



引文格式: 刘诚, 唐卫东, 杨凯, 等. 荒漠浅覆盖区萤石矿定位预测技术研究[J]. 西北地质, 2024, 57(4): 144–156.
DOI: 10.12401/j.nwg.2024042

Citation: LIU Cheng, TANG Weidong, YANG Kai, et al. Research on Location and Prediction Technology of Fluorite Deposits in Shallow Desert Coverage Area[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(4): 144–156. DOI: 10.12401/j.nwg.2024042

荒漠浅覆盖区萤石矿定位预测技术研究

刘诚^{1,2,3}, 唐卫东^{1,2}, 杨凯^{1,2}, 李含^{1,2}, 贺景龙^{1,2}, 姚川^{1,2}, 李新斌^{1,2}

(1. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100; 2. 中国地质调查局金矿勘查技术创新中心, 陕西 西安 710100; 3. 中国地质大学(北京) 地球物理与信息技术学院, 北京 100083)

摘要: 北山地区是中国西北部重要的萤石成矿带, 区内成矿地质条件优越, 但地处戈壁荒漠, 受浅覆盖层影响, 地表仅可观察到极少量露头, 需开展综合地球物理研究为区域成矿潜力及覆盖区下方矿脉赋存空间进行定位预测研究。以北山成矿带东段花石头山地区为示范, 采用高精度磁法、激电中梯、地面伽马能谱测量、便携式 X 射线荧光分析及音频大地电磁测深等技术手段进行综合探测, 其中面积性激电和磁法工作可有效识别隐伏赋矿空间分布, 地面伽马能谱测量、便携式 X 射线荧光分析约束赋矿空间的矿化异常, 音频大地电磁测深构建了隐伏萤石矿赋存位置深部结构模型, 并通过工程验证方法组合的有效性。本研究建立了综合地质-地球物理定位预测技术方法组合, 可为北山成矿带及戈壁荒漠浅覆盖区萤石矿定位预测提供理论和技术支持。

关键词: 隐伏萤石矿; 综合物探方法; 戈壁荒漠; 浅覆盖区; 北山成矿带

中图分类号: P631

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)04-0144-13

Research on Location and Prediction Technology of Fluorite Deposits in Shallow Desert Coverage Area

LIU Cheng^{1,2,3}, TANG Weidong^{1,2}, YANG Kai^{1,2}, LI Han^{1,2}, HE Jinglong^{1,2}, YAO Chuan^{1,2}, LI Xinbin^{1,2}

(1. Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China; 2. Technology Innovation Center for Gold Ore Exploration, China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China; 3. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The Beishan region, located in the northwest of China, is a significant fluorite metallogenic belt. Despite favorable metallogenic geological conditions in the area, the Gobi Desert's shallow cover layers result in minimal outcrops at the surface. Therefore, comprehensive geophysical studies are necessary to explore the regional metallogenetic potentiality and locate mineral veins beneath the cover layers. An example of this exploration is the Huashitou area in the eastern segment of the Beishan metallogenic belt. A combination of high-precision magnetic, induced polarization-resistivity, ground gamma-ray spectrometry, portable X-ray fluorescence

收稿日期: 2022-09-23; 修回日期: 2023-07-12; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2023-JC-QN-0365), 中国地质调查局项目(DD20243342、DD20243333、DD20211552) 联合资助。

作者简介: 刘诚(1990-), 男, 工程师, 博士研究生, 主要从事矿产资源及深部地球物理探测工作。E-mail: liuchengHJ@163.com。

analysis, and audio-magnetotelluric (AMT) survey was used for comprehensive exploration. The area-based induced polarization and magnetic methods effectively identified the distribution of hidden mineral-bearing spaces, while ground gamma-ray spectrometry and portable X-ray fluorescence analysis constrained the mineralization anomalies of deposit spaces. The AMT survey established a deep structure model of the occurrence of concealed fluorite deposits, and its validity was evaluated through engineering verification methods. This study establishes a comprehensive geological-geophysical location prediction technique and method combination that can provide theoretical and technical support for the positioning and prediction of fluorite deposits in the Beishan metallogenic belt and shallow cover areas in the Gobi Desert.

Keywords: hidden fluorite ore; comprehensive geophysical methods; gobi desert region; shallow covered areas; Beishan metallogenic belt

中国西北部地区广泛分布大面积的中新生界覆盖区, 仅戈壁、沙漠覆盖区就占全国陆地总面积的12.3%, 随着中国东部矿产资源开发程度日益提高, 西北部大面积的戈壁荒漠浅覆盖区将成为有利的矿产资源接替基地, 在戈壁、沙漠等中新生界覆盖区开展矿产综合定位预测工作是当前形势下最佳的选择之一(严加永等, 2021; 孟贵祥等, 2022)。萤石作为战略性非金属矿产资源, 在新一代信息技术、新能源、新材料和航空航天等领域的重要性日益凸显, 已被列入中国关键矿产目录(王吉平等, 2015; 李敬等, 2019)。但萤石矿产量主要来源于中国东部近地表和浅部萤石矿资源的开发(王自国等, 2020), 随着浅表萤石矿资源逐渐开发殆尽, 深部及浅覆盖区萤石矿找矿突破将成为未来接替萤石矿资源的重要目标(Camprubí et al., 2019; Castorina et al., 2020)。

前人在覆盖区找矿进行了一些理论与实践研究(成秋明等 2012; 戚志鹏等, 2012; Meng et al. 2017; 陈化奇等, 2019; 龚胜平等, 2021), 主要针对硫化物富集的多金属矿床, 其赋矿位置同激发极化法所获得的极化率参数息息相关(王小红等, 2023)。亦或是基于密度、磁化率特征, 以大比例尺重力和磁法资料为基础, 通过识别隐伏岩体位置形态进而确定找矿靶区(孟贵祥等, 2019; Yan et al., 2019; 严加永等, 2021), 上述工作均具备较为明确的研究思路。而针对隐伏萤石矿的成矿预测研究仍显得较为薄弱, 萤石矿同其围岩物性特征差异不显著, 近地表矿体规模有限且多呈脉状分布, 故前期勘查技术方法的研究多集中于地球化学及遥感解译(方乙等, 2014; 段吉学等, 2019; Wang et al. 2021; 唐利等 2021; Zou et al. 2022), 目前尚未出现针对隐伏萤石矿较为突出的地球物理探测成果。而萤石矿的深部定位预测又十分重要, 目前已知的大型-超

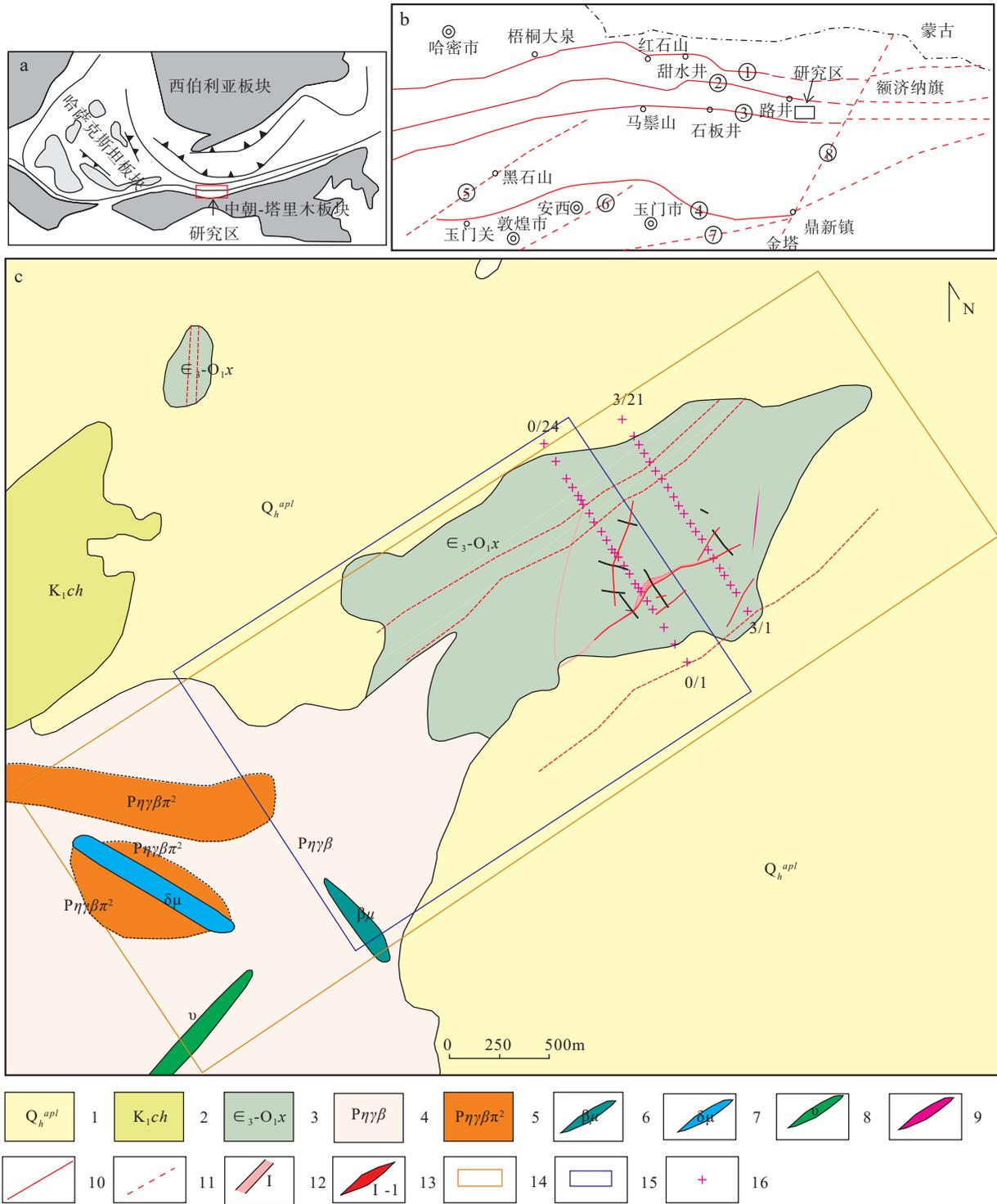
大型萤石矿床其深部形态同近地表露头存在显著区别(赵志强等, 2020), 且深部赋矿潜力较大, 需要具备穿透性的物探手段提供覆盖层下方萤石矿赋存位置的有效信息。

以野外地质调查、激电中梯、地面高精度磁法、便携式 X 射线荧光分析以及音频大地电磁测深等以地球物理探测为主的综合技术方法为切入点, 开展北山成矿带东段花石头山地区浅覆盖区隐伏萤石矿找矿勘查, 为戈壁荒漠浅覆盖区主要受断裂构造控制的脉状萤石矿的定位预测提供借鉴。

1 区域地质及地球物理特征

1.1 研究区地质背景

本次研究区位于北山成矿带东部(图 1), 北山成矿带大地构造位置上处于塔里木-中朝板块、西伯利亚板块和哈萨克斯坦板块交汇部位, 该区位于天山-兴蒙造山带中段, 天山-兴蒙构造带为古亚洲洋自新元古代至古生代的俯冲-汇聚作用形成的全球典型的增生造山带(杨合群等, 2006; 牛亚卓等, 2020)。北山地区东段发育一系列近 EW 向的深大断裂, 以及 NE 向断裂(杨建国等, 2015; 霍明宇等, 2020)。各时代岩浆岩一般呈 NW 向或近 EW 向带状分布, 与区域构造线一致。区内已发现有交叉沟萤石矿、东七一山大型钨锡铷萤石矿等矿床, 该区是北山成矿带重要的萤石、钨、锡、铷、铍矿化集中区(张振亮等, 2022; 陈耀等, 2023)。通过对北山东部萤石矿分布规律的研究表明, 萤石矿床(点)的形成与含钙建造、中酸性火山岩或侵入岩密切相关; NE 向、近 SN 向、近 EW 向及 NW 向断裂构造是区内萤石矿主要储矿和控矿构造, 而 NE 向和近 SN 向张性构造是萤石矿最为有利的成矿构造,



1.第四系砂砾石; 2.下白垩统赤金堡组; 3.上寒武统—下奥陶统西双鹰山组; 4.晚二叠世黑云母二长花岗岩; 5.似斑状黑云母二长花岗岩; 6.辉绿岩脉; 7.闪长玢岩脉; 8.辉长岩脉; 9.石英脉; 10.性质不明断层; 11.推测断层; 12.矿化蚀变带位置及编号; 13.矿体位置及编号; 14.地面高精度磁法工作范围; 15.激电中梯工作范围; 16.AMT测点; ①梧桐大泉-红石山-额济纳旗断裂; ②沙泉子-红尖兵山-路井断裂; ③星星峡-石板井-小黄山断裂; ④玉门关-垒墩泉-鼎新断裂; ⑤黑石山-狼山-北大泉断裂; ⑥三危山断裂; ⑦阿尔金南缘断裂; ⑧鼎新-额济纳旗断裂

图1 研究区大地构造位置(a,b)及研究区矿产地质图(c)

Fig. 1 (a, b) Tectonic location of the study area and (c) mineral geology map of the study area

且区内萤石矿均为热液充填型。故针对荒漠浅覆盖区深部的断裂构造和隐伏岩体的探测是区内萤石矿赋存位置定位预测的关键。

1.2 研究区地质矿产特征

研究区大地构造位置为月牙山-花石头山弧形挤压带的北东翼,萤石矿床处于岩体与地层接触带,区内主要出露地层有西双鹰山组长石石英细砂岩、石英杂砂岩、硅质岩,大豁落山组硅质岩、硅质白云岩,侵入岩主要为梭梭井中粒似斑状二长花岗岩。与萤石矿最为密切的矿化蚀变主要为萤石矿化、硅化(石英、石髓)、碳酸盐化(方解石)和绿帘石化。出露地层为西双鹰山组黄绿色石英砂岩、粉砂岩夹硅质岩,前者为萤石的围岩,远离矿点南部被印支期浅红色黑云母二长花岗岩侵入。后期NE向、近EW向、近SN向构造极为发育,并与岩体共同控制着花石头山构造热液型萤石矿点的产出(图1)。区内地貌较为平缓,近地表被不同程度风蚀物覆盖,除部分出露地层外区域地质情况不明,急需通过具备穿透性的方法手段对区域成矿潜力和萤石矿可能赋存位置予以判断。

1.3 研究区地球物理特征

典型萤石矿类型为石英-萤石型,矿体赋存于岩体与地层的一系列构造破碎带中,对围岩并无特殊选择性(Pei et al., 2019)。本研究区围岩以砂岩地层为主,其南北两侧均为大面积第四系砂砾石覆盖,未明确西侧岩体侵入范围及岩体同已知矿脉的时空关系。结合多个典型萤石矿研究区岩矿石物性的普遍规律(栗克坤等, 2019, 2022),磁化率均表现为围岩>石英>萤石,萤石矿近无磁性,故在磁法勘探结果中多表现为负磁异常;石英脉和含矿石英脉具微弱磁性,多表现为低磁异常;如果研究区第四系覆盖层下方出现成

规模的岩体侵入,亦可形成较为明显的正磁异常,进而为萤石成矿物质来源及成矿机制提供有力证据。与此同时结合几个典型萤石矿区物性数据统计(表1),无论在岩浆岩地区,变质岩地区还是沉积岩地区,萤石的放射性元素含量均远低于赋矿围岩所含的放射性元素含量(高峰等, 2013; 邹灏等, 2014)。

表1 花石头山工作区磁性参数统计表

Tab. 1 The magnetic parameters of the rocks and ores in Huashitoushan working area

岩性	标本数 (个)	磁化强度SI(10 ⁻⁶)	
		区间	平均值
蚀变碎裂岩	10	1~5	3.34
萤石矿脉	15	0~5	1.06
花岗岩	10	36~179	81.3
灰黑色砂岩	16	3~20	8.7

从研究区电性参数来看(表2),由于地下岩石电阻率受岩石成分、结构、孔隙度和含水量的控制,萤石矿石、石英砂岩、构造角砾岩均显示为明显高阻异常,断裂带和第四系砂砾石电阻率低,但由于萤石矿脉(体)规模有限,与萤石矿赋存位置相关的断裂构造应是地球物理探测实际的目标体。断裂带由于地下水蒸腾作用含水量较大,因此其电阻率一般小于整体致密岩石的电阻率,通过电阻率异常能够有效区分隐伏构造断裂带位置,进而指示萤石矿可能的赋存位置。非金属矿物萤石矿极化率同围岩并无明显差异,不具备物性基础,断裂带两侧构造角砾岩极化率略高,但对萤石矿赋存位置并无指示意义,研究区地势平缓,激电中梯获得电阻率分布真实反映覆盖区下地质体分布特征,故本次工作主要利用电阻率差异寻找隐伏构造进而提供隐伏矿体赋存位置的线索。

表2 花石头山工作区电性参数统计表

Tab. 2 The electrical parameters of the rocks and ores in Huashitoushan working area

序号	岩(矿)石 名称	标本数 (个)	$\rho(\Omega \cdot m)$			$\eta(\%)$		
			最小值	最高值	平均值	最小值	最高值	平均值
1	石英砂岩	5	4 722	9 398	7 037	0.895	2.276	1.74
2	石英脉	5	1978	10 712	5 598	0.306	1.426	0.77
3	构造角砾岩	5	5 403.3	5 403.3	5 403.3	1.02	2.82	1.82
4	蚀变岩	5	6 822.0	16 830.5	11 223.3	0.75	1.70	1.12
5	第四系	20	3	52	18.72			

2 浅覆盖区萤石矿综合定位预测技术体系

研究区基本被不同程度风蚀物覆盖,极大影响了基于传统路线地质调查和遥感技术的应用效果,特别是遥感影像提供的信息存在诸多不确定性,其对浅覆盖区的穿透能力远不及地球物理探测。与此同时研究区地处戈壁荒漠,以气候干燥、蒸发量大为特征,在近地表易形成钙质层,对以化探为主要手段的找矿方法提出了挑战。虽然萤石矿本身同围岩物性差异有限,但其赋存位置对应的地球物理探测目标却较为明确,萤石矿化对其围岩并无选择性(Zou et al., 2022),主要以几组平行脉状赋存于角砾岩及浅层剪切带(断裂)中(Pei et al., 2019),故对应地球物理探测目标较为明确,上述戈壁荒漠浅覆盖区是实验不同物探技术手段的理想地区。

基于综合地球物理探测的荒漠浅覆盖区萤石矿定位预测主要包括3个层次的问题,首先是在区域内确定萤石矿可能的赋存位置和范围,即寻找萤石矿可能赋存的隐伏控矿断裂构造及其展布;其次是对赋矿有利部位的含矿潜力予以判别;最后是对萤石矿脉的深部形态和展布进行定位探测,建立可靠的地质-地球物理模型进而指导工程验证。

2.1 浅覆盖区萤石矿赋存部位探测技术

萤石矿潜在赋矿空间的预测是首要考虑的问题,结合前人研究表明应用地面高精度磁法和激电中梯、甚低频电磁法等可通过识别异常展布有效确定赋矿有利部位。

高精度磁法测量作为一种快速、经济的物探方法,通过探测地质体磁性特征可以较为全面的反映控矿构造破碎带的磁异常特征,从而反映构造-矿化蚀变带的存在及其大致展布方向(王猛等, 2018)。戈壁荒漠区无人文、电磁干扰,可在近地表获得高质量的磁法数据。石英脉和萤石矿脉磁性较弱对应低磁异常,而围岩则表现出较强的磁性和正磁异常(栗克坤等 2019; 于汪等, 2019)。

激发极化法主要基于萤石矿脉赋存于断裂/裂缝中的低电阻率特征这一物性基础开展的。前人在萤石矿探测中经常应用类似的甚低频电磁法(VLF-EM)(方乙等, 2013a, 2013b; 夏炳卫等, 2016; 陈伟军等, 2017)。通过探测地下不同的地质体的电阻率,进而

确定岩性形态和边界。地质体电阻率受岩石成分、结构、孔隙度和含水量的综合影响,但通常断裂带由于地下水蒸腾作用含水量较大或存在金属矿物/硫化物富集,其电阻率小于完整致密岩石,故激电方法能够有效地用于识别断裂等构造薄弱部位。

2.2 浅覆盖区萤石矿含矿潜力探测技术

萤石矿潜在赋存空间一旦确定,可依靠伽马总量测量、便携式X射线荧光分析的快速便携技术手段以及槽探揭露,对萤石矿可能赋存位置进行含矿性评价。

地面伽马总量测量通过测量不同地质体中放射性元素含量以其总体变化趋势,从而推断隐伏矿体位置,热液充填型同岩浆活动密切相关而放射性能够指示岩浆活动的痕迹,在对其含矿潜力评价中,含矿构造带因矿石脉体充填于断裂裂隙带中,阻碍了与成矿相关的岩体放射性元素向上运移,导致这些位与不含矿的开放通道断裂裂隙带的放射性总量存在差别,又由于脉状萤石矿其放射性一般低于围岩的物性特征(高峰等, 2013; 邹灏等, 2014),可以实现基于隐伏断裂裂隙带低放射性总量的异常特征,对赋矿有利部位的含矿性作以快速判断。

便携式X射线荧光,通过测定样品中元素的特征X射线,可以确定被测样品中的元素种类,并且元素的特征X射线强度与其含量成正比,由此可以得知该元素的含量。虽然目前由于X射线荧光分析技术只能探测与萤石密切相关的Ca等元素含量,不能用于F元素的分析,故只能在非碳酸盐岩区作为判断潜在赋矿空间成矿潜力的直接证据(李欣宇等, 2018; Wang et al., 2021)。

2.3 浅覆盖区萤石矿深部探测技术

上述方法多是针对隐伏萤石矿体平面展布的预测研究,由于萤石矿赋存空间与断裂构造息息相关,在深部其产状变化难以通过常规地面方法判断,另一方面在深部断裂破碎带扩容空间内易形成高品位萤石主矿体的膨大部分(唐利等, 2021)。电磁勘探方法在矿产勘查中发挥着不可替代的作用,其利用较高频率的电磁信号进行地下电性结构探测,可为深部隐伏矿体和复杂构造地区矿床的勘查提供了大量的电性信息(刘诚等, 2020, 2022)。在戈壁沙漠地区由于人为电磁干扰较小,通过有效降低接地电阻可以很容易地获得良好的数据,经反演得到的电阻率分布可以转化为与岩石电阻率相关的岩性单元。

3 应用实例分析

在本次研究区按照赋存部位探测-含矿潜力探测-深部探测的顺序, 部署了面积性高精度磁法及激电中梯测量从而确定赋矿有利位置, 进而在重点剖面部署地面伽马总量测量和 X 射线荧光测量推断含矿潜力, 同剖面完成 AMT 测量工作的同时槽探和钻探验证。

3.1 地面高精度磁法

本次磁法工作点距为 20 m, 在已知地质线索附近加密, 同时适当扩大工作范围至西南侧出露的黑云母二长花岗岩体, 以形成充分的背景场。研究区区域磁场分布(图 2)自西向东分为 4 部分, 结合前文物性参数测定结果(表 1), 砂岩等围岩及石英脉磁性较弱, 对应低磁异常; 侵入岩体与萤石、石英明显不同, 表现出正磁异常, 萤石磁性最弱但由于其规模有限, 更多表现为热液流体充填裂隙后的综合反应, 为弱正异常。

西南侧为正常高值区, 磁异常超 100 nT, 研究区

西南侧的高磁异常应推断为辉绿岩脉等中基性岩脉二次侵入的表现, 结合标本磁性参数测定, 出露更为广泛的二长花岗岩表现为弱正异常。东侧为相对磁平稳场, 也是本研究发现隐伏萤石矿脉的主要区域, 结合部分地表露头可知萤石矿的赋矿围岩以砂岩为主, 砂岩为弱磁性-无磁性, 萤石矿近无磁性, 两者磁性差异较小, 萤石矿体和石英脉的磁异常呈弱正异常过渡带特征。

通过处于平静场的磁异常和槽探验证表明花石头山萤石矿重点工作区南侧未出现岩体侵入痕迹, 目前见矿区域总体处于砂岩地层的断裂之中, 在区域东侧和目前验证含矿部位磁场值有所差异, 故推测图中白线位置为一处地质界面, 在白色虚线以东, 砂岩地层下方可能存在隐伏弱磁性花岗质岩体, 经后期槽探揭露矿脉在近地表已无延续, 故磁异常有效指示了隐伏萤石矿赋存范围。

3.2 激电中梯

激电中梯工作与地面高精度磁法测线重合, 其中点距 20 m。研究区电阻率异常清晰刻画了工作区电性结构, 图 3 中沿测线方向南北两侧为显著的低阻异

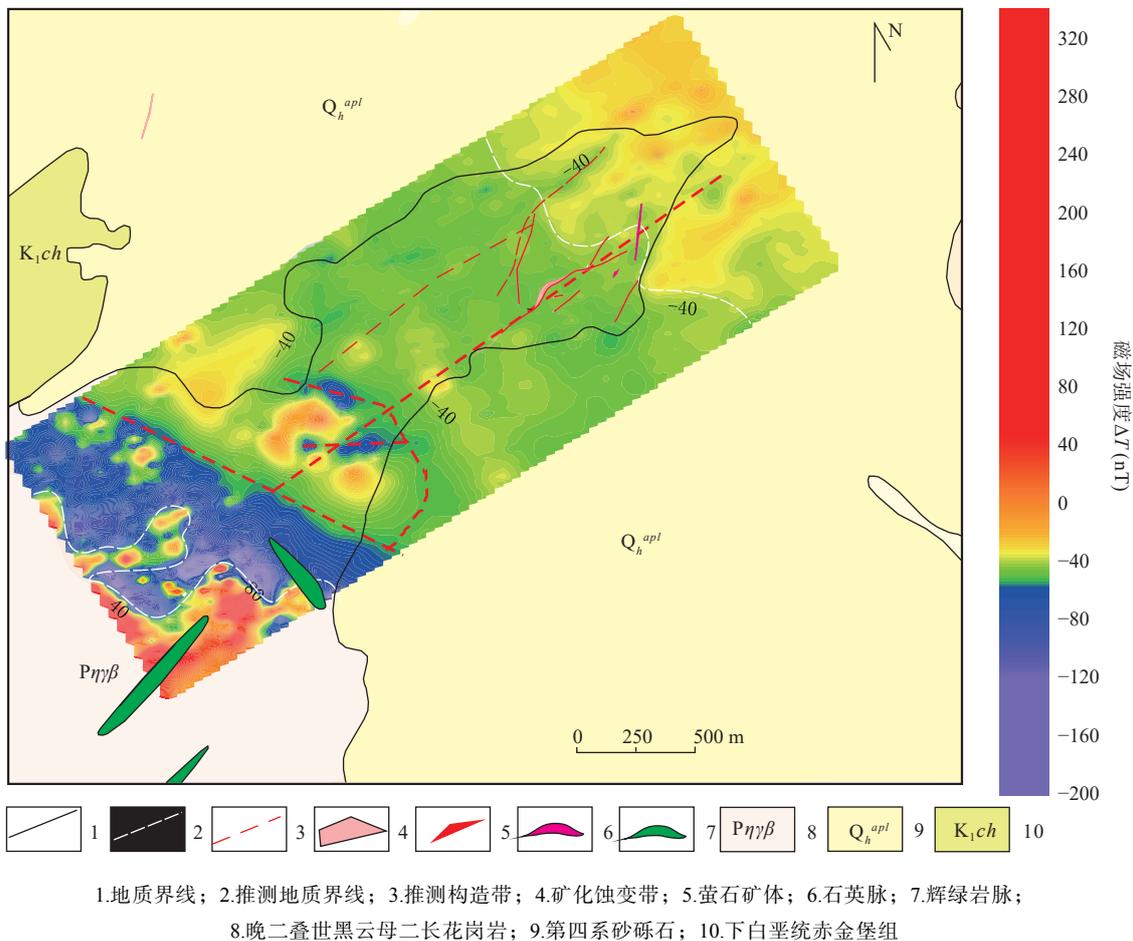
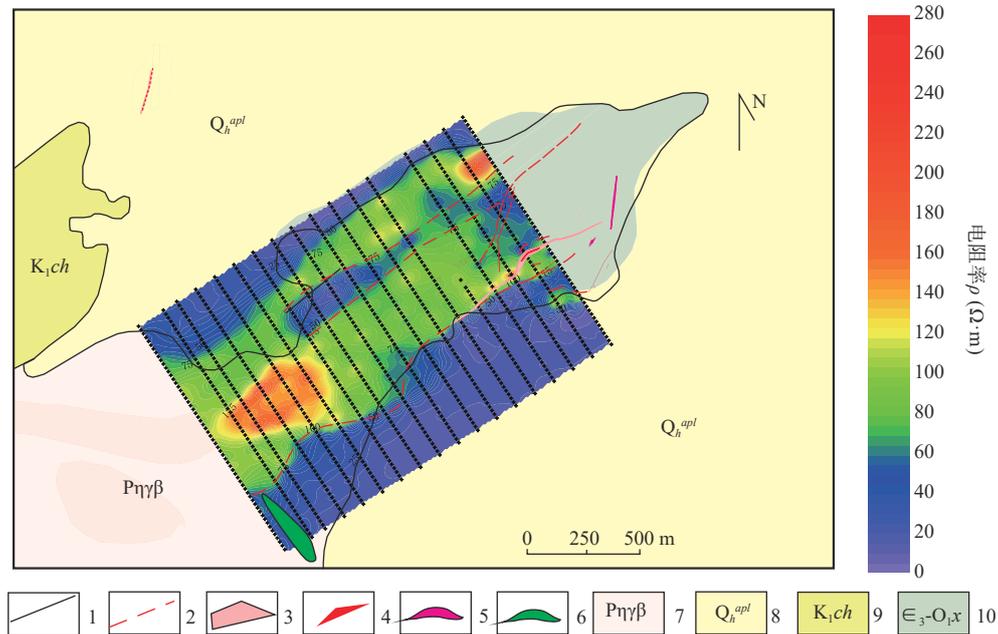


图2 ΔT化极异常平面图及地质图

Fig. 2 ΔT-pole contour plan and geological topographic map



1.地质界线; 2.推测构造带; 3.矿化蚀变带; 4.萤石矿体; 5.石英脉; 6.辉绿岩脉; 7.晚二叠世黑云母二长花岗岩;
8.第四系砂砾石; 9.下白垩统赤金堡组; 10.上寒武统一下奥陶统西双鹰山组

图3 电阻率异常平面图及地质图

Fig. 3 Resistivity anomaly contour plan and geological topographic map

常,结合槽探揭露未出现盐碱风化壳低阻屏蔽现象,异常为第四系砂砾石覆盖层的综合反映。在南侧红色虚线位置为一处显著的电性梯度带,此处不仅代表荒漠覆盖层的快速减薄还对应一处隐伏构造带,经槽探验证为区内主要萤石矿赋矿断裂。剖面中部砂岩地层中也出现一系列NE向的低阻异常,其中北侧有宽近百米的低阻条带向东延伸未闭合,其应为前期地质工作判定主断裂的反映,但本次激电工作显示南侧应为主断裂方向,而此处断裂应为与其平行的次一级断裂。同时除了NE向的主干断裂,通过低阻异常推断出NNE向隐伏次级断裂也获得槽探验证,戈壁荒漠区地形相对平坦,故激电获得的电阻率参数受地形影响小,能够真实反映一定深度的地下电性特征,对于呈现低阻特征的隐伏断裂较为灵敏。

3.3 重点剖面综合地球物理探测

通过面积性的磁法和激电中梯工作在研究区内浅覆盖区识别出多处隐伏萤石矿潜在赋存空间,选择图1所示剖面位置进行伽马总量测量、便携式X射线荧光分析及音频大地电磁(AMT)为主的综合地球物理探测工作,快速刻画赋矿有利位置的深部形态及含矿性,为隐伏区矿产潜力验证提供依据。

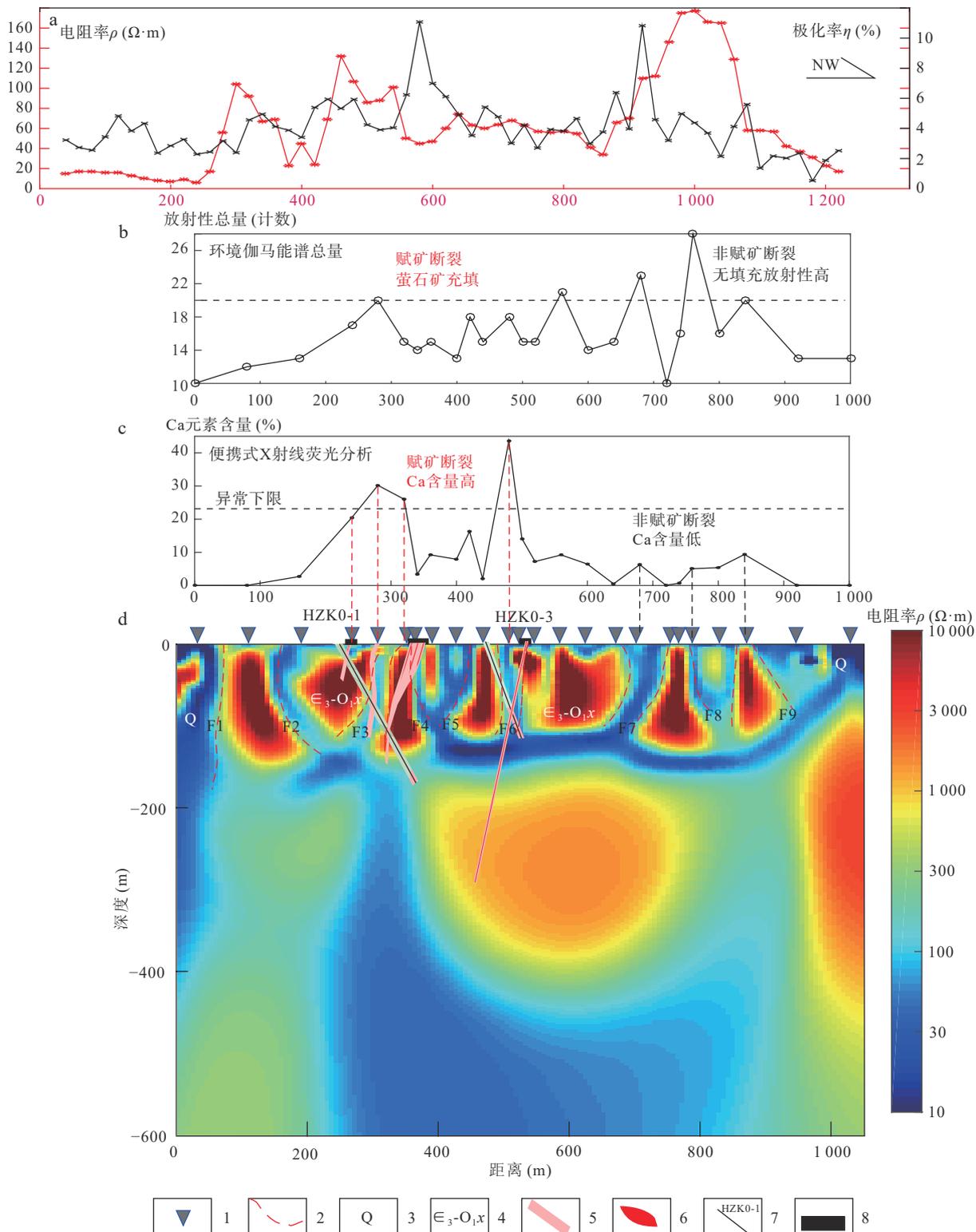
地面伽马能谱测量、便携式X射线荧光与原有地面高精度磁法、激电中梯工作测线重合,测量对象为

去除地表风蚀物覆盖10 cm下方的土壤,避免近地表第四系砂砾石覆盖物影响,对于部分基岩出露及覆盖层较薄的点位,测点稍许移动,尽量确保测量介质相统一。

音频大地电磁方法是研究地下电性结构的有效方法,本次工作平均点距40 m,单点采集时间不少于30 min,其有效频段范围为10 000~1 Hz。数据采集过程中,由于部分区域地表干旱甚至被沙漠覆盖,接地条件较差,通过深挖坑-填粘土-浇水、深埋、覆盖塑料膜保湿等手段有效降低接地电阻,提高高频段数据的可靠性,最终获得高质量的观测数据。野外采集的时间序列文件经傅里叶变换转换为频率域数据,进而计算出互功率谱值,采用标准Robust估计计算阻抗张量,然后挑选效果好的数据进行反演建模。采用二维NLCG算法(Rodi et al., 2001)进行数据反演,理论上TE+TM联合反演的模式能够得到最佳的反演结果,但TE模式受对地下介质的二维性要求较为严格(蔡军涛等, 2010; 王刚等, 2019),故反演主要依靠TM模式的数据。其中相位数据受到的畸变影响较小,将TM模式的视电阻率误差设为20%,相位误差设为10%; TE模式的视电阻率误差设为80%,相位误差设为60%。反演过程采用的数据频段范围是5~10 000 Hz,正则化因子 τ 设为3,最终反演拟合差为0.89。

结合本次完成的重点剖面二维电性结构可知,剖面中部显示为一系列的高低阻异常间隔排列,结合激

电中梯的探测结果(图4a),自南向北形成F1~F9多条较为显著的砂岩地层内部隐伏断裂带,其中F1和



1.测点位置; 2.推测断裂; 3.第四系; 4.上寒武统一下奥陶统双凤山组; 5.矿化蚀变带; 6.矿体; 7.钻孔; 8.探槽;
a.激电中梯; b.环境伽马总量测量; c.便携式X射线荧光分析Ca含量; d.音频大地电磁测深二维反演电阻率模型

图4 0线综合地球物理剖面

Fig. 4 Line 0 integrated geophysical profile

F9 分别为已知覆盖层下方砂岩地层的南北侧边界,南北两端近地表 100 m 内的低阻异常为第四系覆盖层的显示,由于电磁测深受近地表低阻层影响较小,也证实了激电中梯结果中大面积的低阻异常并非近地表盐碱层的屏蔽所致,进一步排除了南侧荒漠覆盖层下大规模岩体侵入的可能,区域成矿的岩浆热液活动应来自于 F2 断裂深部或是来源于剖面北侧的高阻异常。AMT 结果(图 4d)显示多处低阻异常所代表的断裂带提供了丰富的萤石矿赋矿空间,其中 F2、F3、F4、F6 断裂均得到槽探揭露,验证了隐伏断裂带的存在,F7、F8 为前期地质工作划定的已知断裂,与二维反演获得的电阻率模型一致。目前已知矿脉所处位置在深部均有所延伸,赋矿深度在地下 200 m 左右。在地表 200 m 深度下方,研究区中部与北侧出现两处高阻异常推测为区内中酸性岩体的反映,为区域成矿提供物质及能量来源。

但上述断裂含矿性不一,萤石矿的空间分带是含矿热液沿特定负压构造破碎空间上升充填的过程,地层中裂隙提供成矿热液聚集的空间,岩浆活动提供能量及物质来源,但成矿位置的分布具有选择性,以电法为主的地球物理探测能够很好解决赋矿位置的定位,但由于方法多解性,仍需结合伽马总量测量、便携式 X 射线荧光分析进一步约束。地面伽马总量测量可以快速获取近地表放射性,土壤中的伽马辐射来源于深部地质体钾(K)、铀(U)、钍(Th)元素的衰变(Singh et al., 2005),而其基本规律是岩浆岩放射性高于沉积岩及变质岩(高峰等, 2013),萤石成矿过程与岩浆岩提供的能量物质来源相关,由于萤石矿及其伴生的石英脉均赋存于构造裂隙中,实际阻碍了深部放射性向上迁移,故高值异常对应于围岩多金属蚀变,低值异常则对应于石英脉和萤石矿体。通过 0 线剖面(图 4b)的结果可知赋矿的 F3、F4、F6 断裂附近测点的放射性总量均低于异常下限 20×10^{-6} ,而后期槽探验证并不赋矿的断裂带 F7、F8、F9 则表现出高值异常,但在 F1、F2 断裂处覆盖较厚,也表现为低放射性总量,难以通过单一方法做判断,必须将地质条件与其他方法相结合,以保证解释的准确性。便携式 X 射线荧光分析虽然不能直接探测 F 元素的含量,但可以现场直接测定与萤石矿密切相关的钙(Ca)元素(图 4c),避免地球化学测量较漫长的化验周期,快速提供约束条件。由图中可以看出 F3、F4、F6 附近测点 Ca 元素含量均在 20% 以上,而已知未发现萤石矿体的断裂带

附近测点 Ca 元素含量均在 10% 以下,故 Ca 元素高值能够有效指示萤石矿赋存可能性。

3.4 工程验证

通过上文所述的面积性地球物理工作所推断的隐伏断裂带布置槽探 3 条,共圈定 5 条矿化带,受 NE 向构造破碎带控制,初步控制的矿体长为 100~657 m,宽为 1~23.7 m,槽探揭露矿体产于长石石英砂岩内部裂隙及破碎带内,萤石的主要成分 CaF_2 品位为 26.08%~60.64%,平均品位为 38.75%。在 0 线剖面完成的综合地球物理探测,认为 F3、F4、F6 隐伏断裂为主要赋矿断裂,结合 AMT 提供的深部电性结构针对 F3、F6 部署了 HZK0-1 和 HZK0-3 进行验证,均在地下 50 m 深度附近对应位置见矿,对比地表及深部钻孔中矿石特征,萤石矿体在深部均有变厚、变缓、变富的趋势,且隐伏赋矿断裂带延伸稳定,与本次地球物理探测结果一致,在 200 m 深度范围内上述赋矿断裂均有所延续,深部找矿空间较大。

4 讨论

基于不同物性基础的技术方法具有差异化的特点、应用限制条件。特别是在戈壁荒漠浅覆盖区开展工作,由于近地表覆盖层的屏蔽,对各类技术方法均存在一定程度的影响,故探讨兼顾应用效果与可操作性的技术组合以定位预测受断裂控制为主的隐伏萤石矿赋存位置的研究具有一定意义。

针对萤石矿赋存部位探测方面,本次研究采用了地面高精度磁法和激电中梯,前人研究中还增加了高分辨率多光谱遥感、VLF 等技术手段(Wang et al. 2021)。本次研究也参考了遥感影像,虽然其可快速获取区域大型断裂位置及规模,但由于处在浅覆盖区的北山成矿带通行条件较好,可通过现地工作予以确认,故遥感影像多在前期提供指引,对于矿体赋存位置的断裂/裂隙探测仍需以具备穿透性的物探手段为主。地面高精度磁法应用效果对萤石矿围岩有一定选择性,在岩浆岩为围岩的情况下效果较好,但沉积岩作为围岩时则物性差异有限,效果不够显著。本次完成的激电中梯较好反映了萤石矿可能赋存的断裂构造,前人研究较多使用的 VLF 其信号强度弱,相较于激电方法异常不够显著(张参辉等, 2022),萤石矿与硫化物关联程度低,极化率不显著,但激发极化法提供的电阻率仍是有效的找矿手段。与之类似的电

磁测深可以提供 1km 范围内的深部电阻率结构,特别是利用其高频段数据可经济快速完成对一定区域的电性结构特征的构建,进一步结合对赋矿有利部分含矿潜力的评价可实现较好的工程验证效果。

对萤石矿含矿潜力探测是研究的难点,从前文所述的物性基础来看,萤石矿规模较小且各项物性差异均有限,应用地面伽玛总量测量和 X 射线荧光分析能够提高预测的精准度,两种方法均受地表覆盖层厚度影响,图 4 中研究区南北两侧厚覆盖区无论是地面伽玛总量亦或是 Ca 元素的含量均表现为稳定的低值异常。结合本次研究的验证成果,由于萤石矿体充填于地层裂隙/破碎带中形成低放射性异常的找矿标志,但南北两侧放射性低值异常并不指示含矿潜力,因为覆盖层下方并未探测到萤石矿赋存的断裂、裂隙等有利部位,虽然地面伽玛总量测量对于萤石矿赋存位置具有独特指引意义且操作简便,但引起放射性异常的因素较复杂,需要结合其他方法前期推断出的有利赋存位置进行综合判断。X 射线荧光分析可有效提供 Ca 含量,是判断隐伏断裂赋矿潜力的直接证据。但值得注意的是,由于目前技术手段尚不能测定 F 元素的含量,故在高钙背景地区其准确性和可靠性往往受到外来冲积泥沙或漂移荷载的影响,亦需要结合地质调查和前期对于赋矿有利部位判断的其他技术手段成果进行综合分析。

5 结论

(1)通过地质路线检查、面积性地球物理探测(磁法、激电中梯)圈定了区内荒漠浅覆盖区隐伏的潜在赋矿断裂构造展布,结合地面伽玛总量测量和便携式 X 射线荧光分析约束了上述赋矿有利位置的成矿潜力,进而利用音频大地电磁法构建研究区深部结构模型,刻画近地表已知矿体赋存空间的深部形态特征。在上述异常部位开展的工程验证发现了多处隐伏萤石矿体,证明上述技术方法组合有效,指示了该区具备良好找矿前景。

(2)不同于传统的浅覆盖区金属硫化物矿床,萤石矿定位预测需要多种技术方法组合予以约束,其中激电中梯的低阻异常,X 射线荧光分析钙元素的高值异常,伽玛总量在隐伏断裂的低值异常以及音频大地电磁有延伸的低阻异常带可综合作为戈壁荒漠浅覆盖区萤石矿(带)的定位预测标志。

(3)北山成矿带区内萤石成矿地质条件优越,受戈壁荒漠浅覆盖区影响萤石矿规模有限,总结经济、有效的隐伏萤石矿定位预测技术方法组合,并在研究区成功应用,可为成矿带内隐伏萤石矿找矿勘查提供示范作用。

参考文献(References):

- 蔡军涛,陈小斌.大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究(二)——反演数据极化模式选择[J].地球物理学报,2020,53(11):2703-2714.
- CAI Juntao, CHEN Xiaobin. Refined techniques for data processing and two-dimensional inversion in magnetotelluric II: Which data polarization mode should be used in 2D inversion[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 53(11): 2703-2714.
- 陈化奇,李永庆.岩屑测量方法在干旱荒漠区的找矿效果——以贺兰山北段嘎拉斯台白钨矿的发现为例[J].物探与化探,2019,43(1):55-63.
- CHEN Huaqi, LI Yongqing. The prospecting effect of rock debris measurement method in arid desert area: Exemplified by the discovery of the Galasitai scheelite deposit in northern Helan mountain[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(1): 55-63.
- 陈伟军,郝情情,褚少雄,等.甚低频电磁法在隐伏金属矿床定位预测中的应用——以大兴安岭西南段铜多金属矿点为例[J].地质与勘探,2017,53(3):528-532.
- CHEN Weijun, HAO Qingqing, CHU Shaoxiong, et al. Application of Very Low Frequency Electromagnetic Method to Positioning of Concealed Metal Deposits: An Example of Copper Polymetallic Ore Occurrences in the Southwest Greater Hinggan Mountains[J]. Geology and Exploration, 2017, 53(3): 528-532.
- 陈耀,张成,张青,等.内蒙古北山成矿带月牙山-老硐沟地区金多金属矿床成矿预测[J].西北地质,2023,56(2):151-162.
- CHEN Yao, ZHANG Cheng, ZHANG Qing, et al. Metallogenic Regularity and Prospecting Prediction of Gold Polymetallic Deposits in Yueyashan-Laodonggou Area of Beishan Metallogenic Belt, Inner Mongolia[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 151-162.
- 成秋明.覆盖区矿产综合预测思路与方法[J].地球科学:中国地质大学学报,2012,37(6):1109-1125.
- CHENG Qiu ming. Ideas and methods for mineral resources integrated prediction in covered areas[J]. Earth Science:Journal of China University of Geosciences, 2012, 37(6): 1109-1125.
- 段吉学,刘江.综合物化探在内蒙萤石多金属矿普查中的应用

- 研究[J]. 西北地质, 2019, 52(3): 265-274.
- DUAN Jixue, LIU Jiang. Application of Comprehensive Physical and Chemical Exploration Method for Prospecting Fluorite Polymetallic Deposit in Inner Mongolia[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(3): 265-274.
- 方乙, 张寿庭, 邹灏, 等. VLF 和 AMT 在内蒙古小四家萤石矿勘察中的应用[J]. 物探与化探, 2013a, 37(5): 800-803.
- FANG Yi, ZHANG Shouting, ZOU Hao, et al. The application of VLF and AMT to the exploration of fluorite deposit[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013a, 37(5): 800-803.
- 方乙, 邹灏, 王光凯, 等. 甚低频电磁法在萤石矿床勘查中的应用——以内蒙古林西俄力木台萤石矿为例[J]. 桂林理工大学学报, 2013b, 33(2): 246-251.
- FANG Yi, ZOU Hao, WANG Guangkai, et al. Application of VLF-EM in Fluorite Deposit Exploration—A Case Study of Elimutai Fluorite Deposit in Linxi, Inner Mongolia[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2013b, 33(2): 246-251.
- 方乙, 张寿庭, 邹灏, 等. 浅覆盖区萤石矿综合勘查方法研究——以内蒙古林西赛波萝沟门萤石矿为例[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014, 41(1): 94-101.
- FANG Yi, ZHANG Shouting, ZOU Hao, et al. Comprehensive exploration method for fluorite deposits in grasslands covered area: A case study of the Saiboluogoumen fluorite deposit in Linxi, Inner Mongolia, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2014, 41(1): 94-101.
- 高峰, 张寿庭, 邹灏, 等. 地面伽马能谱测量在内蒙古林西地区萤石矿找矿中的应用[J]. 物探与化探, 2013, 37(2): 206-211.
- GAO Feng, ZHANG Shouting, ZOU Hao, et al. The application of field gamma ray spectrometry to the prospecting for fluorite deposits in Linxi area of Inner Mongolia[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(2): 206-211.
- 龚胜平, 陆桂福, 席明杰, 等. 干旱荒漠区综合物化探方法寻找铜多金属矿[J]. 物探与化探, 2021, 45(1): 1-10.
- GONG Shengping, LU Guifu, XI Mingjie, et al. The application of integrated geophysical and geochemical methods to the prospecting of copper polymetallic deposits in the arid desert area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(1): 1-10.
- 霍明宇, 卢克学, 倡先丽, 等. 内蒙古北山造山带东段虎头山北地区地质构造特征及铜金找矿方向探讨[J]. 矿产勘查, 2020, 11(10): 2117-2125.
- HUO Mingyu, LU Kexue, QI Xianli, et al. Geological structural features and copper-gold prospecting direction of the northern Hutoushan in the eastern section of the Beishan Orogenic Belt, Inner Mongolia[J]. Mineral Exploration, 2020, 11(10): 2117-2125.
- 李敬, 张寿庭, 商朋强, 等. 萤石资源现状及战略性价值分析[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(6): 62-68.
- LI Jing, ZHANG Shouting, SHANG Pengqiang, et al. Present Situation and Analysis of Strategic Value of Fluorite[J]. Resource Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(6): 62-68.
- 栗克坤, 陈新立, 商朋强, 等. 物化探综合信息找矿方法在萤石矿找矿中的应用[J]. 中国地质调查, 2019, 6(6): 98-104.
- LI Kekun, CHEN Xinli, SHANG Pengqiang, et al. Application of the prospecting method of geophysical and geochemical integrated information in the exploration of fluorite deposits[J]. Geological Survey of China, 2019, 6(6): 98-104.
- 栗克坤, 商朋强, 韩志坤, 等. 闽北邵武地区萤石矿综合信息找矿方法研究[J]. 地球学报, 2022, 43(3): 404-410.
- LI Kekun, SHANG Pengqiang, HAN Zhikun, et al. Comprehensive Information Prospecting Method for Fluorite Deposits in Shaowu Area, Northern Fujian Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2022, 43(3): 404-410.
- 李欣宇, 邹灏, 张强, 等. 便携式 X 荧光元素分析法在浅覆盖区萤石矿勘查中的应用与分析——以内蒙古乌力吉敖包萤石矿为例[J]. 物探化探计算技术, 2018, 40(5): 681-688.
- LI Xinyu, ZOU Hao, ZHANG Qiang, et al. Application and analysis of portable X-ray fluorescence analyzer on fluorite exploration in shallow cover area[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 40(5): 681-688.
- 刘诚, 孙彪, 魏立勇, 等. 综合电法勘探在西秦岭寨上金矿的应用研究[J]. 地质与勘探, 2020, 56(6): 1226-1237.
- LIU Cheng, SUN Biao, WEI Liyong, et al. Application of the integrated electrical method to exploration in the Zhaishang gold deposit, West Qinling[J]. Geology and Exploration, 2020, 56(6): 1226-1237.
- 刘诚, 李含, 孙彪, 等. 西秦岭寨上金矿综合地球物理研究[J]. 地质论评, 2022, 68(2): 658-672.
- LIU Cheng, LI Han, SUN Biao, et al. Comprehensive geophysical study of Zhaishang Gold deposit, West Qinling[J]. Geological Review, 2022, 68(2): 658-672.
- 孟贵祥, 吕庆田, 严加永, 等. “穿透性”探测技术在覆盖区地质矿产调查中的应用研究[J]. 地球学报, 2019, 40(5): 637-650.
- MENG Guixiang, LV Qingtian, YAN Jiayong, et al. The Research and Application of Explorational Technology of “Penetrating” to Geology and Mineral Investigation in Overburden Area[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2019, 40(5): 637-650.
- 孟贵祥, 邓震, 祁光, 等. 新疆东准噶尔成矿带浅覆盖区地质填

- 图效果——以杜热一带浅覆盖区基岩地质填图为例[J]. 地质通报, 2022, 41(2-3): 374-387.
- MENG Guixiang, DENG Zhen, QI Guang, et al. Effect of geological mapping in shallow overburden area of East Junggar, Xinjiang Province: A case of bedrock geological mapping in the Dure shallow overburden area[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(2-3): 374-387.
- 牛亚卓, 宋博, 周俊林, 等. 中亚造山带北山南部下泥盆统火山—沉积地层的岩相、时代及古地理意义[J]. 地质学报, 2020, 94(2): 615-633.
- NIU Yazhuo, SONG Bo, ZHOU Junlin, et al. Lithofacies and chronology of volcano-sedimentary sequence in the southern Beishan Region, Central Asian Orogenic Belt and its paleogeographical implication[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(2): 615-633.
- 戚志鹏, 李貅, 钱建兵, 等. 电法联合解释在覆盖区矿产勘查中的应用[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2012, 37(6): 1199-1208.
- QI Zhieng, LI Xiu, QIAN Jianbing, et al. Application of electrical joint interpretation method in mineral exploration of coverage areas[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2012, 37(6): 1199-1208.
- 唐利, 张寿庭, 王亮, 等. 浅覆盖区隐伏萤石矿找矿预测: 以内蒙古赤峰俄力木台为例[J]. 地学前缘, 2021, 28(3): 208-220.
- TANG Li, ZHANG Shouting, WANG Liang, et al. Exploration of concealed fluorite deposit in shallow overburden areas: A case study in Elimutai, Inner Mongolia, China[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(3): 208-220.
- 王吉平, 商朋强, 熊先孝, 等. 中国萤石矿床成矿规律[J]. 中国地质, 2015, 42(1): 18-32.
- WANG Jiping, SHANG Pengqiang, XIONG Xianxiao, et al. Metallogenic regularities of fluorite deposits in China[J]. Geology in China, 2015, 42(1): 18-32.
- 王刚, 方慧, 仇根根, 等. 安庆—贵池矿集区及邻区深部电性结构研究[J]. 中国地质, 2019, 46(4): 795-806.
- WANG Gang, FANG Hui, QIU Gengen, et al. The deep electrical structure across Anqing-Guichi ore concentration area[J]. Geology in China, 2019, 46(4): 795-806.
- 王猛, 黄俭合. 综合物探方法在萤石矿勘查中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(S1): 118-124.
- WANG Meng, HUANG Jianhe. Application of Integrated Geophysical Prospecting in Fluorite Orebody Exploration[J]. Coal Geology of China, 2018, 30(S1): 118-124.
- 王小红, 杨建国, 王磊, 等. 地质物化探综合方法在甘肃北山红柳沟铜镍矿的应用[J]. 西北地质, 2023, 56(6): 254-261.
- WANG Xiaohong, YANG Jianguo, WANG Lei, et al. The Application Effect of Geological Geophysical and Geochemical Exploration Comprehensive Method in Hongliugou Copper-Nickel Deposit, Beishan, Gansu Province[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(6): 254-261.
- 王自国, 朱培元. 中央企业萤石矿战略布局思考[J]. 中国矿业, 2020, 29(6): 8-11.
- WANG Ziguang, ZHU Peiyuan. Strategic layout of fluorite mine in state-owned enterprises[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(6): 8-11.
- 夏炳卫, 曹华文, 裴秋明, 等. VLF-EM 和 EH4 在浅覆盖区萤石矿床勘查中的应用——以林西水头萤石矿区为例[J]. 桂林理工大学学报, 2016, 36(2): 228-233.
- XIA Bingwei, CAO Huawen, PEI Qiuming, et al. Exploration of fluorite deposit by the combination of VLF-EM and EH4 on shallow-covered area: A case study of the Shuitou deposit[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2016, 36(2): 228-233.
- 严加永, 孟贵祥, 吕庆田, 等. 综合地球物理在荒漠覆盖区隐伏矿床预测与定位中的应用: 以新疆拉克勒克铜多金属矿床为例[J]. 地球物理学报, 2021, 64(11): 4117-4133.
- YAN Jiayong, MENG Guixiang, LV Qingtian, et al. Prediction and location of concealed deposits in desert gobi coverage areas using Integrated geophysics: An example of the Layikeleke copper polymetallic deposit in Xinjiang, Northwest China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(11): 4117-4133.
- 杨建国, 王磊, 王小红, 等. 内蒙古北山额济纳旗小红山钒钛磁铁矿床 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其意义[J]. 地质通报, 2015, 34(9): 1699-1705.
- YANG Jianguo, WANG Lei, WANG Xiaohong, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating of the Xiaohongshan vanadium-titanium magnetite deposit, Ejina Banner, Beishan, Inner Mongolia, and its geological implications[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(9): 1699-1705.
- 杨合群, 李英, 杨建国, 等. 北山造山带的基本成矿特征[J]. 西北地质, 2006, 39(2): 78-95.
- YANG Hequn, LI Ying, YANG Jianguo, et al. Main Metallogenic Characteristics in the Beishan Orogen[J]. Northwestern Geology, 2006, 39(2): 78-95.
- 于汪, 王猛, 商朋强, 等. 地面高精度磁法在萤石矿勘查中的应用[J]. 地质学刊, 2019, 43(3): 428-433.
- YU Wang, WANG Meng, SHANG Pengqiang, et al. Application of high-accuracy ground magnetic survey to the exploration of fluorite deposits[J]. Journal of Geology, 2019, 43(3): 428-433.
- 张参辉, 李水平, 白德胜, 等. 时间域激电法在浅覆盖区萤石矿勘查中的应用——以河南省方城县铁炉萤石矿床为例[J]. 地质与勘探, 2022, 58(2): 369-380.
- ZHANG Canhui, LI Shuiping, BAI Desheng, et al. Application of the

- time-domain IP method to the exploration of concealed fluorite deposits: A case study of the Tielu fluorite deposit in Fangcheng County, Henan Province[J]. *Geology and Exploration*, 2022, 58(2): 369–380.
- 张振亮, 冯选洁, 赵国斌, 等. 东天山—北山地区中生代内生矿床成矿规律[J]. *西北地质*, 2022, 55(4): 280–299.
- ZHANG Zhenliang, FENG Xuanjie, ZHAO Guobin, et al. The Metallogenic Rule of Mesozoic Hypogene Deposits in the Eastern Tianshan-Beishan Area[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(4): 280–299.
- 赵志强, 白德胜, 张凯涛, 等. 河南陈楼萤石矿床 M3-I 矿体原生晕特征及深部找矿预测[J]. *矿产勘查*, 2020, 11(4): 783–789.
- ZHAO Zhiqiang, BAI Desheng, ZHANG Kaitao, et al. Characteristics of primary halos in the M3-I orebody and its deep prospecting prediction in Chenlou fluorite deposit, Henan Province[J]. *Mineral Exploration*, 2020, 11(4): 783–789.
- 邹灏, 张寿庭, 方乙, 等. 天然萤石的放射性元素含量及其影响[J]. *物探与化探*, 2014, 38(3): 478–484.
- ZOU Hao, ZHANG Shouting, FANG Yi, et al. The radioactive elements content of natural fluorite and its influence[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2014, 38(3): 478–484.
- Camprubi, A., González-Partida, E., Richard, A., et al. MVT-Like Fluorite Deposits and Oligocene Magmatic-Hydrothermal Fluorite-Be-U-Mo-P-V Overprints in Northern Coahuila, Mexico[J]. *Minerals*, 2019, 9(1): 58–85.
- Castorina F., Masi U., Gorello I. Rare Earth Element and Sr-Nd Isotopic Evidence for the Origin of Fluorite from the Silius Vein Deposit (Southeastern Sardinia, Italy)[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2020, 215: 106535
- Meng Yinsheng, Zhang Ruizhong, Liu Ruide, et al. Application of Multiple Geophysical Methods to Prospect Concealed Ores Beneath Quaternary Cover: A Case Study from a Copper-Poly-metallic Deposit[J]. *Technology and Application of Environmental and Engineering Geophysics*, 2017: 243–249.
- Pei Qiuming, Zhang Shouting, Hayashi K., et al. Nature and genesis of the Xiaobeigou fluorite deposit, Inner Mongolia, northeast China: evidence from fluid inclusions and stable isotopes[J]. *Resource Geology*, 2019, 69(2): 148–166.
- Singh S., Rani A., Kumar Mahajan R., et al. ^{226}Ra , ^{232}Th and 40K analysis in soil samples from some areas of Punjab and Himachal Pradesh, India using gamma-ray spectrometry[J]. *Radiat. Meas.*, 2005, 39(4): 431–439.
- Wang Liang, Zhang Shouting, Fang Yi, et al. Integrated Exploration Model for Concealed Ore Deposit: A Case Study from Shuitou Fluorite Deposit, Inner Mongolia, North China[J]. *Journal of Earth Science*, 2021, 32(2): 370–389.
- Yan Jiayong, Chen Xiangbin, Meng Guixiang, et al. Concealed faults and intrusions identification based on multiscale edge detection and 3D inversion of gravity and magnetic data: A case study in Qionghaba area, Xinjiang[J]. *Northwest China Interpretation*, 2019, 7(2): 331–345.
- Rodi W, Mackie R L. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion[J]. *Geophysics*, 2001, 66(1): 174–187.
- Zou Hao, Pei Qiuming, Li Xinyu, et al. Application of field-portable geophysical and geochemical methods for tracing the Mesozoic-Cenozoic vein-type fluorite deposits in shallow overburden areas: A case from the Wuliji'Oboo deposit, Inner Mongolia, NE China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2022, 142: 104685.