

doi: 10.11720/wtyht.2023.0293

周四春,王登红,刘晓辉,等.综合地气测量探测伟晶岩稀有金属矿技术方法及应用[J].物探与化探,2023,47(6):1627-1634. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.0293>

Zhou S C, Wang D H, Liu X H, et al. Technical methods for integrated geogas survey their and applications in the exploration of pegmatite-type rare metal deposits[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(6): 1627-1634. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.0293>

综合地气测量探测伟晶岩稀有金属矿技术方法及应用

周四春¹, 王登红², 刘晓辉¹, 王亚栋³, 文春华⁴, 胡波¹, 王广西¹

(1. 成都理工大学 地学核技术四川省重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037; 3. 青海省地质调查院, 青海 西宁 810008; 4. 湖南省地质调查院, 湖南长沙 410083)

摘要:综合地气测量是针对伟晶岩稀有金属矿找矿需求建立的地气测量与 X 荧光测量联袂探测隐伏矿的综合找矿技术, 其中基于手持式 X 荧光仪进行快速测量, 用于捕获地表的次生晕或原生晕, 完成对含矿伟晶岩脉在地表的赋存位置、走向及延伸长度的评价; 通过动态地气测量捕获深部矿化信息, 用于评价伟晶岩脉的深部含矿性及延伸深度。本文介绍了这种综合找矿技术的主要技术方法, 以及在有关项目支持下在不同地球化学景观环境下开展的找矿应用示范实例, 以期为该方法的推广应用及后续同类景观区的找矿工作提供借鉴。

关键词:花岗伟晶岩; 稀有金属矿; X 荧光测量; 地气测量; 找矿实例

中图分类号: P632 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2023)06-1627-08

0 引言

Li、Be、Na、Ta 等稀有金属矿是我国国防、新能源等重要领域急需的关键矿产。花岗伟晶岩型稀有金属矿则是我国获取前述稀有金属的主要矿产类型之一。

花岗伟晶岩型稀有金属矿的矿体赋存在花岗岩岩体中, 伟晶岩脉矿体与花岗岩的物理性质在大多数情况下没有显著差异, 矿体中金属硫化矿物含量也较低, 这使得通过传统地球物理勘探方法勘查这类矿床并不总能取得效果。

传统地球化学勘查方法对花岗伟晶岩型稀有金属矿床的勘查是有效的, 但应用中也有技术瓶颈。一方面, 地球化学勘探一般只能获取地表的次生晕或原生晕, 对深部含矿情况指示常常不明确; 另一方面, 我国目前发现的花岗伟晶岩型稀有金属矿主要分布在西部边远、自然景观条件恶劣的地区, 每年野外可工作时间较短, 加之一个勘查区往往赋存众多的伟晶岩脉, 而含矿的伟晶岩脉却寥寥无几, 完

全依靠传统地球化学勘查方法评价出露地表或近地表的伟晶岩脉的含矿性, 既受野外工作时间的限制, 也受工作经费的制约。即使靠地球化学勘查获取的次生晕或原生晕评价出了露地表或近地表的伟晶岩脉的含矿性, 对伟晶岩脉深部的含矿性也难以作出判断^[1]。

针对花岗伟晶岩型稀有金属矿床勘查中传统地球物理勘探、地球化学勘查方法面临的技术瓶颈, 成都理工大学课题组在中国地质科学院矿产资源研究所、青海省地质调查院、湖南省地质调查院等单位支持下, 以国家自然科学基金、国家重点研发计划项目、青海省科技厅基础科研等项目为平台, 开展了地气与 X 射线荧光测量联合探测隐伏伟晶岩稀有金属矿的技术方法研究。这种联合探测技术方法, 我们将其定名为“综合地气探测技术”。

1 综合地气探测技术概述

综合地气探测技术由快速 X 射线荧光测量方

收稿日期: 2023-07-05; 修回日期: 2023-10-07

基金项目: 青海省基础研究计划项目 (2022-ZJ-751); 国家重点研发计划项目 (2017YFC0602701); 湖南省重点领域研发计划项目 (2019SK2261); 国家自然科学基金项目 (41074094)

第一作者: 周四春 (1954-), 成都理工大学教授, 主要从事深部找矿技术方法研究及核技术应用工作。Email: zsc@cdu.edu.cn

法与地气探测方法构成。

所谓快速 X 射线荧光测量方法是指基于手持式 X 射线荧光光谱仪开展的土壤或岩石 X 射线荧光测量。目前国内外已经广泛使用的是基于 SDD 探测器的第四代数字化手提式 X 射线荧光仪^[2]。这类仪器理论上可以在野外现场(或野外驻地)开展土壤或岩石样品的测量,完成快速捕获花岗伟晶岩矿床次生晕或原生晕的任务,获取浅地表矿化信息。而地气探测,则是基于地壳内的垂直上升气流可以穿越数百米甚至上千米的岩层,将地下物质信息携带到地表土壤中,现场抽取游离于土壤空隙中来自地壳深部的上升气流——地气,进而捕获地气中携带的深部地质体的纳米微粒,获取深部矿化信息的方法^[3]。两种方法相互补充与融合,可以判断伟晶岩浅部与深部是否含矿,解决伟晶岩稀有金属矿的找矿问题。

2 综合地气探测技术中的 X 射线荧光测量技术方法

综合地气探测技术中的 X 射线荧光(以下简称 XRF,即 X-ray fluorescence)测量设备均采用配备 SDD(silicon drift detector)硅漂移探测器的第四代数字化手提式 XRF 仪。本文研究工作采用了牛津公司生产的商用 X-MET7500 手提式 XRF 仪器。该仪器采用 SDD 探测器,铑靶 X 光管激发源,对⁵⁵Fe 5.9 keV 射线能量分辨率为 120 eV 左右,理想情况下可以同时测量 30 种左右的元素^[2]。

为了实现对花岗伟晶岩脉含矿性的评价,XRF 测量技术方法主要由下述 4 个部分组成。

2.1 X 射线荧光指示元素选择

刘英俊等^[4]将稀有金属元素划分为稀有元素族,该族包括 Y、REE、Li、Be、Nb、Ta、Zr、Hf 等,在戈氏分类中都属于亲石元素,这一组元素间有明显的地球化学共生组合现象。虽然它们的地壳丰度低,但在一定的地质条件下可富集成矿,是一个有特殊性的地球化学元素组。常常与稀有金属族具有共生组合现象的还有属于放射性族的 U 与 Th,这是因为它们在戈氏分类中与稀有元素族同属于亲石元素。

谢学锦院士^[5]在讨论伟晶岩类稀有金属矿床的地球化学异常的元素组分时指出,Nb、Ta、Sn、W、Sb、Bi、Li、Be、Ti、Rb、Cs、Re、U、Th、B、Zr、Hf、P、F 是

该类矿床的地球化学异常中的常见元素。

总结前人的研究,伟晶岩稀有金属矿中常见的富集元素包括 3 类:稀有元素族元素(Nb、Ta、Li、Be、Rb、Y、REE、B、Zr、Hf 等)、有色金属元素(Sn、W、Sb、Ti、Cs、Re)、放射性元素(U、Th)。理论上这些元素都具备作为 XRF 测量找矿中的指示元素(常称为“荧光指示元素”)。

笔者所在课题组在多个伟晶岩稀有金属矿的研究与找矿实践后发现,上述 3 类指示元素中,Nb、Ta、Rb 3 个关键性荧光指示元素具有普适性的找矿指示作用。除上述 3 个荧光指示元素外,矿区不同,具有找矿指示作用的其他荧光指示元素也会有所不同。基于以下几个方面的原因,开展 XRF 测量工作时,其他荧光指示元素需要进行研究选择。

1)目前最先进的手提式 XRF 仪器也无法实现对 Li、Be、B、F 等原子序数小于 13 的元素的测量;

2)每一个具体的稀有金属矿床,其富集元素的成分都是不完全相同的;

3)受到仪器检出限限制,对选出的某些指示元素有可能无法实现测量(包括 Nb、Ta)。

因此在每一个具体的勘查区工作前,可以在已知矿体顶部土壤、背景区土壤上,在最佳采样深度处采集具有代表性的土壤样品,分选出 80~100 目原始土壤粒级部分做样品,分别测量其 XRF 谱线(如图 1 所示),根据谱线上显示的元素组分情况,参考上述 3 类可能的指示元素,然后加以选择,最终将它们与 Nb、Ta、Rb 一起,作为荧光指示元素。

2.2 土壤样品的采集与预处理方法

由于手持式 X 射线荧光仪器做现场原位测量时存在不平度效应、矿化不均匀性效应、颗粒度效应以及基体效应等诸多影响^[2],这些影响不但会明显降低测量结果的准确性,还会影响仪器的检出限。对 Nb、Ta、Rb 3 个关键性荧光指示元素,当我们采用当今最先进的手持式 X 荧光仪(如牛津 X-MET7500)测量时,由于 Rb 一般背景值较高(见图 1),通过现场原位测量获得其结果基本没有问题。但 Nb、Ta 两个元素在大多数伟晶岩稀有金属矿勘查区的背景值甚至异常下限值都处于仪器理想状态下检出限的边缘(参见图 1),通过现场原位测量获得可靠的 Nb、Ta 两个元素的 X 射线荧光结果难度太大。这就是为什么在开展现场测量前一定要找出指矿效果好、区域丰度较高的有色金属或其他金属荧光指示元素的原因。

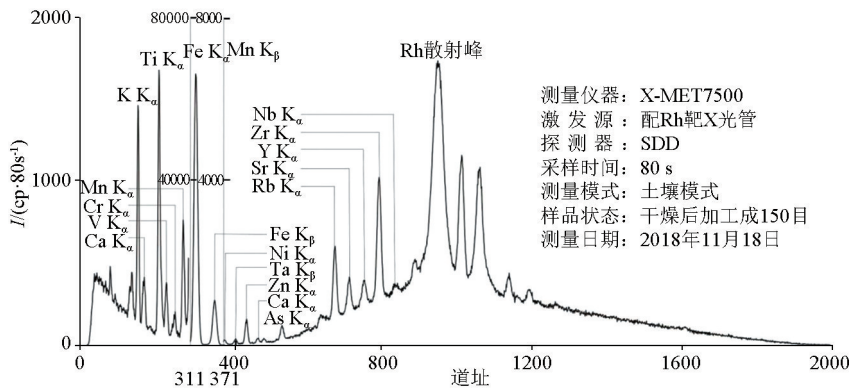


图1 湖南省仁里矿区16号勘探线背景区土壤XRF谱线

(为清晰显示不同道址范围内XRF谱线,0~311、311~371、371~2000段分别采用了不同纵坐标比例尺)

Fig. 1 Soil XRF spectrum in the background area of exploration line 16 in Renli mining area, Hunan Province

(in order to clearly display the XRF spectral lines in different address ranges, different ordinate scales were used for the three segments of 0~311, 311~371 and 371~2000)

基于上述原因,在没有找矿周期约束时,采集土壤回实验室稍作处理后做X射线荧光测量是不受现场测量各种影响,进而改善仪器检出限,可靠获得Nb、Ta两个关键性荧光指示元素的正确技术方案。

以青海茶卡北山锂铍矿勘查区(后文简称“茶卡北勘查区”)XP3测线170号与270号测点研究为例。该勘查区土壤类型主要为高山草原—草甸土,地表腐殖质(A)层一般不超过15 cm,按照地球化学样品采集规范,在研究区统一采集地表30 cm

深坑底的B层土壤。经不同原始粒级土壤样品的XRF对比测量实验,选择目标元素最富集的80~100目原始粒级部分土壤作为测量对象(见图2)。选出的80~100目土壤用仪器配置的压片器统一压制成厚3 mm的样片,制作成待测样品。经实验,用这样制作的样品进行X射线荧光测量,不仅避免了现场测量时无法回避的各种影响,也基本不会受到颗粒度效应影响(表1)。

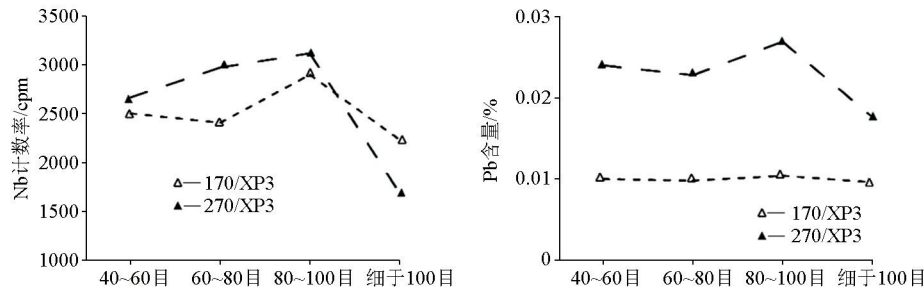


图2 不同原始粒级土壤样品的XRF测量对比

Fig. 2 XRF measurement comparison of soil samples with different raw grain sizes

表1 X射线荧光测量中的颗粒度效应影响实验结果

Table 1 Particle size effects in X-fluorescence measurements affect experimental results

测点号	元素	80~100目	加工为150目样* /	相对误差/%	最大相对误差/%	平均相对误差/%
		原始粒度样/(cp·80s ⁻¹)	(cp·80s ⁻¹)			
132/XP3	Nb	3679	3350	+9.36	9.36	6.32
134/XP3		3616	3879	-7.01		
154/XP3		3789	3688	+2.70		
190/XP3		3041	3237	-6.20		
132/XP3	Ta	837	794	+5.27	10.03	8.18
134/XP3		900	995	-10.03		
154/XP3		1529	1400	+8.81		
190/XP3		936	1020	-8.59		
132/XP3	Rb	0.0108	0.0103	+0.47	10.8	5.92
134/XP3		0.0105	0.0117	-10.8		
154/XP3		0.0239	0.0230	+3.84		
190/XP3		0.0195	0.0179	+8.56		

注:“*”表示理论上,当样品加工到150目后,就不会存在颗粒度效应^[2]。

2.3 测量数据处理与成图参数

一方面,由于伟晶岩稀有金属矿勘查区内 Nb、Ta 元素丰度值都较低(参见图 1),商用仪器一般给不出其元素含量,只能提供元素特征峰计数(率),单位为 cpm,其值一般从几百到几千。而 XRF 仪器对于 Rb 或其他有色金属荧光指示元素能够直接给出百分含量,其值从 0.001%~0.1%,与 Nb、Ta 的荧光测量数值具有数十万至数百万倍的差异,使荧光指示元素间直接对比困难。

另一方面,不同勘查区的同一元素的背景值不同,会造成利用原始测量数据做直接对比研究不方便。

为了减少同一勘查区不同荧光指示元素间,以及不同勘查区同一元素测量结果间对比的影响,对获取的原始 XRF 测量数据首先进行“衬度”化处理^[2],使所有元素的 XRF 测量值都处于同一量级。在此基础上,根据已知矿体上方可行性试验选择的与矿体元素呈显著负相关关系的元素作为分母,对各指示元素做比值计算后作为最终成图参数。用这种比值参数成图,会明显增大各荧光指示元素的异常(峰背比)幅度。

勘查区不同,与矿体元素呈显著负相关的元素有可能不同。比如,茶卡北勘查区与 Be、Nb 等矿体元素间负相关关系最好的为 Ni;新疆福海县卡鲁安锂铍矿勘查区(后文简称“卡鲁安勘查区”)与湖南平江县仁里铌钽矿勘查区(后文简称“仁里勘查区”)与矿体元素负相关关系最好的则为 Zr。图 3 展示了青海茶卡北山勘查区 XRF 测量 Nb 后用 Nb 衬度和 $w(\text{Nb})/w(\text{Ni})$ 数据编制的 XP8 号剖面图对比,在背景值基本没有变化的情况下, $w(\text{Nb})/w(\text{Ni})$ 的异常幅度较 Nb 有显著增加,异常极值处从 1.42 提高到 2.51,增幅达 76.8%,效果特别显著。

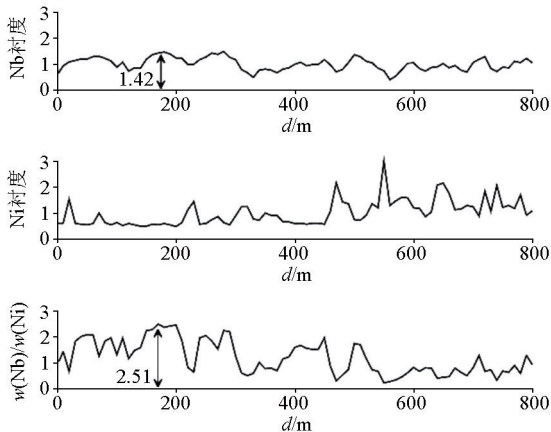


图 3 XP8 测线采用不同 XRF 成图参数编制的剖面图对比

Fig. 3 The XP8 line was compared using different XRF mapping parameters

2.4 X 射线荧光异常的分布特征及推断解释方法

在伟晶岩矿脉上一般会出现两类 X 射线荧光异常:一类是对含矿层位伟晶岩脉区域起指示作用的荧光元素形成的正或负异常(低值区);一类是以 Nb、Ta、Rb 以及相应矿床特有的某种(或某几种)荧光元素指示伟晶岩矿脉位置的正异常^[6]。如茶卡北勘查区,在伟晶岩脉分布区域,可以捕获到 Ca 形成的 X 荧光正异常、Ni 的负异常以及 Fe 与 Mn 的低值区;而在含矿伟晶岩脉上方可捕获到 Nb、Ta、Rb、K 形成的正异常。在不同矿区,Nb、Ta、Rb 都是具有普适性的荧光指示元素,但矿区不同,两类异常的其他荧光指示元素有可能不同。如仁里勘查区第一类异常为 Zr 的荧光负异常,第二类异常则为 Nb、Ta、Rb 以及 Y 与 Ni 的正 X 荧光异常^[6]。

根据第一类荧光元素异常,可以评价伟晶岩脉分布区域;在伟晶岩脉分布区域内出现的第二类荧光异常,则指示了伟晶岩矿脉在地表的出露位置或其顶部在地表的投影位置。据此,结合勘查区地层走向,依据第二类荧光元素异常带的走向及控制长度,可以大致判断伟晶岩矿脉的走向及延伸长度。

3 综合地气探测中的地气测量技术方法

除沙漠覆盖景观区外,常见的不同地球化学景观区内,地气测量技术都可以采用可调节采样效率的动态地气采样、样品浓缩、ICP-MS 测试及数据处理与异常推断解释方法组成。

3.1 采样效率可调节的动态地气采样技术

在课题组早期的研究中发现,我们勘查的矿种用其边界品位来划分的话,可以大致划分为两大类:边界品位在千分之几及以上品位的矿种,如 Cu、Pb、Zn 等;边界品位在万分之几及以下品位的矿种,如 U、Au 等。伟晶岩稀有金属矿(无论是 Li、Be,还是 Nb、Ta 矿)属于第二类矿种。

对第一类矿种的地气探测,采用常规动态地气采样装置(图 4a)及技术就可以有效捕获到矿体元素的地气异常;而第二类矿种,则需要提高采样效率才能有效捕获到矿体元素的地气异常。为此笔者所在课题组建立并采用“提高探测灵敏度的动态地气测量”^[7]。

“提高探测灵敏度的动态地气测量”也称为“效率可调的动态地气采样”技术,实际是地气采样时在常规动态地气采样装置上多串联了一级装有地气捕集剂的捕集器。实验结果表明,两级容量相同的捕集器收集到的地气纳米物质总量将增加 40% 左右,显著提高了地气物质的捕集效率^[7-8]。

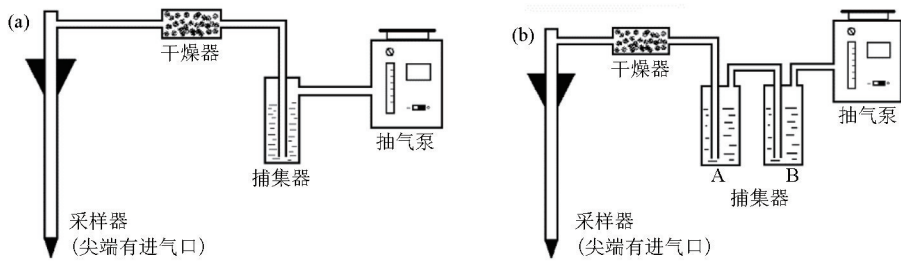


图 4 常规动态地气采样装置 (a) 与效率可调的双捕集器串联式动态地气采样装置 (b) 结构

Fig. 4 Structural diagram of conventional dynamic geogas sampling device (a) and double trap series dynamic geogas sampling device with adjustable efficiency (b)

不同地球化学景观条件下的地气探测实践表明,目前本课题组采用的动态地气采样装置适合于土壤层厚度超过 50 cm 的区域,戈壁覆盖区也可以应用,但沙漠覆盖区不适用。这是因为沙漠覆盖区内地表缺乏致密覆盖层对深部迁移到地表的 地气流加以有效滞留,在地表无法形成较好的地气物质动态饱和层。另外,采用抽气方式进行地气物质采样时会将沙漠中的细沙抽入取样器内,既堵塞采样器的进气孔,也堵塞采样装置中干燥剂前端安装的粉尘物质过滤材料。

3.2 样品预处理与 ICP-MS 测试

采用双捕集器的串联式动态地气采样,虽然提高了 40% 的捕集地气物质总量,但由于增加了一倍捕集剂,捕集剂中地气物质的浓度实际是下降了。为此,采样后的样品需要进行浓缩预处理,然后通过 ICP-MS 测试方法获取地气物质的含量信息。

3.3 资料整理、成图及异常推断解释

鉴于一些目前还无法完全解释清楚的原因,矿源体上方的地气异常连续性不好,在异常区会出现很大幅度的异常峰值跳动。加之地气测量工作效率低,成本过高,目前一般都是开展剖面地气测量^[3,7],以探寻 X 射线荧光测量捕获的主要异常评定的地表含矿的伟晶岩脉深部是否含矿,矿化深度大致为多少。

新一代 ICP-MS 分析仪器具有很强的测试能力,能提供多达 40 种左右元素的地气测量结果。一般情况下,可以将 2.1 节中讨论的 3 类稀有金属矿的指示元素,包括全套稀土元素加以分析后用于综合剖面图编制。

与 X 射线荧光测量数据面临同样的问题,为了同一测区不同地气元素间的对比,以及不同测区间同一元素间的直观对比,地气数据也需处理成衬度值后用于成果图编制。

由于地气的迁移动力来自地壳深部的压力差与温度差^[3],而地壳的压力差与温度差最大梯度方向

是垂直指向地表的,这决定搭载在地气上迁移的地气物质的迁移方式以垂向迁移为主,前人的研究对此结论予以了证实^[9-10]。地气物质的这种迁移机理决定了矿体上方地气异常空间上分布的两个重要特征^[7,11]:

- 1) 地气异常会产出于地下信息源的正上方;
- 2) 矿(化)体的地表出露或浅埋深部分不会产生地气异常。

由于伟晶岩脉矿体向地下倾覆的产状一般较稳定,如果能够较好地确定矿脉倾角,理想情况下,依据矿体上方地气异常的水平宽度,以及 X 射线荧光测量确定的矿体顶部位置,就可以依据三角形关系大致推测含矿伟晶岩的向下延伸深度与走向延伸长度(详见 4.1 节实例介绍)。

需要注意的是,除矿(化)体正上方会出现地气异常外,在断裂出露处或其顶部的投影位置也会捕获到地气异常。但断裂上方的地气异常与矿体上方的地气异常在元素组合上有明显差异。当断裂与矿(化)体有关(如为控矿或赋矿构造等)时,断裂上方的地气异常除有成矿地气指示元素呈现异常外,还有不少造岩元素也会呈现异常;当断裂与矿(化)体无关时,断裂上方则主要是造岩元素的地气异常。据此可以区分出断裂导致的异常。

4 三类不同地球化学景观环境下的综合地气探测技术找矿示范

4.1 高寒草甸景观区找矿应用示范

近年来,课题组先后在地处高寒草甸景观区的新疆福海县卡鲁安锂铍矿区^[12]、青海天峻县茶卡北山锂铍矿区开展了综合地气探测伟晶岩稀有金属矿的应用示范,都取得了不错的找矿效果。

图 5 是卡鲁安锂铍矿区 L2 测线地气测量矿体元素的综合剖面。

依据图 5,按距离 806 号脉地表出露处投影位

地气测量技术研究与应用^[6]。图8是在传梓源矿区PC测线开展的X射线荧光与地气测量的综合剖面。在测线上 $\gamma p206$ ⅣMB号矿脉延伸方向的对应位置捕获到Nb等元素的X-4号XRF异常,在该矿脉倾覆一侧,则捕获到包含矿体元素Li、Be、Nb的D-2号地气异常,提供了 $\gamma p206$ ⅣMB号矿脉穿越PC线的地表与地下依据,将该矿脉向北西方向延伸了不少于500 m(图9)。

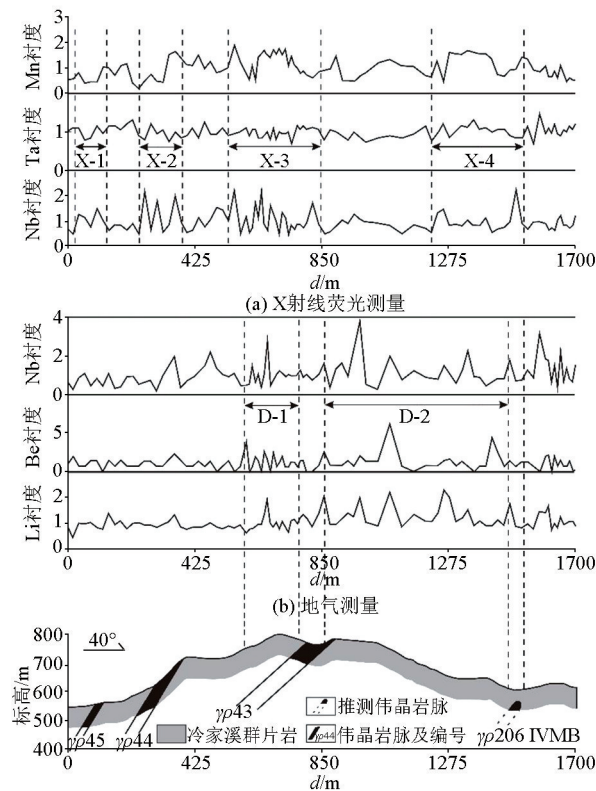


图8 传梓源矿区PC测线综合地气测量剖面及异常分析
Fig.8 Comprehensive geogas measurement profile and anomaly analysis map of PC survey line in Chuanziyuan mining area

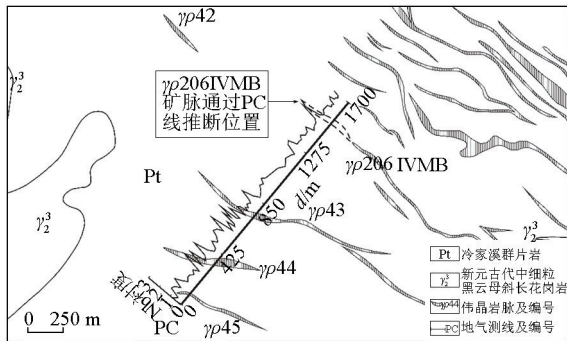


图9 传梓源矿区PC测线Nb元素X射线荧光测量平面剖面
Fig.9 Plane profile of PC survey line Nb element X fluorescence measurement in Chuanziyuan mining area

5 结论及讨论

在我国3种具有代表性的地球化学景观区内伟晶岩稀有金属矿上开展的综合地气测量技术及应用研究表明,采用土壤X射线荧光测量捕获的两类荧光元素异常可以较好地评价伟晶岩脉浅部的含矿性,而地气测量则可以对X射线荧光测量评价出的矿化伟晶岩脉的深部含矿性进行评价,将X射线荧光测量与地气测量进行融合与对照,可以弥补X射线荧光测量不能直接获取Li、Be等低原子序数元素信息的缺陷,同时解决地气测量不能捕获50 m以浅矿化信息的技术短板,形成的综合地气测量技术方法对不同地球化学景观环境下的伟晶岩稀有金属矿具有较好的探测效果。

找矿实践中,可以采用布设测网开展土壤X射线荧光测量快速圈定异常,依据X射线荧光异常带的位置、走向与长度,确定可能的伟晶岩矿脉的位置、走向与延伸长度。在此基础上,在垂直穿越X射线荧光异常带中心位置布设控制矿脉倾覆一侧的地气剖面,开展以获取矿体元素信息为主要目的的地气测量,可以直接获取伟晶岩深部的矿化信息。为了捕获所需要深度的地气信息,地气剖面在地表的布设长度应该根据伟晶岩脉倾覆侧的倾角,大致按照三角形关系加以估算后确定。

为了减少干扰,在干旱荒漠景观区工作时,土壤X射线荧光测量需要注意采集较粗粒级样品,并最好通过实验选择指示元素最富集粒级;在南方潮湿地区开展地气测量时需注意土壤湿度带来的影响,选择土壤水蒸气蒸发较快的夏季,在雨后3天再开展采样。

参考文献(References):

[1] 王登红,王成辉,孙艳,等.我国锂铍钽矿床调查研究进展及相关问题简述[J].中国地质调查,2017,4(5):1-8.
Wang D H, Wang C H, Sun Y, et al. New progresses and discussion on the survey and research of Li, Be, Ta ore deposits in China[J]. China Geological Survey, 2017, 4(5): 1-8.
[2] 周四春,刘晓辉,曾国强,等. X 荧光勘查技术及其在地质找矿中的应用[M]. 北京:科学出版社,2020.
Zhou S C, Liu X H, Zeng G Q, et al. X-ray fluorescence exploration technology and its application in geological prospecting[M]. Beijing: Science Press, 2020.
[3] 童纯茜,李巨初.地气测量寻找深部隐伏金矿及其机理研究[J].地球物理学报,1999,42(1):135-142.
Tong C H, Li J C. Geogas prospecting and its mechanism in the search for deep-seated or concealed gold deposits[J]. Chinese

Journal of Geophysics,1999,42(1):135-142.

[4] 刘英俊,曹励明.元素地球化学导论[M].北京:地质出版社,1987.

Liu Y J,Cao L M. Introduction to elemental geochemistry[M]. Beijing:The Geological Publishing House,1987.

[5] 谢学锦.区域化探[M].北京:地质出版社,1979.

Xie X J. Regional geochemical exploration[M]. Beijing:The Geological Publishing House,1979.

[6] 张龙.伟晶岩稀有金属矿综合地气异常特征及勘查技术研究[D].成都:成都理工大学,2021.

Zhang L. Study on comprehensive geogas anomaly characteristics and exploration technology of pegmatite rare metal ore[D]. Chengdu:Chengdu University of Technology,2021.

[7] 刘晓辉,周四春,童纯菡,等.提高地气探测灵敏度的方法[J].物探与化探,2012,36(6):1064-1067.

Liu X H,Zhou S C,Tong C H,et al. The method and technique for improving the detection sensitivity of dynamic geogas survey[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2012,36(6):1064-1067.

[8] 周四春,刘晓辉,胡波,等.南岭重点矿集区深部成矿信息的地气、放射性信息探测实验[M].北京:中国原子能出版社,2018.

Zhou S C,Liu X H,Hu B,et al. Geogas and radioactivity detection technology and experiment of deep mineralization information in key mineral agglomeration area of Nanling[M]. BeiJing:China Atomic Energy Press,2018.

[9] 童纯菡,李巨初,葛良全,等.地气纳米物质的观测及其意义[J].中国科学:D辑,1998,28(2):153-156.

Tong C H,Li J C,Ge L Q. et al. Observation and significance of geogas nanosubstances[J]. Science in China; Series D,1998,28(2):153-156.

[10] 童纯菡.元素迁移的模拟模型实验[J].核技术,2001,24(6):449-455.

Tong C H. Imitative model experiment for elements transportation[J]. Nuclear Techniques,2001,24(6):449-455.

[11] 周四春,刘晓辉,童纯菡,等.地气测量技术及在隐伏矿找矿中的应用研究[J].地质学报,2014,88(4):736-754.

Zhou S C,Liu X H,Tong C H. et al. Application research of geogas survey in prospecting concealed ore[J]. Acta Geologica Sinica,2014,88(4):736-754.

[12] 杨吉成,周四春,刘晓辉,等.卡鲁安伟晶岩锂矿的地气场特征及找矿意义[J].岩石矿物学杂志,2019,38(4):570-578.

Yang J C,Zhou S C,Liu X H,et al. Geogas field characteristics of the Kalu'an pegmatite lithium deposit and its prospecting significance[J]. Acta Petrologica Et Mineralogica,2019,38(4):570-578.

Technical methods for integrated geogas survey and their applications
in the exploration of pegmatite-type rare metal deposits

ZHOU Si-Chun¹, WANG Deng-Hong², LIU Xiao-Hui¹, WANG Ya-Dong³, WEN Chun-Hua⁴,
HU Bo¹, WANG Guang-Xi¹

(1. Applied Nuclear Technology in Geosciences Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Qinghai Geological Survey Institute, Xining 810008, China; 4. Geological Survey Institute of Huan Province, Changsha 410083, China)

Abstract: The integrated geogas survey is a prospecting technology that integrates geogas survey and X-ray fluorescence measurement for exploring concealed ores based on the prospecting needs of pegmatite-type rare metal deposits. This technology utilizes handheld X-ray fluorescence instruments for rapid measurement to capture secondary or primary halos on the surface, enabling the evaluation of the occurrence positions, strikes, and extension lengths of ore-hosting pegmatite veins on the surface. Moreover, it employs a dynamic geogas survey to capture deep mineralization information for evaluating the deep ore-bearing potential and extension depths of the pegmatite veins. This study demonstrated the main technical methods of the integrated prospecting technology and the application cases of ore prospecting supported by relevant projects in different geochemical landscape environments, in order to provide reference for the extension and application of this method and subsequent prospecting word in similar landscape areas.

Key words: granite pegmatite; rare metal deposit; X-ray fluorescence measurement; geogas survey; ore prospecting case

(本文编辑:蒋实)