



综合物化探方法在河南方城县 某隐伏萤石矿勘查中的应用

闫早华¹, 胡甲齐^{1*}, 李家晓², 朱江源¹, 王延浩¹, 周延强¹, 杨本固¹

(1. 山东省地质矿产勘查开发局第八地质大队(山东省第八地质矿产勘查院), 山东地矿局有色金属矿找矿与资源评价重点实验室, 日照地质地理大数据研究院, 日照市土地质量评价与污染修复重点实验室, 山东日照 276826; 2. 日照市自然资源和规划局日照经济技术开发区分局, 山东日照 276826)

摘要:针对浅覆盖区隐伏萤石矿勘查难题,本研究创新性构建“地-物-化”协同勘查体系,集成高精度磁测、激发极化与土壤化探技术,揭示隐伏矿体地球物理-地球化学响应特征。通过高精度磁测圈定负磁异常区,激电中梯识别中阻中极化带,结合氟钙异常追踪,在方城县第四系覆盖区精准圈定 5 处靶区。验证钻孔揭露矿体埋深 36.5~52.3 m,厚度 2.6~5.2 m,证实物化探异常与隐伏矿体的空间耦合规律。本次研究揭示了构造蚀变岩型萤石矿地球物理及地球化学特征,提出综合物探方法与化探互补技术可有效抑制多解性。该成果为浅覆盖区隐伏萤石矿勘查提供了技术方案,对同类型矿床勘查具有重要示范意义。

关键词:萤石矿;激电中梯;激电测深;高精度磁测;土壤化探;河南方城

中图分类号:P631

文献标识码:A

doi:10.12128/j.issn.1672-6979.2025.08.002

0 引言

河南省方城县地处华北地台南缘与秦岭褶皱带过渡带,是我国萤石矿重要成矿区之一^[1-2]。区内萤石矿体主要赋存于新元古代栾川群二云石英片岩夹炭质页岩中,严格受 NW 向构造控制,呈脉状或透镜状产出^[3]。长期以来,矿区浅部露头矿及民采资源逐步枯竭,隐伏矿体及深部找矿成为资源增储的关键。然而,传统物探方法(如单一激电或磁测)在覆盖区勘查中面临显著挑战:一方面,复杂构造背景导致物探异常多解性突出^[4];另一方面,隐伏矿体与围岩电性、磁性差异微弱,单一方法难以精准识别矿化信息^[5]。此外,现有研究多聚焦于露头矿勘查^[6-7],针对浅覆盖区隐伏萤石矿的系统性综合勘查技术体系尚未建立。

针对上述问题,本文以方城县某浅覆盖区萤石矿为对象,提出综合物探方法与化探互补技术可有效抑制多解性的思路,集成土壤化探(追踪氟、钙异

常)、激电中梯/测深(识别中阻中极化特征)及高精度磁测(圈定负磁异常区),构建多参数找矿模型,突破单一方法的多解性限制^[8]。建立覆盖区隐伏萤石矿“中阻中极化-弱磁-高氟钙”综合识别标志,形成浅覆盖区隐伏萤石矿“地-物-化”协同勘查技术流程。

本研究的实施不仅填补了方城县浅覆盖区系统性综合勘查的空白,更为隐伏萤石矿的高效定位提供了科学依据,为类似地区提供可推广的解决方案,对推动战略性矿产资源增储具有重要实践价值。

1 区域地质背景

方城县位于华北地台南缘与秦岭褶皱带东段北侧的构造过渡带,属北秦岭造山带与华北克拉通结合部位,区域构造总体呈 NW—SE 向展布(图 1)。其地质演化受多期构造-岩浆活动叠加改造,形成复杂的地层-构造-岩浆岩组合,为萤石矿成矿提供了有利条件。

收稿日期:2025-04-08;修订日期:2025-05-19;编辑:王敏

作者简介:闫早华(1984—),男,山东日照人,工程师,主要从事物化探勘查工作;E-mail:yetiov@qq.com

* 通信作者:胡甲齐(1984—),男,山东德州人,高级工程师,主要从事水工环地质工作;E-mail:1487811191@qq.com

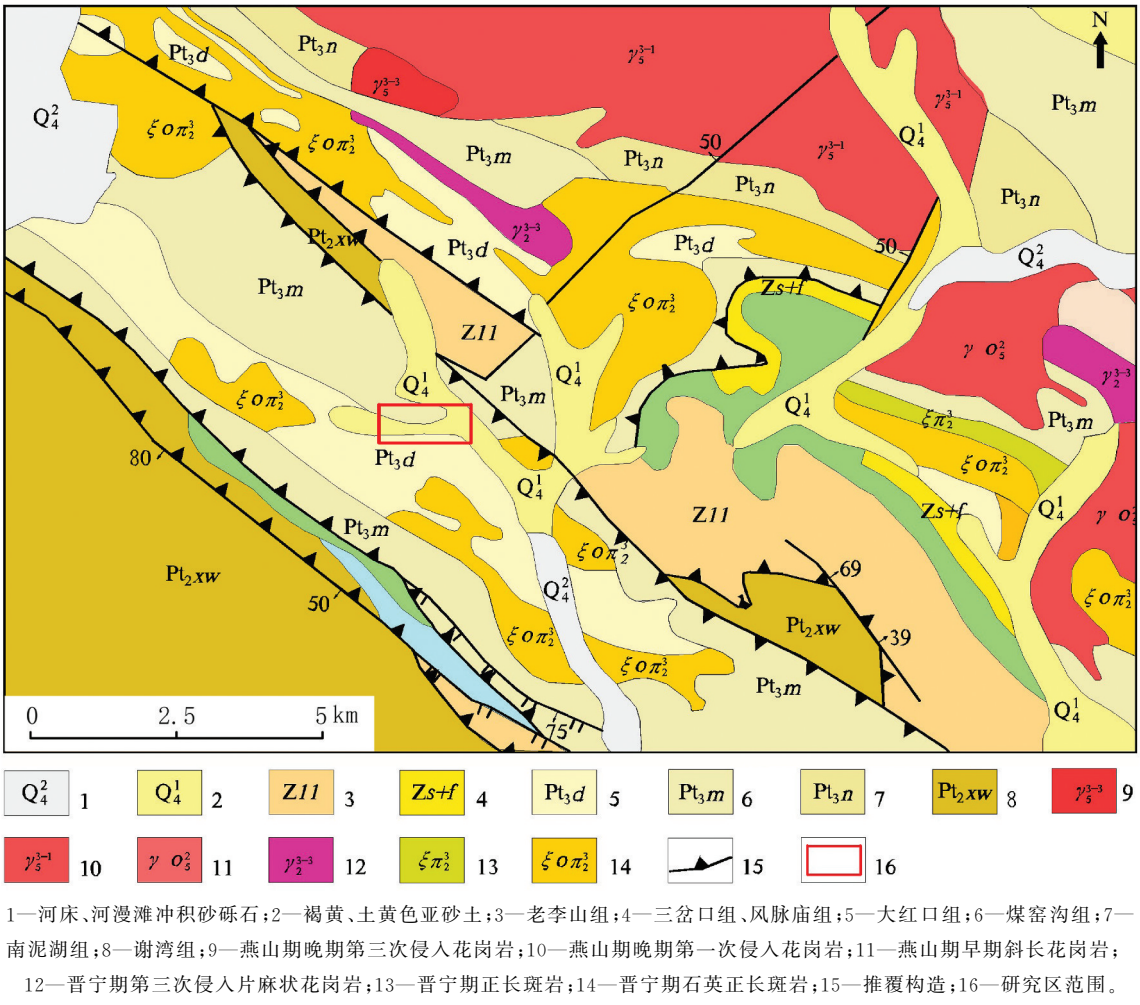


图 1 研究区区域地质图

1.1 地层特征

区域出露地层以新元古代栾川群和下古生代陶湾群和第四系为主。

栾川群:分布于矿区北中部,自下而上划分为三川组(变质砂岩、含砾砂岩)、南泥湖组(石英岩、炭质绢云石英片岩)、煤窑沟组(绢云石英片岩、大理岩)及大红口组(变粗面岩)。该套地层以富钙、硅质岩系为主,是萤石矿体的主要赋存层位。

陶湾群:分布于中部,自下而上为三岔口组(砾岩)、风脉庙组(石英砂岩、泥质粉砂岩)及秋木沟组(条带状灰岩),以碎屑岩-碳酸盐岩建造为特征,局部受构造推覆作用叠置于秦岭宽坪群之上。

第四系:广泛覆盖于河谷及沟谷地带,由砾石、砂土及黏土组成,厚度不均,是研究区内浅覆盖区寻找隐伏萤石矿的重要区域。

1.2 构造

区域构造受控于栾川-维摩寺深大断裂,以逆冲推覆与韧性剪切为主导。

断裂系统:老李山逆冲断层、小立山逆冲断层及郭沟韧性剪切带构成主要构造边界,将华北地台南缘分割为多个逆冲岩席,控制矿体空间展布。

褶皱构造:发育柳树沟-三道河向斜、潘坪-小店背斜等 NW 向褶皱,与断裂共同构成“断-褶”耦合体系,为热液运移及矿体定位提供通道与容矿空间。

1.3 岩浆活动

区域岩浆活动强烈且多期次,包括中元古代—燕山期侵入岩及火山岩。

侵入岩:以中元古代王家营花岗斑岩、晚元古代双山正长岩及燕山期四里店斜长花岗岩为代表,多沿构造薄弱带侵位,为成矿热液活动提供热动力条件。

火山岩:发育熊耳群中性熔岩、栾川群粗面岩及

二郎坪群细碧-石英角斑岩系,局部与萤石矿化存在时空及成因联系。

1.4 成矿地质条件

萤石矿体严格受 NW 向断裂-裂隙系统控制,赋存于栾川群二云石英片岩夹炭质页岩中。成矿作用与构造破碎带内的热液活动密切相关,表现为沿断裂充填的脉状、透镜状矿体,顶底板围岩具硅化、绢云母化蚀变。区域高氟背景(土壤氟化物异常显著)及钙质围岩为萤石矿化提供了物质基础,而多期构造活动则促进了成矿流体的迁移与沉淀。

2 矿床地质特征

2.1 地层

研究区主体地层为新元古代栾川群(三川组、南泥湖组、煤窑沟组、大红口组)及下古生代陶湾群(三岔口组、风脉庙组、秋木沟组)。栾川群以富钙硅质岩系(大理岩、石英片岩)为主,夹炭质页岩,构成萤石矿主要赋存层位;陶湾群以碎屑岩-碳酸盐岩建造为特征,局部受逆冲推覆作用叠覆于秦岭宽坪群之上。第四系广泛覆盖河谷,显著影响隐伏矿体勘查。

2.2 控矿构造

断裂系统:受 NW 向栾川-维摩寺深大断裂控制,发育老李山逆冲断层、郭沟韧性剪切带等,形成逆冲岩席构造,主导矿体空间展布。

褶皱体系:NW 向柳树沟-三道河向斜、潘坪-小店背斜与断裂耦合,构成“断-褶”网络,为热液运移及矿体定位提供通道与容矿空间。

裂隙带:NW 向断裂-裂隙系统直接控制萤石矿脉形态(脉状、透镜状),矿体沿走向及倾向具膨胀狭缩特征。

2.3 岩浆岩

多期次侵入岩(王家营花岗斑岩、双山正长岩、四里店斜长花岗岩)沿构造薄弱带侵位,为成矿热液活动提供热源及动力条件。

2.4 矿体特征

矿床主要赋存于新元古代栾川群,主要出露岩性为二云石英片岩夹炭质页岩、白云石大理岩等,萤石矿分布严格受 NW 向构造控制,沿走向和倾向具膨胀狭缩特征,矿体顶底板围岩为二云石英片岩夹炭质页岩、白云石大理岩等。

矿体沿断裂带充填,形态以脉状、透镜状为主,常见于 NE 或 NW 向次级断裂中,为热液充填型脉状矿床,部分矿床伴生铅锌、银等金属硫化物,显示多金属成矿特征。单矿体长 100~500 m,厚 1~10 m,延深数十至数百米,呈陡倾角(60°~80°)分布。矿石结构为自形一半自形粒状结构,块状、条带状、晶簇状构造;萤石(CaF₂)含量 30%~70%,常与石英、方解石共生。硅化、绢云母化、绿泥石化普遍,蚀变带宽约 1~5 m,与矿化强度呈正相关。矿区北部和南部已发现萤石矿体 5 条,其中 K1 规模最大,沿走向长 360 m,宽 0.4~1.8 m,深部控制深度 300 m,通过民采和巷道采掘,基本已枯竭。

3 工作方法

3.1 地球物理特征

电法勘探以视电阻率和视极化率的差异来区分岩性及构造体,根据视电阻率值和视极化率值的大小以及在地下的展布形式来识别地下地质体的空间分布及其状态和性质。影响电阻率和极化率的主要因素有岩性、岩石结构、岩层构造,含水情况等多种因素。

电性参数主要针对区内主要岩性段进行,本次工作物性测试采用重庆地质仪器厂生产的 DZD-6A 多功能电法仪,共测定各类岩样共计 150 块。由表 1 可知,不同岩性之间存在一定的电性差异,大理岩表现为高阻低极化特征,辉长岩次之,而炭质页岩表现为低阻高极化特征,萤石矿呈中阻中极化特征。

表 1 岩石电性特征统计表

岩石名称	标本块数/个	电阻率值/(Ω·m)			极化率值/%		
		ρ _{min}	ρ _{max}	ρ _{平均}	η _{min}	η _{max}	η _{平均}
大理岩	30	865	2606	1568	0.50	2.78	1.56
石英片岩	30	165	1413	842	0.62	2.94	1.83
炭质页岩	30	46	537	185	1.35	15.62	9.83
辉长岩	30	450	1796	1256	1.23	3.79	2.05
萤石矿	30	81	3567	938	1.27	7.88	5.04

标本磁性测量选用高斯第二位置,从测量结果来看辉长岩磁性最高,构造蚀变岩次之,大理岩磁性较小。区内岩(矿)石磁性强弱表现为:辉长岩>萤石矿>石英片岩>大理岩>炭质页岩(表 2)。

表 2 岩石磁物性测定结果表

岩石名称	标本块数/个	磁化率/ ($\times 10^{-6} \times 4\pi \cdot \text{SI}$)			剩余磁化强度/ ($\times 10^{-3} \text{ A/m}$)		
		最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
大理岩	30	7.3	318.3	98	18.4	448.6	116.4
石英片岩	30	2.2	464.4	122.6	32.3	203.9	119.1
炭质页岩	30	1.3	427.6	75.1	19.7	555.7	130.1
辉长岩	30	52.3	5836.7	1662.7	37.1	2892.3	585.3
萤石矿	30	22.3	1604.6	347.6	58.7	1246	343.2

3.2 岩石化学特征

萤石(CaF₂)的形成通常与热液活动密切相关,其成矿过程受地质构造、围岩性质及流体来源的显著影响。

大理岩作为区域高钙背景的典型代表,其 CaO 含量普遍超过 20%,为萤石矿的形成提供了丰富的钙源。尽管原生大理岩中氟含量较低(通常小于 500×10^{-6}),但在构造活动带或岩浆接触带,深部热液携带的氟元素可与大理岩中的钙离子结合,沉淀形成萤石矿体。此类区域的找矿线索常表现为氟异常(超过 $1\,000 \times 10^{-6}$)与 Ca/F 比值接近 0.5(接近 CaF₂ 的理论值),且异常多沿断裂或接触带呈线状、环状分布。

石英片岩区域则以高硅铝、低钙为特征,此类岩石本身缺乏成矿所需的钙源,但在断裂带中,热液活动可将外部钙质带入,形成萤石-石英脉。

炭质页岩因富含有机质(TOC>2%)而具有较强的吸附能力,其氟含量可达 $(500 \sim 2\,000) \times 10^{-6}$,但这种富集多与有机质吸附或黄铁矿伴生有关,并非直接成矿标志。若炭质页岩发育于灰岩夹层或断裂带附近,热液活动可能将外部钙源引入,形成萤石矿化。

辉长岩作为基性岩类,其 CaO 含量为 8%~14%,虽低于碳酸盐岩,但仍可成为局部钙源。辉长岩区氟含量通常低于 200×10^{-6} ,但若经历热液蚀变或与富氟流体(如花岗岩热液)相互作用,可能在岩体边缘或接触带形成萤石矿化。

已知矿体产于断裂构造带中,具高氟高钙的地球化学特征,因此,利用地球化学方法能够高效定位萤石矿体,为资源勘探提供科学依据。

3.3 物化探方法选择

方城县萤石矿成矿受“构造-岩浆-地层”三位一体控制,NW 向断裂系统为关键控矿要素,富钙硅质

围岩及热液活动共同驱动矿化富集。覆盖层与微弱物性差异是勘查主要难点,需依托综合物化探技术突破多解性限制。

已知矿体表现为中阻中极化弱磁的地球物理特征和高氟高钙的地球化学特征,矿区中部地表大部分被第四系覆盖,因此选用综合物化探方法寻找浅覆盖区萤石矿^[9-18],利用土壤化探、激电中梯和高精度磁测工作,圈定物化探异常;利用激电测深推测隐伏矿体的空间位置。

1:5 千高精度磁测:此项工作与 1:2 千地质测量同时开展,目的是通过对矿区的磁测资料进行各种处理及转换,圈定磁异常,对地层界线、断裂构造等进行解释推断。

1:5 千激电中梯测量:此项工作在 1:5 千高精度磁测完成后开展,目的是通过激电中梯测量工作,结合磁测成果,综合推断断裂构造、划分岩性地层,根据已知萤石矿磁电特征,圈定找矿靶区。利用 1:2 千地物化探剖面 and 激电测深工作,进一步解剖矿体的空间位置。

利用“激电-磁测互补”技术体系,使激电与磁测数据深度融合,减少物探异常多解性,提升找矿勘查精度。其技术优势说明见表 3。

表 3 “激电-磁测互补”技术体系优势说明表	
优势	说明
抑制多解性	激电异常(电性)与磁异常(磁性)联合分析,排除单一物性干扰体(如炭质页岩、基性岩)
提升深部探测能力	磁测延拓分离深浅异常,激电测深反演垂向结构,联合寻找浅覆盖隐伏矿体
优化效率节约成本	地面网格化同步测量(激电+磁测),减少重复工作,适用于大面积覆盖区快速扫面

3.3.1 激发极化法测量工作

中间梯度法在物探勘查中已经是一种非常成熟的方法^[19-21],其最大优点在于一次性探查区域面积大,且能够实现多次同步观测结果,从而确保探测结果的完整性和准确性。由于其工作面积大、工作效率高,中间梯度法得到了广泛的认可和使用,在找矿和工程勘察中发挥着重要的作用。

本次工作中梯装置采用 AB(供电极距)=1 200 m、MN(测量极距)=2 倍点距=40 m。观测范围<2/3AB,旁侧距不大于 200 m。

激电测深采用不等比对称四极法,不等比装置的测量极距 MN 与供电极距 AB 的比,一般保持在 1/3~1/30 的范围,本次工作采用如表 4 的测深极距。

表 4 激电测深极距表						单位:m
AB/2	3	5	9	15	25	40
MN/2	1	1	1	1		
			3	3	3	3
AB/2	65	100	150	230	340	500
MN/2	3	3				
	20	20	20	20	20	20

激电工作供电脉宽 4 s×4 s,延时 200 ms。野外工作选择极差<1.5 mV、内阻<1 000 Ω的不极化电极配对进行测量,每个装置的观测前后都进行 AB 和 MN 导线的对地绝缘电阻的检查,从而保证了 AB 导线绝缘电阻>2 MΩ,MN 导线的绝缘电阻>5 MΩ。

3.3.2 高精度磁法工作

高精度磁测选用加拿大 GEM 公司生产的 GSM-19T 质子磁力仪,每日开工前,先架好日变站,日变站工作早于开工前,晚于收工后,日变观测间隔 10 s。野外作业时,探头方向保持一致向北,观测员观测时的相对位置一致,并且所有操作员均进行了严格的去磁,使所有测点保持同样的观测条件。

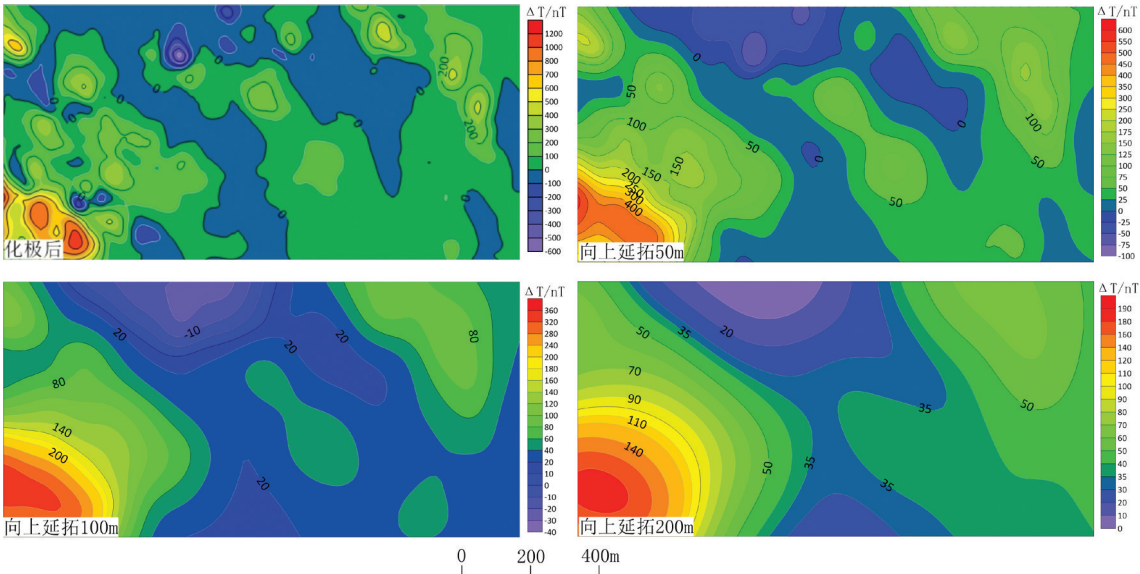


图 2 高精度磁测 ΔT 等值线平面图

测区内 ΔT 最大值为 1 066.4 nT,最小值为 -997.43 nT,平均值 49.5 nT。ΔT 值一般在-100~100 nT 之间,磁场变化较小;ΔT>100 nT 后,其磁场值快速升高,形成局部高磁异常特征;而 ΔT<-100 nT在测区少数地区出现,形成零星低值区。

对磁测数据进行化极后,高磁异常与地质体的对应更准确,向上延拓压制浅部磁干扰异常,反映深

3.3.3 土壤化探工作

土壤化探主要用于配合物探方法追索异常源,采样点距为 10~20 m。在采样点周围 5 m 范围内采样,样品由 3~5 个分样组成。采样避免各种污染,遇有废石堆、崩积物、河床堆积等不能取样时弃点,且在记录中注明。

根据区内已往实验结果,采样深度确定为距地表 20~50 cm 深处土壤的 B 层(淋积层)或 C 层(母质层)中的细粒级物质,避免采集耕植层。野外采样重量 700 g 以上,样品加工后正、副样重量为 200 g。

4 资料解译与分析

4.1 高精度磁测

宏观上,磁场值西南部最高,推测为侵入岩类辉长岩引起;中部、东北部高磁异常呈带状或串珠状分布(图 2),整体走向呈 NW 向,与区域构造走向一致。矿区中部呈大面积弱磁异常,推测为石英片岩和炭质页岩的反映。

部地质体的磁场特征。通过向上延拓 50 m、100 m、200 m情况来看,西南、东北部高磁异常延拓 200 m 后仍然存在,推测为基性岩体;而中部局部高磁异常消失,推测为浅部磁性体或构造带内充填磁性物质的反映。萤石矿基本赋存于负磁异常区。

4.2 激电中梯

从激电中梯视极化率等值线平面图(图 3)可以

看出,全区视极化率表现为 3 种形式。其一为大面积视极化率小于 5% 的背景值,其代表岩性为石英片岩、大理岩、辉长岩等;其二为中部、东南部视极化率介于 5%~8% 之间的条带状 NW 走向的异常带

(DJH1、DJH3),推测为构造带内含炭质页岩所引起;其三为东北部视极化率大于 8% 的带状异常(DJH2),其岩性为炭质页岩。

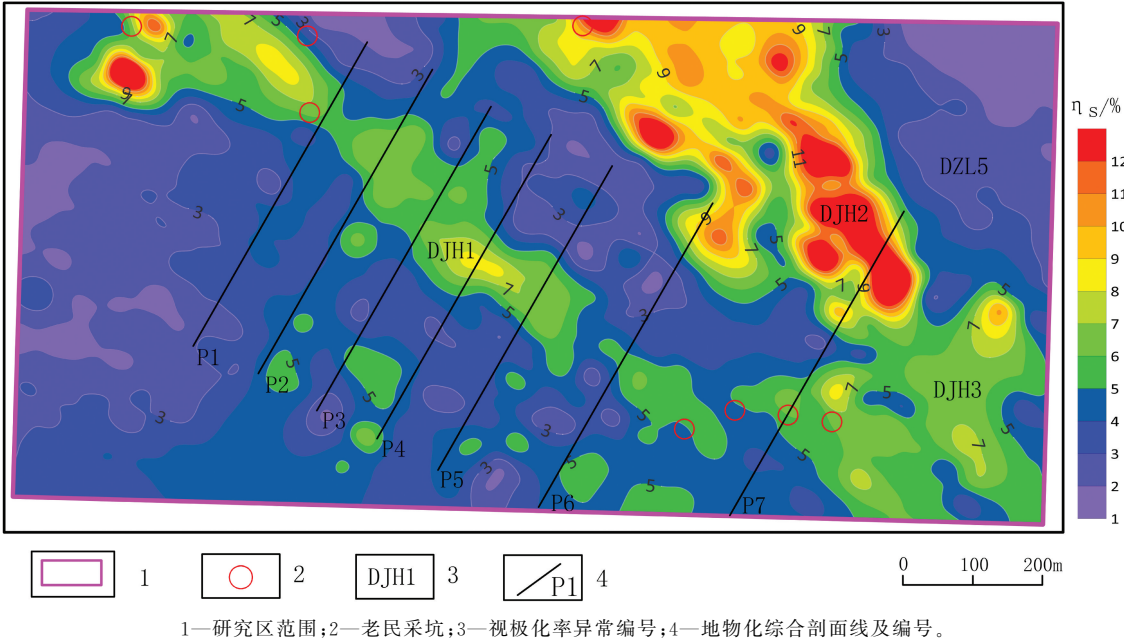


图 3 激电中梯测量视极化率等值线平面图

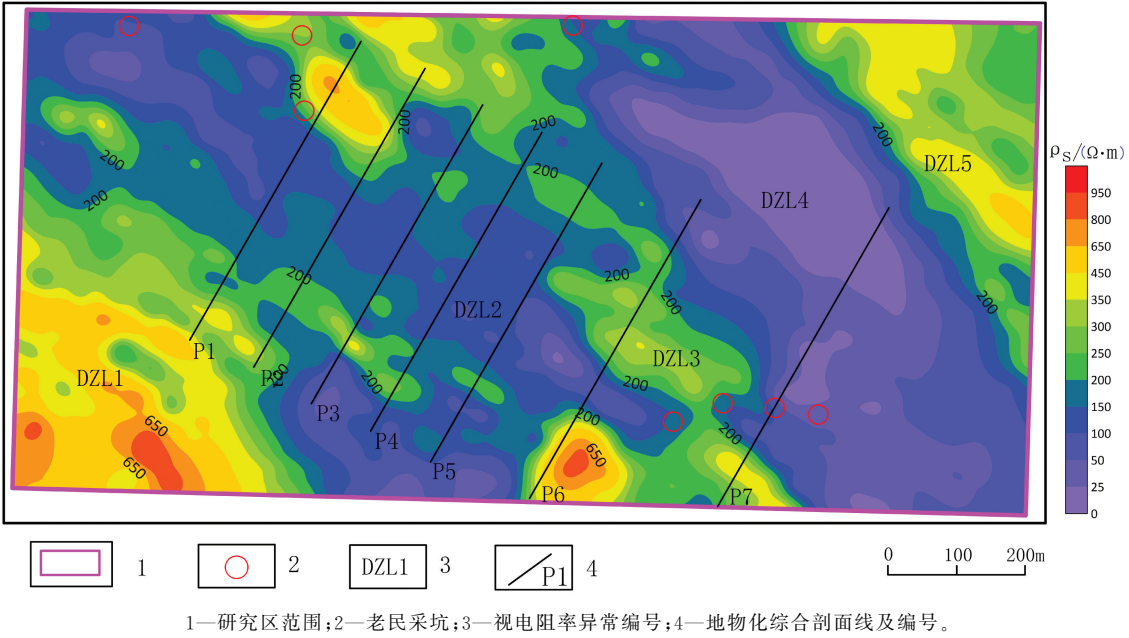


图 4 激电中梯测量视电阻率等值线平面图

从激电中梯视电阻率等值线平面图(图 4)中可以看出,测区电阻率值较低,均在 $1\,000\,\Omega\cdot\text{m}$ 以下。低阻区呈两种形态,其西南部低阻区一般在 $100\sim150\,\Omega\cdot\text{m}$ 之间(DZL2),对应视极化率为低

极化特征,表现为石英片岩的电性特征;其东北部低阻区一般在 $100\,\Omega\cdot\text{m}$ 以下(DZL4),对应视极化率为高极化特征,表现为炭质页岩的电性特征。高阻区呈 3 种形态,其西南部面状高阻区一般在

400 Ω·m 以上(DZL1),对应的极化率呈低极化特征,表现为辉长岩的电性特征;其中部带状高阻区一般在 200~350 Ω·m 之间,局部零星高阻区大于 250 Ω·m(DZL3),对应视极化率呈高极化特征,推测为构造带内含炭质页岩及白云质大理岩所引起;东北部高阻区一般大于 200 Ω·m(DZL5),对应视极化率呈低极化特征,推测为白云大理岩所引起。

通过对已知矿体激电异常特征研究,认为含萤石矿构造带电性特征表现为中阻中极化特征,即视电阻率介于 150~300 Ω·m 之间,视极化率介于 5%~8% 之间。

根据矿体特征来看,萤石矿分布严格受构造控制,沿走向和倾向具膨胀狭缩特征,矿体顶底板围岩为二云石英片岩夹炭质页岩、白云石大理岩等,根据物性特征,其表现为中阻中极化特征,这与地面激电异常特征相吻合。

4.3 地物化综合剖面

为进一步分析第四系覆盖区萤石矿体的连续性,自西北向东南布设了 7 条地物化剖面工作,根据已知矿体电、磁性和土壤化探特征,经综合分析地质、化探、激电和高磁等综合信息,圈定矿体 5 条。

由 P2 线物化剖面为例(图 5):0~220 点浅部和深部均表现为低阻低极化电性特征,推测为二云石英片岩的反映;220~500 点标高 50 m 以浅表现为高阻低极化,推测为白云石大理岩的反映;标高 50 m 以深表现为低阻高极化,推测为炭质页岩的反映。其中 420~440 点,表现为低阻低极化负磁的地球物理特征,土壤氟化物值达 $6\,667.6\times 10^{-6}$,推测为构造破碎带的反映,萤石矿化强烈。

4.4 异常查证

(1)靶区筛选

基于综合物化探异常(高阻中极化、弱磁、高氟钙)的空间叠合特征,结合区域地质构造分析,优先选择异常强度高、与已知矿体地球物理-地球化学特征一致的 4 处靶区(TK2~TK5)进行验证(图 6)。验证依据包括:

物探异常匹配度:靶区视电阻率(150~300 Ω·m)与极化率(5%~8%)和已知矿体电性特征一致;

磁异常分带性:靶区位于负磁异常区($\Delta T<-100\text{ nT}$),与深部基性岩体高磁异常($\Delta T>$

500 nT)分界明显;
化探异常强度:土壤氟化物含量显著高于背景值(峰值达 $6\,667.6\times 10^{-6}$),钙元素异常与大理岩围岩分布吻合。

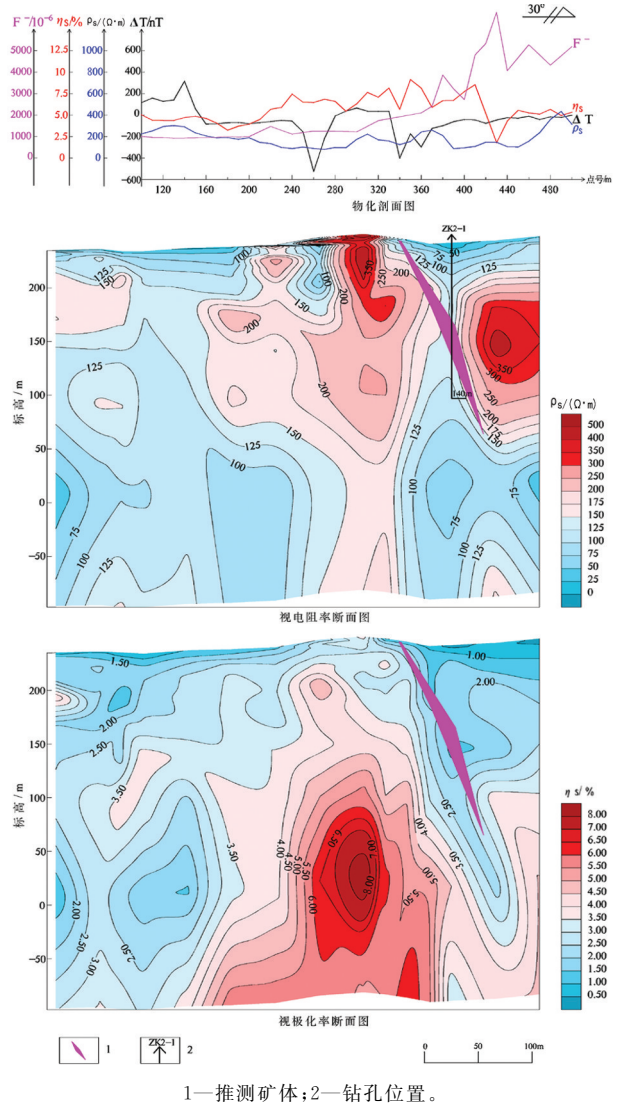


图 5 P2 线物化剖面及激电测深断面图

(2)验证工程布设与实施

钻孔布设:沿物化探异常梯度带及构造破碎带走向布设 7 条物化综合剖面,垂直异常走向布置钻孔,孔深设计 80~120 m,覆盖异常核心区及边缘过渡带。

钻探参数:采用 XY-44 型钻机,全孔取心,岩心采取率 $\geq 85\%$ 。

编录与测试:详细记录岩心蚀变(硅化、绢云母化)、矿化(萤石脉宽度、品位)及构造特征,同步开展

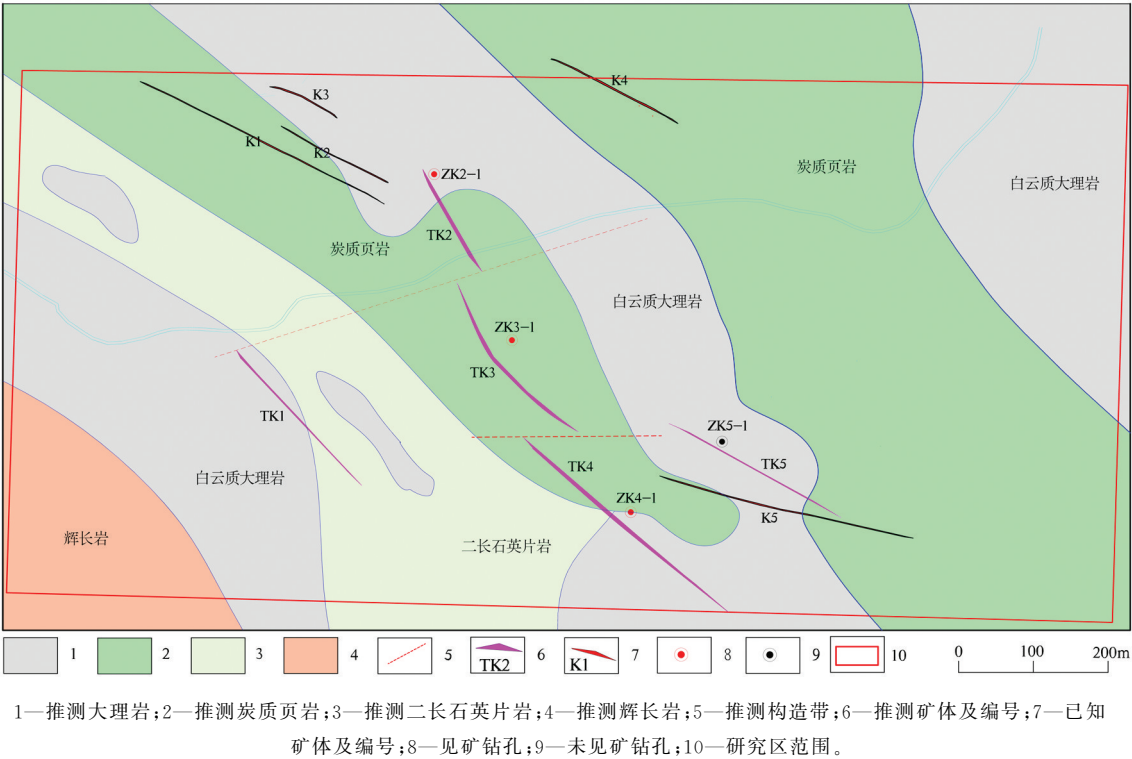


图 6 成果推断图

岩石物性(电阻率、极化率)及地球化学(氟、钙等含量)测量。

(3)综合剖面解析与异常解剖

物化剖面整合:以 P2 线为例,结合 100~500 点高精度磁测、激电中梯、激电测深及土壤化探数据,构建三维地球物理-地球化学模型。结果显示:

220~440 点段低阻低极化带(视电阻率<200 Ω·m,极化率<5%)对应石英片岩围岩;

420~440 点段低阻高极化(极化率>6%)与氟化物异常(>5 000×10⁻⁶)耦合,揭露萤石矿体(真厚度 3.8 m,CaF₂ 平均品位 65%)。

构造-矿化关联:验证发现矿体集中分布于 NW 向断裂破碎带内,与激电异常带(中阻中极化)及磁异常梯度带重合,证实构造控矿主导性。

(4)验证结果与异常成因判定

矿体揭露情况:TK2、TK3、TK4 钻孔揭露隐伏萤石矿体,埋深 36.5~52.3 m,平均真厚度 4.2 m,CaF₂ 品位 55%~72%,矿体呈脉状充填于构造破碎带;TK5 钻孔揭露构造蚀变岩(萤石化、硅化),未达工业品位,反映异常边缘矿化减弱特征。

异常成因厘定:高氟钙异常:源自萤石矿化流体沿断裂迁移,在炭质页岩屏蔽下富集;中阻中极

化异常:由萤石矿脉(高阻)与围岩碎裂带(低阻)电性差异叠加引起;弱磁异常:矿化区磁性矿物(如黄铁矿)含量低,且受深部基性岩体高磁背景压制。

5 结果分析

5.1 三位一体成因模式解析

(1)构造控矿

主导构造体系:矿体严格受 NW 向断裂系统(如栾川-维摩寺深大断裂、老李山逆冲断层)控制,断裂破碎带为热液运移提供通道,次级裂隙带(NE 或 NW 向)成为矿体定位空间。

构造活动期次:多期构造活动(逆冲推覆、韧性剪切)导致岩石破碎,形成高渗透性带,促进含矿热液循环。

构造-矿化耦合:矿体沿断裂带呈脉状或透镜状分布,走向与区域构造一致(NW 向),倾角陡峭(60°~80°),矿体厚度变化与断裂带局部扩容相关(如膨胀狭缩特征)。

(2)地层容矿特征

赋矿层位:矿体主要赋存于新元古代栾川群二云石英片岩夹炭质页岩中,该岩性组合具以下优势:化学容矿性:炭质页岩富有机质(TOC>2%),

吸附富集氟元素；二云石英片岩提供硅质，与热液中的 Ca^{2+} 结合形成萤石(CaF_2)。

物理容矿性：片理发育的片岩及脆性炭质页岩易受构造应力破碎，形成孔隙网络，利于矿液充填。

围岩蚀变：硅化、绢云母化、绿泥石化普遍，蚀变带宽 1~5 m，与矿化强度正相关，指示热液活动对围岩的改造。

(3)热液成矿过程

热液来源：与区域多期岩浆活动(如王家营花岗岩斑岩、双山正长岩)相关，岩浆热液提供成矿物质(F^- 、 Ca^{2+})及热动力条件。

成矿流体演化：深部富氟热液沿断裂上升，与围岩(大理岩、石英片岩)发生水岩反应， Ca^{2+} 从大理岩中淋滤，与 F^- 结合沉淀形成萤石。

成矿阶段：早期高温热液形成粗粒萤石-石英脉；主成矿期中低温热液充填构造裂隙，形成细粒萤石-方解石共生组合；晚期表生作用导致萤石晶簇发育。

5.2 “高阻中极化-弱磁-高氟钙”综合识别标志

(1)地球物理标志

高阻中极化特征(视电阻率 150~300 $\Omega \cdot \text{m}$ ，视极化率 5%~8%)

成因：萤石矿脉(高阻)与围岩碎裂带(低阻)叠加，炭质页岩夹层(高极化)增强极化效应。

定量阈值：视电阻率 $>150 \Omega \cdot \text{m}$ (围岩石英片岩背景值 $<100 \Omega \cdot \text{m}$)；视极化率 5%~8%(背景值 $<5\%$ ，炭质页岩异常 $>8\%$)。

弱磁异常($\Delta T < -100 \text{ nT}$)

成因：矿体含磁性矿物(如黄铁矿)极少，且深部基性岩体(辉长岩， $\Delta T > 500 \text{ nT}$)高磁背景压制。

定量指标：磁异常梯度带(ΔT 变化率 $>50 \text{ nT/km}$)指示矿化构造边界。

(2)地球化学标志

高氟钙异常(氟 $>1\,000 \times 10^{-6}$)

氟异常：土壤氟化物峰值达 $6\,667.6 \times 10^{-6}$ ，显著高于背景值($<500 \times 10^{-6}$)，沿断裂带呈线状分布。

组合异常模式：氟钙异常与中阻中极化、弱磁异常空间叠合。

5.3 “地-物-化”协同勘查技术流程

本次工作采用地质约束物化探解译方向，减少多解性。利用物探提供深部结构，化探锁定地表矿化线索，构建了“地-物-化”协同勘查技术体系(图 7)。

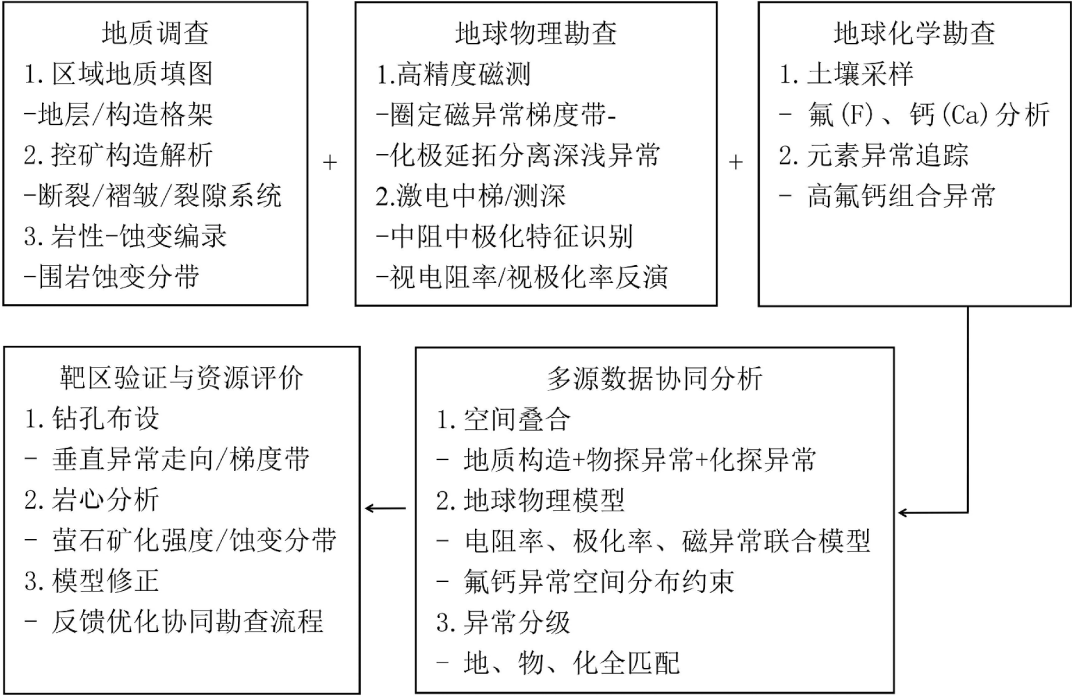


图 7 “地-物-化”协同勘查技术体系图

6 结论

在河南方城地区浅覆盖区隐伏萤石矿勘查中,利用综合物探方法与化探互补技术,能够起到事半功倍的效果,通过本次工作,得出以下认识:

(1)建立方城县萤石矿“构造控矿-岩性容矿-热液成矿”三位一体成因模式,总结了浅覆盖区隐伏萤石矿“高阻中极化-弱磁-高氟钙”综合识别标志,为隐伏矿体定位提供量化依据。

(2)提出“激电-磁测互补”技术体系,通过磁测数据化极延拓压制浅部干扰,揭示深部基性岩体与浅部矿化构造的磁场分异规律,显著降低多解性。

(3)构建“地-物-化”协同勘查技术流程,集成土壤化探异常追踪、激电参数反演及磁异常深浅部分离技术,形成适用于本覆盖区隐伏萤石矿的高效勘查方案。

参考文献:

[1] 王亚伟,史保堂,梁家乐,等.河南嵩县马石沟萤石矿床地质特征及元素地球化学特征研究[J].矿产勘查,2024,15(5):784-793.

[2] 沈瑞峰,胡亚净,王振强,等.河南栾川锅沟萤石矿地质特征及成因初探[J].中国非金属矿工业导刊,2024(1):47-50.

[3] 张六虎,李明,丁小燕.河南南阳地区某萤石矿地质调查及找矿远景预测[J].矿产与地质,2024,38(3):434-441.

[4] 赵嘉伟,李晓,刘志远,等.综合物探法在寻找隐伏半隐伏萤石矿中的应用[J].工程地球物理学报,2024,21(2):279-286.

[5] 张成信,任永健,金松,等.物化探综合找矿方法在内蒙古喀喇沁旗大西沟萤石矿找矿中的应用[J].西北地质,2024,57(4):135-143.

[6] 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.

[7] 张兴康,孙志伟,王光,等.冀北地区高立营萤石矿矿床地质特征及成因分析[J].中国矿业,2024,33(增刊1):527-531.

[8] 马红义,张博,张娅,等.河南栾川县马丢大型萤石矿矿床地质特征及其找矿潜力预测[J].中国地质,2024,51(4):1161-1174.

[9] 周立国.物探方法在青海哈得尔甘南地区寻找砂卡岩型铁多金属矿中的应用效果[J].地球物理学进展,2017,32(5):2176-2181.

[10] 张光之,周立国,王延浩.综合电法在内蒙古查敖包银铅锌矿区的应用[J].地球物理学进展,2015,30(2):867-871.

[11] 王光宇.综合物探方法在矿产资源勘查中的应用研究[J].科技与创新,2024(12):144-146.

[12] 李侠.综合物探方法在多金属矿勘查中的应用[J].世界有色金属,2023(24):136-138.

[13] 夏丽,郑泽佳.金属矿勘探中综合物探方法关键技术及效果分析[J].中国金属通报,2023(6):74-76.

[14] 张成信,任永健,金松,等.物化探综合找矿方法在内蒙古喀喇沁旗大西沟萤石矿找矿中的应用[J].西北地质,2024,57(4):135-143.

[15] 代晓光,李健,商朋强,等.冀北步古沟一带萤石矿地物化找矿技术方法组合研究[J].地质与勘探,2022,58(4):809-821.

[16] 赵嘉伟,李晓,刘志远,等.综合物探法在寻找隐伏半隐伏萤石矿中的应用[J].工程地球物理学报,2024,21(2):279-286.

[17] 王超,李科强,高晶.综合物探方法在萤石多金属普查中的应用[J].化工管理,2023(14):35-38.

[18] 贡鹏超,孙春霞,祝少辉,等.地物化综合方法在新县陡山萤石矿勘查中的探索应用[J].矿产勘查,2022,13(8):1182-1190.

[19] 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.

[20] 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.

[21] 安仰生.激电中梯测量在瑙木浑沟口金矿勘查中的应用[J].山东国土资源,2019,35(11):57-64.

Application of Integrated Geophysical and Geochemical Exploration Methods in the prospecting of a Hidden Fluorite Deposits in Fangcheng County in Henan Province

YAN Zaohua¹, HU Jiaqi¹, LI Jiaxiao², ZHU Jiangyuan¹, WANG Yanhao¹, ZHOU Yanqiang¹, YANG Bengu¹

(1. No.8 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources(No.8 Institute of Geology and Mineral Resources Exploration of Shandong Province), Key Laboratory of Nonferrous Metal Exploration and Resource Evaluation of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources,Rizhao Big Data Research Institute of Geology and Geographic Information,Rizhao Key Laboratory of Land Quality Evaluation and Pollution Remediation,Shandong Rizhao 276826,China;2. Rizhao Economic and Technological Development Zone Branch Bureau of Rizhao Bureau of Natural Resources and

Planning, Shandong Rizhao 276826, China)

Abstract: In response to the exploration difficulties of hidden fluorite deposit in shallow coverage areas, a "geological – physical – chemical" collaborative exploration system has been constructed innovatively, and high precision magnetic surveying, induced polarization, and soil geochemical exploration technologies have been integrated to reveal geophysical – geochemical response characteristics of hidden ore bodies. Through high precision magnetic survey, negative magnetic anomaly areas have been circled, and polarization bands have been identified through induced polarization gradient. Combining with fluoride calcium anomaly tracking, 5 target areas have been accurately delineated in Quaternary coverage area of Fangcheng county. It is revealed that the buried depth of the ore body is 36.5~52.3m, and the thickness is 2.6~5.2m. It is confirmed that there is a spatial coupling law between physical and chemical exploration anomalies and the concealed ore body. Geophysical and geochemical characteristics of fluorite deposits in tectonic altered rock types have been revealed. It is proposed that comprehensive geophysical methods and complementary geochemical techniques can effectively suppress ambiguity. This achievement will provide a technical solution for the exploration of concealed fluorite deposits in shallow coverage areas, and has important demonstration significance for the exploration of similar deposits.

Key words: Fluorite deposit; induced polarization ladder; induced polarization depth measurement; high precision magnetic survey; geochemical exploration of soil; Fangcheng county in Henan province