

doi: 10.11720/wtyht.2023.0296

甘雪军,周四春,刘晓辉,等.综合地气测量在湘南仁里外围稀有金属矿勘查中的应用[J].物探与化探,2023,47(6):1649-1656. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.0296>

Gan X J, Zhou S C, Liu X H, et al. The application of an integrated geogas prospecting for exploring rare metal deposits in the periphery of the Renli mining area, southern Hunan Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(6): 1649-1656. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.0296>

综合地气测量在湘南仁里外围稀有金属矿 勘查中的应用

甘雪军¹,周四春¹,刘晓辉¹,王登红²,文春华³

(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. 湖南省地质调查院, 湖南 长沙 410083)

摘要:在湘南仁里矿区外围的黄柏山测区部署了 6 条测线,应用综合地气测量开展了花岗伟晶岩稀有金属矿找矿研究。依据矿区已知伟晶岩矿脉上方土壤 X 射线荧光与地气异常特征,以 X 射线荧光测量获取的(Nb+Ta+Rb)衬度累加值为主要找矿指示,捕获了 5 个与地层走向一致的土壤 X 射线荧光异常带。1~4 号异常带与已有的伟晶岩矿脉空间位置一致,对可能的伟晶岩矿脉的位置、走向及长度提供了评价依据,依据异常长度,有可能会显著延长原已知矿脉的长度;在测区南侧新发现的 5 号异常带,长度超过 1 000 m,提供了新的找矿靶位。在长度超过 1 500 m 的 4 号主异常带中部 11 号测线开展了地气测量,捕获到反映伟晶岩脉深部矿化信息的 Li、Be 和 Nb 等元素的地气异常,证实测区内伟晶岩矿脉向深部有较大延伸。

关键词:土壤 X 射线荧光测量;(Nb+Ta+Rb)衬度累加值;地气测量;深部含矿信息;花岗伟晶岩稀有金属矿

中图分类号: P632 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2023)06-1649-08

0 引言

仁里超大型钽铌矿床是新近发现的花岗伟晶岩型稀有金属矿床,该矿床位于湖南省平江县北东部的幕阜山岩体西南缘,是目前国内稀有金属矿床中钽和钽含量最高的矿床之一^[1]。

根据前人的研究,除已发现的仁里超大型钽铌矿床外,仁里外围的幕阜山岩体南缘地区还分布有众多伟晶岩脉,有着很好的潜在找矿远景。但该区域地质工作程度较低,地势陡峭,植被覆盖严重难以穿行^[2],加之花岗伟晶岩矿脉与围岩物性差异不明显,开展传统物探方法找矿困难,而全靠化探开展找矿,又受经费限制。为此,笔者所在课题组在仁里矿区外围的找矿应用研究中,采用了土壤 X 射线荧光测量和地气测量相结合的综合地气勘查技术进行探

测。本文介绍了在幕阜山岩体南缘、仁里矿区外围的黄柏山地区开展综合地气测量找矿应用的成果。

1 研究区地质概况

幕阜山稀有金属矿集区大地构造位置属扬子陆块和华夏陆块的中间过渡部位(图 1a),位于江南新元古代造山带中段北缘的湘东北断隆带^[3]。区内地层跨及下扬子地层分区和江南地层分区,出露地层有元古宇待建系—长城系、新元古界青白口系,下古生界寒武系、奥陶系、志留系,新生界白垩—古近系、第四系(图 1b)^[4]。

本文研究的黄柏山地区与仁里矿床同处于湘东北幕阜山西南缘,位于仁里超大型钽铌矿床外围的西北边^[5]。区内地层与岩性简单,主要为低角度的冷家溪群云母片岩,走向 NW,倾向 SW。该区北部

收稿日期: 2023-07-25; 修回日期: 2023-10-07

基金项目: 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)

第一作者: 甘雪军(1999-),男,成都理工大学在读硕士研究生,主要从事核技术应用研究工作。Email:1690020594@qq.com

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工作。Email:zsc@cdu.edu.cn

(图 2), 每条测线布设长度 920 m, 6 条测线控制面积约 1 720 165 m²。测线基本测量点距 20 m, 在已知矿体上方加密到 10 m。

6 条 X 射线荧光测线部署的目的是对测区内已有伟晶岩脉在(近)地表的含矿性进行评价, 对伟晶岩脉之间的关联关系进行整合, 并探寻新的找矿线索。

为了评价测区内含矿伟晶岩脉深部矿化情况, 在穿越测区 $\gamma p47$ 与 $\gamma p46$ 号伟晶岩脉的 11 号测线上部署了地气测量。

为了检测综合地气方法的有效性, 研究矿致异常的特征, 同时为黄柏山测区的异常分析解释提供必要的依据, 在黄柏山测区综合地气测量工作开始前, 在地域上相邻、地质条件相同的仁里矿区布设了一条垂直于 $\gamma p5$ 号伟晶岩矿脉的 44 线进行可行性实验。

3 综合地气测量技术方法

为确保地气和 X 射线荧光测量结果间成果资料分析解释的可对比性, 同时开展两种方法测量的测线上, 采用了同线共点测量方案^[8]。

3.1 土壤 X 射线荧光测量技术方法

对于土壤 X 射线荧光测量, 为了减少现场测量中的几何效应、矿化不均匀效应、颗粒度效应等影响^[9], 选择了在野外取样, 并在室内稍加处理后进行测量的技术方案。采样时, 为保证采集 B 层土壤, 根据测区腐殖质(A)层分布在 0~25 cm 的情况, 统一取 30 cm 坑底细粒土壤 100 g。取回的土壤样品经阴干筛选出 80~100 目细粒部分装杯, 填装为饱和厚度样品。

处理后的土壤样品使用 Oxford 生产的 X-MET7500 型手持式 X 射线荧光仪进行测量。这种仪器能够同时分析地质样品中 30 种以上的元素及其含量^[9]。为了确定需要和可以测量的元素, 对测区 11 号测线矿体上方的 18 号测点以及背景区的 74 号测点的土壤样品进行了谱线测量, 并检测出了 17 种元素。通过地球化学原理分析, 最终选择 14 种元素作为仁里矿区及外围 X 射线荧光测量的荧光元素。表 1 列出了所确认的测量元素的相关信息。

表 2 湖南平江县仁里矿区及外围地气样品分析元素

Table 2 Analysis elements of Renli mining area and peripheral ground gas samples in Pingjiang County, Hunan Province

分析方法	分析元素	分析元素种类
ICP-MS	Li, Be, Sc, Ti, V, Mn, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Rb, Y, Nb, Ta, Mo, Cd, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, W, Tl, Pb, Bi, Th, U, Sr, In, Zr, Hf, Fe, Au, As	48

表 1 湖南平江县仁里矿区及外围土壤样品 X 射线荧光测量元素

Table 1 X-ray fluorescence measurement elements of Renli mining area and peripheral soil samples in Pingjiang County, Hunan Province

分析方法	分析元素	测量元素种类
XRF	K, Ca, Cr, Mn, Fe, Ni, Zn, Pb, Rb, Sr, Zr, Ta, Y, Nb	14

在完成所有土壤样品的测量后, 对研究区 11 号测线上的 18 个测点(占全体测点的 5.56%)样品中 K、Fe、Rb 进行了重复测量, K 的测量值相对偏差范围是 0.4%~3.6%, 平均值为 1.4%; Fe 的测量值相对偏差范围是 0.1%~1.2%, 平均值为 0.3%; Rb 的测量值相对偏差范围是 0.1%~4.3%, 平均值为 1.1%。3 组数据测量结果最大相对误差小于 5%, 结果可靠。

3.2 地气测量技术方法

考虑到地气探测对象为边界品位仅万分之几的稀有金属矿, 研究区采用了提高探测灵敏度的动态地气测量^[10]。该动态地气采样装置由采样器、干燥器、捕集器和抽气泵组成, 各部分用硅胶导管连接。采样时, 利用泵的抽吸作用, 将游离于覆盖层空隙内的地气物质经采样器吸入捕集器, 使之被液态捕集剂俘获, 成为地气样品。地气采样深度在地表覆盖层 50 cm 深处, 采用双捕集器串联以增加采样量, 抽气速度为 2 L/min, 每个测点采样时间为 30 min^[10]。

除采样装置中安置有两重微尘过滤外, 地气样品处理时, 对动态地气采样获得的样品还通过外观做判断, 对采样瓶液体中出现固体颗粒或者颜色发生了变化者, 均加以剔除。然后进行低温浓缩, 最后统一滴定为预先实验选定的体积。

预处理后的地气样品(液体)被送往中核集团北京地质研究院分析中心, 采用最新一代 ICP-MS (ELEMENT XR) 等离子体质谱仪完成对样品的分析。

在分析过程中, 除了检测矿物主要元素 Li、Be、Nb、Ta 外, 也检测了其他常见金属元素和全套稀土元素。共分析了 48 种元素, 其中有 40 种元素是有效的(表 2)。

为了保证用于找矿的地气测量结果的可靠性, 对 44 线 51 个测点的主要地气指示元素 Li、Be、Nb、Ta 测量结果进行了统计, 结果列于表 3。

表 3 湖南平江县仁里矿区及外围地气样品主元素分析结果统计

Table 3 Main element analysis results of Renli mining area and peripheral geogas samples in Pingjiang County, Hunan Province

元素	检出限/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	空白样/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	实测含量范围/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	平均值/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	平均值/空白样
Be	0.002	0.003	0.019~4.700	0.3114	103.8
Li	0.100	0.175	1.700~38.60	4.504	25.7
Nb	0.002	0.002	0.010~0.096	0.028	14.0
Ta	0.002	0.002	0.002~0.049	0.007	3.5

注:元素检出限由核工业北京地质研究院测试中心检测报告给出;当测点某元素的测量值小于检出限时,取检出限的一半作为测量结果;含量数据是测量值扣除空白后的值;当空白含量小于检出限时,作 0 值处理。

从表 3 可见,51 个测点 Be 元素测量结果的平均值是空白样值的 103 倍,Li、Nb 分别为 25.7 与 14 倍,Ta 只有 3.5 倍,可以认为对 Be 的地气测量结果是完全可靠的,Li、Nb 有较好参考价值,Ta 只能参考。为此,在后文将以 Be 为主对地气测量结果进行分析。

4 仁里类花岗伟晶岩矿床综合地气异常特征研究

因为同属相同地质单元,黄柏山地区花岗伟晶岩稀有金属矿的类型应该与仁里相同,换言之,依据仁里矿床上获得的综合地气异常特征,可以用来评价研究区的综合地气测量资料。

依据仁里矿区穿越已知矿脉 $\gamma p5$ 的 44 线上开展的土壤 X 射线荧光与地气测量数据,按同一矿区作为一个地质背景单元的原则统计荧光元素和地气元素的平均值,并将其换算成衬度值作为成图参数,编制了仁里矿区 44 线土壤 X 射线荧光多元素测量综合剖面图(图 3)及仁里矿区 44 线地气测量结果推断解释图(图 4)。

44 线全线均为第四系浮土覆盖区。X 射线荧光测量捕获了 X-1 偏高区及 X-2 异常区(图 3)。X-1 偏高区位于隐伏含矿伟晶岩脉在地表投影位置的正上方,区内 Rb、Nb、Ta 呈偏高显示,Zr 呈负异常;X-2 异常区与已知矿脉位置一致,区内 Rb 有明显异常,Nb、Ta 依然呈偏高显示,Zr 与矿体主元素 Nb、Rb、Ta 间的反变关系明显,呈负异常。44 线土壤 X 射线荧光测量可行性试验结果表明,对研究区这样植被发育、浮土覆盖广泛的区域,指示元素的幅度值普遍偏低,但同时 Rb、Nb、Ta 异常(偏高)与 Zr 缺失造成的负异常(或低值)区,对含矿伟晶岩脉的位置会有较好的指示效果。而含矿伟晶岩脉区会出现 Zr 缺失,这是因为伟晶作用中 Zr 能形成 $M_2[RF_6]$ 型络合物 $Na_2[ZrF_6]$,其溶解度较大,会在气液中迁移出伟晶岩^[11],导致伟晶作用后期形成的伟晶岩矿

脉中 Zr 的缺失。根据矿体上方 X 射线荧光异常特征,在黄柏山开展土壤 X 射线荧光测量时,采用了归一化 $(Rb+Nb+Ta)/Zr$ (均为衬度值,下同)做参数,以便进一步提高捕获 X 射线荧光异常的幅度,提高利用 X 射线荧光测量信息发现找矿线索的灵敏度。

44 线除了在已知矿脉上方捕获到 X-1、X-2 两个 X 射线荧光异常(偏高)区外,在矿脉倾覆一侧根据地气测量稀有金属簇元素 Li、Be 和 Nb 的结果,

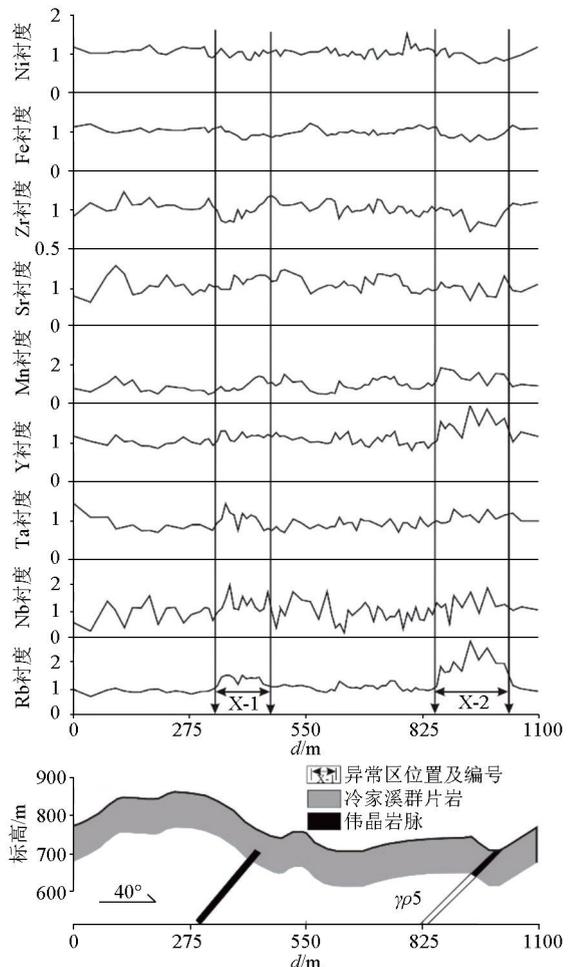


图 3 仁里矿区 44 线土壤 X 射线荧光测量综合剖面
Fig. 3 Comprehensive profile of soil X-ray fluorescence multi-element measurement of 44 line in Renli mining area

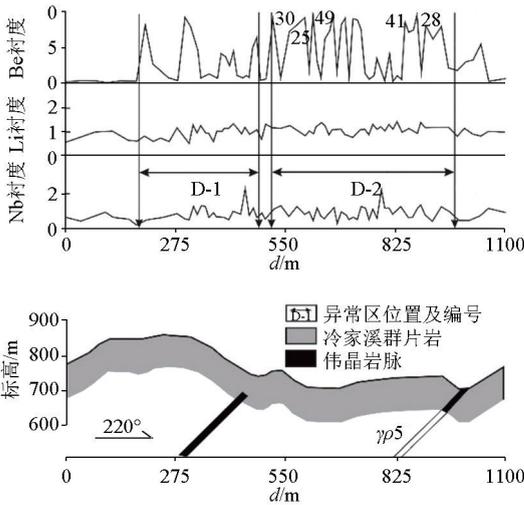


图4 仁里矿区44线地气测量综合剖面

Fig. 4 Comprehensive profile of geogas survey of 44 line in Renli mining area

捕获到了 D-1、D-2 两个以 Be 为主的地气异常区 (图4)。

地气异常具有连续性差,离散性起伏跳动较大的特点,但在矿体上方会形成一定的异常区域^[12]。由于地气物质的垂向迁移特性,这些异常区的异常实际来自不同深度的矿体。

根据地气异常分布特征,D-2 异常是 γp5 号伟晶岩矿脉深部含矿性的反映,其具有相当高的 Be 异常,异常平均值远高于剖面左侧隐伏伟晶岩矿脉上方的 D-1 异常,最高异常值达到背景值的 49 倍。依据测线坐标,计算出 D-2 异常的水平宽度约为 400 m (见图4),根据 γp5 号伟晶岩矿脉倾角在 45° 左右,推测矿脉垂直延伸深度至少达到 400 m,γp5 号伟晶岩矿脉倾伏端延伸长度不会少于 560 m。地气测量结果对 γp5 号伟晶岩深部含矿性及延伸深度、长度的预测结果,与 γp5 号伟晶岩矿脉钻探工程结果基本吻合。

D-1 异常是测线左侧隐伏矿脉产生的异常,依据 D-1 异常推测,该矿脉沿倾覆方向也应该有较大的延长与延深。鉴于没有钻探资料对比,对此异常不做进一步讨论。

通过对仁里矿区 44 线开展综合地气测量研究,可以得出以下结论:联袂应用 X 射线荧光测量与地气测量构建的综合地气测量技术方法对花岗岩伟晶岩稀有金属矿的探测是有效的。依据 X 射线荧光测量捕获的 (Nb+Ta+Rb)/Zr 异常,中心位置通常处于伟晶岩脉顶部在地表的投影范围之内。依据矿脉的产状及地气测量捕获的矿体元素产生的异常区域宽

度,可以对矿脉延伸的深度进行初步的判断(假定倾角不会发生改变)。

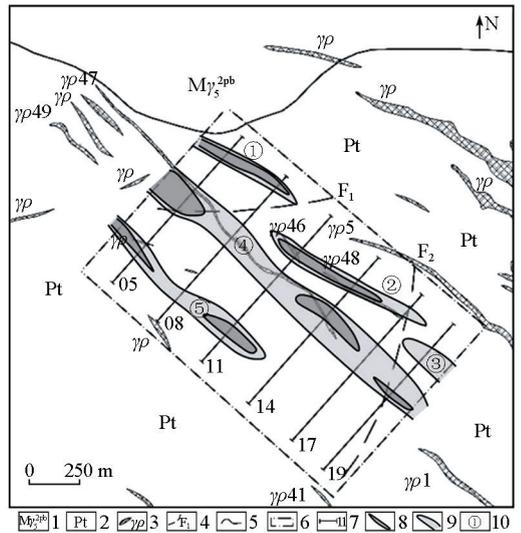
5 黄柏山测区综合地气测量找矿应用

5.1 测区综合地气测量及结果

根据仁里矿区 44 线综合地气探测研究,依据黄柏山测区 6 条测线上实测获取的 396 个测点的土壤 X 射线荧光测量数据进行衬度处理后,将每一测点的 (Nb+Ta+Rb) X 射线荧光测量累加值作为主要找矿指示,编制了黄柏山测区的 (Nb+Ta+Rb)/Zr 归一化累加比值平面等值 (图 5)。

由于测区为植被发育浮土全覆盖区域,探测对象为有一定覆盖层的隐伏矿体,测量获取的指示元素的幅度值普遍较低,无法按传统的地球化学规范圈图,为此采用了背景值加 2 倍标准差为异常下限。理论上这样划定的异常区为真异常的置信概率已达到 95% 以上,而现场考察表明,所圈出的异常与研究区实际地质情况是相符合的。

在 11 号测线上针对探寻 γp47 号等伟晶岩脉深部含矿性而开展的地气测量,获取了 51 个测点的地



1—中粒似斑状黑云母二长花岗岩;2—冷家溪群片岩;3—伟晶岩脉及编号;4—推测断层;5—地质界线;6—X 射线荧光测区;7—测线及编号;8—平均值加 5 倍标准差圈定的异常区;9—平均值加 2 倍标准差圈定的异常区;10—X 射线荧光异常编号

1—medium-grained porphyry-like biotite monzonitic granite; 2—Lengjiaxi schist; 3—pegmatite vein and number; 4—speculative faults; 5—geological boundaries; 6—X-ray fluorescence measurement area; 7—survey line and number; 8—the abnormal area defined by the mean value plus 5 times standard deviation; 9—the abnormal area defined by the mean value plus 2 times standard deviation; 10—X-ray fluorescence anomaly number

图5 黄柏山测区(Nb+Ta+Rb)/Zr 归一化累加比值平面等值线图
Fig. 5 Measurement area (Nb+Ta+Rb)/Zr normalized accumulation ratio plane isometric map in Huangboshan area

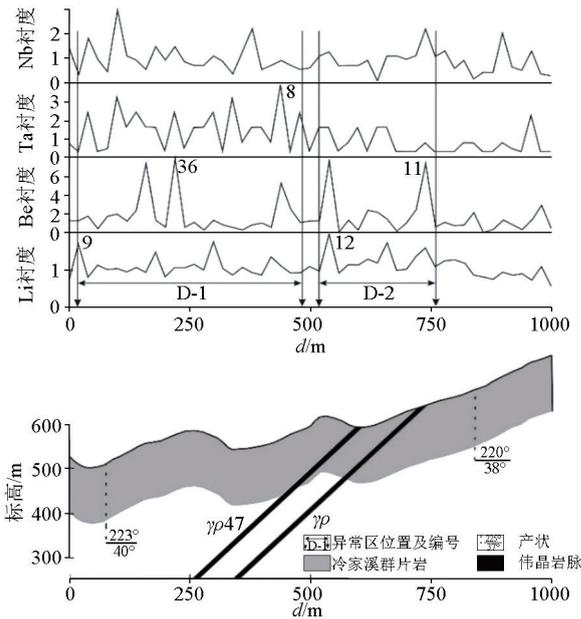


图6 仁里矿区外围11号测线地气测量综合剖面
Fig. 6 Comprehensive profile of geogas survey of line 11 outside the Renli mining area

气测量数据,图6采用矿体元素Li、Be、Ta、Nb的地气测量数据,经衬度处理后编制了11号测线地气测量综合剖面图。

5.2 测量资料综合分析与解释

从图5可见,X射线荧光测量捕获了5个与地层走向一致的X射线荧光异常带。下面逐一对5个异常的找矿意义进行分析与推断解释。

①~③号异常带位于γp47号伟晶岩脉的北侧(图5),其中①、③号异常带是新发现异常,分别位于测区西北区域与东南区域;②号异常位于①号异常带之东南,其西北端起于推测断裂F₁之东南侧,东南端止于F₂断裂处,位于③号异常之西北,长度超过600m。②号异常西北端与γp46号伟晶岩脉空间位置契合,东南端与γp48号空间位置一致,②号X射线荧光异常带可能给出了γp46与γp48号两条伟晶岩脉实际应该是同一条脉的依据。根据①~③号异常带分别分布于F₁断裂之西北(①号异常)、赋存于F₁与F₂之间(②号异常)、位于F₂断裂之东南(③号异常),且3个异常带长轴方向大致可以连接为同一方向的情况,可以推测3个异常带应该是同一条伟晶岩矿脉被F₁与F₂错断成3段后,对3段伟晶岩矿脉的异常反应。由于①号异常西北端没有圈闭,③号异常东南端没有圈闭,沿①号异常带向西北、沿③号异常带向东南,仍然有进一步找矿的空间。

④号异常带从西北向东南穿越整个测区,长度约2000m。该异常带西北端与γp47号伟晶岩脉空

间位置完全一致,无疑γp47号伟晶岩脉是其异常源。④号异常带给出的找矿意义不仅在于将γp47号伟晶岩脉在测区内向东南方向延伸了800m,还可以根据该异常带不仅与测区外围东南角的γp1号伟晶岩脉走向一致,且长轴方向与γp1号伟晶岩脉可以完美契合连接的情况,提供将γp47号伟晶岩脉与γp1号伟晶岩连接的证据(图7)。

⑤号异常带为新发现的异常,位于γp47号伟晶岩脉的南侧,长度超过1000m(图5)。根据该异常西北端未圈闭,其长轴方向与测区外围西北方向的γp49号伟晶岩脉的走向方向在同一条线上(见图7),推测⑤号异常带应该是γp49号伟晶岩脉向东南方向延伸的脉体所引起,该脉体应该是有价值的含矿伟晶岩脉。

11号测线上开展的地气测量捕获到D-1、D-2两个地气异常区,这两个异常区分别分布在γp47与γp46号伟晶岩脉的倾覆一侧上方(图6),给出了两条伟晶岩脉深部含矿的判断依据。

两个异常区中Be元素幅度最高的地气异常有3处,右侧两处分别对应γp46与γp47号伟晶岩矿脉的近顶部位置,这种空间上的契合,既说明两条伟晶岩脉近地表的上部区域Be比较富集,也给出了

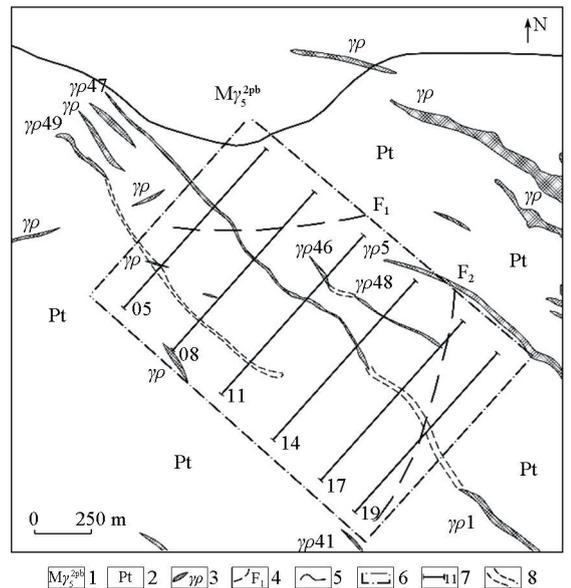


图7 黄柏山测区预测矿脉推断解释
Fig. 7 Interpretation of the inference of predicted veins in Huangboshan area

1—中粒似斑状黑云母二长花岗岩;2—冷家溪群片岩;3—伟晶岩脉及编号;4—推测断层;5—地质界线;6—X射线荧光测区;7—测线及编号;8—推测矿脉
1—medium-grained porphyry-like biotite monzonitic granite; 2—Lengjiaxi schist; 3—pegmatite dikes and number; 4—speculative faults; 5—geological boundaries; 6—X-ray fluorescence measurement area; 7—survey line and number; 8—speculative veins

隐伏伟晶岩矿脉顶部在地表投影位置判断的依据。据此,可以推测依据 X 射线荧光资料推断存在的 $\gamma p49$ 号脉的隐伏延伸脉体在 11 号测线上的顶部在地表的投影区域位于测线 200 m 左右,这与依据地表 X 射线荧光异常位置给出的推断基本一致。

分析地气捕获的 D-1 异常(图 6),异常水平宽度约 450 m,考虑异常右侧离矿脉顶部位置还有约 100 m,矿脉倾角为 45° ,推测测区主矿脉沿倾覆方向最大延伸超过 700 m。且矿脉下部以 Ta、Nb 富集为主。

6 结论与讨论

通过在仁里矿区已知矿体上方的综合地气测量研究,以及仁里矿床外围黄柏山测区的综合地气勘查技术的应用研究表明,综合地气勘查技术对仁里及仁里类型的花岗伟晶岩型稀有金属矿的勘查是有效的。可以得出以下几点结论:

1) 浅覆盖或出露地表的含矿伟晶岩脉是 Rb、Nb、Ta 土壤 X 射线荧光异常的异常源,在含矿伟晶岩脉的上方,还可以测量到 Zr 的负异常,据此,可以依据前述 3 种元素的 X 射线荧光正异常,以及 Zr 的 X 射线荧光负异常评价伟晶岩脉顶部的含矿性。并依据所捕获 $(Rb+Nb+Ta)/Zr$ 的 X 射线荧光异常带的空间分布位置、走向、长度,给出含矿伟晶岩脉的位置、走向与控制长度推断。

2) 在伟晶岩矿脉倾覆一侧,矿体元素 Li、Be、Nb 等是地气异常的异常源。被评价伟晶岩脉在其倾覆一侧出现前述元素跳动大的多种矿体元素的地气异常,是推断该伟晶岩脉深部含矿的依据。根据矿体元素地气异常区域确定的异常宽度,以及所掌握的伟晶岩脉的倾角,可以对该含矿伟晶岩脉的大致埋深深度及矿脉延伸长度做出推断解释。

3) 在黄柏山测区开展的综合地气测量取得一批有价值的找矿成果:根据新发现的 X 射线荧光 ①、③、⑤号异常带提供了新的找矿靶位;不仅提供了 $\gamma p46$ 与 $\gamma p48$ 号伟晶岩应该为一条脉的连接证据,还提供了该伟晶岩矿脉因断裂而发生错位可能存在隐伏的西北段与东南段伟晶岩矿脉的证据,加上新发现的西北段与东南段,可能将该含矿伟晶岩脉的长度总计延伸 1 200 m;根据 ④号 X 射线荧光异常带的分布,给出了 $\gamma p47$ 号含矿伟晶岩延伸穿越测区后与东南方向测区外的 $\gamma p1$ 号伟晶岩脉是同一条脉的依据,可能使得 $\gamma p47$ 号含矿伟晶岩脉总计延长长度超过 1 600 m;根据 11 号测线地气测量捕获的矿体元素异常区,可以推断测区内 $\gamma p47$ 号主矿脉

深部的延伸长度超过 700 m。

鉴于地气测量的效率较低,成本过高,在矿区外围或其他远景区找矿时,可以先按一定比例尺布设测网开展土壤 X 射线荧光测量,以确定含矿伟晶岩脉的位置与走向,然后通过 X 射线荧光捕获的主异常上开展地气测量;确定伟晶岩脉的深部含矿性,并依据伟晶岩矿脉的产状推测可能的矿化延伸深度,从而提高找矿效率。

参考文献(References):

- [1] 刘翔,周芳春,黄志彪,等. 湖南平江县仁里超大型伟晶岩型钽钼多金属矿床的发现及其意义[J]. 大地构造与成矿学, 2018, 42(2): 235-243.
Liu X, Zhou F C, Huang Z B, et al. Discovery of Renli superlarge pegmatite-type Nb-Ta polymetallic deposit in Pingjiang, Hunan Province and its significances[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2018, 42(2): 235-243.
- [2] 文春华,罗小亚,陈剑锋,等. 湘东北幕阜山地区燕山期岩浆演化与稀有金属成矿的关系[J]. 中国地质调查, 2019, 6(6): 19-28.
Wen C H, Luo X Y, Chen J F, et al. Relationship between Yanshanian magmatic activity and rare metal mineralization in Mufushan area of Northeast Hunan[J]. Geological Survey of China, 2019, 6(6): 19-28.
- [3] 陈剑锋,文春华,黄建中,等. 幕阜山南缘仁里稀有金属矿区 7 号伟晶岩脉、辉石闪长岩脉特征及地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2022, 46(5): 951-967.
Chen J F, Wen C H, Huang J Z, et al. Characteristics of No. 7 pegmatite vein and pyroxene diorite in Renli rare metal deposit, south margin of Mufushan batholiths and its geological implications[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2022, 46(5): 951-967.
- [4] 李鹏,李建康,裴荣富,等. 幕阜山复式花岗岩体多期次演化与白垩纪稀有金属成矿高峰:年代学依据[J]. 地球科学, 2017, 42(10): 1684-1696.
Li P, Li J K, Pei R F, et al. Multistage magmatic evolution and cretaceous peak metallogenic epochs of Mufushan composite granite mass: constrains from geochronological evidence[J]. Earth Science, 2017, 42(10): 1684-1696.
- [5] 李鹏,李建康,张立平,等. 幕阜山西南缘黄柏山稀有金属伟晶岩密集区的发现及意义[J]. 矿床地质, 2019, 38(5): 1069-1076.
Li P, Li J K, Zhang L P, et al. Discovery and significance of Huangbaishan rare metal pegmatite concentration area on southern margin of Mufushan[J]. Mineral Deposits, 2019, 38(5): 1069-1076.
- [6] 曹创华,张利军,刘钧,等. 华南植被覆盖稀有金属矿集区快速探测评价体系的建立与应用[J]. 矿床地质, 2022, 41(2): 225-240.
Cao C H, Zhang L J, Liu J, et al. Establishment and application of rapid detection and evaluation system for rare metal ore clusters in vegetation coverage area of South China[J]. Mineral Deposits,

- 2022, 41(2): 225–240.
- [7] 黄建中, 陈剑锋, 文春华, 等. 湘东北地区伟晶岩型锂矿成矿模型及找矿潜力分析[J]. 地球学报, 2022, 43(4): 527–541.
Huang J Z, Chen J F, Wen C H, et al. The metallogenic model and prospecting potentiality of the pegmatite type Li deposit in north-western Hunan Province [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2022, 43(4): 527–541.
- [8] 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.
- [9] 周四春, 刘晓辉, 曾国强, 等. X射线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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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年.
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.

The application of an integrated geogas prospecting for exploring rare metal deposits in the periphery of the Renli mining area, southern Hunan Province

GAN Xue-Jun¹, ZHOU Si-Chun¹, LIU Xiao-Hui¹, WANG Deng-Hong², WEN Chun-Hua³

(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. Geological Survey Institute of Hunan Province, Changsha 410083, China)

Abstract: In this study, six survey lines were deployed in the Huangbaishan survey area in the periphery of the Renli mining area in southern Hunan Province. An integrated geogas prospecting was applied to explore granite pegmatite-type rare metal deposits in the study area. Based on the characteristics of soil X-ray fluorescence and geogas anomalies above the known pegmatite veins in the mining area, this study captured five soil X-ray fluorescence anomaly zones aligning with the formation trend, with the (Nb+Ta+Rb) cumulative value obtained from X-ray fluorescence measurements as the primary prospecting indicator. The Nos. 1~4 anomaly zones exhibit consistent spatial positions with the known pegmatite veins. Accordingly, this study inferred the positions, trends, and lengths of possible pegmatite veins, and a possibility of extension for the known veins based on the anomaly length. The No. 5 anomaly zone discovered on the south side of the survey area, with a length exceeding 1 000 m, serves as a new prospecting target. Geogas prospecting was conducted along the No. 11 survey line in the middle of the No. 4 anomaly zone with a length of over 1 500 m, capturing the geogas anomalies of elements Li, Be, and Nb that reflect the deep mineralization information of pegmatite veins. This confirms that pegmatite veins in the survey area have significant extensions towards the deep part.

Key words: soil X-ray fluorescence measurement; (Nb+Ta+Rb) contrast cumulative value; geogas prospecting; deep ore-bearing information; granite pegmatite-type rare metal deposit

(本文编辑: 蒋实)