

doi:10.19509/j.cnki.dzkq.2020.0209

王秋波,梁斌,刘婷,等.应用地气测量技术探测甲基卡稀有金属矿区中的隐伏矿体[J].地质科技通报,2020,39(2):85-93.

Wang Qiubo, Liang Bin, Liu Ting, et al. Detection of concealed ore bodies in Jiajika rare metal orefield using geogas prospecting technology[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(2): 85-93.

应用地气测量技术探测甲基卡稀有金属 矿区中的隐伏矿体

王秋波, 梁斌, 刘婷, 徐志强, 耿艳

(西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621000)

摘要:以甲基卡稀有金属矿区X03号矿体和烧炭沟矿体2个隐伏矿体作为研究对象,采用主动吸气法,以5%稀硝酸溶液作为捕集剂进行地气测量试验研究。结果表明,地气捕集液中Li、Be、Rb、Cs、Na、B等元素在矿体上方出现多点连续的组合异常,可以指示地表以下30~100 m的隐伏矿体。X03号矿体35号勘探线上,地气中成矿元素异常与土壤中元素含量之间没有相关性,表明地气异常并不是土壤元素含量所形成的,而是来源于隐伏矿体,是隐伏矿体的直接信息反映。地气异常表现为顶部异常特征,隐伏矿体位于异常的下部。甲基卡稀有金属矿区采用地气测量技术寻找隐伏矿体时,在成矿地质条件研究的基础上,结合电法等地球物理资料,可在地气异常的上方布置钻探工程进行钻探验证。

关键词:地气测量;稀有金属矿;隐伏矿;甲基卡

中图分类号:P618.6

文章编号:1000-7849(2020)02-0085-09

收稿日期:2019-01-13

Detection of concealed ore bodies in Jiajika rare metal orefield using geogas prospecting technology

Wang Qiubo, Liang Bin, Liu Ting, Xu Zhiqiang, Geng Yan

(School of Environment and Resource, Southwest University of Science and
Technology, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: An experimental research was conducted on two concealed deposits, X03 and Shaotangou, in Jiajika rare metal orefield. The geogas was collected by an air sampler, and the particles in the gas were captured by 5% dilute nitric acid solution. The results show that continuous anomalies of Li, Be, Rb, Cs, Na and B are observed from the two deposits, and can be used to explore the ore bodies 30—100 m below the earth surface. On Line 35 of X03 ore body, there is no correlation between the content of the mineral elements in the geogas and its total content in the soil. This indicates that the anomalies are formed by the elements in the geogas, not in the soil. Hence, the mineralization information is included in the geogas. The anomalies of the elements in the geogas show in top halos, located over the concealed deposits. Based on the study of metallogenic geological conditions and geophysical data, such as electrical method, drilling engineering can be arranged above the anomalies of elements in geogas for drilling verification.

Key words: geogas prospecting; rare metal mineral; concealed deposit; Jiajika

基金项目:国家重点研发计划“锂能源金属矿产基地深部探测技术示范”项目“甲基卡及外围锂能源金属矿产基地深部探测技术示范”课题(2017YFC0602702);四川省科技厅重点研发项目“川西锂矿大型能源资源基地成矿关键技术研究”与示范”(2018SZ0276)

作者简介:王秋波(1995—),男,现正攻读地质工程专业硕士学位,主要从事勘探地球化学方面的研究工作。E-mail:1003776189@qq.com

通信作者:梁斌(1967—),男,教授,主要从事矿产普查与勘探方面的教学与科研工作。E-mail:earlluh@163.com

位于青藏高原东缘松潘—甘孜造山带的甲基卡是世界著名的花岗伟晶岩型稀有金属富集区,以其独特的成矿地质作用、巨大的资源储量以及丰富的伴生资源、易于开采利用等特点而受到广泛的关注^[1-4]。甲基卡稀有金属矿区的地质勘查工作始于20世纪60年代,已发现了不同规模的伟晶岩脉500余条,并对一些规模较大的矿化伟晶岩脉进行了勘查,发现了包括134号脉在内的多个大、中型稀有金属矿床^[5]。对其成矿条件、控矿因素的分析表明,甲基卡稀有金属矿区成矿地质条件好,具有极大的找矿潜力,新近在甲基卡矿区外围发现的以锂为主的X03号超大型稀有金属矿体就是很好的例证^[2-4]。甲基卡矿区不同成因的第四系覆盖严重(70%以上),以往的地质找矿工作主要集中在基岩区,对地表出露的伟晶岩脉已进行了详细的调查。因此,要想在甲基卡矿区寻找被第四系覆盖以及地下一定深度的隐伏矿体,以进一步扩大其资源储量,就必须引入新的技术手段。近年来,国内外地质、地球化学家经过探索,提出了一系列包括深穿透地球化学方法在内的用于寻找深部隐伏矿的技术方法^[6-13],其中地气测量技术因其探测深度较大、能直接反映深部矿床信息等特点而引起广泛关注^[14-17]。

地气测量技术由瑞典科学家 Kristiansson 等^[18]于20世纪80年代提出,主要用于寻找深部隐伏矿。近年来,我国科学家对地气测量的方法与机理做了众多研究^[19-26],已证实地气测量可有效探测埋深超过800 m的隐伏矿体^[17]。目前,地气测量主要针对金矿、锌矿、铀矿、铅矿、铜镍矿、锌铜矿等矿种^[25-30],对于稀有金属隐伏矿床,该方法尚未进行相关研究。

笔者在甲基卡稀有金属矿区中的X03号矿体35号勘探线、烧炭沟矿体131号勘探线上进行了地气测量,这2条勘探线上锂矿体均位于地表30~100 m以下,通过对隐伏锂矿开展地气测量技术研究,探讨地气异常与隐伏矿体的对应关系,为在该地区寻找深部隐伏稀有金属矿体提供新的技术方法。

1 矿区及矿体的地质特征

甲基卡稀有金属矿区位于四川省西部康定、雅江、道孚三县(市)交界处,海拔4 300~4 700 m。矿区主要的控矿构造是以二云母花岗岩为中心的甲基卡岩浆穹窿,侵入体周围为上三叠统西康群砂板岩经动力热变质形成的云母片岩,自中心向外依次形成十字石带、红柱石十字石带、红柱石带、黑云母带等。围绕花岗岩侵入体分布有千余条花岗伟晶岩脉,规模较大的伟晶岩脉509条,其中工业矿体和矿

化伟晶岩脉114条^[31]。以花岗岩侵入体为中心,微斜长石型、微斜长石—钠长石型、钠长石型、钠长石—锂辉石型和钠长石—锂(白)云母型伟晶岩脉呈环带分布,形成了完整的Li-Be-Nb-Ta成矿系列(图1)。矿区内地表被不同成因的第四系广泛覆盖,主要是残坡积物和沼泽堆积物,覆盖面积达70%以上,最厚可达20 m。

本次研究选取X03号矿体和烧炭沟矿体作为研究对象,在X03号矿体的35号勘探线上、烧炭沟矿体的131号勘探线上进行了地气的测量。

X03号矿体是近年来新发现的以锂为主的超大型矿体,矿体除在北部有少量出露外,其余大部分被第四系所覆盖,第四系厚度一般为5~10 m。矿体西倾,延伸可达300 m,产状较缓,南北长约2 200 m,平均厚度约66 m,呈分支复合状分布,Li₂O资源量88.558万t, Li₂O平均品位1.46%,并且所伴生的稀有元素Be、Nb、Ta、Rb、Cs均可综合利用。35号勘探线上的锂矿体,平均厚度约为10 m,埋深约为100 m,倾角15°左右, Li₂O平均品位1.46%^[31]。

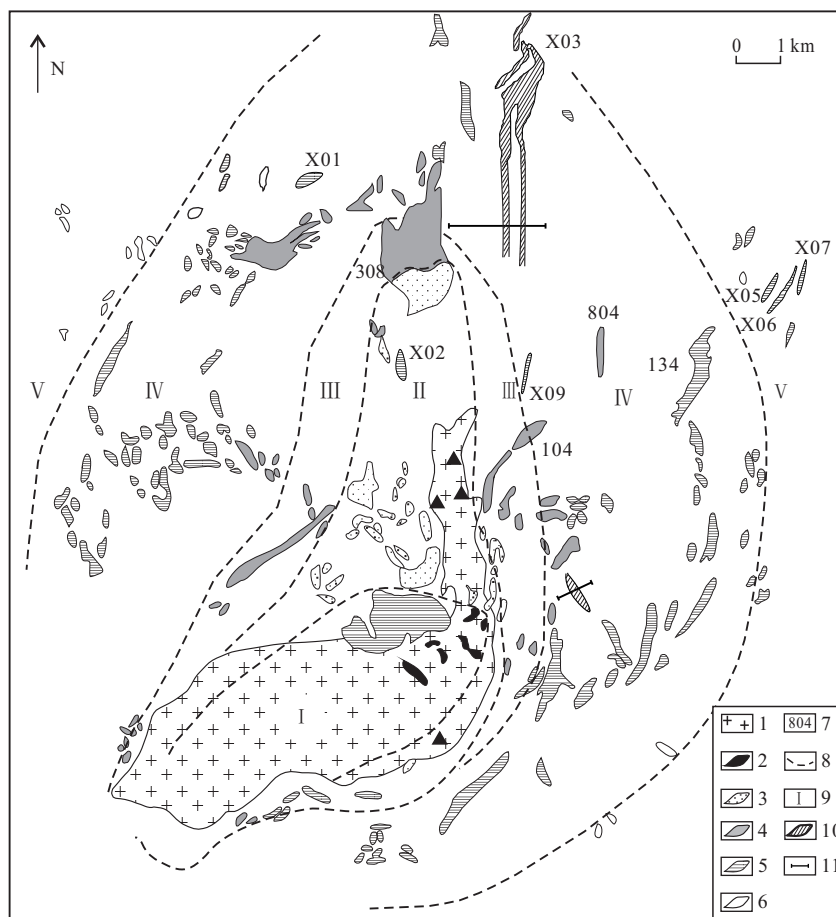
烧炭沟矿体经初步勘查,矿体隐伏于地表30~80 m以下,大致呈南北走向,控制长度约300 m,平均厚度约5 m,矿体西倾,倾角20°~30°, Li₂O平均品位1.15%。

2 样品的采集及测试

X03号矿体地气测线布置于35号勘探线上,总长682 m,采取地气样品16件;烧炭沟矿体地气测线沿中部131号勘探线布置,总长340 m,采集地气样品15件(图1)。矿体上方采样间距为10~30 m,矿体外围采样间距为50~120 m。

使用超纯水配制的20 mL 5%的硝酸(优级纯)溶液作为捕集液,抽气之前,用钢钎打3个孔,孔深50~60 cm,直径3 cm,3个孔垂直测线排列,孔距大于1.5 m。钢钎拔出后,迅速将螺旋采集器插入孔中,用硅胶管将采集器与抽气泵连接,使用气体流量计将流量控制在0.6 L/min,每个点的抽取时间为25 min,吸气量为15 L。

甲基卡稀有金属矿区中发育以Li为主的伟晶岩矿床,其伴生的Be、Rb、Cs、Ta、Nb、Sn等元素一般也达综合利用的工业品位,因此这些元素,特别是Li元素是主要的矿床指示元素;另外由于伟晶岩与近矿蚀变岩、赋矿围岩中Na、B等元素含量差异显著,特别是其中的B元素主要赋存于近矿接触蚀变岩中的电气石之中,B质量分数平均为 $6\ 800 \times 10^{-6}$,而矿体中只含有少量电气石,B质量分数平均为 117×10^{-6} 左右^[31],这些元素也可作为辅助的矿



1.二云母花岗岩;2.微斜长石型伟晶岩;3.微斜长石—钠长石型伟晶岩;4.钠长石型伟晶岩;5.钠长石—锂辉石型伟晶岩;6.钠长石—锂云母型伟晶岩;7.伟晶岩脉编号;8.类型分带线;9.类型分带编号;10.研究的隐伏矿体;11.地气测线;I.微斜长石伟晶岩带;II.微斜长石—钠长石带;III.钠长石带;IV.锂辉石带;V.锂(白)云母带

图1 甲基卡稀有金属矿区地质简图

Fig.1 Simplified geological map of Jiajika rare metal deposit

床指示元素。样品在成都综合岩矿测试中心测试,主要分析了上述成矿元素或指示元素,除Na元素采用ICP-AES测试外,其余元素均用ICP-MS测试完成,所有样品同批次送样测试。

3 结果与讨论

3.1 地气元素异常特征

地气分析结果及相关统计见表1,2。

测线上地气样品数量相对较少、离散程度较大,因此采用下四分位数作为测线上地气元素含量的背景值,以背景值+1倍标准偏差作为异常下限。

X03号矿体35号勘探线、烧炭沟矿体131勘探线上地气综合异常见图2,3,可以看出,Li、Be、Rb、Cs等成矿元素在矿体上方均出现了异常峰值,除成矿元素外Na、B等与伟晶岩或与接触蚀变带有关的元素在矿体上方也出现了异常峰值。这些异常除少部分为单点异常外,多数是多点连续异常,表明地气

中元素异常与隐伏矿体具有良好的对应关系,能够指示地表以下30~100 m隐伏矿体的存在。

X03号矿体35号测线西侧600 m附近,地气中的Li、Rb、Cs、B、Na等元素质量浓度相对较高,部分元素质量浓度已超过异常下限。事实上,测线的西侧已靠近矿区中规模很大的308号伟晶岩脉,最后一个测点距其露头约50 m。308号脉在地表大致呈南北向展布,出露长约1 450 m,宽60~630 m,东西两侧均为第四系残坡积物覆盖,在其内部不均匀地分布有规模不等的锂辉石矿体。根据地气测线附近308号脉20号勘探线的钻探工程揭露,在308号脉东侧第四系覆盖层之下还分布有大小不等的呈脉状侵位于围岩中的伟晶岩脉或矿化伟晶岩脉。因此,可以推测在X03号矿体35号测线西侧的600 m附近,其地表以下可能分布有含矿伟晶岩脉。

以Li、Be、Rb、Cs、Na、B等元素的背景值作为标准,对地气元素质量浓度进行归一化处理,计算各个元素的响应率(response ratios)。从上述元素的

表 1 X03 号矿体 35 号勘探线地气元素含量分析结果

Table 1 The element analysis results of geogas in 35 exploration line of X03 ore body

样号	Li	Be	Rb	Cs	Nb	Ta	Sn	B	Na
	$\rho_B/(\text{ng} \cdot \text{mL}^{-1})$								$\rho_B/(\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$
X03-35-01	0.302	0.001	0.156	0.016	0.014	0.000 3	1.07	10.3	0.78
X03-35-03	0.475	0.008	0.301	0.021	0.021	0.000 7	1.08	58.4	2.49
X03-35-05	0.318	0.006	0.164	0.022	0.014	0.001 7	1.07	16.8	1.18
X03-35-06	0.309	0.004	0.132	0.019	0.010	0.000 2	1.07	9.4	0.92
X03-35-07	0.253	0.005	0.184	0.023	0.028	0.000 9	1.09	28.8	1.37
X03-35-08	0.510	0.006	0.356	0.030	0.011	0.000 9	1.14	41.1	3.53
X03-35-09	0.736	0.005	0.479	0.032	0.028	0.001 6	1.09	67.2	4.63
X03-35-11	0.245	0.001	0.158	0.017	0.020	0.000 6	1.12	13.1	1.03
X03-35-13	0.164	—	0.144	0.018	0.013	0.000 7	1.05	12.0	1.05
X03-35-16	0.363	—	0.269	0.025	0.023	0.000 9	1.15	44.8	2.22
X03-35-18	0.128	0.006	0.135	0.015	0.014	0.000 6	4.74	7.5	0.82
X03-35-19	0.240	0.010	0.202	0.022	0.016	0.000 8	10.94	32.5	1.60
X03-35-22	0.263	0.005	0.182	0.023	0.024	0.001 1	17.40	45.8	1.44
X03-35-23	0.359	—	0.321	0.031	0.022	0.000 9	4.11	48.6	2.47
X03-35-24	0.182	—	0.163	0.022	0.017	0.000 7	4.12	14.7	1.18
X03-35-25	0.210	0.005	0.222	0.052	0.016	0.000 7	4.04	20.2	1.40
平均值	0.316	0.004	0.223	0.024	0.018	0.000 8	3.52	29.4	1.76
标准偏差	0.152	0.003	0.098	0.009	0.006	0.000 4	4.54	19.3	1.07
背景值	0.233	0.001	0.157	0.019	0.014	0.000 7	1.08	12.9	1.04
异常下限	0.385	0.004	0.255	0.028	0.020	0.001 1	5.62	32.1	2.12

表 2 烧炭沟矿体 131 号勘探线地气元素含量分析结果

Table 2 The element analysis results of geogas in 131 exploration line of Shaotangou ore body

样号	Li	Be	Rb	Cs	Nb	Ta	Sn	B	Na
	$\rho_B/(\text{ng} \cdot \text{mL}^{-1})$								$\rho_B/(\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$
ST-131-1	0.289	0.006	0.258	0.022	0.039	0.0020	1.22	29.8	1.88
ST-131-4	0.273	0.005	0.208	0.021	0.022	0.0021	1.17	26.4	1.41
ST-131-6	0.231	0.002	0.175	0.021	0.033	0.0020	1.18	19.1	1.13
ST-131-8	0.233	0.005	0.179	0.019	0.026	0.0017	1.12	23.5	1.38
ST-131-10	0.380	0.004	0.252	0.030	0.032	0.0016	1.16	58.1	2.14
ST-131-11	0.493	0.002	0.264	0.036	0.038	0.0007	1.20	50.4	2.38
ST-131-12	0.292	0.004	0.187	0.017	0.027	0.0004	1.13	36.2	1.66
ST-131-13	0.317	0.006	0.219	0.022	0.020	0.0018	1.14	52.0	1.87
ST-131-14	0.233	0.006	0.164	0.016	0.028	0.0021	1.23	16.4	1.04
ST-131-16	0.284	0.008	0.236	0.032	0.026	0.0008	1.19	19.4	1.06
ST-131-17	0.494	0.006	0.477	0.081	0.025	0.0003	1.31	61.8	2.50
ST-131-19	0.252	0.004	0.253	0.019	0.030	0.0007	1.18	30.1	1.57
ST-131-21	0.190	0.001	0.184	0.016	0.020	0.0011	1.13	18.6	1.11
ST-131-22	0.349	0.002	0.314	0.024	0.028	0.0009	1.21	41.4	1.93
ST-131-24	0.245	0.002	0.411	0.044	0.069	0.0022	1.31	37.0	0.99
平均值	0.304	0.004	0.252	0.028	0.031	0.0014	1.20	34.7	1.60
标准偏差	0.091	0.002	0.089	0.017	0.012	0.0007	0.06	15.1	0.50
背景值	0.239	0.002	0.186	0.019	0.026	0.0008	1.16	21.4	1.12
异常下限	0.330	0.004	0.275	0.036	0.038	0.0015	1.20	36.5	1.62

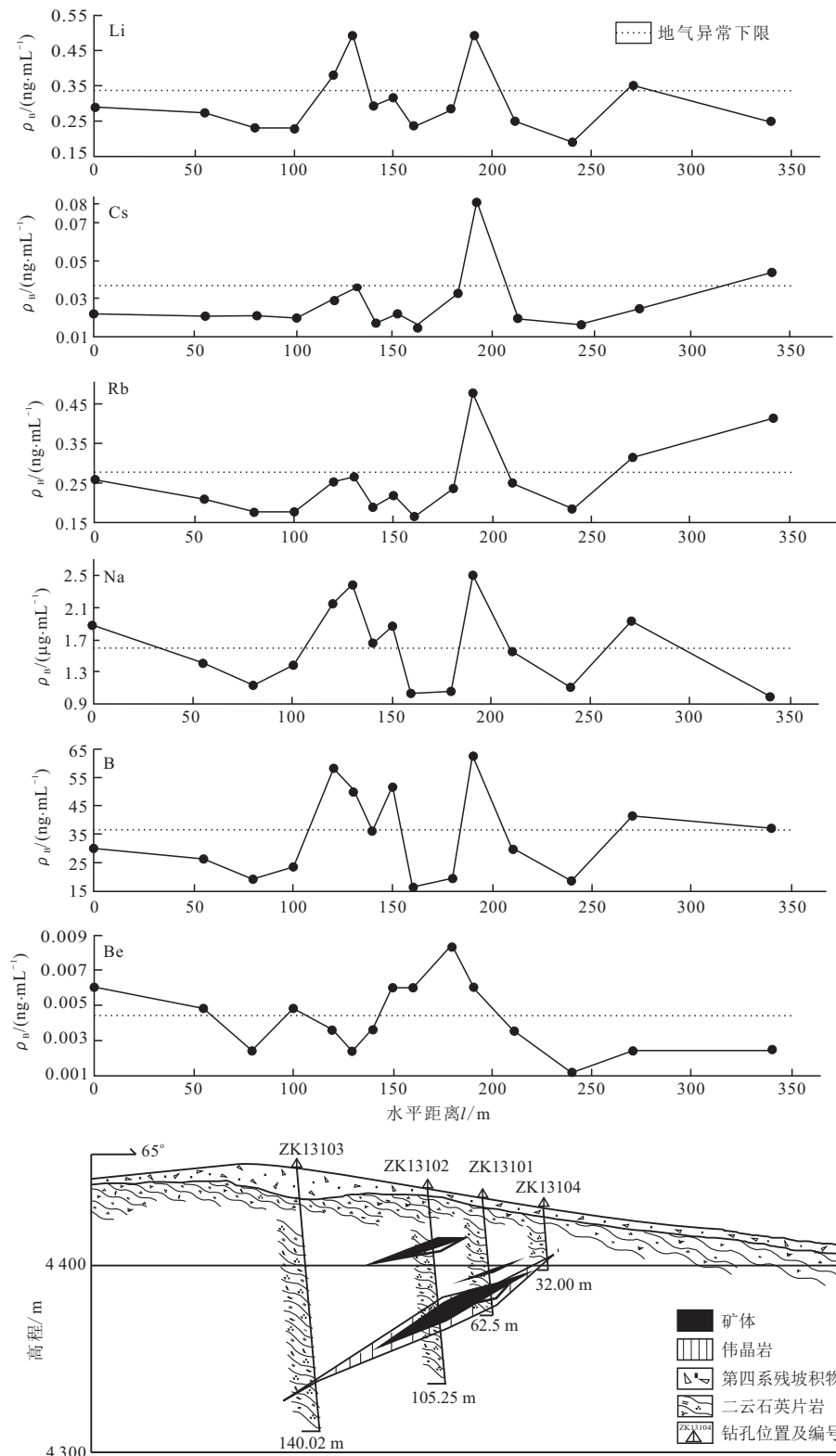


图3 烧炭沟 131 号勘探线地气综合异常图

Fig.3 The integrated geogas anomaly of 131 exploration line of Shaotangou ore body

3.2 地气元素异常模式及找矿的指示意义

(1) 地气元素异常模式

在本次研究的 2 条地气剖面上,元素异常以多峰形式出现在矿体的上方,构成了顶部地气异常模

式。王学求^[32]研究认为,矿区或矿体异常模式的衡量标准除了异常规模的大小、空间分布和元素组合外,更重要的是异常的分布形态,因为地气测量的最终目的是根据异常的分布情况来确定进一步工程钻

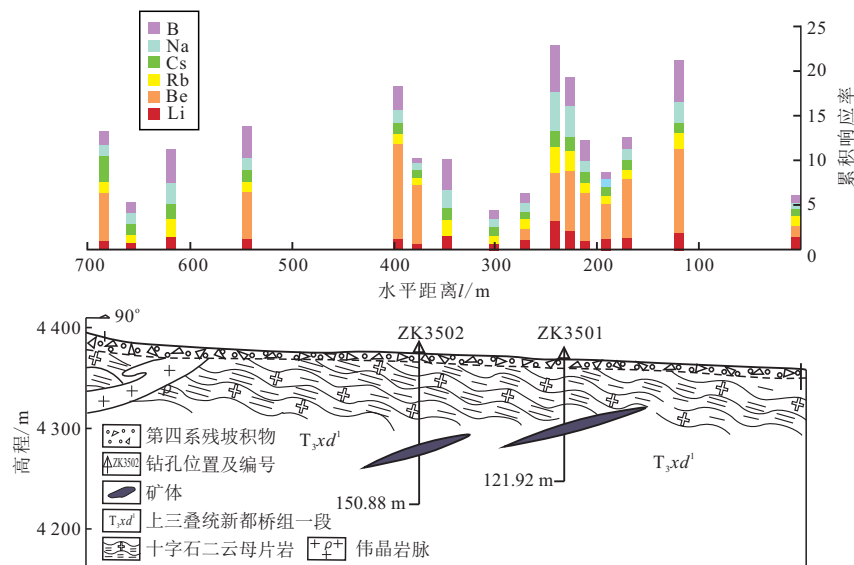


图 4 X03 号矿体 35 号勘探线多元素累积响应率图

Fig.4 The multi-element cumulative Response Ratios of 35 exploration line of X03 ore body

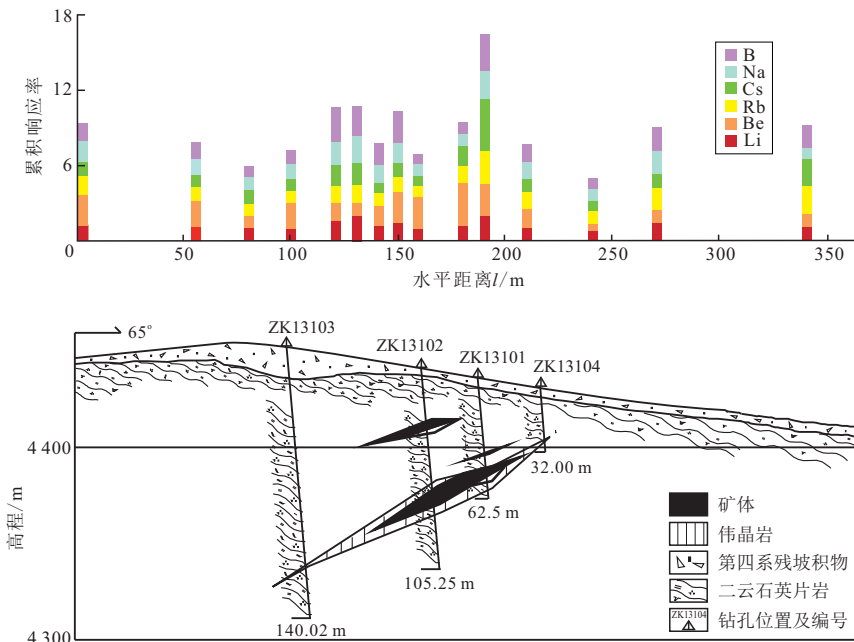


图 5 烧炭沟矿体 131 号勘探线元素累积响应率图

Fig.5 The multi-element cumulative response ratios of 131 exploration line of Shaotangou ore body

孔的位置。

王学求^[32]将地气异常形态分为:顶部异常、双峰异常以及跳跃式异常 3 种形式。顶部异常是指在矿体上方出现连续的异常或单点异常,在矿体产状近直立或陡倾斜时地气异常往往表现出顶部异常的特征,通常在矿体上方出现 1 个显著的峰值,但对于倾斜矿体往往由若干个跳跃的峰值形成顶部异常。从 2 条测线隐伏矿体的产状来看,为规模相对较小的缓倾斜的矿体,倾角在 20°左右,矿体倾向方向在平面上的投影宽度相对较长,因此地气异常的宽度

相对较宽。另外,对甲基卡稀有金属矿体控矿构造的研究^[31]表明,矿体主要受不同方向的剪切张裂隙或层间裂隙控制,这些裂隙构成了矿体(脉)的就位空间,裂隙规模较小,但矿体的围岩是受动力热变质形成的片岩,片理发育,因而矿体上方围岩的片理是地气流上升的主要通道,可在矿体上方形成顶部异常。

大量的试验已证实地下确实存在上升气流的事实^[32-33],地气在温度、压力和浓度梯度的作用下由深部向上迁移。当上升气流经过矿体及其所形成的高

含量地球化学块体时,将成矿元素及伴生元素的超细微颗粒带到地表,一部分滞留于土壤气体中^[6],地下深部的矿体及高含量地球化学块体是引起地气异常的原因^[14-16]。因而,采集气体样品,分析气体中金属元素质量浓度就可以指示深部矿体的存在。2条地气测量剖面上,地气异常表现为以稀有金属为主的组合异常,形成这种组合异常的原因是由于矿体是以Li为主的伟晶岩矿体,伴生Be、Rb、Cs、Ta、Nb、Sn等稀有元素。矿体与蚀变岩石、赋矿围岩在元素含量上存在显著的差别,其中矿体与赋矿围岩元素质量分数比值Li为15.6、Be为11.5、Cs为7.2、Rb为1.8、Na₂O为2.62,而近脉蚀变岩石与矿体中的B比值为46.04^[31],这些元素含量上的差异是形成以成矿稀有金属为主的组合异常的原因。

(2)对寻找隐伏矿体的指示意义

对2个隐伏矿体地气异常模式的分析表明,在以Li为主的、缓倾角的隐伏矿体上方,表现为以Li为主的、由多种稀有金属元素组成的、具多个异常峰的顶部异常,隐伏矿体位于异常的下方。

对甲基卡稀有金属矿区中500多条伟晶岩脉产状的统计^[31]表明,脉体走向以近南北向为主,与穹窿走向一致,倾向总体为西或北西,倾角以缓倾20°~45°为主。矿体产状特征表明,甲基卡矿区隐伏矿体上部的地气异常模型主要表现为由多个异常峰组成的顶部异常形式,这是由控矿构造、围岩特征以及矿体的产状所决定的。因此,在该矿区采用地气测量技术寻找隐伏矿体时,可在地气异常的上方布置钻探工程进行钻探验证。

本次在甲基卡稀有金属矿区开展了2个隐伏稀有金属矿体的地气探测试验,结果表明地气元素异常对于地表以下100 m左右的隐伏矿体具有较好的指示性,显示出这一方法在寻找隐伏稀有金属矿体方面的能力。但应该注意到,伟晶岩型稀有金属矿体的规模一般都较小,矿区114条含矿伟晶岩脉厚度一般在5 m到10余米,长度一般在50~100 m之间,而厚度在50 m以上、长度在1 000 m以上的大型、超大型矿体十分少见。因此,今后在利用地气异常寻找该区隐伏稀有金属矿体时,测线应重点布置在激电扫面发现的由伟晶岩形成的高阻体之上^[31],综合分析地质、地球物理特征,才能更好地发挥地气测量技术的找矿效果,从而指导钻探工程的布置。

4 结 论

(1)地气中Li、Be、Rb、Cs、Na、B等元素在研究区矿体上方均出现异常,除少部分为单点异常外,多

数是多点连续异常,这些元素的异常特征与隐伏矿体具有良好的对应关系,能够指示地表以下30~100 m隐伏矿体的存在。

(2)X03号矿体地气测线上,土壤中Li、Be、Rb、Cs、B等元素在矿体上方没有显示出与隐伏矿体对应的异常,土壤与地气中这些元素的含量不具有相关性,表明地气异常并不是由土壤元素含量所形成的,而是来源于隐伏矿体,是隐伏矿体直接信息的反映。矿体与蚀变岩石、赋矿围岩在元素含量上的显著差异,是形成以成矿稀有金属为主的组合异常的原因。

(3)地气异常表现为具多个异常峰的顶部异常,隐伏矿体位于异常的下方。在综合分析地质、地球物理特征的基础上,可在地气异常的上方布置钻探工程进行钻探验证。

参考文献:

- [1] 王登红,付小方.四川甲基卡外围锂矿找矿取得突破[J].岩矿测试,2013,32(6):987-987.
- [2] 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.
- [3] 付小方,侯立玮,王登红,等.四川甘孜甲基卡锂辉石矿产调查评价成果[J].中国地质调查,2014,1(3):37-43.
- [4] 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.
- [5] 唐国凡,吴盛先.四川省康定县甲基卡花岗伟晶岩锂矿床地质研究报告[R].成都:四川地矿局,1984.
- [6] 王学求,叶荣.纳米金属微粒发现:深穿透地球化学的微观证据[J].地球学报,2011,32(1):7-12.
- [7] 姚文生,王学求,张必敏,等.苗.鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿深穿透地球化学勘查方法实验[J].地学前缘,2012,19(3):167-176.
- [8] 王学求.勘查地球化学近十年进展[J].矿物岩石地球化学通报,2013,32(2):190-197.
- [9] Mann A W, Birrell R D, Fedikow M A F, et al. Vertical ionic migration: Mechanisms, soil anomalies, and sampling depth for mineral exploration [J]. Geochemistry Exploration Environment Analysis, 2005, 5(3): 201-210.
- [10] Cameron E M, Hamilton S M, Leybourne M I, et al. Finding deeply buried deposits using geochemistry [J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 2004, 4(1): 7-32.
- [11] 王发明,翟玉林,李艳军,等.青海大场金矿田北缘灭格滩矿区土壤地球化学异常信息提取及找矿预测[J].地质科技情报, 2015, 34(5): 127-133.
- [12] 刘宜政,高建国,余晓霞,等.基于矿床三维地质建模的云南会泽某矿段隐伏矿体预测[J].地质科技情报, 2014, 33(6): 164-169.
- [13] 张传昱,张均,李婉婷,等.安徽上成金矿床Ⅲ号矿体原生晕特征及深部预测[J].地质科技情报, 2013, 32(3): 159-165.
- [14] 童纯茜,李巨初.地壳内上升气流对物质的迁移及地气测量原理[J].矿物岩石, 1997, 17(3): 83-88.
- [15] 王学求.寻找和识别隐伏大型特大型矿床的勘查地球化学理论方法与应用[J].物探与化探, 1998, 22(2): 81-89, 108.
- [16] 谢学锦,王学求.深穿透地球化学新进展[J].地学前缘, 2003,

- 10(1):225-238.
- [17] 周四春,刘晓辉,童纯茜,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.
- [18] Kristiansson K, Malmqvist L, Persson W. Geogas prospecting: A new tool in the search for concealed mineralizations[J]. *Endeavour*, 1990, 14(1):28-33.
- [19] 童纯茜,李巨初,葛良全,等.地气物质纳米微粒的实验观测及其意义[J].中国科学:地球科学,1998,28(2):153-156.
- [20] 刘应汉,汪明启,赵恒川,等.寻找隐伏矿的“地气”测量方法原理及应用前景[J].青海国土经略,2006(3):41-42.
- [21] 王学求,张必敏,迟清华.穿透性地球化学迁移模型的实验证据[J].矿物学报,2009,29(增刊1):485-486.
- [22] 刘晓辉,童纯茜.地下玻璃固化体中元素垂直迁移规律初探[J].原子核物理评论,2009,26(1):64-68.
- [23] 周四春,刘晓辉,胡波.坑道地气测量试验及其意义[J].矿物学报,2015,35(增刊1):1063-1064.
- [24] Ye Rong, Zhang Bimin, Wang Yong. Mechanism of the migration of gold in desert regolith cover over a concealed gold deposit[J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2015, 15(1):62-71.
- [25] 王学求,张必敏,姚文生,等.覆盖区勘查地球化学理论研究进展与案例[J].地球科学:中国地质大学学报,2012,37(6):1126-1132.
- [26] 周四春,刘晓辉,朱捌,等.地气测量勘查花岗岩隐伏铀矿研究[J].矿物学报,2011,31(增刊1):330-331.
- [27] 王学求,谢学锦,卢荫麻.地气动态提取技术的研制及在寻找隐伏矿上的初步试验[J].物探与化探,1995,19(3):161-171.
- [28] 童纯茜,李巨初.地气测量寻找深部隐伏金矿及其机理研究[J].地球物理学报,1999,42(1):135-142.
- [29] 徐景银,曾明中,付家灿.地气及金属活动态深穿透化探新方法的应用效果[J].湖北地矿,2003,17(2):19-23.
- [30] Wang Xueqiu, Zhang Bimin, Ye Rong. Nanoparticles observed by TEM from gold, copper-nickel and silver deposits and implication for mineral exploration in covered terrains[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2017(9):6014-6025.
- [31] 付小方,侯立伟,梁斌,等.甲基卡式花岗岩伟晶岩型锂矿床成矿模式与三维勘查找矿模型[M].北京:科学出版社,2017.
- [32] 王学求.地球气纳微金属测量的概念、理论与方法[C]//谢学锦,邵跃,王学求,等.走向21世纪矿产勘查地球化学.北京:地质出版社,1999:105-124.
- [33] Kristiansson K, Malmqvist L. Trace elements in geogas and their relation to bedrock composition[J]. *Geoexploration*, 1987, 24:517-534.

(上接第73页)

- [41] Barfod G H, Albarède F, Knoll A H, et al. New Lu-Hf and Pb-Pb age constraints on the earliest animal fossils[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 2002, 201(1):203-212.
- [42] Condon D, Zhu M Y, Bowring S, et al. U-Pb ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China [J]. *Science*, 2005, 308:95-98.
- [43] 蒋干清,史晓颖,张世红.甲烷渗漏构造、水合物分解释放与新元古代冰后盖帽碳酸盐岩[J].科学通报,2006,51(10):1121-1138.
- [44] 王新强,史晓颖.华南伊迪卡拉纪碳同位素时空变化及其对生物演化的影响[J].中国科学:地球科学,2010,40(1):18-27.
- [45] 李超,程猛,Algeo Thomas J,等.早期地球海洋水化学分带的理论预测[J].中国科学:地球科学,2015,45(12):1829-1838.
- [46] Jiang G, Shi X, Zhang S, et al. Stratigraphy and paleogeography of the Ediacaran Doushantuo Formation (ca. 635—551 Ma) in South China[J]. *Gondwana Research*, 2011, 19(4):831-849.
- [47] Mcfadden K A, Xiao S, Zhou C, et al. Quantitative evaluation of the biostratigraphic distribution of acanthomorphic acritarchs in the Ediacaran Doushantuo Formation in the Yangtze Gorges area, South China[J]. *Precambrian Research*, 2009, 173:170-190.
- [48] 安志辉,童金南,叶琴,等.湖北宜昌樟村坪地区陡山沱组地层划分与对比[J].地球科学,2018,43(7):2206-2221.
- [49] 刘鹏举,尹崇玉,陈寿铭,等.华南峡东地区埃迪卡拉(震旦)纪年代地层划分初探[J].地质学报,2012,86(6):849-866.
- [50] Jiang G, Kaufman A J, Christie-Blick N, et al. Carbon isotope variability across the Ediacaran Yangtze platform in South China: Implications for a large surface-to-deep ocean $\delta^{13}\text{C}$ gradient [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 261(1/2):303-320.
- [51] 廖晓,王震亮,余侏宇,等.塔里木地柯坪地区奥陶系高丰度海相烃源岩成因探讨[J].地质科技情报,2018,37(2):59-64.
- [52] Demaison G J, Moore G T. Anoxic environments and oils source bed genesis[J]. *Organic Geochemistry*, 1980, 2(1):9-31.
- [53] Tyson R V, Pearson T H. Modern and ancient continental shelf anoxia[J]. *Geological Society of Special Publication*, 1991, 58:470-482.
- [54] 腾格尔.海相地层元素—碳氧同位素分布与沉积环境和烃源岩发育关系:以鄂尔多斯盆地为例[D].兰州:中国科学院兰州地质研究所,2004.
- [55] 王大锐,白玉雷.碳酸盐岩中稳定同位素对古气候的表征[J].石油勘探与开发,1999,26(5):30-32.
- [56] 周新科,许化政.海相碳酸盐岩的形成环境与有机质特征[J].石油与天然气地质,2009,30(3):337-342,349.
- [57] 严兆彬,郭福生,潘家永,等.碳酸盐岩 C, O, Sr 同位素组成在古气候、古海洋环境研究中的应用[J].地质找矿论丛,2005,20(1):53-56.