

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

刘雪敏^{1,2}, 陈岳龙¹, 王学求²

(1. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083;

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: 通过研究两个已知隐伏矿床(新疆金窝子金矿床、内蒙古拜仁达坝—维拉斯托多金属矿床)不同介质(地气、细粒级土壤、围岩、矿石)中的铅、硫同位素特征,探讨铅、硫同位素对地气、土壤中异常物质来源的示踪,得到以下结论:(1)两矿床的介质从地气、矿石、围岩到土壤,铅同位素比值($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)一般依次增加;土壤异常区相对土壤背景区, $\delta^{34}\text{S}$ 偏高。但对两个矿床背景区、异常区地气中的铅同位素组成、土壤中的铅、硫同位素组成进行方差分析后发现,数据均没有明显的差异,从统计学的角度初步证明研究区不适宜用铅、硫同位素示踪地气、土壤中异常物质的来源。(2)两个矿床的矿石、围岩中铅同位素组成均有明显差异,即围岩中明显有放射成因铅的积累。但这种差异没有显著地反映到背景区、异常区的地气中,原因有待进一步查证。仅从捕获剂的角度初步探讨了其原因。用土壤全量中铅、硫同位素组成特征来示踪土壤异常源,并没有成功,建议采用偏提取的方法测量其中活动态中的铅、硫同位素组成,在深穿透地球化学研究中更合理。

关键词: 深穿透地球化学; 同位素; 新疆金窝子金矿床; 内蒙古拜仁达坝—维拉斯托矿床

中图分类号: P632; P618.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-8527(2012)05-1104-13

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

LIU Xue-min^{1,2}, CHEN Yue-long¹, WANG Xue-qiu²

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang, Hebei 065000, China)

Abstract: Through research on lead and sulfur isotopic characteristics of different media (earthgas, fine-grained soil, surrounding rock, ore) in two known concealed deposits (Jinwozi gold deposit in Xinjiang, Bairendaba-Weilasituo polymetallic deposit in Inner Mongolia), the following conclusions are drawn in this paper. In these two deposits, lead isotopic ratios ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) generally increased from the earthgas, ores, surrounding rocks to the soil. The $\delta^{34}\text{S}$ of anomaly zones was higher than that of soil background areas. The test of variance analysis on the lead isotopic compositions of earthgas, the lead and sulfur isotopic characteristics of soil proved no significant isotopic differences between background and abnormal areas, which preliminarily proved that it is inappropriate to trace the source of abnormal substances by lead, sulfur isotope of earthgas and soil in these two deposits. But the Pb isotopic compositions of ores and surrounding rocks in these two deposits were significantly different. That is, the surrounding rocks obviously have accumulation of radio-

收稿日期: 2012-04-20; **改回日期:** 2012-07-07; **责任编辑:** 戚开静。

基金项目: 国家“863”计划项目“深穿透地球化学探测与识别技术的同位素异常源识别技术课题”(2007AA06Z133)。

作者简介: 刘雪敏,女,博士研究生,1987年出生,地球化学专业,主要从事应用地球化学研究。

Email: liuxuemin8944@gmail.com。

genic lead. However, this difference was not significantly reflected in the earthgas of background and abnormal areas. This paper discussed its reasons only from the perspective of the capture fluids. Lead, sulfur isotopic compositions in the soil were analyzed to trace the source of abnormal substances in this paper, which was not successful. Further research will adopt partial extraction method to measure lead, sulfur isotopic compositions in active phase of soil.

Key words: deep-penetration geochemistry; isotope; Jinwozi gold deposit in Xinjiang; Bairendaba-Weilasituo polymetallic deposit in Inner Mongolia

0 引言

深穿透地球化学是地球化学的新兴分支领域,在找矿上的应用大部分还处于试验阶段,有很多理论需要完善,很多问题需要解决。在我国,用深穿透地球化学方法中的地气法找隐伏矿的研究较多,发展较快,有很多在已知矿床上试验成功的例子^[1-3],也有不少在寻找隐伏矿和盲矿上的成功运用^[4-7]。对于地气的测试对象,伍宗华等^[8]用 Cr、Co、Ni、Cu、Pb、Zn 等微量元素以及 Hg_气、Hg_土、CH₄、CO₂ 等气体;刘应汉等^[9]分析了 Cu、Ni、Co、Ag、Pb、Zn、Fe、Mn 8 种成矿或伴生元素;高玉岩等^[10]测试了地气中 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Bi、Sb、Cr、Ni、Co、Fe、Mn、Sn、REE 等 50 余种元素;汪明启等^[11]用 ICP-MS (等离子质谱法)测定地气样品中的 Cu、Au、Ag、Pb、Zn 等 40 多种微量和稀土元素,他还在甘肃蛟龙掌铅锌矿床^[12]研究地气中的铅同位素组成。可以看出,前人研究隐伏矿上的地气大部分用与成矿有关的元素或微量元素。本文通过研究两个已知隐伏矿床(新疆金窝子矿床、内蒙古拜仁达坝—维拉斯托矿床)上地气、土壤样品中铅、硫同位素组成来示踪地气、土壤中异常物质的来源。

从理论上讲,用铅、硫同位素组成示踪地气、土壤中异常物质的来源有可能实现。矿体中 U、Th 含量低,放射成因铅少,矿石的²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 在矿床演化过程中几乎不发生变化;而 U、Th 为不相容元素,在围岩中含量高,土壤又是地表岩石经过风化搬运作用形成的,所以围岩和土壤中的放射成因铅多,²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 值随时间不断增加。地气在从下至上的搬运过程中经过矿体、围岩、土壤,各介质都对地气中的铅同位素组成有贡献,因为矿体中铅同位素比值较低,所以异常区相对于背景区的地气中铅同位素比值也会相应降低。土壤

中的铅同位素组成主要由土壤本身和空气决定,地气也会被细粒级土壤表面吸附,所以异常区的土壤铅同位素会相应改变。

矿石大部分为硫化物,矿体周围的 S²⁻ 浓度高,它在地气流的作用下运移到地表,而在自然界表生环境中存在这样一类细菌(Thiobacilli、Beggiatoa 和 Sulfolobus 等^[13]),它们能氧化硫化物并形成高价态的化合物,使重的硫同位素聚集在重新形成的氧化物中,造成较小(5‰)的同位素分馏^[14]。因为在平衡条件下,重同位素倾向于富集在具有较强硫键的化合物中,即由低价到高价, $\delta^{34}\text{S}$ 依次升高。从理论上讲,异常区土壤中的 $\delta^{34}\text{S}$ 值比背景区高。

1 隐伏矿床地质概况

1.1 金窝子矿床地质概况

金窝子金矿床位于东天山—北山成矿带,在大地构造上位于塔里木板块北缘,与西伯利亚板块相邻^[10-12]。该矿区由 2 条矿带组成(图 1):北带为金窝子金矿床,属岩浆期后热液型矿床,为剥蚀出露矿^[10-11],不属于本次研究的对象。南带为 210 金矿床,为构造蚀变岩型,受北东向构造断裂带控制。

210 金矿带由多个矿体组成,矿体与地层产状一致,矿体含矿围岩为上泥盆统金窝子组碳质页岩和火山碎屑岩。矿石均以多金属硫化物—石英型、黄铁矿—石英型为主,其次是黄铁绢英岩化花岗闪长岩型矿石。脉石矿物主要有石英(通常大于 88%),其次是方解石、绢云母、绿泥石、白铁矿等。贵金属矿物包括自然金、金银矿和银金矿^[13]。矿区地表普遍被第四系戈壁所覆盖,覆盖厚度从几米至十几米不等。研究区覆盖层厚度自北部金窝子金矿向南部的 210 金矿逐渐加大。由于该矿区位于典型的戈壁区,矿体被运积物所覆盖而非露天开采,所以是荒漠戈壁区深穿透地球

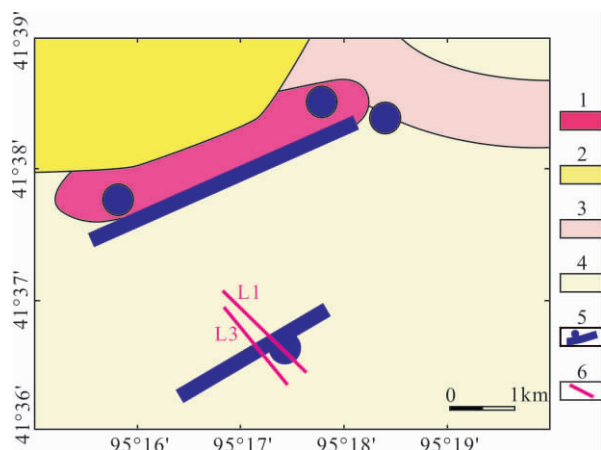


图1 金窝子金矿床地质概况图(据文献[1]修改)

Fig. 1 Generalized geological map of Jinwozi gold deposit

1. 花岗闪长岩; 2. 泥盆系(变质凝灰岩、碳质凝灰岩和火山碎屑岩); 3. 古近纪砂岩; 4. 第四纪风化沉积物(风成砂、残积物、崩积物); 5. 矿体与蚀变带; 6. 采样线

化学研究的理想选区^[2]。

1.2 拜仁达坝—维拉斯托矿床地质概况

拜仁达坝—维拉斯托银多金属矿床位于兴安造山带东缘、大兴安岭中南段西坡。基底结构呈多元化,主要为古生界褶皱基底,其次为中生代火山岩。在古生界褶皱基底内又有前寒武系结晶基底镶嵌其间,矿床位于前寒武系结晶基底构造层。区内地层出露较为齐全,矿区就位于米生庙复背斜西段轴部^[4-13]。拜仁达坝—维拉斯托也是典型的隐伏矿床(图2)。

2 样品采集与分析方法

采样前先垂直于矿体走向布置采样线,再沿采样线采集地气、土壤和岩石。其中金窝子矿床共布置 L1 和 L3 两条采样线(图1),维拉斯托、拜仁达坝各布置一条采样线(图2)。

地气捕获剂为 5% 的硝酸,采用主动抽气的螺旋采样器^[14]。GPS 选定采样点后,用钢钎钻取深 40~50 cm 深孔,将螺旋钻头插入孔中,连接到装有溶液的多孔 U 形瓶一端,另一端连接抽气筒,抽取完气体后,将捕获液倒入到处理过的塑料瓶中,盖好并用石蜡密封。采集土壤样品时在每个采样点铲除地表土壤后,取深部土壤装入布袋。在每一开采矿区的坑道从围岩到矿体系统采集代表性岩石、矿石样品 3~5 件。

取溶液样品(地气)进行铅同位素分析,土壤和岩石样品进行铅、硫同位素分析。土壤和岩石样品首先送至中国地质科学院地球物理地球化学

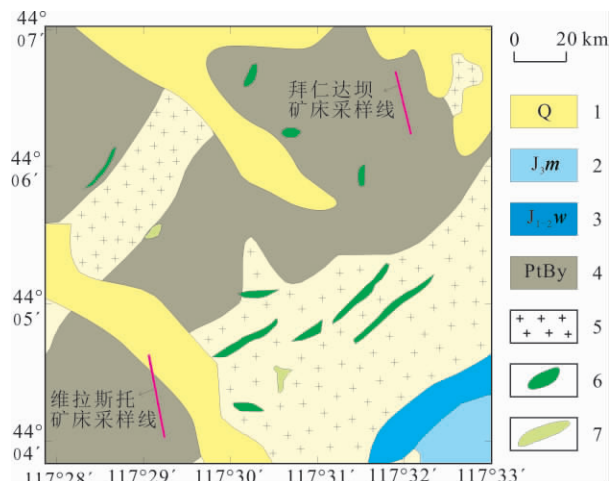


图2 内蒙古拜仁达坝矿床和维拉斯托矿床地质图

(据内蒙古第九矿产勘查开发院 1:20 万化探普查图修改)

Fig. 2 Geological map of Bairendaba and Weilasituo deposit,

Inner Mongolia

1. 第四系; 2. 侏罗系上统满克头鄂博组; 3. 侏罗系中下统万宝山组; 4. 下元古界宝音图组; 5. 华力西中期石英闪长岩; 6. 辉绿辉长岩类; 7. 石英脉

勘查研究所碎至 200 目(74 μm),再把粉末样和溶液样品送至核工业北京地质研究院进行铅、硫同位素分析。粉末样和溶液样品按照《GB/T 17672—1999 岩石中铅铋钨同位素测定方法》进行铅同位素分析;粉末样按照《DZ/T0184.15—1997 硫酸盐中硫同位素组成的测定》进行硫同位素分析。

3 分析结果

3.1 金窝子矿床铅、硫同位素特征

3.1.1 金窝子矿床铅同位素特征

新疆金窝子矿床各介质铅、硫同位素数据,包括本次研究测试的数据和前人的数据,如表1所示。根据新疆金窝子金矿床铅同位素 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解(图3)讨论铅同位素组成特征。

地气(捕集液捕集,即溶液)的 3 种铅同位素比值明显与土壤、岩石不同,表现为同位素比值,特别是异常区的地气中的比值偏低;同位素比值变化范围宽。溶液的铅同位素有的来自捕集液,有的来自地气;地气中的同位素组成由各种介质决定,所以溶液中铅同位素比值的高低与各种介质的加入多少有关。各采样点情况不同,导致同位素比值变化范围宽。

土壤中铅同位素组成明显与地气不同:它们

表 1 金窝子矿床地气、细粒级土壤、矿石和围岩样品的铅、硫同位素数据
Table 1 Lead, sulfur isotopic data of earthgas, fine-grained soil, ore and country rock in Jinwozi gold deposit

样品编号		点性	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	误差	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	误差	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	误差	δ ³⁴ S/‰
地气样品	L1-01-DQT	背景	38.088	0.076	15.558	0.031	17.997	0.036	
	L1-02-DQT	背景	37.556	0.060	15.473	0.025	17.425	0.024	
	L1-03-DQT	异常	37.274	0.007	15.430	0.003	17.230	0.003	
	L1-04-DQT	异常	37.470	0.015	15.464	0.006	17.390	0.007	
	L1-05-DQT	异常	37.160	0.007	15.406	0.003	17.140	0.003	
	L2-03-DQT	异常	38.238	0.008	15.595	0.003	18.178	0.007	
	L2-03-DQT	异常	38.294	0.023	15.620	0.009	18.142	0.015	
	YC-02-DQT	异常	38.161	0.023	15.573	0.009	18.142	0.011	
	YC-03-DQT	异常	37.856	0.015	15.532	0.006	17.754	0.004	
	BJ-01-DQT	背景	38.014	0.005	15.564	0.002	17.973	0.003	
	BJ-03-DQT	背景	38.082	0.023	15.576	0.009	17.982	0.007	
	BJ-05-DQT	背景	38.299	0.008	15.575	0.003	18.258	0.004	
	BJ-06-DQT	背景	38.511	0.015	15.613	0.006	18.449	0.007	
	BJ-06-DQT	背景	38.511	0.015	15.613	0.006	18.449	0.007	
土壤样品	JWZ09L1-01-zkoc	背景	39.208	0.008	15.581	0.003	18.590	0.004	7.0
	JWZ09L1-03-zkoc	背景	39.015	0.008	15.547	0.003	17.935	0.004	8.5
	JWZ09L1-10-zkoc	异常	39.463	0.008	15.638	0.003	18.595	0.004	7.6
	JWZ09L1-11-zkoc	异常	38.650	0.008	15.614	0.003	18.526	0.004	7.3
	JWZ09L1-13-zkoc	异常	38.911	0.004	15.607	0.001	18.555	0.001	7.3
	JWZ09L1-17-zkoc	背景	38.643	0.008	15.645	0.003	18.512	0.004	6.3
	JWZ09L1-19-zkoc	背景	39.210	0.008	15.665	0.003	18.720	0.004	5.9
	JWZ09L3-08-zkoc	异常	38.673	0.005	15.653	0.002	18.635	0.003	6.4
	JWZ09Au232C	异常	38.636	0.008	15.653	0.003	18.524	0.004	6.4
	JWZ09Au118C	异常	38.826	0.008	15.691	0.003	18.649	0.004	7.3
	BJ1	背景	38.601	0.004	15.606	0.002	18.721	0.002	5.5
	BJ2	背景	38.585	0.004	15.612	0.002	18.667	0.002	5.8
	BJ3	背景	38.437	0.006	15.568	0.003	18.646	0.003	5.5
	BJ3	背景	38.437	0.006	15.568	0.003	18.646	0.003	5.5
岩石样品	02	围岩	38.931	0.004	15.713	0.002	18.698	0.002	7.1
	03	围岩	38.948	0.004	15.721	0.002	18.702	0.002	6.2
	04	围岩	38.954	0.006	15.719	0.002	18.727	0.002	5.3
	01	矿石	39.012	0.005	15.721	0.002	18.760	0.003	5.2
	矿石 01	方铅矿							7.2
	矿石 02	黄铁矿	38.508	0.002	15.661	0.001	18.416	0.001	6.9
前人数据	J210K-01 [*]	黄铁矿	38.478		15.612		18.394		
	J210K-02 [*]	黄铁矿	38.342		15.618		18.339		7.9
	J210K-03-1 [*]	黄铁矿	38.585		15.735		18.437		7.3
	J210K-03-2 [*]	黄铁矿	38.294		15.619		18.349		
	J210K-03-3 [*]	黄铁矿	38.482		15.665		18.410		
	J210K-03-4 [*]	黄铁矿	38.457		15.649		18.407		
	J210K-03-5 [*]	黄铁矿	38.592		15.698		18.442		
	J210K-07 [*]	黄铁矿	38.300		15.554		18.309		
	J210K-10 [*]	黄铁矿	38.372		15.606		18.348		5.6
	J210K-11 [*]	黄铁矿	38.945		15.491		18.193		7.0
	J210K-14 [*]	黄铁矿	38.527		15.693		18.419		6.9
	J210K-17 [*]	黄铁矿	38.396		15.600		18.363		
	18-1 [#]	黄铁矿							5.8
	19 [#]	黄铁矿							6.3
	210-1 [#]	黄铁矿							5.0
	210-4 [#]	黄铁矿							6.7
	210-5 [#]	黄铁矿							6.8
	210-6 [#]	黄铁矿							6.3

注：L. 线号；JWZ. 金窝子矿床；YC. 异常；BJ. 背景；误差以 2σ 计；* 引自文献 [7]；#引自文献 [8]；测试单位为核工业北京地质研究院。

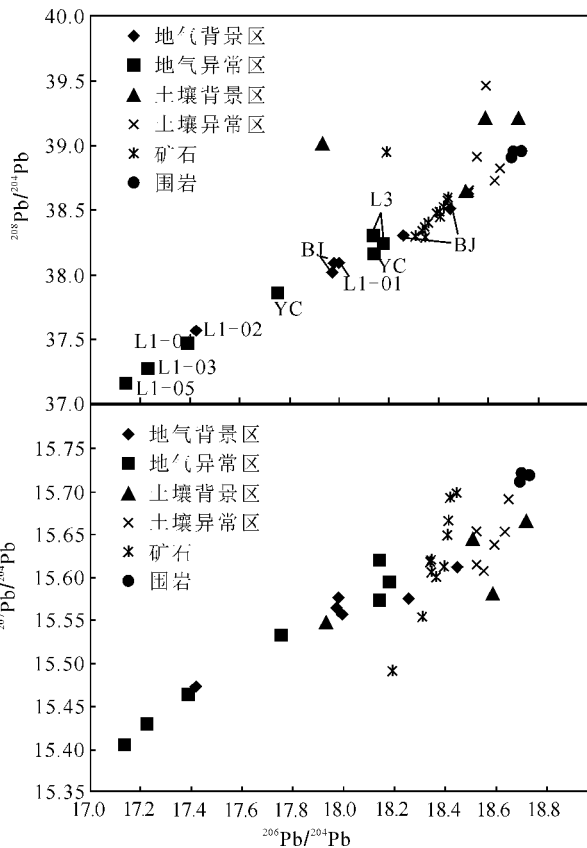


图3 新疆金窝子金矿床铅同位素组成图

Fig. 3 Lead isotopic characteristics in Jinwozi gold deposit, Xinjiang

的比值高,变化范围较大,特别是背景区的土壤样品。

围岩的3个样品的同位素组成非常接近,变化范围小,同位素比值大。围岩和土壤比值较高的原因可能是土壤中U、Th的含量高,放射成因的铅较多。

矿石样品的同位素比值处于土壤和地气之间,其中 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分布比较集中, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值变化范围大。因为在3组同位素衰变反应中, $^{238}\text{U}\rightarrow^{206}\text{Pb}$ 的半衰期为 $4.468\times10^9\text{a}$, $^{235}\text{U}\rightarrow^{207}\text{Pb}$ 的半衰期为 $0.70381\times10^9\text{a}$, $^{232}\text{Th}\rightarrow^{208}\text{Pb}$ 的半衰期为 $14.0181\times10^9\text{a}$, ^{235}U 衰变成 ^{207}Pb 的半衰期最小,差值达1~2个数量级。因此,矿床形成至今, ^{235}U 衰变形成 ^{207}Pb 最快,导致 ^{207}Pb 的变化最大。

值得注意的是,各介质Pb同位素比值在图上呈线性展布,与两端元混合类似。溶液中铅同位素比值由地气和捕集液两端元决定,而地气中的铅同位素可能受土壤、岩石、空气等因素影响,土壤和岩石的铅同位素比值又都大于地气,所以

捕集液(硝酸)的本底铅同位素比值较小,应位于图的左下角。

用铅同位素识别地气或土壤中异常物质来源的基本原理是:通过研究矿床周围不同介质的铅同位素组成特征,并与地气、土壤铅同位素比值进行比较,来探讨金属矿床的地气、土壤中异常物质的可能来源。

从上文的讨论可以看出,研究区不同介质的铅同位素存在一定的差异,这便于用铅同位素示踪法研究地气中异常物质的来源;但要保证异常区和背景区的地气有明显差异,可以通过方差分析来检验。为了讨论方便,对于土壤和地气两种介质,我们仅用L1线的样品。

用SPSS软件对数据进行单因素的方差分析,具体包括L1线背景区、异常区地气的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对比,L1线背景区、异常区土壤的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对比,共6组方差分析。从分析结果(表2)可以看出,这6组方差分析的P值大于0.05,即背景区和异常区的地气、土壤中的铅同位素组成没有显著的差异。所以从统计学的角度可以初步证明,研究区不能用铅同位素示踪地气、土壤中异常物质的来源。从L1采样线上地气、土壤的铅同位素组成特征图(图4,图5)上,看不出背景区、异常区的地气、土壤中的铅同位素有显著的区别,进一步证明研究区不能用铅同位素示踪地气、土壤中异常物质来源。

表2 新疆金窝子矿床L1线地气、土壤中铅同位素方差分析结果

Table 2 Variance analysis results for lead isotope of earth-gas and soil samples from L1 in Jinwozi gold deposit, Xinjiang

参数	背景区与异常区地气			背景区与异常区土壤		
	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
P	0.109	0.122	0.144	0.376	0.407	0.547

3.1.2 金窝子矿床硫同位素特征

除本文分析的金窝子矿床的硫同位素数据外,结合前人在该矿床分析的11个黄铁矿硫同位素数据(表1)作频率直方图(图6)。从图6可以看出,各介质的硫同位素分布比较集中,它们可能有相同的硫源,或者该矿床的均一化程度较高。背景区土壤的硫同位素分布范围最广,呈单峰分布;异常区土壤的硫同位素呈单峰分布;围岩的3个

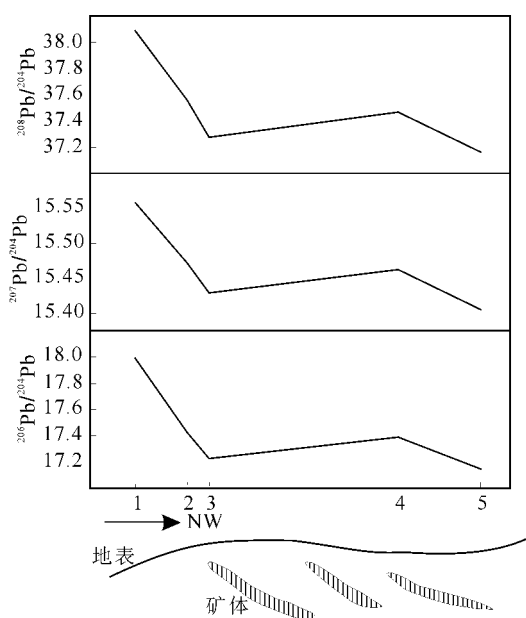


图 4 L1 采样线地气样品中铅同位素组成特征图
(横坐标为采样点的相对位置)

Fig. 4 Lead isotopic characteristics of earthgas samples in L1

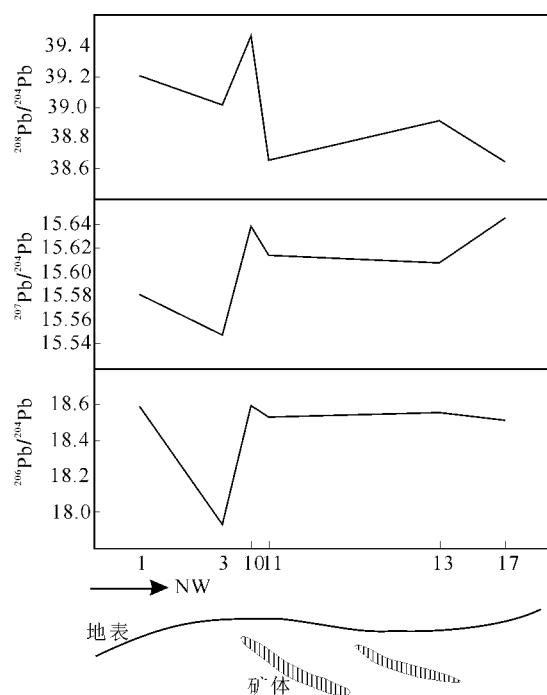


图 5 L1 采样线土壤样品中铅同位素组成特征
(横坐标为采样点的相对位置)

Fig. 5 Lead isotopic characteristics of soil samples from L1

样品同位素分布比较分散。矿石的硫同位素组成呈塔式分布，样品包括一个全岩样品 ($\delta^{34}\text{S} = 5.2\text{‰}$)，一个方铅矿 ($\delta^{34}\text{S} = 7.2\text{‰}$)，其他都为黄铁矿；从土壤背景→矿石→土壤异常， $\delta^{34}\text{S}$ 的峰值逐渐增大，分别为 $5\text{‰} \sim 6\text{‰}$ 、 $6\text{‰} \sim 7\text{‰}$ 、 $7\text{‰} \sim 8\text{‰}$ 。

用 SPSS 软件对土壤背景区和土壤异常区的样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值进行方差分析，讨论两组数据之间的差异性，得到的 P 值为 0.18，大于 0.05，则土壤异常区与土壤背景区样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值没有明显差别，从统计学的角度来看，这两组数据不能进行进一步的分析。从图 6 可以发现，土壤异常区相对于背景区， $\delta^{34}\text{S}$ 值有增高的趋势，但这种趋势还不足以造成显著的差异。

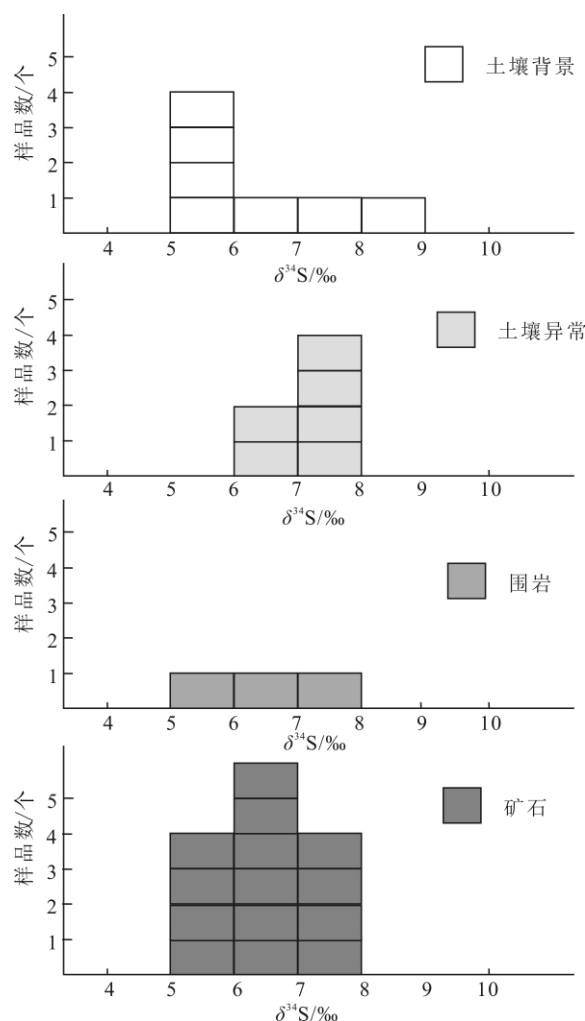


图 6 新疆金窝子金矿床硫同位素频率直方图

Fig. 6 Frequency histogram of sulfur isotope in Jinwozi gold deposit, Xinjiang

3.2 拜仁达坝—维拉斯托矿床铅、硫同位素特征

3.2.1 拜仁达坝—维拉斯托矿床铅同位素特征

根据拜仁达坝—维拉斯托矿床各介质铅、硫同位素比值(表 3, 表 4)和内蒙古拜仁达坝—维拉斯托矿床各介质的铅同位素组成图(图 7)可知，围岩的铅同位素比值最大，分布范围最广。围岩主要为片麻岩、花岗岩、角闪岩等，其中的 U、Th 含量较高，放射性成因的 Pb 含量高，所以 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、

表 3 内蒙古拜仁达坝—维拉斯托矿床地气、细粒级土壤、矿石、围岩样品的铅、硫同位素数据

Table 3 Lead, sulfur isotopic data of earthgas, fine-grained soil, ore and country rock in Bairendaba-Weilasituo poly-metallic deposit, Inner Mongolia

样品编号		点性	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	误差	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	误差	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	误差	δ ³⁴ S/‰
地 气 样 品	BRDB09-01	背景	38.183	0.015	15.616	0.006	18.148	0.007	
	BRDB09-02	异常	37.985	0.008	15.569	0.003	18.088	0.004	
	BRDB09-03	异常	38.188	0.046	15.619	0.019	18.420	0.022	
	BRDB09-04	异常	38.009	0.046	15.547	0.019	18.048	0.022	
	BRDB09-05	异常	38.327	0.015	15.649	0.006	18.349	0.007	
	BRDB09-06	异常	38.365	0.015	15.607	0.006	18.341	0.007	
	BRDB09-07	背景	38.396	0.008	15.602	0.003	18.369	0.004	
	WLST09-01	背景	38.053	0.030	15.562	0.012	18.002	0.011	
	WLST09-02	异常	38.120	0.030	15.564	0.012	18.063	0.014	
	WLST09-03	异常	38.607	0.003	15.763	0.001	20.489	0.002	
	WLST09-04	异常	38.198	0.004	15.614	0.002	18.451	0.002	
	WLST09-05	背景	38.086	0.008	15.559	0.003	18.087	0.004	
土 壤 样 品	BRDB 09-01	背景	38.500	0.004	15.594	0.001	18.482	0.002	—
	BRDB 09-02	异常	38.626	0.006	15.604	0.002	18.509	0.003	6.0
	BRDB 09-03	异常	38.396	0.012	15.565	0.005	18.426	0.005	19.6
	BRDB 09-04	异常	38.731	0.011	15.584	0.004	18.544	0.005	20.0
	BRDB 09-05	异常	38.452	0.013	15.581	0.005	18.505	0.006	21.0
	BRDB 09-06	异常	38.404	0.009	15.591	0.004	18.350	0.004	16.3
	BRDB 09-07	背景	37.495	0.004	15.544	0.001	17.643	0.002	7.2
	BRDB 09-08	背景							4.9
	WLST 09-01	背景	38.403	0.005	15.580	0.002	18.547	0.002	6.5
	WLST 09-02	异常	38.448	0.008	15.588	0.003	18.467	0.004	6.2
	WLST 09-03	异常	38.527	0.008	15.599	0.003	18.495	0.004	6.9
	WLST 09-04	异常	38.586	0.009	15.592	0.004	18.599	0.004	6.1
	WLST 09-05	背景	38.470	0.008	15.583	0.003	18.541	0.004	—
围 岩 样 品	WLST-48	黑云母二长花岗岩	38.694	0.003	15.627	0.001	18.556	0.001	
	WLST-60	黑云母花岗闪长岩	39.356	0.004	15.670	0.002	18.735	0.002	
	WLST-104	黑云母斜长花岗岩	39.827	0.003	15.627	0.001	18.571	0.002	
	WLST-106	黑云母斜长花岗岩	38.548	0.003	15.612	0.001	18.560	0.002	
	WLST-73	黑云母斜长花岗岩	40.024	0.003	15.671	0.001	19.303	0.002	
	WLST-94	黑云母斜长角闪岩	38.806	0.004	15.619	0.002	18.469	0.002	
	WLST-79	黑云母斜长角闪岩	38.46	0.004	15.598	0.001	18.559	0.002	
	WLST-108	黑云母斜长片麻岩	39.502	0.007	15.649	0.003	18.708	0.004	
	WLST-114	黑云母斜长片麻岩	39.672	0.003	15.620	0.001	18.957	0.001	
	WLST-116	黑云母斜长片麻岩	40.302	0.008	15.654	0.003	19.625	0.004	
	WLST-35	黑云母斜长片麻岩	39.666	0.002	15.660	0.001	18.895	0.001	
	WLST-62	黑云母斜长片麻岩	39.246	0.003	15.639	0.001	18.670	0.001	
	WLST-38	黑云斜长角闪岩	39.104	0.002	15.631	0.001	19.031	0.001	
	WLST-81	黑云斜长片麻岩	39.074	0.002	15.647	0.001	18.680	0.001	
	WLST-39	黑云斜长片麻岩	39.496	0.003	15.615	0.001	19.275	0.002	
	WLST-56	黑云斜长片麻岩	39.631	0.002	15.742	0.001	20.403	0.001	
	WLST-46	花岗闪长岩	39.263	0.003	15.678	0.001	19.086	0.002	
	WLST-92	花岗岩与片麻岩	38.606	0.004	15.608	0.002	18.511	0.002	
	WLST-09	钾化、黝帘石化斜长花岗岩	40.306	0.006	15.643	0.002	18.678	0.003	

注: BRDB. 拜仁达坝矿床; WLST. 维拉斯托矿床; 误差以 2σ 计; 测试单位为核工业北京地质研究院。

(续) 表 3 内蒙古拜仁达坝—维拉斯托矿床地气、细粒级土壤、矿石、围岩样品的铅、硫同位素数据
(continued) Table 3 Lead, sulfur isotopic data of earthgas, fine-grained soil, ore and country rock in Bairendaba–Weilasituo polymetallic deposit, Inner Mongolia

样品编号	点性	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	误差	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	误差	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	误差	δ ³⁴ S/‰
WLST-33	角闪斜长变粒岩	39.872	0.002	15.653	0.001	19.131	0.001	
WLST-78	角闪岩	38.398	0.003	15.575	0.001	18.479	0.001	
WLST-80	角闪岩	38.497	0.004	15.586	0.002	18.548	0.002	
WLST-125	片麻岩	39.803	0.006	15.647	0.002	18.999	0.003	
WLST-183	闪长岩	39.011	0.004	15.641	0.002	18.749	0.002	
WLST-196	闪长岩	38.760	0.006	15.621	0.003	18.736	0.003	
WLST-51	闪长岩	39.028	0.004	15.652	0.002	18.534	0.002	
WLST-69	石英闪长岩	38.465	0.005	15.606	0.002	18.641	0.003	
WLST-28	石英闪长岩	38.634	0.003	15.626	0.001	18.637	0.001	
围岩样品	WLST-08	碎裂碳酸盐化斜长花岗岩	38.714	0.002	15.642	0.001	19.126	0.001
	WLST-02	碳酸岩化、绿泥石化斜长角闪岩	39.251	0.005	15.680	0.002	19.817	0.002
	WLST-04	斜长花岗岩	40.485	0.004	15.554	0.001	18.753	0.002
	WLST-11	斜长花岗岩	38.984	0.004	15.664	0.001	18.908	0.002
	WLST-65	斜长角闪岩	38.532	0.004	15.602	0.001	18.479	0.002
	WLST-220	斜长角闪岩	38.525	0.005	15.575	0.002	18.686	0.002
	WLST-112	斜长角闪岩	38.473	0.003	15.617	0.001	18.403	0.002
	WLST-49'	斜长角闪岩	38.413	0.003	15.608	0.001	18.418	0.001
	WLST-49	斜长角闪岩	38.529	0.003	15.599	0.001	18.511	0.001
	WLST-127	英云闪长岩	38.659	0.004	15.601	0.002	18.613	0.002
	WLST-58	英云闪长岩	39.440	0.007	15.664	0.003	18.625	0.003
	WLST-130	英云闪长岩	38.702	0.018	15.613	0.007	18.591	0.010
矿石样品 铅同位素	WLST-13	磁黄铁矿	38.290	0.002	15.569	0.001	18.353	0.001
	WLST-24	石英	38.245	0.002	15.558	0.001	18.336	0.001
	WLST-29	磁黄铁矿	38.359	0.014	15.601	0.006	18.584	0.007
	WLST-115	石英	38.545	0.002	15.611	0.001	18.560	0.001
	WLST-131	磁黄铁矿	38.299	0.003	15.569	0.001	18.361	0.001
	WLST-159	磁黄铁矿	38.201	0.004	15.596	0.002	18.282	0.002
	WLST-160	磁黄铁矿	38.325	0.005	15.578	0.002	18.364	0.002
	WLST-163	磁黄铁矿	38.477	0.008	15.598	0.003	18.487	0.004
	WLST-168	磁黄铁矿	38.374	0.017	15.595	0.007	18.417	0.008
	WLST-186	磁黄铁矿	38.278	0.003	15.567	0.001	18.351	0.001
	WLST-188	磁黄铁矿	38.233	0.003	15.557	0.001	18.328	0.001
	WLST-190	磁黄铁矿	38.198	0.002	15.542	0.001	18.326	0.001
	WLST-200-1	石英	38.258	0.002	15.556	0.001	18.346	0.001
	WLST-200-2	磁黄铁矿	38.392	0.002	15.593	0.001	18.386	0.001
	WLST-201	磁黄铁矿	38.405	0.002	15.598	0.001	18.389	0.001
	WLST-204	方铅矿	38.416	0.002	15.600	0.001	18.390	0.001
	WLST-209	方铅矿	38.269	0.002	15.559	0.001	18.351	0.001
	WLST-210	方铅矿	38.274	0.002	15.561	0.001	18.354	0.001
	WLST-211	方铅矿	38.221	0.002	15.545	0.001	18.343	0.001
	WLST-215	方铅矿	38.260	0.003	15.560	0.001	18.348	0.001
	WLST-216	方铅矿	38.279	0.002	15.566	0.001	18.356	0.001
	WLST-217	石英	38.425	0.002	15.589	0.001	18.463	0.001
	WLST-218	方铅矿	38.262	0.002	15.556	0.001	18.355	0.001

注：BRDB. 拜仁达坝矿床；WLST. 维拉斯托矿床；误差以 2σ 计；测试单位为核工业北京地质研究院。

表 4 内蒙古拜仁达坝—维拉斯托矿床矿石样品的硫同位素数据

Table 4 Sulfur isotopic data of ores in Bairendaba-Weilasituo polymetallic deposit, Inner Mongolia

样品编号	矿物	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	样品编号	矿物	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$
WLST-13	毒砂	0.7	WLST-200	毒砂	0.6
WLST-13	黄铜矿	0.2	WLST-200	方铅矿	-0.6
WLST-13	闪锌矿	-0.1	WLST-200	闪锌矿	0
WLST-13	黄铁矿	1.4	WLST-200	闪锌矿	0.3
WLST-29	黄铜矿	-0.2	WLST-204	黄铁矿	2.1
WLST-29	闪锌矿	-0.5	WLST-204	方铅矿	-0.7
WLST-30	黄铜矿	0.2	WLST-205	闪锌矿	0
WLST-115	黄铜矿	-0.4	WLST-211	黄铁矿	-1.5
WLST-115	闪锌矿	-1.0	WLST-211	闪锌矿	-0.2
WLST-163	黄铜矿	-0.5	WLST-215	方铅矿	-2.4
WLST-163	磁黄铁矿	0.4	WLST-215	闪锌矿	-1.3
WLST-186	毒砂	-0.6	WLST-217	毒砂	0.2
WLST-188	黄铜矿	-0.3	WLST-217	黄铜矿	-1.1
WLST-188	闪锌矿	1.1	WLST-217	黄铁矿	0.8
WLST-188	黄铁矿	-0.6	WLST-217		

注: WLST. 维拉斯托矿床; 误差以 2σ 计; 测试单位为核工业北京地质研究院。

$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值大。矿石的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值变化范围小, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的变化范围大, 原因可能与该矿床的成矿模式^①有关: 该矿床形成于早白垩世, 由于造山后的伸展垮塌作用, 华力西—印支期底侵于下地壳底部的基性岩发生熔融产生大规模的中酸性岩浆, 岩浆在上地壳 3~4 km 深处就位后, 岩浆热液继续向上迁移, 并将该区元古宙增生的幔源基性岩石中的成矿物质淋滤出来, 同时大气降水沿着断裂带将流经基性岩石中的有关成矿物质淋滤出来, 岩浆热液与大气降水相遇后, 物理化学条件的改变使成矿物质析出、沉淀。这种多来源的成矿物质本身具有较宽的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值, 造成矿石的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围大。

土壤除 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 外, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值仅比围岩小, 这些土壤是围岩风化的结果, 继承了 U、Th 含量较高的特征。背景区和异常区土壤的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值的变化范围类似, 而对于 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值, 异常区土壤稍高于背景区。

地气的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值变化范围最大, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值相对其他介质较低, 但异常区和背景区地气的差别不大。

和前文一样, 在进行分析前, 先用 SPSS 软件对异常区、背景区的地气和异常区、背景区的土壤的 3 种同位素比值进行 6 组方差分析(表 5)。从

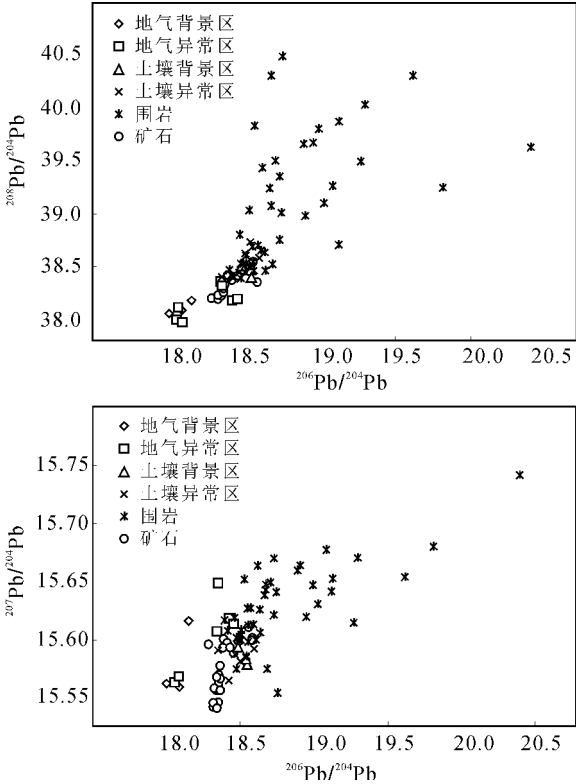


图 7 内蒙古拜仁达坝—维拉斯托矿床地气、土壤、矿石铅同位素组成图

Fig. 7 Lead isotopic characteristics of earthgas, soil and ore in Bairendaba-Weilasituo deposit, Inner Mongolia

① 内蒙古自治区地质调查院, 中国地质大学(北京). 内蒙古自治区区域成矿规律及重要矿产成矿预测地球化学综合研究报告. 2009.

表中可以看出，所有的 P 值大于 0.05，即该矿床异常区地气、土壤和背景区地气、土壤的铅同位素比值差别不明显，不适合用铅同位素进行异常物质来源的示踪。从拜仁达坝矿区、维拉斯托矿区采样线上地气、土壤中铅同位素组成特征(图 8，图 9) 可以发现，异常区和背景区铅同位素没有显著的差异。

表 5 拜仁达坝—维拉斯托矿床地气、土壤铅同位素方差分析结果

Table 5 Variance analysis results for lead isotope of earth-gas and soil samples from L1 in Bairendaba-Weilasituo deposit

参数	背景区与异常区地气			背景区与异常区土壤		
	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
	P	0.923	0.624	0.376	0.404	0.451

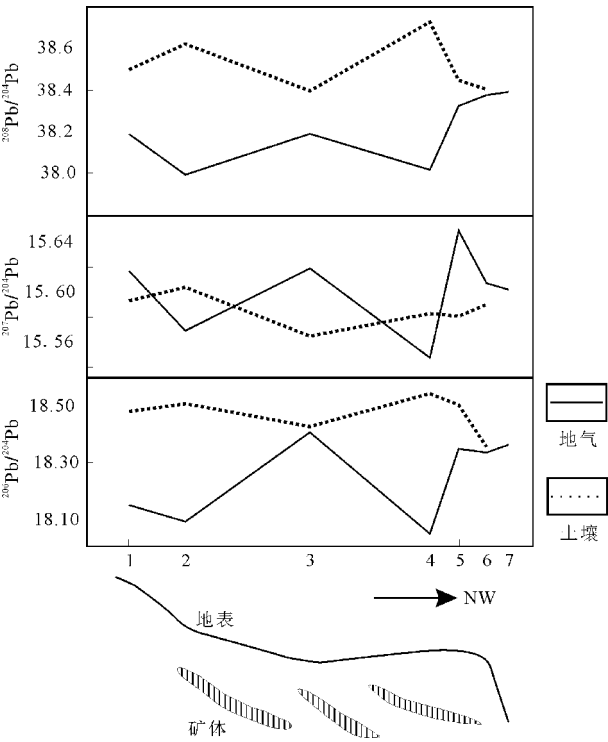


图 8 拜仁达坝矿区采样线上地气、土壤样品中铅同位素组成特征(横坐标为采样点的相对位置)

Fig. 8 Lead isotopic characteristics of earthgas and soil samples in Bairendaba deposit

3.2.2 拜仁达坝—维拉斯托矿床硫同位素特征
根据拜仁达坝—维拉斯托矿床各介质硫同位素数据(表 4)和土壤样品的硫同位素频率直方图(图 10) 可以看出，拜仁达坝矿床的土壤硫同位素分布范围较大，特别是异常区的样品， $\delta^{34}\text{S}$ 范围

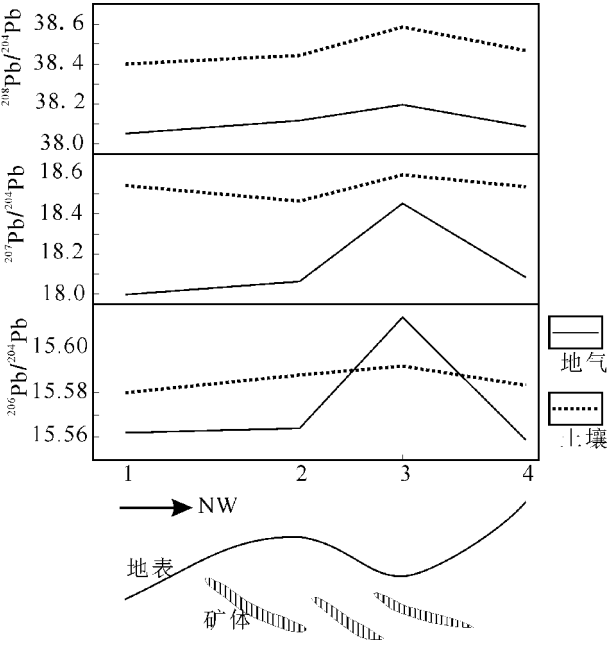


图 9 维拉斯托矿区采样线上地气、土壤样品中铅同位素组成特征(横坐标为采样点的相对位置)

Fig. 9 Lead isotopic characteristics of earthgas and soil samples in Weilasituo deposit

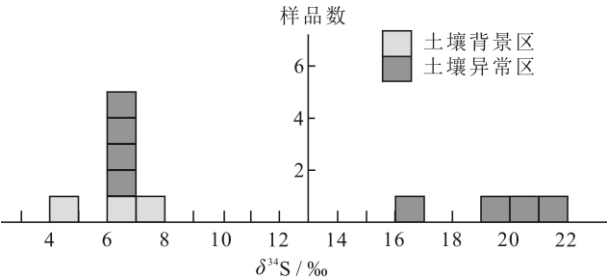


图 10 拜仁达坝—维拉斯托矿床土壤硫同位素频率直方图
Fig. 10 Frequency histogram of sulfur isotope for soil samples in Bairendaba-Weilasituo deposit

为 6‰ ~ 21‰。总体上背景区的 $\delta^{34}\text{S}$ 值比异常区小；维拉斯托矿床的同位素范围分布集中，异常区和背景区均处于 6 ~ 7 之间。

从维拉斯托矿床矿石硫同位素频率直方图(图 11) 可以看出，所有矿物的硫同位素分布比较集中，范围为 $-2.4‰ \sim 2.1‰$ ，它们可能有相同的硫源，或矿床的均一化程度较高。其中黄铁矿的分布范围最广，最分散；磁黄铁矿仅一个样品；毒砂为单峰分布，峰值为 $0 \sim 1‰$ ；闪锌矿和黄铜矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为塔式分布， $\delta^{34}\text{S}$ 的峰值都为 $-1‰ \sim 0$ ；方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布比较零散。

对拜仁达坝—维拉斯托矿床背景区、异常区土壤的 $\delta^{34}\text{S}$ 的峰值进行单因素方差分析， P 值为 0.154，大于 0.050，即该矿床也不能用硫同位素

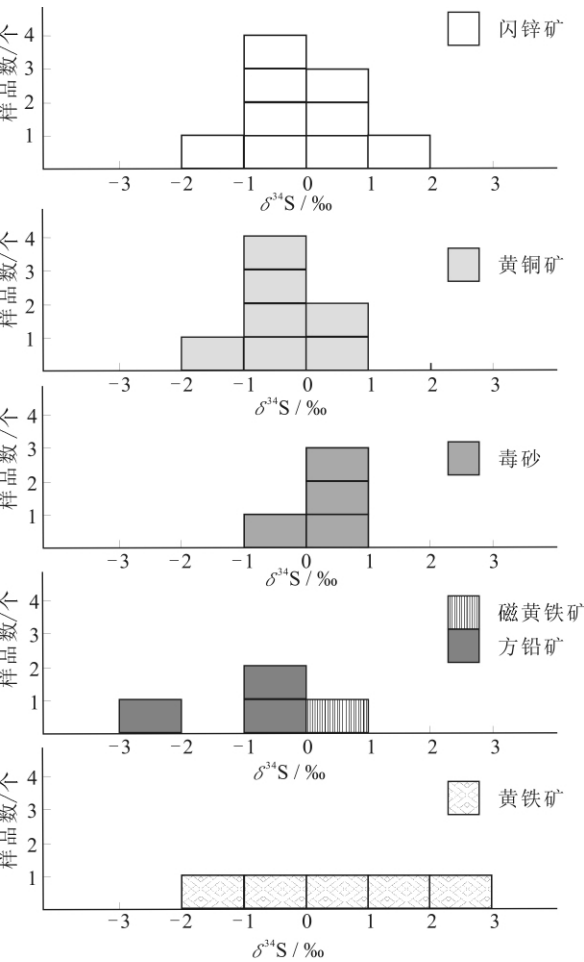


图 11 拜仁达坝—维拉斯托矿床矿石硫同位素频率直方图
Fig. 11 Frequency histogram of sulfur isotope for ore samples in Bairendaba-Weilasituo deposit

示踪土壤异常物质的来源。土壤异常区相对于背景区， $\delta^{34}\text{S}$ 值有增高的趋势，但这种趋势没有引起显著的变化(表 6，图 10)。

4 讨论与问题总结

4.1 铅同位素示踪地气中异常物质来源

从上文可以看出，用单因素方差分析，考虑采样数量和误差后，异常区、背景区的地气中 3 种铅同位素比值都没有显著的差别，无法进行进一步的讨论，所以我们得出的结论是，研究的两个隐伏矿床无法用铅同位素指示地气中的异常物质来源。

由铅同位素的块体效应可知^[19-20]，同一块体的地幔、地壳、矿床的铅同位素特征同步耦合变化，即同一矿床的矿石、围岩的初始铅同位素特征由于处于同一个块体而差异较小。U、Th 含量高低是导致介质铅同位素组成发生变化的主要原

因：围岩 U、Th 含量高，则放射性成因的铅多， $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值大。

由对新疆金窝子矿床、内蒙古拜仁达坝—维拉斯托矿床的矿石和围岩铅同位素组成进行方差分析的结果(表 6)可知，两个矿床 3 种同位素比值方差分析的 P 值均小于 0.05，存在显著差异，说明围岩形成以来积累了放射性成因铅，导致矿石和围岩的铅同位素组成显著不同。

矿石和围岩的铅同位素差异为什么没有显著地反映到背景区和异常区的地气中？原因可能是捕集液中铅同位素含量高，掩盖了地气中铅同位素组成特征。在拜仁达坝—维拉斯托矿区硝酸捕集的地气、空气样品的铅同位素特征图(图 12)中，空气样品与背景区、异常区的地气样品投点的位置接近，说明溶液中测出来的铅同位素组成主要反映捕集液中铅同位素的特征。

汪明启等^[9]在甘肃蛟龙掌铅锌矿床用铅同位素研究时发现，异常区地气明显不同于背景区地气，异常区地气样品有深部矿石硫化物铅的加入，他们用的捕集液是采用特殊清洗方法、超净室环境(1 000 级)、高纯试剂提取等技术配制的，捕集剂本底空白铅含量小于 1 ng/mL，主元素的含量小于 10 $\mu\text{g/mL}$ 。

以上讨论证明虽然本次研究用铅示踪地气中异常物质来源没有成功，但并不代表这种方法不可行，通过进一步改良捕集液的质量，能实现铅同位素对深穿透异常物质来源的成功示踪。

表 6 金窝子矿床、拜仁达坝—维拉斯托矿床矿石与围岩铅同位素方差分析结果

Table 6 Variance analysis result for lead isotope of ore and country rock samples in Jinwozi and Bairendaba-Weilasituo deposit

参数	金窝子矿床矿石与围岩			拜仁达坝—维拉斯托矿床矿石与围岩		
	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
	P	0.001	0.041	0	0	0

4.2 铅、硫同位素示踪土壤中异常物质来源

铅、硫同位素在理论上都能实现对土壤中异常物质来源的成功示踪，但在实际操作过程中，背景区与异常区的差异能不能显著地反映在所测样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值中，主要取决于地气中铅、硫同位素矿体的贡献率以及地气中的铅、硫同位素对土壤铅、硫同位素的改变有多大。

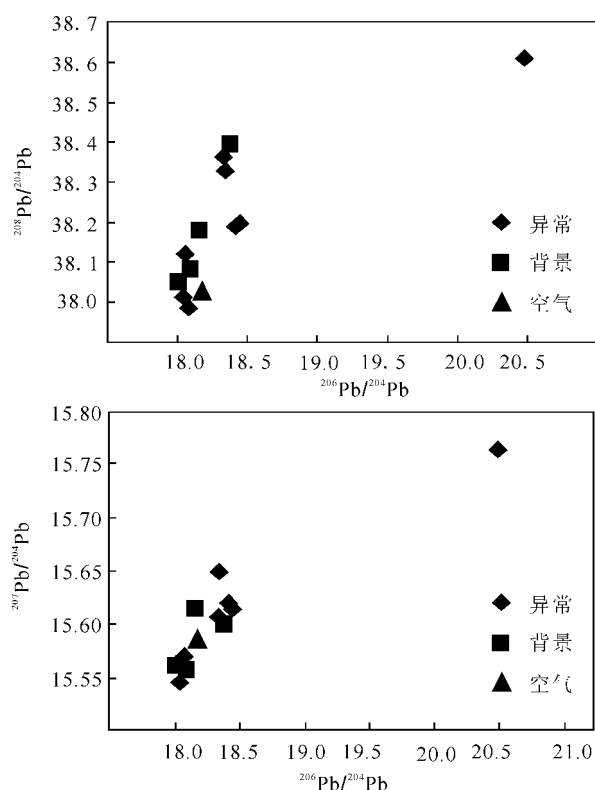


图 12 内蒙古拜仁达坝—维拉斯托矿床地气、空气的铅同位素组成特征图

Fig. 12 Lead isotopic characteristics of earthgas and gas samples in Bairendaba-Weilasituo deposit, Inner Mongolia

用目前的采样方法以及测试手段不能显著地区分土壤异常区和背景区的铅、硫同位素特征。可能因为土壤的铅、硫同位素特征主要与土壤本身及空气有关, 可以采用活动态测量法^[21-23]的思想, 测量土壤活动态中的铅、硫同位素组成, 而不是测整个土壤的铅、硫同位素组成。可以认为活动态中铅、硫同位素组成大部分来源于地气, 与深部隐伏矿有很大的关联。

4.3 问题总结

地气法能够用来勘查隐伏矿和盲矿, 但由于其机理还处在假说阶段, 方法自诞生以来就备受质疑。研究异常源的示踪有助于认识地气形成机理, 前人仅汪明启等^[9]在甘肃蛟龙掌铅锌矿床上做过用铅同位素示踪地气中异常物质来源的研究, 而用硫同位素研究在国内外实属先例。在没有足够经验的基础上开展研究, 不可避免会遇到许多问题, 以下是本文总结的几个方面的问题及相应的建议。

(1) 捕集液的选择和制备。由于地气不能直接采集, 只能通过捕集液捕集, 那么我们得到的地气的铅同位素组成数据实际上是由地气和捕集液

两者决定。地气是一种气体, 其中的铅含量很少, 特别是背景区的样品, 那么捕集液中铅的含量越低越好, 这样地气的铅同位素特征越显著。捕集液中铅含量高会导致测出来的铅同位素组成大部分由捕集液决定, 即异常区和背景区地气的铅同位素组成区分度不大。所以我们在实验室配置捕集液时要在超净环境控制下, 用高纯酸和高纯制水配置, 同时在仪器允许的情况下, 测定捕集液中的铅含量和铅同位素比值。

(2) 样品的采集。同位素示踪异常源的基本思想是地气、土壤与其他介质的铅、硫同位素对比, 所以要采集周围所有介质的样品, 包括围岩(与矿有关的每种围岩都应采集, 且样品数量都应该满足统计要求)、异常区和背景区的土壤及其他覆盖物、矿石。地气样品采集过程中注意不要被空气污染, 也不要采样点之间相互污染。

(3) 实验分析。铅同位素分析除了分析比值外, 还应分析每个样品的铅含量。土壤的铅、硫同位素最好只分析土壤金属活动态部分, 因为土壤全量铅、硫同位素组成主要反映土壤本身的特征, 深穿透地球化学中研究土壤应用偏提取的方法分析金属活动态的部分。

5 结 论

通过研究两个已知隐伏矿床(新疆金窝子金矿床、内蒙古拜仁达坝—维拉斯托多金属矿床)不同介质(地气、细粒级土壤、围岩、矿石)中的铅、硫同位素特征, 得到以下结论。

(1) 两个矿床的介质从地气、矿石、围岩到土壤, 铅同位素比值($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)一般依次增加; 土壤异常区相对土壤背景区, $\delta^{34}\text{S}$ 偏高。对两个矿床背景区、异常区地气中的铅同位素组成, 背景区、异常区土壤中的铅、硫同位素组成进行方差分析后发现, 数据均没有明显的差异, 初步证明研究区不适宜用铅、硫同位素示踪地气、土壤中异常物质的来源。

(2) 两矿床的矿石、围岩中铅同位素组成均有明显差异, 即两个矿床的围岩中明显有放射成因铅的积累。这种差异没有显著地反映到背景区、异常区的地气中, 原因需要进一步查证。本文仅从捕获剂的角度初步探讨了原因。

(3) 本文用土壤全量中铅、硫同位素组成特征示踪土壤异常源, 并没有成功, 建议采用偏提取的方法测量其中活动态中的铅、硫同位素组成,

这在深穿透地球化学研究中更合理。

(4) 对于深穿透异常源的同位素示踪的方法, 本文还从捕集液的选择和制备、样品的采集和实验分析 3 个角度, 总结了以后研究需要注意的事项。

参考文献:

- [1] 高玉岩, 汪明后, 夏修展, 等. 某些景观区隐伏金属矿地气法试验结果 [J]. 物探与化探, 2010, 34(2): 144-149.
- [2] 高玉岩, 汪明后, 徐洋. 隐伏金属矿床及背景区地气组分特征研究——以河北省宣化张全庄金矿为例 [J]. 地质调查与研究, 2010, 33(3): 198-206.
- [3] 汪明后, 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.
- [4] 刘应汉, 任天祥, 汪明后, 等. 隐伏矿区地气测量试验及效果 [J]. 有色金属矿产与勘查, 1995, 4(6): 355-360.
- [5] 童纯菡, 梁兴中, 李巨初. 地气测量研究及在东季金矿的试验 [J]. 物探与化探, 1992, 16(6): 446-451.
- [6] 汪明后, 高玉岩, 张得恩, 等. 地气测量在北祁连盆地区找矿突破及其意义 [J]. 物探与化探, 2006, 30(1): 7-12.
- [7] 伍宗华, 金仰芬, 郭英杰, 等. 地气测量在叶县—邓县—南漳地学剖面研究中的应用 [J]. 岩石学报, 1995, 11(3): 333-342.
- [8] 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]. 地质论评, 2003, 53(6): 807-813.
- [9] Habicht K, Canfield D E, Ret hemeier J. Sulfur isotope fractionation during bacterial reduction and disproportionation of thiosulfate and sulfite [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1998, 62(15): 2585-2595.
- [10] 文雪琴. 荒漠戈壁区深穿透地球化学的理论方法及应用研究 [D]. 西安: 长安大学, 2008: 1-116.
- [11] 文雪琴, 王学求, 叶荣, 等. 干旱戈壁区金属元素的垂向变化与分散——以新疆金窝子金矿为例 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2010, 29(1): 38-51.
- [12] 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.
- [13] 潘小菲, 刘伟. 北山金窝子金矿床流体包裹体特征及成矿流体演化 [J]. 岩石学报, 2006, 22(1): 253-263.
- [14] 孙丰月, 王力. 内蒙拜仁达坝银铅锌多金属矿床成矿条件 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2008, 38(3): 376-383.
- [15] 王瑾, 侯青叶, 陈岳龙, 等. 内蒙古维拉斯托铜多金属矿床流体包裹体研究 [J]. 现代地质, 2010, 24(5): 847-855.
- [16] 刘应汉, 刘京秋, 张华, 等. 纳米微粒物质测量中动态累积法采样技术 [J]. 物探与化探, 2008, 32(1): 61-65.
- [17] 刘伟, 李新俊, 邓军. 东天山金窝子石英脉金矿床成矿流体和成矿物质的来源 [J]. 中国科学: D 辑, 2002, 32(增刊): 105-119.
- [18] 雒利平, 冯建忠, 傅水兴, 等. 甘肃金窝子金矿地质地球化学特征 [J]. 有色金属矿产与勘查, 1999, 8(5): 522-525.
- [19] 朱炳泉. 壳幔化学不均一性与块体地球化学边界研究 [J]. 地学前缘, 1998, 5(1/2): 72-82.
- [20] 朱炳泉, 常向阳. 地球化学省与地球化学边界 [J]. 地球科学进展, 2001, 16(2): 153-162.
- [21] Wang Xueqiu, Cheng Zhizhong, Liu Dawen, et al. Nanoscale metals in earthgas and mobile forms of metals in overburden in wide-spaced regional exploration for giant ore deposits in overburden terrains [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1997, 58(1): 63-72.
- [22] Wang Xueqiu. Leaching of mobile forms of metals in overburden: development and applications [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1998, 61(1/3): 39-55.
- [23] 尤宏亮. 深穿透地球化学方法综述 [J]. 有色矿冶, 2005, 21(6): 3-6.