

文章编号: 1001-1749(2018)05-0681-08

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

李欣宇^{1,2,3}, 邹 灏^{1,4}, 张 强^{1,5}, 韦绍裔¹, 王良坤¹, 张 燕¹, 杨 坚¹

(1. 成都理工大学 地球科学学院, 成都 610059;

2. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 构造成矿成藏国土资源部重点实验室, 成都 610059;

5. 中国地质大学(武汉) 资源学院, 武汉 430074)

摘 要: 随着现场 X 荧光元素分析技术的发展, 便携式 X 荧光元素分析仪在野外矿产勘查工作中崭露头角。以内蒙古乌力吉敖包浅覆盖区的萤石矿为基础, 开展现场 X 荧光勘查验证工作, 通过元素异常分析和矿区实际情况对比得出以下结论: ①便携式 X 荧光元素分析仪在浅层覆盖区勘查中具有较高的效率与精度; ②连续的 Ca 元素异常对萤石矿脉具有良好的指示作用; ③化探方法存在一定多解现象, 但根据矿床类型并结合其他勘查方法可排除多解区域。

关键词: 现场 X 荧光元素分析; 萤石; 甚低频电磁法; 勘查; 内蒙古

中图分类号: P 632 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1749.2018.05.18

0 引言

萤石作为一种重要的战略性非金属矿产, 被广泛应用于冶炼、玻璃、陶瓷等工业^[1]。内蒙古地区不同规模的断裂构造和岩浆活动分布广泛, 为我国萤石矿产的重要产出区。草原面积广大且地形平坦, 但草场覆盖严重导致矿体绝大部分处在较浅的隐伏状态, 找矿工作难以开展, 对于高效率的找矿方法方面还在不断探索中, 需开展多次现场验证与效果分析。

X 荧光元素分析技术早先应用于野外取样带回分析, 根据元素异常开展进一步找矿工作。方乙、张

鹏等^[2-3]利用便携式 X 荧光元素分析仪在内蒙古赤峰市林西地区进行萤石勘查工作, 证明了其应用的有效性; 赵春江等^[4]采用携带式 X 荧光仪对土壤样品进行测量, 有效地发现隐伏花岗岩铀矿异常。随着 X 荧光技术的发展, 现场 X 荧光元素分析技术取得较大进展, 精度方面也在不断提高, 有望成为浅层覆盖区找矿的有利手段。

笔者以内蒙古乌力吉敖包萤石矿为例, 利用便携式 X 荧光元素分析仪对浅层覆盖区进行野外实地测量与后期成图, 并与矿区的实际情况进行对比, 再结合甚低频电磁法的勘查情况进行综合分析, 总结和评价便携式 X 荧光元素分析仪在矿产勘查中的效果。

收稿日期: 2017-06-02

基金项目: 资源勘查工程专业教育部卓越工程师教育培养计划项目(11100-18Z0524); 成都理工大学优秀创新团队培育计划项目资助(JXTD201704); 四川省虚拟仿真实验教学中心(11100-18Z0530); 国家自然科学基金(41702108); 四川省教育厅重大培育项目(18ZD0009)

第一作者: 李欣宇(1996-)男, 硕士, 主要从事资源勘查工程固体矿产工作, E-mail: Lxy199601@sina.com。

通信作者: 邹灏(1986-)男, 博士, 副教授, 主要从事矿产勘查与评价的研究工作, E-mail: zouhao21@sina.com。

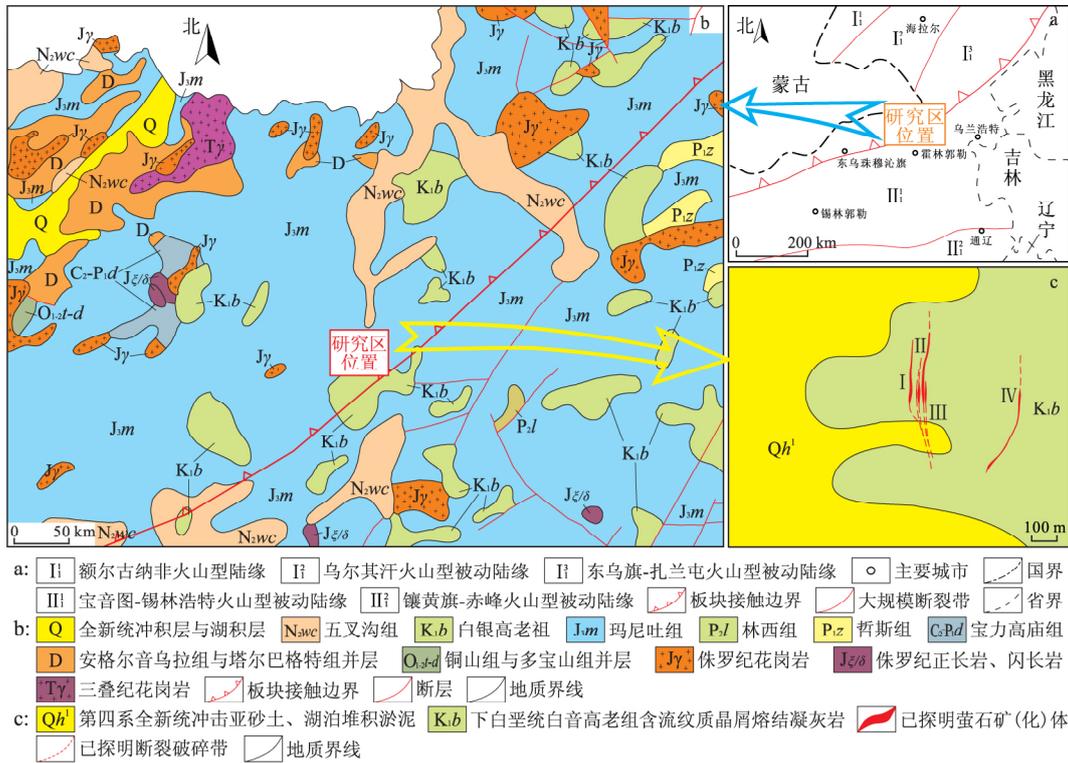


图 1 区域构造地质图及矿区地质图

Fig. 1 Geological map of regional tectonics and sketch of fluorite deposit
 (a) 研究区大地构造位置; (b) 研究区区域地质图; (c) 矿区地质图

1 地质概况

1.1 大地构造背景

乌力吉敖包萤石矿位于西伯利亚板块东南大陆边缘增生带附近,与华北板块西北部大陆边缘增生带的交界部位(图 1(a)),二连浩特—贺根山深大断裂附近^[5]。主要出露中、新生代地层,其中侏罗纪、白垩纪和新近纪地层分布广泛,部分被第四系覆盖(图 1(b))。燕山时期主要发育杂色陆源碎屑岩,受太平洋板块挤压作用的影响,在中侏罗世形成较多的小型断陷盆地和山间盆地,其中较大型的断裂周围广泛分布小规模断裂,后沿霍林河—乌兰浩特一带发育小规模火山活动,地层发生抬升剥蚀;晚侏罗世至早白垩世火山活动强烈,导致大量断裂、褶皱的发育和频繁的火山岩浆活动。燕山期的构造和岩浆作用在该区域形成多条地壳和超壳断裂^[6],存在大量岩浆和汽水热液上涌现象,伴有铜、铅、锌、萤石和稀土等矿产的形成,对于萤石的成矿条件十分有利。后期又发生抬升作用,地形平坦开阔,找矿前景巨大。

1.2 矿区地质特征

工作区属于滨太平洋构造域,区内褶皱不发育,

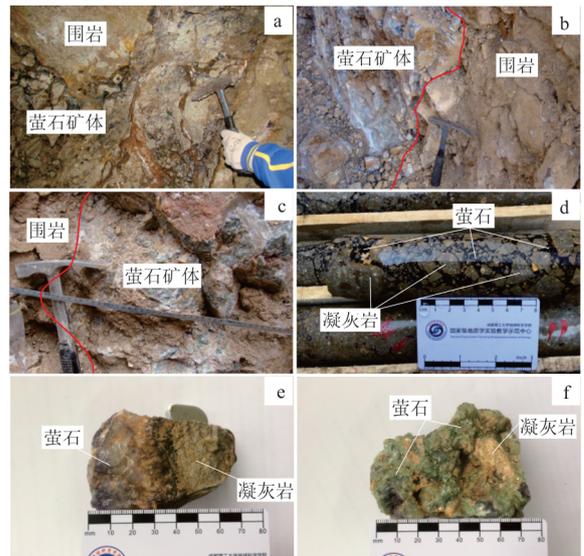


图 2 萤石矿体与矿石特征

Fig. 2 The characteristics of fluorite ore deposit and mineral
 (a) 斜井下矿脉; (b)、(c) 萤石与围岩界限;
 (d) 钻探岩心; (e)、(f) 萤石矿石

小规模断裂较多,构造迹线呈 NNE 向。主要发育中酸性火山岩、火山碎屑岩夹火山碎屑沉积岩建造,侵入岩不发育,地层主要为下白垩统白音高老组

(K_1b),岩性主要为晶屑熔结凝灰岩,SHRIMP 年龄为 133 Ma ~ 129 Ma^[7];西北和西南地区可见第四系全新统(Q_4l),主要为冲积亚砂土和湖泊堆积淤泥等。矿区内草场大面积覆盖,覆盖物的成分主要为细砂和粘土,深度 2 m~10 m 不等,属于浅层覆盖区,部分地表出现零星萤石矿化,风化严重。

1.3 矿床地质特征

萤石矿体赋存在下白垩统白音高老组(K_1b)晶屑熔结凝灰岩中,受断裂控制明显;根据前期主、微量元素分析工作和流体包裹体岩相学特征,已知该矿床的成因类型为浅成低温热液裂隙充填型矿床。该矿区已经进行了探槽和钻探工程,并有一口斜井垂直地面深度为 50 m,内部见数米宽萤石矿脉(图 2(a)),基本确定了区内萤石矿脉的分布与规模,但未投入开采,除少量局部已复垦的探槽工程,绝大部分

地表处于自然风化或沉积状态。矿区内部共发现有 4 条萤石矿体(图 1(c)和表 1):中部矿体(I, II, III)呈 N-S 走向,倾角 $45^\circ \sim 65^\circ$,矿体厚度约 3.7 m~4.5 m;矿区东部矿体(IV)呈 N-S 至 NNE-SSW 走向,倾角 $61^\circ \sim 64^\circ$,矿体厚度约 4.6 m;矿体呈似层状-透镜状产出,夹有大量凝灰岩角砾,呈现由断裂带中间向两端尖灭的形态,与围岩界限明显(图 2(b),图 2(c))。矿石成分主要为萤石和凝灰岩(图 2(e),图 2(f)),含少量石英、高岭土和蛋白石等。萤石主要呈脉状、条带状和角砾状(图 2(a),图 2(d),图 2(f)),颜色为紫色(图 2(e))、绿色(图 2(f))、白色和黄褐色等,伴随有一定的硅化(石英和蛋白石化)、高岭土化和褐铁矿化。围岩蚀变以硅化和高岭土化为主,其次发育绢云母化,蚀变具分带性。

表 1 萤石矿脉形态特征

Tab.1 The characteristics of fluorite vein in study area

编号	规模/m		产状 /°			矿石成分
	长度	厚度	走向	倾向	倾角	
I	270	3.7	N-S	W	$45 \sim 56^\circ$	萤石、凝灰岩、石英、高岭土
II	280	4.5	N-S	W	$58 \sim 62^\circ$	萤石、凝灰岩、石英、高岭土
III	200	4.4	N-S	W	$58 \sim 65^\circ$	萤石、凝灰岩、石英
IV	250	4.6	NE-SW	NW	$61 \sim 64^\circ$	萤石、凝灰岩、石英

2 发展及工作原理

2.1 发展状况

X 荧光元素分析技术最早发展于 20 世纪 50 年代末至 60 年代初期,其物理基础是基于近代原子物理学中的“莫塞莱定律”,其特征 X 射线的能量和强度与测试样品中所含元素的种类和含量有关,通过测定的特征 X 射线能量和强度就能实现对元素的定性、定量分析^[8-9]。现场 X 射线荧光分析方法的准确度一般均逊于室内大型分析仪器和化学分析方法,这也是现场 X 射线荧光分析仪器和方法技术不断改进和完善的技术目标,但便携式 X 荧光元素分析仪具有携带方便、分析速度快(1min 左右)、分析范围广(主量、微量元素)和测量对象多(岩石、矿石、土壤等)的特点,被广泛应用于地质矿产勘查中现场多元素快速分析和环境污染调查中有毒有害元素的快速分析等多个领域^[10-14]。

2.2 工作原理

X 射线荧光,是高能量子与原子发生相互作用的产物。当 X 射线照射样品时,其中原子的外层电子从高能层跃迁至 K 或 L 的低能壳层空间,并以辐射出 X 射线的形式释放能量,其释放的能量等于跃迁能级间的能量之差,由于不同原子的能层不同,因此释放的能量也不同,称为元素的特征 X 射线。X 射线的能量 E_x 与原子序数 Z 的平方成正比。因此,特征 X 射线的能量可确定发出 X 射线的元素^[15]。而在一般情况下,样品中元素的特征 X 射线强度与元素含量成正比,据此通过对样品中某种元素特征 X 射线强度的测量,便可得知该元素的含量^[8-9]。

便携式 X 荧光元素分析仪对诸多元素存在较好的定性和定量分析能力,通过研究区野外实地测量和室内计算机数据处理成图,可迅速圈定元素异常区域,为区域性特定元素异常分析的重要测量设备。

3 勘查应用

3.1 前期踏勘及工程布置

研究区面积约为 3 km², 平坦开阔, 地形起伏较小, 全区被草原植被覆盖(图 3(a)), 覆盖层平均厚度约为 7 cm, 淋溶层平均厚度约为 25 cm, 淀积层平均厚度一般在 20 cm 以上; 土壤分层因地势情况存在一定厚度差异, 局部地势较高区域基岩(凝灰岩)直接裸露于地表且风化严重。岩石露头可见断裂破碎带或节理(图 3(c)), 部分裂隙中出现少量萤石矿化(图 3(b)), 构造迹线呈 N 至 NNE 向(图 3(d)), 符合现场 X 荧光元素分析法的应用条件。

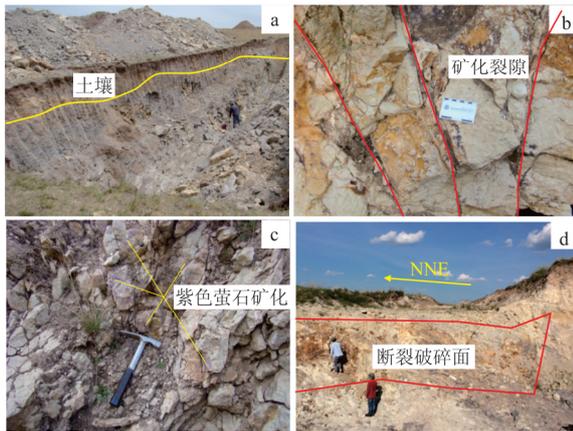


图 3 萤石矿化及构造情况

Fig. 3 The fluorite features of the mineralization and structure

- (a) 探槽工程; (b) 萤石矿化节理;
(c) 地表节理与萤石矿化; (d) 主要断裂破碎面

本次勘查工作采用成都理工大学研制的第三代便携式 X 射线荧光光谱仪 IED-2000T, 主要由主机和探头构成。主机运行 Windows 掌机操作系统并嵌入 GPS 导航芯片, 探头为电致冷 Si-PIN 半导体探测器。该仪器可自动计算多种目标元素的含量, 有高水平的野外现场数据采集、分析和处理能力; 通过无线技术连接, 操作界面简洁明了, 在野外使用方便快捷。具有原位、快速、无损的多元素同时测定的特点, 应用领域广泛^[16]。

根据研究区构造迹线的方向和萤石矿体的分布, 自北向南布置了 8 条 W-E 向勘探线(L5、L3、L1、L0、L2、L4、L6、L8), 长度均在 1 150 m 以上, 平均约 1 360 m, 勘探线间距为 200 m, 测点间距为 10 m。在用罗盘和测绳测定测点的同时, 辅以手持 GPS 检测, 确保测点定位的准确性。本次采样挖取约 40

cm 深的草原淀积层土壤(B 层), 部分地势较高、土壤层薄的区域测量浅部土壤, 测量时间为 100 s, 本次测量有效测点共 979 个, 历经约 15 d 完成。

3.2 数据处理

IED2000T 型便携式 X 荧光元素分析仪, 可以对 K、Ca、Sc、Ti、V、Cr、Mn、Fe 等多元素进行含量测定, 由于该区萤石矿床属于低温热液裂隙充填型矿床, 成矿过程中会形成 Ca 和 F 的原生晕元素异常^[17], 故选取 Ca 元素数据进行分析。为降低测量偶然因素影响和便于实验数据分析, 根据已得实验数据运用迭代法对工作区的 Ca 元素的背景值和异常下限进行计算^[18], 经过 7 次迭代求得背景值为 1.098 206%, 异常下限为 2.194 367%。根据 Ca 元素的异常值和异常下限使用 Origin 绘制勘探线元素异常曲线图(图 4)和使用 Surfer 绘制区域元素异常的平面等值线图(图 5), 并在图中标记元素异常下限。

3.3 结果分析

便携式 X 荧光元素分析仪主要通过探测区内 Ca 元素含量, 确定可能存在萤石矿体的地区, 缩小找矿靶区范围再开展下一步勘探工作, 从而达到找矿的目的。在由实测数据和元素异常下限绘制曲线图中, 明显高于异常下限的地区为萤石矿体的可能赋存区域, 本次选取穿过已知萤石矿脉的 L1、L0 和 L2 号勘探线, 与相应的勘探线剖面图进行对比分析(图 4)。

图 4(a)显示其西部 400 m~500 m 处、中部 780 m~900 m 处和 1 000 m 附近与东部 1 150 m~1 300 m 处均出现较高的 Ca 元素异常。与实际矿区内已发现萤石矿脉的位置对比发现, 中部 780 m~900 m 处异常对应矿区的 I、II 和 III 号矿脉, 东部 1 150 m~1 300 m 处对应 IV 号矿脉向北延伸歼灭的萤石矿化裂隙, 而单峰异常的西部 400 m~500 m 处和中部 1 000 m 附近的异常无对应矿脉。

图 4(c)显示其中部 760 m~880 m 处和东部 1 050 m 附近出现较高的 Ca 元素异常, 而西部异常较低或无明显异常。与勘探线剖面简图(图 4(d))对比发现, 中部 760 m~880 m 处异常对应矿区的 I、II 和 III 号矿脉, 东部 1 050 m 处异常无对应矿脉, 另外发现 1 200 m 附近的 IV 号矿脉未显示有明显的 Ca 元素异常。

图 4(e)显示其中部 780 m~900 m 处出现较高的 Ca 元素异常, 东部 1 060 m~1 280 m 处间断出现中等 Ca 元素异常, 西部无明显异常。对比发现

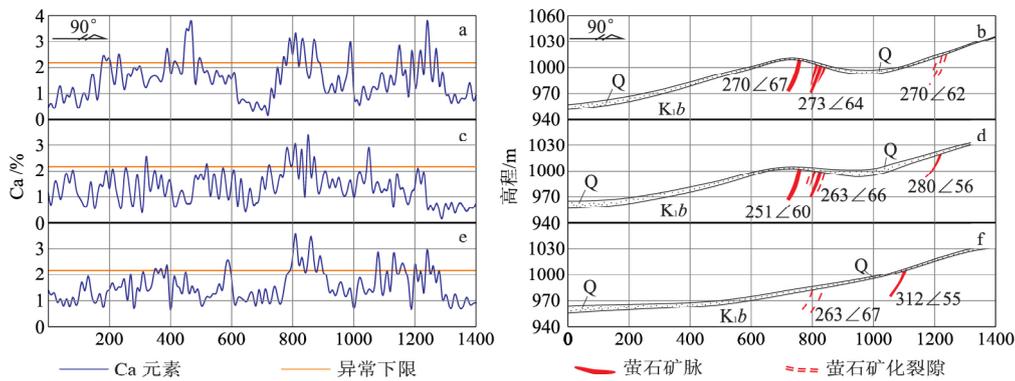


图 4 X 荧光 Ca 元素分析曲线与勘探线剖面图

Fig. 4 Calcium analysis curve of X fluorescence element and profile diagram of exploration lines (a)L1 勘探线 X 荧光 Ca 元素分析曲线;(b)L1 勘探线剖面图;(c)L0 勘探线 X 荧光 Ca 元素分析曲线;(d)L0 勘探线剖面图;(e)L2 勘探线 X 荧光 Ca 元素分析曲线;(f)L2 勘探线剖面图

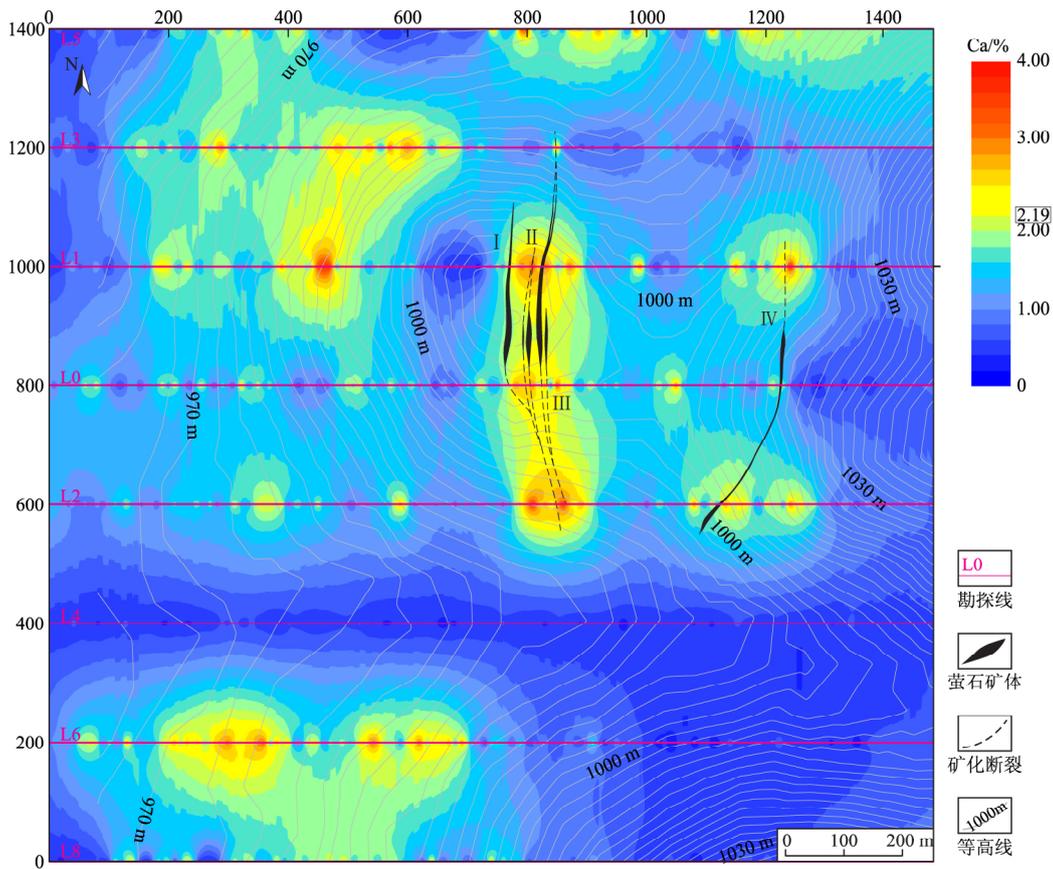


图 5 X 荧光 Ca 元素分析异常平面图

Fig. 5 The calcium anomaly map of X fluorescence element analysis

中部 780 m~900 m 处的 Ca 元素异常对应 I、II 和 III 号矿脉向南延伸歼灭后的矿化裂隙(图 4(f)), 东部 1 060 m~1 280 m 处的间断异常范围较大, 1 060 m~1 170 m 处对应产状较缓的 IV 号矿脉南端, 而 1 200 m~1 280 m 处无矿脉与之对应。

由图 4 可以看出, 连续高峰异常区域地下存在

矿脉的可能性更大, 并且异常通常集中在矿脉赋存点至沿产状向上延伸的方向。在该研究区异常集中在矿脉的偏东侧, 这可能指示矿脉曾经发生过严重的风化剖蚀, 顶部矿脉遭剖蚀后在矿脉东侧留下元素异常, 同时被剖蚀矿脉的原生晕也可产生偏向东侧的元素异常。一般情况下矿脉的原生晕异常或矿

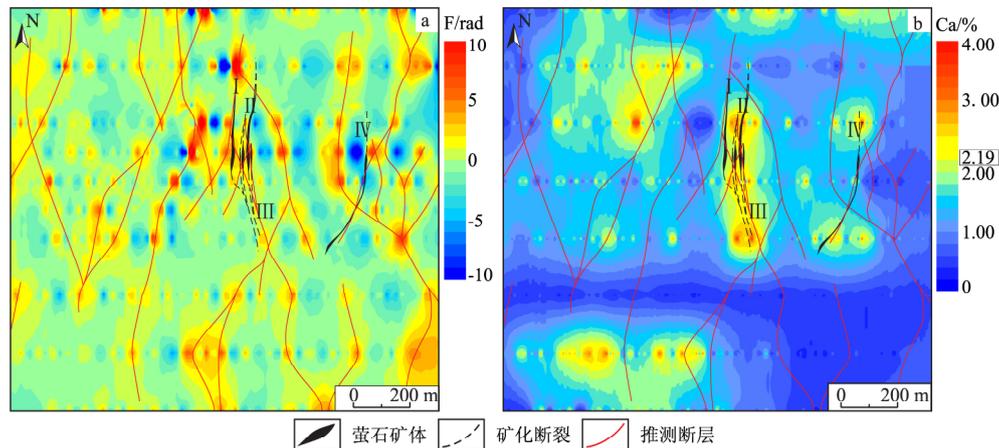


图 6 浅覆盖区萤石矿综合勘查图

Fig. 6 Comprehensive prospecting of fluorite deposits in shallow cover area
(a) 甚低频电磁法(VLF-EM)勘查图;(b)矿区断裂与Ca元素异常组合图

脉风化导致的元素异常范围较大,因此单峰异常区的出现可能是由个别测点的异常值较高导致,地下通常无矿脉存在。

在研究区的Ca元素异常平面等值线图中(图5),金黄色—红色表示元素异常高于异常下限的区域。研究区中部的I、II和III号矿脉元素异常明显,元素异常区域位于萤石矿脉的右侧位置,II和III号矿脉位于元素异常区域的中央,矿脉南端延伸歼灭方向也显示有明显异常,而矿脉北端延伸方向异常则较弱;研究区东部的IV号矿脉也存在元素异常,但在L0勘探线处却发生了中断,矿脉北端延伸歼灭方向异常最为显著,南端延伸方向异常范围较大。Ca元素异常在已知矿脉处的异常情况对应较准确(图5),除L0勘探线东侧1200m处矿脉无异常显示,可能与当地山坡上的一些当地牧民的废弃建筑有关,在施工时影响到了该处的土壤。除此之外,图5还显示在研究区西北区域和西南区域出现有较大范围的元素异常,北侧偏东区域也出现分散的元素异常,这些异常的出现原因仍有待商榷,说明便携式X荧光元素分析法存在一定的多解现象。

3.4 与甚低频电磁法的对比分析

由于方乙等^[3, 19]利用甚低频电磁法(VLF-EM)在内蒙古林西的隐伏一半隐伏萤石矿体的定位预测中取得较大进展,证明甚低频电磁法可以清晰地反映研究区构造格局、构造产状与平面展布特征,符合萤石矿床由断裂控制的特点。因此在矿区开展X荧光元素分析法勘查的同时,也开展了甚低频电磁法的勘查工作,试图解释研究区西北和西南区域出现较大范围元素异常和东北区域出现分散元

素异常的原因,勘查成果图如图6所示。甚低频电磁法的结果显示矿区内地表盖层以下断裂主要呈现N-S向,部分呈NNE-SSW向,这与野外实地调查的结果显示一致;另外甚低频电磁法还显示矿区西部断裂破碎带较为稀疏,中部和东部地区的萤石矿脉发育处则较为密集。

将甚低频电磁法探测的区内断裂投影至Ca元素X荧光元素分析勘查平面图中(图6(b)),显示在研究区中部和东部的矿脉赋存区域的断裂与Ca元素异常情况重合较好,尤其是中部的I、II和III号矿脉,说明便携式X荧光元素分析仪在勘查过程中具有较好的指示效果。甚低频电磁法的勘查结果显示断裂分布,便携式X荧光元素分析仪显示元素异常,两者萤石矿的勘查过程中存在一定的共同指示作用。矿区北部西南区域断裂发育较弱或不发育,该结果可以对Ca元素异常指示的西南和东北部区域高异常区起到一定的排除作用;而西北区域元素高异常和断裂同时存在却无矿脉发育,在实地考察中发现该区域存在大量节理和少量萤石矿化现象(图3(c)),由于萤石规模太小而未达到工业要求,却在探测过程中反应明显。以上说明两者结合可有效剔除便携式X荧光元素分析仪勘查的部分多解性结果,同时也需要重视对野外情况的考察与分析。

4 结论

经过野外地质踏勘、现场X荧光测量、数据处理制图和勘探对比分析,针对便携式X荧光元素分析法在浅层覆盖区萤石的勘查工作,得出以下结论:

1)便携式 X 荧光元素分析仪对萤石矿区的 Ca 元素反应明显,具有成本低、速度快的特点,在浅层覆盖区的勘查效果良好。

2)在勘探过程中,连续的元素异常对萤石矿脉具有较好的指示效果,单峰异常指示效果差。

3)针对以断裂控矿为特征的萤石矿体,将便携式 X 荧光元素分析法与甚低频电磁法相结合,可一定程度上剔除多解区域,具有更好的应用前景。

参考文献:

- [1] 徐旃章,吴志俊. 浙江省萤石矿成矿规律与成矿预测[M]. 成都:四川科学技术出版社,1991.
XU D Z, WU Z J. Metallogenic regularity and metallogenetic prognosis of fluorite deposit in Zhejiang province [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1991. (In Chinese)
- [2] 张鹏,张寿庭,邹灏,等. 便携式 X 荧光仪在萤石矿勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2012, 36(5): 718—722.
ZHANG P, ZHANG S T, ZOU H, et al. The application of portable X-ray fluorescence analyzer to fluorite prospecting[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2012, 36(5): 718—722. (In Chinese)
- [3] 方乙,张寿庭,邹灏,等. 浅覆盖区萤石矿综合勘查方法研究——以内蒙古林西赛波沟门萤石矿为例[J]. 成都理工大学学报, 2014, 41(1): 94—101.
FANG Y, ZHANG S T, ZOU H, 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. (In Chinese)
- [4] 赵春江,周四春,刘晓辉,等. 隐伏花岗岩铀矿上方的 X 荧光异常特征及其找矿意义[J]. 物探与化探, 2012, 36(6): 1055—1058.
ZHAO C J, ZHOU S C, LIU X H, et al. X-ray fluorescence anomaly over the concealed granite-type uranium deposit and its prospecting significance[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2012, 36(6): 1055—1058. (In Chinese)
- [5] XIAO W J, WINDLEY B F, JIE H, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt[J]. Tectonics, 2003, 22(6): 8—20.
- [6] CHEN B, JAHN B M, TIAN W. Evolution of the solonker suture zone: constraints from zircon U—Pb ages, HF isotopic ratios and whole-rock Nd—Sr isotope compositions of subduction- and collision-related magmas and forearc sediments[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 34(3): 245—257.
- [7] 陈英富,王根厚,段炳鑫. 内蒙古东乌珠穆沁旗辉音敖包一带晚侏罗世火山岩特征及时代[J]. 中国地质, 2012, 39(6): 1690—1699.
CHEN Y F, WANG G H, DUAN B X. Zircon SHRIMP geochronology and geochemistry of Late Jurassic volcanic rocks in Huiyin Obo area of Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia [J]. Geology in China, 2012, 39(6): 1690—1699. (In Chinese)
- [8] 葛良全,周四春,赖万吕. 原位 X 荧光辐射取样技术[M]. 成都:四川科学技术出版社,1997.
GE L Q, ZHOU S C, LAI W L. In situ X fluorescence radiation sampling technique [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1997. (In Chinese)
- [9] 刘菁华,王祝文. 放射性勘探方法[M]. 北京:地质出版社,2014.
LIU Q H, WANG Z W. Radioactive exploration method [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014. (In Chinese)
- [10] 葛良全. 现场 X 射线荧光分析技术[J]. 岩矿测试, 2013, 2(32): 203—212.
GE L Q. Research Development in in-situ X-ray fluorescence analysis techniques [J]. Rock and Mineral Analysis, 2013, 2(32): 203—212. (In Chinese)
- [11] 任家富,虞先国,陈永君,等. 便携式 X 荧光仪在土壤和水系沉积物样品中的应用研究[J]. 物探化探计算技术, 2007, 29(4): 346—348+279.
REN J F, TUO X G, CHEN Y J, et al. An application study in soil and river system deposit samples of portable X fluorogenic instrument [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 29(4): 346—348+279. (In Chinese)
- [12] 钱建平,吴高海,陈宏毅. 便携式 X 射线荧光光谱仪应用条件试验及效果[J]. 物探与化探, 2010, 34(4): 497—502.
QIAN J P, WU G H, CHEN H Y. Experiments on the application conditions of portable XRF analyzer its prospecting results [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2010, 34(4): 497—502. (In Chinese)
- [13] 林延畅,葛良全,姜海静,等. 铜钴矿样品 X 荧光快速测定技术的初步研究[J]. 物探化探计算技术, 2007, 29(03): 256—259+181.
LIN Y C, GE L Q, JIANG H J, et al. Pilot study on

- the technique of copper and cobalt ore fast analyzing by X-ray fluorescence[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2007, 29(03): 256-259+181. (In Chinese)
- [14] JANG M. Application of portable X-ray fluorescence (PXRF) for heavy metal analysis of soils in crop fields near abandoned site[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2010, 32(3): 207-216.
- [15] 卓尚军, 吉昂. X射线荧光光谱分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
ZHUO S J, JI A. Analysis of X ray fluorescence spectroscopy[M]. Beijing: Science Press, 2003. (In Chinese)
- [16] 张鹏. 便携式 X 荧光仪在内蒙古赤峰浅覆盖区萤石矿勘查中的应用[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.
ZHANG P. Application of portable X-ray fluorescence on fluorite mine exploration in shallow covered area of Chifeng, Inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.
- [17] 林焕华. 浙江省龙泉县八都萤石矿床化探方法试验研究[J]. *物探与化探*, 1991, 15(3): 225-235. (In Chinese)
- LIN H H. The trial utilization of geochemical prospecting method in the Badu fluorite deposit, Longquan County, Zhejiang province[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 1991, 15(3): 225-235. (In Chinese)
- [18] 戴塔根, 龚玲兰. 应用地球化学[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005.
DAI T G, GONG L L. Applied geochemistry [M]. Changsha: Central South University Press, 2005. (In Chinese)
- [19] 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*, 2013, 2(33): 246-251.
FANG Y, ZOU H, WANG G K, 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*, 2013, 2(33): 246-251. (In Chinese)

Application and analysis of portable X-ray fluorescence analyzer on fluorite exploration in shallow cover area

LI Xinyu^{1,2,3}, ZOU Hao^{1,4}, ZHANG Qiang^{1,5}, WEI Shaoyi¹,
WANG Liangkun¹, ZHANG Yan¹, YANG Jian¹

(1. College of Earth Sciences, Chengdu University of technology, Chengdu 610059, China;

2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Key Laboratory of Tectonic Controls on Mineralization and Hydrocarbon Accumulation, Ministry of land and Resources, Chengdu 610059, China;

5. Faculty of Resource Department, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: With the development of field X fluorescence analyzing technology, portable X-ray fluorescence analyzer performed well in field prospecting. In this paper, the fluorite mine in the coverage area of Wuliji'aobao in Inner Mongolia is taken as an example to carry out X-ray fluorescence survey. The following conclusions are drawn through the analysis of diagram element anomaly and comparing the actual situation of ore area. (1) Portable X-ray fluorescence analyzer has high efficiency and accuracy in exploration of shallow coverage area. (2) Continuous anomalies of Ca element have good indications for fluorite veins. (3) Geochemical exploration methods have multiple solutions, but multiple solutions can be ruled out according to the type of ore deposits and other exploration methods.

Keywords: field X fluorescence analysis; fluorite; very low frequency electromagnetic method; exploration; inner Mongolia