

doi: 10.11720/wtyht.2017.1.07
付锦,赵宁博,刘涛.高精度磁测预测砂岩铀矿氧化带前锋线[J].物探与化探,2017,41(1):45-51.http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.1.07
Fu J,Zhao N B,Liu T.The prediction of the front of the sandstone uranium deposit oxidation zone based on high-precision magnetic measurement[J].Geo-physical and Geochemical Exploration,2017,41(1):45-51.http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.1.07

高精度磁测预测砂岩铀矿氧化带前锋线

付锦^{1,2},赵宁博^{1,2},刘涛^{1,2}

(1.核工业北京地质研究院 遥感信息与图像分析国家级重点实验室,北京 100029;2.核工业北京地质研究院,北京 100029)

摘 要:通过伊犁盆地南缘地面高精度磁测的开展、航空高精度磁测资料的应用以及钻孔岩心的磁化率测量,对层间氧化带型砂岩铀矿各地球化学分带的铁磁矿物分布特征、磁化率变化特征和磁场特征以及与铀矿化的关系进行了系统地研究,探讨了利用高精度磁测确定氧化—还原过渡带的位置的可行性、机理和方法,对砂岩型铀矿氧化带前锋线位置和铀成矿远景靶区的预测具有重要作用。
关键词:高精度磁测;氧化—还原过渡带;层间氧化带型砂岩铀矿
中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2017)01-0045-07

0 引言

在铀矿勘查中,磁法测量主要用于成矿构造的寻找和厘定、基底结构的圈定和划分,在直接寻找和定位铀矿方面很少见。通过磁法预测层间氧化带型砂岩铀矿氧化带前锋线在美国曾有报道^[1-2],其原理是在层间氧化带砂岩铀矿中,含氧地下水沿着透水岩层向下倾方向迁移,在氧化带前锋线附近,受地球化学障的作用,地下水中携带的铀元素发生沉淀,同时一些砂体中原有强磁性物质受地球化学障的作用,蚀变为弱磁性矿物,如赤铁矿、褐铁矿等,于是,在铀矿卷赋存的氧化带前锋线附近产生磁化强度弱化现象,以此达到预测氧化带前锋线的目的。可见,在合适的物性前提下,磁法可应用于卷状铀矿床的定位。美国地调局在德克萨斯州南部、怀俄明州泡德河盆地、新墨西哥州圣胡安盆地的 3 个卷型铀矿床上进行野外钻孔岩心磁化率测量表明,尽管 3 个矿床地球化学环境不尽相同,但共同特点是砂体本身含有铁磁性矿物,并且铀与磁化率之间存在负相关关系。从中不难发现,美国 3 个卷型矿床原生砂体磁化率大都在 200~4 000 μSI,最高达 10 000 μSI。

蚀变后,磁化率降低,但如果砂岩本身并不含有铁磁性矿物,那么就不存在磁性弱化的前提。我国砂岩铀矿是否存在这样的物性条件? 机理是否相同? 笔者在利用高精度磁测定位砂岩型铀矿氧化带前锋线时需要厘清。
为此,笔者在伊犁盆地南缘开展了地面高精度磁测,并按氧化、还原程度对见矿钻孔岩心划分,并进行磁化率测量。对层间氧化带型砂岩铀矿各地球化学分带的铁磁矿物分布特征、磁化率变化特征和磁场特征以及与铀矿化的关系进行了系统研究,探讨了利用高精度磁测确定氧化—还原过渡带位置的可行性、机理和方法,为我国砂岩型铀矿氧化带前锋线的预测提供一种可行的技术方法。

1 磁性参数

表 1 为伊犁盆地蚀源区和盆地盖层的磁化率,盆内大部分沉积岩地层磁化率在 $n\times 10\ \mu\text{SI}$ 。盆地盖层中主要磁性层是碱交代岩,少数砂砾岩有弱磁性,但分布不普遍。基底中主要磁性层为二叠系上统的安山质次火山岩和极少的砂岩以及二叠系下统的安山岩、安山玢岩、玄武岩、中基性火山岩、砂岩和凝灰

收稿日期:2015-09-29;修回日期:2016-05-26
基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目“放射性矿产探测与开发技术”(SS2012AA060901)
作者简介:付锦(1961-),男,主要从事铀矿地球物理、地球化学找矿预测方法研究工作。

岩,其中砂岩磁化率均值174 μ SI,凝灰岩磁化率变化大,磁化率平均值达1018 μ SI;石炭上统的安山岩、中基性熔岩、凝灰岩、角砾岩均具有较高的磁化率,安山岩磁化率均值337 μ SI,中基性岩、凝灰岩、角砾岩磁化率变化大,平均值达到一千多 μ SI,石炭下统的正长花岗岩、花岗闪长岩磁性较稳定,平均磁化率671 μ SI,安山质砾岩、角砾岩和安山质熔岩、安山质凝灰岩磁化率变化大,磁化率约200~300 μ SI;

表 1 伊犁盆地及其蚀源区磁性参数^[3]

地质时代	岩性	磁化率/(10 ⁻⁶ SI)		
		最小值	最大值	均值
白垩系	砂砾岩	1.67	52.77	28.03
侏罗系	碱交代岩	695.40	776.19	735.79
	砾岩砂砾岩	7.04	632.54	
二叠系上统	安山质次火山岩	436.91	436.91	436.91
	砾岩	13.51	15.83	15.06
	砂岩	330.66	389.34	354.99
二叠系下统	流纹斑岩	30.78	30.78	30.78
	安山岩、安山玢岩	38.21	1407.13	258.32
	玄武岩、中基性火山岩	70.35	1322.70	676.52
	砂岩	134.56	212.19	174.39
	凝灰岩	50.04	1579.11	1018.13
石炭系上统	安山岩	6.88	1071.18	337.64
	中基性熔岩凝灰岩	161.18	172.01	1175.64
	角砾岩	1579.94	1712.00	1645.96
	灰岩	58.90	759.85	71.8
	火山碎裂岩	19.98	40.71	28.31
石炭系下统	正长花岗岩、花岗闪长岩	583.01	759.85	671.44
	流纹岩	30.63	39.58	35.1
	安山岩、安山玢岩	0	1425.9	290.14
	安山质砾岩、角砾岩	23.58	1103.20	196.23
	安山质熔岩、安山质凝灰岩	30.31	685.98	302.63
	灰岩	32.85	142.47	65.44
	砾岩、砂砾岩、砂岩	18.27	51.69	34.98
	板岩	22.61	22.61	22.61
志留系	中性熔岩	64.07	64.07	64.07
	灰岩、白云岩	6.25	774.24	390.24
奥陶系	灰岩	0	19.80	10.35
	硅质岩	1.71	6.15	3.93
	角砾岩	5.76	14.81	10.29
寒武系	灰岩	6.70	16.31	11.51
震旦系	灰岩	0	79.15	39.2
	板岩	0	0	0
	千枚岩	20.15	36.53	28.34
元古宇青白口系	灰岩	2.68	8.24	6.8
	角砾岩	10.42	11.73	11.07
	板岩	16.08	38.86	28.94
蓟县系	硅质岩灰岩	2.68	13.19	7.94
γ_4^3	花岗岩	20.30	1357.36	608.73
$\gamma\delta_4^3$	花岗闪长岩	70.82	872.42	358.13
δ_4^3	闪长岩	35.18	1368.19	566.35
$\gamma\pi_4^3$	花岗斑岩等	35.18	64.07	49.63
N_4^3	辉绿岩	25.53	25.53	25.53
γ_4^2	花岗岩	15.83	921.32	215.46
γ_4^1	花岗岩	116.64	116.64	116.64
$\gamma\sigma_2^2$	片麻状花岗岩	45.23	45.23	45.23

志留系的灰岩、白云岩磁化率约400 μ SI, 其他的老地层磁化率较小。侵入体磁化率45~608 μ SI, 是本区区域背景和局部磁异常的主要磁源。

地层中铁矿物的种类和多寡与地球化学环境的变化密切相关。图 1 是李合哲等实测的伊犁盆地 K 矿床氧化、还原各带铁矿物类型和含量变化^[4-5], 笔者依据伊犁盆地 3 个矿区所采 14 个钻孔样品测量结果, 在表 2 中归纳总结出不同氧化/还原程度标型铁矿物, 岩心重砂矿物鉴定结果与表 2 所列各带磁化率一致。氧化岩心主要是赤褐铁矿, 几乎不含黄

铁矿, 还原岩心几乎不含赤褐铁矿, 主要是黄铁矿, 越靠近还原带, 岩心中黄铁矿含量越高, 至原生带几乎见不到赤褐铁矿和磁铁矿了; 而过渡带的轻微氧化岩心含少量黄铁矿和极少量赤、褐铁矿, 有些有微量磁铁矿。过渡带偏还原的岩心含少量黄铁矿和磁铁矿, 并含有一定量的晶质铀矿或沥青油矿, 原生带主要是黄铁矿了。

为了了解氧化—还原环境与岩石地层磁化率的关系, 在伊犁盆地 M 铀矿床某工业钻孔取了含矿段所在的氧化—还原过渡带岩心样品进行磁化率和铀

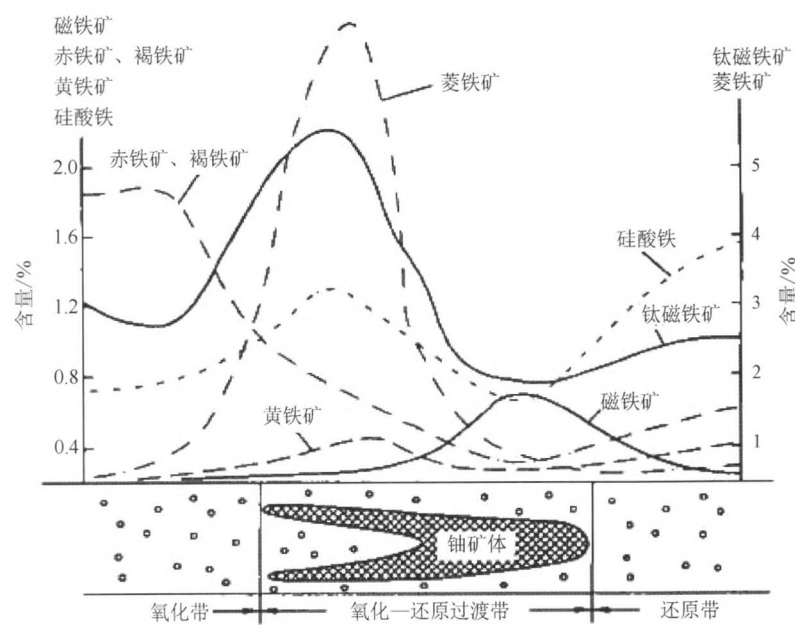


图 1 伊犁盆地 K 矿床地球化学分带与铁矿物分布^[4-5]

表 2 不同氧化-还原环境标型铁矿物及其含磁性分布

环境	强还原	弱还原	弱氧化	强氧化
标型价态	Fe ²⁺ 、S ²⁻ 、FeO	Fe ³⁺ 、Fe ²⁺ 、SO、S ²⁻	Fe ³⁺ 、Fe ²⁺ 、S ⁴⁺	Fe ³⁺ 、SO ₄ ²⁻
标型铁矿物	硅酸铁 黄铁矿	磁铁矿 少量黄铁矿	钛磁铁矿 黄铁矿 菱铁矿 硅酸铁 极微磁铁矿	褐铁矿 赤铁矿
	黄铁矿	磁铁矿	菱铁矿	褐铁矿

含量测量,岩心均取自含矿目的层,岩性为砂岩,岩心样品铀含量均值与磁化率均值关系列于图 2,磁化率与铀含量基本存在正相关关系,含矿段砂岩磁化率高于非含矿段。这一结果与美国 3 个盆地情况有不同,那里的卷型铀矿床产出区含矿段砂岩磁化率低于非含矿段,显示铀矿化与磁性矿物比例呈负相关关系。

为了研究氧化—还原分带与铀含量及磁化率的关系,将 14 个钻孔岩心样品分析结果按岩石铁矿物种类、含量和颜色划分为 4 类,分别为还原岩心样、

偏还原岩心样、轻微氧化岩心样和完全氧化岩心样,偏还原岩心样和轻微氧化岩心样代表氧化—还原过渡带环境,还原岩心样位于过渡带与还原带分界处,只是还原程度略高于偏还原样品。图 3 中还原和氧化岩心样品铀含量均较低,偏还原和轻微氧化的过渡带的岩心铀含量高,还原样品由于位于氧化—还原过渡带边缘,磁化率仍然较高,但铀含量却大幅降低,可能铀沉淀范围小于铁矿物变化所指示的氧化—还原环境的变化范围。

图 4 矿床的样品均取自见矿的含矿目的层氧

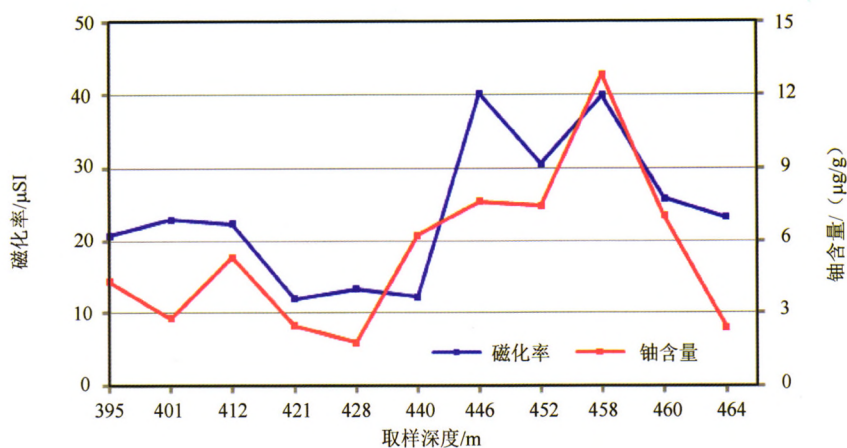


图 2 M 矿床某钻孔含矿段不同深度岩心磁化率与铀矿化关系

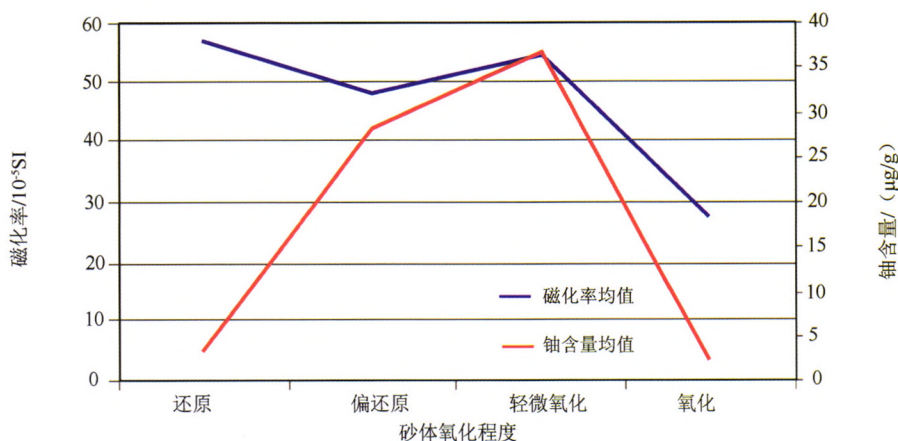


图 3 钻孔岩心地球化学环境变化与磁化率和铀矿化关系^[6]

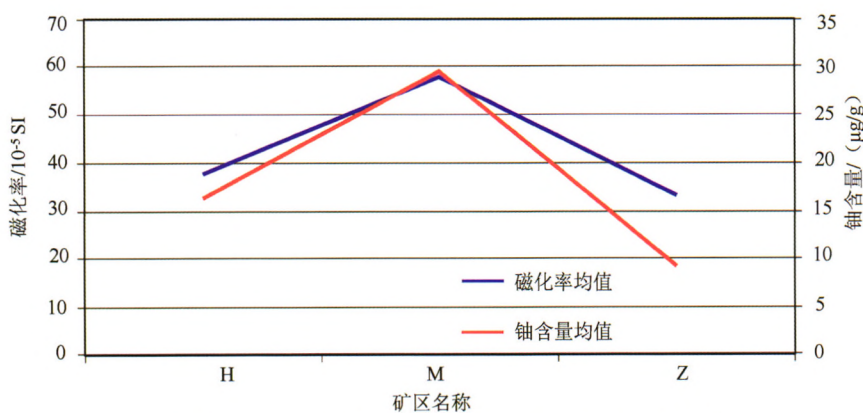


图 4 按矿床统计的钻孔岩心磁化率和铀矿化关系^[6]

化—还原过渡带砂体中,按含矿段所在的氧化—还原过渡带岩心样品磁化率平均值统计,磁化率低的矿床铀含量低,磁化率高的矿床铀含量高,说明还原容量愈大,流经砂体的氧化水中的高价铁离子被还原成低价磁性矿物的量就愈多,磁化率就愈高,铀被还原沉淀亦越多,所成铀矿也相对富大,伊犁盆地 M 矿床是该盆地中几个矿床磁化率均值最高的,也是所有矿床中最富的,其富大的原因之一就是砂体的高还原容量。

2 磁异常确定氧化带前锋线机理

伊犁盆地南缘砂体本身磁化率很低,含矿砂岩磁化率在 $10\sim 50\mu\text{SI}$ 之间,含磁性矿物极少,但是含氧地下水所携带的来自蚀源区的三价铁离子和在氧化带不断扩展所生成三价铁离子在盆地砂体中运移,随着运移距离的增加,地下水氧化性逐渐减弱,还原性逐渐增强,水中的三价铁离子又被还原成二

价铁离子,增加了磁铁矿物的含量,导致在氧化—还原界面附近磁化率增强。

核工业新疆 216 大队李合哲曾分析氧化—还原各带铁矿物主要类型分布特征指出(图 1)^[4],氧化带主要是赤铁矿和褐铁矿,其他铁矿物含量都很低;过渡带卷形矿尾端(弱氧化带)主要是菱铁矿、钛磁铁矿和硅铁矿,部分黄铁矿,磁铁矿主要集中在过渡带卷形矿头部位,而还原带主要是硅酸铁和少量钛磁铁矿,说明磁性矿物主要集中于过渡带。于此同时,水中铀酰络离子遇到还原介质被还原沉淀,导致铁磁矿物生成和铀沉淀位置接近,均位于还原介质丰富的氧化—还原过渡带内,但由于地下水中所携带的三价铁数量有限加之砂体埋藏较深,因此,只有在砂体还原容量较大时才能产生足够在地表引起微磁异常的铁磁矿物,还原磁铁矿的多少和砂体的还原物质的多寡成正比。

砂体的还原容量越大,铀也沉淀越多,这种变化

更易发生在富大的层间氧化带型铀矿上,有迹象表明,铁磁矿物的变化范围应该比矿卷的范围更大,更容易指示氧化—还原过渡带的位置。这是利用高精度磁测探测层间氧化带型砂岩铀矿,尤其是富大铀矿氧化—还原过渡带的机理,图 5 是该机理模型示意。

此前,核工业航测遥感中心的倪卫冲和江民忠在伊犁盆地(图 6)、鄂尔多斯盆地、腾格里盆地等^[4,7-11]进行航磁解释时也发现了铀矿产出位置的地表投影有叠加于背景磁异常上的波动的弱磁异常产生。笔者在伊犁盆地 W 矿床上测得的磁测剖面也探测到微磁异常^[6]。这与此前文献报道的美国泡德河等盆地利用高精度磁测和磁化率测量确定氧化带前锋线的原理有所不同,最大差异是由于两者含矿目的层砂体磁性不同所造成的磁性矿物变化的差异。查阅文献资料显示^[1-2],美国怀俄明州泡德河盆地、德克萨斯州南部、新墨西哥州圣胡安盆地含

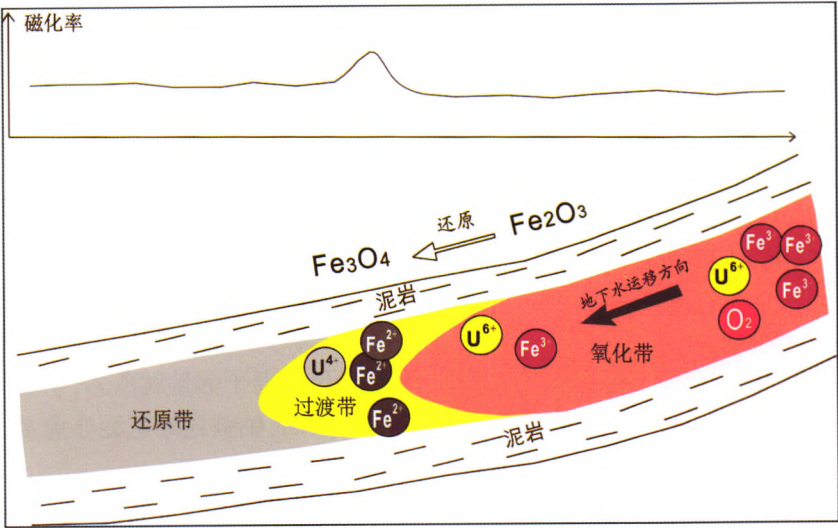


图 5 伊犁盆地氧化—还原过渡带磁化率增高机理模型

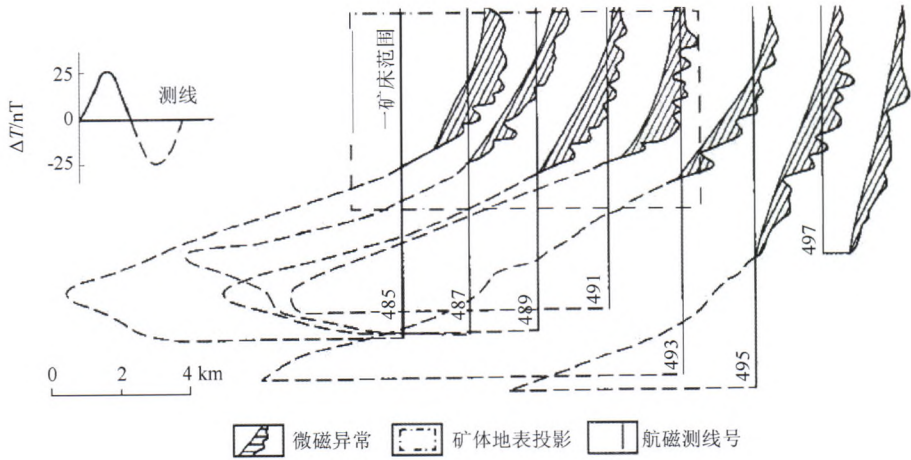


图 6 伊犁盆地 K 矿床航磁微磁异常剖面平面^[4,8]

矿主砂岩磁化率值 200~4 000 μSI , 最高达 10 000 μSI , 砂体本身磁化率较高, 在含氧地下水流经原生砂体时, 原生砂体中的二价铁部分被氧化为三价铁, 导致部分磁铁矿氧化成赤铁矿甚至褐铁矿而部分失去磁性, 因此, 致使在氧化带前锋线附近磁性降低, 可降低 30% 到一个数量级左右。而伊犁盆地与美国三盆地含矿目的层砂体磁性正好相反, 砂体本身磁化率很低, 氧化水中的高价铁离子遇有原生砂体的还原剂时被还原而导致铁磁矿物的增加, 从而在矿卷部位弱磁异常的产生。

同时, 也应指出, 探测效果取决于砂体本身还原介质容量高低和磁性矿物生成的多寡。比如, 伊犁盆地 Z 矿床氧化—还原过渡带磁化率较低, 难以形成有效的微磁异常, W 矿床可以探测到微磁异常并可通过数据处理可将微磁异常提取出来 (图 7)。需要说明的是, 所叠加的地表干扰磁异常高低是该方法是否可行的前提。比如, 伊犁盆地东部断褶带地表褶皱剧烈, 磁性火山岩多有分布, 背景上叠加磁场较强, 掩盖了氧化—还原过渡带微磁异常的变化, 也使方法应用受限, 异常精度的保证也是方法应用成效的关键。另外, 由于 M 矿床是多沉积旋回形成的层间氧化带空间上呈叠瓦状分布, 因此, 平面上多层氧化带前锋线叠加, 无法准确预测某沉积旋回氧化带前锋线, 只能预测氧化—还原过渡带分布。

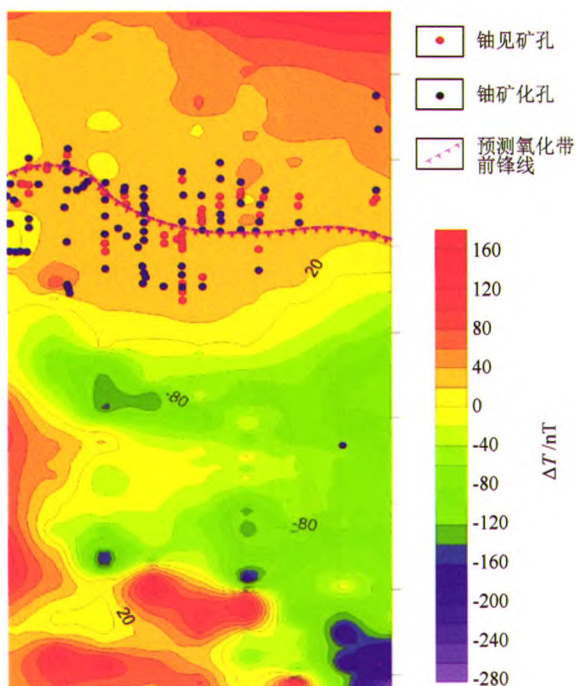


图 7 W 矿床地面磁测 ΔT 剩余异常
与氧化带前锋线预测^[6]

3 伊犁盆地南缘各地球化学分带磁场特征

除了前述铀矿氧化—还原过渡带在一定条件下存在弱磁异常显示外, 伊犁盆地氧化、过渡、还原带以及蚀源区在区域磁场上具有明显特征。图 7 是伊犁盆地 W 矿床地面高精度磁测 ΔT 剩余异常图, 区域磁场上蚀源区普遍存在的磁性火山岩出露导致磁场起伏大, 正负交替; 盆地边缘, 基底成斜坡带、断陷带或断褶带形式, 磁场强度逐渐降低, 形成或宽缓或密集的磁场的梯度带, 这个梯度带表明地层呈斜坡带向盆地方向倾斜, 是地下水径流区, 是氧化带所在位置。盆内氧化—还原带所在部位 (即铀矿产出部位), 磁场由梯度带过渡到宽缓磁场, 其上叠加有微磁异常, 进入还原带磁场变得宽缓, 反映了基底埋藏深。因此, 除了识别微磁异常可以确定氧化—还原过渡带的位置, 根据磁异常的特征也可识别蚀源区、氧化带、过渡带和还原带所在部位, 从而识别铀成矿有利的氧化—还原过渡带和圈定远景靶区。

4 结论

1) 伊犁盆地南缘地面高精度磁测结果和岩心磁化率测量表明, 在铀矿化所在的氧化—还原过渡带, 磁化率和铀含量存在正相关关系, 砂体还原容量愈大, 流经砂体的氧化水中的三价铁离子被还原成低二价铁离子的量就愈多, 生成的磁铁矿愈多, 磁化率就愈高, 铀被还原沉淀亦愈多, 所成铀矿也相对富大。

2) 伊犁盆地南缘砂体本身磁化率很低, 利用高精度磁测识别氧化带前锋线或者氧化带前锋线位置的原理是: 含氧地下水所携带的来自蚀源区和在氧化带生成三价铁离子在盆地砂体中运移, 随着运移距离的增加, 地下水氧化性逐渐减弱, 还原性逐渐增强, 水中的三价铁离子被还原成二价铁离子, 增加了铁磁矿物的含量, 导致在氧化—还原地球化学障附近砂体磁化率增强; 当砂体还原容量较大, 所生成的磁性矿物较多时, 利用地面高精度磁测可以确定氧化带前锋线的大致位置。

3) 砂岩铀矿的成矿位置与区域构造和基底局部构造紧密相关, 利用地面或者航空高精度磁测, 可以圈定和划分区域和局部构造, 结合氧化、过渡、还原带的磁场特征, 确定和识别氧化—还原过渡带的地表投影位置。因此, 除了在条件适合时可以利用微磁异常识别氧化—还原过渡带位置, 同时可以利

用磁场特征区分蚀源区、氧化带、过渡带和还原带,达到圈定铀矿靶区的目的,对砂岩铀矿远景靶区的预测具有重要意义。

参考文献:

[1] 谈成龙,张书成.高效益与深部铀矿产的物化探勘查方法[R].核工业北京地质研究院科技信息研究所,2009.

[2] Ellit J R.Magnetic susceptibility and geochemical relationships as uraiumn prospecting duides[J]. USAEC.AEC-RI,1968;53-56.

[3] 胡明考,张向东,曹维起.新疆伊宁航测地区航空磁测报告[R].核工业航测遥感中心,1992.

[4] 江民忠,张积运,石岩,等.微航磁异常与可地浸砂岩型铀矿床[J].铀矿地质,2007,23(5):300-303.

[5] 李和哲.伊犁盆地南缘铀成矿远景评价[R].核工业西北地质局 216 大队,1995.

[6] 付锦,赵宁博,蔡煜琦,等.基于磁异常的砂岩型铀矿氧化—还原过渡—带定位[J].铀矿地质,2015,31(s1):234-235.

[7] 倪卫冲.层间氧化带砂岩型铀矿床上航磁弱信息形成机理的初步探讨[J].航测与遥感,1998,52(4):17-19.

[8] 倪卫冲.在伊犁盆地南缘地区开展航放航磁弱信息提取的应用效果[J].航测与遥感,2000,55(1):13-15.

[9] 陈国胜.鄂尔多斯盆地东部地区航磁弱异常的解釋[J].航测与遥感,2002,60(3、4):13-15.

[10] 倪卫冲.在腾格尔坳陷西北缘地区开展航放航磁弱信息提取的应用试验[J].航测与遥感,2000,56(3、4):9-13.

[11] 倪卫冲.新疆十红滩地区航放航磁弱信息提取方法的应用及其效果[J].航测与遥感,2002,59(1、2):19-23.

The prediction of the front of the sandstone uranium deposit oxidation zone based on high-precision magnetic measurement

FU Jin^{1,2}, ZHAO Ning-Bo^{1,2}, LIU Tao^{1,2}

(1.National Key Lab of Remote Sensing Information and Image Analysis Technology,Beijing 100029, China; 2.Beijing Research Institute of Uranium Geology,Beijing 100029,China)

Abstract: Through high-precision ground magnetic survey, high-precision aviation magnetic data application, and susceptibility measurements of drill core in Ili basin, the authors made a systematic study which included ferromagnetic mineral distribution characteristics, susceptibility variation characteristics of geochemical zoning of interlayer oxidation zone sandstone uranium deposits and the relationship with uranium mineralization, investigated feasibility, mechanism and methods of locating oxidation-reduction zone lby means of high-precision magnetic survey. The results obtained by the authors have an important role in prediction of front line of the oxidation zone and prognosis of uranium mineralization target.

Key words: high-precision magnetic measurement;redox transitional zone;interlayer oxidation zone sandstone type uranium deposit

(本文编辑:王萌)