

doi: 10.6046/zrzyyg.2022072

引用格式: 徐大兴,杨彪,邵兆刚,等. 哈达门沟金矿蚀变分带的高光谱分析及找矿意义[J]. 自然资源遥感,2023,35(1):123-131. (Xu D X, Yang B, Shao Z G, et al. A hyperspectral analysis of alteration zoning in the Hadamengou gold deposit and its significance for ore prospecting[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(1): 123-131.)

哈达门沟金矿蚀变分带的高光谱分析及找矿意义

徐大兴^{1,2}, 杨彪^{3,4}, 邵兆刚¹, 柳长峰⁵, 王达⁶, 王建平⁶

(1. 中国地质科学院, 北京 100037; 2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 3. 呼和浩特自然资源综合调查中心, 呼和浩特 010010; 4. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059; 5. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083; 6. 中国地质大学(北京)地球与科学资源学院, 北京 100083)

摘要: 内蒙古包头市哈达门沟金矿是乌拉山—大青山成矿带上重要的大型金矿床, 具有很大的找矿潜力。为了充分发挥遥感技术在地质找矿中的应用, 对哈达门沟金矿进行了不同遥感数据的矿化蚀变信息提取。依据矿区蚀变矿物光谱特征, 利用 Landsat8 OLI、ASTER、WorldView-3 遥感数据, 采用主成分分析确定了哈达门沟金矿 Landsat8 OLI 和 WorldView-3 提取铁染、ASTER 和 WorldView-3 提取羟基、ASTER 提取碳酸盐化的综合处理方法。通过蚀变异常信息的分布规律, 叠加矿区地质图分析, 成功圈定了 2 条蚀变带, 并且结合控矿构造研究的成果, 认为哈达门沟金矿成矿热液活动与构造关系密切。研究可以为乌拉山—大青山成矿带寻找同种类型的金矿床提供参考, 对哈达门沟金矿外围找矿有一定的指导意义。

关键词: 哈达门沟金矿; 蚀变异常信息; 综合处理方法; 控矿构造; 外围找矿

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-035X(2023)01-0123-09

0 引言

近年来, 在内蒙古哈达门沟金矿找矿过程中, 勘查单位在矿区及外围开展了物探、化探、钻探等工作, 分别从构造成矿、同位素地球化学、成矿年代学、矿床成因等方面探索了金成矿作用的研究。为配合找矿工作, 提高找矿效率, 在该矿区及其外围开展遥感矿化信息提取研究有重要意义。

随着卫星遥感技术的发展, 众多的遥感数据被应用到遥感找矿工作中。在 Landsat 系列遥感数据中, 张玉君等^[1]通过 ETM+ 数据提取遥感蚀变异常, 预测了东天山找矿范围; 丛丽娟等^[2]利用主成分分析对 Landsat7 ETM+ 数据进行了铁染、羟基和碳酸盐蚀变信息提取。在 ASTER 数据中, 以主成分分析为主, 张玉君等^[3]辅以去干扰异常主分量门限化技术提取了蒙古欧玉陶勒盖斑岩铜金矿羟基异常; 刘建宇等^[4]辅以波段运算筛选了北山韧性剪切带金矿蚀变异常区; Xu 等^[5]辅以不同算法优化模型

验证了广西大瑶山古龙金矿的有效性。在 WorldView-3 遥感数据中, Salehi 等^[6]利用波段比值和匹配滤波方法认为 SWIR 波段提取氧化铁和氢氧化物更可靠; Sun 等^[7]基于主成分分析法和矿物指数法提出了蚀变异常提取的新方法。不同学者还通过对不同遥感数据组合使用, 如毛晓长等^[8]对 ETM+ 和 ASTER 数据提取分析, 认为 ETM+ 适合黏土类矿化信息提取; Zhang 等^[9]集成 ASTER 和 Landsat8 OLI 数据, 综合绘制了青藏高原多龙斑岩型铜矿的蚀变带; Bedini^[10]通过 WorldView-3 和 ASTER 数据绘制了罗达基拉尔浅热石英明矾金矿主要蚀变矿物的空间分布。

很多专家通过分析方法和遥感数据组合使用, 在 Landsat8 OLI、ASTER 和 WorldView-3 遥感数据中已经发现了许多成矿预测区。而组合多源遥感数据提取不同蚀变信息对比的研究仍然存在不足, 因而本文采用了 3 种遥感数据分别提取了铁染、羟基、碳酸盐化, 确定了哈达门沟金矿的综合处理方法, 圈定了蚀变异常带, 取得了很好的找矿应用效果。

收稿日期: 2022-03-07; 修订日期: 2022-07-25

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“内蒙古哈达门沟金矿岩金普查”(编号: DD20191017)和“河西走廊—阿尔金盆地结合带深部地质调查”(编号: 20221643-5)及国家自然科学基金项目“内蒙古中东部毛登—前进场早石炭世强过铝花岗岩带地球化学成因及其构造意义”(编号: 41702054)共同资助。

第一作者: 徐大兴(1996-), 男, 博士研究生, 构造地质学专业。Email: xudax@stu.pku.edu.cn。

通信作者: 杨彪(1988-), 男, 工程师, 博士, 主要从事矿产勘查。Email: yangbiao_c@aliyun.com。

表 1 Landsat8 OLI、WorldView-3 和 ASTER
遥感影像数据特征参数对比
Tab.1 Comparison of feature parameters of Landsat8
OLI, WorldView-3 and ASTER

remote sensing image data			
传感器	光谱波段	波长范围/ μm	空间分辨率/m
Landsat8 OLI	B1 Coastal	0.43 ~ 0.45	30
	B2 Bule	0.45 ~ 0.51	30
	B3 Green	0.53 ~ 0.59	30
	B4 Red	0.64 ~ 0.67	30
	B5 NIR	0.85 ~ 0.88	30
	B6 SWIR 1	1.57 ~ 1.65	30
	B7 SWIR2	2.11 ~ 2.29	30
ASTER	B1 Green	0.52 ~ 0.60	15
	B2 Red	0.63 ~ 0.69	15
	B3N NIR	0.78 ~ 0.86	15
	B4 SWIR1	1.60 ~ 1.70	30
	B5 SWIR2	2.145 ~ 2.185	30
	B6 SWIR3	2.185 ~ 2.225	30
	B7 SWIR4	2.235 ~ 2.285	30
	B8 SWIR5	2.295 ~ 2.365	30
	B9 SWIR6	2.360 ~ 2.430	30
WorldView-3	B1 Coastal	0.40 ~ 0.45	1.24
	B2 Blue	0.45 ~ 0.51	1.24
	B3 Green	0.51 ~ 0.58	1.24
	B5 Red	0.63 ~ 0.69	1.24
	B6 Red Edge	0.705 ~ 0.745	1.24
	B7 VNIR1	0.770 ~ 0.895	1.24
	B9 SWIR1	1.195 ~ 1.225	7.5
	B10 SWIR2	1.550 ~ 1.590	7.5
	B13 SWIR5	2.145 ~ 2.185	7.5
	B14 SWIR6	2.185 ~ 2.225	7.5
	B15 SWIR7	2.235 ~ 2.285	7.5
	B16 SWIR8	2.295 ~ 2.365	7.5

2.2 蚀变矿物波谱特征研究

地表岩石的蚀变矿物,因内部电子具不同原子和分子及结构和构造特征,外部受风化作用影响,且表面与外来电磁辐射能量互相作用,导致矿物内部离子发生改变,从而产生 Fe^{3+} , OH^- , CO_3^{2-} 等不同的离子,并对特定波长范围内的电磁波谱表现出独特的特征吸收谷和反射峰^[19-21]。而哈达门沟金矿区的 Fe^{2+} 及 Fe^{3+} 蚀变矿物中磁铁矿和黄铁矿的波谱曲线较平滑,但褐铁矿表现出明显的高低起伏,而在 3 种遥感数据的波段范围内, OH^- 蚀变矿物高岭石和绿帘石的波谱曲线要么呈现过度式吸收谷,要么呈现过度式反射峰,没有表现出波浪起伏的特点,但绿泥石在特定的波段范围内均有(弱/强)吸收谷和反射峰,且 CO_3^{2-} 蚀变矿物方解石也有同样的现象(图 2)。在收集 USGS 波谱库基础上,结合哈达门沟金矿区蚀变矿物的特征,本文选取了哈达门沟金矿区的褐铁矿、绿泥石、方解石作为主要蚀变矿物,利用其在特定波长范围内具有不同的波谱反射率呈现的吸收谷和反射峰的原理,作为主成分分析

方法的理论基础。

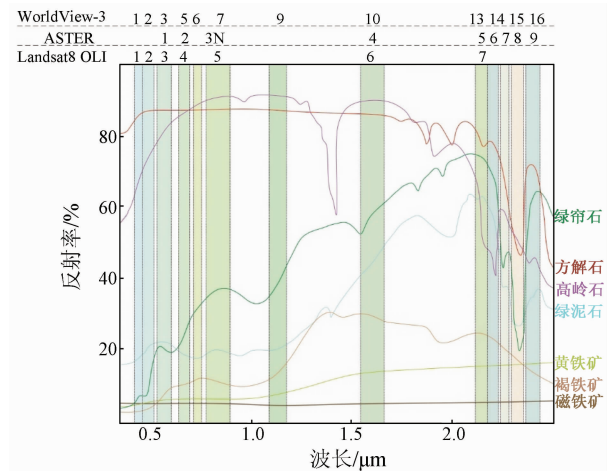


图 2 哈达门沟金矿区蚀变矿物光谱反射率曲线
Fig.2 Spectral reflectance curve of altered minerals
in the Hadamengou gold mining area

3 蚀变信息提取分析

3.1 实验处理方法和流程

哈达门沟金矿区遥感实验方法,主要采用 EN-VI5.3 软件处理。基于遥感数据不同空间分辨率特征和多波段特性,通过不同波段的光谱信息反差,将波段集中于一个主成分分量中,实现信息压缩,且 3 种数据提取蚀变信息综合对比验证,以此可以提高蚀变异常提取的准确度。在应用主成分分析方法时,哈达门沟金矿区第四系发育,会产生伪异常,需要对遥感影像进行掩模处理;同时为降低遥感卫星传感器、地表大气和光照、遥感影像分辨率、研究区面积等影响,需要对遥感影像进行预处理,后期也需要对异常进行筛选。具体实验操作流程见图 3。

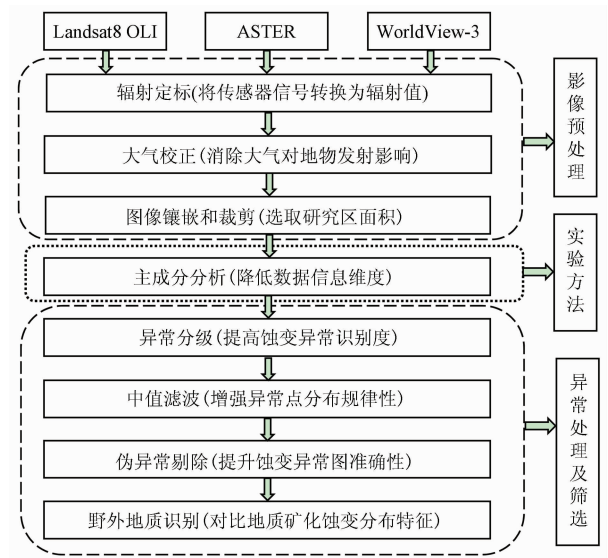


图 3 遥感数据实验处理流程图
Fig.3 Experimental processing flow
chart of remote sensing data

3.2 Landsat8 OLI 和 ASTER 蚀变异常提取

通过对比分析 2 种遥感数据提取 Fe^{3+} 蚀变异常,结合哈达门沟金矿蚀变矿物波谱特征,褐铁矿在 Landsat8 OLI 遥感影像提取过程中呈现出更好的效果。本文通过分析褐铁矿蚀变矿物在波段 3、波段 5 呈现吸收谷,在波段 4 表现反射峰的现象(图 2),采用波段 1,3,4,5 进行主成分分析,得到哈达门沟金矿区铁染蚀变特征矩阵模型(表 2)。矩阵模型中波段 3 和 5 与波段 4 载荷具体相反的贡献指标,和褐铁矿矿物波谱特征相吻合,因而选取 PC4 进行蚀变提取。哈达门沟金矿的绿泥石蚀变矿物波段 8 显示吸收谷和波段 7,8 呈现反射峰,方解石蚀变矿物波段 6,9 表现反射峰和波段 8 显示吸收谷(图 2),主成分分析模型分别以波段 5,7,8,9 和波段 5,6,8,9

表 2 哈达门沟金矿 Fe^{3+} 、 OH^- 、 CO_3^{2-} 蚀变特征矩阵模型
Tab.2 Fe^{3+} , OH^- , CO_3^{2-} alteration characteristic matrix model of the Hadamengou gold deposit

Landsat8 OLI 铁染蚀变异常				
主分量	B1	B3	B4	B5
PC1	0.491 747	0.596 503	0.505 663	0.495 927
PC2	0.749 143	0.083 068	-0.196 777	-0.627 027
PC3	0.417 337	-0.491 333	-0.489 557	0.587 159
PC4	-0.150 995	0.703 666	-0.682 582	0.127 031
ASTER 羟基蚀变异常				
主分量	B5	B7	B8	B9
PC1	0.485 702	0.542 789	0.517 743	0.448 793
PC2	0.477 404	0.355 001	-0.132 887	-0.792 717
PC3	0.718 932	-0.489 810	-0.404 945	0.281 500
PC4	-0.138 982	0.582 614	-0.741 824	0.301 567
ASTER 碳酸盐蚀变异常				
主分量	B5	B6	B8	Band9
PC1	0.496 935	0.512 477	0.529 086	0.458 793
PC2	0.435 960	0.458 340	-0.206 005	-0.746 609
PC3	0.674 196	-0.368 475	-0.554 123	0.320 366
PC4	-0.329 323	0.625 714	-0.608 752	0.459 792

为主,羟基蚀变异常波段 7,9 与波段 8 和碳酸盐化波段 6,9 与波段 8 均具有相反的贡献指标(表 2),和绿泥石和方解石矿物波谱特征分别相吻合,因而均选取 PC4 提取蚀变。

选取 PC4 处理得到 3 种蚀变异常信息的像元值较为宽泛,应用阈值分割法对铁染、羟基、碳酸盐化的异常信息处理(表 3)。异常统计值均以 1.5, 2.0,2.5 为分级依据,应用统计值分别得到的应用值对蚀变异常进行分级,并通过后期 3×3 中值滤波处理和伪异常剔除,获得了哈达门沟金矿蚀变异常分布图(图 4)。

表 3 哈达门沟金矿 Fe^{3+} 、 OH^- 、 CO_3^{2-} 蚀变异常分级统计信息
Tab.3 Classification statistics of Fe^{3+} , OH^- , CO_3^{2-} alteration anomaly in the hadamengou gold deposit

Landsat8 OLI 铁染蚀变分级				
图像亮度值	最小值	最大值	平均值($\bar{X}$)	标准差(δ)
	-127.919 731	139.990 753	-0.110 923	21.576 088
异常统计值	统计值		应用值	
	$\bar{X} + 1.5\delta$		32.253 209	
	$\bar{X} + 2.0\delta$		43.041 253	
	$\bar{X} + 2.5\delta$		53.829 297	
ASTER 羟基蚀变异常分级				
图像亮度值	最小值	最大值	平均值($\bar{X}$)	标准差(δ)
	-69.988 426	70.972 389	0.093 647	21.090 162
异常统计值	统计值		应用值	
	$\bar{X} + 1.5\delta$		31.728 890	
	$\bar{X} + 2.0\delta$		42.273 971	
	$\bar{X} + 2.5\delta$		52.819 052	
ASTER 碳酸盐化分级				
图像亮度值	最小值	最大值	平均值($\bar{X}$)	标准差(δ)
	-95.791 901	99.937 935	-0.027 181	25.156 812
异常统计值	统计值		应用值	
	$\bar{X} + 1.5\delta$		37.708 037	
	$\bar{X} + 2.0\delta$		50.286 443	
	$\bar{X} + 2.5\delta$		62.864 849	

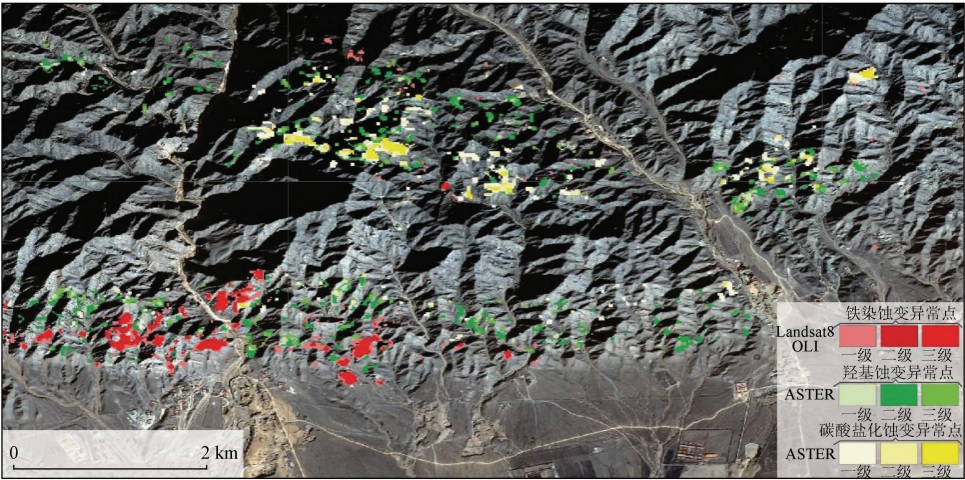


图 4 哈达门沟金矿铁染、羟基、碳酸盐化蚀变异常分布图
(底图为北京二号遥感影像)

Fig.4 Anomaly distribution of iron staining, hydroxyl and carbonation alteration in Hadamengou gold deposit

3.3 WorldView-3 蚀变异常提取

对 WorldView-3 数据的不同波段进行了蚀变矿物光谱反射率分析,提出了 WorldView-3 蚀变异常的主成分分析模型(表 4)。在 ENVI 5.3 软件处理中,采用了铁染和羟基蚀变异常的 PC4 主分量和碳酸盐化的 PC3 主分量进行提取,且进行了阈值分割、中值滤波、伪异常剔除的后期处理。结果显示,羟基和铁染的蚀变异常效果好,对比于 ASTER 和 Landsat8 OLI 数据提取几乎吻合,但碳酸盐化的蚀变异常点分布广泛,没有形成蚀变信息提取,综合绘制了哈达门沟金矿 WorldView-3 蚀变异常图(图 5)。本次实验方案首次验证了哈达门沟金矿 WorldView-3 数据提取铁染和羟基的可行性,突出了 WorldView-3 数据空间分辨率和精细的波段范围在蚀变信息提取中的优势。

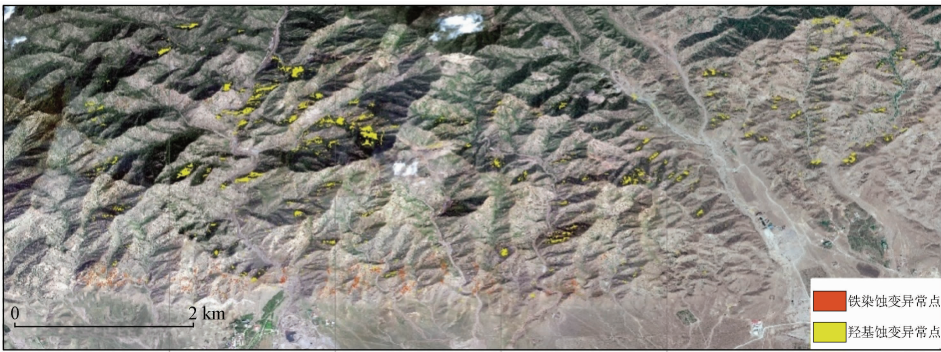


图 5 哈达门沟金矿铁染、羟基蚀变异常分布图
(底图为 WorldView-3 遥感影像)

Fig.5 Anomaly distribution map of iron contamination and hydroxyl alteration in Hadamengou gold deposit

4 构造与蚀变信息分布规律

4.1 哈达门沟构造特征

20 世纪 90 年代以来,对内蒙古大青山构造特征的研究众多,在野外地质勘查、实验数据分析、资料总结等大量的工作基础上,形成了大青山逆冲推覆构造体系的认识^[22-26]。近 20 a 中,内蒙古大青山逆冲推覆构造研究更加精细化,在实地勘探研究中,甄别出大青山东段发育低角度叠瓦状逆冲断层^[27-28],提出大青山西端高角度逆冲断层样式的认识^[15,29]。哈达门沟金矿隶属于大青山西端,分布于乌拉山地区,其构造特征饱受争议。近年来,基于务实的岩心编录和野外调研,哈达门沟的矿脉在南北向上呈近 EW 向平行排列,构造特征同大青山西端归属于高角度逆冲断层^[30]。因而,不难看出,近 EW 向高角度逆冲断层控制哈达门沟成矿,同时受南北向断层改造^[31]。

表 4 Worldview-3 主成分分析矩阵模型

Tab.4 WorldView-3 Principal component analysis matrix model

主分量	铁染蚀变异常			
	B3	B6	B9	B11
PC1	0.004 139	0.004 708	0.703 261	0.710 904
PC2	0.042 929	0.005 467	-0.710 395	-0.702 471
PC3	-0.706 442	0.703 310	0.009 631	-0.078 749
PC4	0.008 635	0.096 663	-0.708 294	0.699 214

主分量	羟基蚀变异常			
	B1	B7	B11	B16
PC1	-0.234 232	-0.297 356	-0.671 890	-0.636 615
PC2	0.667 832	-0.638 428	-0.216 309	-0.315 626
PC3	-0.706 442	0.703 310	0.009 631	-0.078 749
PC4	0.008 635	-0.096 663	-0.708 294	0.699 214

主分量	碳酸盐化蚀变异常			
	B1	B7	B14	B16
PC1	0.000 654	-0.001 290	-0.707 102	-0.707 110
PC2	-0.286 312	-0.888 022	-0.253 727	0.255 079
PC3	0.082 120	-0.351 374	-0.659 753	0.659 180
PC4	0.954 610	-0.296 567	-0.018 860	0.020 283

4.2 蚀变信息分布特征

Landsat8 OLI 铁染异常的强度主要集中于哈达门沟金矿乌兰不浪沟靠近山前盆地,和 ASTER 数据靠近山前盆地分布的羟基异常较为吻合(图 4),且和 WorldView-3 铁染蚀变异常基本吻合(图 5),反映了 3 种数据对 Fe^{3+} 和 OH^- 的提取真实性较高,而发生蚀变的矿物可能和构造岩浆热液活动交代围岩形成的蚀变岩有关,这和乌兰不浪沟靠近山前盆地观测的沿逆冲断层发育的伟晶岩脉相一致(图 6(a))。ASTER 提取的羟基异常的强度同样在 100 号矿脉附近也有明显的分布,但 WorldView-3 分布较为零散,可能是地表植被造成的影响。但 ASTER 碳酸盐化的强度相较于集中在胡鲁斯太沟西侧 100 号矿脉的附近,和羟基异常十分吻合,这两者蚀变异常较高的强度可能是由于人工采矿造成的地表矿石堆引起的(图 6(b)),而在大坝沟附近 100 号矿脉的两者蚀变异常套合得很好,且和野外在 100 号矿脉观测到的由内部逆冲断层组成的构造蚀变带基本吻合(图 6(c))。



图 6 哈达门沟金矿野外露头实地验证图

Fig. 6 Field verification of the Hadamenggou gold mine outcrop

以遥感影像为底图,将不同遥感数据提取的铁染、羟基、碳酸岩化的蚀变异和地质图进行叠加,获得了哈达门沟金矿地质遥感解译图(图 7)。在地质遥感图中,可以清晰地识别出蚀变异常点的空间展布呈现近 EW 向和 NWW 向,分别和山前构造岩浆活动蚀变带、100 号矿脉几乎吻合。依据控矿构造研究成果,哈达门沟金矿的蚀变带、众多的近 EW 向

矿脉明显由高角度叠瓦状逆冲断层控制,而 2 条遥感蚀变异常带的深部成矿热液影响范围大于蚀变带,但还是受构造带控制。因此,通过遥感分析,依据控矿构造研究成果,推测遥感蚀变异常区和构造带走向延伸范围内,在吻合位置的附近深部成矿潜力很大,在不吻合位置是植被覆盖和断层规模大小所引起的。

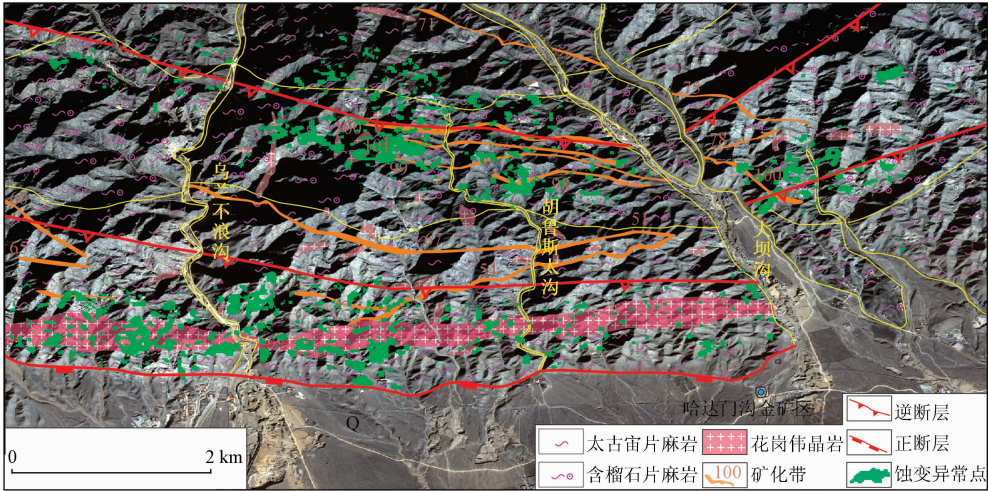


图 7 哈达门沟金矿地质遥感解译图

Fig. 7 Geological remote sensing interpretation map of the Hadamenggou gold mine

5 结论

1) 在哈达门沟金矿区利用 Landsat8 OLI 和

WorldView-3 数据获得了铁染蚀变异常信息,采用 WorldView-3 和 ASTER 数据获得了羟基蚀变异常信息,应用 ASTER 数据获得了碳酸盐化蚀变异常信息,3 种蚀变异常信息综合反映了深部成矿热液活动。

2)将上述 3 种数据提取的蚀变异常信息和哈达门沟金矿矿区地质图套合,清晰地显示出蚀变异常信息的空间展布方位和已知矿脉、蚀变带、构造带吻合程度较好,可以大致圈出 2 条蚀变矿化带。对比矿区控矿构造带的分布特征,可以看出哈达门沟金矿成矿热液活动影响范围明显大于控矿构造带的分布范围,但仍明显受断裂构造带的控制。

3)利用不同遥感数据,开展蚀变矿化信息提取研究,可有效地提取矿区及其外围矿化蚀变异常,结合地质矿产调查成果,对在矿区及其外围找矿具有重要的指导意义。

志谢:感谢中国遥感应用协会专家委员会常务副主任胡如忠和中国地质大学(北京)刘文灿教授对本文的大力支持,以及对本文提出的宝贵修改意见。同时特别感谢中国地质调查局呼和浩特自然资源综合调查中心工程师苏攀云、樊松浩、侯秀宏的野外协助,在此向他们表示衷心的感谢!

参考文献(References):

[1] 张玉君,杨建民,陈 薇. 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, 54(4):31-36. doi:10.6046/gtzyyg. 2002. 04. 07.
Zhang Y J, Yang J M, Chen W. Research and application of remote sensing anomaly extraction method for ETM+ (TM) alteration; Geological basis and spectral premise [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2002, 54(4):31-36. doi:10.6046/gtzyyg. 2002. 04. 07.

[2] 丛丽娟,胡凤翔,杨俊才,等. 内蒙古朱拉扎嘎金矿 ETM+ 数据提取蚀变异常方法研究[J]. 现代地质,2007,21(4):726-732.
Cong L J, Hu F X, Yang J C, et al. Study on alteration anomaly extraction method of ETM+ data in Zhulazaga gold deposit, Inner Mongolia [J]. Geoscience, 2007, 21(4):726-732.

[3] 张玉君,杨建民,姚佛军. 多光谱遥感技术预测矿产资源的潜能——以蒙古国欧玉陶勒盖铜金矿床为例[J]. 地学前缘, 2007, 14(5):64-70.
Zhang Y J, Yang J M, Yao F J. Prediction of mineral resources potential using multi-spectral remote sensing technology: A case study of Ouyutolgoi Cu-Au deposit in Mongolia [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(5):64-70.

[4] 刘建宇,陈 玲,李 伟,等. 基于 ASTER 数据韧性剪切带型金矿蚀变信息提取方法优化[J]. 国土资源遥感,2019,31(1):229-236. doi:10.6046/gtzyyg. 2019. 01. 30.
Liu J Y, Chen L, Li W, et al. Optimization of alteration information extraction method for ductile shear zone type gold deposit based on ASTER data [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019, 31(1):229-236. doi:10.6046/gtzyyg. 2019. 01. 30.

[5] Xu K, Wang X F, Kong C F, et al. Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring gold deposits based on SVM and PCA using ASTER data: A case study of Gulong [J]. Remote Sensing, 2019, 11(12):1-22.

[6] Salehi T, Tangestani M H. Large-scale mapping of iron oxide and hydroxide minerals of Zefreh porphyry copper deposit, using Worldview-3 VNIR data in the Northeastern Isfahan, Iran [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 73(6):156-169.

[7] Sun Y Q, Tian S F, Di B G. Extracting mineral alteration information using WorldView-3 data [J]. Geoscience Frontiers, 2017, 8(5):1051-1062.

[8] 毛晓长,刘文灿,杜建国,等. ETM+ 和 ASTER 数据在遥感矿化蚀变信息提取应用中的比较——以安徽铜陵凤凰山矿田为例[J]. 现代地质,2005(2):309-314.
Mao X C, Liu W C, Du J G, et al. Comparison of ETM+ and ASTER data in remote sensing alteration information extraction: A case study of the Fenghuangshan ore field in Tongling, Anhui Province [J]. Geoscience, 2005(2):309-314.

[9] Zhang T B, Yi G H, Li H M, et al. Integrating data of ASTER and Landsat-8 OLI (AO) for hydrothermal alteration mineral mapping in Duolong porphyry Cu-Au deposit, Tibetan Plateau, China [J]. Remote Sensing, 2016, 8(11):1-23.

[10] Bedini E. Application of WorldView-3 imagery and ASTER TIR data to map alteration minerals associated with the Rodalquilar gold deposits, southeast Spain [J]. Advances in Space Research, 2019, 63(10):336-3357.

[11] Zhang, Y P, Chen, X H, Zuza A V, et al. Sedimentary paleoenvironment of the eastern Hexi Corridor, NW China: Constraints from chert geochemistry and sedimentary analysis of early paleozoic strata [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(4):1223-1237.

[12] Wang, Y, Chen, X H, Nie L S, et al. Late paleozoic element migration and accumulation under intracontinental sinistral strike-slip faulting in the west junggar orogenic belt, NW China [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(6):2012-2030.

[13] 张义平,肖文霞,张 进,等. 河西走廊东部香山群时代和物源讨论[J]. 中国地质,2015,42(6):1774-1792.
Zhang Y P, Xiao W X, Zhang J, et al. The age and provenance of Xiangshan Group in the east of Hexi Corridor [J]. Geology of China, 2015, 42(6):1774-1792.

[14] Zhang Y M, Gu X X, Xiang Z L, et al. Magmatic hydrothermal origin of the Hadamengou-Liubagou Au-Mo deposit, Inner Mongolia, China: Constraints on geology, stable and Re-Os isotopes [J]. Ore Geology Reviews, 2017(2), 86:172-195.

[15] 徐大兴. 内蒙古哈达门沟金矿床构造控矿研究及意义[D]. 北京:中国地质大学(北京),2021.
Xu D X. Study on ore-controlling structure of the Hadamengou deposit in Inner Mongolia and its significance [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.

[16] 苏胜贵. 内蒙古哈达门沟金矿田 100 号脉深部找矿预测[D]. 北京:中国地质大学(北京),2019.
Su S G. Deep prospecting prediction of No. 100 vein in the Hadamengou gold field, Inner Mongolia [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.

[17] 章永梅. 内蒙古柳坝沟—哈达门沟金矿田成因、控矿因素与找矿方向[D]. 北京:中国地质大学(北京),2012.
Zhang Y M. Genesis, ore-controlling factors and prospecting direction of Liubagou-Hadamengou gold deposit in Inner Mongolia [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.

[18] 侯万荣. 内蒙古哈达门沟金矿床与金厂沟梁金矿床对比研究[D]. 北京:中国地质科学院,2011.

Hou W R. Comparative study on the Hadamenggou gold deposit and Jinchanggouliang gold deposit in Inner Mongolia [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2011.

[19] 张玉君, 曾朝铭. 西藏冈底斯地区斑岩铜矿识别的最佳多光谱遥感异常判别研究 [J]. 矿床地质, 2012, 31 (4): 671 – 698.

Zhang Y J, Zeng C M. Study on the best multi – spectral remote sensing anomaly identification of porphyry copper deposits in Gangdisi area, Tibet [J]. Mineral Deposits, 2012, 31 (4): 671 – 698.

[20] 白雅文. 遥感技术在地质构造信息提取中的应用——以内蒙古四子王旗地区为例 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2006.

Bai Y W. Application of remote sensing technology in geological structure information extraction: A case study of Siziwang Banner, Inner Mongolia [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2006.

[21] Karimzadeh S, Tangestani M H. Evaluating the VNIR – SWIR datasets of WorldView – 3 for lithological mapping of a metamorphic – igneous terrain using support vector machine algorithm: A case study of central Iran [J]. Advances in Space Research, 2021, 68 (6): 2421 – 2440.

[22] 郑亚东, Davis G A, 王 琮, 等. 内蒙古大青山大型逆冲推覆构造 [J]. 中国科学 (D 辑), 1998, 28 (4): 289 – 295.

Zheng Y D, Davis G A, Wang C, et al. Large thrust nappe structure in Daqingshan, Inner Mongolia [J]. Science in China (Series D), 1998, 28 (4): 289 – 295.

[23] 张进江, 戚国伟, 郭 磊, 等. 内蒙古大青山逆冲推覆体系中中生代逆冲构造活动的⁴⁰Ar – ³⁹Ar 定年 [J]. 岩石学报, 2009, (3): 609 – 620.

Zhang J J, Qi G W, Guo L, et al. ⁴⁰Ar – ³⁹Ar dating of Mesozoic thrust activity in Daqingshan thrust nappe system, Inner Mongolia [J]. Journal of Rock, 2009, (3): 609 – 620.

[24] 刘正宏, 徐仲元, 杨振升. 大青山逆冲推覆体系含义及地质特征 [J]. 世界地质, 2001, 20 (3): 224 – 230.

Liu Z H, Xu Z Y, Yang Z S. Implications and geological characteristics of Daqingshan thrust nappe system [J]. World Geology, 2001, 20 (3): 224 – 230.

[25] 王建平, 杨玉东. 内蒙大青山地区的冲断和推覆构造 [R]. 北京: 中国地质科学院地质力学研究所, 1983: 44 – 57.

Wang J P, Yang Y D. Thrust and nappe structures in Daqingshan area, Inner Mongolia [R]. Beijing: Institute of Geomechanics Chinese Academy of Geological Sciences, 1983: 44 – 57.

[26] 王海滨, 张进江, 古大祥, 等. 内蒙古中部盘羊山逆冲推覆体系的构造特征、活动时限与构造意义 [J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45 (5): 839 – 850.

Wang H B, Zhang J J, Gu D X, et al. Tectonic characteristics, active time and tectonic significance of Panyangshan thrust nappe system in central Inner Mongolia [J]. Tectonics and Metallogeny, 2021, 45 (5): 839 – 850.

[27] 杜菊民, 张庆龙, 李洪喜, 等. 内蒙古中部大青山地区推覆构造系统与断层相关的褶皱 [J]. 地质通报, 2005, 24 (7): 660 – 664.

Du J M, Zhang Q L, Li H X, et al. Nappe structural system and fault – related folds in Daqingshan area, central Inner Mongolia [J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24 (7): 660 – 664.

[28] 张浩然. 内蒙古大青山东段逆冲推覆构造 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2009.

Zhang H R. Thrust nappe structure in eastern Daqingshan section, Inner Mongolia [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2009.

[29] 何 斌. 内蒙古大青山西段晚古生代 – 中生代逆冲系统及其演化 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2019.

He B. Late Paleozoic to Mesozoic thrust system and its evolution in western Daqingshan section, Inner Mongolia [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.

[30] 刘得文. 内蒙古哈达门沟金矿区构造变形特征与控矿构造研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2014.

Liu D W. Study on structural deformation characteristics and ore – controlling structure of the Hadamenggou gold deposit, Inner Mongolia [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014.

[31] Yan S X, Liu Q S, Wang H M, et al. Remote sensing strategic exploration of large or superlarge gold ore deposits [C] // Asia – Pacific Symposium on Remote Sensing of the Atmosphere, Environment, and Space, 1998.

A hyperspectral analysis of alteration zoning in the Hadamenggou gold deposit and its significance for ore prospecting

XU Daxing^{1,2}, YANG Biao^{3,4}, SHAO Zhaogang¹, LIU Changfeng⁵, WANG Da⁶, WANG Jianping⁶

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Hohhot Natural Resources Comprehensive Survey Center, Hohhot 010010, China; 4. School of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 5. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 6. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The Hadamenggou gold deposit in Baotou City, Inner Mongolia is an important large gold deposit in the Wulashan – Daqingshan metallogenic belt, with great prospecting potential. To give full play to remote sensing technology in geological prospecting, this study extracted the mineralization alteration information of the Hadamenggou gold deposit from remote sensing data of different satellites. Based on the spectral characteristics of alteration minerals in the mining area, this study proposed a comprehensive processing method that extracted iron

staining information from the Landsat8 OLI and WorldView – 3 data, hydroxyl information from the ASTER and WorldView – 3 data, and carbonation information from the ASTER data through principal component analysis. As a result, two alteration zones were delineated based on the distribution patterns of alteration anomalies and the geological map analysis of the mining area. By combining the study results of the ore – controlling structures, it is believed that the metallogenic hydrothermal processes of the Hadamengou gold deposit were closely related to structures. This study can provide a reference for the prospecting for the same type of gold deposits in the Wulashan – Daqingshan metallogenic belt and can guide the peripheral prospecting of the Hadamengou gold deposit.

Keywords: Hadamengou gold deposit; alteration anomaly; comprehensive processing method; ore – controlling structure; peripheral prospecting

(责任编辑: 张 仙)