化和褐铁矿化与带状展布铝、镁羟基位置对应(图 7a)。英格庄地区,位处 29 号异常浓集区,内有中型金矿床 1 处,其控矿断裂(金牛山断裂)地表特征明显,与遥感解译断裂位置一致,断裂带内岩石主要发育褐铁矿化、硅

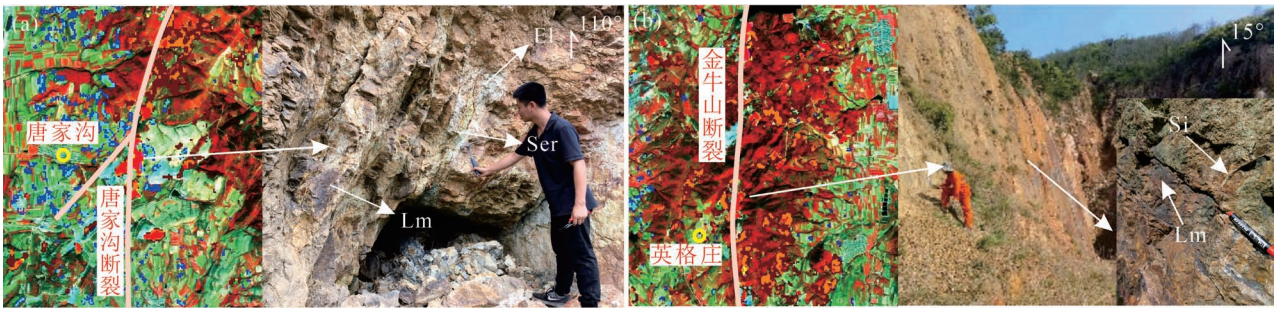


图 7 遥感异常提取及实地特征：(a) 唐家沟地区；(b) 英格庄地区

Fig. 7 Remote sensing anomaly extraction and field characteristics: (a) Tangjiagou area; (b) Yinggezhuang area

化、绢云母化、高岭土化等蚀变，遥感解译该区主要发育铝、镁羟基异常，且一、二、三级皆有分布，也是沿断裂呈带状展布。总体来看，矿化蚀变位置与铝、镁羟基异常区具有良好的对应关系(图 7b)。

4 遥感金成矿远景区圈定及验证

4.1 金成矿远景区圈定

在成矿地质背景的辅助下，将遥感构造解译与遥感异常浓集区叠加并进行综合分析是优选遥感成矿远景区、圈定找矿靶区的重要依据。找矿靶区圈定以后，还需要详细野外验证，并根据实际情况对成矿远景区做进一步的完善。本次以牟平—乳山地区金矿成矿地质背景、控矿构造及成矿作用等条件为

表 3 胶东水道地区金成矿远景区一览表

Table 3 The table of Au metallogenic prospective areas in Shuidao area of Jiaodong Peninsula

编号	出露地质体	构造特征	遥感异常特征	已知典型金矿床
Ⅰ	晚侏罗世二长花岗岩、古元古界变质岩	发育北北东向和北西向断裂；环形构造，为复合环，数量多，规模大	有 1 处铁染异常浓集区，规模大，强度中等；另发育 1 处镁、铝羟基浓集区，异常强度高，面积小	双山屯、下潘格庄
Ⅱ	晚侏罗世二长花岗岩	发育近东西向、北东向断裂；环形构造，为单一环；北西向韧性剪切带发育	有 2 处铝、镁羟基异常浓集区，形成多个浓集中心，规模大，强度高，另见有零星分布的羟基异常	里夼
Ⅲ	晚侏罗世二长花岗岩	北北东向断裂发育且规模大；环形构造，为复合环；北东向韧性剪切带发育	有 3 处铝、镁羟基异常浓集区，呈北北东向带状展布，形成多个浓集中心，规模大，强度高；铁染异常相对发育	下雨村、磨山
Ⅳ	晚侏罗世二长花岗岩	发育北北东向断裂；环形构造，为单一环	有 2 处异常浓集区。发育铁染异常和镁羟基异常，规模较小，强度弱	金矿点
Ⅴ	晚侏罗世二长花岗岩	发育北北东向、北东向断裂；环形构造，为单一环	有 1 处铝、镁羟基异常浓集区，零星分布铁染异常，规模较小，强度弱	下朱车
Ⅵ	晚侏罗世二长花岗岩、古元古界变质岩	北北东向断裂发育且规模大；环形构造发育，为复合环，规模中等	有 2 处异常浓集区。发育铝、镁羟基和铁染异常，异常规模大、强度高、呈北北东向带状分布，形成多处浓集中心	唐家沟
Ⅶ	晚侏罗世二长花岗岩	北北东向断裂发育且规模大；环形构造发育，为复合环，规模中等	有 2 处异常浓集区。发育铝、镁羟基异常，呈北北东向展布，规模中等，强度高，形成多处浓集中心	邓格庄，腊子沟
Ⅷ	晚侏罗世二长花岗岩	发育北北东向和北西向断裂；环形构造发育，为一单环，规模小	有 1 处异常浓集区，发育一级铝、镁羟基异常，呈北北东向展布，形成多个浓集中心	金矿点
Ⅸ	晚侏罗世二长花岗岩、中生界砾岩和砂砾岩、古元古界变质岩	发育近东西向盆缘断裂；环形构造发育，为单环，规模小；北西向、北东向韧性剪切带发育	有 3 处异常浓集区。以镁羟基较发育，规模大，强度高，呈北北东向、北东向沿断裂展布，形成多个浓集中心	宋家沟、蓬家夼
Ⅹ	晚侏罗世二长花岗岩、古元古界变质岩	北北东向断裂发育且规模大；环形构造发育，规模中等，为复合环	有 1 处铝、镁羟基异常浓集区。异常规模大、强度高、呈北北东向带状分布，形成多处浓集中心。	英格庄
Ⅺ	晚侏罗世二长花岗岩	北北东向断裂发育且规模大；环形构造发育，为复合环，规模中等	有 2 处异常浓集区，以铝、镁羟基异常较发育，强度高，有 2 处浓集中心	金青顶、福禄地
Ⅻ	晚侏罗世二长花岗岩	发育北北东向、北东向断裂	有 1 处异常浓集区。主要发育铝、镁羟基异常，多沿北北东向呈带状展布	石城

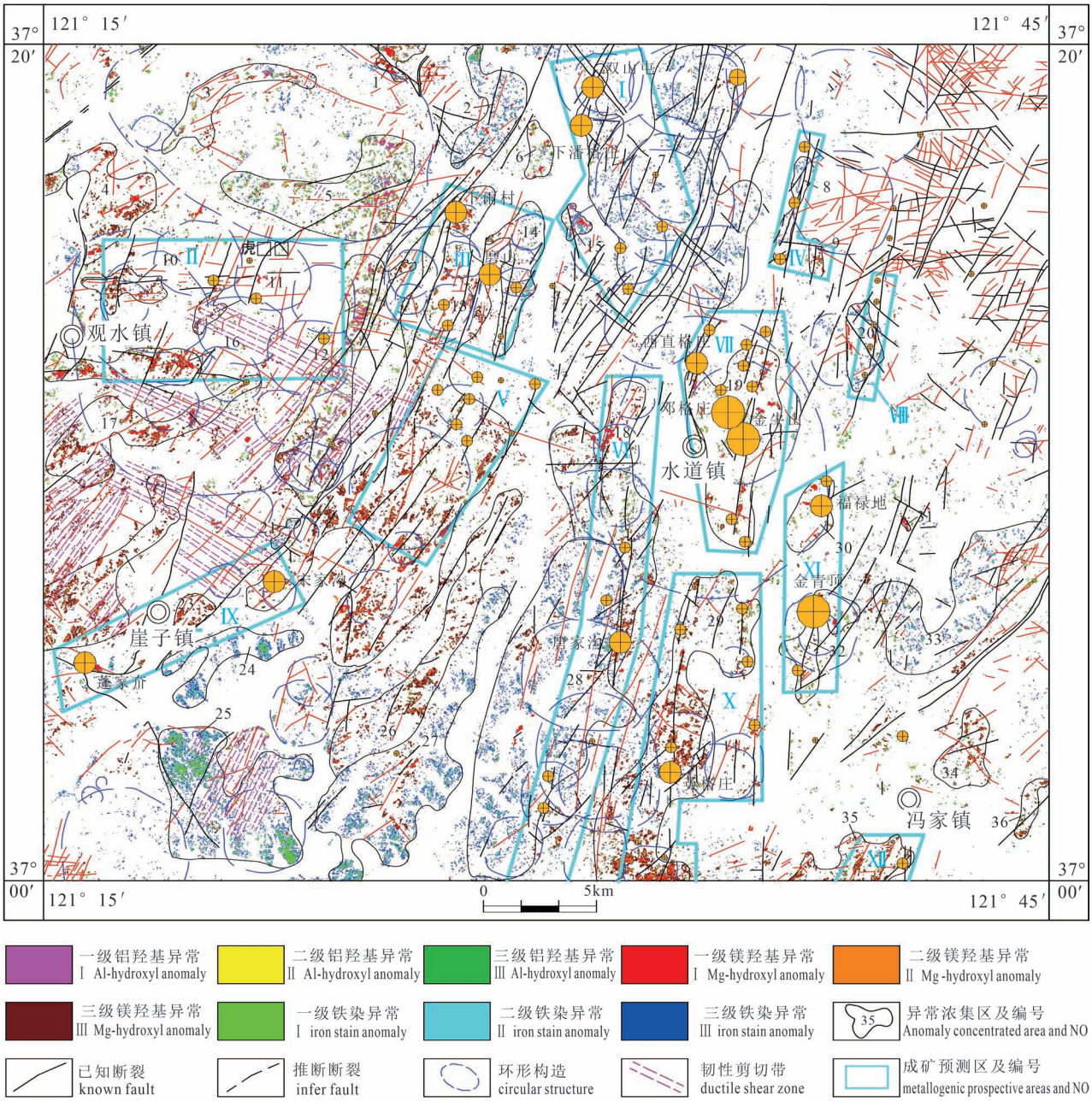


图 8 胶东水道地区金成矿远景区分布图

Fig. 8 Distribution map of gold metallogenic prospective areas in Shuidao area of Jiaodong Peninsula

基础,将遥感解译的断裂、环形构造、韧性剪切带和蚀变异常信息与已知金矿床作套合分析(图 8),总体表明在晚侏罗世二长花岗岩分布区,环形构造和北北东向断裂发育地段,以及铝、镁羟基异常浓集区三者叠合部位,是金矿床产出的有利位置。区内已知有 37 处金矿床(点),其中 32 处产于北北东向及其次级断裂带上,3 处产于近东西向与北北东向断裂交汇处,还有 2 处产于位于北东东向盆缘断裂中(韧性剪切带边部),皆与环形构造密切相关。区内产出的唐家沟、金牛山、英格庄等大中型金矿床,其蚀变带出露地表规模越大,对应的铝、镁羟基异常的强度和规模越大;但也有特殊情况,如双山屯、下潘格庄、金青顶中大型金矿床,因矿体多隐伏于地下,地表出露蚀变带规模较小,仅见零星铝、镁羟基异常分布。故在该区域寻找金矿床(点),重点关注环形构造(尤其是同心环)且还有北北东向断裂或北东向与近东西向断裂交汇处或韧性剪切带边部区域,其次考虑一、二级铝、镁羟基异常浓集区及浓集中心

的分布。另外,对遥感蚀变异常浓集区以外的二和三级羟基异常发育区、带状断续展布的异常区也应注意,如在水道镇东北部地区,环形构造和北北东向断裂发育地段,可见二、三级铝、镁羟基异常呈点状和带状分布,见有 5 处金矿点分布。

根据研究区遥感解译的断裂、环形构造和韧性剪切带的分布特征、规模大小以及遥感异常浓集区的分布特征、规模、强度等信息,结合已知金矿床的控矿地质条件及成矿地质特征,划分了 12 处金成矿远景区(表 3)。在晚侏罗世二长花岗岩分布区,以环形构造和北北东向断裂或韧性剪切带发育为构造特征,以发育羟基异常浓集区并形成浓集中心为遥感异常特征,是热液矿床发生围岩蚀变、含矿热液运移、富集的有利区域,金矿床(点)多分布于此。

4.2 野外验证

在遥感解译圈定的远景区内,开展了实地异常查证。在Ⅱ号和Ⅲ号远景区内,已知矿权的外围,发育环形构造和羟基异常地段新发现金矿点各 1 个。

Ⅱ号远景区内,在虎龙头村西 1.0km 处,在近东西向和北东向断裂交汇部位、环形构造中心以及二级铝羟基、三级镁羟基和一级铁染异常发育地段,新发现金矿化带 1 条,蚀变带呈透镜状产出,地表出露宽度约 2.0~5.0 m,断续延伸超过 300 m,其内圈定金矿体 1 个,宽 3.90 m,产状 32°∠62°,金品位 3.11×10^{-6},黄铁矿化硅化碎裂岩为赋矿岩石。风化呈褐红色,新鲜面呈灰白—灰黑色,发育绢英岩化、黄铁矿化蚀变,黄铁矿较发育呈浸染状、团块状分布(图 9a)。Ⅲ号远景区内,磨山村南西 800 m 处,在北北东向断裂、环形构造边缘以及一级铝羟基、二级镁羟基和一级铁染异常发育地段,新发现金矿化带 1 条,蚀变带呈脉状产出,出露长度大于 500 m,宽 1.10~5.50 m,产状 310°∠68°,其内圈定金矿体 1 个,宽 0.30 m,金品位 3.38×10^{-6},赋矿岩石为褐铁矿化石英脉,发育褐铁矿化、绢英岩化蚀变,破碎带见煌斑岩脉充填(图 9b)。

5 结论

综合以上遥感解译分析和异常信息提取,结合野外地表调查,对水道地区的遥感解译分析形成如下认识:

(1)采用 ASTER 和 GF-1 遥感数据组合,将多光谱数据与全色数据融合,形成清晰的地形地物边界线,以此为基础建立了构造解译标志,共解译线性构造 929 条、环形构造 89 个、韧性剪切带 15 条,认为北北东向断裂、环形构造内部及边缘以及韧性剪切带边缘是金矿床产出的有利部位。

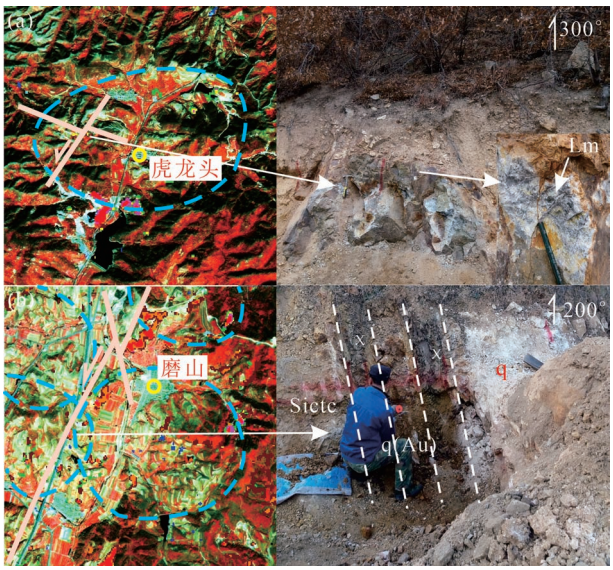


图 9 遥感金成矿远景区内新发现金矿点:
(a) 虎龙头地区;(b) 磨山地区

Fig. 9 New discovery gold occurrances in gold metallogenic prospective area of remote sensing: (a) Hulongtou area; (b) Moshan area

(2)基于高光谱 ASTER 数据,采用去干扰异常主分量门限化技术,能快速、有效地提取了遥感铝羟基、镁羟基和铁染异常信息。对成矿地质背景一致或同一类型、空间上紧密相连的遥感蚀变异常进行了归并,综合圈定遥感异常浓集区 36 处,金矿床的产出位置一般发育较强的铝、镁羟基异常。

(3)将遥感解译构造的成矿有利部位和遥感异常浓集区进行叠合,结合区域成矿地质背景和成矿规律,圈定了 12 处金成矿远景区,经野外查证,在Ⅱ号和Ⅲ号远景区内新发现金矿点 2 处,显示了良好的找矿效果。遥感技术为区域地质找矿提供了强有力的技术支撑。

致谢:感谢山东省地质测绘院和山东省第三地质矿产勘查院同事们的支持和帮助!感谢审稿专家们的宝贵修改意见!

注 释 / Notes

❶ 吴风萍, 丁正江, 薄军委. 2021. 胶东东部金矿空间分布及类型研究报告[R]. 烟台: 山东省第三地质矿产勘查院.

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese

with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

程三友, 陈静, 林海星, 辜平阳, 庄玉军. 2021. 高分辨率遥感图像几何精校正在高山峡谷区 1∶5 万地质填图中的应用. 地质通报, 40(4): 520~526.

程三友, 杨兴科, 于恒彬, 刘渭. 2020. 基于 ASTER 数据的矿化蚀变遥感异常提取技术方法——在青海祁漫塔格成矿带虎头崖矿区的应用. 地质力学学报. 26(3): 432~442.

丁正江, 孙丰月, 刘建辉, 刘殿浩, 李碧乐, 张丕建, 钱烨, 李杰. 2012. 胶东邢家山钼钨矿床辉钼矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义. 岩石学报, 28(9): 2721~2732

付丽华, 张策. 2020. 基于高分遥感数据的西藏荣勒地区控矿信息提取. 国土资源遥感, 32(1): 98~105.

韩海辉, 任广利, 王艺霖, 杨敏, 姚安强, 张转. 2020. 协同处理方式在遥感蚀变异常成因分析中的应用——以北山方山口地区为例. 国土资源遥感, 32(1): 138~147.

侯德华, 张国立, 王硕, 王金贵, 程州. 2018. 基于 GF-2 影像西藏桑耶地区岩性—构造遥感解译. 中国地质调查,5(5):66~73.

胡官兵, 刘舫, 党伟, 杨坤, 陈庆松. 2019. 遥感技术在滇西南植被覆盖区地质填图中的应用. 国土资源遥感, 31(2): 224~230.

蒋校, 路云阁, 孙昂, 李勇志, 连铮. 2021. 国产高分一号卫星数据在境外地质矿产调查中的应用——以伊朗法尔亚地区为例. 国土资源遥感, 33(1): 199~204.

李国华, 丁正江, 宋明春, 李俊建, 李秀章, 纪攀, 张丕建, 王志新. 2017. 胶东新类型金矿——辽上黄铁矿碳酸盐脉型金矿. 地球学报, 38(3): 423~429.

李洪奎, 时文革, 李逸凡, 李璐邑,韩代成,曹丽丽,刘继梅. 2013. 山东胶东地区金矿成矿时代研究. 黄金科学技术, 21(3): 1~9.

李娜, 董新丰, 甘普平, 闫柏琨, 朱婉菁. 2021. 高光谱遥感技术在基岩区区域地质调查填图中的应用. 地质通报, 40(1): 13~21.

刘德长, 邱骏挺, 闫柏琨, 田丰. 2018. 高光谱热红外遥感技术在地质找矿中的应用. 地质论评,64(5): 1190~1200.

吕凤军, 郝跃生, 石静, 王娟. 2009. ASTER 遥感数据蚀变遥感异常提取研究. 地球学报, 30(2): 271~276.

马玥, 姜琦刚, 李远华, 肖晨超, 付长亮. 2016. 国内外商用遥感卫星的定量化对比分析与评估. 国土资源遥感, 28(1): 1~6.

戚静洁, 柳志进, 李钰欣, 王建田, 王春来. 2018. 胶东金山金矿床地质特征及构造控矿模式浅析. 山东国土资源, 34(4): 19~23.

赛盛勋, 邱坤峰. 2020. 胶东乳山金矿床成矿过程:周期性压力波动诱发的流体不混溶. 岩石学报,36(5): 1547~1566.

唐文龙, 付超, 邹键, 何江涛, 席宏, 田杰鹏, 党智财. 2021. 胶东唐家沟金矿床独居石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素年代学及其地质意义. 地质学报, 95(3): 809~821.

王辉, 秦绪文, 范玉海, 杨金中, 金谋顺, 张少鹏, 廖友运, 杨晨, 崔胜, 贺小龙, 匡经水, 郭鹏程. 2018. 高分遥感技术在西昆仑大红柳滩—俘虏沟地区地质找矿中的应用. 中国地质, 45(6): 1289~1301.

王烜, 王海鹏, 王然, 吴子杰, 高福亮, 康宁, 万方来, 王艺龙, 杨欢, 刘杰. 2019. 基于 GF2 号与 Landsat8 数据融合的遥感图像地质解译——以 1∶5 万瓦房店市幅为例. 地质论评, 65(4): 918~928.

薛建玲, 庞振山, 李胜荣, 陈辉, 孙文燕, 陶文, 姚磊, 张运强. 2019. 胶东邓格庄金矿床成因: 地质年代学和同位素体系制约. 岩石学报, 35(5): 1532~1550.

杨俊颖, 温夏伟, 谭红兵. 2021. 西藏尼木地区遥感数据低温反演与地热异常预测. 地质论评, 67(5): 1~11.

杨日红, 李志忠, 陈秀法. 2012. ASTER 数据的斑岩铜矿典型蚀变矿物组合信息提取方法: 以秘鲁南部阿雷基帕省斑岩铜矿区为例. 地球信息科学学报, 14(3): 411~418.

于学峰, 李大鹏, 田京祥, 单伟, 李洪奎, 杨德平, 张尚坤, 罗文强, 熊玉新. 2018. 山东金矿深部勘查进展与成矿理论创新. 山东国土资源, 34(5): 1~13.

于学峰, 宋明春, 李大鹏, 田京祥, 王来明. 2016. 山东金矿找矿突破进展与前景. 地质学报, 90(10): 2847~2862.

郑雄伟, 彭孛, 尚坤. 2021. 基于国产卫星的遥感地质解译能力评估. 自然资源遥感, 33(3): 1~10.

智云宝,孙海瑞,李风华.2020. 山东栖霞笏山金矿床成因:元素地球化学与流体包裹体证据. 吉林大学学报(地球科学版), 50(5): 1552~1569.

Cheng Sanyou, Chen Jing, Lin Haixing, Gu Pingyang, Zhuang Yujun. 2021&. Application of geometric precision correction based on high-resolution Remote Sensing Image in 1∶50000 geological mapping. Geological mapping. Geological Bulletin of China, 40(4): 520~526.

Cheng Sanyou, Yang Xingke, Yu Hengbin, Liu Wei. 2020&. Methods of ASTER remote sensing data used in extracting mineralization and alteration information in the Hutouya mining area of the Qimantag metallogenic belt, Qinghai Province. Journal of Geomechanics, 26(3): 432~442.

Ding Zhengjiang, Sun Fengyue, Liu Jianhui, Liu Dianhao, Li Bile, Zhang Pijian, Qian Ye, Li Jie. 2012&. Re-Os dating of molybdenites from the Xingjiashan molybdenum—tungsten deposit in Jiaodong Peninsula, China and its geological significance. Acta Petrologica Sinica, 28(9): 2721~ 2732.

Fu Lihua, Zhang Ce. 2020&. Study of ore control information in Rongle area of Tibet based on high resolution remote sensing data. Remote Sensing for Land and Resources, 32(1): 98~105.

Han Haihui, Ren Guangli, Wang Yilin, Yang Min, Yao Anqiang, Zhang Zhuan. 2020&. Application of collaborative processing method to the analysis of remote sensing alteration abnormal causes: A case study of Fangshankou area in Beishan. Remote Sensing for Land & Resources, 32(1): 138~147.

Hou Dehua, Zhang Liguo, Wang Shuo, Wang Jingui, Chen Zhou. 2018&. Interpretation of lithology—structure in Sangye region of Tibet based on GF-2 satellite remote sensing images. Geological Survey of China. 5(5): 66~73.

Hu Guanbing, Liu Fang, Dang Wei, Yang Kun, Chen Qingsong. 2019&. Application of remote sensing technology to geological mapping in the vegetation covered area of southwest Yunnan. Remote Sensing for Land & Resources, 31(2): 224~230.

Jiang Xiao, Lu Yunge, Sun Ang, Li Yongzhi, Lian Zheng. 2021&. The application of domestic GF-1 satellite data to geological and mineral resources survey abroad: A case study of Faryab area, Iran. Remote Sensing for Land & Resources, 33(1): 199~204.

Li Guohua, Ding Zhengjiang, Song Mingchun, Li Junjian, Li Xiuzhang, Ji Pan, Zhang Pijian, Wang Zhixin. 2017&. The Liaoshang pyrite carbonate veined deposit: A new type of gold deposit in Jiaodong Peninsula. Acta Geoscientica Sinica, 38(3): 423~429.

Li Hongkui, Shi Wenge, Li Yifan, Li Luyi, Han Daicheng, Cao Lili, Liu Jimei. 2013&. Study on gold mineralization ages in Jiaodong area, Shandong Province. Gold Science and Technology, 21(3): 1~9.

Li Na, Dong Xinfeng, Gan Puping, Yan Bokun, Zhu Wanjing. 2021&.

Application of hyperspectral remote sensing technology to regional geological survey and mapping in bedrock area. Geological Bulletin of China, 40(1): 13~21.

Liu Dechang, Qiu Junting, Yan Bokun, Tian Feng. 2018&. Application of thermal inferred hyperspectral remote sensing in ore exploration. Geological Review, 64(5): 1190~1200.

Lü Fengjun, Hao Yuesheng, Shi Jing, Wang Juan. 2009&. Alteration remote sensing anomaly extraction based on Aster remote sensing data. Acta Geoscientica Sincia, 30(2): 271~276.

Ma Yue, Jiang Qigang, Li Yuanhua, Xiao Chenchao, Fu Changliang. 2016&. Quantitative analysis and evalution of domestic and overseas commercial RS satellites. Remote Sensing for Land and Resources, 28(1): 1~6.

Qi Jingjie, Liu Zhijin Li Yuxin, Wang Jiantian, Wang Chunlai. 2018&. Primary study on geological characteristics and structural ore-controlling model of Jinshan gold deposit in Jiaodong area. Shandong Land and Resources, 34(4): 19~23.

Sai Shengxun, Qiu Kunfeng. 2020&. Ore-forming processes of the Rushan gold deposit, Jiaodong: Fluid immiscibility induced by episodic fluid pressure fluctuations. Acta Petrologica Sincia, 36(5): 1547~1566.

Tang Wenlong, Fu Chao, Zou Jian, He Jiangtao, Xi Hong, Tian Jiepeng, Dang Zhicai. 2021&. LA-ICP-MS U-Pb isotopic chronology of monazite from Tangjiagou gold deposit in Jiaodong and its geological significance. Acta Geologica Sinica, 95(3): 809~821.

Wang Hui, Qin Xuwen, Fan Yuhai, Yang Jinzhong, Jin Moushun, Zhang Shaopeng, Liao Youyun, Yang Chen, Cui Sheng, He Xiaolong, He Xiaolong, Kuang Jingshui, Guo Pengcheng. 2018&. The application of high resolution remote sensing technology to ore-prospecting in Dahongliutan Fulugou area of West Kunlun Mountains. Geology in China, 45(6): 1290~1302.

Wang Xuan, Wang Haipeng, Wang Ran, Wu Zijie, Gao Fuliang, Kang Ning, Wan Fanglai, Wang Yilong, Yang Huan, Liu Jie. 2019&. Geological interpretation of remote sensing images based on data fusion of GF2 and Landsat8——A case study of the Wafangdian 1∶50000 quadrangle map. Geological Review, 65(4): 918~928.

Xue Jianling Pang Zhenshan, Li Shengrong, Chen Hui, Sun Wenyan, Tao Wen, Yao Lei, Zhang Yunqiang. 2019&. The genesis of Denggezhuang gold deposit in Jiaodong: Constraints from multigeological chronology and isotope system. Acta Petrologica Sinica, 35(5): 1532~1550.

Yang Kuifeng, Jiang Peng, Fan Hongrui, Zuo Yabin, Yang Yueheng. 2018. Tectonic transition from a compressional to extensional metallogenic environment at ~120 Ma revealed in the Hushan gold deposit, Jiaodong, North China Craton. Journal of Asian Earth Sciences, 160: 408~425.

Yang Junying, Wen Xiawei, Tan Hongbing. 2021&. Land surface temperature using remote sensing data inversion and prediction of geothermal anomaly area in Nimu, Xiang (Tibet). Geological Review, 67(5): 1~11.

Yang Rihong, Li Zhizhong, Chen Xiufa. 2012&. Information extraction of typical alteration mineral assemblage in porphyry copper using ASTER satellite data, Arequipa Province of south Peru. Journal of Geo-information Science, 14 (3): 411~418.

Yu Xuefeng, Li Dapeng, Tian Jingxiang, Shan Wei, Li Hongkui, Yang Deping, Zhang Shangkun, Luo Wenqiang, Xiong Yuxin. 2018&. Progress of deep exploration and theoretical innovation of metallogenic of gold deposits in Shandong Province. Shandong Land and Resources, 34(5): 1~13.

Yu Xuefeng, Song Mingchun, Li Dapeng, Tian Jingxiang, Wang Laiming. 2016&. Prospecting breakthroughs and prospect of gold deposits in Shandong Province. Acta Geologica Sinica, 90(10): 2847~2862.

Zheng Xiongwei, Peng Bo, Shang Kun. 2021&. Assessment of the interpretion ability of domestic satellites in geological remote sensing. Remote Sensing for Land and Resources, 33(3): 1~10.

Zhi Yunbao, Sun Hairui, Li Fenghua. 2020&. Geological and geochemical features of Hushan gold deposit in Qixia, Shandong Province. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 50(5): 1552~1569.

Application research of high-resolution remote sensing date in the delineation of gold metallogenic potential areas in Shuidao area of Jiaodong Peninsula

ZOU Jian[1)], TANG Wenglong[2)], WANG Fenghua[3)], HU Feng[1)], BO Junwei[1)], WANG Zhixin[1)], LIU Zhi[1)], WEI Xufeng[1)], LI Yong[1)]

1) *No. 3 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Yantai, Shandong*, 264004;

2) *Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin*, 300170;

3) *Shandong GEO-Surveying & Mapping Institute, Jinan*, 250013

Objectives: GF-1 and ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) remote sensing data were used to extract ore-control information, identify ore-control structures, extract alteration information such as Al—hydroxyl, Mg—hydroxyl and iron stain anomalies for Shuidao area with serious coverage of Muping—Rushan gold metallogenic belt, and prospected ore-forming prospective areas combined with metallogenic geological conditions, then carry out field geological verification.

Methods: GF-1 and ASTER remote sensing data and field geological survey.

Results: Remote sensing interpret 929 linear structures, 89 annular structures and 15 ductile shear zones;

extract 26 hydroxyl anomalies and 10 iron stain anomalies; 12 prospective areas have been prospected.

Conclusions: Gold deposits usually locate in the NNE faults, the edge of the annular structures and ductile shear zones. Iron stain anomalies located in the south and the north of the study area and not obvious relationship with mineralization. Al—hydroxyl and Mg—hydroxyl anomalies were distributed in the central of the study area, which were obviously related to the fault and annular structure. They were banded and arc-banded, which were presumed to be caused by alteration minerals in the fault zone, and many gold deposits were produced. The remote sensing anomalies of block or point distribution are presumed to be caused by intrusive rock. Combined with the regional gold metallogenic regularity and the obtained results, the gold metallogenic prediction is carried out, 12 prospective areas have been prospected, the field verification shows well effect.

Keywords: GF-1 and ASTER remote sensing date; interpretation of geological structures; extraction of remote sensing abnormal information; metallogenetic prognosis; Muping—Rushan gold metallogenic belt, Jiaodong Peninsula

Acknowledgement: This study is supported by the geological survey projects of China Geological Survey (Nos. DD20160044, DD20190155); Scientific and technological research project of Shandong Province Bureau of Geological & Mineral Resources (No. KY201501); Stratigic mineral exploration project of Yantai city Bureau of Natural Resources and Planning (No. SDYTSJ2021-0105-02-1); The geological survey program of Shandong Province (No. SDGP370000202002001782-A16)

First author: ZOU Jian, male, born in 1981, master, senior engineer, is mainly engaged in the study of mineral exploration and metallogenic regularity; Email: zouj3472@163.com

Corresponding author: TANG Wenlong, male, born in 1979, senior engineer, is mainly engaged in mineral resources survey and regional metallogenic regularity research; Email: twl011562@126.com

Manuscript received on: 2022-02-27; Accepted on: 2022-08-28; Network published on: 2022-09-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2022.09.001　　**Edited by**: LIU Zhiqiang