



综合物探方法在锂铍稀有、稀土矿勘查中的应用研究

保善东, 曾 彪, 白宗海, 黄青华, 苑永涛, 祁 文, 熊寿加

青海省青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室/青海省地质调查院, 青海 西宁 810012

摘 要: 对矿石中放射性核素的含量组合与岩石含矿量进行相关性分析, 进而指导锂铍稀土矿资源勘查工作。采用 ENVI Pro 型质子磁力仪和 ARD 型多道伽玛能谱仪, 对茶卡北山地区花岗伟晶岩脉进行磁性特征测量和放射性特征测定, 确定 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 含量分布规律和异常位置, 划分含矿岩体, 提取信息并进行磁异常和放射性元素含量的相关性分析。结果表明, 北部铀钍钾偏高的背景场主要受原岩为沉积岩的浅变质岩控制, 中、南部异常区内, 磁异常套合铀钍混合异常点部位两组脉体的节点附近和接触带部位寻找稀有稀土矿的潜力最大。从而表明通过磁法测量和能谱测量的相关性分析能够为后期找矿工作提供了良好的地球物理依据。

关键词: 锂铍稀土矿; 花岗伟晶岩; 放射性元素; 综合物探; 青海省

APPLICATION OF COMPREHENSIVE GEOPHYSICAL PROSPECTING METHODS IN EXPLORATION OF LITHIUM-BERYLLIUM RARE METAL AND RARE EARTH ORES

BAO Shan-dong, ZENG Biao, BAI Zong-hai, HUANG Qing-hua, YUAN Yong-tao, QI Wen, XIONG Shou-jia

Qinghai Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources in Northern Qinghai-Tibetan Plateau/ Qinghai Geological Survey Institute, Xining 810012, China

Abstract: The correlation between content assemblage of radionuclides in ores and ore content of rock is analyzed to guide the exploration of lithium-beryllium rare earth ore resources. The granite pegmatite dikes in Chakabeishan area are measured for magnetic and radioactive characteristics by using ENVI Pro proton magnetometer and ARD multichannel gamma-ray spectrometer, to determine the content distribution rule and anomaly location of ^{238}U , ^{232}Th and ^{40}K , delineate ore-bearing rock bodies, extract information and analyze the correlation between magnetic anomaly and radioactive element content. The results show that the background field with high U, Th and K in the north anomaly area is mainly controlled by epimetamorphic rocks originated from sedimentary rocks. In the middle and southern anomaly areas, the area near the joint of two veins and contact zone where the magnetic anomalies overlap U-Th mixed anomalies have the greatest potential for rare metal and rare earth ores exploration, reflecting that the correlation analysis of magnetic survey and energy spectrum measurement can provide a good geophysical basis for future prospecting.

Key words: lithium-beryllium rare earth ore; granite pegmatite; radioactive element; comprehensive geophysical prospecting; Qinghai Province

收稿日期:2021-01-04; 修回日期:2021-01-29. 编辑:张哲.

基金项目:青海省地质勘查基金项目“青海省天峻县茶卡北山地区锂稀有稀土矿预查”(2018353008kc002).

作者简介:保善东(1987—),男,工程师,从事地球物理矿产勘查及研究工作,通信地址 青海省西宁市南川西路 107 号, E-mail//342831016@qq.com

通信作者:熊寿加(1987—),男,工程师,从事地球化学勘查及研究工作,通信地址 青海省西宁市南川西路 107 号, E-mail//253794847@qq.com

0 引言

锂、铍等稀有金属是重要的战略资源^[1],也是不可再生资源^[2],在社会经济发展中的应用日益广泛^[3].在南祁连地块和全吉地块相接的宗务隆山构造带东段茶卡北山地区发现了锂辉石伟晶岩脉群^[4],该类碱性花岗岩脉追索难度较大.2017年实施的青海省察汗诺-茶卡北山地区1:2.5万水系沉积物测量和2018年青海省天峻县茶卡北山地区锂稀有稀土矿预查项目,提出了矿石中²³⁸U、²³²Th、⁴⁰K三种元素含量组合与岩石的含矿性有一定相关性的设想^[5].结合锂铍稀土矿各类型矿石矿物组合中普遍存在的锂辉石、锂云母、绿柱石、钠长石化白云母花岗伟晶岩脉中的实际情况,为提高找矿效果,实施了更为有效的地球物理勘探方法——地面伽玛能谱和磁法测量^[6].通过物化探异常与地质矿产成果综合应用研究,新发现了多处矿化有利地段^[7],对研究区锂铍稀土矿资源勘查起到一定的促进作用^[8].

1 地质背景

茶卡北山地处柴达木盆地东北缘,位于欧龙布鲁克-乌兰成矿带东段.该成矿带是青海省稀有、稀土成矿有利地区,石乃亥伟晶岩型铍钽铀矿床、沙柳泉铀钼多金属伟晶岩型矿产于带中.

研究区内地层及岩浆岩的展布方向受北西向断裂控制(图1).出露的主要地层为石炭—二叠系土尔根大坂组,岩性以石英砂岩夹千枚状黑云片岩为主.南部小面积出露果可山组地层,岩性有灰白色白云岩等.北部、中部分布两条中浅部构造韧性剪切带,呈北西向展布,沿断裂及其次级裂隙构造发育地段为伟晶岩脉密集分布地段.南部二叠纪中酸性中细粒石英闪长岩沿区域性断裂产出,呈北西向长条带状展布.区内的脉岩主要为花岗伟晶岩,脉体走向与构造线方向基本一致.

圈定出的1:20万水系异常中,Li元素异常较为突出,其峰值为 46.93×10^{-6} ,表明茶卡北山地区具有较好的稀有多金属矿找矿前景.圈定1:5万水系异常6处,异常主元素为Rb、Y、W等,但对具有成矿意义的Li、Be等元素未作分析.

对花岗伟晶岩脉集中区进行了地表踏勘及捡块样分析,发现9条花岗伟晶岩脉,基本沿土尔根大坂组上

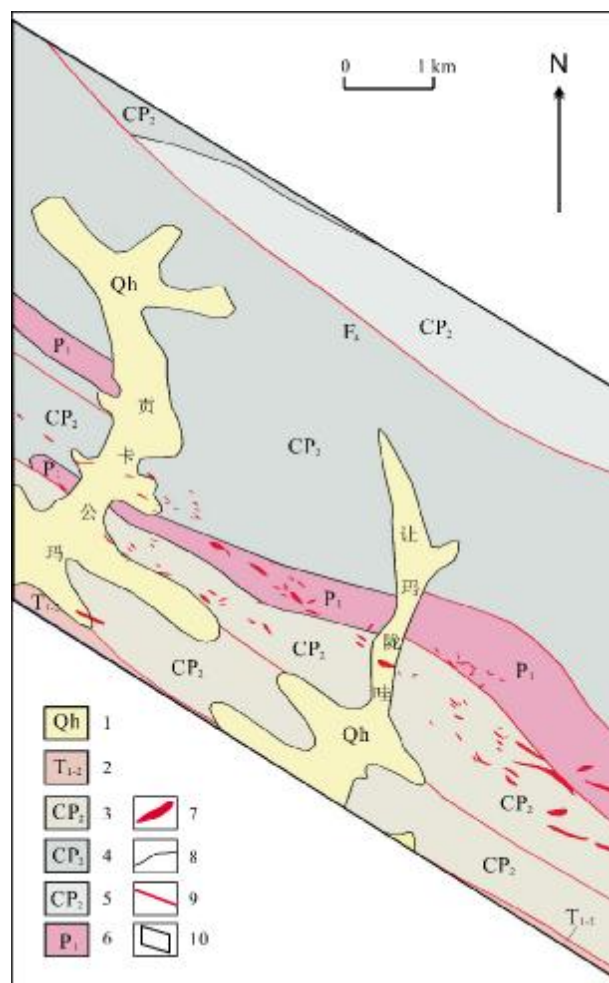


图1 茶卡北山地区地质图

Fig. 1 Geological sketch map of Chakabeishan area

1—全新世(Holocene); 2—隆务河组(Longwuhe fm.); 3—果可山组(Guokeshan fm.); 4—土尔根大坂组上段(upper mem. of Tuergendaban fm.); 5—土尔根大坂组下段(lower mem. of Tuergendaban fm.); 6—石英闪长岩(quartz diorite); 7—花岗伟晶岩脉(granite pegmatite dike); 8—地质界线(geological boundary); 9—断层(fault); 10—磁法-能谱测量范围(range of magnetic-energy spectrum measurement)

段地层中断裂及次级节理、裂隙侵入.脉体规模不等,脉宽一般10~20 m,最宽达40 m,长50~400 m,呈透镜状、巢状、囊状、条带状等形态展布,多呈北西向,部分呈东西、北东向.锂主要赋存于锂辉石、锂云母花岗伟晶岩脉中;铍赋存于绿柱石花岗伟晶岩脉中;铷、钽赋存在钠长石化白云母花岗伟晶岩脉中,矿化与钠长石化、白云母化等关系密切.

2 工作技术方法

2.1 技术方法选择

依据研究区基岩裸露较好、第四系覆盖较薄等地

貌,确定开展大比例尺高精度磁法和地面伽玛能谱测量.采用高精度磁法测量了解研究区各地质体和花岗伟晶岩等目标地质体的磁性特征和分布情况^[9],地面伽玛能谱测量可直接对放射性异常进行全面系统的检查,确定其放射性核素铀、钍、钾含量分布规律和铀异常位置^[10],大致查明异常和构造性质,以较小的经济代价有效地对研究区稀有稀土矿异常作出快速评价.

2.2 仪器参数及测量网度

磁法测量采用 ENVI Pro 型质子磁力仪,磁场测量精度为±1 nT,分辨率为 0.1 nT^[11].伽玛能谱测量采用 ARD 型多道伽玛能谱仪,分辨率 7.5%,能量范围 40 keV~3 MeV^[12].开工前后对磁力仪进行探头、主机及单多台一致性和噪声水平测定,对能谱仪进行仪器、短期稳定性及一致性测定等,各项性能指标均符合技术要求^[13].测线方位 35°,网度 100 m×20 m,面积 41.4 km²,实测物理点均为 20 724 个.

3 物性特征

3.1 磁性特征

测定磁物性标本 306 块,采用 ENVI Pro 质子磁力仪,选用高斯第二位置,测定参数为磁化率 *k*、剩余磁化强度 *J_r*.研究区岩(矿)石磁性特征(表 1)如下.

(1)果可山组和土尔根大阪组中大理岩、二云石英

片岩、糜棱岩显示弱磁性,磁化率均值分别为 85.9、81.8、58.2 (10⁻⁶×4 πSI),地磁图上皆显示弱磁或无磁异常.而花岗质片麻岩略显强磁性,磁化率均值为 929.4 (10⁻⁶×4 πSI).

(2)中酸性侵入岩石英闪长岩和花岗岩磁化率均值为 77.2、112.3 (10⁻⁶×4 πSI),皆显示弱磁性.

(3)糜棱岩化石英闪长岩较石英闪长岩磁性略高,磁化率均值为 121.1 (10⁻⁶×4 πSI).地磁图上显示大面积弱正磁异常,石英闪长岩侵入二云石英片岩接触部位显示跳跃状正负伴生强磁异常.

(4)含石榴子石、电气石、绿柱石、白云母花岗伟晶岩,磁化率均值为 74.7 (10⁻⁶×4 πSI),剩余磁化强度均值为 28.7×10⁻³ A/m,显示无磁性,与围岩强磁性形成反差^[10].

3.2 放射性特征

通过统计研究区各地质体放射性背景值(表 2),可见在花岗伟晶岩、二云石英片岩和糜棱岩中 eU、eTh、eK 的背景值较高,其次为石英闪长岩体,再次为果可山组大理岩地层,说明断裂蚀变发育地带,以及细晶岩脉、伟晶岩脉等脉体发育地段为放射性成矿的有利地段. U、Th、K 三种元素的含量及总道计数率值与研究区出露的一套浅变质岩、沉积岩、冲洪积物等存在显著的差异,这形成了良好的地球物理勘探前提^[14],

表 1 茶卡北山地区岩(矿)石磁物性统计结果表
Table 1 Magnetic and physical properties of rocks (ores) in Chakabeishan area

岩(矿)石	块数	磁化率 <i>k</i> /(10 ⁻⁶ ×4 πSI)			剩余磁化强度 <i>J_r</i> /(10 ⁻³ A/m)		
		最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
大理岩	42	4.6	257.3	85.9	4	104.8	25.4
含石榴子石、电气石、绿柱石、白云母花岗伟晶岩	33	1.4	246.1	74.7	3.6	131.1	28.7
石英闪长岩	23	8.8	223	77.2	7	87.3	32.8
石英脉	9	15.1	135.4	64.5	4.7	37.8	22.4
二云石英片岩	143	1.9	318.6	81.8	2.8	128.5	28.6
褐铁矿化二云石英片岩	15	0	132.1	54.8	6.9	52.7	30.6
花岗细晶岩	6	85.9	186.2	125.2	13.1	133.2	63.4
花岗岩	4	30.4	192.8	112.3	9	35	20.7
糜棱岩	17	4.9	140.2	58.2	8.3	65.9	34.7
糜棱岩化石英闪长岩	11	50.3	264.2	121.1	9.8	33.3	18.3
花岗质片麻岩	3	671.2	1425.8	929.4	47.1	255.5	127.2

可较准确地划分出可能的含矿岩体, 然后根据岩石中 U、Th、K 三种天然放射性元素含量值^[15], 通过多参数组合进行微弱信息增强和提取^[16], 可获得丰富的地质勘探信息, 从而将碱性岩体中锂铍稀有矿的矿(化)体与围岩区分开来^[17], 为后期找矿工作提供依据。

表 2 各类地质体放射性背景值统计表
Table 2 Radioactive background values of various geological bodies

地层(岩性)	U/10 ⁻⁶		Th/10 ⁻⁶		K/10 ⁻²	
	X	S	X	S	X	S
花岗伟晶岩岩体	3.3	0.9	15.5	3.1	1.9	0.5
第四系/全新统	2.7	0.8	13.4	2.4	1.6	0.4
二云石英片岩	2.9	0.9	15.4	3.1	1.9	0.5
石英闪长岩	2.8	0.8	14.4	2.8	1.8	0.4
糜棱岩	3.1	0.9	14.8	2.9	1.8	0.4
大理岩	2.9	0.9	13.9	3.1	1.7	0.5

4 综合分析

4.1 磁异常特征

根据磁异常特征, 结合地质背景, 自北向南划分为 4 个磁异常区(图 2), 各分区特征如下。

(1)北部面状强正磁异常区: 圈定 C1 磁异常, 以面状正磁异常为主, 幅值 30~100 nT, 出露岩性主要为细粒黑云石英片岩, 推测与深部隐伏中酸性岩体有关。

(2)中部条带状弱正磁异常区: 圈定 C2、C3、C4 磁异常, 以椭圆状正磁异常为主, 局部负异常伴生, 幅值 20~60 nT, 出露中粗粒含石榴子石二云石英片岩和石英闪长岩。C3 磁异常北西向展布, 其中 C3-2 磁异常西北侧地表出露石英闪长岩。C2 磁异常呈北东向椭圆状或条带状展布, 其中 C2-2 磁异常东南侧出露石英闪长岩。综合分析, 推测 C2、C3 和 C4 磁异常可能与隐伏石英闪长岩有关。

(3)南部面状弱负磁异常区: 主要出露大理岩和长石石英砂岩, 为大面积平稳负磁异常, 东侧呈现大面积面状负磁异常, 西侧显示带状负磁异常, 圈定磁异常 C5、C6, 推测为无磁地层。

(4)东南部条带状强正负磁异常区: 圈定 C7、C8 磁异常。C7 磁异常为正负伴生磁异常, 幅值 -371~+360 nT, 呈北西向椭圆状展布, 异常部位出露石英闪

长岩岩株, 北侧有大理岩分布。推测 C7 磁异常为中、酸性岩体侵入碳酸盐岩接触带中磁性矿物富集引起^[18]。

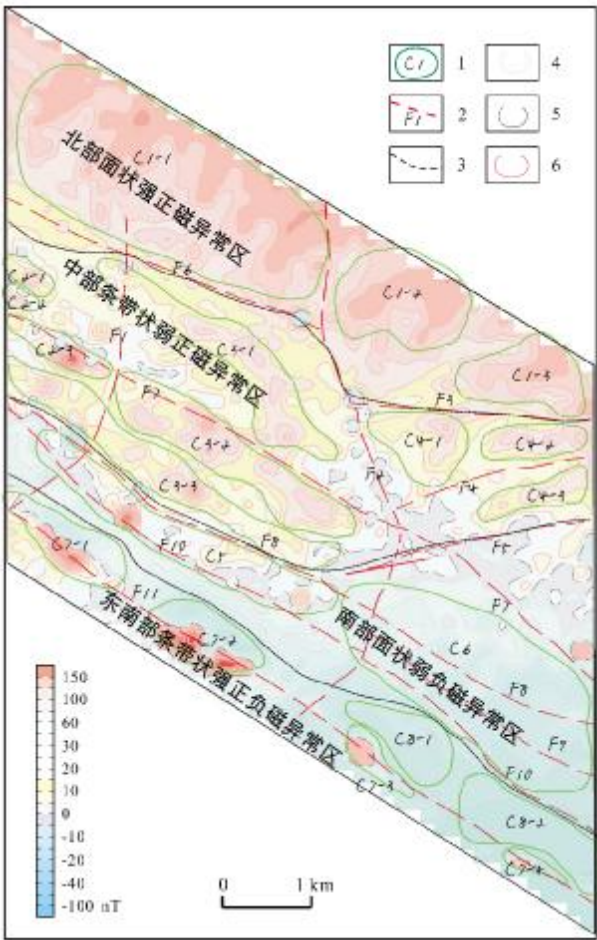


图 2 ΔT 磁异常等值线平面图

Fig. 2 Plan of ΔT magnetic anomaly isoline

1—磁测范围(range of magnetic survey); 2—推测断层(inferred fault); 3—异常区界线 (anomaly boundary); 4—负磁异常 (negative magnetic anomaly); 5—零值线(zero line); 6—正磁异常(positive magnetic anomaly)

研究区推测断裂构造共 11 条, 其中近南北向 2 条: F1、F2; 北东向 3 条: F3、F4、F5; 北西向 6 条: F6—F11。断裂构造有磁性分界面、磁异常错动带、串珠状磁异常等分布特征, 部分北西向断裂与地质解释较吻合。近南北向、北东向为推测的隐伏次级断裂。

4.2 铀钍钾特征

4.2.1 平面分布特征

通过能谱铀、钍、钾含量参数统计(表 3)看出, 铀含量介于 $0.2 \times 10^{-6} \sim 7.3 \times 10^{-6}$, 均值 3.0×10^{-6} , 变异系数 (30%) 变化较大; 钍含量介于 $3.8 \times 10^{-6} \sim 42.4 \times 10^{-6}$, 均值 14.8×10^{-6} , 变异系数 (21%) 变化较大; 钾含量介于 $0.1 \times$

$10^{-6}\sim 4.6\times 10^{-2}$, 均值 1.9×10^{-2} , 变异系数(50%)变化大. Th/U 均值(5.6)大于地壳地层和岩体均值(4.7). U/K 均值为 1.6, Th/K 均值为 7.9, 反映了在去钾元素背景下铀、钍元素的相对富集情况. U/K 比值较低, 说明铀元素的迁移富集不是很充足. 综上所述, 说明茶卡北山地区钍含量的差异大, 变异系数变化大, 偏度负偏, 峰度大, 钍元素发生了局部富集; 相对而言, 铀元素亦发生局部富集, 但富集程度相对较低; 钾变化范围大, 变异系数偏大, 研究区断裂钾化蚀变发育, 为蚀变岩脉提供了局部容矿空间^[19].

表 3 茶卡北山地区铀、钍、钾含量参数统计表
Table 3 Content parameters of U, Th and K in Chakabeishan area

统计参数	U/ 10^{-6}	Th/ 10^{-6}	K/ 10^{-2}	Th/U	U/K	Th/K
最小值	0.2	3.8	0.1			
最大值	7.3	42.4	4.6			
平均值	3.0	14.8	1.9	5.6	1.6	7.9
标准方差	0.9	3.1	0.5			
变异系数	0.30	0.21	0.27			
偏度	-2.7	-3.2	-5.2			
峰度	3.0	5.4	6.6			

4.2.2 异常区、带、点划分

采用迭代法确定 6 种地质体的背景值(X)和标准偏差(S), 最后选择 2 倍系数, 即 $X+2S$ 作为各类地质体的标准方差, 确定研究区各地质体背景值及异常划分原则. 放射性含量整体呈现北高南低特征, 钍、钾富集特征相关性极好, 异常形态极为相似. 共划分出 3 个放射性异常分区, 圈出 U 异常带 3 条、异常点 22 个(图 3); Th 异常带 3 条、异常点 20 个(图 4); 圈出 K 异常带 3 条、异常点 18 个. 钾与铀、钍异常相关性较好, 钾、钍相关性更强. 重点将研究区中、南部铀钍异常区、带、点特征(表 4、5)总结如下.

(1)中部条带状中高值异常区以条带状异常为主, 受控因素为有限的局部侵入岩体、细晶岩脉体、花岗伟晶岩脉体等, 多为铀钍混合异常, 一般钾化程度不高, 局部钾化强度较高. 铀、钍、钾总量的相关性较好, 总体呈现为中等偏高的含量分区, 铀含量介于 $0.4\times 10^{-6}\sim 4.9\times 10^{-6}$, 均值 2.8×10^{-6} ; 钍介于 $4.9\times 10^{-6}\sim 23.1\times 10^{-6}$, 均



图 3 U 含量等值线平面图

Fig. 3 Plan of U content isoline

1—花岗伟晶岩脉 (granite pegmatite dike); 2—异常分区线(anomaly division line); 3—铀含量等值线(U content isoline); 4—铀异常点编号 (number of U anomaly point); 5—铀异常带编号(number of U anomaly belt)

值 15.4×10^{-6} ; 钾介于 $0.6\times 10^{-6}\sim 3.4\times 10^{-2}$, 均值 2.1×10^{-2} . 多地段存在北西向串珠状高值异常带, 部分异常带与含稀有稀土矿伟晶岩脉带位置较吻合.

该异常分区圈定 2 条北西向铀(钍、钾)异常带, 分别为 U1(TH1、K1)和 U2(TH2、K2), 其中 U2 异常带内 u14—u20 异常点部位均发现含稀有稀土矿花岗伟晶岩脉, 而 U1 异常带内 u9—u13 异常点部位寻找稀有稀土矿的潜力较大.

(2)南部条带状低值背景区为大面积地质背景, 仅西侧有北西向铀钍混合型异常, 钾化程度较高, 铀、钍、钾呈现低含量. 部分地段第四系覆盖, 出露岩性主要为大理岩及石英片岩. 该异常分区内划分出 U3(TH3、K3)异常带, 圈定 u21、u22 异常点, 其中 u21 异常点发

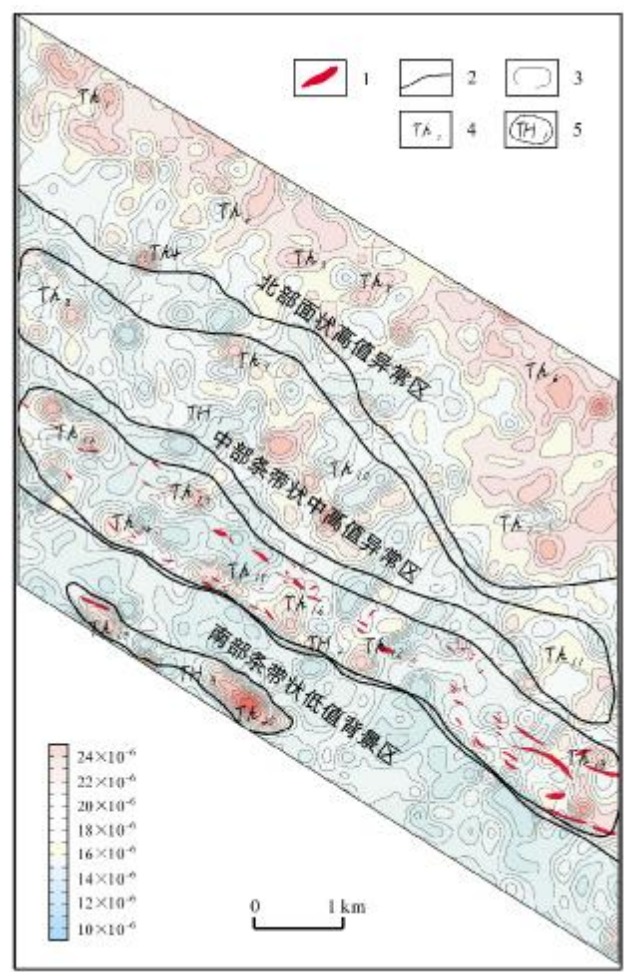


图 4 Th 含量等值线平面图

Fig. 4 Plan of Th content isoline

1—花岗伟晶岩脉 (granite pegmatite dike); 2—异常分区线 (anomaly division line); 3—钍含量等值线 (Th content isoline); 4—钍异常点编号 (number of Th anomaly point); 5—钍异常带编号 (number of Th anomaly belt)

现花岗伟晶岩脉,与异常点 u22 展布特征极为相似.推测南部为浅变质地层背景,钍钍混合型异常受控因素为局部侵入石英闪长岩脉和花岗伟晶岩脉等.

4.2.3 铀、钍、钾相关性特征

从铀、钍、钾相关性统计特征(表 6)看出,整体铀、钍、钾相关性较好,在北侧第二层二云石英片岩部位,铀、钍、钾相关性略有差异,中部及南部断裂构造部位、石英闪长岩和糜棱岩化石英闪长岩位置,铀、钍、钾相关性和同向性很高,再次说明北西走向断裂构造蚀变带和北西走向地层与中酸性侵入岩的接触夹持部位及其周缘,成矿潜力相对较大^[20].

4.2.4 异常筛选、评价

地面伽玛能谱测量 Th/U 比值是地球化学特征的重要参数,可以判断岩石中铀元素的活化迁移规律.通过古铀系数(Th/U)特征分析,Th/U 比值小于 3 为纯铀型,Th/U 比值在 3~5 之间为偏铀型或铀钍混合型,Th/U 比值在 5~7 之间为钍铀混合型,Th/U 比值大于 7 为纯钍型.由此总结出重要异常点含铀性及异常类型(表 7).

通过 U/K 和 Th/K 的比值,在花岗岩型矿化中反映了铀钍元素和钾元素的地化作用性状,即较高的 U/K 和 Th/K 比值清楚地反映了在钠交代过程中铀钍相对富集而去钾的特征.整体规律为矿化有利地段 U/K 比值一般较大,并且异常连续性较好,规模较大,地质成矿要素有利,而 Th/K 比值范围更大,异常更高.可见,Th/K 比值(图 5)较高地段是寻找钠交代型矿床的重要场所^[21].

表 4 茶卡北山地区铀异常带统计表

Table 4 Characteristics of U anomaly belts in Chakabeishan area					
异常带	面积/km ²	含量范围/10 ⁻⁶	异常形态	受控因素	含 U 异常点
U1	7.47	3.3~6.0	条状	岩体	u9、u10、u11、u12、u13
U2	6.81	3.3~5.8	条带状	断裂蚀变带、岩体、岩脉	u14、u15、u16、u17、u18、u19、u20
U3	0.84	2.4~5.8	条带状	岩体、岩脉	u21、u22

表 5 茶卡北山地区钍异常带统计表

Table 5 Characteristics of Th anomaly belts in Chakabeishan area					
异常带	面积/km ²	含量范围/10 ⁻⁶	异常形态	受控因素	含 Th 异常点
TH1	7.47	11.0~23.7	条带状	岩体	Th8、Th9、Th10、Th11
TH2	6.81	11.0~26.9	条带状	断裂蚀变带、岩体、岩脉	Th12、Th13、Th14、Th15、Th16、Th17、Th18
TH3	0.84	14.0~24.2	条带状	岩体、岩脉	Th19、Th20

表 6 茶卡北山地区铀、钍、钾相关性统计表

Table 6 Correlation characteristics of U, Th and K in Chakabeishan area

U 异常点	U 异常场类型	Th 异常点	Th 异常场类型	K 异常点	K 异常场类型
u1	异常场	Th1	异常场	k1	异常场
u2	异常场	Th2	异常场		偏高场
u3	异常场	Th5	异常场	k2	异常场
u4	异常场	Th6	异常场	k3、k4	异常场
u5	异常场		正常场		背景场
u6	异常场		背景场		正常场
u7	异常场		偏高场		偏高场
u8	异常场	Th7	偏高场	k5	偏高场
u9	异常场	Th8	异常场	k6	异常场
u10	异常场	Th9、Th10	异常场	k7	正常场
u11	异常场	Th10	异常场	k8	异常场
u12	异常场		背景场		正常场
u13	异常场	Th11	异常场	k9	异常场
u14	异常场	Th12	异常场	k10	异常场
u15	异常场	Th13	异常场	k11	异常场
u16	异常场	Th14	异常场	k12	异常场
u17	异常场		正常场	k14	异常场
u18	异常场	Th15、Th6	异常场	k13	异常场
u19	异常场	Th17	异常场	k15	异常场
u20	异常场	Th18	异常场	k16	异常场
u21	异常场	Th19	异常场	k17	异常场
u22	异常场	Th20	异常场	k18	异常场

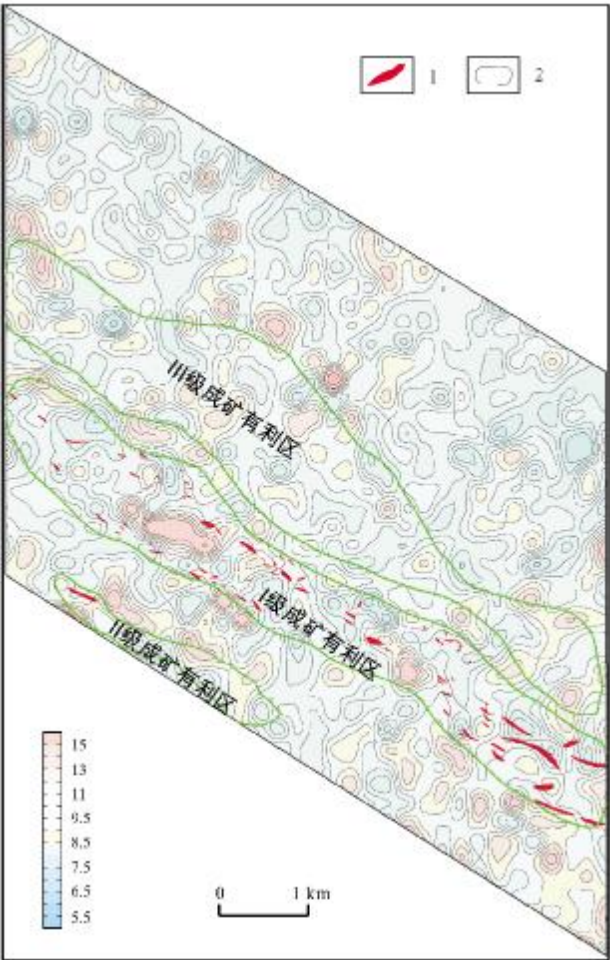


图 5 Th/K 含量比值平面等值线图

Fig. 5 Plan of Th/K content ratio isoline

1—花岗伟晶岩脉 (granite pegmatite dike); 2—评价系数等值线 (evaluation coefficient isoline)

表 7 茶卡北山地区异常点类型划分表

Table 7 Division of anomaly types in Chakabeishan area

异常点	古铀系数	评价系数	异常类型	伟晶岩出露情况	潜力筛选
u14	Th/U=3~7	$U/K < 1.8, Th/K < 7$	混合型	出露	I 类
u15	Th/U=3~7	$U/K < 1.8, Th/K < 7$	混合型	出露	I 类
u16	Th/U=3~7	$U/K=1.8\sim2.3, Th/K < 7$	混合型	出露	I 类
u17	Th/U=3~7	$U/K=1.8\sim2.3, Th/K < 7$	混合型	出露	I 类
u18	Th/U=3~7	$U/K > 2.3, Th/K > 9$	混合型	出露	I 类
u19	Th/U=3~7	$U/K=1.8\sim2.3, Th/K < 7$	混合型	出露	I 类
u20	Th/U > 7	$U/K < 1.8, Th/K < 7$	纯钍型	出露	I 类
u21	Th/U=3~7	$U/K < 1.8, Th/K > 9$	混合型	出露	I 类

在放射性异常点、带的类型划分基础上,结合 U/K、Th/U、Th/K 特征评价,对磁异常进行窗口法场分离突出局部异常(图 6),综合确定异常类型及异常分类,划分出 3 处稀土矿成矿有利区。

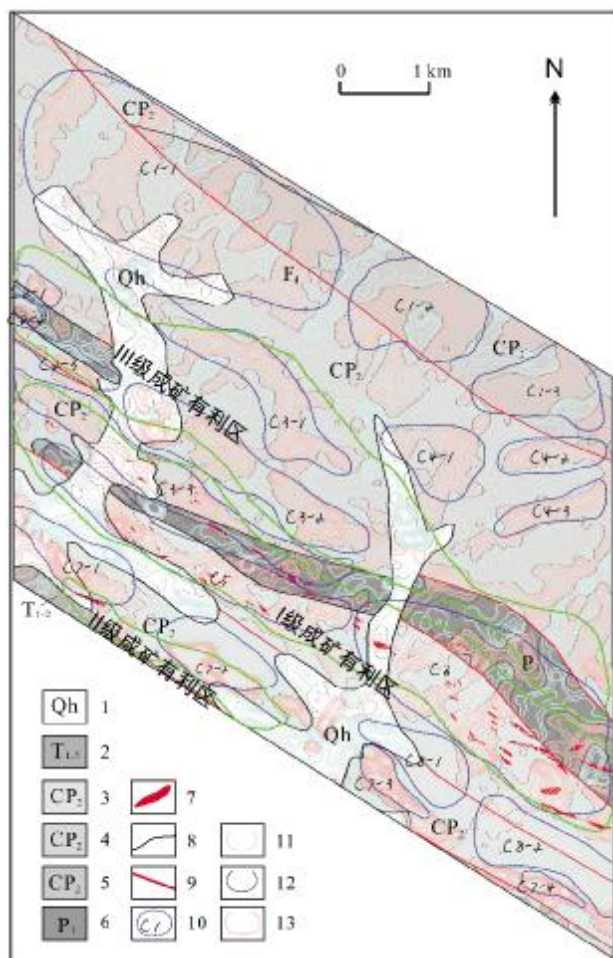


图 6 物探综合解释推断成果图

Fig. 6 Results of integrated geophysical interpretation and inference

1—全新世 (Holocene); 2—隆务河组 (Longwuhe fm.); 3—果可山组 (Guokeshan fm.); 4—土尔根大坂组上段 (upper mem. of Tuergendaban fm.); 5—土尔根大坂组下段 (lower mem. of the Tuergendaban fm.); 6—石英闪长岩 (quartz diorite); 7—花岗伟晶岩脉 (granite pegmatite dike); 8—地质界线 (geological boundary); 9—断层 (fault); 10—磁异常范围及编号 (magnetic anomaly range and number); 11—负磁异常 (negative magnetic anomaly); 12—零值线 (zero line); 13—正磁异常 (positive magnetic anomaly)

4.3 验证

通过磁法和能谱测量工作取得了较好找矿效果, C3-3、C5、C6 (即 u18、u19、u20 及 Th18 等异常点) 异常部位揭露了 9 条含绿柱石、锂辉石伟晶岩脉 (Li_2O 平均

品位在 1.11%~3.13%, BeO 平均品位 0.06%) 和 13 条含绿柱石伟晶岩 (BeO 平均品位 0.044%~0.056%), 显示出巨大的找矿潜力。

5 结语

(1) 研究区划分磁异常分区 4 个, 圈定磁异常 8 处, 推测断裂构造 11 条, 划分了 3 个放射性异常分区, 圈定 3 个混合异常带、22 个铀异常点、20 个钍异常点、18 个钾异常点, 圈定稀有稀土矿找矿有利异常区 3 个, I、II、III 级成矿有利区各 1 个。

(2) 北部铀钍钾偏高背景场主要受原岩为沉积岩的浅变质岩控制, 中、南部异常区内磁异常套合铀钍混合异常点部位两组脉体的节点附近和接触带部位寻找稀有、稀土矿的潜力最大^[22]。

(3) 加强对高精度磁测 C2、C7 等磁异常的查证, 建议对北西向条带状磁异常开展下步工作, 对已发现含稀有、稀土矿的花岗伟晶岩脉开展工程揭露, 建议加强 U3 (TH3、K3)、U1 (Th1、K1) 铀钍异常带的带性分布特征查证, 结合地质情况, 探究其深部存在稀有、稀土矿化的可能性。

参考文献 (References):

- [1] 李善平, 薛万文, 任华, 等. 青海省“三稀”矿产资源现状及成矿规律[J]. 青海科技, 2018, 25(6): 10-15.
Li S P, Xue W W, Ren H, et al. Present situation and metallogenic regularity of RE-REE mineral resources in Qinghai Province [J]. Qinghai Science and Technology, 2018, 25(6): 10-15. (in Chinese)
- [2] 王登红, 王瑞江, 孙艳, 等. 我国三稀 (稀有稀土稀散) 矿产资源调查研究成果综述[J]. 地球学报, 2016, 37(5): 569-580.
Wang D H, Wang R J, Sun Y, et al. A review of achievements in the three-type rare mineral resources (rare resources, rare earth and rarely scattered resources) survey in China [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2016, 37(5): 569-580.
- [3] 韩宝福. 中俄阿尔泰山中生代花岗岩与稀有金属矿床的初步对比分析[J]. 岩石学报, 2008, 24(4): 655-660.
Han B F. A preliminary comparison of Mesozoic granitoids and rare metal deposits in Chinese and Russian Altai Mountains [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(4): 655-660.
- [4] 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]. 大地构造与成矿学, 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 Chakaibeishan area

- in the northeastern margin of the Tibetan Plateau: Implications for Li-Be mineralization[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2020, 44(1): 69-79.
- [5] 陈浩, 陈志文, 田碧, 等. 地面 γ 能谱测量在铌稀土矿勘查中的应用[J]. *资源环境与工程*, 2016, 30(6): 994-998.
- Chen H, Chen Z E, Tian B, et al. The application of ground gamma spectrometry in niobium-rare earth ore prospecting [J]. *Resource Environment & Engineering*, 2016, 30(6): 994-998.
- [6] 熊意林, 钟石玉, 李志刚, 等. 竹山土地岭一带铌钽矿床地质特征及找矿前景分析[J]. *资源环境与工程*, 2018, 32(S1): 1-7, 43.
- Xiong Y L, Zhong S Y, Li Z G, et al. Geological characteristics and prospecting potential of niobium-tantalum deposit in the Tudiling area, Zhushan[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2018, 32(S1): 1-7, 43.
- [7] 杜发, 张秀萍, 毛立全, 等. 航磁在阿尔金东段铌钽稀有金属找矿中的应用[J]. *物探与化探*, 2018, 42(5): 902-908.
- Du F, Zhang X P, Mao L Q, et al. The application of aeromagnetic to the prospecting of Nb-Ta deposits in Eastern Altun[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(5): 902-908.
- [8] 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.
- [9] 杨荣, 范俊波, 黄韬, 等. 磁法测量在甲基卡地区找矿中的应用[J]. *四川地质学报*, 2017, 37(4): 692-695, 699.
- Yang R, Fan J B, Huang T, et al. The application of magnetic survey to the prospecting in the Jiajika region[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2017, 37(4): 692-695, 699.
- [10] 韩志滨, 马宏伟, 杜广仁. 大连市地区地表天然放射性水平调查[J]. *地质与资源*, 2020, 29(5): 483-489.
- Han Z B, Ma H W, Du G R. Investigation on the natural radioactivity level of ground surface in Dalian urban area[J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(5): 483-489.
- [11] 苑永涛, 封建平, 王亚栋, 等. 综合物探在昆仑河黑刺沟金多金属矿 M I 金矿带应用效果研究[J]. *矿产与地质*, 2018, 32(4): 722-728.
- Yuan Y T, Feng J P, Wang Y D, et al. On the application effect of complex geophysical prospecting on M I gold ore belt of Heicigou Au polymetallic deposit in Kunlun River area[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2018, 32(4): 722-728.
- [12] 杨涛涛, 吕福亮, 李林, 等. 西沙海域上新统一全新统高伽马地层的发现及地质分析[J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(6): 2526-2532.
- Yang T T, Lü F L, Li L, et al. Identification and geology analysis of high natural gamma value formation of Pliocene-Holocene in Xishaoffshore[J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(6): 2526-2532.
- [13] 国家国防科技工业局. EJ/T363—2012 地面伽玛能谱测量规范[S]. 2013.
- State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense. EJ/T363—2012 Specifications for ground γ -ray spectrometric survey[S]. 2013.
- [14] 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 deposits in China[J]. *Metal Mine*, 2015, 44(6): 92-97.
- [15] 朱卫平, 刘诗华, 朱宏伟, 等. 常用地球物理方法勘探深度研究[J]. *地球物理学进展*, 2017, 32(6): 2608-2618.
- Zhu W P, Liu S H, Zhu H W, et al. Study on the exploration depth of geophysical methods commonly used[J]. *Progress in Geophysics*, 2017, 32(6): 2608-2618.
- [16] 乔耿彪, 丁建刚, 苏永海, 等. 新疆阿尔泰山别也萨麻斯一带发现新的锂、铍、铌、钽等稀有金属矿点[J]. *中国地质*, 2020, 47(2): 542-543.
- Qiao G B, Ding J G, Su Y H, et al. The discovery of Li, Be, Nb, Ta rare metal ore spots in the Bieyesamas area in Altay, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 2020, 47(2): 542-543.
- [17] 刘强, 金洪涛, 朱巍, 等. 东北地区煤田地质环境放射性综合评价方法研究[J]. *地质与资源*, 2020, 29(4): 388-396.
- Liu Q, Jin H T, Zhu W, et al. Study on the Comprehensive evaluation method of Geoenvironmental radioactivity of coalfields in Northeast China[J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(4): 388-396.
- [18] 刘应冬, 周玉, 郭润平, 等. 四川甲基卡锂辉石矿床西缘地面高精度磁测异常特征及找矿预测[J]. *矿产勘查*, 2018, 9(3): 428-437.
- Liu Y D, Zhou Y, Guo R P, et al. Anomalies characteristics of ground high-precision magnetic survey and the prospecting prediction in Jiajika style spodumene deposits, Sichuan[J]. *Mineral Exploration*, 2018, 9(3): 428-437.
- [19] 叶小拼. 桂西沉积型锂矿资源潜力分析[J]. *地质与资源*, 2020, 29(5): 429-434.
- Ye X P. Resource potential analysis of sedimentary lithium deposits in west Guangxi Region[J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(5): 429-434.
- [20] 付小方, 袁茜平, 王登红, 等. 四川甲基卡矿田新三号稀有金属矿脉的成矿特征与勘查模型[J]. *矿床地质*, 2015, 34(6): 1172-1186.
- Fu X F, Yuan L P, Wang D H, et al. Mineralization characteristics and prospecting model of newly discovered X03 rare metal vein in Jiajika orefield, Sichuan[J]. *Mineral Deposits*, 2015, 34(6): 1172-1186.

- [11] 马瑞申, 刘百顺, 李中明, 等. 河南省新安县郁山铝土矿床地质特征[J]. 地质与勘探, 2012, 48(3): 479-486.
- Ma R S, Liu B S, Li Z M, et al. Geological characteristics of the Yushan bauxite deposit in Xin'an County, Henan Province [J]. Geology and Prospecting, 2012, 48(3): 479-486.
- [12] 席善峰, 欧阳兆灼, 李健全, 等. 河南省三门峡铝土矿地质特征及控矿条件研究[J]. 地质与资源, 2019, 28(4): 339-344.
- Xi S F, Ouyang Z Z, Li J Q, et al. Study on the geology and ore-controlling conditions of the bauxite deposits in Sanmenxia area, Henan Province [J]. Geology and Resources, 2019, 28(4): 339-344.
- [13] 杨振军, 刘国范, 马庚杰, 等. 豫西铝土矿成矿地质条件及找矿前景[J]. 矿产与地质, 2005, 19(3): 280-285.
- Yang Z J, Liu G F, Ma G J, et al. Ore-forming geological conditions and ore prospects of bauxite in western Henan [J]. Mineral Resources and Geology, 2005, 19(3): 280-285.
- [14] 郎岩峰, 殷建锋, 何鹏, 等. 河南铝土矿成矿地质特征及深部勘查方向[J]. 矿产勘查, 2016, 7(5): 767-773.
- Lang Y F, Yin J F, He P, et al. Geological characteristics and prospecting target in the depth of bauxite deposit in Henan [J]. Mineral Exploration, 2016, 7(5): 767-773.
- [15] 陈全树, 何文平, 周迪. 河南省洛阳-三门峡铝土矿地质特征及其勘查开发前景[J]. 地质找矿论丛, 2002, 17(4): 252-256, 270.
- Chen Q S, He W P, Zhou D. Geological characteristics and the exploration and development prospect of Al ore in Luoyang-Sanmenxia area, Henan Province [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2002, 17(4): 252-256, 270.
- [16] 翟东兴, 刘国明, 陈德杰, 等. 河南省陕-新铝土矿带矿床地质特征及其成矿规律[J]. 地质与勘探, 2002, 38(4): 41-44.
- Zhai D X, Liu G M, Chen D J, et al. Deposit geology and metallogenic regulation of Shan-Xin bauxite belt, Henan Province [J]. Geology and Prospecting, 2002, 38(4): 41-44.
- [17] 河南省地质矿产局. 河南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1989.
- Henan Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional geology of Henan Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989. (in Chinese)
- [18] 朱东晖, 李国平, 郭保健, 等. 河南铝土矿[M]. 北京: 地质出版社, 2012: 63-70.
- Zhu D H, Li G P, Guo B J, et al. Bauxite deposits in Henan Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012: 63-70. (in Chinese)
- [19] 陈旺. 豫西石炭纪铝土矿成矿系统[D]. 北京: 中国地质大学, 2009: 35-49.
- Chen W. Carboniferous bauxite ore-forming system, western Henan [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2009: 35-49.
- [20] 罗铭玖, 黎世美, 卢欣祥, 等. 河南省主要矿产的成矿作用及矿床成矿系列[M]. 北京: 地质出版社, 2000.
- Luo M J, Li S M, Lu X X, et al. The mineralization and metallogenic series of major minerals in Henan Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000. (in Chinese)
- [21] 胡安国, 张天乐, 蒋伯昌, 等. 中国河南粘土-铝土矿床和江西高岭土-瓷石矿床及应用研究[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- Hu A G, Zhang T L, Jiang B C, et al. Clay-bauxite deposits in Henan Province and kaolin and pottery stone deposits in Jiangxi Province, China and their application research [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.
- [22] 陈丽娟, 张建东. 豫西偃师南部铝土矿地质特征及控矿地质条件[J]. 地质找矿论丛, 2008, 23(2): 144-148.
- Chen L J, Zhang J D. The geological characteristics and ore controlling geological conditions of bauxite deposits in southern Yanshi, western Henan [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2008, 23(2): 144-148.

(上接第 67 页/Continued from Page 67)

- [21] 李必红, 程纪星, 杨龙泉, 等. 放射性物探在相山盆地深部火成岩型铀矿勘查中的应用[J]. 世界核地质科学, 2017, 34(3): 161-166, 179.
- Li B H, Cheng J X, Yang L Q, et al. Application of radioactive geophysical exploration for the deep volcanic rock type uranium deposit exploration in Xiangshan basin [J]. World Nuclear Geoscience, 2017, 34(3): 161-166, 179.
- [22] 李贤芳, 张玉洁, 田世洪. 锂同位素在伟晶岩矿床成因研究中的应用[J]. 中国地质, 2019, 46(2): 419-429.
- Li X F, Zhang Y J, Tian S H. Application of lithium isotopes in genetic study of pegmatite deposits [J]. Geology in China, 2019, 46(2): 419-429.