

doi: 10.11720/wtyht.2022.2585

李建亭,刘雪敏,王学求,等.地表土壤微细粒测量中微量元素和同位素对福建罗卜岭隐伏铜钼矿床的示踪与判别[J].物探与化探,2022,46(1):32-45. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.2585>

Li J T, Liu X M, Wang X Q, et al. Tracing and identification of concealed Luoboling copper-molybdenum deposit in Fujian Province using trace elements and isotopes in fine-grained surface soils[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 32-45. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.2585>

# 地表土壤微细粒测量中微量元素和同位素对福建罗卜岭隐伏铜钼矿床的示踪与判别

李建亭<sup>1</sup>, 刘雪敏<sup>1</sup>, 王学求<sup>2</sup>, 韩志轩<sup>2</sup>, 江瑶<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059; 2. 中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000)

**摘要:** 在已知隐伏矿——罗卜岭斑岩型铜钼矿床上方采集了表层土壤以及典型钻孔中的矿石和围岩样品, 分析了 6 个微量元素 (Cu、Mo、Ba、Pb、Zn、V) 的含量变化以及硫、铅同位素的组成特征, 来验证土壤金属活动态测量技术、微细粒级土壤全量测量技术在隐伏矿区的找矿效果, 并根据铅、硫同位素的组成特征来识别地表地球化学异常的来源。研究表明, 微细粒级土壤全量测量技术对该矿区深部矿体的指示效果最好, 其中 Cu、Ba、Mo 的含量高值区与深部隐伏矿体的展布相关性较强。土壤金属活动态、微细粒级土壤全量均显示出 14、15 号采样点下方极有可能存在着隐伏矿体, 同时两种测量方法均可以根据 V、Pb、Zn 的含量变化较为准确地圈定出接近地表矿化岩体的范围。由于异常区土壤全量的硫同位素组成大多数信息继承自非赋矿围岩, 掩盖了来自深部矿体的贡献, 故在本矿区用硫同位素指示地表土壤中的异常来源效果较差, 建议测量土壤金属活动态中的硫同位素组成应更为合理。异常区土壤全量的铅同位素继承了来自深部矿体铅同位素的特征, 直接为微细粒级土壤全量测量技术在覆盖区的矿产勘查提供了证据, 同时<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 在地表微细粒级土壤全量中的变化与下伏隐伏矿体的展布相关性较强, 可以有效指示深部隐伏矿体。

**关键词:** 罗卜岭铜钼矿床; 铅、硫同位素; 微量元素; 土壤微细粒测量; 覆盖区找矿

**中图分类号:** P632 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2022)01-0032-14

## 0 引言

随着矿产勘查程度的提高, 地表露头矿和浅部矿越来越少, 寻找深部隐伏矿越来越受到矿产勘查界的重视, 由此一系列找矿勘查方法应运而生, 这主要包括电提取法、地气法、酶提取法、活动金属离子法、地球气纳微金属测量法、金属活动态测量法等多种非传统地球化学方法<sup>[1-6]</sup>。这些方法虽然原理不同, 探测深度大 (>100 m), 探测信息微弱, 但与矿化关系密切, 因此, 将它们统称为深穿透地球化学法<sup>[7]</sup>。上述方法主要通过已知矿区开展试验, 通

过圈定的地表地球化学异常与深部隐伏矿体的空间对应关系来验证方法有效性, 但这些深穿透地球化学方法并没有在未知的覆盖区开展广泛的找矿应用, 因为目前国内外学术界在深穿透地球化学理论基础问题上还存在一定争议, 特别是如何断定地表的地球化学异常就是来源于深部的隐伏矿体, 有什么直接证据? 要回答这个问题, 实际上就是要示踪覆盖区地表圈定的地球化学异常的来源。

近年来, 随着高分辨 MC-ICP-MS 技术的发展和同位素分析成本的降低, 可借助同位素示踪技术来查证地表地球化学异常信息的来源。通常的做法是在覆盖区采集地表介质, 如土壤、地下水、地表水、地

收稿日期: 2020-12-25; 修回日期: 2021-09-13

基金项目: 国家重点研发计划项目“覆盖区地球化学异常源示踪与判别”(2016YFC0600604)

第一作者: 李建亭(1994-), 男, 硕士, 主要从事穿透性地球化学勘查技术学习与研究工作。Email: 448287250@qq.com

通讯作者: 刘雪敏(1987-), 女, 博士, 主要从事于勘查地球化学与矿床地球化学研究工作。Email: 451245437@qq.com

气等,通过对比其同位素的含量和分布与矿石、围岩中同位素组成的关系,来示踪地表地球化学异常的来源。如汪明启等<sup>[8]</sup>、徐洋等<sup>[9]</sup>利用铅同位素分别在甘肃蛟龙掌铅锌矿区和山东邹平王家庄铜矿区成功示踪了异常区地气样品有深部矿石硫化物铅的加入,从而为地气用于覆盖区矿产勘查提供了可靠的理论基础。刘雪敏等<sup>[10]</sup>通过铅、硫同位素对新疆金窝子金矿床和内蒙古拜仁达坝—维拉斯托多金属矿床的异常区地气样品进行了示踪,提出了依托偏提取的思想,仅测量介质中活动态的铅、硫同位素的组成应更为合理。Saunders 等<sup>[11]</sup>用 Cu、S、Pb 同位素在浅层低温 Au-Ag 矿区示踪了成矿流体的来源及其与构造的关系,为后期寻找深部的盲矿提供了依据。Matthew 等<sup>[12]</sup>和 Caritat 等<sup>[13]</sup>分别利用矿区浅层地下水中的 Pb、S、Sr、Pb 同位素说明了地下水中的金属元素与深部矿体的关系。

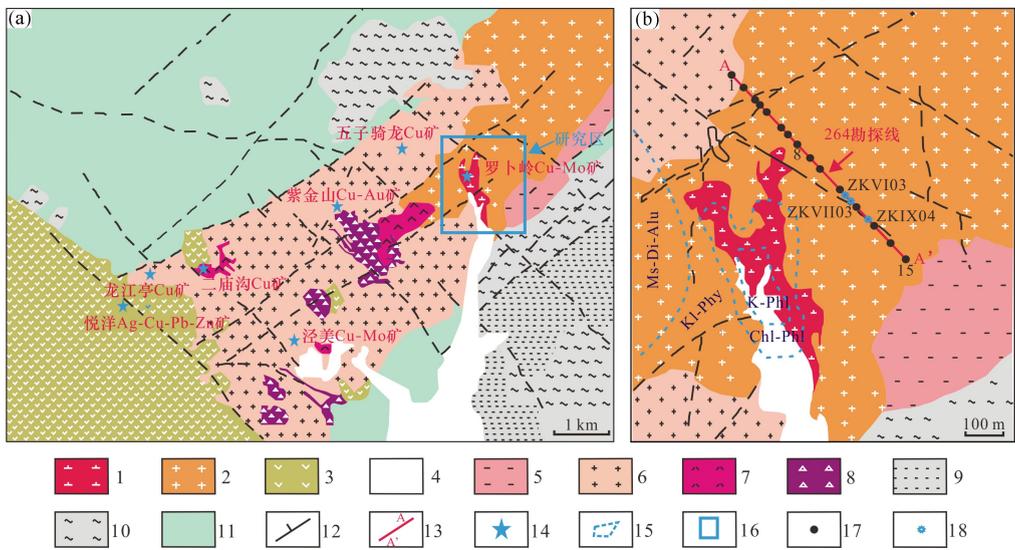
本文在已知隐伏矿——罗卜岭斑岩型铜钼矿床上方采集了表层土壤以及典型钻孔中的矿石和围岩

样品,分析 6 个微量元素 (Cu、Mo、Ba、Pb、Zn、V) 的含量变化以及硫、铅同位素的组成特征,来验证土壤金属活动态测量技术、微细粒级土壤全量测量技术在隐伏矿区的找矿效果,并根据铅、硫同位素的组成特征来识别地表地球化学异常的来源。

## 1 矿床地质概况

罗卜岭大型铜钼矿床位于福建省上杭县紫金山矿田的北东部(图 1a),属于典型的斑岩型矿床。国内外对紫金山矿田的大地构造背景、地层、构造、岩浆活动已有大量文献发表<sup>[14-21]</sup>,下文仅概述罗卜岭铜钼矿床的地质特征。

罗卜岭铜钼矿床位于宣和复背斜西南倾伏端东南翼,矿区出露的地层较为简单,仅在矿区南部出露新生界第四系地层和少量泥盆系天瓦寨组。该区大面积分布燕山期岩浆岩(图 1b),主要包括早白垩世四坊花岗岩闪长岩体和罗卜岭花岗岩闪长斑岩体,也是



1—早白垩世罗卜岭花岗岩闪长斑岩;2—早白垩世四坊花岗岩闪长岩;3—早白垩世火山石帽山岩体;4—第四系冲积沉积物;5—晚侏罗世才溪岩体;6—中侏罗世紫金山复式岩体;7—白垩纪英安玢岩;8—白垩纪隐爆角砾岩;9—早石炭世岩体(林地组);10—晚泥盆世碎屑沉积岩体(天瓦寨组、桃子坑组);11—下震旦统梭子坝群;12—断层;13—264号测线;14—经典矿床;15—矿化蚀变带(K-Phl:弱钾化-绢英岩化蚀变带,Chl-Phl:弱绿石化-绢英岩化蚀变带,Kl-Phy:高岭石化-黄铁绢英岩化,Ms-Di-Alu:白云岩化-地开石化-明矾石化);16—研究区;17—土壤采样点位;18—钻孔

1—early Cretaceous Luoboling granodiorite porphyry;2—early Cretaceous Sifang granodiorite;3—early Cretaceous Shimaoshan volcanic rocks;4—Quaternary alluvial sediments;5—late Jurassic Caixi monzogranite pluton;6—middle Jurassic Zijinshan granite batholith;7—Cretaceous dacitic porphyries;8—Cretaceous cryptoexplosive breccia pipes;9—early Cretaceous Lindi clastic sediments;10—late Devonian clastic sediments (Tianwadong & Taozikeng formations);11—Neoproterozoic Louziba metamorphosed clastic sediments;12—fault;13—section view of exploration line 264;14—ore deposit;15—mineralization alteration zone (K-Phl: weakly potassium-sericitization alteration zone, Chl-Phl: weakly chlorogenic-sericitization alteration zone, Kl-Phy: kaolinitization-pyrite sericitization, Ms-Di-Alu: dolomitization-kazitritization-alum petrochemistry);16—the study area;17—soil sampling points;18—drill hole

图 1 福建紫金山矿田地质简图(a)及罗卜岭矿区地质简图(b)(修改自 Zhong J 等<sup>[22]</sup>)

Fig. 1 Geological schematic diagram (a) of Zijinshan ore field in Fujian Province, geological schematic diagram (b) of Luoboling mining area (modified from Zhong J, et al. <sup>[22]</sup>)

该矿床的主要赋矿岩体,少量出露晚侏罗世五龙子中粒花岗岩体和才溪二长花岗岩体,在矿区深部还广泛发育早白垩世中寮似斑状花岗闪长岩体。区内断裂构造较为发育,以NE向和NW向断裂为主,近SN向次之,其中NE向断裂起控矿作用,NW向起控岩作用。另外,NE、NW向节理构造也十分发育,其中NE向节理为主要的容矿构造<sup>[23]</sup>。

罗卜岭铜钼矿床主成矿元素为铜,伴生钼,在空间上呈“上铜下钼”分布。矿体平面上呈半圆弧展布,空间上呈马鞍状,以似层状、扁豆状和透镜状产出,主要赋存于中寮似斑状花岗闪长岩体外接触带的罗卜岭花岗闪长斑岩体和四坊花岗闪长岩体中,局部分布于五龙子中粒花岗岩体内,是典型的被岩浆岩覆盖的隐伏矿体。矿区热液蚀变强烈,按照蚀变矿物组合及其空间分布规律,罗卜岭铜钼矿床从内向外可划分出5个蚀变带:(弱)钾化—绢英岩化蚀变带(K-Phl)、(弱)绿泥石化—绢英岩化蚀变带(Chl-Phl)、高岭石化—黄铁绢英岩化蚀变带(KI-Phy)、地开石—硅化蚀变带(Di-Q)和明矾石—地开石—硅化组合蚀变带(Di-Alu-Q),而铜钼矿体主要赋存于弱钾化—绢英岩化带内,部分位于绿泥石化—绢英岩化带内。主要的金属矿物有:黄铜矿、黄铁矿、辉钼矿,其次为铜蓝、斑铜矿、蓝辉铜矿、硫砷铜矿、方铅矿、闪锌矿等;非金属矿物以石英、白云母(绢云母)为主,其次为泥化蚀变矿物地开石、高岭石、蒙脱石、明矾石、叶蜡石,绿泥石—绢英岩化产物绿泥石、绢云母以及钾化蚀变矿物钾长石、黑云母组成。矿石结构主要有它形粒状结构、半自形—自形结构、充填和充填结构、包含结构、交代残余结构和共结出结构。矿石构造较为简单,主要类型有浸染状、脉状、网脉状构造等<sup>[24-26]</sup>。

## 2 样品采集及分析方法

### 2.1 样品采集

在罗卜岭斑岩型铜钼矿区地表采集了15件土壤样品、13件岩石(围岩和矿石)样品。具体采样方

法如下:土壤样品沿264勘探线(位置见图1b)布置,该勘探线垂直于矿体走向,长约1.5 km,点距50~200 m不等,在矿区和围岩区共布置15个土壤采样点。每个采样点由3个子采样点组成,子采样点相距1.5~2 m,采集10~30 cm深的去掉腐殖层后的残坡积土并均匀混合为一件样品,每件样品采集1.5~2 kg。围岩、矿石采集于264勘探线ZKIX04、ZKVI03、ZKVII03钻孔内200 m以下的具有代表性的新鲜样品。

### 2.2 样品处理和分析

土壤样品风干、捏碎后,直接过200目(74 μm)孔径的筛子,仅对筛分后的微细粒级土壤进行研究。分析样品(全量、金属活动态)中测试元素(Cu、Mo、Ba、Pb、Zn、V)的含量变化以及全量样品的硫、铅同位素组成特征,其中,对于金属活动态样品仅分析了各元素的水提取态和黏土吸附态。采集的钻孔岩石样品在室内开展详细的矿物学研究后,挑选出矿石矿物较多的样品并粉碎至40~80目,在双镜下挑选出黄铁矿和黄铜矿。对围岩和挑选出的矿石(单矿物)样品分析了硫、铅同位素组成特征。测试的准确度和精确度利用实验室重复样和标准样品进行监测,分析结果可靠。具体分析实验室和测试方法见表1。

## 3 微量元素对异常源的示踪与判别

### 3.1 土壤微细粒全量的微量元素

微细粒级土壤(<200目)中包含大量的粘土矿物、铁锰氧化物、盐类等物质,其吸附作用和可交换性能是金属元素的天然“捕获井”<sup>[27-28]</sup>。深部与成矿有关的物质在一种或多种营力(如离子扩散、电化学梯度、地下水溶解循环、地气流及地震泵等)的共同作用下,沿各种迁移通道卸载于地表,大部分被微细粒级土壤捕获<sup>[29]</sup>。所以分析微细粒级土壤全量中的微量元素可以在一定程度上判别下伏是否存在隐伏矿体。如刘汉粮等<sup>[30]</sup>在甘肃柳元花牛山铅锌矿区107剖面线开展的微细粒级土壤全量测量实

表1 各介质的分析方法

Table 1 Analysis methods of sampling media

介质	检测项目	分析实验室	主要检测方法和仪器
土壤	微细粒全量 Cu、Mo、Ba、Pb、Zn、V	河南省岩矿测试中心	DZ/T 0064. 80—93
	微细粒金属活动态 Cu、Mo、Ba、Pb、Zn、V		XSERIES 2 电感耦合等离子质谱仪
围岩	硫、铅同位素	核工业北京地质研究院	DZ/T 0184. 12—1997
矿石 (单矿物)			DZ/T 0184. 15—1997
			Deltaplus 气体同位素质谱计

验,发现主成矿元素 Pb、Zn 的含量高值区与深部隐伏矿体相对应;韩志轩等<sup>[31]</sup>对江西通江岭铜矿区的 19 和 20 号剖面线进行了微细粒级土壤全量测量实验,发现 Cu、Pb、Zn 的含量高值区可以有效指示深部隐伏矿体。

在罗卜岭铜钼矿区 264 号测线上采集的 15 件微细粒级土壤全量样品的 6 个微量元素(Cu、Mo、Ba、Pb、Zn、V)统计参数见表 2。由表 2 可知,6 个元素的变异系数均低于 1,如主成矿元素 Cu、Mo 的变异系数仅分别为 0.63、0.85。这是因为一方面本矿床呈浸染状分布于斑岩体内,另一方面该矿床伴生较强的蚀变作用,与成矿有关的元素会进入蚀变带,造成成矿元素异常面积较大且分布均匀<sup>[33]</sup>。主成矿元素 Cu、Mo 的平均值明显高于福建省土壤背景值,富集系数均大于 2,分别为 4.44、2.79,显示出强富集特征;Ba 的平均值与福建省土壤背景值相差不大,富集系数为 1.13;V 的平均值略低于福建省土壤背景值,富集系数为 0.71。值得注意的是,伴生元素 Pb、Zn 富集特征具有明显的不同,Pb 明显富集,Zn 明显贫化,富集系数分别为 3.17、0.35,这与一般热液型矿床中 Pb 和 Zn 密切共生的特征不符,可能 Pb、Zn 在地表土壤中已经发生了解耦,但是,这种解耦是由成矿过程中元素分异导致的,还是与表生成土过程中锌的强烈淋失相关,仍有待进一步研究。整体来看,矿区土壤微量元素总体有成矿元素变异系数低、富集系数高的特征。另外,Cu、Mo、Ba 的极值比大于 10,分别为 10.1、24.28、10.24,反映出其在此剖面分布的均匀性较差,下方存在一定矿化,与已知事实相符。

图 2 为罗卜岭铜钼矿区 264 号勘探线微细粒级土壤 6 个微量元素的全量折线图。由图 2 可知,主成矿元素 Cu、Mo 从背景区到已知异常区含量明显升高,但最高值均出现在测线东南端背景区的 14 号点位,分别为  $120 \times 10^{-6}$ 、 $46.14 \times 10^{-6}$ 。另外,根据矿体形态,矿体右侧应该还有延伸。综合地表异常及

矿体形态,推测 264 线南侧深部仍有成矿潜力,但成矿深度可能比已知矿体略浅。故本文将 14~15 号采样点位视为预测异常区。整体来看,主成矿元素 Cu、Mo 的含量高值区(含量大于  $120 \times 10^{-6}$ 、 $10 \times 10^{-6}$ )与下伏隐伏矿体的分布较为吻合;Ba 的含量变化趋势与 Cu 较为相似且大于  $300 \times 10^{-6}$  的范围与下伏隐伏矿体的分布高度吻合;V、Pb、Zn 含量高值区的分布与下伏矿体的展布相关性较差,这可能与上文提及到的 Pb、Zn 在地表土壤的解耦有关,也可能与 Pb、Zn 活动性较强,易向矿体边缘富集有关<sup>[35]</sup>。值得注意的是,V、Pb、Zn 的含量高值范围与赋矿岩体——罗卜岭花岗岩闪长斑岩接近地表的范围较为一致,这与赋矿岩体普遍发育矿化蚀变的地质事实相符。综上所述,地表微细粒级土壤全量中的 Cu、Mo、Ba 的含量高值区与深部隐伏矿体的展布相关性较强,对于预测深部矿体的规模有一定的指示意义,而 V、Pb、Zn 可以较为准确地圈定出接近地表矿化岩体的范围。

### 3.2 土壤金属活动态微量元素

金属活动态测量的理论依据是深部与成矿有关的物质在一种或多种营力作用下,沿迁移通道到达地表并转化成各种活动态(超微细的亚微米至纳米级颗粒、胶体、离子和各种配合物),被可溶性盐类、黏土、氧化物和有机质所吸附或结合而存在于地表疏松介质中,在原介质元素含量的基础上形成活动态叠加含量,使用适当的提取剂将这些元素叠加含量提取出来,获取来自深部的矿化信息,从而达到寻找和评价隐伏矿的目的<sup>[7]</sup>。如宋雷鹰<sup>[36]</sup>在内蒙古哈如勒敖包矿区对成矿元素进行水提取态、黏土吸附态实验,发现贱金属元素如 Cu、Pb、Zn、Ag 等的水提取态对地质找矿具有较好的指示意义;杨刚刚等<sup>[37]</sup>在新疆东戈壁钼矿区进行的金属活动态测量剖面实验显示 Mo、W 的水提取态和 Cu 的铁锰氧化态在矿体上方有明显的连续高值异常区,并在主矿体上方达到最大,对深部隐伏矿体具有良好指示意义。

表 2 罗卜岭铜钼矿区 264 号测线微细粒级土壤 6 个微量元素全量统计参数( $n=15$ )

Table 2 Statistical parameters of 6 trace elements in fine soils of the exploration line 264 in Luoboling  
Cu-Mo deposit area ( $n=15$ )

元素	最大值	最小值	中位数	极值比	平均值	标准差	变异系数	福建省土壤背景值	富集系数
Cu	234	23	73.1	10.1	100.35	63.35	0.63	22.6	4.44
Mo	46.14	1.9	11.4	24.28	14.32	12.2	0.85	5.14	2.79
Ba	732.5	71.5	304.5	10.24	339.04	216.57	0.64	300	1.13
Pb	237	31.8	92.1	7.45	110.67	59.56	0.54	34.9	3.17
Zn	41.6	16.8	30.4	2.48	28.94	7.85	0.27	82.7	0.35
V	91.55	18.96	53.88	4.83	55.27	20.75	0.38	78.3	0.71

注:各元素含量单位均为  $10^{-6}$ ;极值比=最大值/最小值;变异系数=标准差/平均值;福建省土壤背景值引自文献<sup>[32]</sup>;富集系数=平均值/福建省土壤背景值。

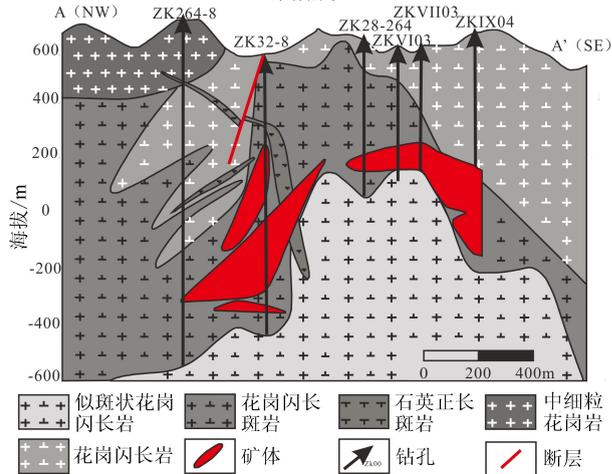
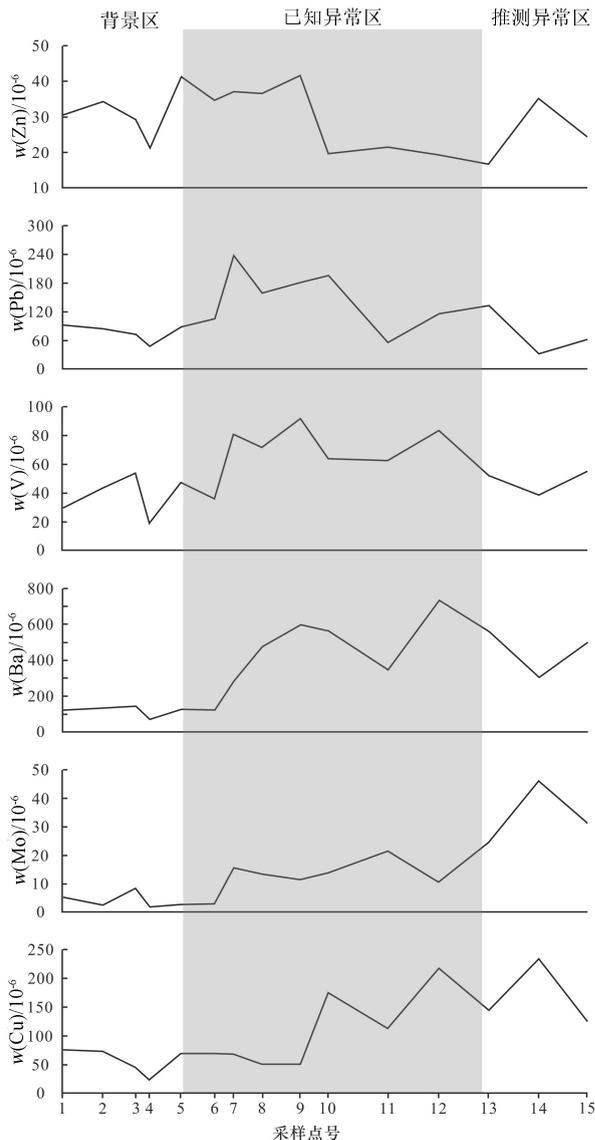


图2 福建罗卜岭铜钼矿区 264 号勘探线微细粒级土壤 6 个微量元素的全量折线图 (修改自赵辰等<sup>[34]</sup>)

Fig.2 Line graphs of six trace elements' concentration in the fine grained soils of the 264 exploration line in the Luoboling ore area (modified from Zhao C, et al<sup>[34]</sup>)

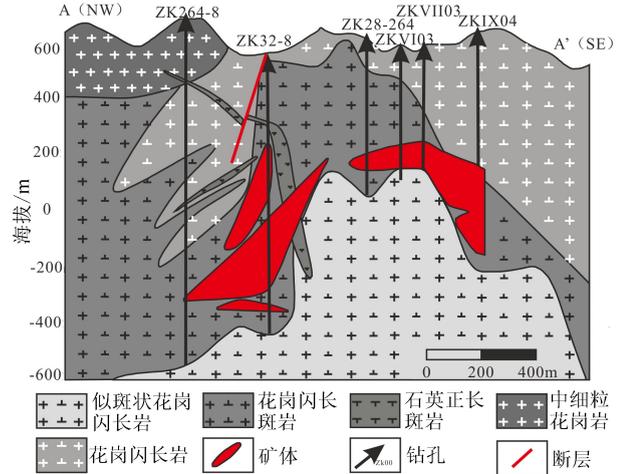
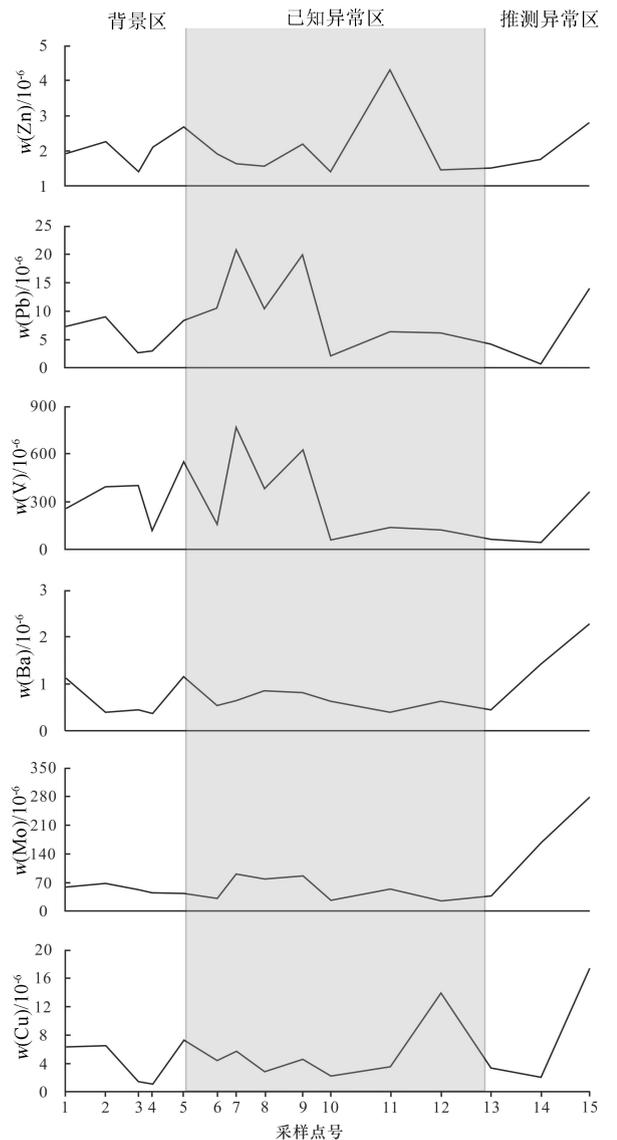


图3 罗卜岭铜钼矿区 264 号勘探线微细粒级土壤 6 个微量元素的金属活动态折线图

Fig.3 Line diagrams of active states for 6 trace elements in fine soils of 264 exploration line in Luoboling Cu-Mo mining area

罗卜岭铜钼矿区 264 号测线上采集的 15 件微细粒级土壤活动态样品的 6 个微量元素 (Cu、Mo、Ba、Pb、Zn、V) 统计参数见表 3。由表 3 可知,主成矿元素 Cu 及伴生元素 Pb、Zn 的金属活动态(水提取态+黏土吸附态)的平均值分别占微细粒级土壤全量平均值的 5.26%、5.48%、7.12%,说明水提取态和黏土吸附态是这些元素的重要存在形式。如活动态 Cu 的平均值为  $5.28 \times 10^{-6}$ ,最大值可达  $17.37 \times 10^{-6}$ 、活动态 Pb 平均值为  $6.06 \times 10^{-6}$ ,最大值可达  $20.75 \times 10^{-6}$ ,显然研究区局部受到了矿化影响。

图 3 为罗卜岭铜钼矿区 264 号勘探线微细粒级土壤 6 个微量元素的金属活动态折线图。由图 3 可知,6 个微量元素的金属活动态在 15 号点位均存在较高异常,这与上文微细粒级土壤全量所预测的下伏矿体相对应。主成矿元素 Cu 在已知异常区上方仅 12 号点位存在异常,最高值( $17.37 \times 10^{-6}$ )出现在 15 号点位;Ba 与 Mo 在含量变化趋势上具有相似

性,两者均在推测矿体上方 14、15 号点位显示出明显异常,最高值分别为  $2.28 \times 10^{-6}$ 、 $278 \times 10^{-9}$ ,但在已知异常区上方均未有异常显示;相较于土壤全量,活动态的 V、Pb、Zn 对于圈定接近地表的矿化岩体范围更为清晰。整体而言,本次各测试元素在隐伏矿体上方均有较好的指示和预测效果,V、Pb、Zn 对于圈定接近地表的矿化岩体范围更为清晰,但相比于土壤全量,Cu、Mo、Ba 的高值区与下伏隐伏矿体的展布相关性较差。这可能是由于本次研究采用的活动态提取方法用水提取态和黏土吸附来代表金属活动态,而本矿区处于中亚热带气候,雨量充沛,地表植被较多,为湿润气候森林覆盖区,测试元素可能在有机态和铁锰氧化物结合态中含量较多,所以是本次研究各测试元素的活动态与下伏隐伏矿体展布相关性较差的主要原因。建议未来针对不同的地貌区发展不同的活动态提取技术。

表 3 罗卜岭铜钼矿区 264 号测线微细粒级土壤金属活动态含量统计参数 ( $n=15$ )

Table 3 Statistical parameters of active states for 6 trace elements in fine soils of 264 exploration line in Luoboling Cu-Mo mining area ( $n=15$ )

元素	最大值	最小值	极值比	中位值	平均值	占微细粒全量百分比/%
Cu	17.37	1.04	16.7	3.99	5.28	5.26
Mo	278.00	25.00	11.12	54.30	75.29	0.53
Ba	2.28	0.37	6.16	0.54	0.51	0.15
Pb	20.75	0.64	32.42	8.30	6.06	5.48
Zn	4.30	1.41	3.05	1.91	2.06	7.12
V	765.00	42.85	17.85	257.00	296.60	0.55

注:V、Mo 含量单位为  $10^{-9}$ ,其他元素单位均为  $10^{-6}$ ;极值比=最大值/最小值;占微细粒全量百分比=金属活动态平均值/全量平均值;金属活动态=水提取态+黏土吸附态。

## 4 硫、铅同位素对异常源的示踪与判别

### 4.1 硫同位素

从理论上讲,可以利用地表土壤中的硫同位素组成来示踪和判别深部隐伏矿体。因为大多数金属矿床的含矿矿物为硫化物(如本矿床的黄铜矿、黄铁矿等),矿体周围的  $(S_2)^{2-}$  或  $S^{2-}$  浓度高,可以在地气流的作用下迁移至地表土壤中,而自然界表生环境中存在着一类细菌(如 *Thiobacilli*、*Beggiatoa* 和 *Sulfolobus* 等)<sup>[38]</sup>,能将低价态硫化物氧化成高价态的化合物(硫酸盐或亚硫酸盐)或者  $(S_2)^{2-}/S^{2-}$  直接被氧气氧化为亚硫酸盐或硫酸盐,形成的高价态化合物往往富集重的硫同位素,分馏约 5%<sup>[39]</sup>,故矿体上方土壤的硫同位素组成应与背景区存在一定的差异。

本次研究共获得 15 件微细粒级土壤全量样品、

5 件围岩(非赋矿围岩)样品、7 件单矿物样品的硫同位素组成,此外还收集了前人在该矿床获得的硫同位素数据(表 4),并绘制了硫同位素分布的频率直方图(图 4)。由表和图可知:19 件矿石样品的硫同位素分布比较集中,范围为  $-1.6‰ \sim 2.2‰$ ,平均值为  $1.3‰$ ,矿石硫同位素组成落在陨硫同位素范围之内( $0 \pm 3$ )‰,具有地幔来源特征<sup>[41]</sup>。其中 1 件辉钼矿硫同位素为  $2.2‰$ 、1 件闪锌矿硫同位素为  $-1.6‰$ 、1 件方铅矿硫同位素为  $-1.2‰$ 、16 件黄铁矿硫同位素组成范围为  $0.5‰ \sim 2.2‰$ ,呈塔式分布,峰值在  $1‰ \sim 2‰$  之间;5 件围岩硫同位素组成范围为  $6.2‰ \sim 16.6‰$ ,分布范围较宽,主要集中在  $10‰ \sim 12‰$  之间;5 件背景区微细粒级土壤全量样品的硫同位素变化范围为  $-0.4‰ \sim 10.3‰$ ,范围较宽,主要集中在  $4‰ \sim 7‰$  之间;10 件异常区微细粒级土壤全量样品硫同位素变化范围最大,其范围为  $1.8‰ \sim 15.3‰$ ,主要有两个集中范围: $5‰ \sim 9‰$ 、 $12‰ \sim$

表 4 罗卜岭铜钼矿区细粒级土壤、矿石、围岩样品的硫同位素数据 (n=39)

Table 4 Sulfur isotopic data of fine-grained soil, ore and wall rock samples in Luoboling Cu-Mo mining area (n=39)

样品编号	点性	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	样品编号	点性	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$
264-1	背景	6.9	VII03-7	黄铁矿	2
264-2	背景	5	VII03-8	黄铁矿	2.2
264-3	背景	10.3	TZ11*	黄铁矿	1.7
264-4	背景	-0.4	TZ16*	黄铁矿	2.6
264-5	背景	4.2	TZ19*	黄铁矿	1.9
264-6	异常	5.4	TZ21*	黄铁矿	1.8
264-7	异常	6.6	ZK36-282-1*	黄铁矿	2.7
264-8	异常	7	ZK36-282-2*	黄铁矿	1.8
264-9	异常	12.3	ZK001-1*	黄铁矿	0.5
264-10	异常	15.3	ZK001-2*	黄铁矿	0.9
264-11	异常	13.6	ZK25-4*	黄铁矿	0.9
264-12	异常	13.6	ZKIX-09*	辉钼矿	2.2
264-13	异常	14.1	ZK001-2*	闪锌矿	-1.6
264-14	异常	1.8	ZK25-4*	方铅矿	-1.2
264-15	异常	8			
IX04-7	黄铁矿	0.6	IX04-20	非赋矿围岩	11.6
IX04-8	黄铁矿	0.9	VI03-4	非赋矿围岩	16.6
IX04-10	黄铁矿	2.2	VI03-20	非赋矿围岩	10.2
VI03-9	黄铁矿	1.7	VII03-15	非赋矿围岩	11.1
VI03-10	黄铁矿	1.5	VII03-16	非赋矿围岩	6.2

注：“\*”表示数据引自文献[40]。

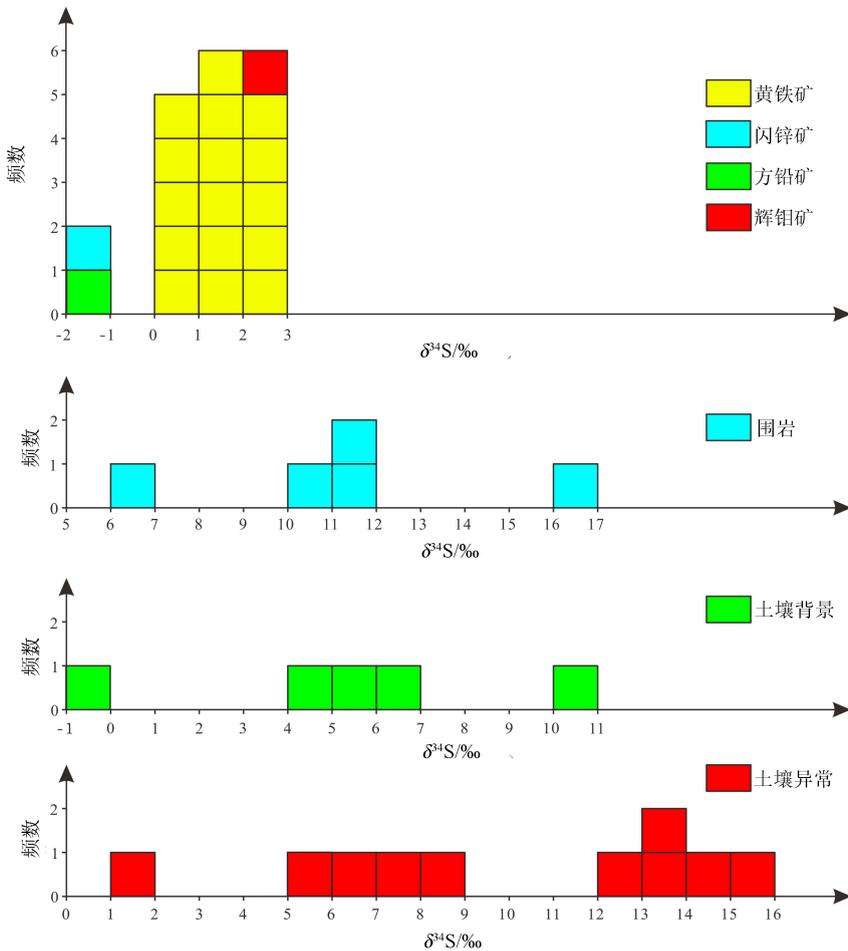


图 4 罗卜岭铜钼矿区矿石、围岩、土壤背景和土壤异常的硫同位素组成

Fig. 4 Sulfur isotopic composition diagrams of ores, rocks, soil background and soil anomalies in the Luoboling Cu-Mo mining area

16‰。可以看出,从矿石→背景区土壤→围岩→异常区土壤,硫同位素的组成逐渐增大,且除矿石硫同位素组成较为集中外,其他介质中的硫同位素组成变化范围较宽,组成较为分散。

本文利用硫同位素识别土壤中异常物质来源的基本思想是:对比异常区土壤样品和矿床周围不同介质(如矿石、围岩、土壤背景)的硫同位素组成特征,来探讨土壤中异常物质的可能来源。通过上文的讨论可以看出,研究区不同介质的硫同位素组成存在一定差异,这有利于使用硫同位素示踪法研究土壤中异常物质的来源。但首先要保证异常区与背景区的土壤有明显差异,这可以利用 SPSS 软件进行单因素方差分析来检验两者数据是否存在差异(当  $P$  值小于 0.05 时,存在明显差异)。方差分析结果如表 5 所示,土壤异常区与土壤背景区两组数据的  $P$  值为 0.08,大于 0.05,表明两组数据之间的  $\delta^{34}\text{S}$  没有明显差别。从统计学的角度来看,这两组数据不能进一步分析。

由图 4 可知,土壤异常区硫同位素的组成集中区(5‰~9‰、12‰~16‰)与围岩(非赋矿围岩)硫同位素的组成集中区(10‰~12‰)特征相似,这与方差分析得出的结论基本一致,表明土壤异常区的硫同位素组成大多数信息继承自非赋矿围岩,而不能反映隐伏矿的硫同位素组成。另外,由表 4、图 5 可知,5 件背景区土壤样品  $\delta^{34}\text{S}$  的平均值为 5.20‰,10 件异常区样品  $\delta^{34}\text{S}$  的平均值为 9.77‰,说明异常区土壤确实明显受到深部矿体的( $\text{S}_2$ )<sup>2-</sup>/S<sup>2-</sup>运移至地表被氧化而富集重同位素的影响。本次研究的是土壤全量中硫同位素组成,受外界环境较大,若采用刘雪敏等<sup>[10]</sup>提出的依托偏提取的思想,仅测量土壤活动态中的硫同位素组成,可能更合理。

#### 4.2 铅同位素异常特征

铅同位素之间的质量差相对较小,任何物理化学条件引起的铅同位素分馏均可以忽略不计,引起铅同位素组成变化的主要原因是放射性 U 和 Th 的衰变。方铅矿、闪锌矿、黄铁矿等硫化物中不含 U、Th 或含量极低,与矿物中铅的质量分数相比可忽略不计,且矿物形成后不再有放射性成因铅的明显加

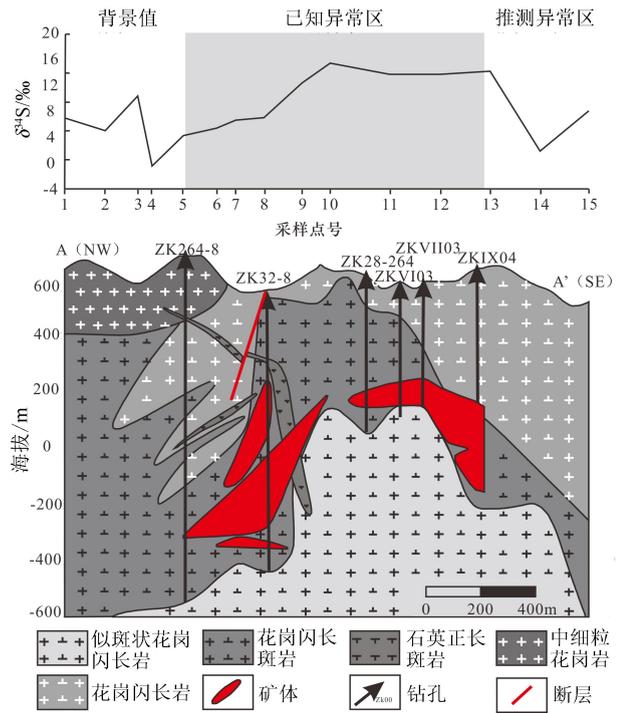


图 5 罗卜岭矿区 264 号勘探线土壤微细粒级全量中硫同位素组成分布

Fig. 5 Sulfur isotope distribution of total soil fine particles along exploration line 264 of Luoboling mining area

入。那么这些硫化物中的 Pb 同位素组成就可以反映原始热液中金属物质来源区的 Pb 体系及其初始 Pb 同位素组成特征,从而获得有关成矿物质来源的信息。铅同位素在成土作用过程中几乎不发生分馏<sup>[8]</sup>,所以异常区土壤和背景区土壤<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb、<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb、<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 比值可能会出现明显差异,土壤的铅同位素组成能示踪异常物质的来源,可用于隐伏矿体的示踪。

罗卜岭铜钼矿床各介质铅同位素数据(本次研究测试的数据和前人的数据)见表 6。由表 6 可知,矿石<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb、<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb、<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 的范围分别为 38.67~39.215、15.595~15.674、18.417~18.764,变化范围较小,分布相对集中。在<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb-<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb(图 6a)、<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb-<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb(图 6b)图解中投点落于造山带附近,具有深部岩浆来源特征;围岩(非赋矿围岩)的 3 种铅同位素比值范

表 5 罗卜岭矿区不同介质硫同位素数据单因素方差分析  $P$  值

Table 5  $P$  values of variance analysis of sulfur isotope data of different media in Luoboling mining area

	矿石	围岩	土壤背景	土壤异常
矿石	1			
围岩	0	1		
土壤背景	0	0.04	1	
土壤异常	0	0.57	0.08	1

表 6 罗卜岭铜钼矿区细粒级土壤、矿石、围岩样品的铅同位素数据 ( $n=52$ )Table 6 Lead isotopic data of fine-grained soil, ore and wall rock samples in Luoboling Cu-Mo mining area ( $n=52$ )

	样品编号	点性	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	误差	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	误差	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	误差
土壤	264-1	背景	38.799	0.006	15.655	0.002	18.555	0.003
	264-2	背景	38.787	0.003	15.64	0.001	18.578	0.001
	264-3	背景	38.805	0.003	15.639	0.001	18.582	0.002
	264-4	背景	38.815	0.004	15.649	0.002	18.611	0.002
	264-5	背景	38.846	0.003	15.661	0.001	18.645	0.001
	264-6	异常	38.804	0.003	15.651	0.001	18.607	0.001
	264-7	异常	38.694	0.003	15.626	0.001	18.481	0.001
	264-8	异常	38.788	0.003	15.655	0.001	18.529	0.002
	264-9	异常	38.751	0.003	15.646	0.001	18.521	0.001
	264-10	异常	38.773	0.005	15.651	0.002	18.492	0.002
	264-11	异常	38.694	0.004	15.627	0.002	18.493	0.002
	264-12	异常	38.754	0.003	15.637	0.001	18.508	0.001
	264-13	异常	38.728	0.004	15.635	0.001	18.48	0.001
	264-14	异常	38.774	0.005	15.636	0.002	18.495	0.002
	264-15	异常	38.773	0.003	15.642	0.001	18.54	0.002
矿石	IX04-7	黄铁矿 <sup>#</sup>	38.767	0.007	15.634	0.008	18.509	0.008
	IX04-8	黄铁矿 <sup>#</sup>	38.951	0.007	15.595	0.003	18.537	0.003
	IX04-10	黄铁矿 <sup>#</sup>	38.899	0.004	15.629	0.001	18.491	0.002
	VI03-10	黄铁矿 <sup>#</sup>	39.067	0.007	15.643	0.003	18.764	0.003
	VII03-7	黄铁矿 <sup>#</sup>	39.215	0.009	15.618	0.003	18.617	0.004
	VII03-8	黄铁矿 <sup>#</sup>	38.864	0.008	15.622	0.003	18.634	0.004
	M1 <sup>#</sup>	辉钼矿 <sup>#</sup>	38.741	0.001	15.655	0.001	18.479	0.001
	M4 <sup>#</sup>	辉钼矿 <sup>#</sup>	38.732	0.011	15.666	0.004	18.48	0.005
	M5 <sup>#</sup>	辉钼矿 <sup>#</sup>	38.751	0.001	15.667	0.001	18.455	0.002
	Py5 <sup>#</sup>	黄铁矿 <sup>#</sup>	38.67	0.013	15.666	0.005	18.493	0.006
	Py8 <sup>#</sup>	黄铁矿 <sup>#</sup>	38.749	0.007	15.667	0.003	18.417	0.004
	Py9 <sup>#</sup>	黄铁矿 <sup>#</sup>	38.752	0.003	15.661	0.001	18.486	0.002
	Py10 <sup>#</sup>	黄铁矿 <sup>#</sup>	38.788	0.003	15.668	0.001	18.476	0.002
	Py11 <sup>#</sup>	黄铁矿 <sup>#</sup>	38.799	0.001	15.67	0.001	18.491	0.001
	Py18 <sup>#</sup>	黄铁矿 <sup>#</sup>	38.773	0.004	15.668	0.002	18.453	0.002
	Py20 <sup>#</sup>	黄铁矿 <sup>#</sup>	38.736	0.001	15.655	0.001	18.473	0.001
	Py23 <sup>#</sup>	黄铁矿 <sup>#</sup>	38.775	0.003	15.658	0.002	18.469	0.002
	Py32 <sup>#</sup>	黄铁矿 <sup>#</sup>	38.743	0.001	15.654	0.001	18.482	0.001
	Py33 <sup>#</sup>	黄铁矿 <sup>#</sup>	38.812	0.007	15.663	0.003	18.502	0.004
	Py34 <sup>#</sup>	黄铁矿 <sup>#</sup>	38.838	0.007	15.674	0.003	18.503	0.004
Py35 <sup>#</sup>	黄铁矿 <sup>#</sup>	38.674	0.002	15.644	0.001	18.426	0.001	
Py36 <sup>#</sup>	黄铁矿 <sup>#</sup>	38.772	0.002	15.66	0.001	18.503	0.001	
Py37 <sup>#</sup>	黄铁矿 <sup>#</sup>	38.815	0.005	15.66	0.002	18.505	0.002	
Py39 <sup>#</sup>	黄铁矿 <sup>#</sup>	38.811	0.008	15.67	0.003	18.498	0.004	
Py40 <sup>#</sup>	黄铁矿 <sup>#</sup>	38.719	0.002	15.65	0.001	18.456	0.001	
围岩	IX04-20	非赋矿岩体	39.358	0.004	15.659	0.001	19.243	0.002
	VI03-4	非赋矿岩体	39.854	0.004	15.709	0.002	19.86	0.002
	VI03-20	非赋矿岩体	39.463	0.006	15.668	0.002	19.349	0.003
	VII03-15	非赋矿岩体	39.025	0.003	15.647	0.001	18.936	0.001
	VII03-17	非赋矿岩体	39.352	0.004	15.695	0.001	19.253	0.002
	ZK4012-1 <sup>#</sup>	非赋矿岩体	38.721	0.001	15.647	0.001	18.575	0.001
	16-308 <sup>#</sup>	非赋矿岩体	38.823	0.001	15.665	0.001	18.525	0.001
	ZL-1-4 <sup>#</sup>	非赋矿岩体	38.777	0.003	15.654	0.001	18.538	0.001
	IX-01-3 <sup>#</sup>	非赋矿岩体	38.864	0.002	15.648	0.001	18.634	0.001
	IX01-4 <sup>#</sup>	非赋矿岩体	38.826	0.001	15.654	0.001	18.589	0.001
	IX01-7 <sup>#</sup>	非赋矿岩体	38.785	0.001	15.643	0.001	18.565	0.001
	IX01-10 <sup>#</sup>	非赋矿岩体	38.803	0.002	15.652	0.001	18.627	0.001

注:铅同位素误差以  $2\sigma$  计;“#”表示数据引自文献[40]。

围分别为 38.721~39.854、15.643~15.709、18.525~19.86, 相比矿石样品,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值明显增高。在  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (图 6a) 图解中投点落于造山带附近, 具有深部岩浆来源特征, 在  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (图 6b) 图解中投点大多落于造山带附近, 个别投点落在上地壳附近, 亦显示出深部岩浆来源特征。土壤铅同位素整体介于矿石与围岩之间, 相比矿石样品, 具有更小变化范围, 分布更为集中, 其中异常区土壤  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  的范围分别为 38.694~38.804、15.626~15.655、18.48~18.607, 背景区土壤  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  的范围分别为 38.787~38.846、15.639~15.661、18.555~18.645, 异常区土壤 3 种铅同位素组成均略低于背景区土壤样品。在  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (图 6a)、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (图 6b) 图解中, 土壤样品投点落于造山带附近, 同样表现出具有深部岩浆来源特征。区别在于异常区土壤投点明显更接近矿石投点分布范围, 而背景区土壤投点更靠近围岩投点分布范围。

首先利用 SPSS 软件对不同介质的 3 种铅同位素数据进行单因素方差分析, 来检验数据间的差异性, 结果见表 7。异常区土壤和背景区土壤  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  的  $P$  值分别为 0.01、0, 均小于 0.05, 存在显著差异, 表明两者 2 种铅同位素组成特征明显不同。从统计学的角度来看, 这两组数据可以进一步分析。而  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  的  $P$  值为 0.16, 大于 0.05, 不存在显著差异, 表明两者铅同位素组成特征相似。从统计学的角度来看, 这两组数据不能进一步分析; 矿石样品与围岩样品  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  的  $P$  值为 0.2, 大于 0.05, 不存在显著差异, 表明两者铅同位素组成特征相似, 围岩样品有矿石铅同位素的参与; 异常区土壤样品与矿石样品  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  的  $P$  值分别为 0.17、0.07、0.66, 均大于 0.05, 不存在显著差异, 表明两者 3 种铅同位素组成特征相似, 异常区土壤样品继承了矿石的铅同位素特征。异常区土壤样品与围岩样品  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  的  $P$  值分别为 0.02、0.01、0.01, 均小于 0.05, 均存在显著差异, 表明两

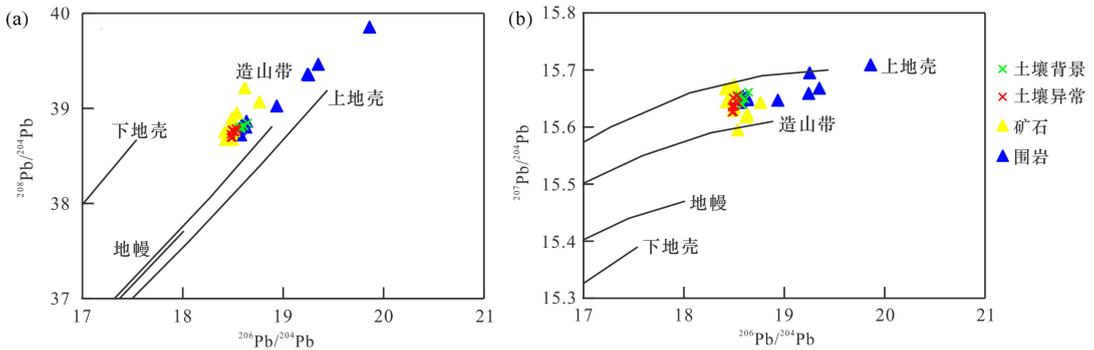


图 6 罗卜岭铜钼矿区矿石、围岩、土壤背景和土壤异常  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (a)、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (b) 图解

Fig. 6  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  vs.  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (a)、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  vs.  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (b) composition diagrams of ores, wall rocks, soil background and soil anomalies in the Luoboling Cu-Mo mining area

表 7 罗卜岭矿区不同介质铅同位素数据单因素方差分析  $P$  值

Table 7  $P$  values of variance analysis of lead isotope data of different media in Luoboling mining area

铅同位素	介质	矿石	围岩	土壤背景	土壤异常
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	矿石	1			
	围岩	0	1		
	土壤背景	0.01	0.16	1	
	土壤异常	0.66	0.01	0	1
$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	矿石	1			
	围岩	0.2	1		
	土壤背景	0.67	0.2	1	
	土壤异常	0.07	0.01	0.16	1
$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	矿石	1			
	围岩	0	1		
	土壤背景	0.97	0.16	1	
	土壤异常	0.17	0.02	0.01	1

者 3 种铅同位素组成特征明显不同;背景区土壤样品与矿石样品  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  的  $P$  值为 0.01, 小于 0.05, 存在显著差异, 而两者  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  的  $P$  值分别为 0.97、0.67, 均大于 0.05, 不存在显著差异, 背景区土壤样品可能部分继承了矿石铅同位素特征。背景区土壤样品与围岩样品  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  的  $P$  值分别为 0.16、0.2、0.16, 均大于 0.05, 不存在显著差异, 表明两者 3 种铅同位素组成特征相似。

在  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  图解(图 7)上, 矿石、围岩、土壤样品投点近似呈一条直线分布且土壤样品投点介于矿石、围岩之间, 异常区土壤样品投点更接近矿石分布范围而背景区土壤样品投点更接近围岩分布范围, 表明该矿区土壤铅同位素的来源几乎没有外来干扰, 而是继承了矿区矿石、围岩铅同位素特征。矿石、围岩部分样品投点几乎重合, 这是因为本次采集样品除了中寮似斑状花岗闪长岩、才溪二长花岗岩等非赋矿围岩外, 还有少量成矿母岩——罗卜岭花岗闪长斑岩。以上结果与方差分析得出的结论一致。

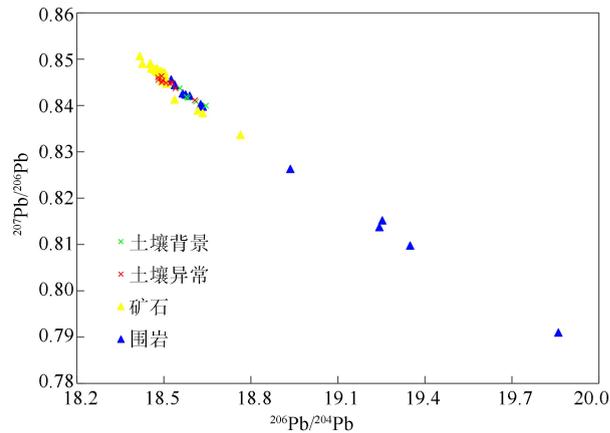


图 7 罗卜岭矿区不同介质  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  图解  
Fig. 7 Diagram of  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  vs.  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  for various media in Luoboling mining area

从背景区土壤到异常区土壤,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值均有降低的趋势(图 8),  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值在异常区的最大值(18.540)比在背景区的最小值(18.555)还低,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值在异常区的最大值(38.788)与背景区的最小值(38.787)非常接近, 但  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值在异常区虽有降低的趋势, 但这种趋势还不足以造成显著的差异。另外, 由上文方差分析可知, 背景区土壤样品与矿石样品  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  的  $P$  值大于 0.05, 不存在显著差异, 背景区土壤样品可能部分继承了矿石铅同位素特征, 而  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  的  $P$  值小于 0.05, 二

者不存在显著差异, 背景区土壤样品没有矿石铅同位素特征。因此, 综合来看,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  在地表土壤中的变化与下伏隐伏矿体的分布吻合度最好, 可以有效指示和示踪深部隐伏矿体。

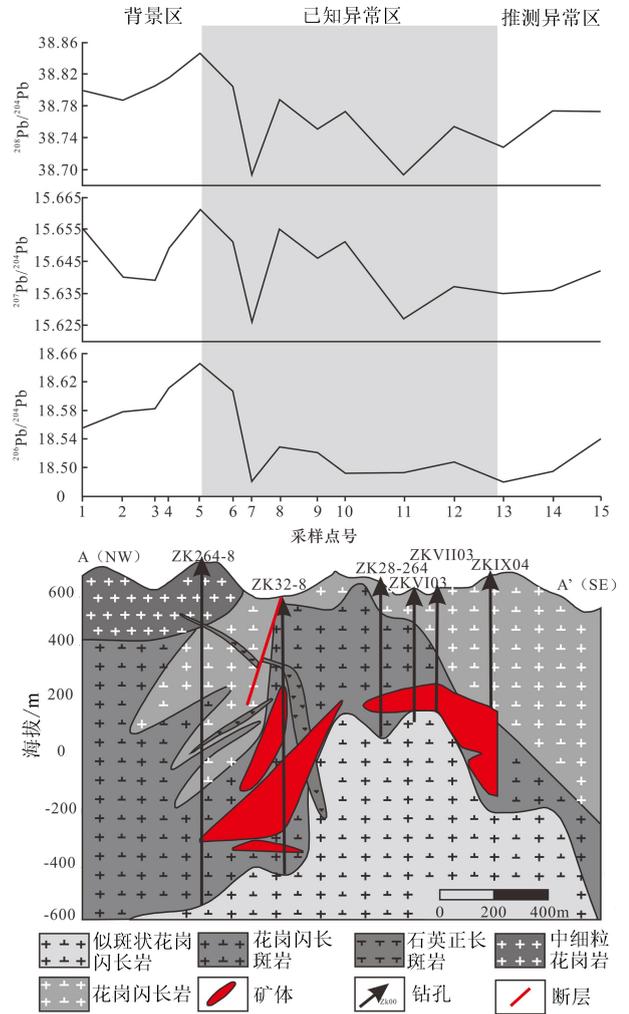


图 8 罗卜岭矿区 264 勘探线微细粒级土壤全量中铅同位素组成分布

Fig. 8 Lead isotope distribution of total soil fine particles along exploration line 264 of Luoboling mining area

### 5 结论

本文在已知隐伏矿罗卜岭斑岩型铜铅矿床上方采集了表层土壤以及典型钻孔中的矿石和围岩样品, 分析了 6 个微量元素(Cu、Mo、Ba、Pb、Zn、V)的含量变化以及硫、铅同位素的组成特征, 来验证土壤金属活动态测量技术、微细粒级土壤全量测量技术在隐伏矿区的找矿效果, 并根据铅、硫同位素的组成特征来识别地表矿致异常的来源。研究表明:

1) 地表微细粒级土壤全量中 Cu、Ba、Mo 的含量高值区与深部隐伏矿体的展布相关性较强, 对于

预测深部矿体的规模有一定的指示意义,而 V、Pb、Zn 可以较为准确地圈定出接近地表矿化岩体的范围。

2) 结合地表异常和矿体形态规模,土壤活动态、微细粒级土壤全量均显示出 14、15 号采样点下方极有可能存在着隐伏矿体。两种测量方法均可以根据 V、Pb、Zn 的含量变化较为准确地圈定出接近地表矿化岩体的范围。相比于微细粒级土壤全量,活动态的 Cu、Ba、Mo 的高值区与下伏隐伏矿体的展布相关性较差,这可能是因为本次研究采用的活动态提取方法仅包括金属的水溶态和黏土吸附态,但本矿区处于中亚热带气候,土壤富含大量的有机质和铁锰氧化物,活动态的金属可能主要以有机相态和铁锰氧化物相态存在,所以指示隐伏矿体分布的效果较差。建议针对不同的地貌特征发展不同的活动态提取技术。

3) 从矿石→背景区土壤→围岩→异常区土壤,硫同位素的组成逐渐增大,且除矿石硫同位素组成较为集中外,其他介质中的硫同位素组成变化范围较宽,组成较为分散。异常区土壤全量样品  $\delta^{34}\text{S}$  的平均值明显高于背景区,说明异常区土壤全量样品确实明显受到深部矿体中  $(\text{S}_2)^{2-}/\text{S}^{2-}$  运移至地表被氧化而富集重同位素的影响,但土壤异常区、围岩两者的硫同位素组成集中区特征相似,表明土壤异常区的硫同位素组成大多数信息继承自非赋矿围岩,而不能反映隐伏矿的硫同位素组成,建议测量活动态中的硫同位素组成更为合理。

4) 单因素方差分析显示异常区土壤全量样品  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  的比值与矿石不存在显著差异,异常区土壤样品继承了矿石的铅同位素特征,从而为微细粒级土壤全量测量用于覆盖区矿产勘查提供了理论基础。背景区土壤全量样品仅  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  的比值与矿石存在显著差异且  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  在地表土壤中的变化与下伏隐伏矿体的分布的吻合度最好,可以有效指示深部隐伏矿体。

## 参考文献 (References):

- [1] Ryss Y S, Goldber G I S. The partial extraction of metals (CHIM) method in mineral exploration [J]. *Method and Technique*, 1973, 84: 5 - 19.
- [2] Kristiansson K, Malmqvist L. Evidence for nondiffusive transport of  $^{86}\text{Rn}$  in the ground and a new physical model for the transport [J]. *Geophysics*, 1982, 47(10): 1444 - 1452.
- [3] Clark J R. Enzyme-induced leaching of B-horizon soils for mineral exploration in areas of glacial overburden [J]. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy Section B-Applied Earth Sci-*
- [4] Mann A W, Birrell R D, Mann A T, et al. Application of the mobile metal ion technique to routine geochemical exploration [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1988, 61: 87 - 102.
- [5] Wang X Q, Cheng Z Z, Lu Y X, et al. Nanoscale metals in earth-gas and mobile forms of metals in overburden in wide-spaced regional exploration for giant deposits in overburden terrains [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1997, 58: 63 - 72.
- [6] Wang X Q. Leaching of mobile forms of metals in overburden: development and application [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1998, 61: 39 - 55.
- [7] 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 - 108.  
Wang X Q. Geochemical methods and application for giant ore deposits in concealed terrains [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1998, 22(2): 81 - 108.
- [8] 汪明启,高玉岩. 利用铅同位素研究金属矿床地气物质来源: 甘肃蛟龙掌铅锌矿床研究实例 [J]. *地球化学*, 2007, 36(4): 391 - 399.  
Wang M Q, Gao Y Y. Tracing source of geogas with lead isotopes: A case study in Jiaolongzhang Pb-Zn deposit, Gansu Province [J]. *Geochimica*, 2007, 36(4): 391 - 399.
- [9] 徐洋,汪明启,高玉岩,等. 利用铅同位素研究山东邹平王家庄铜矿地气物质来源 [J]. *物探与化探*, 2014, 38(1): 23 - 27.  
Xu Y, Wang M Q, Gao Y Y, et al. Tracing the source of geogas materials with the lead isotope method in the Wangjiazhuang copper ore deposit of Zouping, Shandong Province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2014, 38(1): 23 - 27.
- [10] 刘雪敏,陈岳龙,王学求. 深穿透地球化学异常源同位素识别研究:以新疆金窝子金矿床、内蒙古拜仁达坝-维拉斯托多金属矿床为例 [J]. *现代地质*, 2012, 26(5): 1104 - 1116.  
Liu X M, Chen Y L, Wang X Q. Research on isotope identification for anomalous sources of deep penetration geochemistry: two cases of Jinwozi Au deposit, Xinjiang and Bairendaba-weilasituo polymetallic deposit, Inner Mongolia [J]. *Modern Geology*, 2012, 26(5): 1104 - 1116.
- [11] Saunders J A, Mathur R, Kamenov G D, et al. New isotopic evidence bearing on bonanza (Au-Ag) epithermal ore-forming processes [J]. *Mineralium Deposita*, 2015, 51(1): 1 - 11.
- [12] Matthew I L, Brian L C, Wayne D G. Lead isotopes in ground and surface waters: fingerprinting heavy metal sources in mineral exploration [J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2009, 9: 115 - 123.
- [13] Caritat P D, Kirste D, Carr D, et al. Groundwater in the broken hillregion, Australia: Recognising interaction with bedrock and mineralisation using S and Pb isotopes [J]. *Applied Geochemistry*, 2005, 20(4): 767 - 787.
- [14] 于波,裴荣富,邱小平,等. 福建紫金山矿田中生代岩浆岩演化序列研究 [J]. *地球学报*, 2013, 34(4): 437 - 446.  
Yu B, Pei R F, Qiu X P, et al. The evolution series of mesozoic magmatic rocks in the Zijinshan orefield, Fujian province [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2013, 34(4): 437 - 446.
- [15] 林东燕,陈郑辉. 福建上杭拉分盆地与紫金山铜金矿床成矿关

- 系[J]. 西安科技大学学报, 2011, 31(4): 438-442.
- Lin D Y, Cheng Z H. Relationship between Shanghang pull-apart basin in Fujian and Zijinshan copper-gold deposit mineralization [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2011, 31(4): 438-442.
- [16] 王少怀, 裴荣富, 曾宪辉, 等. 再论紫金山矿田成矿系列与成矿模式[J]. 地质学报, 2009, 83(2): 145-157.
- Wang S H, Pei R F, Zeng X H, et al. Metallogenic series and model of the Zijinshan mining field [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2009, 83(2): 145-157.
- [17] 张德全, 余宏全, 阎升好, 等. 福建紫金山地区中生代构造环境转换的岩浆岩地球化学证据[J]. 地质论评, 2001, 3(6): 608-616.
- Zhang D Q, Sheng H Q, Yan S H, et al. Geochemistry of mesozoic magmatites in the Zijinshan regine and implication on regional tectonal inversion [J]. Geological Review, 2001, 23(6): 608-616.
- [18] 黄仁生. 福建省紫金山铜金矿床成矿物理化学条件的研究[J]. 福建地质, 1994, 26(3): 159-173.
- Huang R S. On the metallogenic physicochemical conditions of the Zijinshan copper-gold deposit in Fujian Province [J]. Geology of Fujian, 1994, 26(3): 159-173.
- [19] 陶建华, 许春林. 福建上杭紫金山铜金矿床控岩控矿构造分析[J]. 福建地质, 1992, 26(3): 186-203.
- Tao J H, Xu C L. Discussion on the rock and ore-controlling structures of the Zijinshan Copper-gold deposit in Shanghang country, Fujian Province [J]. Geology of Fujian, 1992, 26(3): 186-203.
- [20] 潘天望, 袁远, 吕勇, 等. 福建紫金山矿田早白垩世以来构造演化 and 成岩成矿时空格架[J]. 地质力学学报, 2019, 25(1): 61-76.
- Pan T W, Yuan Y, Lyu Y, et al. The early-cretaceous tectonic evolution and the spatial-temporal framework of magmatism mineralization in Zijinshan ore-field, Fujian province [J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(1): 61-76.
- [21] 陈素余, 王少怀, 黄宏祥. 紫金山深部铜矿物特征研究[J]. 矿床地质, 2014, 33(S1): 667-668.
- Chen S Y, Wang S H, Huang H X. Study on the characteristics of deep copper deposits in Zijinshan [J]. Mineral Deposite, 2014, 33(S1): 667-668.
- [22] Zhong J, Chen Y J, Pirajno J, et al. Geology geochronology, fluid inclusion and H-O isotope geochemistry of the Luoboling porphyry Cu-Mo deposit, Zijinshan orefield, Fujian Province, China [J]. Ore Geology Reviews, 2014, 57: 61-77.
- [23] 赖晓丹, 祁进平, 邱小平, 等. 福建省上杭县罗卜岭斑岩型铜钼矿床含矿裂隙研究[J]. 矿床地质, 2012, 31(S1): 853-854.
- Lai X D, Qi J P, Qiu X P, et al. Study on ore-bearing fractures of Luobaling porphyry copper-molybdenum deposit in Shanghang County, Fujian Province [J]. Mineral Deposite, 2012, 31(S1): 853-854.
- [24] 郭祥清. 福建上杭县罗卜岭斑岩型铜矿蚀变、矿化分带及找矿标志[J]. 世界有色金属, 2020, 11(8): 58-61.
- Guo X Q. The characteristics of alteration and mineralization zone and the prospecting indicator in the Luoboling porphyry Cu-Mo deposit, Shanghang, Fujian [J]. World Nonferrous Metals, 2020, 11(8): 58-61.
- [25] 王进焱, 祁进平, 李晶, 等. 罗卜岭斑岩铜(钼)矿床围岩蚀变及矿化特征探讨[J]. 矿物学报, 2013, 33(S2): 833-834.
- Wang J Y, Qi J P, Li J, et al. Study on alteration and mineralization of surrounding rock of Luobling porphyry copper (molybdenum) deposit [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2013, 33(S2): 833-834.
- [26] 郭祥清, 祁进平. 福建上杭罗卜岭铜(钼)矿床地质特征及找矿标志[J]. 矿物学报, 2013, 33(S2): 903-904.
- Guo X Q, Qi J P. Geological characteristics and prospecting criteria of Luobuling copper (molybdenum) deposit in Shanghang, Fujian [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2013, 33(S2): 903-904.
- [27] 王学求, 刘占元, 叶荣, 等. 新疆金窝子矿区深穿透地球化学对比研究[J]. 物探与化探, 2003, 27(4): 247-254.
- Wang X Q, Liu Z Y, Ye R, et al. Deep-penetrating geochemistry: a comparative study in the Jinwozi gold ore district, Xinjiang [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2003, 27(4): 247-254.
- [28] 刘汉粮, 王学求, 张必敏, 等. 沙泉子隐伏铜镍矿地球化学勘查方法试验[J]. 物探与化探计算技术, 2014, 36(6): 200-206.
- Liu H L, Wang X Q, Zhang B M, et al. Geochemical exploration for concealed Cu-Ni deposit, Shaquanzi, Xinjiang [J]. Computational Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 36(6): 200-206.
- [29] 唐金荣, 吴传璧, 施俊法. 深穿透地球化学迁移机理与方法技术研究新进展[J]. 地质通报, 2007, 12(12): 1579-1590.
- Tang J R, Wu C B, Shi J F. Recent progress in the study of the deep-penetrating geochemical migration mechanisms and methods [J]. Geological Bulletin of China, 2007, 12(12): 1579-1590.
- [30] 刘汉粮, 张必敏, 刘东盛, 等. 土壤微细粒全量测量在甘肃花牛山矿区的应用[J]. 物探与化探, 2016, 40(1): 33-39.
- Liu H L, Zhang B M, Liu D S, et al. The application of soil geochemical measurement method to the Huanishan Pb-Zn deposit, Gansu Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(1): 33-39.
- [31] 韩志轩, 张必敏, 乔宇, 等. 隐伏铜矿区土壤微细粒测量有效性实验——以江西通江岭铜矿为例[J]. 地球学报, 2020, 41(6): 977-986.
- Han Z X, Zhang B M, Qiao Y, et al. Validity experiments of fine-grained soil geochemical survey for exploring concealed copper deposits: A case study in the Tongjiangling copper deposit, Jiangxi province [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2020, 41(6): 977-986.
- [32] 陈振金, 陈春秀, 刘用清, 等. 福建省土壤元素背景值及其特征[J]. 中国环境监测, 1992, 12(3): 107-110.
- Chen Z J, Chen C X, Liu Y Q, et al. Background values and characteristics of soil elements in Fujian province [J]. Environmental Monitoring in China, 1992, 12(3): 107-110.
- [33] Zhang B M, Wang X Q, Ye R, et al. Geochemical exploration for concealed deposits at the periphery of the Zijinshan copper-gold mine, south-eastern China [J]. Journal of Geochemical Explora-

- tion, 2015, 157: 184–193.
- [34] 赵辰, 文美兰, 吴彦彬, 等. 碳硫分析在不同地球化学覆盖区的找矿应用研究[J]. 桂林理工大学学报, 2021, 4(1): 42–46.  
Zhao C, Wen M L, Wu Y B, et al. Prospecting application of carbon-sulfur analysis in different geochemical cover areas [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2021, 4(1): 42–46.
- [35] 宓奎峰, 柳振江, 李春风, 等. 内蒙古乌努格吐山大型铜钼矿床元素迁移及成矿过程探讨[J]. 中国地质, 2014, 41(4): 1270–1287.  
Mi K F, Liu Z J, Li C F, et al. Metallogenic processes and migration of ore-forming elements in the Wunugetushan porphyry Cu-Mo deposit, Inner Mongolia [J]. Geological in China, 2014, 41(4): 1270–1287.
- [36] 宋雷鹰. 内蒙古哈如勒敖包矿区金属活动态测量的试验效果[J]. 科技情报开发与经济, 2010, 20(7): 174–176.  
Song L Y. Analysis on the test results of MOMEQ of Haruleaobao mining area, Xinbaerhu right banner, Inner Mongolia [J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2010, 20(7): 174–176.
- [37] 杨刚刚, 李方林, 张雄华. 金属活动态测量在东戈壁钼矿找矿效果研究[J]. 新疆地质, 2018, 36(2): 182–188.  
Yang G G, Li F L, Zhang X H. The prospecting effect research of East gobi molybdenum ore using MOMEQ [J]. Xinjiang Geology, 2018, 36(2): 182–188.
- [38] 常华进, 储雪蕾, 黄晶, 等. 沉积环境细菌作用下的硫同位素分馏[J]. 地质评论, 2007, 53(6): 807–813.  
Chang H J, Chu X L, Huang J, et al. Sulfur isotope fractionation accompanying bacterial action under sedimentary condition [J]. Geological Review, 2007, 53(6): 807–813.
- [39] Habick K, Canfield D E, Rathemeier J. Sulfur isotope fractionation during bacterial reduction and disproportionation of thiosulfate and sulfite [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1998, 62(15): 2585–2595.
- [40] 李斌. 福建紫金山矿田中生代岩浆演化与铜金钼成矿作用地球化学研究[D]. 南京: 南京大学, 2015.  
Li B. Geochemistry of mesozoic magmatic rocks and related Cu-Au-Mo mineralizations in the Zijinshan ore field of Fujian Province [D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.
- [41] 杜思敏. 硫同位素在示踪金属矿床成矿物质来源中的应用[J]. 化工矿产地质, 2019, 41(3): 296–310.  
Du S M. Application of sulphur isotope in tracing ore-forming material sources of metal deposits [J]. Geology of Chemical Minerals, 2019, 41(3): 296–310.

## Tracing and identification of concealed Luoboling copper-molybdenum deposit in Fujian Province using trace elements and isotopes in fine-grained surface soils

LI Jian-Ting<sup>1</sup>, LIU Xue-Min<sup>1</sup>, WANG Xue-Qiu<sup>2</sup>, HAN Zhi-Xuan<sup>2</sup>, JANG Yao<sup>1</sup>

(1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China)

**Abstract:** This paper collected surface soil above the known concealed deposit the Luoboling porphyry-type copper-molybdenum deposit and acquired samples of ore and surrounding rocks from typical boreholes of the deposit. Then, it analyzed the changes in the contents of six trace elements (Cu, Mo, Ba, Pb, Zn, and V) and the isotopic composition of S and Pb, aiming to verify the ore prospecting effects of the measurement technology of mobile forms of metals in soil and full analysis of fine-grained soil in concealed deposits and to identify the sources of surface geochemical anomalies according to the isotopic composition of Pb and S. The study results are as follows. The total analysis of fine-grained soil showed the best effects in indicating deep ore bodies in the Luoboling deposit, and the areas with high contents of Cu, Ba, and Mo correlated strongly with the distribution of deeply concealed ore bodies. Both the mobile forms of metals in the soil and the total analysis of fine-grained soil showed that it is quite possible that concealed ore bodies occur below sampling points No. 14 and 15. Meanwhile, the changes in the contents of V, Pb, and Zn obtained using both methods can accurately delineate the scopes of mineralized rock masses close to the ground surface. However, most of the total sulfur isotopic composition in the soil of anomaly zones inherits from the non-ore-hosting surrounding rocks and masked the contribution from the deep ore bodies. Consequently, sulfur isotopes showed poor effects in indicating the sources of anomalies in the surface soil in the Luoboling deposit. Therefore, it is more reasonable to measure the sulfur isotopic composition according to the mobile forms of metals in the soil. In contrast, the total Pb isotopes in the soil of the anomaly zones inherit the characteristics of the Pb isotopes of deep ore bodies. This serves as direct evidence of full analysis of fine-grained soil in the mineral exploration of coverage areas. Moreover, the changes in the <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb ratio in the full analysis of surface fine-grained soil correlated strongly with the distribution of underlying concealed ore bodies and thereby can effectively indicate the deep concealed ore bodies.

**Key words:** Luoboling copper-molybdenum deposit; lead and sulfur isotopes; trace elements; fine particle soil survey; ore prospecting of coverage areas