

doi: 10. 11720/wtyht. 2023. 0294

王亚栋,周四春,刘晓辉,等. 青海茶卡北山锂铍矿勘查区 X 射线荧光异常特征及找矿意义[J]. 物探与化探, 2023, 47(6): 1635–1642. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.0294>

doi: 10. 11720/wtyht. 2023. 0294

Wang D H, Zhou S C, Liu X H, et al. X-ray fluorescence anomalies in the Chakabeishan exploration area for lithium-beryllium deposits, Qinghai Province: Characteristics and implications for prospecting[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(6): 1635–1642. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.0294>

青海茶卡北山锂铍矿勘查区 X 射线荧光 异常特征及找矿意义

王亚栋¹, 周四春², 刘晓辉², 胡波², 王广西², 徐云甫¹, 曹红亮¹, 樊新胜², 韩若浦²

(1. 青海省地质调查院 青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室, 青海 西宁 810012; 2. 成都理工大学 地学校技术四川省重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 在青海省乌兰县茶卡北山勘查区开展了土壤 X 射线荧光测量勘查伟晶岩锂铍矿的研究, 结果表明, 通过测量 Ca、Ni、Mn、Fe 以及 Nb、Ta、Rb、K 两组指示元素, 可以准确捕获花岗伟晶岩锂铍矿形成的土壤次生晕。其中, 第一组元素的 X 射线荧光异常信息用于指示含矿层位花岗伟晶岩的位置, 第二组元素的 X 射线荧光异常则用于圈定具有矿化显示的伟晶岩脉的位置、走向及其在平面上的延伸范围。根据捕获的 X 射线荧光异常推测, 勘查区主矿脉沿西北、东南两个方向还有较大延伸, 该结论为下一步找矿工作提供了参考。

关键词: 手提式 X 荧光仪; 土壤 X 射线荧光测量; 茶卡北山; 花岗伟晶岩锂铍矿

中图分类号: P632

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2023)06-1635-08

0 引言

2018 年青海省地质调查院通过“青海省乌兰县察汗诺—茶卡北山地区 1:2.5 万地球化学测量”项目, 在茶卡北山片区圈定了多处以锂铍为主的地球化学异常。随后, 在该勘查区通过工程验证发现了花岗伟晶岩型锂铍工业矿体^[1]。目前, 茶卡北山地区是青海省最具有锂铍找矿前景的地区之一^[2]。

由于伟晶岩矿脉与围岩的物性差异小^[3], 伴生的硫化金属矿物含量低, 常规地球物理方法找矿效果不佳^[4]。加之勘查区地处高海拔高寒地区, 野外可工作时间短, 完全靠勘查周期较长且成本较高的传统化探方法开展进一步找矿也有困难。为了提供快速、有效的伟晶岩锂铍矿新找矿方法, 青海省地质调查院与成都理工大学共同承担了青海省科技厅基础研究计划项目“综合地气测量在青海省茶卡北山

地区伟晶岩型锂铍矿区找矿方法研究及示范”, 在勘查区开展了基于手提式 X 射线荧光仪快速测量勘查花岗伟晶岩锂铍矿的方法技术研究与找矿应用示范, 以为同类景观区的找矿研究提供更多方法。

1 勘查区地质概况

茶卡北山勘查区行政区划隶属青海省天峻县, 南距茶卡镇 30 km, 茶德高速位于勘查区南侧, 交通较为便利。大地构造位置位于宗务隆山构造带、全吉地块、秦岭弧盆系结合部, 区域整体构造呈 NW 向, 邻近断裂主要为宗务隆山南缘断裂、温泉—哇洪山断裂(图 1)。

区内地层以青白口—奥陶系茶卡北山片岩组(Qb-O₃c)为主(图 2), 该套地层占勘查区面积的 80% 以上, 同时勘查区南部石炭—二叠系果山组(C-P₂g)和第四系地层少量分布。断裂构造(F₄~

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)

第一作者: 王亚栋(1986-), 男, 物化探工程师, 从事物化探勘查找矿工作。

通讯作者: 周四春(1954-), 男, 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。Email: zsc@cdut.edu.cn

F₈) 主体方向为 NW—SE 向,与地层的走向基本一致。侵入岩在勘查区中部沿区域断裂产出,岩性为灰白色中细粒石英闪长岩,部分受变质作用已经糜棱岩化^[5]。

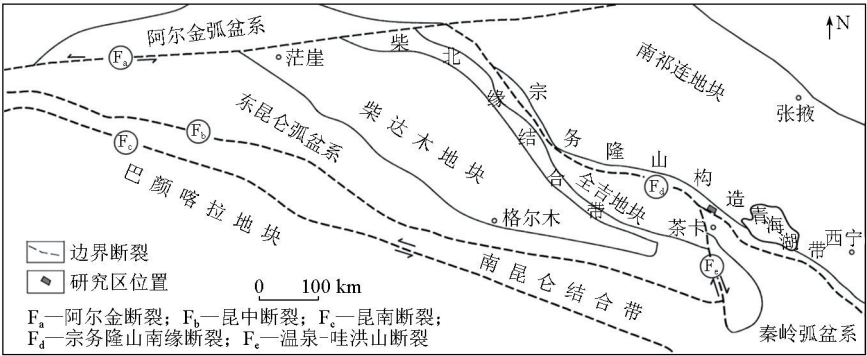


图 1 勘查区大地构造及交通位置(据王秉璋等^[1]修改)

Fig. 1 Geotectonic and traffic location in the survey area(according to Wang Bingzhang, et al. ^[1])

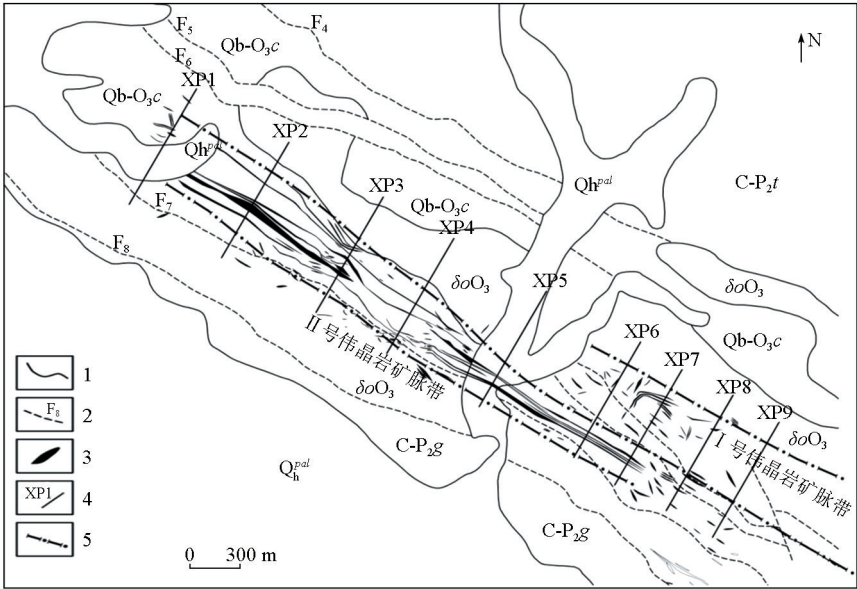


图 2 茶卡北山地区地质简图

Fig. 2 Geological sketch of the Chakabeishan area

通过近年来的工作,在勘查区划分出 3 条伟晶岩矿脉带,在 I 号伟晶岩矿脉带圈定了 35 条花岗伟晶岩脉,其中 17 条含矿,矿化类型主要为锂铍矿化,矿石矿物主要为锂辉石和绿柱石,Li₂O 平均品位 0.58%~1.94%,伴生 BeO 品位 0.041%~0.076%。脉体产状分 NW 倾和 NE 倾两组,伟晶岩向深部有一定延伸,但多数变薄并趋于尖灭^[6]。

2 土壤 X 射线荧光测量

2.1 X 射线荧光测量工作部署

根据研究与找矿工作的需要,以茶卡北山勘查

区内已知的 I、II 号伟晶岩矿脉带为控制目标,以基本垂直于 I、II 号伟晶岩矿脉带为原则,按 NE30°方位角,从西北到东南平行部署了 9 条 X 射线荧光(以下简称“XRF”,代表 X-ray fluorescence)测线(依次命名为 XP1~XP9)(见图 2)。其中,XP2~XP7 为 I 号与 II 号伟晶岩矿脉带已知区,用于建立勘查区 XRF 找矿模式并对其有效性进行检验;XP1 为探寻已知矿脉是否向西北方向延伸而部署;XP8 与 XP9 则是为探寻已知矿脉是否向东南方向延伸而部署。

2.2 X 射线荧光测量设备与方法技术

区内的土壤 XRF 测量仪器采用牛津公司生产

的商用 X-MET7500 手提式 X 射线荧光仪器。该仪器采用 SDD(silicon drift detector) 探测器,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^[7]。

根据前期研究结果^[8-9],为了减少影响因素,提高测量可靠性与准确性,测区内土壤 XRF 测量采取了取样后在实验室内测量的技术方案。

研究区属于半干旱高寒深切割山区^[10],植被发育,土壤类型主要为高山草原—草甸土,局部为黑钙土^[11]。按照土壤发生层划分原则^[12],现场踏勘后确认在 0~15 cm 为 A 层,以富含有机质—腐殖质为主要特征,风成砂多浮在表面;15~35 cm 为淋积层(B 层),以富含硅酸盐黏粒、铁、铝、碳酸盐、石膏或硅的淀积为主要特征,有机质已很少见;35~65 cm 为 C 层,以残积物—坡积物为主;65 cm 以下为基岩。

为保证样品全部采集至 B 层物质,每个测点上均按 30 cm 深度取坑底的土壤部分,主要为富含细粒硅酸盐黏粒、铁、铝、碳酸盐、石膏等,未观测到带明显的风成砂。经不同原始粒级土壤样品的 XRF 对比测量实验^[13],选择目标元素最富集的 80~100 目原始粒级土壤作为测量对象。每件样品分选出 80~100 目原始粒级的土壤 6 g(干样),平铺于外径 43.10 mm、内径 34.12 mm 的聚乙烯塑料环内,置于样片机内,在 30 MPa 压力下施压 40 s,压制成 3 mm 厚样片进行测量。

将压制好的土壤样片平整放置于 X-MET7500 手提式 X 射线荧光仪探测窗上,选择“土壤模式”、80 s 测量时间,逐一测量各测点样品。每个测点获取了 Nb、Ta、Rb、K、Ca、Ni、Mn、Fe、Zr、Sr、Ti、Zn、As、V 14 种元素的测量结果。其中,由于所用仪器土壤测量模式中不能直接给出 Nb、Ta、As 元素含量,这 3 个元素的测量结果以其 K_{α} 特征峰净峰面积(X 射线荧光强度,单位为 cp/80s)为测量结果,其余元素以仪器给出的百分含量为测量结果。

2.3 土壤 X 荧光测量结果

为了研究并选取最佳 XRF 指示元素(后文称“荧光指示元素”),以及判别荧光指示元素与矿体间的空间关联关系,依据实测数据,以已知区 XP3 测线为研究对象,编制了 Nb、Ta、Rb、K、Ca、Ni、Mn、Fe、Zr、Sr、Ti、Zn、As、V 14 种元素以衬度值为单位的 X 射线荧光测量综合剖面(图 3)。

根据对 XP3 测线实测剖面的研究,最后确认

Nb、Ta、Rb、K 4 种元素是区内最好的荧光指示找矿元素,为此编制了 4 种元素的平面剖面与平面等值线作为找矿成果图。4 种元素的平面等值线图中,异常的分布形态基本一致。限于篇幅,本文仅展示了 Nb 元素的 XRF 测量等值线(见图 4),以便对 XRF 测量结果加以讨论和分析。

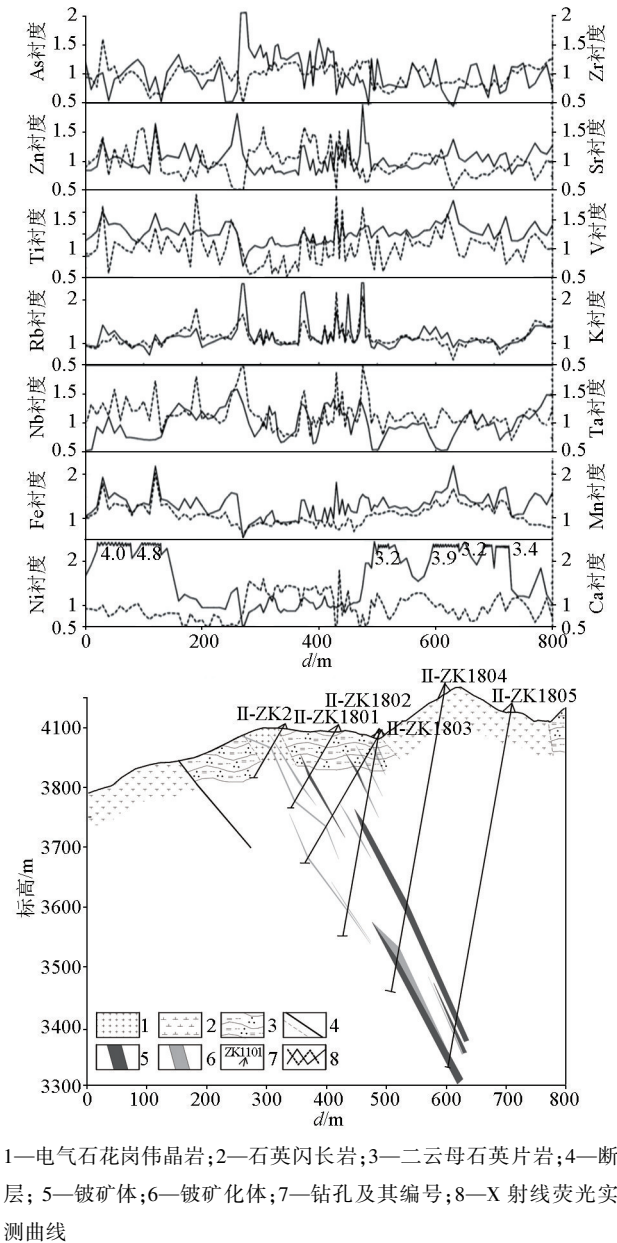


图 3 XP3 测线 X 射线荧光测量 14 种元素综合剖面
Fig. 3 14 elements comprehensive profile by X-fluorescence measurement in XP3 line

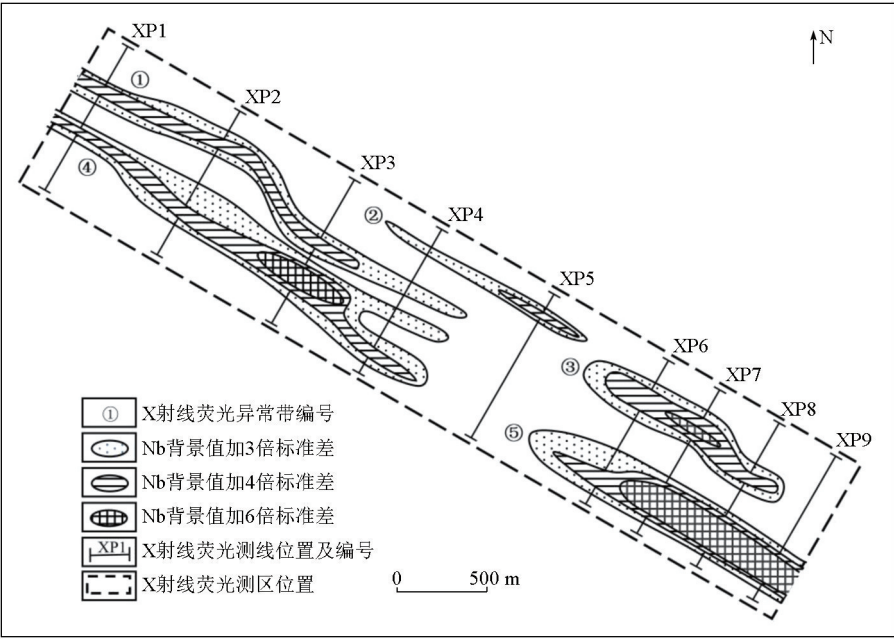


图 4 茶卡北山土壤 X 射线荧光测量 Nb 异常分布

Fig. 4 Nb abnormal map of soil X-ray fluorescence measurement in Chakabeishan

需要说明的是,由于研究区第四系覆盖广泛,且面对的主要为隐伏矿,实际获得的各元素的测量值幅度均较低,根据勘查区实际地质情况,采用了背景值(平均值)加 3 倍标准差(本文计算得出 Nb 背景值为 1 800 cp/80s,标准差为 216 cp/80s)为异常下限(根据概率论可知,超过该下限的测量值为异常值的置信概率超过 99%)。

为了保证测量结果的可靠性,对 XP3 测线全线 81 个测点进行了检查测量,检查测点占整个测区的 11.1%。结果表明,Nb、Ta、Rb、K 4 种元素检查测量与基本测量测点间最大误差不超过 8%,平均误差分别为 2.9%、3.1%、2.4%、2.2%。

3 已知区典型剖面矿致 X 射线荧光异常特征

以茶卡北山矿区部署的 XP3 测线测量结果(图 3)为例,研究 X 射线荧光异常分布特征及其与矿体空间上的关联关系。

从图 3 可见,矿(化)体聚集区域出现在 260~490 m,在这个区域,与矿(化)体有关联的 X 射线荧光异常元素有两组:

- 1) 正异常元素组,包括 Rb、Nb、Ta、K、Ca 5 种元素;
- 2) 负异常元素组,包括 Ni、Mn、Fe 3 种元素。

先讨论正异常元素组元素与矿(化)体间的关联关系。总体上 Rb、Nb、Ta、K 4 种元素的异常都出现在剖面 250~500 m 区域内,这些元素出现异常的

位置与地质工作确认的矿(化)体聚集区域 260~490 m 几乎完全一致。在这些元素的异常区域内,每个元素都捕获有多个异常峰,各元素的异常峰值位置基本都出现在出露地表的矿(化)体或距离地表较近的矿(化)体顶部在地表投影位置处,偏差一般不超过 30 m。

相较上述 4 种元素的异常,Ca 异常比较特殊,它虽然在 250~500 m 也出现异常,但其呈现的是连续异常,没有明显的对应矿脉的异常峰值出现,据此推测,Ca 异常揭示的应该是赋存矿的伟晶岩脉贡献,而非矿(化)体所致。换言之,Ca 应该是含矿层位的指示元素,Ca 异常应该是含矿层位伟晶岩脉的识别标志。

分析茶卡北山勘查区其他已知区剖面的 X 射线荧光测量成果图,除 XP5 测线没有捕获到异常外,其他剖面的 X 射线荧光正异常元素组合特征与 XP3 基本一致。

据此可以做出结论:

- 1) Ca 是含矿层位伟晶岩脉的有效指示元素,Ca 的 X 射线荧光异常是伟晶岩脉的指示标志;
- 2) Rb、Nb、Ta、K 是矿异常的有效指示元素,Rb、Nb、Ta、K 4 种元素的 X 射线荧光异常是矿异常的重要标志。

再研究负异常元素组与矿(化)体间的关系。图 3 显示,Ni、Mn、Fe 3 种元素在剖面 250~500 m 区域中均出现一定亏损(低于测区背景值或显示低值),形成负异常(或低值)区。这种负异常(或低

值)区没有明显的负异常峰值出现,呈现连续分布的状态。3 种元素的 X 荧光异常低值分布形态,与 Ca 在这一区域内出现的连续正异常分布形态几乎为镜像分布。这表明,Ni、Mn、Fe 3 种元素在 250~500 m 区域出现的连续负异常(或低值)区,实际是对含矿层位伟晶岩脉赋存位置的指示。

通过上述讨论,可以得到重要的基本认识:

1) 茶卡北山勘查区开展 X 射线荧光测量找矿时,有两组对找矿有指示作用的 X 荧光元素,一组为正异常元素,包括 Rb、Nb、Ta、K、Ca;一组为负异常元素,包括 Ni、Mn、Fe。这是与矿有关的 X 射线荧光异常的基本元素组合。

2) Ca、Ni、Mn、Fe 是含矿层位伟晶岩脉的有效指示元素,Ca 的正 X 荧光异常区与 Ni、Mn、Fe 的负异常(或低值)区,是对含矿层位伟晶岩脉的识别标志。

3) Rb、Nb、Ta、K 是含矿伟晶岩脉的有效指示元素,4 种元素的异常是矿异常的识别标志。当 Rb、Nb、Ta、K 的正异常出现在 Ca、Ni、Mn、Fe 指示的含矿层伟晶岩脉内时,Rb、Nb、Ta、K 的正异常可以判定为矿异常。

4 测区 X 荧光测量结果综合分析

4.1 已知区测量结果分析

从第 3 节关于 XP3 测线 X 射线荧光测量综合

剖面(图 3)的讨论可知,虽然不能通过 X 射线荧光测量直接获取矿体元素 Li 与 Be 的含量或 X 射线荧光强度结果,但通过 Ca、Ni、Mn、Fe 以及 Rb、Nb、Ta、K 两组元素的 X 射线荧光测量结果,依然可以可靠评价出露地表或浅埋深的隐伏伟晶岩脉顶部是否含矿。

从图 4 中我们知道,通过 X 射线荧光测量获得的 Nb 元素的 X 射线荧光平面等值线图圈出了 5 个异常带。

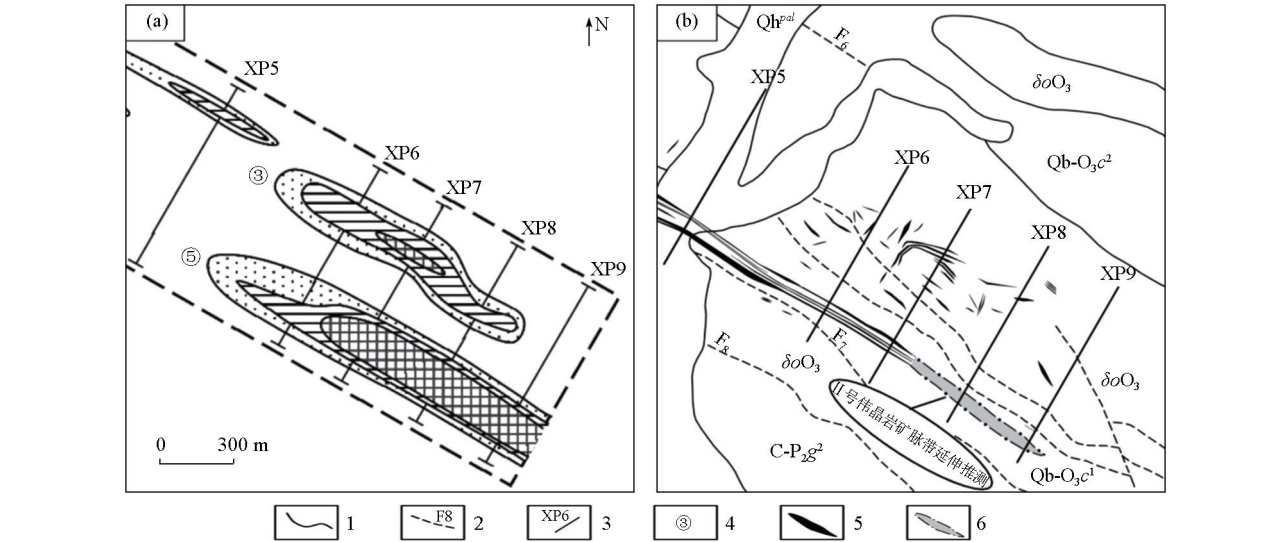
先讨论分布于测区北侧的①、②、③号异常带。对照测区地质图(图 2)可知,①号异常带与Ⅱ号伟晶岩矿脉带北侧的多条伟晶岩脉空间位置形成对应,②、③号异常带则与Ⅰ号伟晶岩矿脉带空间位置相契合。

④、⑤异常带均分布于Ⅱ号伟晶岩矿脉带对应位置,④异常带与测区西北段Ⅱ号伟晶岩矿脉带空间位置完全契合,⑤号异常带与测区东南段Ⅱ号伟晶岩矿脉带空间位置高度一致。

前述分析表明,利用快速 X 射线荧光测量成果资料,可以确定含矿伟晶岩脉的位置、走向与延伸长度。

4.2 测区东南端测量结果分析

图 5 展示了 X 射线荧光测区东南端捕获的 Nb 的 X 射线荧光异常(图 5a),以及异常分布区的地质背景情况(图 5b)。



1—地质界线; 2—断层; 3—实测土壤 X 射线荧光剖面; 4—X 荧光异常带编号; 5—伟晶岩矿脉带; 6—推断伟晶岩脉;(a) 中图例同图 4;(b) 中图例同图 2
1—geological boundaries; 2—fault; 3—measured soil X-ray fluorescence profile; 4—X fluorescence anomaly band numbering; 5—pegmatite vein belt; 6—inferring pegmatite dike groups; in Fig. 5a, the legends is the same as Fig. 4; in Fig. 5b, the legends is the same as Fig. 2

图 5 茶卡北山 X 射线荧光测区东南端 Nb 异常(a)及推断解释(b)
Fig. 5 Nb anomaly at the southeast end of the X-ray fluorescence survey area of Chakabeishan(a) and its inferred interpretation(b)

从图 5b 中可见,Ⅱ号伟晶岩矿脉带赋存于测区南部,沿北西(东南)方向延伸,前人的工作已经控制该伟晶岩带延伸到 XP7 号测线位置截止,在测区开展 X 射线荧光测量工作前,XP8~XP9 测线希望加以控制的区域是未知区,该伟晶岩带是否会穿越 XP8 与 XP9 测线向东南方向继续延伸是没有依据的。

从图 5a 中可见,在 X 射线荧光测区的东南端,捕获了两条 Nb 元素的 X 射线荧光异常带。北侧的③号异常带,其西北段在 XP6、XP7 测线区域与Ⅰ号伟晶岩矿脉带空间位置高度契合,无疑反应了该伟晶岩矿脉带的空间位置。该异常带长轴方向与地层走向一致,沿东南方向穿越 XP8 后,延伸到 XP9 之前圈闭。③号异常带的空间分布给出了Ⅰ号伟晶岩矿脉带除已控制区域外,至少向东南方向延伸了 600 m 的证据。南侧的⑤异常带从 XP5 前开始,与

地层走向方向一致,沿东南方向先后穿越已知区的 XP6、XP7 两条测线后,继续穿越 XP8、XP9 测线(见图 5a)。穿越 XP9 测线后,异常幅度没有衰减,显示出异常穿越 XP9 测线后继续向东南方向延伸的趋势相当明显。⑤异常带西北段(XP6、XP7 测线区域),其异常空间位置与Ⅱ号伟晶岩带的空间位置完全吻合,因此可以判断⑤异常带应该是Ⅱ号伟晶岩带引起的异常。据此,根据⑤异常带穿越 XP9 测线后有继续向东南方向延伸趋势情况,可以推测,Ⅱ号伟晶岩带沿东南方向有较大延伸,整个矿脉带将比原控制截止位置延伸 1 000 m 左右。

4.3 测区西北部测量结果分析

图 6 展示了 X 射线荧光测区西北端捕获的 Nb 的 X 射线荧光异常(图 6a),以及伟晶岩脉延伸的推断解释(图 6b)。

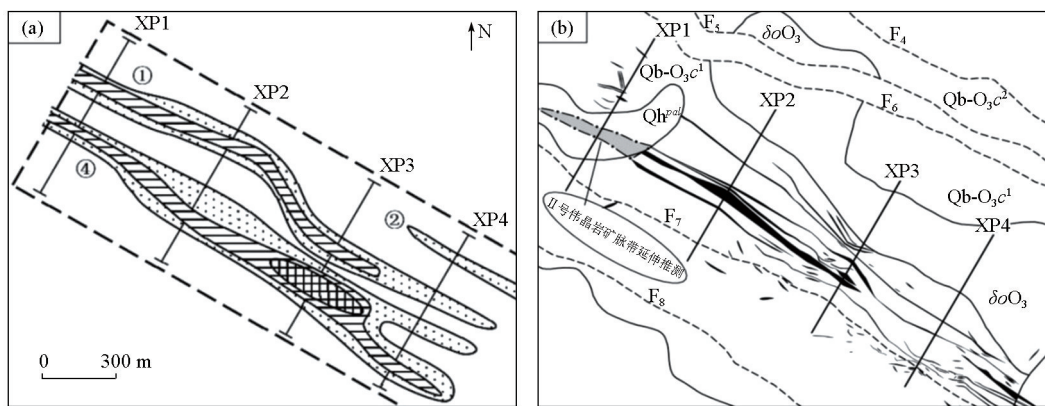


图 6 茶卡北山 X 射线荧光测区西北端 Nb 异常 (a) 及推断解释 (b) (图例同图 5)

Fig. 6 Nb anomaly at the northwest end of the X-ray fluorescence survey area of Chakabeishan (a) and its inferred interpretation (b) (the legend is the same as Fig. 5)

从图 6b 中可见,Ⅱ号伟晶岩带赋存于测区南部,沿北西方向延伸,前人的工作已经控制该伟晶岩带延伸到 XP2 号测线位置截止,在测区内开展 X 射线荧光测量工作前,XP2 西北侧的 XP1 测线是希望加以控制的未知区域,该伟晶岩带是否会穿越 XP1 向西北方向继续延伸尚没有依据。

从图 6b 中可见,在 X 射线荧光测区的西北端,捕获了两条 Nb 元素的 X 射线荧光异常带。北侧的①号异常带在 4.1 节中已经做了分析。南侧的④异常带从 XP5 测线前开始,与地层走向方向一致,沿西北方向先后穿越已知区的 XP4、XP3、XP2 三条测线后,继续穿越 XP1(见图 6a)。穿越 XP1 测线后,异常宽度有所缩小,幅度没有明显衰减,表明异常穿越 XP1 测线后有继续向西南方向延伸的趋势。④号异常带东南段(XP2、XP3、XP4 测线区域),其异常空间位置与Ⅱ号伟晶岩带的空间位置高度契合,

因此可以判断④异常带应该是Ⅱ号伟晶岩带引起的异常。据此,根据④异常带穿越 XP1 测线后有继续向西北方向延伸趋势的情况,可以推测,Ⅱ号伟晶岩带沿西北方向还有一定延伸,整个矿脉带将比原控制截止位置延伸 400 m 左右。

4.4 工程验证情况

依据前述推断结论,针对Ⅱ号伟晶岩矿脉带向东南延伸情况,在 XP8 线上实施了 ZK25801 孔进行深部验证。结果在孔深 95~195 m 处发现 3 层铍矿(化)体,其聚集区域出现在测线 200~280 m 位置,与地表土壤 X 射线荧光 Rb、Nb、Ta、K 异常出的 180~340 m 区域吻合,可以认定异常就是深部铍矿(化)伟晶岩脉的反映,也进一步证明Ⅱ号伟晶岩矿脉带沿东南延伸的推论是可信的;至于伟晶岩矿脉带沿西北方向延伸的推论,有待今后进一步工程验证。

5 结论

研究与找矿应用表明,在茶卡北山勘查区可以利用X射线荧光正异常指示元素与负异常指示元素相互补充,协同判定所捕获的X荧光异常是否为矿异常。其中,Ca的X射线荧光正异常与Ni、Mn、Fe的负异常(或低值)区共同指示伟晶岩脉区的位置,出现在伟晶岩脉区内的Rb、Nb、Ta、K正异常位置,则用来判定矿化伟晶岩脉的位置。研究证实,矿(化)伟晶岩脉的露头或矿体顶部的投影位置与Rb、Nb、Ta、K正异常位置具有良好的一致性,换言之,当判定4种元素的X射线荧光异常分布在伟晶岩脉中时,利用4种元素的X射线荧光异常不仅可以基本确定含矿伟晶岩脉顶部在地表的投影位置,还能够利用其异常带长轴方向与长度判定矿脉的走向与延伸长度。

在X射线荧光测区的未知区域开展的找矿应用示范成果表明,测区西北方向,Ⅱ号伟晶岩带形成的X射线荧光异常带沿地层走向穿越未知区域的XP1测线,表明勘查区内Ⅱ号伟晶岩带在现有控制截止处的基础上,向西北方向至少有400 m的延伸。而在测区的东南端,Ⅱ号伟晶岩带形成的X射线荧光异常带沿地层走向穿越未知区域的XP8、XP9测线,表明勘查区内Ⅱ号伟晶岩带在现有控制截止处的基础上,向东南方向至少有100 m的延伸。

参考文献(References):

[1] 王秉璋,韩杰,谢祥镭,等. 青藏高原东北缘茶卡北山印支期(含绿柱石)锂辉石伟晶岩脉群的发现及Li-Be成矿意义[J]. 大地构造及成矿学 2020,44(1):69-79.
Wang B Z,Han J,Xie X L,et al. Discovery of the indosinian(beryl-bearing) spodumene pegmatitic dike swarm in the Chakabeishan area in the northeastern margin of the Tibetan Plateau:Implications for Li-Be Mineralization[J] Geotectonica et Metallogenia, 2020,44(1):69-79.

[2] 潘彤,李善平,王涛,等. 2022,青海锂矿成矿特征及找矿潜力[J]. 地质学报,96(5):1827-1854.
Pan T,Li S P,Wang T,et al. Metallogenic characteristics and prospecting potential of lithium deposits in the Qinghai Province[J]. Acta Geologica Sinica,2022,96(5):1827-1854.

[3] 何兰芳,李亮,申萍,等. 伟晶岩型锂矿床地球物理探测及可可托海实例[J]. 地学前缘 2020,30(5):244-254.
He L F,Li L,Shen P,et al. Geophysical approaches to the exploration of lithium pegmatites and a case study in Koktohay[J]. Earth Science Frontiers,2020,30(5):244-254.

[4] 魏新昊,周楠楠,张顺. 伟晶岩型锂矿人工源电磁勘探可行性

研究[J]. 地学前缘,2023,30(5):265-274.

Wei X H,Zhou N N,Zhang S. Detectability of pegmatite lithium deposits by controlled source electromagnetic methods[J]. Earth Science Frontiers,2023,30(5):265-274.

[5] 王秉璋,潘彤,王强,等. 青藏高原东北缘茶卡北山地区印支期高分异花岗岩的发现及找矿意义[J]. 岩石学报,2023,39(8):2402-2408.
Wang B Z,Pan T,Wang Q,et al. Discovery of indosinian highly fractionated granites in the chaqiabeishan area,NE Tibetan Plateau and its prospecting significance[J]. Acta Petrologica sinica, 2023,39(8):2402-2408.

[6] 吕书俊,董国臣,罗志波,等. 茶卡北山锂辉石花岗伟晶岩锂矿化特征及成矿时限[J]. 岩石矿物学杂志,2023,42(3):350-364.
Lyu S J,Dong G C,Luo Z B,et al. Lithium mineralization characteristics and chronology of spodumene granite pegmatite in the northern Chaka, Mountain Qinghai Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica,2023,42(3):350-364.

[7] 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 fluorescence exploration technology and its application in geological prospecting [M]. Beijing:Science Press,2022.

[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、放射性探测技术与实验[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] 张国亚,周四春,刘晓辉,等. 鄂东南某铀矿勘查区地气与X荧光异常特征及找矿意义[J]. 高校地质学报,2014,20(4):564-569.
Zang G Y,Zhou S C,Liu X H,et al. The abnormal features and prospecting significance of geogas and X-ray fluorescence in exploration area of uranium deposits in Southeastern Hubei Province [J]. Geological Journal of China Universities,2014,20(4):564-569.

[10] 赵娟,孙泽昆,李明喜. 青海景观区特征和地球化学勘查方法技术[J]. 物探与化探,2004,28(3):239-241.
Zhao J,Sun Z K,Li M X. Landscape features of Qinghai Province and selection of geochemical exploration methods and techniques [J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2004,28(3):239-241.

[11] 王予生,史书乐,刘守月,等. 青海土壤[M]. 北京:中国农业出版社,1997.
Wang Y S,Shi S L,Liu S Y,et al. Qinghai soil[M]. Beijing:China Agriculture Press,1997.

[12] 朱鹤健,陈健飞,陈松林,等. 土壤地理学[M]. 北京:高等教育出版社,2019.
Zhu H J,Chen J F,Chen S L,et al. Soil geography[M]. Beijing: Higher Education Press,2019.

X-ray fluorescence anomalies in the Chakabeishan exploration area for lithium-beryllium deposits, Qinghai Province: Characteristics and implications for prospecting

WANG Ya-Dong¹, ZHOU Si-Chun², LIU Xiao-Hui², HU Bo², WANG Guang-Xi², XU Yun-Fu¹,
CAO Hong-Liang¹, FAN Xin-Sheng², HAN Ruo-Pu²

(1. Key Laboratory of the Northern Qinghai-Tibet Plateau Geological Processes and Mineral Resources, Qinghai Geological Survey Institute, Xining 810012, China; 2. Applied Nuclear Technology in Geosciences Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The research on exploring pegmatite-type lithium-beryllium deposits through soil X-ray fluorescence measurements was conducted in the Chakabeishan exploration area of Ulan County, Qinghai Province. The results demonstrate that soil secondary halos formed by granite pegmatite-type lithium-beryllium deposits can be accurately captured by measuring two groups of indicator elements, i. e. , Ca, Ni, Mn, Fe, and Nb, Ta, Rb, K. The X-ray fluorescence anomalies of the first group of elements indicate the position of the ore-hosting horizon (i. e. , granitic pegmatites). Those of the second group of elements are used to determine the location, strike, and planar extension range of the pegmatite veins with mineralization manifestation. As inferred from the captured X-ray fluorescence anomalies, the main ore veins in the exploration area exhibit significant extensions along the northwest and southeast directions. This conclusion provides a reference for further prospecting work.

Key words: handheld X-ray fluorescence instrument; soil X-ray fluorescence measurement; Chaka North Mountain; granite pegmatite-type lithium-beryllium deposit

(本文编辑:蒋实)