

doi: 10.11720/wtyht.2022.2500

王睿,李占龙,马涛.放射性测量方法在稀有稀土矿勘查中的应用——以小兴安岭地区南岔区某铀异常点为例[J].物探与化探,2022,46(4):854-861. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.2500>

Wang R, Li Z L, Ma T. Application of radioactive prospecting in exploration of rare metal minerals: A case study of a uranium anomaly in the Nancha area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(4): 854-861. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.2500>

放射性测量方法在稀有稀土矿勘查中的应用 ——以小兴安岭地区南岔区某铀异常点为例

王睿,李占龙,马涛

(黑龙江省第五地质勘查院,黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 本文研究了黑龙江省小兴安岭地区稀有稀土元素赋存状态及放射性特征,提出了能谱测量在稀有稀土矿勘查中的一些新认识。通过航空放射性物探测量与地面伽马能谱测量相结合的方法,深度挖掘能谱测量数据的参数特征,确定找矿标志。研究认为,稀有金属矿床的矿化多与花岗岩伟晶岩有关,富集过程中常伴有钠长石、独居石、晶质铀等放射性矿物形成,且具有与铀矿的共伴生的特点,利用放射性测量可成为寻找 REE、Nb、Ta 等稀有金属矿床的便捷且有效的方法。文章在伊春南岔地区航放异常内新发现铌钽、钷多金属矿化点一处,证实了放射性勘查方法的有效性。

关键词: 铌、钽、钷;稀有金属;铀钽矿化;伽马能谱测量

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2022)04-0854-08

0 引言

在机械、化工、航天航空、军事、高能物理、建材、电子计算机及芯片技术等领域内,以铌钽、钷、锂、铍等稀有稀土金属被广泛应用。近年来,对稀有稀土金属矿物成矿理论、找矿方法的研究主要集中于地球化学原生晕、次生晕,岩石地球化学特征,构造热液成矿等方面,而新方法技术应用方面欠缺突破、创新,尤其是有针对性矿产勘查方面,成果较少。根据中国三稀矿产资源战略调查研究,王登红等^[1]认为我国三稀资源成矿条件独特,具有“稀土不土、稀散不散、稀有常有”的特点,在内生型的稀有稀土矿床中,铌、钽、钷等稀有金属常与稀土矿物伴生。根据不完全统计,我国产出的稀有金属矿物近 200 多种,根据王盘喜等^[2]调查,我国内蒙古白云鄂博超大型稀有稀土金属矿床中产出的矿物种类就多达 160 余种,内蒙古扎鲁特旗巴尔哲稀土矿共伴生矿物达 44 余种。因此,我国学者根据矿物组合特征将稀有稀

土矿床划分为(Li、Be、Ta、Nb)与 REE(Nb、Ta、Be)两个大类,分别对应了矿床形成的构造环境及岩浆物质来源,即构造体制转换或俯冲作用构造环境下的钙碱性花岗岩与大陆隆起或裂谷作用下的碱性花岗岩。

多年以来,稀有稀土矿产的勘探仍拘谨于常规的化探等手段,方法单一,局限性大且成本高,仅仅在普查或者预查的小范围内使用。在航放异常查证过程中发现与放射性异常相关的稀有稀土矿这一事实给黑龙江省的三稀矿产成矿研究提供了新找矿思路。本文以伊春市南岔某铀异常点为例,阐述放射性物探手段在稀有金属矿勘探工作中的应用。

1 航放数据来源及异常带特征

2010 年以来,黑龙江省完成大小兴安岭地区、完达山地区等航空放射性测量,工作范围基本覆盖全省。在对航空放射性异常地面查证过程中,发现了几处与放射性有关且产于放射性异常中的三稀矿

收稿日期: 2020-11-02; 修回日期: 2021-11-17

基金项目: 黑龙江省财政地勘专项基金项目“黑龙江省小兴安岭北部航放异常查证”(〔2013〕003)

第一作者: 王睿(1985-),男,高级工程师,现主要从事地球物理勘查、矿产普查、铀矿勘查等工作。Email:441235080@qq.com

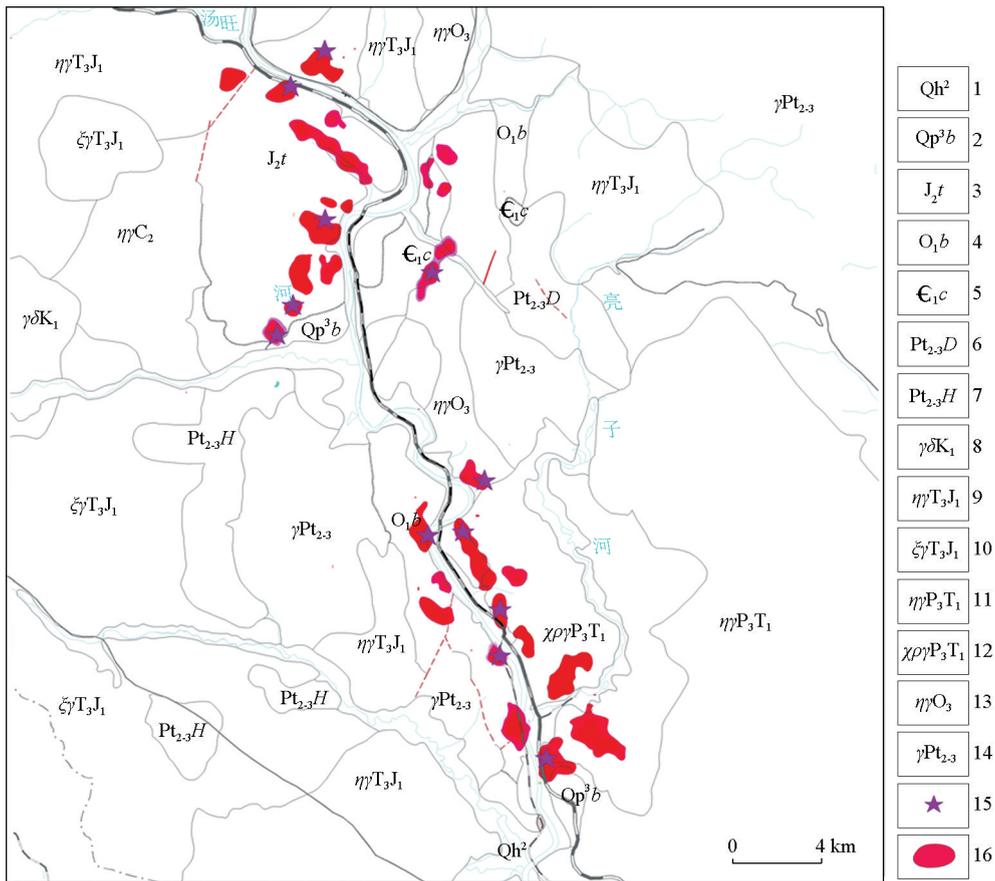
通讯作者: 李占龙(1988-),男,工程师,现主要从事矿产普查、铀矿勘查等工作。Email:909953001@qq.com

床,其中较为典型的就就是漠河县 782 高地稀有稀土矿,该矿点是黑龙江省发现的唯一以铈为主的中型稀有金属矿床^[3]。

本次研究数据主要来源于 2010~2012 年由中国地调局和黑龙江国土资源厅共同出资完成的“小兴安岭地区 1:5 万航空高精度磁测及航空伽马能谱综合测量”工作及“黑龙江省小兴安岭北部航放伊春查证”项目实测数据^[4]。数据由核工业航测遥感中心制造的 ARD 多道伽马能谱仪采集,国防科技工业 1313 二级计量站检定,铀道灵敏度 $\geq 0.277(10^{-6}eU \cdot s)^{-1}$;钍道灵敏度 $\geq 0.122(10^{-6}eTh \cdot s)^{-1}$;相对偏差 eU:-1.1%~-4.0%;eTh:1.5%~3.2%,符合国家标准。测网密度采用 100 m×20 m,共完成地面伽马能谱测量点 3 794 个,测量数据包括 U、Th、K 及伽马总量,

所测数据质量符合规范要求。

在航空放射性测量中,该区域呈现出一个显著特征(图 1):航放高场多分布于汤旺河两岸中生代岩浆岩带中,为偏高—高值区,呈 NNW 向展布。主要出露下寒武统晨明组粉砂质板岩、板岩、变石英砂岩,中奥陶统小金沟组大理岩、粉砂岩硅质岩,下白垩统宁远村组酸性熔岩及其火山碎屑岩,出露岩体有中石炭世二长花岗岩、早二叠世花岗岩、晚三叠世二长花岗岩以及晚二叠世—早三叠世碱长花岗岩。区域铀丰度显著增高,形成一系列沿河分布的 NW-NE 向异常,呈团块状、带状、不规则带状等分布形态。异常带表现出的分布特征与区域断裂构造相符,受控特征明显,规模较大的航放异常多产于断裂构造交汇部位。



1—第四系低河漫滩堆积层;2—第四系更新统别拉洪河组;3—侏罗系中统太安屯组;4—奥陶系下统宝泉组;5—寒武系下统晨明组;6—东风山岩群;7—红林岩组;8—早白垩世花岗岩闪长岩;9—晚三叠—早侏罗世二长花岗岩;10—晚三叠—早侏罗世正长花岗岩;11—晚二叠世—早三叠世二长花岗岩;12—晚二叠—早三叠世碱长花岗岩;13—晚奥陶世二长花岗岩;14—新—中元古界花岗岩;15—航空放射性异常点;16—航空放射性高场

1—Quaternary low-river floodplain deposits; 2—the Quaternary Pleistocene Belahong River group; 3—middle Jurassic Taitun group; 4—lower Ordovician Baoquan group; 5—lower Cambrian Chenming group; 6—Dongfeng Mountain rock group; 7—Honglin rock group; 8—the Granodiorite of early Cretaceous epoch; 9—the Monzogranite of late Permian-early triassic; 10—the Syenogranite of late Permian-early Triassic; 11—the Monzogranite of late Permian-early Triassic; 12—the Alkali Feldspar Granite of late Permian-early Triassic; 13—the monzogranite of late Ordovician; 14—the Granite of Neo-Meso-Proterozoic; 15—airborne radioactive anomaly; 16—aeronautical radioactive high field

图 1 汤旺河南岔段地质及铀异常分布

Fig. 1 Geological and Uranium anomaly map of Tangwang river in Nancha district

2 研究区地质背景

研究区位于黑龙江省小兴安岭成矿带中段,汤旺河放射性异常带内(图 1)。研究区地层单一(图 2),第四系及古生代下寒武统西林群晨明组(ϵ_1c)变质岩类,主要包括白云质灰岩、含沥青质灰岩、粉砂岩、长石石英砂岩等。该地层总体上呈上粗下细逆粒序层,颜色也是由上而下逐渐加深。岩性以碎屑岩为主,主要分布于汤旺河南岔段,总体呈 NW 或 NE 向厚板状沿河分布。上部为灰色—灰紫色厚层状细粒云母长石石英砂岩,中部为灰—灰绿色绢云

母化长石石英砂岩、石英岩;下部为绢云母化粉砂质板岩。区域上,构造结合部位及侵入岩接触部位附近岩石变质程度较高,片理化发育,低级区域变质岩板岩均含有绢云母、绿泥石等,基本达到绿片岩相变质程度。具有指示作用的黄铁矿化主要分布于铀矿化体内及其附近的变质石英砂岩、石英砂岩内,是主要的铀矿物富集的重要标志性矿化之一。侵入岩主要为晚奥陶世碎裂岩化二长花岗岩($O_3\eta\gamma$)及 NE 向展布的花岗岩脉,岩石地质成岩较老,受汤旺河区域性断裂活动及岩浆活动影响,区域变质强烈,形成碎裂岩化二长花岗岩。

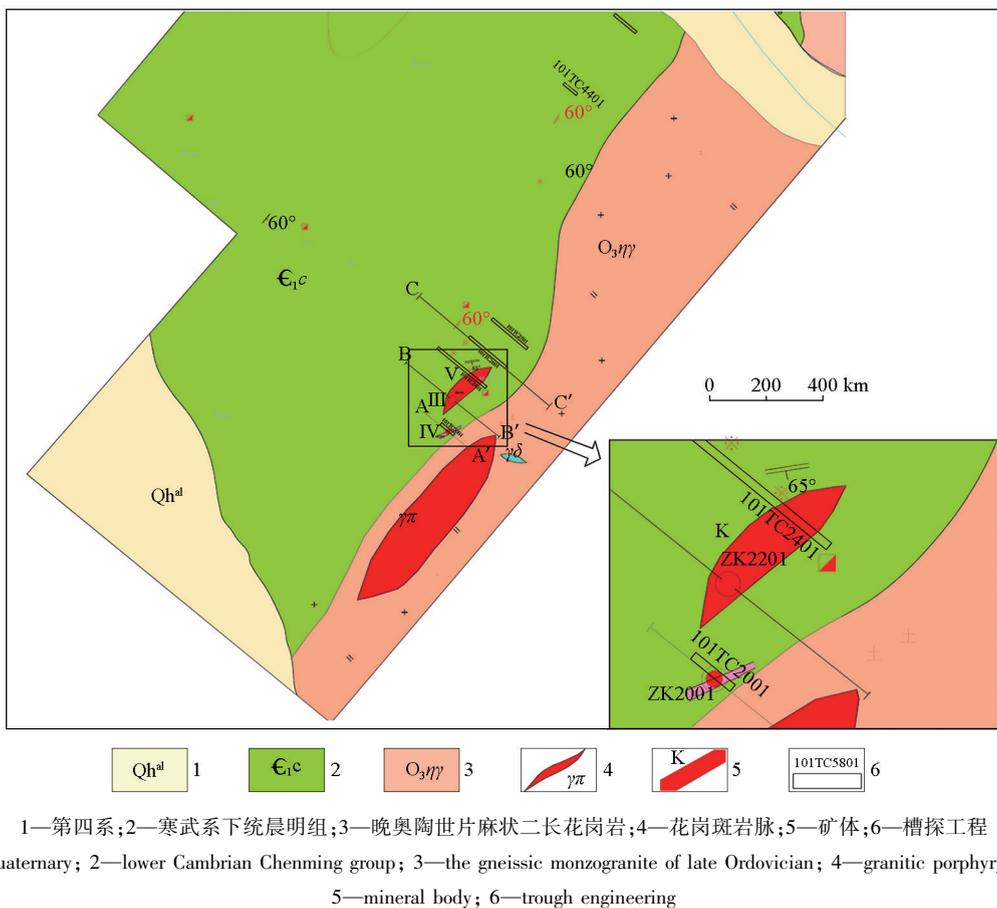


图 2 研究区地质

Fig. 2 Geological map of the study area

3 放射性特征研究理论与方法

根据资料分析,我国的铀钼、铷等稀有金属成矿类型、分布地区具有各自独特特征,但也具有相通之处。如四川省南部的攀西地区发现的碱性花岗岩型、花岗伟晶岩型稀有金属矿床、矿点,根据王汾连等^[5]调查,认为其与区域上广泛发育的侵入岩体关

系密切。在杨铸生等^[6]对攀西地区内的稀有金属矿物(烧绿石、氟碳铈矿等)的调查显示,其中均含有放射性元素铀、钍,放射性强度与 Nb_2O_5 含量成正比关系,是铀钼矿的直接找矿标志。在内蒙古巴尔哲超大型矿床产于燕山期巴尔哲碱性花岗岩体内,为 REE-Zr-Be-Nb-Ta 多金属矿床,主要矿石矿物为铀铁矿、独居石、硅铍铈矿、锆石、氟碳铈矿和烧绿石等。杨斌斌等^[7]认为矿体受钠长石化作用

制约,U、Th、Y 元素明显富集,呈现高放射性特征。在黑龙江省,三稀矿产的成矿规律研究相对较少,目前已发现的稀有矿物主要为铌钽、铷、锂、铍、锆等,稀土矿物为镧、铈、钇等,矿床、矿点主要分布在龙江一大井子、佳木斯成矿亚带内,与海西期后花岗伟晶岩关系密切,矿床类型主要有花岗伟晶岩型和碱性花岗岩型稀有稀土金属矿,成矿时代为兴凯期侵入旋回的混合花岗岩;海西期侵入旋回早期的碱性花岗岩和中期二云母花岗岩、晚期碱性花岗岩;燕山期侵入旋回的碱性花岗岩。

钽铌等稀有金属矿床的矿化多与花岗岩伟晶岩有关,其中含钠长石、独居石、晶质铀等放射性矿物等高放射性特征,以及与铀矿的共伴生关系。因此,研究区内采用了地面伽马能谱测量的放射性物探工作方法,以放射性初步划分异常的同时利用数据处理、参数计算等方式圈定靶区。

4 地面伽马能谱数据处理与解释

4.1 能谱数据形态分布检验

能谱数据正态性检验见表 1、图 3,剔除 $X_i \geq X + 3S$ 的数据,U、Th、Te(总量)数据形态符合正态分

布,仅 K 元素偏度较高,变异系数除 K 元素外均相对较小,说明区内铀异常离散程度较小,异常值较为集中且稳定。

4.2 能谱异常划分

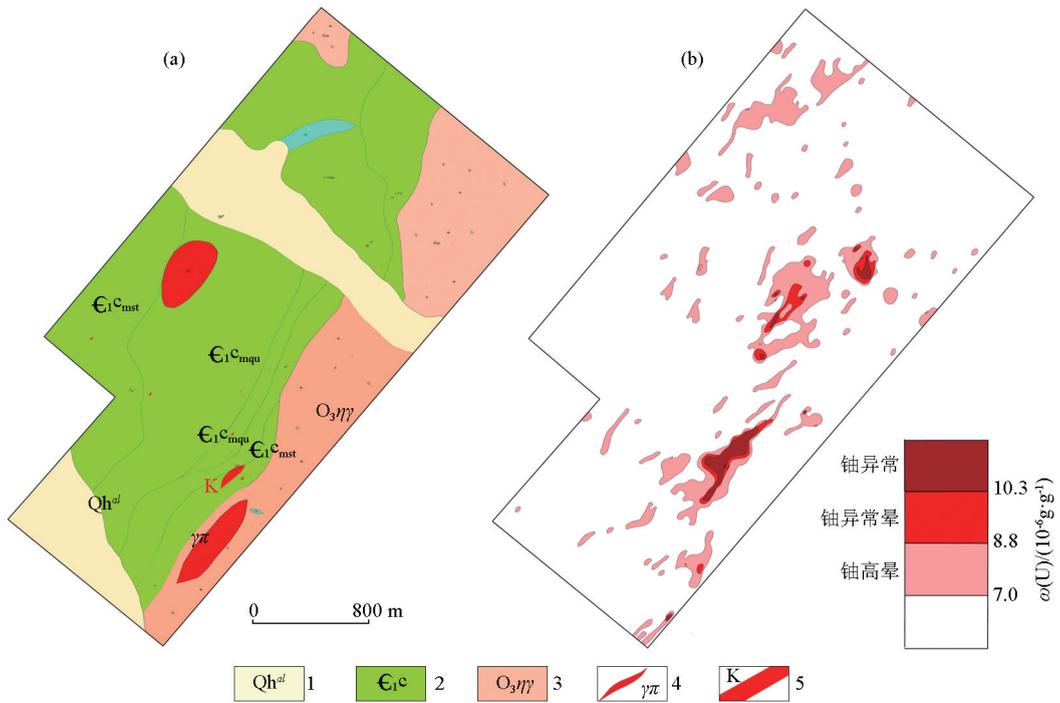
相对富铀区一般指铀 $eU \geq X + \sigma$,且 $eTh/eU \leq 3$ 的区域,具体划分原则为:偏高晕: $X + \sigma \leq eU < X + 2\sigma$;高晕: $X + 2\sigma \leq eU < X + 3\sigma$;异常晕: $X + 3\sigma \leq eU < 3\sigma$;异常: $3\sigma \leq eU$ 。

表 1 能谱数据对数正态检验计算结果

Table 1 Tabular statement of logarithmic normal distribution test of energy spectrum data

参数	U	Th	K	Te
简单算术平均数 X	0.494	1.008	0.201	1.121
中位数为 m	0.491	0.996	0.176	1.111
众数 Mo	0.450	0.940	0.080	1.090
最大值 X_{max}	1.090	1.493	0.756	1.623
极差为 R	1.090	1.078	0.756	0.990
平均离差 M_D	0.136	0.120	0.105	0.106
标准差 σ	0.175	0.156	0.131	0.136
变差系数 C_v	0.354	0.155	0.653	0.122
偏度	6.395	7.606	16.355	10.386
峰度	4.010	4.704	3.602	5.662

注:U、Th、Te(总量)单位为 $10^{-6}g/g$;K 单位为 $10^{-2}g/g$



1—第四系;2—寒武系下统晨明组;3—晚奥陶世片麻状二长花岗岩;4—花岗斑岩脉;5—铷、铌钽矿化体

1—Quaternary; 2—lower Cambrian Chenming group; 3—the gneissic monzogranite of late Ordovician; 4—granitic porphyry vein; 5—the mineral body of Rb, Nb and Ta

图 3 研究区地质 (a) 及铀元素异常晕分布 (b)

Fig. 3 Geological of the study area (a) and distribution map of uranium anomaly halo (b)

表 2 能谱数据数字特征统计

Table 2 Statistical table for digital characteristics of energy spectrum data

参数	U	Th	K	Te
简单算术平均数 \bar{X}	3.44	10.88	1.50	13.35
平均离差 M_D	1.18	3.13	0.40	2.98
标准差 σ	1.77	4.25	0.51	3.78
变差系数 C_v	0.51	0.39	0.34	0.28
偏度	71.04	36.58	13.57	18.34
峰度	178.63	34.27	1.28	3.44

注:已剔除数据中大于 $\bar{X}+3\sigma$ 的值

根据表 2、图 4 统计结果,相对富铀区应为 $eU \geq 5.2 \times 10^{-6}$,其中偏高晕: $5.2 \times 10^{-6} \leq eU < 7.0 \times 10^{-6}$,高晕: $7.0 \times 10^{-6} \leq eU < 8.8 \times 10^{-6}$,异常晕: $8.8 \times 10^{-6} \leq eU$

$< 10.3 \times 10^{-6}$,异常: $eU \geq 10.3 \times 10^{-6}$ 。对比图 3,可见全区铀元素达异常级别的富集中心 3 处,偏高晕零散分布。铀异常晕总体呈 NE 向带状沿晚奥陶世片麻状二长花岗岩分布,表明其成因与元古宙花岗岩关系密切。沿接触带发育较为普遍但规模较小的交代蚀变作用,结合古铀含量、活化铀量、异常内钍铀比等参数特征反映出铀迁出情况,表明后期热液交代作用中必然有一种或一类元素与铀发生了交代。

4.3 能谱数据处理与综合解释

探索不同数据参数处理方式及解释方法在实际工作中发挥的作用,因此针对研究区,笔者选用了几种能谱数据处理方式,表 3 是在数据处理中选用的参数模型及所代表的意义。

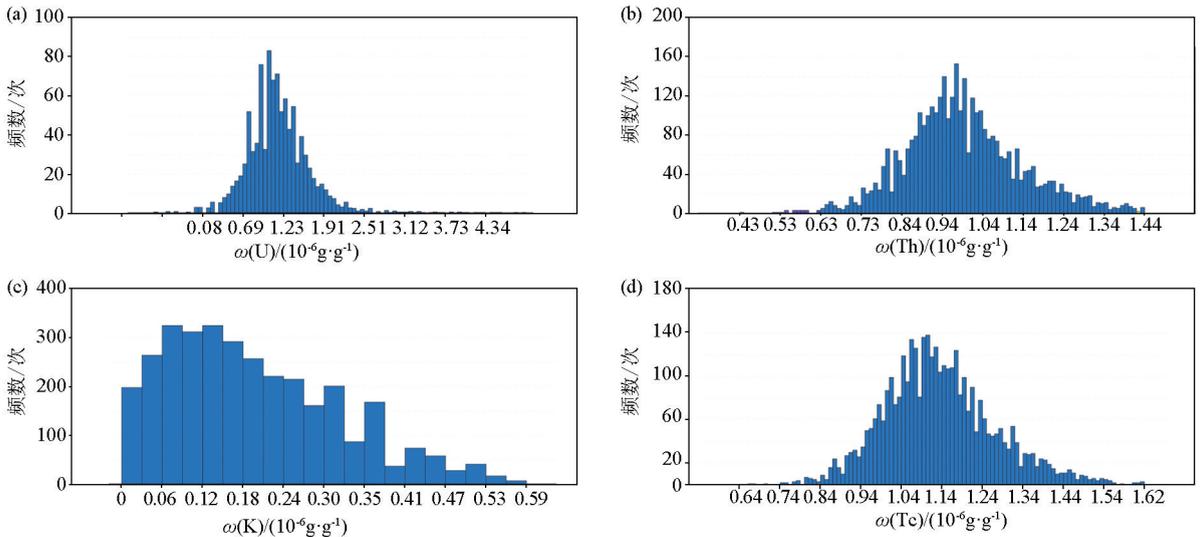


图 4 铀元素 (a)、钍元素 (b)、钾元素 (c) 和总量 (d) 地面伽马能谱测量数据对数分布直方图

Fig. 4 An histogram for logarithmic distribution of energy spectrum data of Uranium content (a), Thorium content (b), Potassium content (c) and total content (d)

表 3 特征参数

Table 3 Characteristic parameter

参数	数学模型	地质意义
钍铀比	Th/U	钍铀比值的变化可以指示蚀变、矿化等特殊地质作用过程
古铀量 (Gu)	$Th/(\overline{Th/U})$	利用古铀与现代铀差异评价铀元素在成岩后活化迁移路径及淋失、叠加情况
交代蚀变 (F)	$(U \cdot K)/Th$	利用 U、K、Th 元素稳定性和迁出迁入能力不同反映元素在后期成矿作用中的交代蚀变情况

Th/U:一般情况下,放射性元素的含量在许多类型的岩石中是保持相对稳定的,各元素间存在一定的相关性,而在一些地质活动中会造成某些元素地相对富集或贫化。如热液活动、蚀变作用等,造成某些元素的带入或带出。故钍铀比值的变化可以指

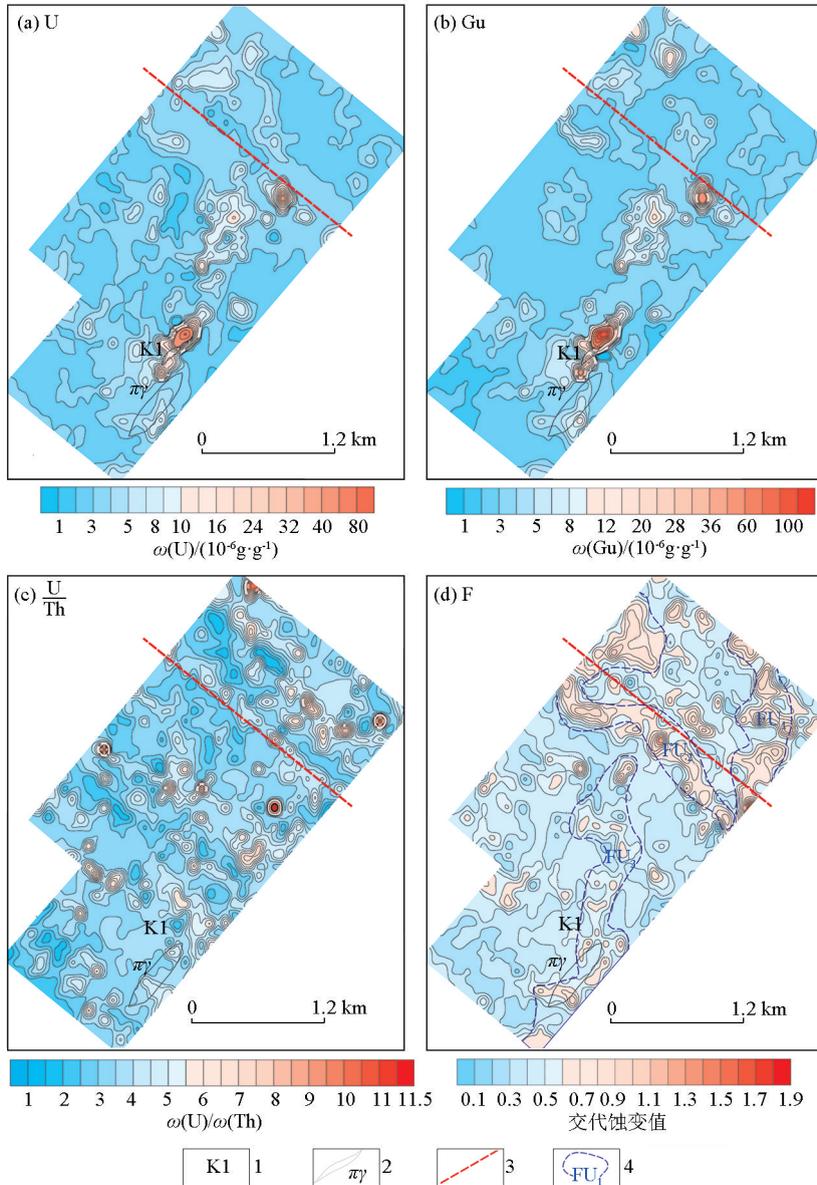
示蚀变、矿化等特殊地质作用过程,可用它来进行特殊地质过程的填图、找矿远景预测等。地壳不同类岩石中铀、钍绝对含量可能差异很大,但 Th/U 比值比较恒定,大约在 3~4^[8],研究区 $Th/U \approx 3.62$,与中国沉积层 $Th/U \approx 4.4$ 、中国上陆壳 $Th/U \approx 3.1$ 接近^[9],显示岩浆作用过程中 Th、U 具有相似的地球化学行为。铀含量高晕内 62 组数据的 $Th/U \approx 3.78$;异常晕内 25 组数据的 $Th/U \approx 4.69$;U 异常内 20 组数据 $Th/U \approx 4.93$ 。局部钍铀比值的变化是后期构造或者热液活动中钍、铀分离的结果。低 Th/U 预示后期有二次铀的富集,是成矿有利指示因素;高 Th/U 则预示铀有迁移流失,不利于铀富集成矿^[10],因此异常内较高的 Th/U 指示了铀发生过迁移流失。

Gu:通常指岩石形成时的铀含量,在一个包含

铀迁出、迁入的较大区域内,求得该区域内钍量与铀量之比,可以反映铀钍元素未发生分离时的初始比值^[11],这样就可以利用公式计算出古铀量。从图 5a、5b 看出,现代铀量低于古铀量(Gu),总体形态一致,迁移量 $Fu = eU - Gu$ 为负,铀元素异常晕范围内的 $Fu \approx -21 \times 10^{-6}$,但含量明显减少,说明成岩后活化铀含量增加。

F:由原苏联学者叶菲莫夫于 1978 年提出,认为交代岩的多阶段成因常伴随着强烈的地球化学蚀变,发生某些元素的迁入和带出。交代作用过程中钾既有迁入也有带出,但以迁入为主。钍通常在发

生接触变质时带出,而且变质越深带出越多。铀是放射性元素中最活跃的元素,在交代作用过程中常以迁入为主,但在后期的外生成矿作用中有可能被带出,故铀的变化情况不如钾、钍稳定(图 5c)。根据图 5d 显示,研究区内具有 3 条 F 值得异常带,其代表的交代蚀变作用与地质吻合度较高,分别为 NNW 向的 FU_1 、 FU_3 ,两条异常带与晚奥陶时花岗岩接触带相符,体现出地层被 NW 向断裂错断的特征; FU_2 沿 NW 向断裂呈带状分布,连续性好,规模大,代表伴随断裂活动发生的一系列热液蚀变作用。



1—矿化体;2—花岗斑岩脉;3—推测断裂;4—F 值异常区;a 铀含量等值线;b—古铀含量等值线;c—铀、钍含量比等值线;d—交代蚀变值
1—mineralizer; 2—granitic porphyry vein; 3—speculated fracture; 4—the anomaly area of the value of F;a—contour map of Uranium content;b—contour map of Paleouranium content;c—contour map of the ratio of Uranium and Thorium;d—contour map of the value of metasomatic alteration

图 5 地面伽马能谱测量参数等值线剖析

Fig. 5 Contour profile of ground gamma spectrum measurement parameters

FU_3 沿花岗岩接触带分布,结合较高的古铀含量、向外迁出的活化铀量以及反映铀后期迁移流失的钍铀比等参数特征,反映矿体附近的异常具有以下特征:早期成岩时期具有较高的铀含量;成岩后期伴随着断裂活动、岩浆热液活动岩石发生交代蚀作用;交代蚀变作用时期,发生 U^{4+} 、 Th^{4+} 和 REE^{3+} 元素之间的类质同象,铀元素迁出,而 REE 和部分稀有元素迁入。因此,具有上述特征的 FU_1 处应具有较好的稀有稀土矿化情况。

5 异常验证

在图 2 内铀异常中心槽探工程验证后,揭露控制矿体铀、钽铌矿(化)体 K(图 2),其矿化特征如下:

钍矿体:宽度 50 m,平均品位 721×10^{-6} ,最大值 1180×10^{-6} ,赋矿岩石为绢云母化黄铁矿化长石石英砂岩。

钽铌矿体:共伴生于钍矿体内部,产状、形态与钍矿体相同,钽元素含量偏高,平均品位 0.091%;钽平均品位为 0.0066%, $(Nb_2O_5/Ta_2O_5) > 1$;

铷矿体:与钽铌、钍、铀矿体伴生,矿体形态相似,平均品位达 950×10^{-6} ,最高为 1920×10^{-6} 。

铀矿化:矿体内铀元素分布不均匀,矿化品位在 $(100 \sim 150) \times 10^{-6}$ 之间,总宽度近 30 m。

成矿岩体为花岗岩接触外带的变质石英砂岩,距离奥陶纪花岗岩体较近,具有远高于背景值的放射性高场和 Nb、Ta、Rb、U、Th 的共伴生特征。推断矿源与花岗岩体关系密切,含矿热液受构造作用岩层间破碎、裂隙等通道运移,最后于稍远处构造变质较发育的层间接触带富集,

矿体空间展布受 NW—NE 向汤旺河断裂构造控制,矿体富集、形成时间与区域中—低温变质作用耦合,矿化就位机制多样且与区域性构造、岩浆岩侵入关系密切,显示出构造、运移、变质、物源、热液的复合控矿成矿特征^[12]。

另外,研究区作为铀元素氧化迁出地铀源区,是该地区小型山前盆地内砂岩型铀矿勘探的重要线索。

6 结论

对能谱数据处理及验证,总结出可能稀有稀土元素矿化的放射性测量规律:①能谱测量放射性异常区;②Th/U 较高的偏钍性异常;③古铀量(Gu)含

量高明显高于现代铀含量的异常;④代表交代蚀变反应 F 值异常分布区。

综上,在具有放射性异常的区域,偏钍性的放射性异常不应归为无意义异常,其对部分稀有稀土元素矿产具有一定找矿指示意义。伽马能谱测量不应局限于铀矿勘查范围内,应拓展放射性物探的应用范围。特别是与放射性相关的稀有稀土矿,放射性物探手段具有较强的先天优势,是直观、快速寻找此类矿床的有效方法。

参考文献(References):

- [1] 王登红,王瑞江,李建康,等.中国三稀矿产资源战略调查研究进展综述[J].中国地质,2013,40(2):361-370.
Wang D H, Wang R J, Li J K, et al. The progress in the strategic research and survey of rare earth, rare metal and rare-scattered elements mineral resources[J]. Geology in China, 2013, 40(2): 361-370.
- [2] 王盘喜,包民伟.我国钽铌等稀有金属矿概况及找矿启示[J].金属矿山,2015,44(6):92-97.
Wang P X, Bao M W. General situation and prospecting revelation of Tantalum-Niobium rare metal[J]. Metal Mine, 2015, 44(6): 92-97.
- [3] 徐国战,吴鸣谦,徐文喜,等.黑龙江省漠河市 782 高地钽多稀有金属矿床的地质特征及找矿标志[J].矿床地质,2019,38(2):382-400.
Xu G Z, Wu M Q, Xu W X, et al. Geological characteristics and prospecting indicator of No. 782 highland Nb-rich rare-metal deposit in Mohe City, Heilongjiang province[J]. Mineral Deposits, 2019, 38(2): 382-400.
- [4] 林泽付,马涛,王睿.黑龙江省小兴安岭地区航放异常查证报告[R].2016.
Ling Z F, Ma T, Wang R. Report of the verification of airborne radiometric anomalies in Xiaoxing'anling area, Heilongjiang Province [R]. 2016.
- [5] 王汾连,赵太平,陈伟.钽铌矿研究进展和攀西地区钽铌矿成因初探[J].矿床地质,2012,31(2):293-308.
Wang F L, Zhao T P, Chen W. Advances in study of Nb-Ta ore deposits in Panxi area and tentative discussion on genesis of these ore deposits[J]. Mineral Deposits, 2012, 31(2): 293-308.
- [6] 杨铸生,段惠敏,王秀京.四川攀西地区钽铌矿床的地质特征及找矿方向[J].四川地质学报,2007,27(4):248-254.
Yang Z S, Duan H M, Wang X J. Geological features and reconnaissance of Nb-Ta deposits in the Panzhihua-Xichang region, Sichuan[J]. Acta Geologica Sichuan, 2007, 27(4): 248-254.
- [7] 杨武斌,牛贺才,单强,等.巴尔哲超大型稀有稀土矿床成矿机制研究[J].岩石学报,2009,25(11):2924-2932.
Yang W B, Niu H C, Shan Q, et al. Ore-forming mechanism of the Baerzhe super-large rare and rare earth elements deposit[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(11): 2924-2932.
- [8] 章邦桐.内生铀矿床及其研究方法[M].北京:原子能出版社,1990.

- Zhang B T. Endogenic uranium deposits and methods of study [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1990.
- [9] 黎彤. 中国陆壳及其沉积层和上陆壳的化学元素丰度[J]. 地球化学, 1994, 23(2): 140-145.
- Li T. Element abundances of China's continental crust and its sedimentary layer and upper continental crust[J]. Geochimica, 1994, 23(2): 140-145.
- [10] 胡鹏, 闫秋实, 叶松鑫, 等. 钍铀比值在判别铀成矿环境中的应用研究——以粤北书楼丘铀矿床为例[J]. 地质与勘探, 2020, 56(1): 37-48.
- Hu P, Yan Q S, Ye S X, et al. Application of the thorium-uranium ratio in identifying uranium metallogenic environment: An example of the shulouqiu uranium deposit in Northern Guangdong Province [J]. Geology and Exploration, 2020, 56(1): 37-48.
- [11] 郭福生, 辜骏如. 能谱特征参数 $\overline{\text{Th}/\text{U}}$ 与 $\overline{\text{Th}}/\overline{\text{U}}$ 之差异及古铀量计算公式的修正[J]. 铀矿地质, 1997, 1(6): 356-358.
- Guo F S, Gu J R. The difference between spectral characteristic parameter $\overline{\text{Th}/\text{U}}$ and $\overline{\text{Th}}/\overline{\text{U}}$ and the revised formula for calculating paleo-uranium abundance[J]. Uranium mineral, 1997, 13(6): 356-358.
- [12] 徐文雄, 刘文, 伏顺, 等. 诸广岩体南部长排铀矿床勘查模式与找矿预测[J]. 地质学刊, 2018, 4(3): 361-369.
- Xu W X, Liu W, Fu S, et al. Exploration model and prospecting prediction of the Changpai uranium deposit in southern Zhuguang rock mass[J]. Journal of Geology. 2018, 4(3): 361-369.

Application of radioactive prospecting in exploration of rare metal minerals: A case study of a uranium anomaly in the Nancha area

Wang Rui, Li Zhan-Long, Ma Tao

(Fifth Geological Exploration Institute of Heilongjiang Province, Haerbin 150090, China)

Abstract: The mineralization of deposits of rare metals such as tantalum and niobium in China is mostly related to granite pegmatite. The enrichment of rare metals in these deposits is accompanied by the formation of radioactive minerals, such as albite, monazite, and high-grade uranium, and these deposits have paragenetic and associated minerals uranium deposits. Therefore, radioactive prospecting has become the most convenient and effective method to explore deposits of rare metals such as REEs, Nb, and Ta. Based on the close correlation between mineralization and radioactivity of rare earth minerals, this study fully investigated the parameter characteristics of the surveyed energy spectrum data through the combination of airborne radioactivity measurement and ground gamma spectrometry measurement to determine prospecting indicators. A new niobium-tantalum-rubidium polymetallic mineralized point was discovered in the Nancha area, Yichun City using the radioactive prospecting method, which was thus proven effective.

Key words: Niobium, tantalum, and rubidium; rare metals; mineralization of uranium and thorium; gamma ray spectrometry

(本文编辑:王萌)