

doi: 10.11720/wtyht.2023.0295

刘晓辉,周四春,王亚栋,等. 地气测量在茶卡北山锂铍矿勘查区深部含矿性预测中的应用[J]. 物探与化探, 2023, 47(6): 1643-1648. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.0295>

doi: 10.11720/wtyht.2023.0295

Liu X H, Zhou S C, Wang Y D, et al. Application of geogas prospecting in the prediction of deep ore-bearing properties in the Chakabeishan exploration area for lithium-beryllium deposits[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(6): 1643-1648. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.0295>

地气测量在茶卡北山锂铍矿勘查区 深部含矿性预测中的应用

刘晓辉¹, 周四春¹, 王亚栋², 韩若浦¹, 樊新胜¹

(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. 青海省地质调查院, 青海 西宁 810012)

摘要: 为了给茶卡北山锂铍矿勘查提供深部找矿支持, 在勘查区内布设了两条长 800 m 的地气测量剖面, 得到了 162 个测点的地气样品中 Li、Be、Cs、Nb、Rb、Ti、稀土等 30 多种元素的含量信息。结合现有的勘探成果, 研究了当地的地气异常特征。结果表明: 在伟晶岩脉和铍矿(化)体的隐伏段上方, 均能探测到多种元素的显著地气异常; 地气中 Li、Rb、Th、Cs、Pb、Nb、Ti、La、Ce 组合异常可以指示伟晶岩脉, 而 Be、Rb、Nb、Cs、Pb、Ti、Cu 组合异常可用于直接指示隐伏铍矿(化)体; Be 异常可以指示埋深 480 m 以内的铍矿(化)体。本研究证明, 在第四系覆盖区, 地气测量可以用于预测隐伏伟晶岩脉的含矿性。

关键词: 地气测量; 伟晶岩型锂铍矿; 隐伏矿; 茶卡北山

中图分类号: P618.72; P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2023)06-1643-06

0 引言

稀有金属是战略性新兴产业的关键性矿产资源, 在高端装备制造业和新能源汽车领域均发挥着不可替代的作用, 锂、铍、钽是当前稀有金属中关注度最高的 3 个矿种^[1]。综合考虑锂、铍的储量及勘查开发状况、技术研发进展、工业需求动向等因素, 日本将其看作优先考虑的“战略矿产”, 英国将其作为“风险清单矿产”, 美国将其纳入“危机矿产清单”, 我国不少学者也建议将其列入“关键矿产”或“战略性关键矿产”^[2-4]。青海省的关键矿产种类丰富, 近年在茶卡北山地区伟晶岩型锂铍矿找矿取得重大突破, 新发现一定规模的含矿伟晶岩脉密集带, 圈定矿化体 130 余条, 初步估算锂矿资源量 1.42 万 t, 铍矿资源量 7 500 t, 达中型规模^[5]。近年来, 茶卡北山矿区内陆续开展了高精度磁法测量、伽马能谱测量等物探方法和常规地球化学测量。1:2.5 万化

探可快速圈定异常, 浓缩找矿有利地段, 但无法指示深部矿体。由于矿体与围岩物性差异不明显, 1:1 万磁法测量圈定的弱正磁异常的梯度带和转折部位与地表发现的伟晶岩虽具有一定对应性, 但无明显规律, 无法有效提取找矿要素; 1:1 万伽马能谱测量和 1:1 万放射性异常中的 K 高值段与伟晶岩也有一定的对应性, 但该方法受第四系覆盖区影响, 测量效果不佳, 无法有效圈定异常。该地区锂铍矿找矿工作目前依然停留在地表找矿的阶段, 需要可获取深部找矿信息的手段。

近年来, 地气测量技术先后被应用于金矿、铀矿、铅锌矿等矿产资源勘查, 在寻找隐伏矿方面取得了一定的成果^[6-10]。本课题组通过在新疆卡鲁安伟晶岩型锂铍矿勘查区开展地气测量应用研究, 发现地气中 Li、Be 等 6 种元素的含量异常与隐伏锂铍矿之间有很好的空间关联, 可作为指矿元素, 并据此推测了一处找矿前景区^[11]。茶卡北山地区伟晶岩型锂铍矿的成矿条件与卡鲁安相近, 本课题组在茶卡北

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(2017YEC0602701)

第一作者: 刘晓辉(1978-), 男, 博士, 讲师, 主要从事核技术在地学中的应用研究工作。Email: liuxiaohui@cdut.edu.cn

山已探明的含矿伟晶岩脉上,开展了多剖面地气测量实验,研究指矿元素组合及其异常与隐伏矿体的联系,以期为当地深部含矿性预测提供参考。

1 工作区地质概况

茶卡北山锂铍矿勘查区位于青海省海西内蒙古族藏族自治州乌兰县境内,坐落于青海南山的西端,区域构造上处于南祁连地块与全吉地块(又称欧龙布鲁克地块接合部)的宗务隆山构造带东段,秦—祁—昆结合部的北端。

勘查区内最主要、分布最广泛的岩脉为花岗伟晶岩脉,也是主要的含矿地质体。按照其空间分布特征,自北向南划分出 3 条伟晶岩矿脉带(依次编号 I、II、III)。其中 II 号伟晶岩带规模最大,NW-SE 向延伸约 7 km,宽度 200~700 m。目前该带圈定伟晶岩脉 144 条,其中有 60 条含矿,矿化类型以铍为主。伟晶岩脉主要向 NE 倾,地表延伸 10~200 m,宽 0.2~20 m。经钻探工程验证,伟晶岩脉深部最厚可达 37.29 m,但从整体验证情况来看,多数脉体在斜深 150 m 以内迅速变薄,个别脉体在变薄之后在斜深 300 m 左右又出现膨大趋势。本次地气测量实验主要以 II 号伟晶岩矿脉带为目标。

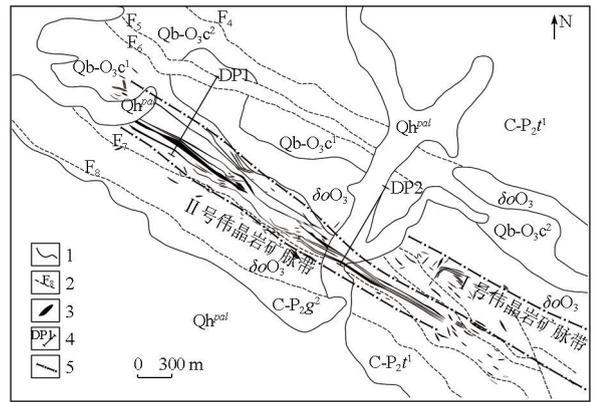
2 地气测量方法

2.1 测线布置

横跨 II 号伟晶岩矿脉带布置了两条平行地气测量剖面(分别编号为 DP1 和 DP2),方向 NE30°,线长 800 m,线距 650 m,如图 1 所示。每条剖面上布置 81 个测点,点距 10 m。DP1 测线西南段有明显伟晶岩脉出露,最大宽度约 40 m;该测线钻探成果充分,已探明多条含有铍矿体或铍矿化体的隐伏伟晶岩脉。DP2 测线岩脉出露不明显,第四系覆盖物较厚,钻探成果有限,已探明有埋深度近 500 m 的隐伏铍矿体。

2.2 地气测量工作方法

鉴于 II 号伟晶岩带主要矿体的 BeO 品位并不高(0.04%~0.07%)且锂矿化很少,本次实验采用了提高探测灵敏度的动态地气测量方法^[12]。快速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,使游离于覆盖层空隙内的地气物质经采样器进入捕集器,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



1—实测地质界线;2—实测断层;3—伟晶岩脉;4—地气测线及编号;5—伟晶岩矿脉带;Qb-O₃c—茶卡北山片岩组;C-P₂g—石炭—二叠系果可山组;δO₃—奥陶系石英闪长岩;C-P₂t—石炭—二叠系土尔根大坂组;Qh^{pal}—全新统冲积物

1—measured geological boundaries; 2—measured faults; 3—pegmatite vein; 4—geogas line and number; 5—pegmatite vein belt; Qb-O₃c—Chakabeishan schist formation; C-P₂g—Permo-Carboniferous Guokeshan formation; δO₃—Ordovician quartz diorite; C-P₂t—Permo-Carboniferous Tu'ergendaban formation; Qh^{pal}—Holocene alluvial deposits

图 1 茶卡北山锂铍矿勘查区地气测量剖面布置
Fig. 1 Schematic diagram of geogas survey profile layout in Chakabeishan lithium beryllium deposit exploration area

集剂串联以增加采样量,抽气速度为 2 L/min,每个测点采样时间 30 min。

地气样品经浓缩和定容后,送至核工业北京地质研究院分析中心作电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)分析,得到 Li、Be、Nb、Ta、Rb、稀土等 40 余种元素的含量信息。分析方法依据《水质 65 种元素的测定 电感耦合等离子体质谱法》(HJ 700—2014)标准。

3 地气异常分析

地气测量数据中,Ta、Au、Tl、Ho 等元素多个测点(超过测点总数 20%)的含量小于检出限,其余 30 余种元素的测量结果有效。选择其中 12 种典型元素(包括成矿元素、稀有元素、有色金属元素和稀土元素),统计其背景区平均值和标准差,以平均值加 2 倍标准差作为异常下限,可确定地气异常点位,具体见表 1。这些元素的分析方法检出限和其在空白中的含量也列入表 1。依据地气测量结果和现有的勘查成果,绘制两条测线的综合剖面,如图 2、图 3 所示。

3.1 地气异常特征

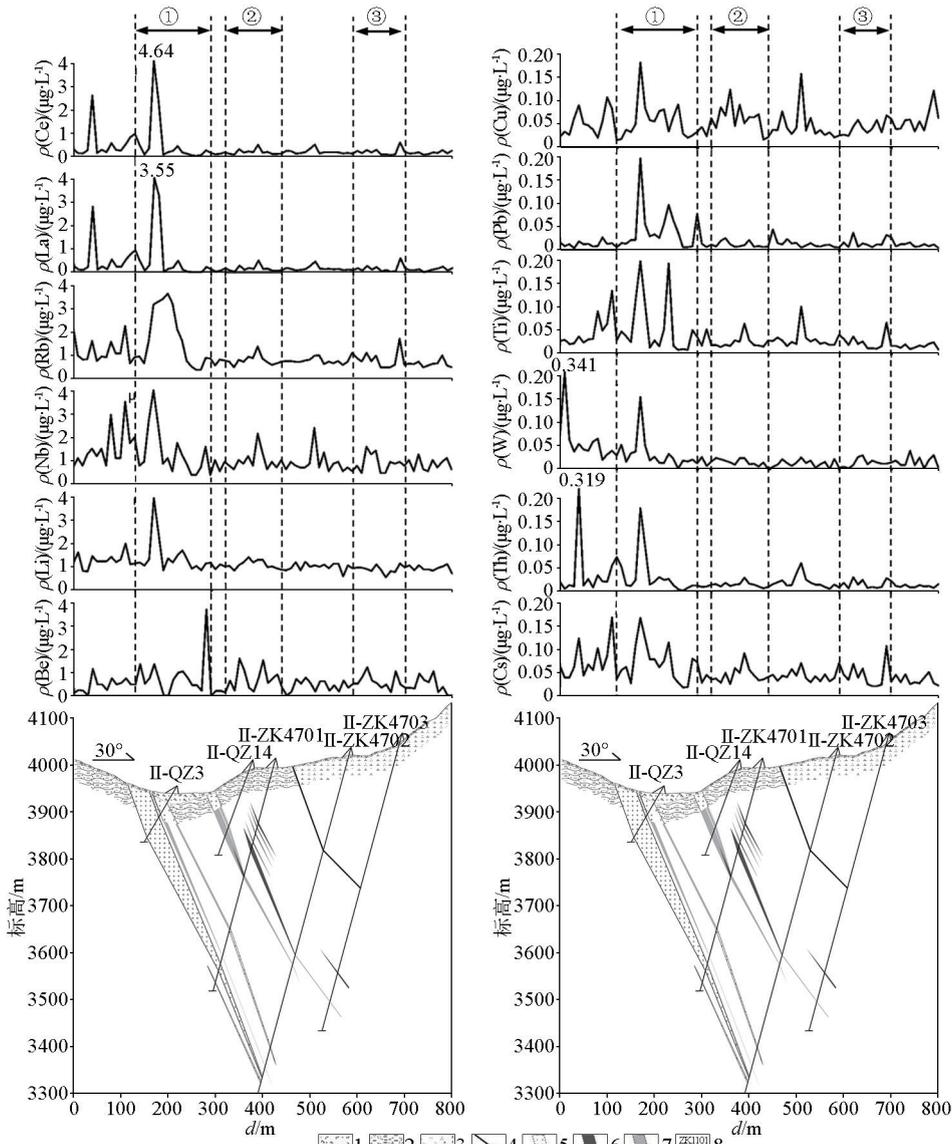
与本课题组在新疆卡鲁安伟晶岩型锂矿勘查区得到的地气测量结果相比^[11],Li、Be、Cs、Nb、Rb 的测量值范围均在同一量级,只是茶卡北山勘查区的 Be 异常值更高,而 Li 的异常值较低。这与本勘查区以铍矿化为主的情况相对应。

表 1 地气测量结果(部分元素)统计

Table 1 Geogas survey results (some elements) statistics

元素	含量范围/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	平均值/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	空白/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	标准差/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	异常下限/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	DP1 测线 异常点数量	DP2 测线 异常点数量	分析方法检 出限/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)
Be	0.001~0.111	0.013	<0.002	0.009	0.031	11	8	0.002
Li	1.27~3.96	1.65	0.17	0.18	2.01	5	2	0.1
Nb	0.001~0.050	0.011	<0.002	0.005	0.021	10	8	0.002
Rb	0.220~2.670	0.522	0.036	0.257	1.040	13	3	0.01
Cs	0.010~0.197	0.036	0.002	0.019	0.074	13	3	0.002
Th	0~0.319	0.008	0.014	0.014	0.036	7	6	0.002
La	0.020~3.550	0.110	0.003	0.080	0.270	11	4	0.002
Ce	0.030~4.630	0.220	0.007	0.160	0.540	7	5	0.002
W	0~0.329	0.020	0.012	0.022	0.064	8	9	0.010
Ti	1.46~39.40	4.58	0.13	2.56	9.70	14	5	0.10
Pb	0.56~29.70	2.65	0.10	1.91	6.47	7	7	0.01
Cu	3.12~397.00	11.5	0.16	6.02	23.50	4	11	0.02

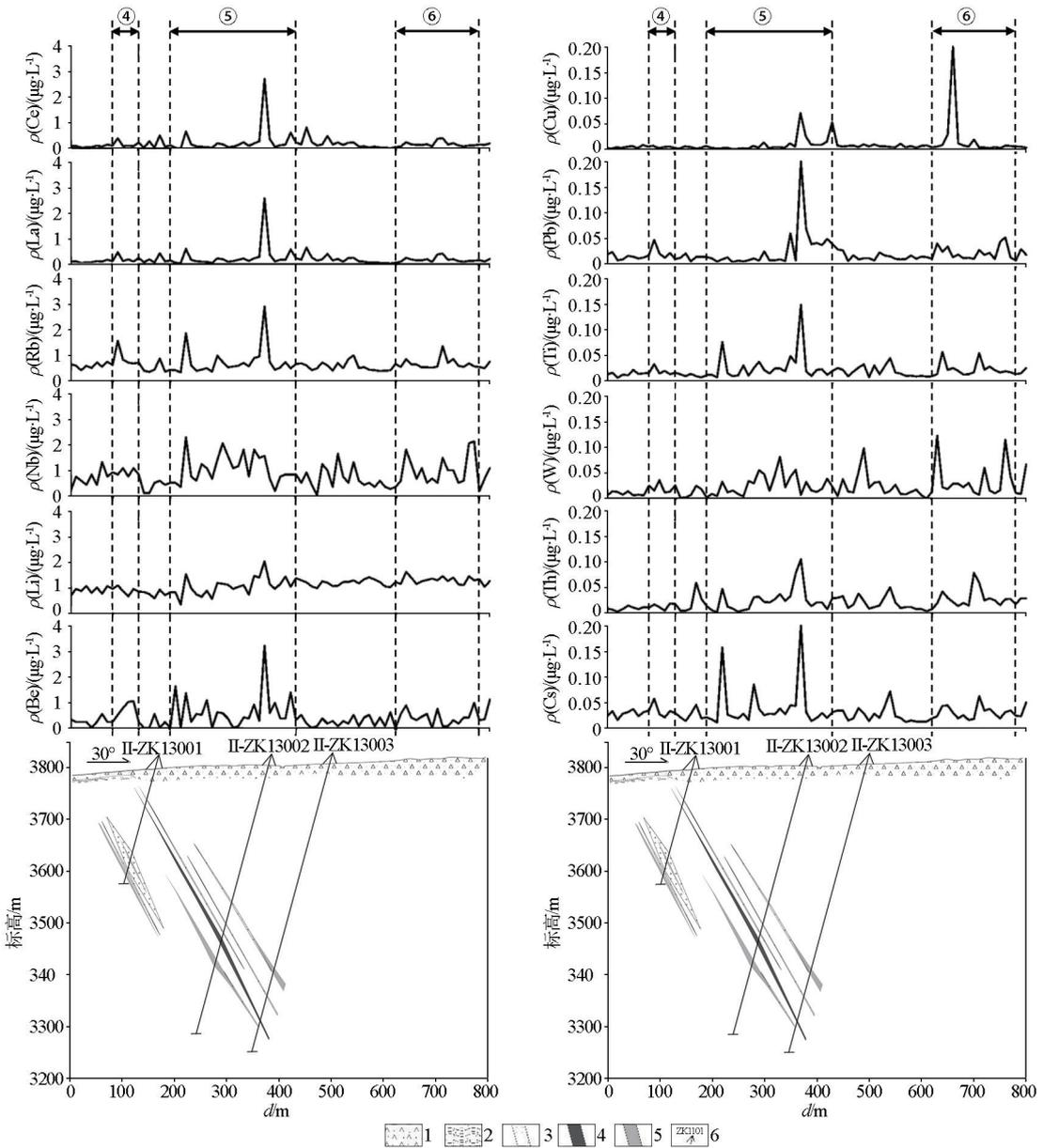
注:当某测点某元素的测量值小于检出限时,取检出限的一半作为测量结果;含量数据是测量值扣除空白后的值;当空白含量小于检出限时,视为 0。



1—第四系残坡积物; 2—石英闪长岩; 3—二云母石英片岩; 4—断层; 5—伟晶岩脉; 6—铍矿体; 7—铍矿化体; 8—钻孔及其编号
1—Quaternary residual-slope sediment; 2—quartzdiorite; 3—two-mica quartz schist; 4—fault; 5—pegmatite vein; 6—beryllium ore body; 7—beryllium mineralized body; 8—drilling and its number

图 2 DP1 测线地气测量综合剖面

Fig. 2 DP1 line geogas survey comprehensive profile



1—第四系残坡积物；2—二云母石英片岩；3—伟晶岩脉；4—铍矿体；5—铍矿化体；6—钻孔及其编号

1—Quaternary residual-slope sediment；2—two-mica quartz schist；3—pegmatite vein；4—beryllium ore body；5—beryllium mineralized body；6—drilling and its number

图3 DP2 测线地气测量综合剖面

Fig. 3 DP2 line geogas survey comprehensive profile

每条测线上分布有多个元素异常点,以 Be 异常分布特点为主,结合其余大部分元素的异常分布共性,将连续或集中出现的多点异常划分为异常区。如图 2 所示,在 DP1 测线上划分出 3 个异常区,依次编号为①(据测线起点距离 130~300 m)、②(330~450 m)、③(600~710 m)。对比地质剖面,①号异常区位于大型伟晶岩脉及其倾向上方,该伟晶岩脉最大厚度约 40 m,在其埋深约 100 m 的隐伏段上方出现了 Be 弱异常和其他所有元素的强异常。①号异常区内,该伟晶岩脉北东测有多条隐伏铍矿化体,

在其埋深 150~200 m 的上方出现了 Be、Ti 强异常, Cs、Pb 中等异常和 Nb、Rb、Cu 弱异常。②号异常区位于多条有一定规模的隐伏铍矿体和矿化体上方,出现有 Be、Nb、Cu 中等异常和 Rb、Cs、Ti 弱异常,其他元素无明显异常。Be 异常对应的最大铍矿体埋深近 300 m。③号异常区位于多条小规模隐伏铍矿化体上方,出现有 Be、Nb、Rb、Cs、Ti 弱异常,其他元素无明显异常。Be 异常对应的最大铍矿化体埋深约 150 m。

如图 3 所示,在 DP2 测线上也可划分出 3 个异

常区,依次编号为④(据测线起点距离 80~130 m)、⑤(190~430 m)、⑥(620~780 m)。对比地质剖面图,④号异常区位于含铍矿化的中型伟晶岩脉上方,出现了 Be、Rb、Cs、Ti、Pb 弱异常,Be 异常对应的最大铍矿化体埋深约 180 m。⑤号异常区内有多条小型伟晶岩脉和一定规模的隐伏铍矿体(矿化体),出现有 Li 弱异常以及 Be 和其他所有元素的中等和强异常。Be 异常对应的最大铍矿体埋深近 480 m。⑥号异常区出现有 Be、Rb、Cs、Ti、Pb 弱异常和 Nb、W、Th、Cu 强异常,由于未开展钻探工程,异常原因不明,可能反映下方有未探明的铍矿(化)体,但规模应该不大。

3.2 指示元素组合

综合对比两条测线上各元素异常点的分布特征,Li 和 Be 有明显区别。Li 异常集中出现在伟晶岩脉(不一定含矿)上方,其强异常与铍矿体关系不大;而 Be 异常主要出现在铍矿体、铍矿化体或含有铍矿化的伟晶岩脉上方,其强异常与铍矿体有明确的对应关系。该现象与茶卡北山的成矿模式和控矿因素相吻合,即伟晶岩形成过程中,Li、Be 与 Rb、Nb、Ta 共生,但由于 Li 是最活跃的元素,其在聚集成矿后,如果受到强大的外界压力会很容易向围岩中逸散,导致 Be 与其他共生元素相对富集。

从地气测量结果来看,La、Ce 的异常分布与 Li 相近,也可以指示伟晶岩脉位置,这可能是因为当地伟晶岩类具有轻稀土相对重稀土富集的特征^[13]。王建国等^[14]对茶卡北山伟晶岩的地球化学特征研究表明:研究区采集的所有样品 Rb、Th、Cs、Ce 和 Pb 元素富集,Ba、Zr、Hf、Nb、Ta 和 Li 元素中等富集,部分样品 TiO₂ 含量大于 0.5%。与之对应,地气测量结果显示,Rb、Th、Cs、Pb、Nb、Ti 都能指示隐伏伟晶岩脉,其中 Rb、Nb、Cs、Pb、Ti 与 Be 相似,还能较好地指示铍矿(化)体。此外 Cu 异常对铍矿(化)体也有一定反映。

4 结论

通过在茶卡北山锂铍矿勘查区开展地气测量实验,得出以下几点结论:

1) 多元素地气异常可以有效指示隐伏伟晶岩脉和铍矿(化)体,地气异常点会连续或集中出现在目标地质体及其倾向上方。

2) 指示伟晶岩脉的地气元素组合包括 Li、Rb、Th、Cs、Pb、Nb、Ti、La、Ce,而 Be、Rb、Nb、Cs、Pb、Ti、Cu 组合可用于直接指示隐伏铍矿(化)体。

3) 矿体指示元素异常幅度与隐伏铍矿(化)体的埋深和规模有一定联系,规模越大,异常幅度越大,地气中的 Be 异常可以指示埋深 480 m 以内的铍矿(化)体。

4) 深部伟晶岩脉的含矿性可以通过是否出现成矿元素地气异常来判断。

综上所述,地气异常信息直接来源于深部地质体,地气异常位置与隐伏目标地质体有较精准的空间对应关系,地气异常成分与目标地质体含矿性有联系,地气测量技术可以为茶卡北山地区深部含矿性预测提供重要支持。

参考文献 (References):

- 王登红,王成辉,孙艳,等.我国锂铍钽矿床调查研究进展及相关问题简述[J].中国地质调查,2017,4(5):1-8.
Wang D H, Wang C H, Sun Y, et al. New progresses and discussion on the survey and research of Li, Be, Ta ore deposits in China[J]. Geological Survey of China, 2017, 4(5): 1-8.
- 王登红.关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向[J].地质学报,2019,93(6):1189-1209.
Wang D H. Study on critical mineral resources: Significance of research, determination of types, attributes of resources, progress of prospecting, problems of utilization, and direction of exploitation [J]. Acta Geological Sinica, 2019, 93(6): 1189-1209.
- 毛景文,袁顺达,谢桂青,等.21世纪以来中国关键金属矿产找矿勘查与研究新进展[J].矿床地质,2019,38(5):935-969.
Mao J W, Yuan S D, Xie G Q, et al. New advances on metallogenic studies and exploration on critical minerals of China in 21st century [J]. Mineral Deposits, 2019, 38(5): 935-969.
- 李建武,李天骄,贾宏翔,等.中国战略性关键矿产目录厘定[J].地球学报,2023,44(2):261-270.
Li J W, Li T J, Jia H X, et al. Determination of China's strategic and critical minerals list [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2023, 44(2): 261-270.
- 苏慧敏,车玉滢,尹燕梁,等.战略性关键矿产勘查现状与对策:以青海省为例[J].地球科学,2023,48(4):1543-1550.
Su H M, Che Y Y, Yin Y L, et al. Present situation and research direction of strategic critical mineral exploration: Taking Qinghai province as an example [J]. Earth Science, 2023, 48(4): 1543-1550.
- 周四春,刘晓辉,胡波.地气场信息的地质学意义[J].物探与化探,2012,36(6):1044-1049.
Zhou S C, Liu X H, Hu B. Geological significance of geogas field information [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(6): 1044-1049.
- 周四春,刘晓辉,胡波,等.滇西某铅锌矿整装勘查区地气、X荧光测量找矿应用[J].物探与化探,2012,36(6):1040-1043.
Zhou S C, Liu X H, Hu B, et al. The application of geogas and X-ray fluorescence survey to ore prospecting in an integrated exploration area of a certain lead-zinc deposit in western Yunnan province

[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2012, 36 (6) : 1040-1043.

[8] 周四春, 刘晓辉, 童纯菡, 等. 地气测量技术及在隐伏矿找矿中的应用研究[J]. *地质学报*, 2014, 88(4) : 736-754.
Zhou S C, Liu X H, Tong C H, et al. Application research of geogas survey in prospecting concealed ore [J]. *Acta Geological Sinica*, 2014, 88(4) : 736-754.

[9] 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 radioactive detection technology and experiment of deep mineralization information in Nanling key ore concentration area [M]. Beijing: China Atomic Energy Press, 2018.

[10] 王勇, 王东升, 吴国东, 等. 地气测量方法在粤北长排花岗岩型铀矿勘查中的应用[J]. *铀矿地质*, 2020, 36(4) : 302-310.
Wang Y, Wang D S, Wu G D, et al. Application of geogas method in the exploration of granite-type uranium deposit in Changpai area of northern Guangdong [J]. *Uranium Geology*, 2020, 36(4) : 302-310.

[11] 杨吉成, 周四春, 刘晓辉, 等. 卡鲁安伟晶岩锂矿的地气场特征及找矿意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2019, 38(4) : 570-578.
Yang J C, Zhou S C, Liu X H, et al. Geogas field characteristics of the Kalu'an pegmatite lithium deposit and its prospecting significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2019, 38 (4) : 570-578.

[12] 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.

[13] 李善平, 潘彤, 严兴鹏, 等. 柴北缘东段茶卡北山伟晶岩稀土元素地球化学特征及物源分析[J]. *稀土*, 2022, 43(4) : 88-99.
Li S P, Pan T, Yan X P, et al. REE geochemical characteristics and provenance analysis of Chaka north mountain pegmatite in the eastern part of the northern margin of Qaidam basin, Qinghai province [J]. *Chinese Rare Earths*, 2022, 43(4) : 88-99.

[14] 王建国, 张世珍, 邢佳, 等. 乌兰茶卡北山含矿伟晶岩地球化学特征及地质意义[J]. *黄金科学技术*, 2022, 30(6) : 809-821.
Wang J G, Zhang S Z, Xing J, et al. Geochemical characteristics and geological significance of ore-bearing pegmatites in the Wulan Chakabeishan area [J]. *Gold Science and Technology*, 2022, 30 (6) : 809-821.

Application of geogas prospecting in the prediction of deep ore-bearing properties in the Chakabeishan exploration area for lithium-beryllium deposits

Liu Xiao-Hui¹, Zhou Si-Chun¹, Wang Ya-Dong², Han Ruo-Pu¹, Fan Xin-Sheng¹

(1. *Applied Nuclear Technology in Geosciences Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China*; 2. *Qinghai Geological Survey Institute, Xining 810012, China*)

Abstract: To provide deep prospecting support for the exploration of lithium-beryllium deposits in the Chakabeishan area, two geogas prospecting profiles each with a length of 800 m were laid out in the exploration area, obtaining the content information of over 30 elements such as Li, Be, Cs, Nb, Rb, Ti, and rare earth elements in the geogas samples from 162 measuring points. Combined with the existing exploration results, the characteristics of local geogas anomalies were investigated in this study. The results are as follows: (1) Significant geogas anomalies of various elements can be detected above the concealed sections of pegmatite veins and beryllium ore bodies; (2) The combined anomalies of elements Li, Rb, Th, Cs, Pb, Nb, Ti, La, and Ce in geogas can indicate pegmatite veins, while the combined anomalies of elements Be, Rb, Nb, Cs, Pb, Ti, and Cu can directly indicate concealed beryllium ore bodies; (3) Be anomalies can indicate beryllium ore bodies within a burial depth of 480 m. This study demonstrates that geogas prospecting can be used to predict the ore-bearing properties of concealed pegmatite veins in the Quaternary coverage area.

Key words: geogas prospecting; pegmatite-type lithium-beryllium deposit; concealed deposit; Chakabeishan

(本文编辑: 蒋实)