

doi: 10.11720/wtyht.2021.1290

梁新强, 乔占华, 闫强, 等. 物探方法在复兴屯银铅锌多金属矿区构造与成矿机理研究中的应用[J]. 物探与化探, 2021, 45(2): 323-336. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1290>

Liang X Q, Qiao Z H, Yan Q, et al. Application of geophysical methods in the exploration of Fuxingtun silver-lead-zinc polymetallic deposit and its metallogenic mechanism [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(2): 323-336. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1290>

物探方法在复兴屯银铅锌多金属矿区构造与成矿机理研究中的应用

梁新强, 乔占华, 闫强, 王亮, 李建锋, 刘晓辉, 王森
(内蒙古国土资源勘查开发院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要: 复兴屯银铅锌多金属矿是近两年在大兴安岭成矿带中生代陆相火山盆地首次发现的特大型银铅锌多金属矿床。在矿床普查与勘查期间开展了地面高精度磁测、时间域激发极化法面积性测量、AMT 电磁测深等物探方法, 发挥了重要指导作用。① 通过地面磁异常数据 RGIS 软件处理解释判定了普查区构造格局; ② 综合利用地磁异常和视电阻率异常特征, 结合地表出露岩性判定了破火山口断陷盆地位置; ③ 利用激电测深判定了断陷盆地形成过程与构造特征及断裂构造的多期次与硫化物沉淀的多期次性; ④ 依据视极化率异常特征, 结合地质构造环境判定了场源性质和成矿物质来源; ⑤ 利用 AMT 电磁测深资料圈定了筒状次火山岩侵入体。本文在上述研究结果和钻探基础上, 还研究了该矿床形成机理, 给出了一套寻找该类矿床的物探方法应用思路。

关键词: 银铅锌多金属矿; 矿产普查; 物探; 内蒙古复兴屯

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2021)02-0323-14

矿机理。

0 引言

复兴屯银铅锌矿区位于内蒙古科尔沁右翼前旗境内, 矿体主要赋存于满克头鄂博组火山岩中, 矿床成因属陆相火山一次火山热液充填型银、铅、锌矿床。矿床普查时间为 2015 年 6 月~2018 年 12 月, 共计施工钻孔 126 个, 累计完成钻探工作量 101 389.32 m。截至 2018 年 12 月, 矿床 1 区估算 Ag 金属量 5 105 046 kg, 伴生 Zn+Pb 金属量 370 959 t, Ga 金属量 497 t, 规模预计达特大型。这是在大兴安岭成矿带中生代陆相火山盆地首次发现的特大型银铅锌多金属矿床, 被列入 2019“十大找矿突破”。

该矿床找矿的勘查技术应用, 对该区域后期找矿具有重要指导意义。围绕矿产普查与勘查突破, 该区先后组合开展了地面高精度磁测、时间域激发极化法测量、AMT 交流测深等物探工作, 基于物探异常判定了局部断裂和区域构造格局, 并研究了成

1 地质概况

复兴屯矿产普查区火山岩广泛分布, 出露岩性主要为侏罗系: 白音高老组流纹岩(J_3b)、玛尼吐组安山质凝灰岩($J_3mn\zeta tf$)、玛尼吐组流纹岩($J_3mn\lambda$)、满克头鄂博组流纹岩($J_3mk\lambda$)、满克头鄂博组酸性凝灰岩(J_3mkstf)、满克头鄂博组凝灰岩($J_3mk\lambda tf$)、满克头鄂博组流纹质凝灰岩($J_3mk\lambda tf$)、满克头鄂博组珍珠岩($J_3mk\nu\lambda$), 见图 1。

区内矿化蚀变较发育, 主要赋存于满克头鄂博组中, 岩石普遍具叶蜡石化、绿泥石化、高岭石化。近地表氧化带亦具铁锰矿化、褐铁矿化、弱硅化, 以脉状或蜂窝状、浸染状交代产出; 深部以碳酸盐化、铅锌矿化为主, 局部见黄铁黄铜矿, 多以细点状、星点状、斑点状或细脉状产出。银铅锌矿体由浅部到深部有变富、规模变大的趋势。

收稿日期: 2020-06-04; 修回日期: 2020-09-16

基金项目: 内蒙古自治区地质勘查基金项目“内蒙古自治区科尔沁右翼前旗复兴屯银铅锌多金属矿普查”项目(11-1-KC11)

作者简介: 梁新强(1965-), 男, 主要从事地质地球物理勘查工作。Email: 773735479@qq.com

表 1 复兴屯普查(1 区)岩石磁性参数测定结果统计

Table 1 Statistics of measurements of magnetic parameters of rocks in Fuxingtun (Section 1)

岩石名称	块数	$\kappa/(10^{-6}\times4\pi\text{SI})$		$M_r/(10^{-3}\text{ A}\cdot\text{m}^{-1})$		备注
		常见值	常见值变化范围	常见值	常见值变化范围	
流纹质晶屑岩屑凝灰岩	31	1585	912~3981	912	347~2455	地表采样
安山质岩屑凝灰岩	38	347	107~1096	269	78~2138	
流纹质晶屑凝灰岩	44	389	145~776	155	52~275	
弱铅锌矿化英安质角砾凝灰岩	30	977	724~1413	191	83~813	岩心采样
弱铅锌矿化角砾凝灰岩	37	—	—	—	—	
铅锌矿化流纹质熔结凝灰岩	31	—	—	—	—	
火山角砾岩	30	—	—	—	—	
石英二长斑岩	30	—	—	—	—	
流纹岩	30	—	—	—	—	
沉凝灰岩	30	—	—	—	—	
流纹质(角砾)岩屑晶屑凝灰岩	35	—	—	—	—	

注:“—”表示磁性较弱,不足以引起±1 nT 异常值,未参与统计计算。

出该区场值为负大面积分布的异常特征。其三,地质体遭受构造作用,大范围破碎杂乱堆积。对比 1:10 000 地质图可知,区内地表出露的岩性为:侏罗系满克头鄂博组流纹岩($J_3mk\lambda$)、侏罗系满克头鄂博组凝灰岩($J_3mk\tau f$)、侏罗系满克头鄂博组珍珠岩($J_3mkv\lambda$)、侏罗系满克头鄂博组酸性凝灰岩(J_3mkstf),并非单一沉积建造地质体,并且熔岩形成的地质体占主导地位。这就表明地质体形成后,有后期构造作用于 C_{h3} 异常区,迫使区内地质体广度深度破碎,产生去磁现象。导致地质体如此大范围纵、

横、垂向均匀破碎去磁的原因,推测是在火山活动期间,岩浆大量喷发致使岩浆房空虚,间歇期冷凝收缩环火山颈形成断裂,由于支承物体的缺失,在重力作用下大面积塌陷形成破火山口断陷盆地。跌落至盆地内的地质体破碎严重,加之杂乱无章的堆积,产生破碎去磁。

图 3 为 ZK1304 孔 580 m 深处,采集的岩心标本两端面与侧面照片图,其岩性为流纹岩。由图可看出岩块碎裂堆积,流纹岩碎块产状倒转顺钻孔轴线直立分布。这些实物标本证明了塌陷形成的破火山

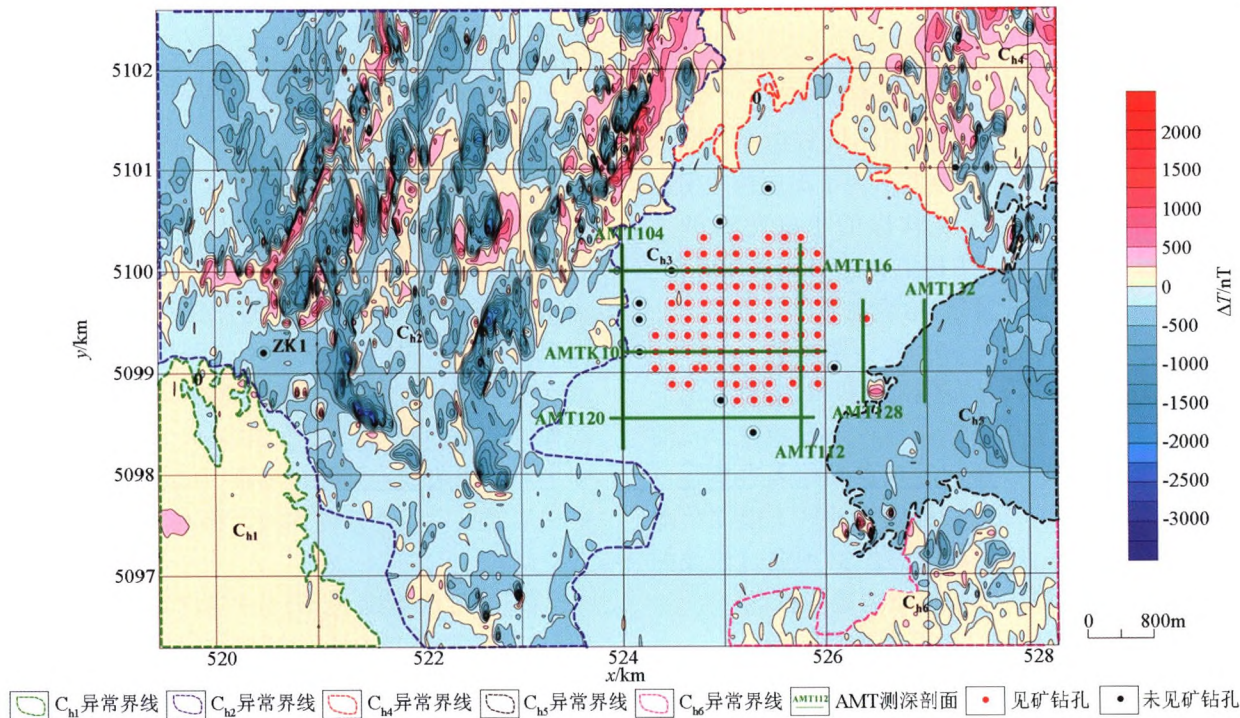


图 2 复兴屯 1 区银铅锌多金属矿普查地面高精度磁测 ΔT 化极等值线平面(1:10 000)

Fig.2 Map of RTP of ΔT from ground magnetic survey of Section 1 of Fuxingtun silver-lead-zinc polymetallic deposit (1:10 000)



图3 复兴屯1区银铅锌多金属矿普查 ZK1304 孔
580 m 深度岩心标本两端面、侧面照片

Fig.3 Core section and side photo of drill hole
ZK1304 at 580m in Section 1 of Fuxingtun silver-lead-zinc
polymetallic deposit

口断陷盆地的存在。徐夕生、邱检生主编的《火成岩岩石学》指出,巨量熔结凝灰岩的形成与破火山口有直接或间接的关系^[1]。 C_{h2} 异常区大量的熔结凝灰岩出现佐证了这一观点,进一步说明该破火山口断陷盆地的存在。该破火山口断陷盆地,磁测、电测(下述)成果相契合^[2]。

3 普查区构造格局判定

为了圈定复兴屯矿产普查区的隐伏地质构造,开展了地面磁测工作,获得的磁异常见图2。我们知道,地面观测的磁异常是地下不同规模 and 不同深度的磁性体共同叠加所产生的。为了提取构造引起的异常,我们采用了RGIS软件的正则化滤波方法^[3-4],就是从叠加异常中提取构造目标体的异常。在火山岩地区,构造较复杂,地表地质体的分布往往受成岩时期的地形控制。例如,熔浆一般向低凹地形流动,可能形成线性分布但延深极浅;塑性碎屑流在流动过程中,由于推挤作用往往形成线性分布的绳状构造,延深极浅。这两种现象在地表观察很可能误认为断裂构造。因此,火山岩地区不能简单地用地面观测异常来推断地质构造,必须通过滤波的方法去除干扰,提取深部的地质构造信息。

3.1 ΔT 正则化滤波异常特征及地质解释

经正则化滤波,选取波因子 $\lambda = 334$ (即相当于滤除规模小于在334 m的异常),进而得到圈定具有一定规模异常5处,编号分别为: C_{L1} 、 C_{L2} 、 C_{L3} 、 C_{L4} 、 C_{L5} ,见图4。各异常特征如下:

C_{L1} 异常独立圈闭,平稳缓变,场值相对低,介于

-3~8 nT 之间。空间形态呈卵状,西大东小,近EW向延伸。按独立圈闭等值线上限值8 nT圈定,长轴长1529 m,走向方位角273°,分布面积约1.14 km²。 C_{L1} 异常对应地质构造为火山小洼地,推断其产生原因与火山塌陷密切相关。

C_{L2} 异常独立圈闭,由 C_{L2-1} 、 C_{L2-2} 、 C_{L2-3} 三处次级异常叠加而成,整体呈“杯”形,近SN向展布。场值较高,介于20~216 nT之间,等值线密集,周边梯度较大。 C_{L2-1} 异常展布呈三角形(南侧未封闭),场强相对较大(55~78 nT); C_{L2-2} 异常较规则,呈肾状展布,平均走向约30°,强度较大(147~216 nT)且西凹东凸,等值线密集,向西向南变密,向北向东变疏,按147 nT等值线圈定,长约2.9 km,平均宽度1.44 km,分布面积约3.5 km²; C_{L2-3} 异常较规则,形态、幅值与 C_{L2-2} 异常相近,按147 nT等值线圈定,长约3.4 km,平均宽度0.7 km,分布面积约2.6 km²。 C_{L2-2} 、 C_{L2-3} 异常对应地质构造为火山机构,较强的异常是由火山堆积规模与延深巨大(所谓有根的磁性地质体)产生;同时也表明此两个火山机构较完整,形成后未发生坍塌现象。

C_{L3} 异常形态较规则,呈NE—SW向的环带状展布,外廓8 nT圈闭的形状似“胃组织”,北东膨大、南西收缩,向北拉长渐变收窄;内廓8 nT圈闭北东膨大南西收缩渐变拉长,似“蝌蚪”状与 C_{L4} 异常对接。按内、外环圈闭等值线8 nT圈定,环带长轴延伸方位角约30°,外缘长约15 km,内环长约6.4 km,分布面积约8.8 km²。异常平缓场值低,等值线北密南疏, ΔT 介于-26~8 nT之间。 C_{L3} 异常对应地质构造为破火山口断陷盆地。该断陷盆地与周围地质体呈断层接触,北陡南缓中央凸起,平面投影呈“胃组织”状沿NE—SW向展布,与 C_{L2-2} 、 C_{L2-3} 异常对应的火山机构并列分布。它们的产出受控于NE—SW向区域线性断裂构造,区域上受环太平洋中生代中酸性火山构造控制^[2]。磁测推断火山活动形成的线性构造 F_{L1} 、 F_{L2} 、 F_{L3} 、 F_{L4} ,放射状分布其周边。由于地质体塌陷破碎裂隙较发育,加之分布面积大,为矿田形成提供了良好的热液运移通道与成矿物质沉淀空间。

C_{L4} 异常较规则,空间分布似“蝌蚪”状独立圈闭,NE向膨大SW向收窄渐变拉长,包含于 C_{L3} 异常之中。变化平缓场值相对低, ΔT 介于8~20 nT之间。按独立圈闭等值线下限值8 nT圈定,长轴长约2.5 km,平均走向方位角约30°,加权平均宽度约0.55 km,分布面积约1.5 km²。 C_{L4} 异常对应地质构造为火山塞,也即断陷盆地形成过程中,地质体从火

山颈由里向外滑塌,形成漏斗状凹地,后期熔浆回流于漏斗之中形成的产物。

C_{15} 异常独立圈闭,场值较高(20~205 nT),等值线密集与 C_{13} 接触。呈次级叠加状态由 C_{15-1} 、 C_{15-2} 两个次级异常叠加而成,总体二级阶梯状围绕 C_{13} 转折分布。 C_{15-1} 次级异常较规则,呈次级叠加“S”形拐折分布(北侧东侧未封闭),总体 NW—SE 向延伸,平均走向方位角 349°,按异常独立圈闭等值线下限值 43 nT 圈定,长约 4.8 km,平均宽度约 1.1 km,分布面积约 5.5 km²; C_{15-2} 次级异常较规则, NW—SE 向延伸带状分布(东南端未封闭)走向方位角 331°,按异常独立圈闭等值线下限值 43 nT 圈定,走向长 2.1 km,平均宽度约 1.4 km,分布面积约 2.9 km²。等值线较稀疏对称于长轴镜像分布。 C_{15} 异常对应地质

构造为产于断陷盆地东缘的火山岩带, F_{14} 断裂对其穿切一分为二,形成南、北岩带错位分布。其中 C_{15-1} 次级异常主值区对应分布于北岩带中的火山机构,产于 NE—SW 向与 NW—SE 向两断裂构造的交汇复合处,而 C_{15-2} 异常对应着产于南岩带中的火山机构。

3.2 构造格局判定

综上所述,勘查区中部偏东破火山口断陷盆地大面积分布,火山机构、火山洼地绕其四周密集产出,共同构成蜂房状火山构造群。放射状断裂构造由盆地向外辐射(磁测推断),分割四周火山机构。这些要素共同叠加,构成普查区以断陷盆地为核心的火山构造格局^[5-16]。断陷盆地、放射状断裂为主要控矿构造,参见图 4。

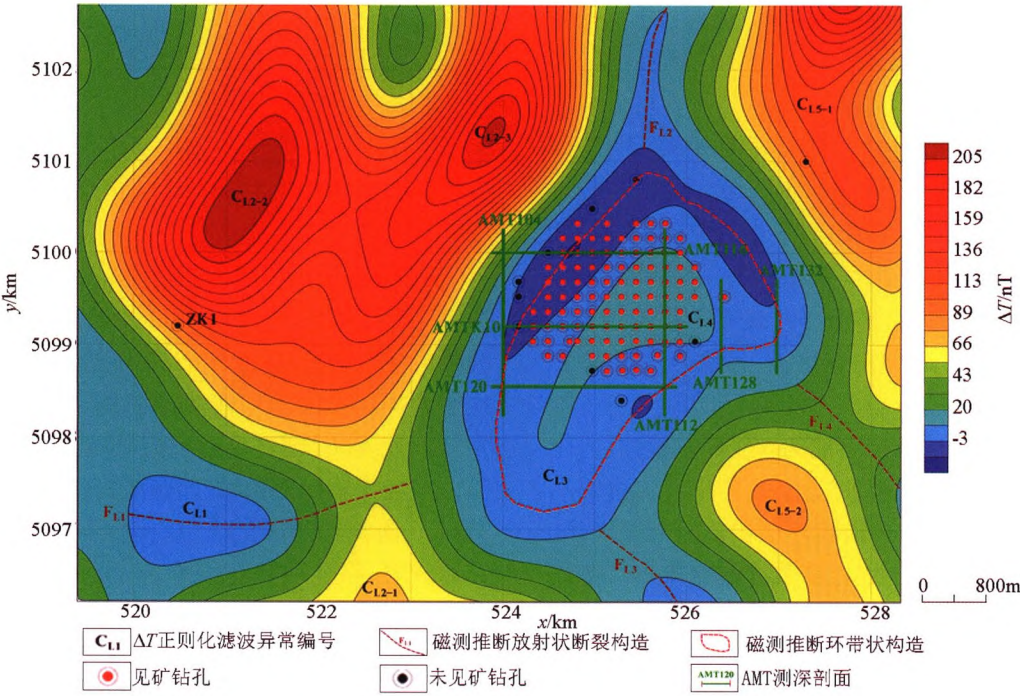


图 4 复兴屯 1 区地面高精度磁测 ΔT 正则化滤波平面等值线与推断构造 (1:10 000)
Fig.4 Contour of ground magnetic anomaly after normalized filtering and interpreted structures
of Section 1 of Fuxingtun silver-lead-zinc polymetallic deposit (1:10 000)

4 矿床赋存区地电异常特征及地质信息简析

4.1 主要岩石电性参数特征

通过地表及钻孔采集岩石标本,测定了本区岩石电性参数,结果见表 2。由表可知,在 AB 极距 1 200 m 的探测深度范围内,铅锌矿化流纹岩、流纹岩及凝灰岩可引起相对较明显激电异常,其他岩性一般引起激电异常背景场。地表采样标本电阻率均

高,主要为岩石硅化所致,这一特征在激电测深断面图上具有明显反映。这一现象的产生,与热液中二氧化硅析出温度低密切相关。岩心样本,沉凝灰岩电阻率值最低,与沉积建造电性特征相吻合。该岩石由于电阻率低所产生的一次场电位低,加之极化率低,在观测过程中信噪比低下,当环境中存在缓变的自然电场时易受干扰,观测结果会出现场值较低的负异常。其他岩性电阻率,符合面积性测量大部分区域视电阻率异常场值较低这一特征。

表 2 区域岩(矿)石电性参数
Table 2 Regional electric parameters of rocks

岩石名称	块数	$\eta/\%$		$\rho/(\Omega \cdot \text{m})$		备注
		常见值	常见值变化范围	常见值	常见值变化范围	
凝灰岩	31	1.58	1.05~2.34	10000	2344~50119	地表采样
晶屑岩屑凝灰岩	30	1.74	1.45~2.34	8511	2344~72444	
英安岩	32	1.35	0.76~2.00	5495	2138~18197	
流纹岩	33	2.29	1.58~3.09	741	324~1445	岩心采样
铅锌矿化火山角砾岩	37	1.45	0.46~5.89	214	112~562	
凝灰岩	44	2.00	0.69~3.89	661	219~1698	
角砾凝灰岩	48	1.51	0.48~5.01	316	151~661	
沉凝灰岩	30	0.42	0.20~1.10	115	62~257	
铅锌矿化流纹岩	31	2.69	1.82~5.25	316	148~1023	

4.2 面积性激电测量异常特征及地质解释

4.2.1 面积性测量 ρ_s 异常特征

按异常特征的自然分区,区内可划分出左、中、右 3 个 ρ_s 异常区,编号分别为:DJ _{ρ_1} 、DJ _{ρ_2} 、DJ _{ρ_3} ,见图 5。限于篇幅,仅就矿床赋存区异常 DJ _{ρ_2} 特征进行解释如下。

DJ _{ρ_2} 异常分布面积大形态较规则,似椭圆状 SN 向展布贯穿于整个测区,与 DJ _{ρ_1} 、DJ _{ρ_3} 异常突变接触,界线明晰。异常平缓场值低, ρ_s 值较集中,一般小于 193 $\Omega \cdot \text{m}$ 。中央区寄生 DJ _{ρ_{2-1}} 、DJ _{ρ_{2-2}} 带状次级异常,两者并行合围,局部外方内圆似环状包围于核部饼状异常周边。 ρ_s 相对较低,一般介于 193~332 $\Omega \cdot \text{m}$ 之间。

DJ _{ρ_2} 异常对应地质体可能为:① 颗粒较细、成岩不好、空隙发育的正常沉积建造地层区;② 成岩不好、空隙发育的降落式火山碎屑沉积建造地层区;③ 受后期构造作用破碎严重裂隙发育的地质体。对比 1:10 000 地质图可知,区内地表出露的岩性为:侏罗系满克头鄂博组流纹岩(J_{3mk λ})、侏罗系满克头鄂博组凝灰岩(J_{3mk stf})、侏罗系满克头鄂博组珍珠岩(J_{3mk $\nu\lambda$})、侏罗系满克头鄂博组酸性凝灰岩(J_{3mk stf}),并非单一沉积建造地质体,且熔岩形成的地质体大面积分布。这些岩石组合不可能形成与围岩接触界线如此规则明晰,规模如此之大的平稳 ρ_s 异常区。这就说明地质体形成后期,又有火山塌陷作用于 DJ _{ρ_2} 异常区,致使区内地质体广度、深度严重破碎,其裂隙不同程度含水,形成视电阻率大面积较低。该低阻断陷盆地,分布面积大,与围岩呈突变接触界线明晰。对比图 4、5 可知,DJ _{ρ_2} 异常区与 C₁₃ 异常区范围基本相吻合,磁测、电测反映的破火山口断陷盆地相契合,进一步证明了该破火山口断陷盆地的客观存在性。而图 5 所示的 DJ _{ρ_{2-1}} 、DJ _{ρ_{2-2}} 次级异常对应地质构造为次火山岩侵入体。破火山口断陷盆

地形成后期,火山再次活动,岩浆沿裂隙上升,由于动力不足无法喷出,侵入其间形成侵入体。与早期塌陷作用形成的地质体相比较,致密程度相对较高完整性相对较好,故视电阻率相对较高。

4.2.2 面积性测量 η_s 异常特征

按各异常独立圈闭等值线下限值圈定普查区 η_s 异常区四处,编号为:DJ₁、DJ₂、DJ₃、DJ₄,见图 6。限于篇幅,仅就矿床赋存区异常 DJ₄ 特征进行如下解释。

DJ₄ 异常面状分布以下限值 1.5%(图 6 中黄色区域)独立圈闭,呈次级叠加状态,由 3 处次级异常叠加而成:DJ₄₋₁ 次级异常波曲转折整体带状分布,呈次级叠加状态由多处次级异常组合而成,各次级异常多以豆莢状产出,长轴顺势取向,支离破碎星散分布。按独立圈闭等值线上限值 1.8% 圈定,北侧约长 3.0 km,南侧长约 2.6 km,总体长 5.6 km。异常强度总体较弱,除个别突变点外, η_s 介于 1.8%~3.0% 之间;DJ₄₋₂ 次级异常团块状分布欠规则,呈次级叠加状态由多处次级异常组合而成。各次级异常以透镜状或点豆状产出,长轴近 SN 取向,蜂房状集群分布。异常相对较强, η_s 介于 2.1%~4.5% 之间。按各次级异常公共圈闭等值线上限值 2.1% 圈定,分布面积约 2.5 km²;DJ₄₋₃ 次级异常呈次级叠加状态由多处次级异常组合而成,各次级异常以点豆状产出,串珠状稀疏排列,构成带状环形分布,按公共圈闭等值线上限值 1.8% 圈定,环带外环长约 6.2 km,内环长约 4.2 km。

DJ₄ 背景异常呈面状分布,表明场源物质产状较缓裂隙均匀分布,其可能与熔岩流活动密切相关。DJ₄₋₁ 次级异常处于 DJ _{ρ_2} 异常对应的断陷盆地内,坐标线 5 100 000 两侧异常走向转折表明,极化地质体形成后期又有构造作用其上,产生平移错动致使走向转折。异常波曲转折支离破碎星散分布相互叠加

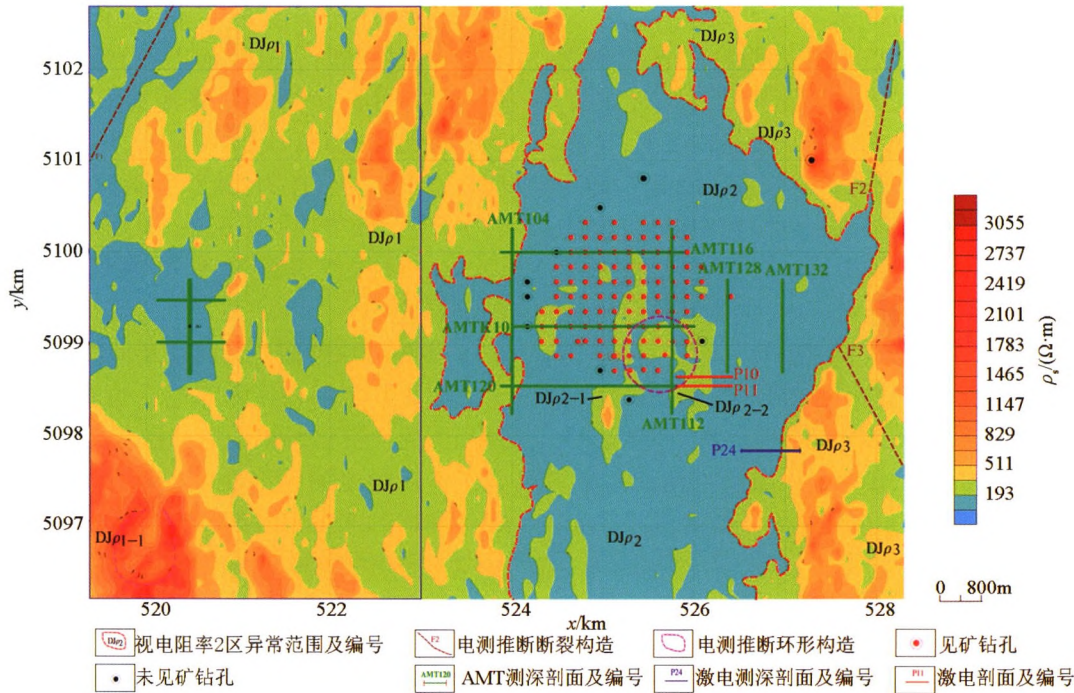


图 5 复兴屯 1 区银铅锌多金属矿普查时间域激发极化法测量 ρ_s 等值线平面 (1:10 000)

Fig.5 ρ_s conntour map from time-domain IP survey in Section 1 of Fuxingtun silver-lead-zinc polymetallic deposit (1:10 000)

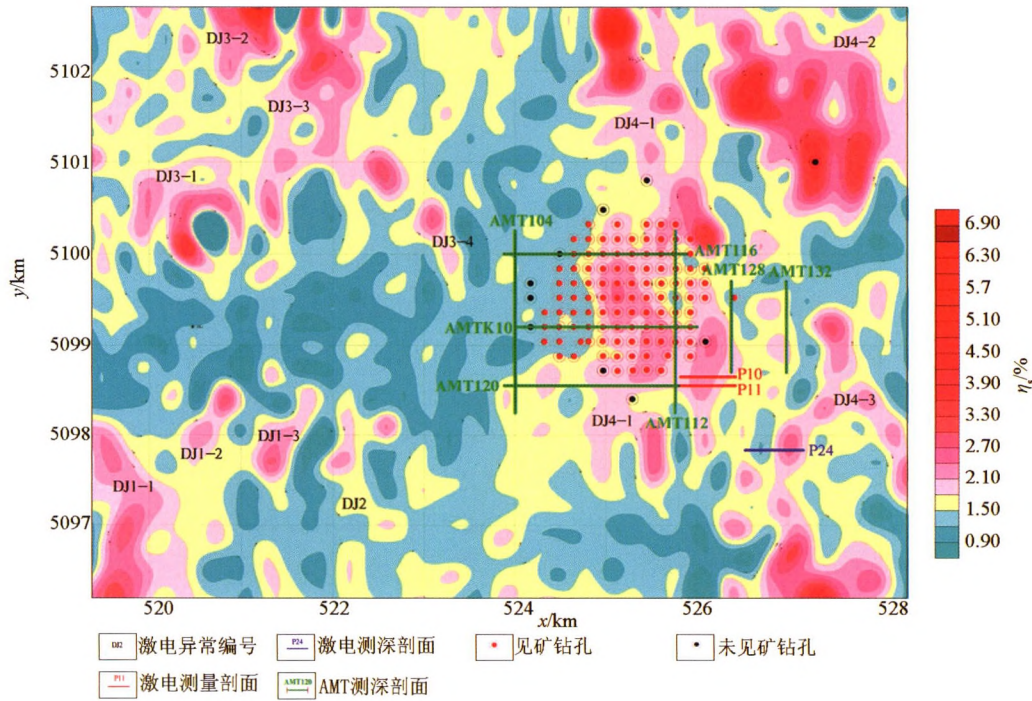


图 6 复兴屯 1 区银铅锌多金属矿普查时间域激发极化法测量 η_s 等值线平面 (1:10 000)

Fig.6 η_s conntour map from time-domain IP survey in Section 1 of Fuxingtun silver-lead-zinc polymetallic deposit (1:10 000)

这一特征表明,对应极化地质体由多期次构造与热液作用形成。依据地电异常特征与地质环境及构造环境分析,该异常的场源为沿裂隙充填的硫化物。

对比 1:10 000 地质图可知, DJ_{4-1} 次级异常区地表出露的岩性为:侏罗系满克头鄂博组流纹岩 ($J_3mk\lambda$)、侏罗系满克头鄂博组珍珠岩 ($J_3mkv\lambda$)、侏罗系玛尼

吐组英安质凝灰岩($J_3mn\zeta tf$)。

DJ_{4.2}次级异常团块状分布,表明异常的产出受控于某一地质构造。对比 ΔT 正则化滤波异常可知,该异常处于断陷盆地东侧的火山机构之上,异常的形成与火山热液密切相关。岩浆多次溢流形成层间裂隙,热液携带场源物质在层间裂隙中运移,场源物质沉淀其间形成异常场源体。对比 ρ_s 等值线图可知,DJ_{4.2}异常处于 DJ_{p3}异常区内,主值区对应视电阻率值相对较高,介于 $352\sim 1\,310\,\Omega\cdot m$ 之间,这一特征表明异常对应地质体相对较致密完整。依据地电异常特征与地质环境及构造环境分析,该异常的场源为硫化物。对比 1:10 000 地质图可知,DJ_{4.2}次级异常区,地表出露岩性为侏罗系玛尼吐组流纹岩($J_3mn\lambda$)。

DJ_{4.3}次级异常对应为产于火山颈周围的环带状裂隙构造,以构造透镜体的形式表现出来,受控于旋扭转动构造。对比 ρ_s 等值线平面图可知,该异常左翼紧邻破火山口断陷盆地东缘,右翼与 F_{D3}断裂重合。环内视电阻率相对较高, ρ_s 介于 $352\sim 1\,147\,\Omega\cdot$

m 之间。表明该异常所在火山机构,发生坍塌后,又有熔岩充填其间。依据地电异常特征与地质环境及构造环境分析,该异常的场源为沿裂隙充填的硫化物。对比 1:10 000 地质图可知,DJ_{4.3}次级异常区对应地表出露的岩性为:侏罗系满克头鄂博组流纹岩(J_3mktf)、侏罗系满克头鄂博组酸性凝灰岩(J_3mkstf)、侏罗系满克头鄂博组流纹质凝灰岩($J_3mk\lambda tf$)。

4.3 激电测深断面异常特征及地质解释和验证

为了判定勘查区深部地质构造情况,查明火山颈周围的环带状裂隙构造和次火山岩充填构造,布设了 1 条激电测深剖面 P24 和 2 条激电测量剖面 P10 和 P11,平面位置如图 5 和图 6。

4.3.1 激电测深断面 ρ_s 异常和 η_s 异常特征

激电测深,采用温纳装置。接收机测量延时选为 200 ms,取样脉宽选为 40 ms,迭加次数为 1 次。供电采用双向短脉冲方式,供电周期 32 s 占空比为 0.5。最大极距时,供电电流不小于 8 500 mA。点距 40 m,极距排列如表 3。

表 3 激电测深温纳装置电极距排列

Table 3 Electrode array settings for IP sounding with Wenner arrangement

(AB/2)/m	3	4.5	6.9	10	15	21	30	42	57	78	105
(MN/2)/m	1	1.5	2.3	3.3	5	7	10	14	19	26	35
(AB/2)/m	141	189	252	336	450	600	798	1050	1386	1830	
(MN/2)m	47	63	84	112	150	200	266	350	462	610	

ρ_s 异常特征:测深断面如图 7,P24 线断面内阶梯异常等值线密集构成梯度带,由左至右递增上升贯穿于整个断面。按各阶梯台阶内阶角连线确定,向西倾,倾角 48° 。 ρ_s 值介于 $152\sim 302\,\Omega\cdot m$ 之间。梯度带左侧,异常平缓场值低大范围面状分布, ρ_s 介于 $122\sim 152\,\Omega\cdot m$ 之间。梯度带右侧,解释深度 59~300 m 之间,异常西倾等值线上密下疏总体带状分布, ρ_s 值介于 $332\sim 572\,\Omega\cdot m$ 之间。

η_s 异常特征:P24 线 η_s 异常特征如图 7,断面内以梯级包络带($0.5\leq\eta_s$ 等值线 $\leq 1.4\%$)为界线,划分出左右两处异常。左侧异常位于解释深度 44~127 m 之间 94 号点左侧,以下限值 1.7%圈定,变化平缓近水平带状分布;右侧异常,以下限值 1.7%独立圈闭,呈次级叠加状态由多处次级异常组合而成。左翼由深到浅、由左至右呈 12 级阶梯状递变分布,斜向贯穿于整个断面,包络带附着其上,右翼各次级异常多以条带状产出近垂向延伸,分布于阶梯级间结合部。异常总体产状相对较陡,按各阶梯外阶角连线确定,向西倾,倾角 47° 。

4.3.2 激电测深断面地质解释与验证

P24 测深断面 ρ_s 异常特征表明该断面横切断陷盆地过渡带及其外边区。梯度带左侧为断陷盆地分布区(与正则化滤波推测的破火山口断陷盆地相吻合),火山大量喷发致使岩浆房空虚,间歇期冷凝收缩,环绕火山颈形成同心状环形断裂群,成体系由内向外扩展分布。由于支承物缺失,在重力作用下断块顺环状裂隙面由内至外,向火山颈方向滑走塌陷。中央区呈漏斗状向下凹陷。边缘带由左至右步步升高形成单边阶梯状断层构造,断层面向西倾,对应于异常梯度带。盆地内 ρ_s 场值低大范围均匀分布,表明滑塌于盆地中的地质体严重碎裂。该盆地断陷较深,西侧未封闭;梯度带右侧为盆地外边区,其浅部地质体主要由岩浆喷溢地表形成。 η_s 异常特征表明,44~127 m(解释深度)之间 94 号点左侧近水平分布的异常带,其场源为分布于熔岩盖层层间裂隙中的硫化物,梯级包络带右侧,硫化地质体的产出受控于阶梯状断层构造,分布于盆地边缘阶梯状断层带及右侧外边区,形成机理为热液携带硫化

物沿断层滑脱面上升沉淀于附近的裂隙之中。硫化地质体产状陡延深大,底部 620 m(解释深度)处未封闭。

对比 ρ_s 等值线平面图可知,该剖面 108 号点左侧处于断陷盆地内,右侧处于断陷盆地东侧外边区。对比 η_s 等值线平面图可知,该断面落于 $DJ_{4.3}$ 环带异常之上。该断面 108 号点经 ZK4401 孔进行钻探验证,其结果与测深推断相匹配。深度 7.4~104.99 m 段岩性主要为铁锰矿化含角砾凝灰岩,成分主要为角砾、岩屑、晶屑,其中 66.58~67.54 m 段矿化强烈,

Zn 品位 0.5%;104.99~187.8 m 段岩性为含角砾凝灰岩,成分主要为流纹岩、流纹质凝灰岩;187.8~199.21 m 段岩性为叶蜡石化含角砾凝灰岩,成分主要为流纹岩;199.21~288.18 m 段岩性为含角砾岩屑晶屑熔结凝灰岩,成分主要为流纹岩、凝灰岩;288.18~371.25 m 段岩性为角砾岩,成分主要为流纹岩、安山岩;221.81~243.18 m 段零星可见铅锌矿化;223.27~258.57 m 段见黄铁矿化;130.8~131.63 m 之间岩石破碎。

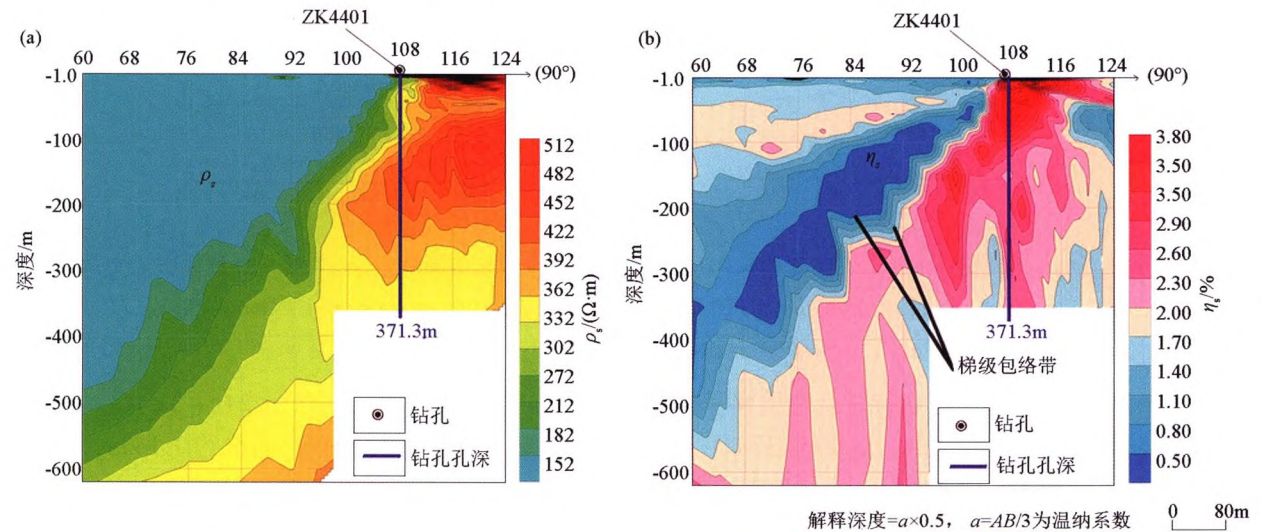


图 7 复兴屯 1 区银铅锌多金属矿普查 P24 线时间域激发极化法测深(温纳装置) ρ_s 、 η_s 等值线断面 (1:5 000)

Fig.7 ρ_s and η_s contour map of time-domain IP sounding(Wenner arrays) along profile 24 in Section 1 of Fuxingtun silver-lead-zinc polymetallic deposit (1:5 000)

4.4 剖面激电测量异常特征及地质信息简析

激电剖面测量,采用中间梯度装置主剖面观测。接收机,测量延时选为 200 ms,取样脉宽选为 40 ms,迭加次数为 1 次。供电采用双向短脉冲方式,供电周期 32 s,占空比为 0.5。AB=1 200 m,MN=40 m,点距 20 m,供电电流一般不小于 5 200 mA。

4.4.1 P10 剖面激电异常特征及地质解释

ρ_s 异常特征:剖面内 140 号点左侧,曲线高低相间锯齿状大振幅跳变, ρ_s 值介于 146~478 $\Omega \cdot m$ 之间。143 号点右侧,曲线缓速下降,场值介于 79~155 $\Omega \cdot m$ 之间。具体见图 8。

η_s 异常特征:剖面内 η_s 异常呈梯形分布,顶部曲线锯齿状大幅跳变,左翼曲线由负(相对)至正二级阶梯状递变上升,右翼曲线渐变下降拐折拖尾至远。极大值分别为:2.2%、2.3%、2.16%,按剖面内异常统计背景值 1.4 计算,净异常极大值分别为:0.8%、0.9%、0.76%。具体见图 8。

地质解释:剖面 ρ_s 异常特征表明 140 号点左侧

区段,地质体完整、破碎相间分布,即断裂构造成群出现阵列式分布;140 号点右侧区段,地质体由西至东碎裂程度渐变增强;对比 ρ_s 等值线平面图可知,P10 剖面处于断陷盆地中央区。剖面 η_s 异常特征表明 134 号点左侧,极化地质体多期次产出,叠加复杂的构造因素;108~112 号点之间, η_s 异常与 ρ_s 异常反向增、减变化,表明断裂形成后,又有场源物质沉淀其间,致使 η_s 异常增强;117~122 号点之间 η_s 异常与 ρ_s 异常同向减、增变化,表明极化地质体形成后,又有地质构造作用使其破碎,导致 η_s 异常场值下降;138 号点右侧,极化地质体产于高、低阻(相对)异常对应地质体的接触带。依据地电异常特征及地质环境构造环境分析,极化地质体场源物质为充填于构造裂隙之中的硫化物。对比 η_s 平面等值线图可知,该剖面落于 $DJ_{4.1}$ 异常之上。对比地质剖面 and 化探土壤测量剖面可知,地表出露岩性主要为侏罗系满克头鄂博组流纹质凝灰岩($J_3 mkltf$),剖面内 η_s 异常段有 Co 元素异常大范围分布,表明地幔

热液沿火山颈上行分布于地表附近。

4.4.2 P11 剖面激电异常特征及地质解释

ρ_s 异常特征和 η_s 异常特征如图 8, 136 点左侧, η_s 异常高低相间锯齿状大振幅频繁跳动, 136 点右侧, 异常由左至右阶梯状小幅递减缓变下降。极大值分别为: 2.2%、2.9%、2.4%、2.2%、1.5%, 按剖面内

异常统计背景值 1.3 计算, 净异常极大值分别为: 0.9%、1.6%、1.1%、0.9%、0.2%。 ρ_s 异常特征与 η_s 异常形态相仿并行分布。P11 剖面地质解释与 P10 剖面相类似, 推断 P11 剖面处于断陷盆地中央区, 地幔热液沿火山颈上行分布于地表附近。

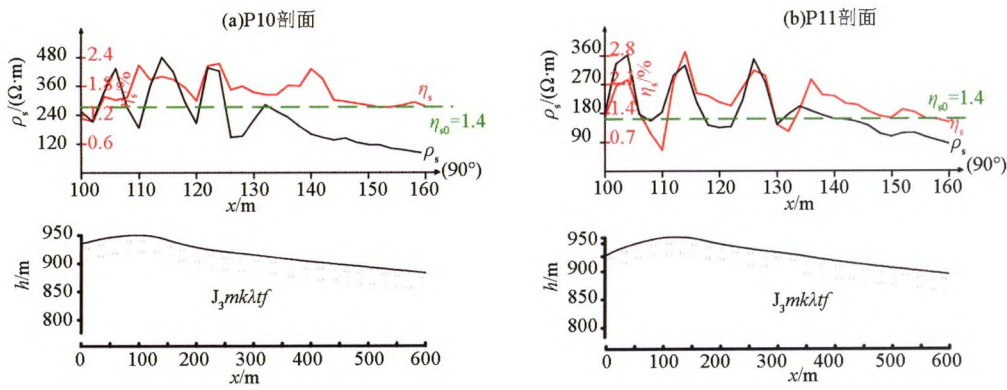


图 8 复兴屯 1 区银铅锌多金属矿普查 P10、P11 剖面时间域激发极化法测量 η_s 、 ρ_s 、地质综合剖面图 (1:2 000)

Fig.8 η_s and ρ_s of time-domain IP and the geological section along profile P10and P11 in Section 1 of Fuxingtun silver-lead-zinc polymetallic deposit (1:2 000)

4.5 AMT 测深等深度 ρ_s 异常特征及地质解释

为了圈定地下一定深度上的地质构造和目标地质体展布情况, 围绕核心勘查区布设了 3 横 4 纵的 7 条大地电磁 (AMT) 测深剖面 (见图 2、4、5、6), 点距 100 m。通过空间插值得到随深度变化的深部视电阻率 ρ_s 的三维空间分布, 也就是通过组合剖面, 实现探查深部剖面电性结构分布的目的, 进而推断和圈定深部隐伏构造和含矿地质体。

4.5.1 地下 630 m 等深度 ρ_s 异常特征与地质解释

对剖面视电阻率进行插值处理, 得到地下空间三维视电阻率分布, 从而可以分析不同深度上电性分布与变化情况。在地下 630 m 的平面内, 基于视电阻率等值线图, 圈定视电阻率异常四处, 编号分别为: D₁、D₂、D₃、D₄, 见图 9 中 630 m 等深度图。异常特征简述如下:

D₁ 异常较规则半环带分布, 场值相对较高, ρ_s 介于 352~611 $\Omega \cdot m$ 之间, 内侧等值线密集构成梯度带与 D₃ 异常呈陡梯度接触, 界线明晰。按 325 $\Omega \cdot m$ 等值线圈定, 半环长约 5.9 km, 平均宽约 0.34 km, 面积约 2.0 km²。D₁ 异常对应地质体为次火山岩环状侵入体。破火山口断陷盆地形成后期, 火山再次活动, 岩浆沿环状断裂上升, 侵入其间形成该环状侵入体。与早期塌陷作用形成的地质体相比较, 致密程度高完整性好, 故视电阻率相对较高。

D₂ 异常独立圈闭呈椭圆状近 SN 向展布, 场值

由内向外渐变增大, ρ_s 介于 241~315 $\Omega \cdot m$ 之间。按 315 $\Omega \cdot m$ 等值线圈定, 周长约 1.1 km, 分布面积约 0.1 km²。D₂ 异常对应于岩带之上的寄生火山颈。

D₃ 异常 (图 9 中 630 m 等深度图中央蓝色区域) 环带状产出, 场值较低, ρ_s 介于 130~278 $\Omega \cdot m$ 之间, 叠加两处次级异常, 总体形态欠规则, 大致 SN 向展布, 局部向东拉长。两次级异常分别以点豆状、豆荚状产出, 离散分布。按 278 $\Omega \cdot m$ 等值线圈定, D₃ 异常外环周长约 5.8 km, 分布面积 1.7 km²。D₃ 异常对应地质体为破火山口断陷盆地形成过程中, 塌陷于火山颈及周围的破碎堆积物, 其视电阻率较低是因碎裂严重的反映。

D₄ 异常叠合于 D₃ 异常之内, 椭圆状产出, 长轴 NW—SE 向延伸, 形态较规则, 呈同心状轴对称镜像分布, 等值线较稀疏。场值较高, ρ_s 介于 278~389 $\Omega \cdot m$ 之间。278 $\Omega \cdot m$ 等值线圈定周长约 1.5 km, 分布面积约 0.17 km²。D₄ 异常对应地质体为 650 m 深度处, 封堵于破火山口漏斗中的火山塞, 为后期岩浆喷发熔岩流回流于破火山口漏斗所致。

4.5.2 不同等深度 ρ_s 异常对比解释

图 9 给出了 120、630、1 550 和 2 050 m 深度视电阻率值的变化情况。由图可见, 在深度为 120 m 时, 630 m 处的低阻区域不存在, 而被高阻地质体取代。这一特征说明, 岩浆沿环状裂隙上行, 喷溢于地表形

成火山熔岩流盖层,流入破火山口漏斗,厚度增大形成火山塞,总体蘑菇状分布,对早期的破火山口进行封堵,构成 120 m 等深度异常的场源体;未喷出地表的同源岩浆在地下形成次火山岩侵入体。对比工作区 1:10 000 地质图(图 1)可知,地表出露侏罗系满克头鄂博组熔岩流形成珍珠岩($J_3mkv\lambda$)和流纹岩($J_3mk\lambda$)、凝灰岩(J_3mktf),佐证了这一推断结论。

对比图 9 中 630、1 550、2 050 m 3 个等深度 ρ_s 异常图可知,该环状次火山岩侵入体垂向延深大且呈筒状分布,深度至 2 050 m 处未见收敛迹象,只是纵横向范围收缩。随着深度增大,包围其间的火山塞尖灭,但破火山颈相依然存在,只是其间地质体致密程度相对提高。

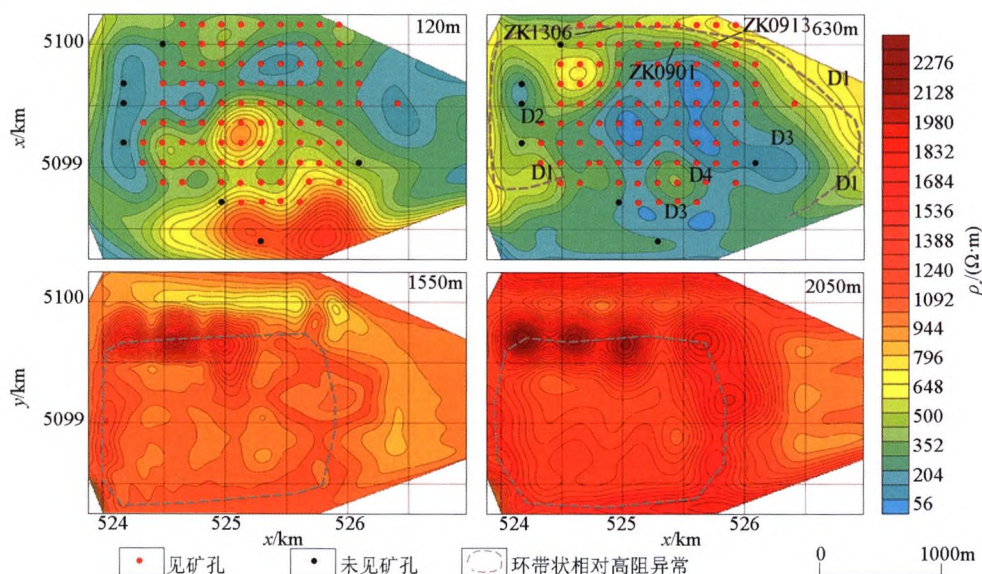


图 9 复兴屯 1 区银铅锌多金属矿普查 AMT 测深 120、630、1 550、2 050 m 等深度 ρ_s 等值线综合平面(1:5 000)

Fig.9 ρ_s contour map at the depth of 120 m, 630 m, 1 550 m and 2 050 m of AMT survey in Section 1 of Fuxingtun silver-lead-zinc polymetallic deposit (1:5 000)

4.5.3 关于岩筒推断结论的钻孔验证

勘查区的钻探结果,也验证了上述推断。如图 9 所示,钻探揭示出岩筒较浅处以喷溢相流纹岩形式存在,较深处以次火山岩侵入体形式存在。铅锌矿化普遍且延深大,说明该岩筒接近矿源,这也为矿床成因认识提供了环境依据。下面给 3 个典型钻孔验证结果。

ZK0901 钻孔:123.5~247.37 m 段岩性为流纹质熔结凝灰岩;250.13~310.84 m 段岩性为流纹质火山角砾岩;447.8~526.6 m 段岩性为铅锌矿化流纹质火山角砾岩;635.5~675.59 m 段岩性为霏细岩;675.59~992.14 m 岩性为铅锌矿化晶屑岩屑角砾凝灰岩,局部夹杂霏细岩,铅锌矿化极普遍。

ZK0913 钻孔:68.11~194.01 m 段岩性为火山角砾岩,成分为流纹岩、安山岩、凝灰岩存在不连续铅锌矿化;194.01.13~244.84 m 段岩性为铅锌矿化碎屑状流纹岩;370.32~557.16 m 段岩性为弱黄铁矿化、铅锌矿化火山角砾岩,成分为流纹岩、凝灰岩、少量英安岩;594.57.5~696.9 m 段岩性为铅锌矿化火山角砾岩,成分为流纹岩、凝灰岩、英安岩,铅锌矿化

普遍;717.94~860.40 m 段岩性为铅锌矿化火山角砾岩,成分为流纹岩、凝灰岩、凝灰熔岩,局部夹霏细岩,连续铅锌矿化;957.4~1 014.40 m 段岩性为铅锌矿化火山角砾岩,成分为流纹岩、凝灰岩,连续铅锌矿化;1 073.3~1 079.8 与 1 089.62~1 097.31 m 段岩性为石英二长斑岩;1 097.31~1 103.41 m 段岩性为霏细岩。

ZK1306 钻孔:18.08~29.65 m 段岩性为铁锰矿化流纹岩;456.32~466.43 m 段岩性为弱铅锌矿化含角砾凝灰岩;466.43~530.78 m 段岩性为含角砾凝灰岩,角砾成分为流纹岩;594.19~747.57 m 段岩性为弱铅锌矿化含角砾岩凝灰岩,角砾成分为流纹岩,铅锌矿化普遍;717.94~860.40 m 段岩性为含角砾岩凝灰岩,角砾成分为流纹岩,多处铅锌矿化;906.1~1 023.83 m 段岩性为含角砾熔结凝灰岩,角砾成分为流纹岩,铅锌矿化较普遍。1 023.83~1 035.09 m 段岩性为石英二长斑岩。1 035.09~1 054.23 m 段岩性为弱铅锌矿化含角砾凝灰岩,角砾成分为安山岩。

3 个钻孔验证结果共同点为:碎屑成分主要为流纹岩,铅锌矿化普遍且延深大,赋矿介质主要为含

流纹岩角砾凝灰岩。ZK0913、ZK1306 钻孔 1 000 m 深度以下均见到石英二长斑岩, ZK0901、ZK0913 钻孔 800 m 深度以上均见到厚度不同的霏细岩, 其成分相当于花岗岩。

4.5.4 基于电测深成果的矿床构造认识

综合上述关于地下电性分布的测深结果, 我们可以认为, 复兴屯 1 区破火山口断陷盆地大面积分布, 以低阻形式呈现, 与围岩呈单边阶梯状断层过渡相接。形成过程中的地质体垂向滑走塌陷机理, 与欧洲侏罗山滑脱构造相似^[2]。由于断块自身向下拉伸, 上部推挤压迫, 致使某些地质体局部塑性变形隆起褶曲; 局部折断产状突变, 造成图 3 中流纹岩碎块产状倒转, 顺钻孔轴线直立分布的现象。2018 年 9 月, 陈毓川院士来普查区工作, 在岩心上观察到滑脱构造, 他认为勘查区主要为滑脱构造控矿。断陷盆地形成后, 地质构造多期次活动, 对早期形成的硫化地质体进行改造, 有的进行叠加(如 P10 剖面), 有的产生破坏(如 P11 剖面), 总体表现出硫化物多期次沉淀特征。火山再次活动沿环状裂隙上行, 喷溢地表形成蘑菇状盖层, 未喷出部分形成延深巨大的次火山岩岩筒侵入体。

5 矿床成因的探讨

由上述物探和钻探结果得知, 矿床产于破火山口断陷盆地, 环绕盆地四周火山机构呈蜂房状分布。这一格局说明区内曾经火山频繁活动, 为矿床的形成提供了充分的物质来源。盆地形成过程中, 断块滑塌跌落又相互碰撞致使地质体严重碎裂杂乱堆积, 构成断陷盆地内丰富繁杂的裂隙构造, 为矿床的形成提供了热液运移的良好通道与成矿物质沉淀的广阔空间。破火山口断陷盆地形成后, 初始喷发状态的火山通道被封堵, 当火山再次活动, 岩浆有选择地沿着结构疏散源距最短的环状裂隙上升, 喷溢地表时形成蘑菇状火山塞, 对早期形成的破火山口进行封堵。未喷出地表的岩浆, 在地下形成延深巨大, 环绕原火山颈的次火山岩岩筒侵入体(ZK0913 钻孔在 1 073.3~1 079.8 m 与 1 089.62~1 097.31 m 段见石英二长斑岩, ZK1306 钻孔在 1 023.83~1 035.09 m 段见石英二长斑岩), 既为矿床形成提供了丰富的物质来源, 又封闭成矿物质的分散流失。包围其间的断陷区块, 裂隙繁杂发育, 提供了足够的储矿空间。岩筒四周合围顶部火山塞封堵, 形成下端单向可入的完美成矿环境。另外, 岩筒范围内化探 Co 元素剖面异常大范围高值分布, 表明成矿热液来自

于地幔深处。

该矿床规模大, 矿体多以细脉侵染状产出, 说明赋矿地质体裂隙丰富细小, 远区成矿几率甚小。勘探深度范围内矿床近等轴状分布, 表明环境封闭成矿物质近源提供。见矿钻孔区域分布呈圆形(图 9), 说明矿床平面内纵横向生长局限于圆形岩筒包围的范围内。这一事实说明, 矿床的产出空间受控于岩筒, 成矿物质的来源与次火山岩岩筒的侵入活动密切相关。起初, 深处岩浆携带含矿热液沿原始通道上行, 当遇到破火山口断陷盆地底部时, 改变运行通道, 沿着环状裂隙上行, 岩浆冷凝析离形成岩筒侵入体, 热液携带成矿物质沉淀于裂隙之中形成热液型矿床。成矿物质沿两个方向沉淀成矿: ① 沉淀于环状岩筒及火山塞中的原生裂隙成矿; ② 沉淀于岩筒包围的断陷区块中的裂隙成矿。

因此可以认为, 该矿床为受控于酸性次火山岩岩筒侵入活动的斑岩型矿床。成矿物质主要由岩浆的环状侵入活动提供, 成矿空间主要由滑脱作用产生的裂隙提供。矿床规模巨大, 与岩筒四周合围顶部火山塞封堵近源成矿密切相关。

6 结论与建议

6.1 结论

复兴屯银铅锌多金属矿, 隐伏于破火山口断陷盆地, 成矿物质主要来源于次火山岩侵入活动。矿床赋存区, ΔT 场量低表现为平稳缓变的面状负异常, 激电异常具有低视电阻率相对高视极化率特征。矿床的形成与火山活动密切相关, 寻找该类矿床, 核心问题是圈定火山岩带中的破火山口断陷盆地, 工作思路如下。

6.1.1 找矿远景区选择

火山岩带的产出受控于区域性深大断裂构造, 其基本构成要素为火山机构、破火山口断陷盆地(火山机构塌陷形成)、次火山岩侵入体。磁异常特征总体呈次级叠加状态, 场值离散跳变正负相间, 规模巨大带状展布。完整的火山机构, 锥体堆积巨大, 颈相下延巨深。是所谓的有“根”磁性地质体, 可产生场量较强规模较大的磁异常, 这一特征其他地质体不具备。当岩浆房空虚火山机构塌陷便形成破火山口断陷盆地, 由于破碎去磁场量极其微弱, 致使异常平稳缓变, 近椭圆状面形分布(火山中心式喷发塌陷时)或裂谷式带状分布(火山裂隙形喷发塌陷时)。基于上述特征, 成矿远景区可通过航磁资料来圈定。选择环带状相对高值磁异常(绝对值)包

围的平缓面状磁异常区(可初步判定为破火山口断陷盆地)作为成矿远景靶区,如图 10 中红色虚线圈定的范围。

6.1.2 预查工作区筛选确定

成矿远景区内,地表既有矿化蚀变现象又有化探异常存在,可确定为预查找矿靶区。对于大面积沉积建造覆盖的盆地,可以盆缘矿化蚀变与化探异常共同存在确定预查找矿靶区。

6.1.3 工作部署及方法选择

在预查找矿靶区,首先开展地面高精度磁测,通过数据处理判断断陷盆地构造特征;在火山“漏斗”或火山“塞”分布区域开展面积性激电测量,了解硫

化物地质体分布特征,筛选低阻硫化物地质体;在此基础上,开展 AMT 测深,了解深部控矿构造,选择工程验证靶区;进而布置时间域激电剖面测量、激电测深,为钻探工程验证提供较客观的依据。

6.2 建议

找矿工作的关键点在于靶区选择。本文所述的此类矿床矿源深度大,多属于隐伏矿床,地表多为表象因素,因此在找矿预查阶段与普查前期,要依靠物探方法确定靶区和了解深部构造。靶区应选择相对完整的断陷盆地,包含盆缘及一定的盆地外边带。激电测深应采用温纳装置,以获取较好的观测精度与较高的垂向分辨率和较大的探测深度。

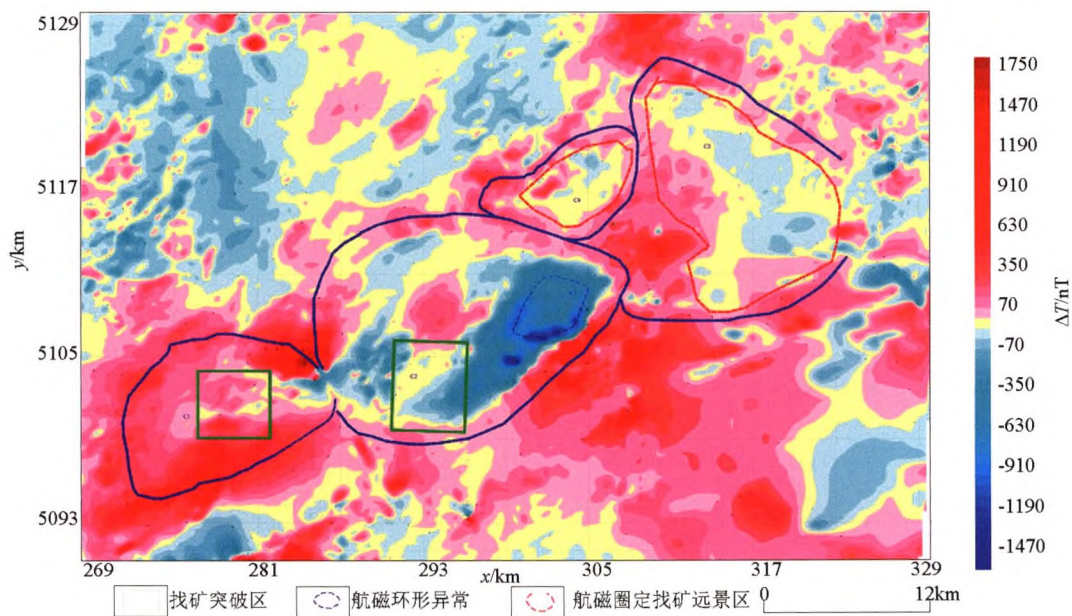


图 10 科尔沁右翼前旗复兴屯一带航磁 ΔT 化极等值线平面 (1:50 000)

Fig.10 RTP Map of ΔT of ground magnetic survey in Fuxingtun area, Youyi-qianqi of Kerqin (1:50 000)

致谢:中国地质调查局发展研究中心张明华教授、张盛高工为本文的撰写给予了指导,审稿专家提出的修改建议精练了文章并提升了效果,内蒙古国土资源勘查开发院(前内蒙古物化探队)为本文研究提供了相关资料,在此深表感谢。

参考文献 (References):

- [1] 徐夕生,邱检生.火成岩岩石学[M].北京:科学出版社,2010.
Xu X S, Qin J S. Igneous petrology[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [2] 刘德良,沈修志,陈江峰,等.地球与类行星构造地质学[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2009.
Liu D L, Shen X Z, Chen J F, et al. Structure geology of the earth and planetoid[M]. Hefei: China Science and Technology University Press, 2009.
- [3] 管志宁.地磁场与磁力勘探[M].地质出版社,2005.
Guan Z N. Geomagnetic field and magnetic exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.
- [4] 张明华,王成锡,黄金明,等.重磁电数据处理解释软件系统 RGIS[M].北京:地质出版社,2011.
Zhang M H, Wang C X, Huang J M, et al. Gravity magnetic and electrical exploration data processing and interpretation software RGIS[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.
- [5] 郭良辉,孟小红,石磊,等.优化滤波方法及其在中国大陆布格重力异常数据处理中的应用[J].地球物理学报,2012,55(12):4078-4088.
Guo L H, Meng X H, Shi L, et al. Preferential filtering method and its application to Bouguer gravity anomaly of Chinese continent [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55 (12): 4078 - 4088.
- [6] Pierre K, Nicolas P. Use of non-linear filtering for the regional-residual separation of potential field data[J]. Journal of Applied Geophysics, 2011, 73(4): 315-322.
- [7] 杨辉,文百红,戴晓峰,等.火山岩油气藏重磁电震综合预测方法及应用[J].地球物理学报,2011,54(2):286-293.

- Yang H, Weng B H, Dai X F, et al. Comprehensive predication of hydrocarbon deposits in volcanic rock by gravity, magnetic, electrical and seismic data and its application[J]. Chinese Journey of Geophysics, 2011, 54(2): 286–293.
- [8] 张东风, 柳建新, 谢维. 激电测深法在非洲刚果(金)某铜钴矿区的勘查应用[J]. 地质与勘探, 2010, 46(4): 664–669.
- Zhang D F, Liu J X, Xie W. Application of IP sounding method to exploration of a copper-cobalt deposit in Congo(DRC)[J]. Geology and Exploration, 2010, 46(4): 664–669.
- [9] 郭继颂, 李达, 刘志远, 等. 大功率激电在承德槽子沟金矿勘查中的应用[J]. 资源调查与环境, 2012, 33(3): 168–174.
- Guo J S, Li D, Liu Z Y, et al. Application of high-power induced polarization for gold deposit in Caozigou, Chengde [J]. Resource Investigation and Environment, 2012, 33(3): 168–174.
- [10] 马一行, 颜廷杰, 何鹏, 等. 激发极化法在覆盖区矿产勘查中的应用——以内蒙古昌图锡力锰银铅锌多金属矿勘查为例[J]. 物探与化探, 2019, 43(4): 709–717.
- Ma Y X, Yan T J, He P, et al. Exploration in coverage area: A case study of the Changtuxili Mn-Ag-Pb-Zn polymetallic ore deposit, Inner Mongolia [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(4): 709–717.
- [11] 何鹏, 张跃龙, 苏航, 等. 综合找矿方法在内蒙古昌图锡力锰银铅锌矿勘查中的应用[J]. 地质与勘探, 2018, 54(3): 501–511.
- He P, Zhang Y L, Su H, et al. Application of the integrated ore-prospecting method in the Changtuxili Mn-Ag-Pb-Zn deposit, Inner Mongolia [J]. Geology and Exploration, 2018, 54(4): 501–511.
- [12] 郑全波, 苏航, 何鹏, 等. 内蒙古昌图锡力地区锰银铅锌多金属矿的找矿标志[J]. 地质调查与研究, 2019, 42(1): 39–46.
- Zheng Q B, Su H, He P, et al. The prospecting criteria of Mn-Ag-lead-zinc polymetallic ore in Changtuxili area of Inner Mongolia [J]. Geological Survey and Research, 2019, 42(1): 39–46.
- [13] 范剑, 邱小波, 李毅, 等. 西秦岭国安寺—白杨沟地区高精度磁测异常特征及找矿远景分析[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(6): 2436–2443.
- Fan J, Qiu X B, Li Y, et al. Characteristics of ground magnetic anomalies and exploration perspective analysis in Guo'an temple-Baiyanggou area of west Qinling [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(6): 2436–2443.
- [14] 邓居智, 郑燕青, 陈辉, 等. 多种频率域电磁法在冷水坑矿集区的应用效果对比[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(6): 2510–2520.
- Deng J Z, Zheng Y Q, Chen H, et al. Comparison of various frequency-domain electromagnetic methods for mineral exploration in Lengshuikeng ore-concentration area [J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(6): 2510–2520.
- [15] 焦彦杰. 西藏扎西康铅锌银矿床含矿走滑断裂地球物理特征及找矿方向[J]. 地质找矿论丛, 2016, 31(3): 434–439.
- Jiao Y J. Geophysical characteristics of strike-slip fault in exploration for Lead-Zinc-Silver deposits [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2016, 31(3): 434–439.
- [16] 李富, 刘鑫明, 廖国忠, 等. 地面高精度磁测和电磁测深在矿产调查中的应用[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(1): 427–433.
- Li F, Liu X M, Liao G Z, et al. High resolution magnetic survey and electromagnetic sounding for mineral resource exploration [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(1): 427–433.

Application of geophysical methods in the exploration of Fuxingtun silver-lead-zinc polymetallic deposit and its metallogenic mechanism

LIANG Xin-Qiang, QIAO Zhan-Hua, YAN Qiang, WANG Liang,

LI Jian-Feng, LIU Xiao-Hui, WANG Miao

(Land and Resources Exploration and Development Institute of Inner Mongolia, Hohhot 010020, China)

Abstract: The Fuxingtun silver-lead-zinc polymetallic deposit is the first large-scale silver-lead-zinc polymetallic deposit discovered in the Mesozoic continental volcanic basin in the Daxinganling metallogenic belt in the past two years. During the census of the deposit, geophysical methods such as high-precision magnetic survey on the ground, time-domain induced polarization method, and AMT sounding method were conducted. Geophysical methods played an important guiding role in the exploration of Fuxingtun silver-lead-zinc polymetallic deposit. ① Through the processing and interpretation of ground magnetic anomaly data (using RGIS software), the structure of the census area were determined; ② Using the characteristics of geomagnetic anomaly and apparent resistivity anomaly, combined with the exposed lithology on the surface, the caldera rifted basin was determined; ③ Using the electrical sounding data, the formation process and structural characteristics of the faulted basin was determined, as well as the multi-stage of fault structure and the multi-stage of sulfide precipitation; ④ Based on the abnormal characteristics of apparent polarizability and the geological structure environment, the nature of the field source and the source of mineralization materials were determined; ⑤ The intrusive body of cylindrical subvolcanic rock was delineated by AMT sounding data. Based on the above research results and drilling data, this paper studies the formation mechanism of the deposit and summarizes a set of application ideas for geophysical methods to find such deposits.

Key words: silver-lead-zinc polymetallic deposit; mineral exploration; geophysics; Fuxingtun, Inner Mongolia (本文编辑:王萌)