热烈庆祝中国地质学会成立100周年
1922～2022
www.geojournals.cn/georev

# 湘东北仁里矿区西侧X荧光异常特征及找矿意义

金益帆[1)],刘晓辉[1,2)],张庆贤[1)],文春华[3)],曹创华[3)],刘钧[3)],张利军[4)],张立平[5)]

1）成都理工大学 核技术与自动化工程学院,成都, 610059;
2)中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与矿产预测重点实验室,北京, 100037
3）湖南省地质调查院,长沙,410116; 4）湖南省有色地质勘查研究院,长沙,410015;
5）湖南省核工业地质局311队,长沙,410100

**内容提要**:湖南湘东北幕阜山地区新发现了仁里超大型钽铌矿床,为寻找伟晶岩型稀有金属矿床提供了新的研究思路。研究表明湘东北地区是铌—钽—锂—铍稀有金属矿重要的成矿区域,项目在仁里矿区西侧找矿勘查区开展了遥感—地球物理—化探—X荧光—地气分析综合探测研究工作,以建立南方高植被覆盖区伟晶岩型稀有金属找矿高效、快速勘查技术方法体系。本次研究利用X荧光勘查技术,对工作区布设的3条共长3000 m的测线,共153个测点的土壤样品进行了分析,每个测点获得了Nb、Ta、Rb等重要成矿元素的含量。通过矿致X荧光异常特征的分析,确定了工作区内异常的性质,与已获得的勘查成果比较,符合程度较好,并且在一条测线上推测可能存在未探明的含铌钽矿伟晶岩脉,为后续的勘探工作提供线索。同时也表明了X荧光勘查方法具有良好的找矿效果,可以为找矿提供参考和指示作用。

**关键词**:土壤X荧光测量;花岗伟晶岩型铌钽矿;异常特征

铌、钽等稀有金属具有高熔沸点、耐腐蚀、密度大、超导性等优点,在电子、航天、新能源、材料化工等工业领域的需求持续增长,是新兴产业所需要的关键材料,具战略性“卡脖子”的重要作用。因此,美国和欧洲多个国家将稀有金属列为“关键矿产”资源,我国将锂、铌、钽等9种稀有金属矿产纳入“战略性矿产”名单之中(陈瑞强等,2020)。

湖南省湘东北幕阜山地区通过多年的地质勘查与综合研究,新发现了仁里超大型钽铌矿床,为在湘东北幕阜山地区寻找伟晶岩型稀有金属矿床提供了新的研究思路。仁里铌钽矿床位于湖南省平江县幕阜山岩体西南缘,目前对此地区的矿床地质特征、岩石地球化学特征、矿物学岩相学、稀有金属成矿作用、成矿规律与找矿预测等方面开展了不同程度的研究(黄志飚等,2018;刘翔等,2018,2019;李鹏等,2019;周芳春等,2019a,b;石威科等,2020)。

前人研究表明湘东北地区是铌—钽—锂—铍稀有金属矿重要的成矿区域,伟晶岩型稀有金属矿主要分布于幕阜山—连云山稀有金属成矿带(文春华等,2019)。区内除新发现的仁里超大型钽铌矿床外,在幕阜山南缘地区分布较多的伟晶岩脉,勘查程度较低。由于幕阜山地区植被覆盖严重且地形、地势陡峭,给传统的地质填图找矿造成较大困难。本课题组尝试在高植被覆盖区应用综合探测技术方法,实现地质找矿高效勘查。项目在仁里矿区西侧找矿勘查区开展了遥感—地球物理—化探—X荧光—地气分析综合探测研究工作,以期建立南方厚植被覆盖区伟晶岩型稀有金属找矿高效、快速勘查技术方法体系。X射线荧光以其快速测量、无损检测、操作简便等的优点,在环境调查、现场分析、矿产勘查等众多领域得到国内外诸多学者广范应用,且取得良好的效果(Ardida et al., 2004; Peinado et

注:本文为成矿作用与矿产预测国家重点实验室开放基金项目“幕阜山地区伟晶岩型稀有金属矿综合地气探测技术示范”(编号:ZS2005)、湖南省重点领域研发计划“湖南省锂铌钽等稀有金属资源高效勘查与开发”重点专项(编号:2019SK2261)和四川省科技计划(编号:2021JDTD0018)的成果。
收稿日期:2021-08-28;改回日期:2022-02-19;网络首发:2022-03-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.03.035
作者简介:金益帆,男,1996年生,在读硕士研究生,主要从事核技术应用研究;Email:jinyf29@sina.com。通讯作者:刘晓辉,男,1978年生,博士,讲师,主要从事核地球物理勘查、核技术应用教学及研究;Email:liuxiaohui@cdut.edu.cn。

al.， 2010； Figueroa － Cisterna et al.， 2011； Melquiades et al.， 2011；杨海等，2014）。笔者利用 X 荧光勘查技术，在幕阜山南缘地区黄柏山勘查区设置了多条测线，开展土壤 X 射线荧光研究，分析区内铌、钽、锂等稀有金属变化特征，并对比化探等研究结果，圈定稀有金属异常区，为区内稀有金属找矿勘查提供依据，并为综合探测技术方法体系建立提供支撑，应用新的探测技术方法对指导稀有金属矿找矿勘查突破具有重要的意义。

## 1 工作区地质概况

湖南仁里铌钽矿床位于湖南省平江县幕阜山岩体西南缘，工作区交通区位图如图 1 所示。仁里矿床大地构造上位于扬子陆块东南缘江南新元古代造山带中段北缘之湘东北断隆带，处于扬子陆块与华夏陆块的过渡部位（刘翔等，2018）。地层主要为冷家溪群片岩。区内断裂构造发育，以北（北）东向、北西向为主；区内岩浆活动频繁，存在两个时期的侵入岩：①以梅仙、三墩等岩体为代表的武陵期花岗岩；②以幕阜山岩体为代表的燕山期花岗岩。区内伟晶岩脉十分发育，分布于岩体内外接触带附近数千米范围内，多成群成带产出，以外接触带片岩地区北西向伟晶岩脉规模最大（杨世珍等，2020）。岩体内部伟晶岩脉成群出现，其走向及产状没有一定的规律性，伟晶岩脉受构造裂隙控制，产状复杂，其规模相对较小，局部钠长石化、白云母化较强烈，易形成小的银钽等稀有金属矿体；岩体外接触带冷家溪群片岩地区的伟晶岩呈西北走向、近平行的雁列

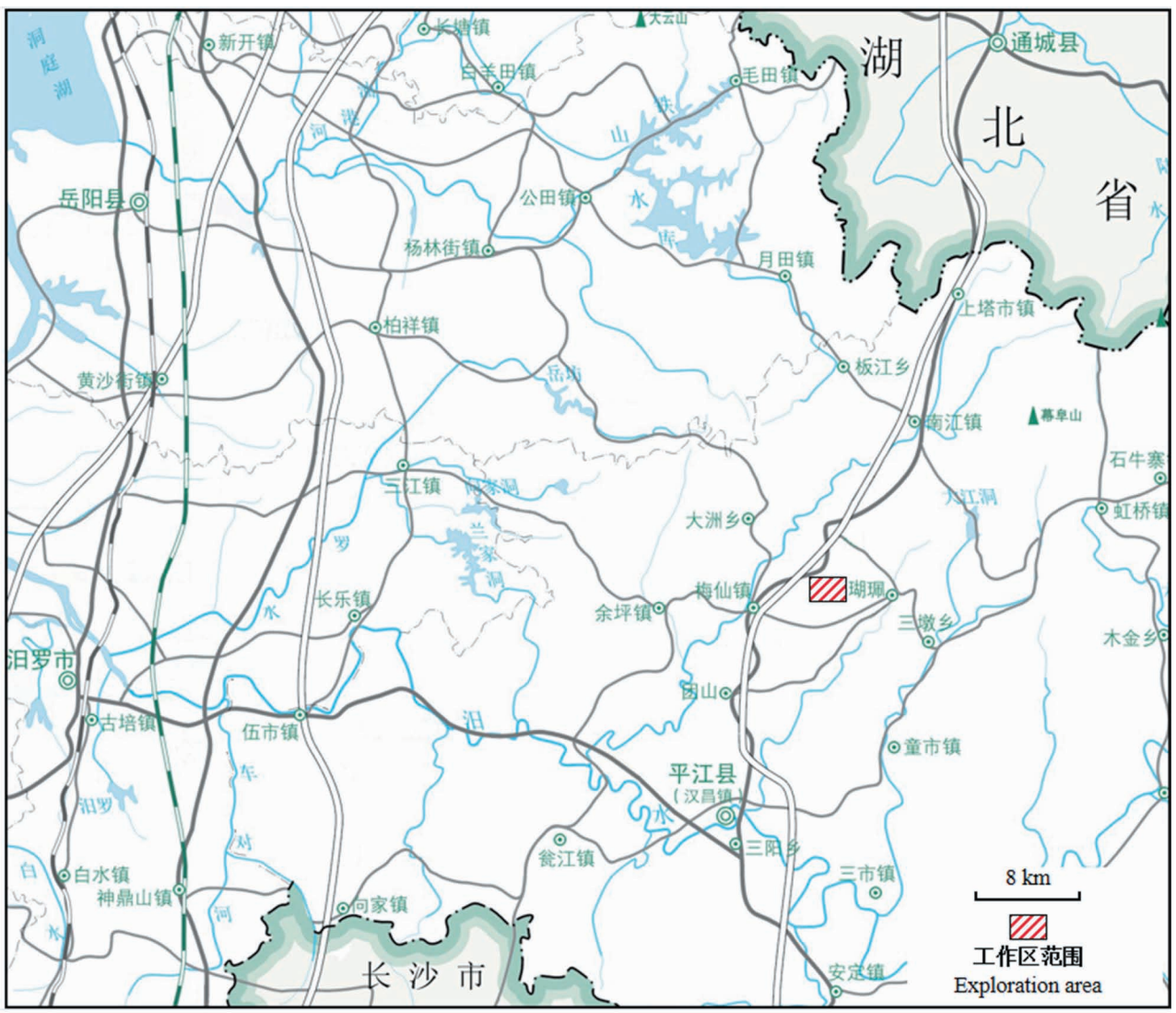



图 1 湘东北仁里矿区西侧工作区交通图

Fig. 1 Traffic map of the exploration area on west of Renli mining area in northeastern Hunan

式分布,主要特点为:伟晶岩脉规模大、西北走向、一般倾向南西、呈层状产出,普遍钠长石化、白云母化强烈,铌钽等稀有金属矿化较好,易形成大而富的稀有金属矿体(周芳春等,2019a,b)。

仁里矿床铌钽矿具有品位高、储量大、共伴生矿种丰富的特点,其为典型的花岗伟晶岩型稀有金属矿床,以铌钽为主矿种,矿物以钽铌铁/锰矿、铌钽铁/锰矿为主,随着矿区勘测的深入,矿区内锂、铷等其他稀有金属资源储量丰富(杨世珍等,2020)。根据在仁里矿区前期工作得到的矿区内某测线伟晶岩脉样品微量元素分析结果(周芳春等,2019a)可以看出矿区内铌钽矿具有众多共伴生元素,如 Fe、Mn、Rb、Cs、Cu、Zn、Ni、Sr 等稀有金属元素。因此勘查区内具有非常好的找矿潜力。除仁里矿区外,幕阜山南缘地区分布较多伟晶岩脉,成矿潜力较好,但勘查程度较低。

## 2　X 荧光测量原理和工作方法

### 2.1　X 荧光测量原理

X 射线荧光测量方法是基于莫塞莱定律。用放射性同位素或者 X 光管作为激发源来照射待测样品去激发岩石(土壤)中某元素,可使其产生特征 X 射线,由于特征 X 射线的能量与目标元素的原子序数的平方成正比,不同原子序数的元素放出的特征 X 射线的能量不同,因此可以定性的测量出是什么元素。如果岩石(土壤)矿物中某个元素很多,则该元素特征 X 射线的荧光强度很强,从而得知所含某元素得含量很高;反之荧光强度弱,则其含量低(章晔,1984)。那么使用 X 射线荧光仪测量并记录样品中待测元素的特征,也就是 X 射线照射量率,可以确定样品的成分和目标元素含量。

工作区内的铌钽矿属于典型的花岗伟晶岩型矿床,成因与区域燕山早期陆内挤压造山和燕山中期后造山环境导致的构造岩浆活动密切相关(刘翔等,2018)。成矿过程中,Nb、Ta、Rb、Mn、Fe、Cu、Zn 等元素得到富集,并且进入土壤等风化产物,利用 X 射线荧光法可以得到这些富集元素的特征 X 射线,因此,可以利用 X 荧光测量覆盖层土壤,发现和评价近地表伟晶岩脉的含矿性。

### 2.2　工作方法

根据工作区的具体情况和湖南地质调查院在该区域所取得的物探和化探结果,按测线基本垂直花岗伟晶岩脉走向和构造线走向为原则,选取 14 号、17 号和 19 号测线开展土壤 X 射线荧光测量,测线

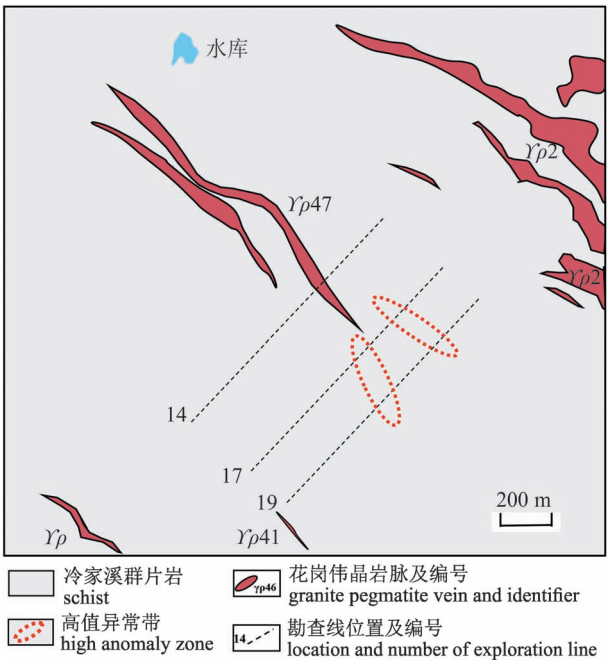



图 2 湘东北仁里矿区西侧工作区测线布置示意图

Fig. 2 Schematic map of survey line layout in exploration area on west of Renli mining area in northeastern Hunan

布置如图 2 所示,14、17、19 号测线长均为 1000 m,点距 20 m,所有测线走向均为 NE40°。在工作区选取的取样深度应该在 20~30 cm,每样采集深处的 B 层土壤 500 g 左右,共采集土壤样品 153 件。

仪器采用 Oxford 的 XMET-7500 型 X 荧光分析仪,该仪器能同时分析地质样品中 30 种以上元素及含量,分析范围广,且精度和准确度高,可快速稳定地进行样品无损分析,提供在工作区找矿所需的各种主要元素的信息(杨笑凡等,2013)。在样品测量前,使用国家一级土壤标准物质 GBW07406(GSS-6)与 GBW07407(GSS-7)配制成 Nb、Ta 浓度不同的标准样品,建立用于 X 荧光测量的标准曲线。然后对这两种标准物质原样进行测量,结果见表 1。可见,两种标准物质中 Nb 的测量值与标准值相符,测量相对误差小于 10%。而 Ta 的测量误差均超过 100%。在完成所有土壤样品的测量后,挑选了 4 个样品进行重复测量,Nb 的测量相对偏差范围是 3.2%~46.8%,平均值为 16.9%;Ta 的测量相对偏差范围是 3.7%~17.2%,平均值为 8.6%。综合来看,X 荧光测量 Nb 的准确度和重现性满足化探要求;测量 Ta 的重现性可以,但准确度不足。对于本研究来说,主要目的是利用 X 射线荧光分析技术提取土壤中的成矿、伴生元素浓度异常,虽然无法准确

**表 1 标准物质 Nb、Ta 测量结果**

**Table 1 Measurement results of reference materials Nb, Ta**

| 元素 | GBW07406(GSS-6) | | GBW07407(GSS-7) | |
|---|---|---|---|---|
| | 标准值(μg/g) | 测量值(μg/g) | 标准值(μg/g) | 测量值(μg/g) |
| Nb | 26.8 | 29 | 64 | 66 |
| Ta | 5.3 | 28 | 3.9 | 50 |

测量 Ta 元素浓度,但其测量结果可以反应元素浓度的差异。所以,利用 X 荧光测量 Ta,来寻找 Ta 异常对指示含矿性依然具有一定参考价值。

土样经过风干和粗碎后,过 80 目筛,搅拌均匀,压制成厚度为 2 mm 的样片,以备 X 射线荧光测量。样品测量采用土壤测量模式的标准曲线,在测量时间上,为保证测量精度,减少相对误差,每件样品测量时间选择为 200 s。

## 3 土壤 X 射线荧光测量数据分析

### 3.1 X 荧光数据统计分析

由于是针对稀有金属矿体的测量,成矿元素在土壤中的含量可能较弱,所以在分析时,取均值加 1 倍标准差为异常下限来划分异常区域(赵春江等,2012)。在三条测线中分别选取成矿元素和部分共伴生元素分析,这些元素均可在已知矿体上划分出异常,且利用 X 荧光测量方法得到的结果准确度较高。表 2 是三条测线的元素测量的统计结果。

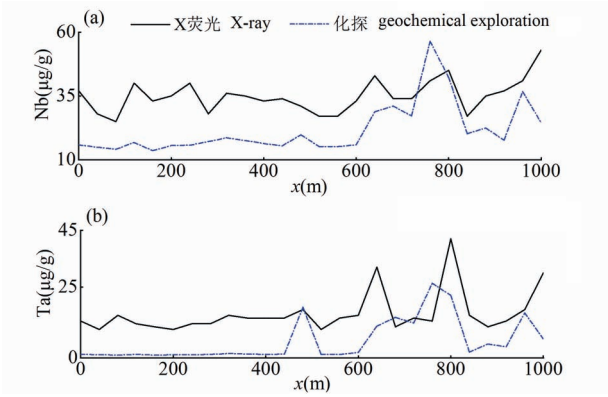



图 3 湘东北仁里矿区西侧工作区 14 号测线 Nb、Ta 的剖面对比图

Fig. 3 Section comparison diagram of Nb、Ta in survey line No. 14 in exploration area on west of Renli mining area in northeastern Hunan

### 3.2 X 荧光测量数据与化探结果的对比

Nb、Ta 作为工作区内主要成矿元素,将此次工作所得的 14 号测线 Nb、Ta 的土壤 X 荧光测量数据与湖南地质调查院在该测线上的常规化探成果(点距 40 m)进行对比,如图 3 所示,横轴表示以 0 为工作初始点,到初始点的点距,后文图中均为此表示。

在图 3a、b 可以看出,两种勘探方式所取得的异常区大致相近。在 Nb 的剖面对比图中,从 600 m 处至 840 m 的范围内两者均显示了较高的异常幅度,在 920~1000 m 的范围也有小幅度的异常反映。在 Ta 的剖面对比图中,600~840 m 的测点范围内两

**表 2 湘东北仁里矿区西侧工作区三条测线主要元素含量统计表**

**Table 2 The main element content statistics table of the 3 survey lines in exploration area on west of Renli mining area in northeastern Hunan**

| 测线 | 元素 | Nb(μg/g) | Ta(μg/g) | Rb(μg/g) | Fe(%) | Mn(μg/g) | Cu(μg/g) | Ni(μg/g) | Zn(μg/g) | Pb(μg/g) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 14 号线 | 最小值 | 24 | 10 | 70 | 2.49 | 295 | 62 | 24 | 61 | 31 |
| | 最大值 | 53 | 42 | 229 | 5.26 | 1499 | 80 | 36 | 110 | 74 |
| | 均值 | 34.3 | 14.8 | 125.4 | 3.26 | 602.6 | 71.7 | 30.1 | 82.4 | 47.2 |
| | 标准偏差 | 5.7 | 5.7 | 35.7 | 0.46 | 245.2 | 4.7 | 2.6 | 10.1 | 8.4 |
| | 异常下限 | 40.0 | 20.5 | 161.0 | 3.72 | 847.8 | 76.5 | 32.7 | 92.5 | 55.6 |
| 19 号线 | 最小值 | 25 | 10 | 74 | 2.42 | 287 | 64 | 25 | 67 | 41 |
| | 最大值 | 70 | 50 | 350 | 4.66 | 1389 | 96 | 44 | 151 | 72 |
| | 均值 | 33.9 | 14.5 | 129.3 | 3.51 | 611.6 | 75.0 | 32.3 | 86.3 | 52.2 |
| | 标准偏差 | 7.0 | 7.3 | 38.6 | 0.39 | 288.5 | 5.8 | 3.5 | 13.4 | 6.2 |
| | 异常下限 | 40.9 | 21.9 | 167.8 | 3.90 | 900.1 | 80.8 | 35.8 | 99.7 | 58.3 |
| 17 号线 | 最小值 | 26 | 10 | 80 | 2.29 | 287 | 11 | 25 | 50 | 31 |
| | 最大值 | 41 | 18 | 161 | 4.5 | 1091 | 35 | 37 | 88 | 76 |
| | 均值 | 34.1 | 12.5 | 113.5 | 3.4 | 571.2 | 17.8 | 30.9 | 64.3 | 46.3 |
| | 标准偏差 | 3.2 | 1.9 | 15.5 | 0.4 | 225.9 | 4.9 | 2.8 | 9.0 | 9.9 |
| | 异常下限 | 37.3 | 14.4 | 129.1 | 3.7 | 797.1 | 22.7 | 33.7 | 73.4 | 56.1 |

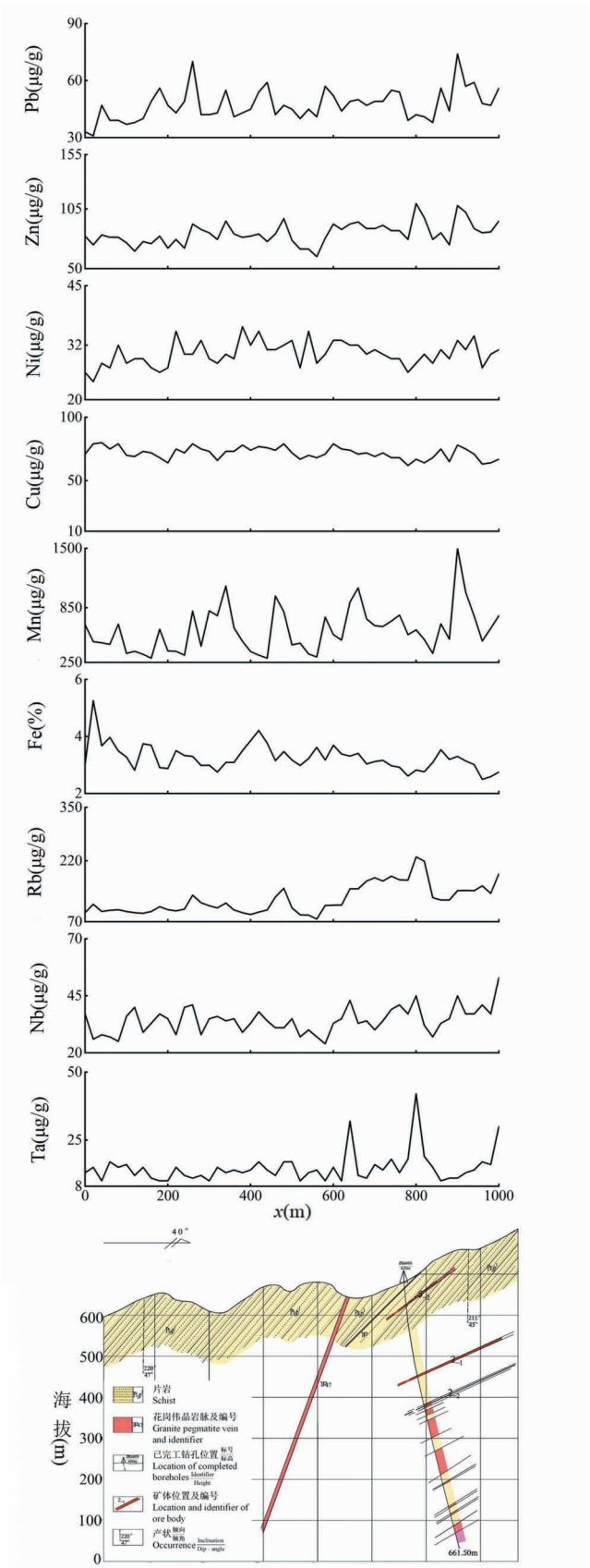



图 4 14 号测线综合剖面图

Fig. 4 Comprehensive section diagram of survey line No. 14

种勘探方式也都有明显的异常显示,且在 920 m 后也同样有小幅度异常。

X 荧光勘查技术所取得的数据可以划分出背景区和异常区,只是异常幅度相比化探方法偏小,这与其检出限较高有关,但是此方法所取得的异常结果与化探结果吻合程度高。由此也可以表明 X 荧光勘查技术作为一种无损的、快速的测量技术,在铌钽稀有金属矿勘查中是有效的。而且用于 X 荧光仪测量的土壤样品仅需要 2~4 g,只要保证采样的代表性,在较少土壤样品的情况下就能取得明显的结果,减少了采样工作量,提高了矿产勘查的工作效率,并且具有较好的参考作用。

## 4　矿致 X 荧光异常讨论

根据表 2 中三条测线的主要元素含量统计,绘制了 14 号、19 号测线的综合剖面及 17 号测线的元素剖面图,如图 4、图 5 和图 6 所示。

### 4.1　14 号测线

14 号测线上已开展了一定的地质勘探和钻探工作,含矿岩脉和矿体控制较好,可作为本次 X 射线荧光测量的验证剖面。从 14 号测线综合剖面图(图 4)中可看出,Nb、Ta 在 620~660 m 处均有明显异常,在此范围内 Ta、Nb 的最大异常幅度分别为 1.6 和 1.1,异常范围与 $\gamma\rho_{47}$ 含矿伟晶岩脉的出露处基本重合。Nb 在 740~820 m 范围有连续的异常,最大异常幅度为 1.2;Ta 在 780~820 m 的范围内存在异常,最大异常幅度为 2.1,在此异常范围地下发现有 5-2 号隐伏矿体,该矿体埋深不到 50 m,此处的异常是由该矿体成矿物质的扩散或其露头的风化产物坡积所致。成矿元素 Nb、Ta 的异常可在图中明显发现是源自测线上的独立含矿伟晶岩脉和已探明的矿体。

在其他的共伴生元素中,Rb 在 660~840 m 内有连续异常且最大异常幅度为 1.4,此范围基本覆盖了 $\gamma\rho_{47}$ 含铌钽矿伟晶岩脉出露处和 5-2 矿体。在 $\gamma\rho_{47}$ 伟晶岩脉出露处附近,Mn、Ni、Cu、Zn 均有异常反映;在 5-2 矿体的上方,Ni、Cu 有异常反映,Zn、Pb 和 Mn 的异常值较高,且 Zn 的异常范围与 Nb、Ta 的异常范围对应较好。根据 14 号测线土壤 X 射线荧光测量结果与已探明含矿伟晶岩脉的符合性,Nb、Ta、Rb 异常对含矿岩脉的出露位置有较好的指示效果,其次是 Mn、Zn、Ni、Cu 异常。

### 4.2　17 号测线

结合 17 号测线元素异常图(图 6),在此测线

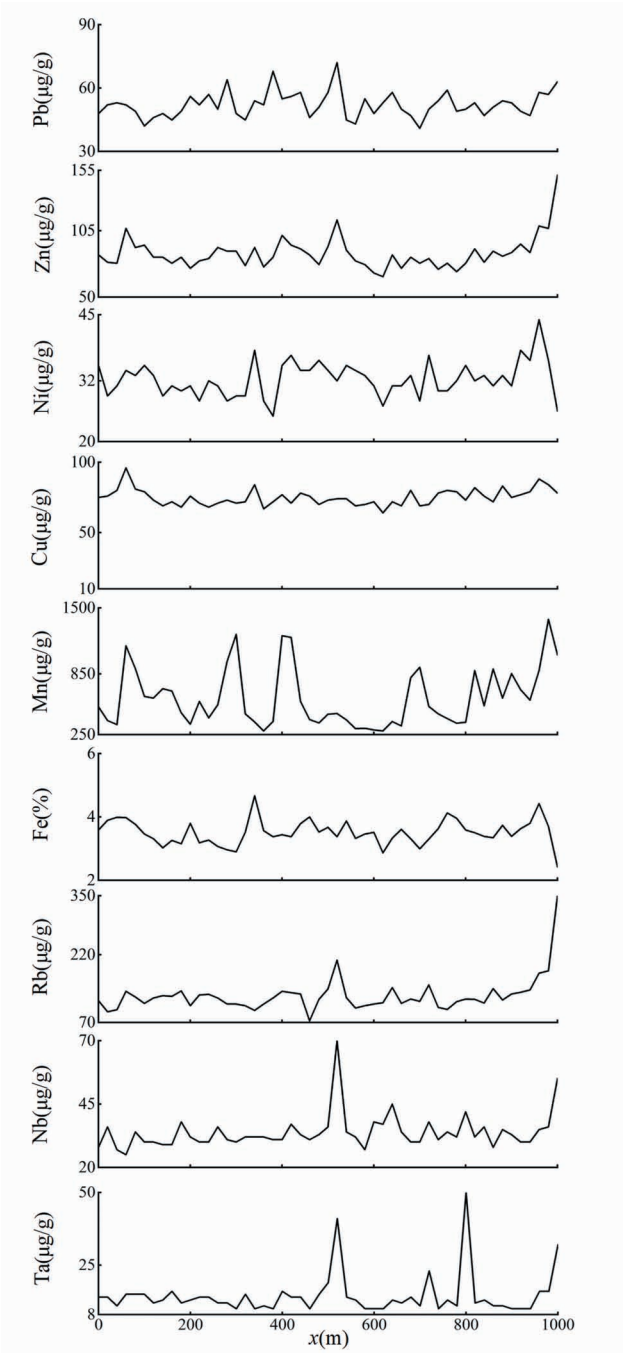



图 5 19 号测线综合剖面图

Fig. 5 Comprehensive section diagram of survey line No. 19

上,Nb 的异常测点幅值均不高,但是异常点较多,其连续性较好,最大异常幅度为仅为 1.1,Ta 在 0~40 m、460~500 m、600~640 m 处以及 900~920 m 的范围内有幅度较小的异常,这些异常范围内最大异常幅度为 1.3。

根据其他元素异常图可以发现,Rb 在 440~480 m 处以及 860~1000 m 范围内有明显的异常反映,

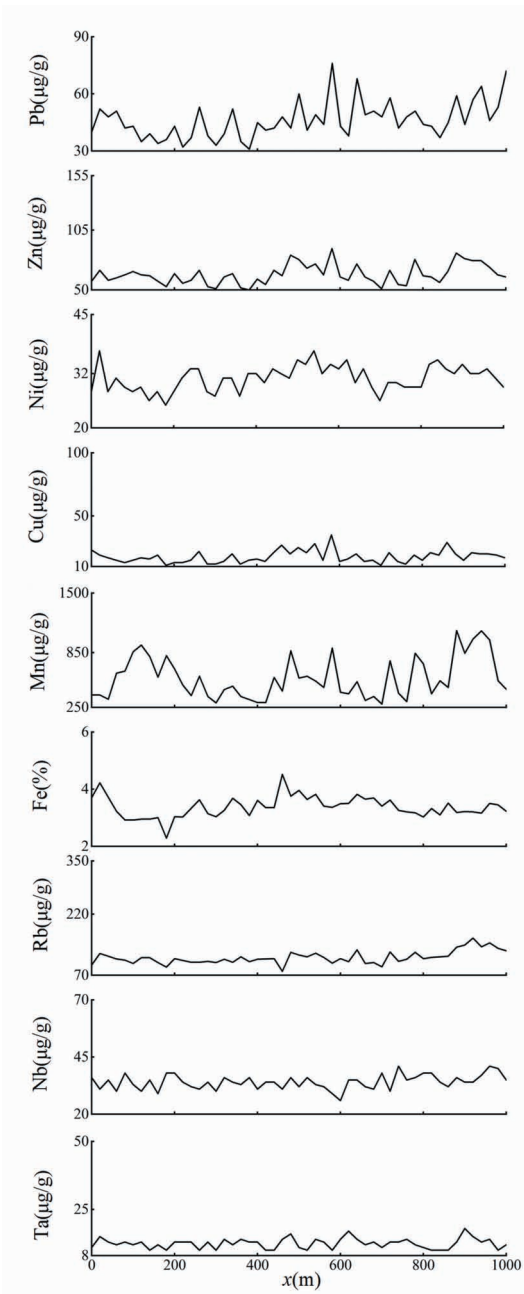



图 6 17 号测线元素含量剖面图

Fig. 6 Sectional view of element content of survey line No. 17

Rb 和 Ta 的部分异常范围重合。Pb、Mn、Fe、Ni 的异常测点与异常范围与 Nb、Ta 的异常范围重合较多,Cu、Zn 在 Ta 的异常范围内同样存在异常反映。在现有的地质勘查结果中,17 号测线并没有含矿伟晶岩脉经过,但根据元素异常分析以及 14 号测线的结果符合程度较好来看,可能是由于 $\gamma\rho_{47}$ 的含矿伟晶岩脉和 5-2 矿体持续向 17 号测线延伸所致。

### 4.3　19 号测线

由 19 号测线综合剖面图(图 5)可知,Nb、Ta 有三处异常范围相同,在 500~540 m 的测点范围内 Nb、Ta 均有高异常幅度,最大异常幅度分别为 1.7 和 1.9。780~820 m 测点范围内 Ta 有高幅度的异常且最大异常幅度 2.3,Nb 也存在异常,但不明显。在 960~1000 m 的范围内,两种元素也均存在较明显的异常反映。

Pb、Zn 在 500~540 m 和 980~1000 m 处测点范围分别存在异常,Pb 在 740~780 m 处的异常在 Nb、Ta 异常处的 40 m 范围之内。Cu、Mn、Fe 的异常点位及异常范围相似,部分异常范围与 Nb、Ta 的异常范围重合。Ni 在 700~740 m 处和 Ta 一样存在异常反映,其 480~520 m 的异常范围也基本处于 Nb、Ta 的 500~540 m 的异常范围内。由 14 号线的异常结果与地质剖面的符合程度较高以及 17 号测线上可能存在向东南方向延伸的 $\gamma\rho_{47}$ 含矿伟晶岩脉和 5-2 矿体,可以预测在 19 号测线中存在未探明的含铌钽矿伟晶岩脉或矿体。

### 4.4　成矿元素的累加值剖面分析

为了更准确地对测线的异常特征做出评价,可以综合考虑矿脉相关元素的异常。首先选择每条测线的所选元素的数据进行归一化的处理,计算每个元素的平均值、标准偏差,再剔除大于平均值加 2 倍标准偏差的值,然后重复以上步骤,直至该元素剩余测点的数据均不大于平均值加 2 倍标准偏差,最后用剩余的测点数据计算的平均值作为元素的背景值(周四春等,1991,1999)。将每个元素的每个测点数据除以其背景值即可得到归一化值。

利用每条测线的 Nb、Ta、Rb 3 种元素的归一化值相加后的新数据绘制累加值剖面图,14 号、17 号及 19 号 3 条测线分别如图 7a、b、c 所示。同时,对此组数据的异常下限依旧设置为其平均值加 1 倍标准偏差,由此,可以在 3 条测线均划分出 3 个高值异常区。对比异常位置可以看出,14 号测线的高值异常区Ⅰ和高值异常区Ⅱ实际指示了已探明的含铌钽矿岩脉和矿体,吻合程度很好;高值异常区Ⅲ的高幅值极有可能是由于 14 号测线东北方向还存在未探明的含矿伟晶岩脉。由此可以看出 X 荧光测量结果与此前的地质勘探结果基本相符。17 号测线(图 7b)中高值异常区Ⅰ和Ⅱ的异常幅值不高,现有的地质勘查工作未发现有含矿伟晶岩脉经过,这可能是 $\gamma\rho_{47}$ 岩脉和 5-2 矿体分别向 17 号线延伸造成。19 号测线中,之前的地质勘查工作也未发现有含铌钽矿伟晶岩脉。而在 X 荧光的测量结果中,在累加值综合剖面图(图 7c)上可以发现在高值异常区Ⅰ和高值异常区Ⅱ内幅值较高,同时 Pb、Zn、Ni、Mn 元素在这两个区域内的异常都颇为明显。根据 X 荧光测量所得的异常结果符合性较好来看,这两个高值异常区为勘查中新发现的高值异常区,可以初步推测在高值异常区Ⅰ和高值异常区Ⅱ内都可能存在含铌钽矿岩脉或矿体。图 7a、图 7c 中两条测线的高值异常区Ⅲ则同样可能为东北向还存在未知的含矿伟晶岩脉。

结合 17 号和 19 号测线的异常分析结果,在工作区内的 17、19 号测线上圈定高值异常带,如图 2 所示,两处高值异常带可以初步推测分别是由 $\gamma\rho_{47}$ 含矿伟晶岩脉和 5-2 矿体的延伸所致。为了更准确确定此测线是否经过含铌钽矿伟晶岩脉和矿体以及其规模,需要进一步开展相关的地质勘查工作。

## 5　结论

通过在仁里矿区西侧伟晶岩型铌钽矿勘查区的应用研究,利用 X 射线荧光测量可以直接获取土壤中成矿元素(Nb、Ta)和部分共伴生元素(Rb、Mn、Ni 等)的含量信息。在浅地表含矿岩脉的上方会出现这些元素的高幅度异常。采用综合多个指示元素的含量归一化累加值绘图,可以更直观地体现多元素异常的分布特征,以便更加准确地分析矿体位置。

在工作区内,通过 X 荧光测量方法得到的异常数据中,14 号的异常结果与当地的地质勘查和化探成果符合较好;17 号测线的中间异常区极有可能来自 $\gamma\rho_{47}$ 岩脉岩体向东南向的延伸,末端异常区可能为测线东北向还存在未探明含矿岩脉导致;同时可以初步推测 19 号测线的高值异常区是工作中新发现的异常区,此测线上的异常幅值较高极有可能是隐伏铌钽矿岩脉引起,值得在此区域开展进一步的工作。

在本课题研究的综合探测方法体系中,X 荧光测量与常规化探相比,具有测量速度快,能同时测量多种成矿、伴生元素,测量成本低等优势,且具有一

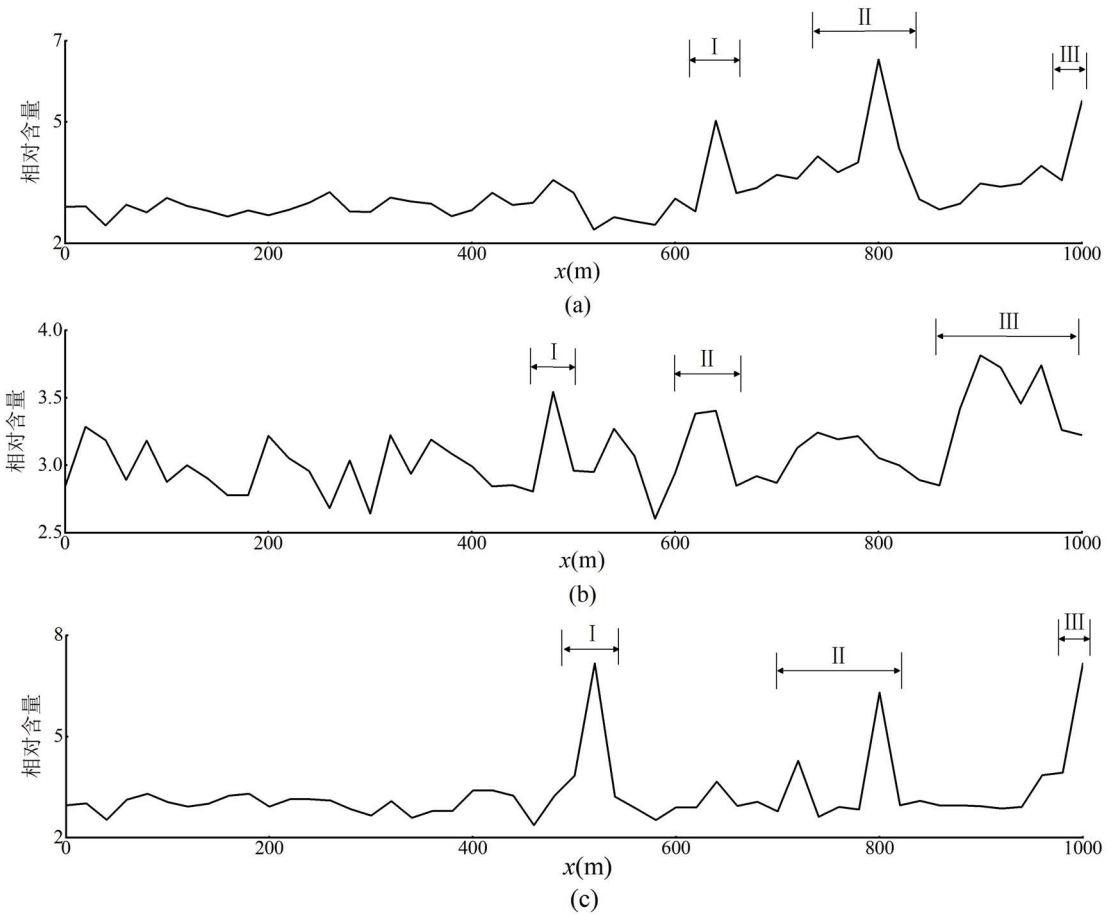



图 7 三条测线所选元素累加值剖面

Fig. 7 Accumulated value section of selected elements of all survey lines

定地准确性和参考价值。实践结果证明,采用 X 荧光测量勘查技术圈定找矿异常的效果不亚于常规化探。这给今后铌钽稀有金属矿勘查工作提供了重要参考,即在找矿远景区可以先开展大规模的 X 荧光测量,快速、初步圈定找矿异常,缩小化探范围,从而提高找矿效率。本文研究成果展示了 X 荧光测量应用于铌钽矿勘查的有效性,其在遥感—地球物理—化探—X 荧光—地气分析综合探测研究工作中具有指示、参考作用,对项目中稀有金属找矿高效、快速勘查技术方法体系的建立提供了重要支持。

## 参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

陈瑞强, 陈边防, 胡德勇. 2020. 推动我国稀有金属产业高质量发展的思考. 中国有色金属, (20): 38~41.

黄志飚, 李鹏, 周芳春, 刘翔, 李建康, 肖国强, 张立平, 陈虎, 汪宣民. 2018. 幕阜山地区新元古代花岗岩地球化学特征及成因探讨. 桂林理工大学学报, 38(4): 614~624

李鹏, 刘翔, 李建康, 黄志飚, 周芳春, 张立平. 2019. 湘东北仁里—传梓源矿床 5 号伟晶岩岩相学、地球化学特征及成矿时代. 地质学报, 93(6): 1374~1391.

刘翔, 周芳春, 黄志飚, 李建康, 周厚祥, 肖国强, 包云河, 李鹏, 谭黎明, 石威科, 苏俊男, 黄小强, 陈虎, 汪宣民, 林跃, 刘晓敏. 2018. 湖南平江县仁里超大型伟晶岩型铌钽多金属矿床的发现及其意义 . 大地构造与成矿学, 42(2): 235~243.

刘翔, 周芳春, 李鹏, 李建康, 黄志飚, 石威科, 黄小强, 张立平, 苏俊男. 2019. 湖南仁里稀有金属矿田地质特征、成矿时代及其找矿意义. 矿床地质, 38(4): 771~791.

石威科, 周芳春, 刘翔, 李鹏, 黄志飚, 文春华, 陈阡然, 苏俊男, 黄小强, 张宗栋, 张立平, 陈虎, 刘俊峰, 胡小芳. 2020. 湖南仁里矿田锂辉石白云母伟晶岩地质特征及其找矿意义. 地质学报, 94(3): 817~835.

文春华, 罗小亚, 陈剑锋, 林碧海, 李胜苗. 2019. 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. 中国地质调查, 6(6): 19~28.

杨海, 葛良全, 熊盛青, 谷懿, 张庆贤. 2014. 一套基于 X 射线荧光测量的快速找矿方法. 物探与化探, 38(4): 723~728.

杨世珍, 黄小强, 张立平, 黄志飚, 周芳春, 曾乐, 万海辉, 苏俊男, 陈虎, 柳清琦. 2020. 湖南仁里铌钽稀有多金属矿床经济价值

及其找矿启示. 矿产勘查, 11(9): 1894~1902.

杨笑凡, 周四春, 赵辉, 孙森. 2013. 黄沙坪型铅锌矿 X 荧光异常特征及找矿意义. 现代矿业, 29(8): 37~39.

周芳春, 刘翔, 李建康, 黄志飚, 肖国强, 李鹏, 周厚祥, 石威科, 谭黎明, 苏俊男, 陈虎, 汪宣民. 2019a. 湖南仁里超大型稀有金属矿床的成矿特征与成矿模型. 大地构造与成矿学, 43(1): 77~91.

周芳春, 李建康, 刘翔, 李鹏, 黄志飚, 石威科, 苏俊男, 陈虎, 黄小强. 2019b. 湖南仁里铌钽矿床矿体地球化学特征及其成因意义. 地质学报, 93(6): 1392~1404.

章晔. 1984. X 射线荧光探矿技术. 北京: 地质出版社, 13~17.

赵春江, 周四春, 刘晓辉, 鲍小柯, 赵峰, 谢克文. 2012. 隐伏花岗岩铀矿上方的 X 荧光异常特征及其找矿意义. 物探与化探, 36(6): 1055~1058.

周四春, 赵琦, 陈慈德. 1999. 现场多元素 X 荧光测量技术勘查金矿研究. 核技术, 22(9): 539~544.

周四春, 谢庭周, 葛良全. 1991. 普查铜矿的新方法——X 荧光方法研究. 物探与化探, 15(4): 284~289.

Ardida M, Ferrero J L, Juanes D, Lluch J L, Roldán C. 2004. Comparison of total-reflection X-ray fluorescence, static and portable energy dispersive X-ray fluorescence spectrometers for art and archeometry studies. Spectrochimica Acta(Part B), 59(10): 1581~1586.

Chen Ruiqiang, Chen Bianfang, Hu Deyong. 2020#. Thinking on Promoting the High Quality Development of China´s Rare Metal Industry. China Academic Journal Electronic Publishing House, (20): 38~41.

Figueroa Cisterna J, Bagur-González M G, Morales-Ruano S, Carrillo-Rosúa J, Martín-Peinado F. 2011. The use of a combined portable X-ray fluorescence and multivariate statistical methods to assess a validated macroscopic rock samples classification in an ore exploration survey. Talanta, 85(5): 2307~2315.

Huang Zhibiao, Li Peng, Zhou Fangchun, Liu Xiang, Li Jiankang, Li Jiankang, Zhang Liping, Chen Hu, Wang Xuanmin. 2018&. Geochemical characteristics and genesis of the Neoproterozoic granite in Mufushan area. Journal of Guilin University of Technology, 38(4): 614~624

Li Peng, Liu Xiang, Li Jiankang, Huang Zhibiao, Zhou Fangchun, Zhang Liping. 2019&. Petrographic and geochemical characteristics of Renli—Chuanziyuan No. 5 pegmatite, NE Hunan, and its metallogenic age. Acta Geologica Sinica, 93(6): 1374~1391.

Liu Xiang, Zhou Fangchun, Huang Zhibiao, Li Jiankang, Zhou Houxiang, Li Jiankang, Bao Yunhe, Li Peng, Tan Liming, Shi Weike, Su Junnan, Huang Xiaoqiang, Chen Hu, Wang Xuanmin, Lin Yue, Liu Xiaomin. 2018&. Discovery of Renli superlarge pegmatite-type Nb—Ta polymetallic deposit in Pingjiang, Hunan Province and its Significances. Geotectonica et Metallogenia, 42(2): 235~243.

Liu Xiang, Zhou Fangchun, Li Peng, Li Jiankang, Huang Zhibiao, Shi Weike, Huang Xiaoqiang, Zhang Liping, Su Junnan. 2019&. Geological characteristics and metallogenic age of Renli rare metal orefield in Hunan and its prospecting significance. Mineral Deposits, 38(4): 771~791.

Melquiades F L, Parreira P S, Appoloni C R, Silva W D, Lopes F. 2011. Quantification of metals in river water using a portable EDXRF system. Applied Radiation and Isotopes, 69(2): 327~333.

Peinado F Martí, Ruano Morales S, González Bagur M G, C Estepa Molina. 2010. A rapid field procedure for screening trace elements in polluted soil using portable X-ray fluorescence (PXRF). Geoderma, 159(1): 76~82.

Shi Weike, Zhou Fangchun, Liu Xiang, Li Peng, Huang Zhibiao, Wen Chunhua, Chen Qianran, Su Junnan, Huang Xiaoqiang, Zhang Zongdong, Zhang Liping, Chen Hu, Liu Junfeng, Hu Xiaofang. 2020&. Geological characteristics and the prospecting significance of the spodumene—muscovite pegmatite in the Renli ore-field, Hunan Province. Acta Geologica Sinica, 94(3): 817~835.

Wen Chunhua, Luo Xiaoya, Chen Jianfeng, Lin Bihai, Li Shengmiao. 2019&. Relationship between Yanshanian magmatic activity and rare metal mineralization in Mufushan area of Northeast Hunan. Geological Survey of China, 6(6): 19~28.

Yang Hai, Ge Liangquan, Xiong Shengqing, Gu Yi, Zhang Qingxian. 2014&. A set of rapid prospecting methods based on X-ray fluorescence measurement. Geophysical and Geochemical Exploration, 38(4): 723~728.

Yang Shizhen, Huang Xiaoqiang, Zhang Liping, Huang Zhibiao, Zhou Fangchun, Zeng Le, Wan Haihui, Su Junnan Chen Hu, Liu Qingqi. 2020&. Economic value of Renli rare polymetallic deposit in Hunan Province, and its prospecting revelation. Mineral Exploration, 11(9): 1894~1902.

Yang Xiaofan, Zhou Sichun, Zhao Hui, Sun Sen. 2013&. X-ray fluorescence anomaly characteristics and prospecting significance of Huangshaping type lead—zinc deposit. Morden Mining, 29(8): 37~39.

Zhou Fangchun, Liu Xiang, Li Jiankang, Huang Zhibiao, Xiao Guoqiang, Li Peng, Zhou Houxiang, Shi Weike, Tan Liming, Su Junnan, Chen Hu, Wang Xuanmin. 2019a&. Metallo genic characteristics and prospecting direction of Renli super large rare metal deposit in Hunan Province, China. Geotectonica et Metallogenia, 43(1): 77~91

Zhou Fangchun, Li Jiankang, Liu Xiang, Li Peng, Huang Zhibiao, Shi Weike, Su Junnan, Chen Hu, Huang Xiaoqiang. 2019b&. Geochemical characteristics and genetic significance of orebodies in Renli Nb—Ta deposit,Hunan Province. Acta Geologica Sinica, 93(6): 1392~1404.

Zhang Ye. 1984#. X-ray Fluorescence Prospecting Technology. Beijing: Geological Publishing House: 13~17.

Zhao Chunjiang, Zhou Sichun, Liu Xiaohui, Bao Xiaoke, Zhao Feng, Xie Kewen. 2012&. X-ray fluorescence anomaly over the concealed grantie-type uranium deposit and its prospecting significance. Geophysical and Geochemical Exploration, 36(6): 1055~1058.

Zhou Sichun, Zhao Qi, Chen Cide. 1999&. Study and applications of insitu XRF prospecting gold technique. Nuclear Techniques, 22(9): 539~544.

Zhou Sichun, Xie Tingzhou, Ge Liangquan. 1991&. The study of a new method for copper ore prospecting—X-ray fluorescence method. Geophysical and Geochemical Exploration, 15(4): 284~289.

# The anomaly features and prospecting significance of X-ray fluorescence in exploration area on the west of Renli mining area in northeastern Hunan Province

JIN Yifan[1)], LIU Xiaohui[1,2)], ZHANG Qingxian[1)], WEN Chunhua[3)], CAO Chuanghua[3)], LIU Jun[3)], ZHANG Lijun[4)], ZHANG Liping[5)]

1) *College of Applied Nuclear Technology and Automation Engineering*, *Chengdu University of Technology*, *Chengdu*, 610059;

2) *Key Laboratory of Metallogenesis and Mineral Prediction* (*Ministry of Natural Resources*), *Institute of Mineral Resources*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing*, 100037;

3) *Hunan Institute of Geological Survey*, *Changsha*, 410116;

4) *Institute of Hunan Nonferrous Geological Exploration*, *Changsha*, 410015;

5) *Hunan Nuclear Geology* 311 *Brigade*, *Changsha*, 410100

**Abstract**: The discovery of Renli ultra-large tantalum—niobium deposit in Mufushan area, northeastern Hunan Province, provides a new research idea for finding pegmatite-type rare metal deposits. The study shows that northeastern Hunan is an important metallogenic area of niobium—tantalum—lithium—beryllium rare metal deposits. The project carried out remote sensing—geophysics—geochemical exploration—X-ray fluorescence—geogas analysis comprehensive exploration research in the western prospecting area of Renli mining area, in order to establish an efficient and rapid prospecting technology and method system for pegmatite rare metal deposits in high vegetation coverage areas in the South. In this study, X-ray fluorescence exploration technology was used to measure the soil samples of 153 measuring points in 3 survey lines with a total length of 3000 m in the working area. The contents of Nb, Ta, Rb and other important metallogenic elements were obtained at each measuring point. Through the analysis of the characteristics of ore-induced X-ray fluorescence anomaly, the nature of the anomaly in the working area is determined. Compared with the obtained exploration results, it is in good agreement, and it is speculated that there may be an unproven pegmatite vein of niobium—tantalum ore on a survey line, which provides basis for subsequent exploration engineering work. It also shows that X-ray fluorescence exploration method has good prospecting effect and can provide reference and indication for prospecting.

**Keywords**: X-ray fluorescence measurements of soil; granite pegmatite niobium—tantalite ore; abnormal features

**Ackowledgements**: This paper was supported by the Open Fund Project of State Key Laboratory for Mineralization and Mineral Prediction of "The Demonstration of Comprehensive Geogas Detection Technology for Pegmatite-type Rare Metal Deposits in Mufushan Area" (No. ZS2005), Hunan Provincial Key Research and Development Program of "Efficient Exploration and Development of Lithium, Niobium, Tantalum and other Rare Metal Resources in Hunan Province" (No. 2019SK2261) and Sichuan Science and Technology Program (No. 2021JDTD0018).

**First author**: JIN Yifan, male, born in 1996, studying for a master's degree, majors in nuclear technology application research; Email: jinyf29@sina.com

**Corresponding author**: LIU Xiaohui, male, born in 1978, Ph. D., lecturer, mainly engages in nuclear geophysical exploration and nuclear technology applications; Email: liuxiaohui@cdut.edu.cn

**Manuscript** received on: 2021-08-28; Accepted on: 2022-02-19; Network published on: 2022-03-20

**Doi**: 10.16509/j.georeview.2022.03.035 **Edited by**: ZHANG Yuxu