

doi: 10.11720/wtyht.2023.1215

袁玉婷,刘雪敏,王学求,等.硫、铅同位素对地表土壤微细粒金属全量测量异常的示踪——以水银洞卡林型隐伏金矿体为例[J].物探与化探, 2023,47(4):1083-1097.http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1215

Yuan Y T, Liu X M, Wang X Q, et al. Sulfur-lead isotopes based tracing of the metal element anomalies identified in the total metal measurement of surface fine-grained soils: A case study of the Shuiyindong Carlin-type concealed gold deposit[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(4): 1083-1097. http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1215

硫、铅同位素对地表土壤微细粒金属全量测量异常的示踪 ——以水银洞卡林型隐伏金矿体为例

袁玉婷¹, 刘雪敏¹, 王学求², 谭亲平³

(1. 成都理工大学 地核技术四川省重点实验室, 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; 3. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 在覆盖区寻找隐伏矿床是解决目前资源困境的重要途径之一。国内外所发展的深穿透地球化学方法对已知隐伏矿床开展了大量试验研究,取得了较好的效果。由于无法确定地表金属元素异常是否直接来自深部矿体,使上述方法未在未知覆盖区开展广泛的找矿工作,因此急需发展地表异常示踪技术。贵州水银洞金矿是我国超大型全隐伏的卡林型金矿床,成矿流体富含 S、Au、As、Sb、Hg 等元素。本文以该矿床为研究对象,采集地表微细粒土壤样品,分析 5 种微量元素 (Au、As、Cu、Sb、Hg) 的含量,以验证微细粒土壤全量测量技术在该矿床的找矿效果,并用 S、Pb 同位素识别地表土壤异常来源。研究发现:①微细粒土壤测量技术在该矿区的指示效果好,Au-As-Sb-Hg 高异常区与隐伏矿体和断层的分布较为吻合,其中 Hg 对隐伏矿体的指示效果最好;②隐伏矿体及断层上方土壤中 $\delta^{34}\text{S}$ 值、放射成因的 $w(^{207}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 和 $w(^{206}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 显著高于围岩区土壤,可有效示踪地表微细粒土壤中的异常来自于深部的隐伏矿体。该研究为在同类型覆盖区用微细粒土壤全量测量技术寻找隐伏卡林型金矿提供了理论依据。

关键词: 硫、铅同位素; 土壤微细粒全量测量; 异常源示踪; 水银洞金矿

中图分类号: P632 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2023)04-1083-15

0 引言

新中国成立以来,经过半个多世纪的矿产开采,地表或浅地表矿产资源越来越少,找矿方向开始不断向地球深部延伸^[1]。目前国内外的勘查地球化学家致力于研究能探测更大深度的、可获取直接信息的地球化学找矿方法,如瑞典 Kristiansson 等提出的地气法、前苏联的电地球化学方法、美国 Clark 等提出的酶提取方法、澳大利亚 Mann 等提出的活动金属离子法,以及我国提出的土壤微细粒全量测量

和金属活动态法^[2-7]。这些方法主要通过研究成矿元素或伴生元素从深部隐伏矿向地表的迁移机理和分散模式,测量穿透覆盖层到达地表的元素含量,从而发现与隐伏矿有关的地表地球化学异常,达到寻找深部隐伏矿的目的,因此统称为深穿透地球化学方法^[8]。目前这些方法主要在已知隐伏矿区开展试验研究,阻碍它们在未知覆盖区开展系统找矿的重要原因是:如果在地表介质中发现了金属异常,如何判断这些异常就是来自深部的隐伏矿体?因此急需发展地表异常示踪技术。

近年来,伴随高分辨电感耦合等离子体质谱仪

收稿日期: 2022-04-24; 修回日期: 2022-10-19

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: 袁玉婷(1998-),女,硕士,2021年毕业于成都理工大学地球化学专业,主要从事穿透性地球化学勘查技术学习与研究工作。Email: 578631493@qq.com

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

(ICP-MS)等技术的发展,同位素分析成本逐渐降低,可以借助同位素示踪技术探究地表地球化学异常信息的来源。基本方法为:采集覆盖区地表介质(如土壤、水、地气),分析其同位素组成,并与矿石、围岩中同位素组成特征进行对比,示踪地表地球化学异常的来源^[9]。如刘雪敏等^[10]通过 Pb、S 同位素对新疆金窝子金矿床、内蒙古拜仁达坝—维拉斯托多金属矿床不同介质中的异常物质来源示踪,提出采用偏提取的方法,测量活动态中的 Pb、S 同位素组成更为合理。李建亭等^[9]等通过 S、Pb 同位素对罗卜岭隐伏铜钼矿中异常物质来源示踪,发现表层铅同位素继承了深部矿体的同位素特征,为微细粒级土壤全量测量技术在覆盖区找矿提供了证据。徐洋等^[11]利用 Pb 同位素示踪了山东邹平王家庄斑岩型铜矿区的地气物质来源于深部矿体,为地气在覆盖区矿产勘查提供了可靠的理论基础。

卡林型金矿是产于未经区域性变质的细碎屑岩、碳酸盐岩和硅质岩中的微细浸染型中低温热液金矿床^[12],因 20 世纪 60 年代初在美国西部内华达州的卡林镇首次发现而得名^[13]。20 世纪 70 年代末在我国板其发现同类型矿床^[14-15],随后陆续在滇黔桂地区发现了一系列具有类似地质特征的卡林型金矿。滇黔桂“金三角”是我国著名的卡林型金矿带^[16],其中水银洞金矿是该区重要的金矿之一。水银洞金矿位于贵州省贞丰县城北西 20 km 处,是中国通过成矿预测发现的第一个 I 勘探类型卡林型金矿床^[17]。近年来随着贵州贞丰—普安金矿国家级整装勘查为代表性的项目实施及系列研究课题的开展,已查明水银洞金矿金资源达 290 t,埋藏深度达

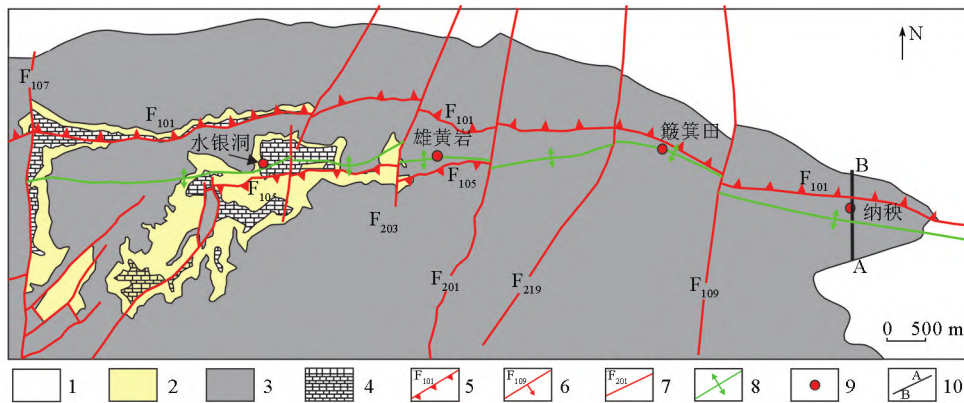
150~1 400 m,为典型的隐伏金矿^[18]。

本文采集水银洞金矿纳秧段隐伏矿体上方、围岩上方的土壤样品,分析微细粒土壤样品中 5 种微量元素(Au、As、Cu、Sb、Hg)的含量,检验土壤微细粒全量测量技术在该类型隐伏矿床的找矿效果;同时分析土壤中 S、Pb 同位素组成特征,收集前人已获得的矿石、围岩的 S、Pb 同位素组成数据,查明地表异常与深部隐伏矿体的关系,示踪地表地球化学异常的来源。

1 研究区概况

水银洞金矿位处扬子陆块与华南陆块接合部位^[19],由水银洞、雄黄岩、簸箕田、纳秧 4 个矿段组成(图 1)^[20]。矿区钻遇地层从下至上依次有二叠系中统茅口组(P_2m),二叠系上统龙潭组(P_3l)、长兴组(P_3c)和大隆组(P_3d),三叠系下统夜郎组(T_1y)和永宁镇组(T_{1yn})(图 2)^[21],其中在 P_2m 和 P_3l 沉积间断面——不整合界面附近,由区域性构造作用和热液蚀变,形成了一套构造蚀变体(SBT)^[22],金矿赋存于 P_3l 地层和 SBT 中^[23]。

灰家堡背斜是水银洞矿区的主干构造,为近 EW 向区域性宽缓的短轴背斜,背斜东段南北翼分别发育了一条近 EW 向的逆断层(F_{105} 、 F_{101} ,如图 1 所示)。 F_{105} 断层为一条倾向南的逆断层,在簸箕田和纳秧矿段内发育不明显; F_{101} 断层为一条倾向北的逆断层,贯穿整个水银洞金矿区。垂直于 EW 向的背斜和逆断层,发育了一组近 SN 或 NE 向的断层(如 F_{107} 、 F_{201} 和 F_{109} 断层),断层斜切或横切背斜

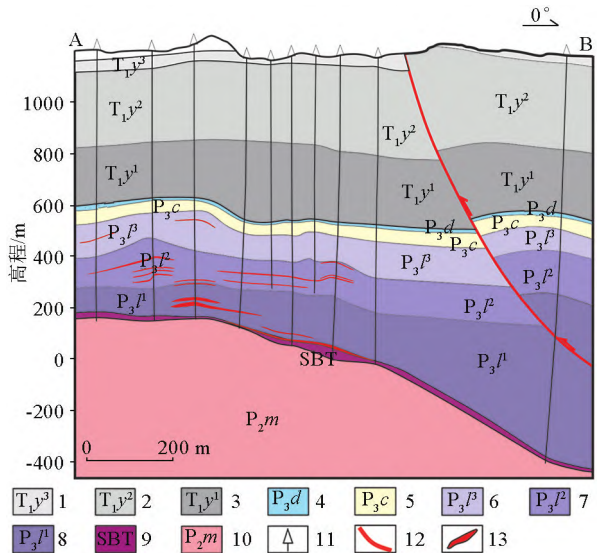


1—永宁镇组;2—长兴至大隆组;3—夜郎组;4—龙潭组;5—逆断层及其编号;6—正断层及其编号;7—性质不明断层及其编号;8—灰家堡背斜;9—矿段;10—A-B 剖面线

1—Yongningzhen formation;2—Changxing-Dalong formation;3—Yelang formation;4—Longtan formation;5—reverse fault and its No.;6—normal fault and its No.;7—unclassified fault and its No.;8—anticlinal axis;9—deposit;10—A-B profile line

图 1 水银洞卡林型金矿地质简图(修改自文献[20])

Fig.1 Geological sketch of the Shuiyindong Carlin-type gold deposit(modified from reference[20])



1—夜郎组第三段;2—夜郎组第二段;3—夜郎组第一段;4—大隆组;5—长兴组;6—龙潭组第三段;7—龙潭组第二段;8—龙潭组第一段;9—构造蚀变体;10—茅口组;11—钻孔;12—断层;13—矿体
1—the third unit of the Yelang formation;2—the second unit of the Yelang formation;3—the first unit of the Yelang formation;4—Dalong formation;5—Changxing formation;6—the third unit of the Longtan formation;7—the second unit of the Longtan formation;8—the first unit of the Longtan formation;9—unconformity (SBT);10—Maokou formation;11—drill hole;12—fault;13—orebody

图2 水银洞卡林型金矿纳秧矿段剖面地质图(剖面A-B位置见图1)

Fig.2 Geological cross-section A-B through the Nayang section of the Shuiyindong Carlin-type gold deposit (the position of A-B is shown in Fig.1)

轴,多为正断层兼具右行或左行剪切特征,东部纳秧一带局部表现为逆断层性质^[20]。谭亲平等^[24]总结了灰家堡背斜的构造模式,认为P₃l及其之上地层卷入灰家堡背斜构造,且沿P₃l、P₂m之间不整合面顺层滑动,产生横向缩短、纵向加厚的现象,为调整不同地段之间横向缩短的位移差而形成垂直于背斜轴向的走滑(撕裂)断层,并把背斜切割成若干块体;顺层滑脱断层在背斜近核部受阻或应力集中,转化为切层逆冲后发育平行于背斜轴的逆冲断层。

水银洞金矿体受上述构造蚀变体、灰家堡背斜和相关逆断层的联合控制,主要包括“层控型”和“断控型”两种矿体^[25-26]。“层控型”为主要产出类型,矿体呈层状、似层状产于灰家堡背斜核部(以背斜轴为中线向两翼延伸300 m范围内)的P₃l中,产状与岩层产状一致,走向上为波状起伏,空间上具有多个矿体上下重叠,并且沿背斜轴向东逐渐消失的特点;“断控型”分布在受背斜近轴部的低角度逆冲断层(如F₁₀₁断层)控制的浅部,产状与断层产状基本一致^[27-29]。

水银洞金矿矿石矿物以黄铁矿、毒砂为主,以及少量的辉锑矿、辰砂、雄(雌)黄;脉石矿物主要为石英、白云石、方解石、萤石,及少量高岭石、伊利石、绢云母、海绿石等^[30]。热液蚀变类型主要为黄铁矿化、白云石化、硅化、毒砂化、雄(雌)黄化、方解石化、辉锑矿化、萤石化、滑石化、辰砂化等^[31],其中硅化、白云石化、黄铁矿化是成矿的必备条件^[32]。金主要以不可见金的形式赋存于砷黄铁矿和毒砂中^[33]。水银洞金矿详细的成矿背景、地层、构造、矿体特征见文献^[34-39]。

2 样品采集与实验室分析

2.1 样品采集

在水银洞卡林型金矿纳秧段上方近SN方向的A-B勘探线(垂直矿体走向)布设20个地表土壤采样点(图3),其中已知矿体上方8个(编号6~13),围岩区12个(编号1~5,14~20)。采样点间距50~100 m,每个采样点周围布置3个子采样点,子采样点相距1.5~2 m,在每个子采样点铲除地表土壤后,采集10~30 cm深的土壤,混合均匀为该采样点的土壤样品。每件样品采集1.5~2 kg。

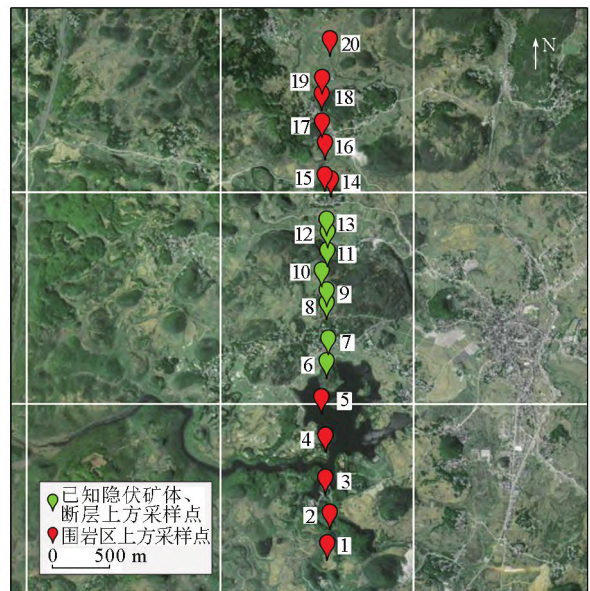


图3 水银洞卡林型金矿纳秧段采样点分布(奥维互动地图投影)

Fig.3 Distribution map of sampling sites in the Nayang section of the Shuiyindong Carlin-type deposit (Ovi interactive map projection)

2.2 样品处理和分析

土壤样品自然风干、捏碎后,直接过200目(74 μm)孔径的筛子,仅取微细粒级土壤成分进行研究。

每件土壤样品分为两份,一份送至河南省岩石矿物测试中心分析微量元素 Au、As、Cu、Sb、Hg 的含量,检测方法依据、主要检测仪器和标样信息见表 1,所有样品的数据均高于检出限,报出率均为 100%,用标准样品的分析结果计算的相对标准偏差(RSD)也满足数据质量控制要求。另一份土壤样品送至核工业北京地质研究院分析测试研究中心分析 Pb、S 同

位素组成(表 1)。所有测试用实验室重复样和标准样品来监控数据的准确度和精确度,分析结果可靠。

3 分析结果

3.1 地表微细粒土壤微量元素组成特征

水银洞卡林型金矿纳秧段采集的 20 件微细粒土壤样品的微量元素 Au、As、Cu、Sb、Hg 统计参数见表 2。总土壤样品中 Au、Cu 的变异系数小于 50%,样品间含量差异小;而 As、Sb、Hg 的变异系数较大,分别为 112%、138%、136%,表明这 3 种元素样品间的含量差异较大。隐伏矿体上方土壤中 Au、As、Sb、Hg(除 Cu 外)的中位数、算术平均值和几何平均值均高于围岩区上方的土壤,特别是 As、Sb 和 Hg。其中 As 的中位数(可代表背景值^[40]) 在隐伏矿体上方土壤中的值是围岩区土壤的 2.91 倍,Hg 为 4.01 倍,Sb 为 5.11 倍;As 的算术平均值是围岩区的 2.84 倍,Hg 为 5.47 倍,Sb 为 2.68 倍。Cu 在隐伏矿体上方土壤中的含量低于围岩上方土壤,围岩区算术平均值达 80.46×10^{-6} ,而隐伏矿体上方算术平均值仅为 60.04×10^{-6} 。

表 1 各元素分析的检测方法依据、主要检测仪器和标样信息

Table 1 Analytical methods, instruments and standards of elements

检测项目	检测依据	检测仪器	标准样品
Au	DZ/T 0279.4—2016	XSERIES2 电感耦合等离子体质谱仪	GAu-9、GAu-11
Cu	GB/T 14506.30—2010		
As、Sb	DZ/T 0279.13—2016	AFS-8330 双道原子荧光光度计	GSS-19、GSS-23
Hg	NY/T 1121.10—2006		
S 同位素	DZ/T 0184.15—1997	Deltavplus 气体同位素质谱计	IAEA-SO-5、IAEA-SO-6、NBS-127
Pb 同位素	DZ/T 0184.12—1997	Phoenix 热表面电离质谱仪	NBS981

表 2 水银洞卡林型金矿纳秧段微细粒级土壤 5 种微量元素统计参数

Table 2 Statistical parameters of five trace elements in fine-grained soils in the Nayang section of the Shuiyindong Carlin-type deposit

元素	位置	最小值	中位数	最大值	算术平均值	几何平均值	标准偏差	变异系数/%
Au	总矿段	0.93	2.61	5.55	2.84	2.60	1.24	44
	围岩区上方	0.93	2.20	3.15	2.21	2.11	0.67	30
	矿体上方	1.80	3.81	5.55	3.79	3.56	1.33	35
	矿体/围岩区上方		1.73		1.71	1.69		
Cu	总矿段	31.96	74.66	103.00	72.29	69.07	19.91	28
	围岩区上方	58.87	82.47	103.00	80.46	79.18	14.70	18
	矿体上方	31.96	69.25	85.06	60.04	56.27	21.22	35
	矿体/围岩区上方		0.84		0.75	0.71		
As	总矿段	8.10	49.21	325.09	83.13	49.54	93.21	112
	围岩区上方	8.10	29.01	224.00	47.94	30.28	59.53	124
	矿体上方	42.46	84.32	325.09	135.92	103.63	112.71	83
	矿体/围岩区上方		2.91		2.84	3.42		
Sb	总矿段	0.75	11.41	98.90	16.94	7.78	23.30	138
	围岩区上方	0.75	2.91	50.27	10.13	4.20	15.25	151
	矿体上方	11.33	14.84	98.90	27.15	19.60	30.15	111
	矿体/围岩区上方		5.11		2.68	4.66		
Hg	总矿段	0.217	1.157	11.884	2.483	1.247	3.372	136
	围岩区上方	0.217	0.820	2.656	0.891	0.626	0.761	85
	矿体上方	1.189	3.292	11.884	4.872	3.505	4.369	90
	矿体/围岩区上方		4.01		5.47	5.60		

注: Au 的含量单位为 10^{-9} , 其他元素为 10^{-6} ; 总样品数为 20 件, 其中围岩区上方 12 件, 深部隐伏矿体上方 8 件; 变异系数 = (标准偏差 / 算术平均值) × 100%; 矿体/围岩区上方 = 矿体上方土壤的中位数、算术平均值或几何平均值除以围岩区上方土壤的中位数、算术平均值或几何平均值。

用SPSS软件对总样品5种微量元素进行相关性分析(表3)。Au与As、Hg在 $p < 0.01$ 水平(双侧)上均呈正相关,Pearson相关系数分别为0.654、0.720。此外As和Hg在 $p < 0.01$ 水平(双侧)上也呈明显的正相关性,Pearson相关系数为0.890。

地表土壤5种微量元素沿采样剖面变化的折线图见图4。由南至北,自围岩区上方、隐伏矿体和断层上方到围岩区上方,Au、As、Sb、Hg含量先升高后降低,高异常出现在隐伏矿体和断层上方:Au在10、11、12号点处含量分别为 5.55×10^{-9} 、 5.33×10^{-9} 、 4.20×10^{-9} ;As在11、12号点处含量分别为 325.09×10^{-6} 、 301.10×10^{-6} ;Sb在10、12号点处含量分别 36.79×10^{-6} 、 98.90×10^{-6} ;Hg在11、12号点处含量分别为 11.719×10^{-6} 、 11.884×10^{-6} ,其中11、12号点位于断层 F_{101} 出露区,说明与深部矿体有关的微量元素信息可沿断层迁移至地表。此外,Au在隐伏矿体上方6号点处也存在明显高异常(4.39×10^{-6})。Sb在围岩上方1号点处存在明显高异常(50.27×10^{-6})。而Cu在剖面上的变化与上述4种

元素相反,由南至北,Cu先降低后升高,并且围岩区上方比隐伏矿区上方含量高,其中16号点位处最高(103.00×10^{-6})。

3.2 土壤硫同位素组成

水银洞卡林型金矿纳秧段采集的20件微细粒土壤样品的硫同位素组成的统计参数见表4。总土壤样品中 $\delta^{34}S$ 的变异系数为89.5%,差异较大,围岩区上方土壤样品的 $\delta^{34}S$ 范围为 $-3.2\text{‰} \sim 6.2\text{‰}$,平均值为 2.0‰ ;深部隐伏矿体和断层上方土壤样品的 $\delta^{34}S$ 范围为 $4.5\text{‰} \sim 12.5\text{‰}$,平均值为 7.5‰ ;且后者的中位数和平均值均高于前者,分别为4.5倍、3.8倍。

地表土壤样品中硫同位素组成沿采样剖面变化的折线图见图5,隐伏矿体、断层上方的土壤样品的 $\delta^{34}S$ 明显高于剖面北边围岩区上方土壤样品的 $\delta^{34}S$,同剖面南边围岩区上方土壤样品的 $\delta^{34}S$ 对比无明显差异,说明不同围岩发育的土壤的 $\delta^{34}S$ 差异较大。隐伏矿上方10号点 $\delta^{34}S$ 最大(12.5‰),7号点 $\delta^{34}S$ 最小(4.5‰)。

3.3 土壤铅同位素组成

水银洞卡林型金矿纳秧段采集的20件微细粒土壤样品的铅同位素组成统计参数见表4。总土壤样品中 $w(^{206}Pb)/w(^{204}Pb)$ 、 $w(^{207}Pb)/w(^{204}Pb)$ 、 $w(^{208}Pb)/w(^{204}Pb)$ 的变化范围分别为18.860 ~ 21.438、15.622 ~ 15.834、38.888 ~ 39.276,其中 $w(^{206}Pb)/w(^{204}Pb)$ 在隐伏矿体、围岩上方变异系数大于1.00%,同位素组成变化范围宽,分别为1.832、1.218; $w(^{206}Pb)/w(^{204}Pb)$ 、 $w(^{207}Pb)/w(^{204}Pb)$ 在隐伏矿体上方与围岩区上方土壤的中位

表3 水银洞卡林型金矿纳秧段微细粒土壤5种微量元素相关性分析

Table 3 Correlation analysis of five trace elements in fine-grained soils in the Nayang section of the Shuiyindong Carlin-type deposit

元素	Cu	As	Sb	Hg
Au	-0.254	0.654 **	0.477 *	0.720 **
Cu		0.018	0.004	-0.014
As			0.562 **	0.890 **
Sb				0.577 **

注:“**”表示在 $p < 0.01$ 水平(双尾)相关性显著;“*”表示在 $p < 0.05$ 水平(双尾)相关性显著。

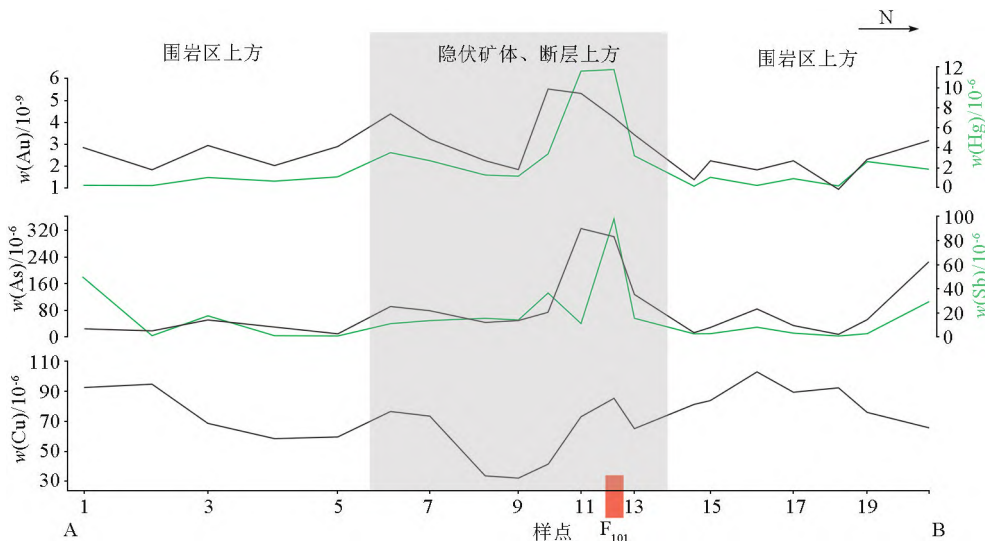


图4 水银洞卡林型金矿纳秧段微细粒土壤5种微量元素的剖面变化折线

Fig.4 Change trends of five trace elements in fine-grained soils along the exploration line in the Nayang section of the Shuiyindong gold deposit

表 4 水银洞卡林型金矿纳秧段土壤样品 S、Pb 同位素组成的统计参数

Table 4 Statistical parameters of S and Pb isotopic compositions of fine-grained soils in the Nayang section of the Shuiyindong Carlin-type gold deposit

硫、铅同位素组成	最小值	中位数	最大值	算术平均值	几何平均值	标准偏差	变异系数/%
$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	总矿段	-3.2	4.6	12.5	4.2	3.8	89.5
	围岩区上方	-3.2	1.7	6.2	2.0	2.6	130.9
	矿体上方	4.5	7.5	12.5	7.5	2.6	34.6
	矿体/围岩区上方		4.5		3.8		
$w(^{206}\text{Pb})/$ $w(^{204}\text{Pb})$	总矿段	18.860	19.904	21.438	19.969	19.951	0.869
	围岩区上方	18.860	19.176	20.692	19.398	19.391	0.573
	矿体上方	20.220	20.850	21.438	20.826	20.823	0.368
	矿体/围岩区上方		1.087		1.074	1.074	
$w(^{207}\text{Pb})/$ $w(^{204}\text{Pb})$	总矿段	15.622	15.719	15.834	15.724	15.724	0.065
	围岩区上方	15.622	15.685	15.779	15.684	15.684	0.049
	矿体上方	15.740	15.784	15.834	15.783	15.783	0.031
	矿体/围岩区上方		1.006		1.006	1.006	
$w(^{208}\text{Pb})/$ $w(^{204}\text{Pb})$	总矿段	38.888	39.034	39.276	39.048	39.048	0.096
	围岩区上方	39.011	39.095	39.276	39.100	39.100	0.082
	矿体上方	38.888	38.962	39.046	38.969	38.969	0.050
	矿体/围岩区上方		0.997		0.997	0.997	

注:变异系数 = (标准偏差 / 算术平均值) × 100%; 矿体/围岩上方 = 矿体上方土壤的中位数或算术平均值除以围岩区上方土壤的中位数或算术平均值。

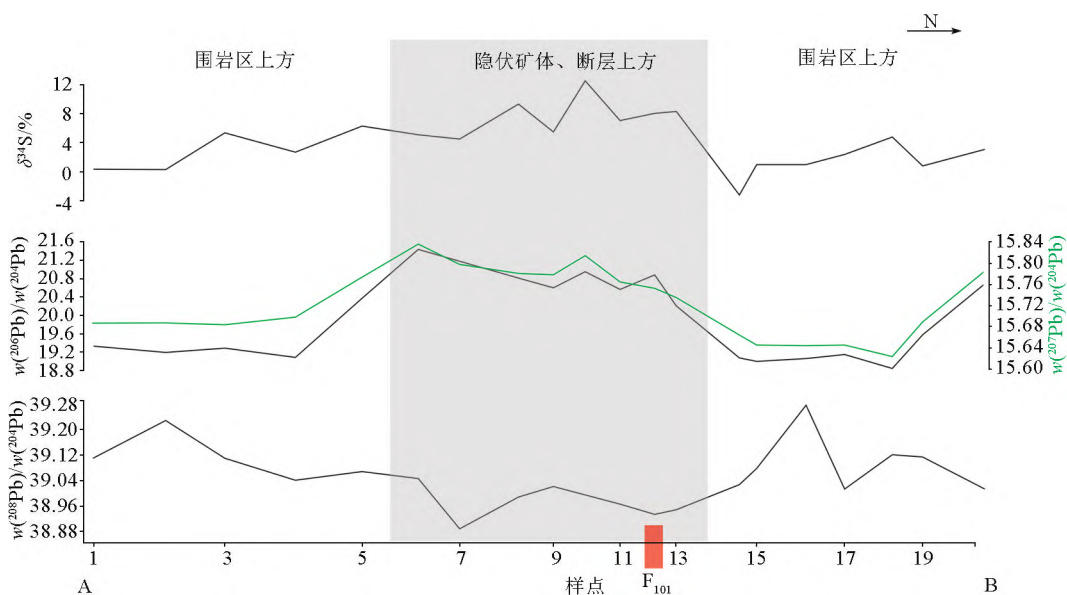


图 5 水银洞卡林型金矿纳秧段微细粒土壤 S、Pb 同位素组成的剖面变化折线

Fig.5 Change trends of S and Pb isotopic compositions of fine-grained soils in the Nayang section of the Shuiyindong Carlin-type gold deposit

数、算术平均值、几何平均值的比值略大于 1, 而 $w(^{208}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 与上述情况正好相反, 这些比值都略小于 1。

地表土壤样品中 Pb 同位素组成沿采样剖面变化的折线图见图 5, 从南至北, 围岩区上方、隐伏矿体和断层上方到围岩区上方, $w(^{208}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 比值沿剖面先降低再升高, 围岩区含量较隐伏矿体上方高; $w(^{206}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 、 $w(^{207}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 沿剖面变化曲线一致, 比值先升高再降低, 隐伏矿体上方呈现高异常, 其中 6 号点出现峰值, $w(^{206}\text{Pb})/$

$w(^{204}\text{Pb})$ 为 15.834、 $w(^{207}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 为 21.438, 在断层 F_{101} 附近 10 号点呈现小幅升高。

4 讨论

4.1 地表微细粒土壤测量技术在研究区的试验效果

测量地表微细粒土壤中成矿元素和重要伴生元素的全量来寻找隐伏矿床的原理^[41-43]为: 隐伏金属矿体富含与矿有关的超微细金属、金属离子或化合物, 可在一种或多种地质营力(如地下水、电场、地

气流、蒸发作用、浓度梯度、毛细管作用等)的作用下迁移至地表,被上覆土壤或其他疏松的地球化学障所捕获,常常富集在细粒级黏土中,地表微细粒土壤中与成矿有关的元素表现出异常,利用该异常可在一定程度上判别下伏是否存在隐伏矿体。如张必敏等^[44]在内蒙古半干旱草原区准苏吉花隐伏铜钼矿上方开展土壤细粒级全量测量试验,发现成矿元素 Mo、Cu 的主体异常分布范围与深部隐伏矿体的分布较为一致,可有效地指示隐伏铜钼矿体。刘汉粮等^[45]在新疆沙泉子铜镍矿区开展土壤微细粒全量测量的试验,发现成矿元素地球化学异常分布与矿体和找矿靶区吻合度最高,具有 Cu-Ni-Cr-Co 的元素异常组合,为该矿区寻找隐伏铜镍矿的有效手段。刘汉粮等^[46]在甘肃柳园花牛山铅锌矿区利用微细粒土壤全量测量技术圈定的成矿元素地球化学异常具有多元素异常组合特征,主成矿元素 Pb、Zn 的含量高值区与深部隐伏矿体相对应,该方法可作为柳园花牛山矿区寻找隐伏矿的有效手段。

本次研究的地表微细粒级全量测量中,主成矿元素 Au 在隐伏矿体和断层上方的中位数、算术平均值和几何平均值均高于围岩区上方土壤(比值分别为 1.73、1.71、1.69,如表 2 所示),并且沿围岩区→隐伏矿和断层上方→围岩区含量先升高后降低,在隐伏矿和断层上方的 10、11、12 号点位呈高异常(图 4),异常区与深部矿体吻合。伴生元素 As、Sb、Hg 与主成矿元素 Au 关系密切(表 3),隐伏矿体上方的中位数、算术平均值和几何平均值均高于围岩区上方的土壤(表 2),且在隐伏矿和断层上方的 10、11、12 号点位呈明显高异常(图 4),异常区与深部隐伏矿体对应效果好。张必敏等^[47]在黄土覆盖区的申家窑金矿进行土壤微细粒测量技术试验得到了类似的结果,Au、As、Sb 的分布模式一致,都与金矿脉分布较为吻合,并认为土壤微细粒测量方法可有效用于寻找隐伏金矿,Au、As、Sb 可作为黄土覆盖区寻找隐伏金矿的指示元素。夏勇等^[25]对水银洞金矿的微量元素地球化学特征分析,发现研究区 Au、Hg、Sb、As 元素组合沿构造轴线分布,指示着成矿元素在有利构造带中富集,结合成矿规律,在水银洞金矿成矿预测研究中取得很好效果,为黔西南区域隐伏金矿寻找提供方向。

研究区地表微细粒土壤的 Au、As、Sb、Hg 异常可有效指示下伏的隐伏矿体,但仅在空间上对应,无法确定地表异常是否真的来自深部隐伏矿体,故下面用 S、Pb 两种同位素进行示踪,查明地表异常与深部隐伏矿体的关系。

4.2 硫同位素示踪地表异常来源

多数隐伏金属矿体的含矿矿物为硫化物,例如水银洞金矿中的黄铁矿、毒砂等, $(S_2)^{2-}$ 或 S^{2-} 在矿体周围浓度高,可在地气流的作用下迁移至地表土壤中,在表生环境中被氧气氧化,或被细菌氧化,形成高价态的化合物(硫酸盐或亚硫酸盐),从而富集重同位素^[48],分馏约 5‰^[49],因此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。地球上硫有以下 4 种来源:①岩浆硫(地幔硫), $\delta^{34}S$ 值为 $(0\pm 3)\%$;②海水硫,通常以较大的正值为特征;③沉积硫(地层硫),硫同位素组成变化极大($-40\%\sim 50\%$);④混合硫,由两种或两种以上不同来源的硫的混合,硫同位素高低通常视混入硫同位素组成和混入的比例而定^[33, 50]。曾键年等^[51]通过对江西金山矿床的硫同位素组成特征研究,发现其与外围双桥山群上亚群中硫化物的硫同位素极为相似,成矿流体的硫主要来源于双桥山群含矿建造。席明杰等^[52]通过对乌奴格吐山和垦山试验区 Cu 矿化体、Cu 异常地段的硫同位素组成特征的研究,发现二者硫来源一致,说明用硫同位素组成特征判断地球化学异常是可行的。唐龙飞等^[53]通过研究桂北丹池成矿带中的大厂矿田中硫同位素组成特征,发现拉么锌铜矿硫的来源为岩浆硫,铜坑深部锌铜矿体为岩浆硫和地层硫的混合,根据硫同位素分布规律预测铜坑深部 96 号矿体往下至龙箱盖隐伏岩体顶部空间具有较好找矿前景。

本文收集了前人已发表的水银洞金矿矿石和围岩中硫化物的硫同位素组成数据(表 5),并绘制了硫同位素分布的频率直方图(图 6)。27 件硫化物的 $\delta^{34}S$ 分布范围为 $-8.41\%\sim 27.17\%$,平均值为 6.55% 。其中 20 件矿石黄铁矿的 $\delta^{34}S$ 分布范围为 $-8.41\%\sim 27.17\%$,主要集中在 $1\%\sim 9\%$,平均值为 7.56% 。由于卡林型金矿载金黄铁矿粒度细小,且一些黄铁矿具环带结构,常以沉积期黄铁矿为核结晶热液期黄铁矿,因此测得的矿石黄铁矿中硫同位素组成代表沉积期与热液黄铁矿混合的结果^[54]。5 件雄黄的 $\delta^{34}S$ 分布范围为 $2.7\%\sim 5.28\%$,均值为 3.844% ,与矿石中辉锑矿(2‰)和毒砂(4.5‰)的硫同位素组成一致。10 件围岩黄铁矿的 $\delta^{34}S$ 分布集中在两个区域: $-26\%\sim -23\%$ 以及 $3\%\sim 9\%$,平均值为 -3.37% ,因为不同研究者采集的围岩样品不同,围岩黄铁矿的 $\delta^{34}S$ 差异较大,且矿石黄铁矿 $\delta^{34}S$ 的平均值明显高于围岩。矿石各硫化物中硫同位素组成与岩浆硫($(0\pm 3)\%$)相比更富集 ^{34}S ,其主体分布范围与岩浆硫最接近,但不排除其他硫源的

表 5 水银洞卡林型金矿矿石、围岩样品的硫同位素数据

Table 5 Sulfur isotopic data of ore and wall rock samples in the Shuiyindong Carlin-type deposit

样品编号	分析矿物	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	参考文献	样品编号	分析矿物	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	参考文献
IIe		-0.43		SYD-S-2		1.6	
IIIf		-8.41		SYD-S-1		15.3	
IIIa		5.72	[25]	SYD-S-6		3.6	
IIIb-1		8.16		SYD-S-9		21	[54]
IIIb-2	黄铁矿	27.17		SYD-S-10	黄铁矿	8.4	
IIIb-3		21.11		SYD-S-11		7.3	
ZK1618		7		SYD-S-12		13.1	
ZK1404		3.18	[56]	NY-9		4.3	
ZK1130		6.72		NY-11		3.99	
SYD-16		-2.5		NY-12		4.84	[57]
ZKSYD-68	辉锑矿	2		ZK42332		3.27	
SYD-3	毒砂	4.5	[39]	ZK31116-8	雄黄	5.28	
SYD-12	雄黄	2.7		ZK31116-3		4.77	
SYD-14		3.2		SYD-S-5		6.8	
ZK1618		6.91		SYD-S-3	黄铁矿	3.7	[54]
ZK1404		6.01	[56]	SYD-S-4		3.9	
ZK1130	黄铁矿	8.67		SYD-S-7		4.6	
SYD-W-3		-25.73					
SYD-W-3		-23.67	[58]				
SYD-W-3		-24.92					

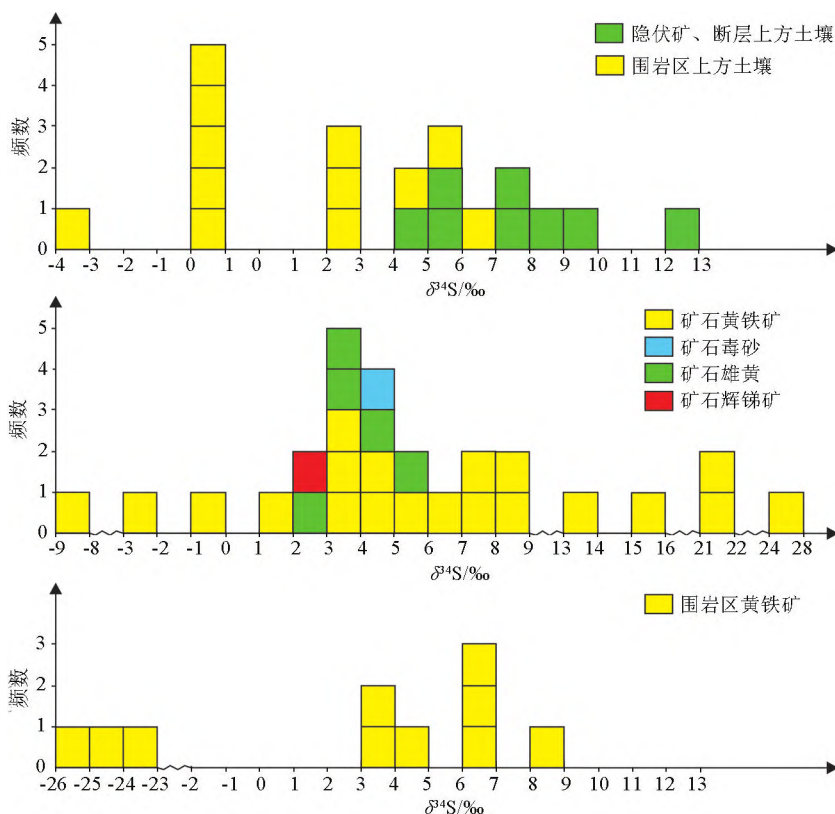


图 6 水银洞卡林型金矿区土壤、矿石、围岩的硫同位素组成

Fig.6 Sulfur isotopic composition of soils, ores and surrounding rocks in the Shuiyindong Carlin-type gold deposit

混入。朱赖民等^[55]通过研究黔西南地区成矿流体与二叠系、三叠系岩石的水岩作用对硫同位素组成的影响,发现本区域金矿床的真正硫源可能为深源硫与地层硫源混合而成。

研究区地表微细粒土壤的硫同位素组成能指示

地表与成矿有关的金属异常(Au、As、Sb、Hg)来自深部隐伏矿体,因为:①硫同位素与主成矿元素Au相关性较好,在 $p < 0.01$ 水平(双侧)上显著正相关,相关系数为0.652(表6);Au与 $\delta^{34}\text{S}$ 的高异常区吻合,均在10、11号点位附近(图4、图5);②隐伏矿

体和断层上方土壤 $\delta^{34}\text{S}$ 的中位数、算术平均值分别是围岩区土壤 $\delta^{34}\text{S}$ 的 4.5 倍和 3.8 倍(表 4), 由于矿石硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值(6.55‰) 大于围岩黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值(-3.37‰), 而与深部矿体有关的

(S_2)²⁻或 S^{2-} 迁移至地表后, 可被氧气或细菌氧化而富集重同位素, 使得隐伏矿体及断层上方土壤中的 $\delta^{34}\text{S}$ 值显著高于围岩区土壤。

表 6 水银洞卡林型金矿纳秧段微细粒土壤 4 种微量元素与硫、铅同位素的相关性分析
Table 6 Correlation analysis of four trace elements in fine-grained soils with sulfur and lead isotopes in the Nayang section of the Shuiyindong Carlin-type deposit

指标	As	Sb	Hg	$\delta^{34}\text{S}$	$w(^{206}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$	$w(^{207}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$	$w(^{208}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$
Au	0.653 **	0.476 *	0.719 **	0.652 **	0.711 **	0.689 **	-0.438
As		0.562 **	0.890 **	0.359	0.503 *	0.39	-0.417
Sb			0.578 **	0.35	0.391	0.29	-0.316
Hg				0.464 *	0.522 *	0.406	-0.487 *
$\delta^{34}\text{S}$					0.679 **	0.655 **	-0.508 *
$w(^{206}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$						0.966 **	-0.652 **
$w(^{207}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$							-0.595 **

注: “**”表示在 $p < 0.01$ 水平(双尾)相关性显著; “*”表示在 $p < 0.05$ 水平(双尾)相关性显著。

4.3 铅同位素示踪地表异常来源

铅是多数金属矿床的伴生元素, 不同矿化作用具有不同的初始铅同位素组成特征, 其后期变化主要由放射性 U、Th 衰变反应引起, 且不受其他过程的影响^[59]。金属矿体与围岩 U、Th 含量不同, 分析矿床周围多种介质的铅同位素组成和分布特征, 将其与土壤铅同位素比值进行比较, 示踪地表土壤中异常的来源及其与深部隐伏矿体的关系。汪明启等^[60]研究甘肃蛟龙掌铅锌矿床地气中 Pb 同位素特征, 发现异常区地气 Pb 同位素组成明显不同于背景区, 异常区样品有深部矿石硫化物中 Pb 的加入, 证明地气可用于覆盖区矿产勘查。李中兰等^[61]对北祁连地区寒山金矿的 Pb 同位素组成开展研究, 发现其矿体暴露深度自西向东存在由深至浅的规律变化, 向东隐伏, 根据其隐伏系数, 推测寒山金矿床为特大型金矿床。崔学军等^[62]对甘肃鹰嘴山金矿区地表 Pb 同位素组成进行研究, 提出利用铅同位

素进行隐伏矿深度、形态与资源量预测的方法, 根据其矿区隐伏系数推测鹰嘴山金矿床为大型—特大型金矿床。

本文收集了前人发表的水银洞金矿矿石中黄铁矿的铅同位素组成数据(表 7), 发现矿石黄铁矿的 $w(^{208}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 、 $w(^{206}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 、 $w(^{207}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 最大值(表 7)均小于隐伏矿体和断层上方土壤的最小值(表 4), 说明土壤母质中的 U 和 Th 的含量比矿石黄铁矿中的高, 土壤中有更高含量的放射性成因的铅。 $w(^{206}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 、 $w(^{207}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 沿围岩区→隐伏矿体和断层上方→围岩区上方, 变化曲线一致(图 5), 比值先升高再降低, 在隐伏矿体和断层上方呈现高异常, 其中 6 号点出现峰值, 在断层 F_{101} 附近 10 号点出现小幅升高现象; $w(^{208}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 沿剖面先降低再升高(图 5), 围岩区比值较隐伏矿体和断层上方高。

国内外学者用铅同位素示踪时, 常用 $w(^{207}\text{Pb})/w(^{206}\text{Pb}) - w(^{206}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 或 $w(^{206}\text{Pb})/w(^{207}\text{Pb}) - w(^{206}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 图解^[60], 本文重点讨论 $w(^{207}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb}) - w(^{206}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 图解, 同时结合 $w(^{208}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb}) - w(^{207}\text{Pb})/w(^{206}\text{Pb})$ 进行分析(图 7)。矿石黄铁矿、围岩区上方土壤、隐伏矿体和断层上方土壤中铅同位素组成在 $w(^{207}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb}) - w(^{206}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 图解上大致呈线性排布(图 7a), $w(^{207}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 、 $w(^{206}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 有隐伏矿体和断层上方土壤 > 围岩区上方土壤 > 矿石黄铁矿的关系。在 $w(^{208}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb}) - w(^{207}\text{Pb})/w(^{206}\text{Pb})$ 散点图上(图 7b), 隐伏矿体、断层上方土壤、围岩区上方土壤、矿石黄铁矿分布在不同的区域, 具有不同的组成范围, 且 $w(^{208}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 存在隐伏矿体和断层上方土壤 \approx 围岩区

表 7 水银洞卡林型金矿矿石黄铁矿的铅同位素组成

Table 7 Lead isotopic composition of pyrite in the Shuiyindong Carlin-type gold deposit

样品	$w(^{206}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$	$w(^{207}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$	$w(^{208}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$	参考文献
IIe	18.361	15.56	38.452	[25]
IIIf	18.383	15.642	38.729	
IIIa	18.304	15.54	38.501	
IIIb-1	18.452	15.532	38.332	
IIIb-2	17.942	15.56	38.158	
IIIb-3	18.145	15.551	38.382	
SYD-11	18.648	15.612	38.712	[39]
SYD-3	18.213	15.628	38.496	
SYD-20	18.459	15.608	38.508	
分布范围	17.942~18.648	15.532~15.642	38.158~38.729	
平均值	18.323	15.581	38.474	

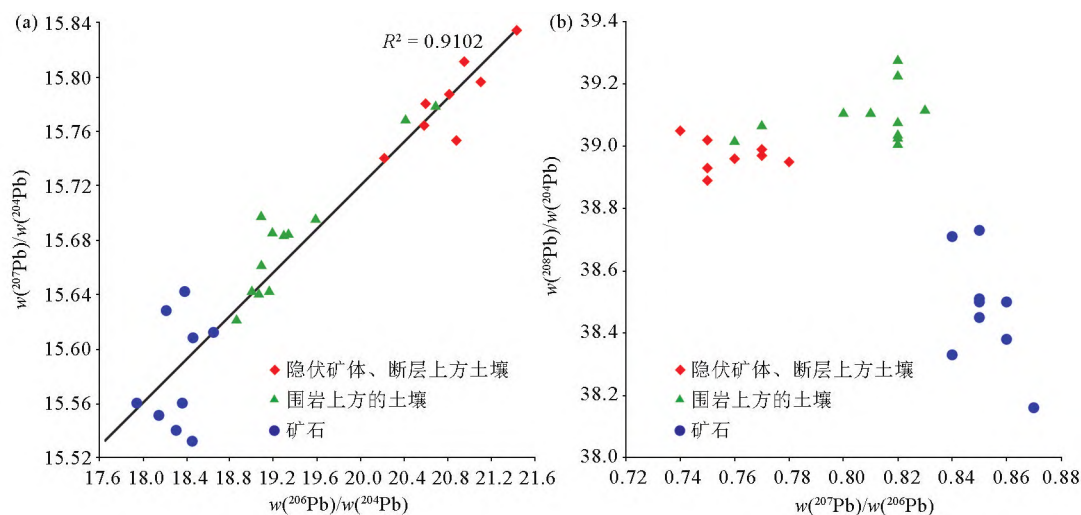


图 7 水银洞卡林型金矿纳秧矿段地表土壤、矿石黄铁矿的 $w(^{207}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb}) - w(^{206}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ (a)、 $w(^{208}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb}) - w(^{207}\text{Pb})/w(^{206}\text{Pb})$ (b) 图解

Fig.7 $w(^{207}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb}) - w(^{206}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ (a)、 $w(^{208}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb}) - w(^{207}\text{Pb})/w(^{206}\text{Pb})$ (b) diagram of the surface soil and ore pyrite in the Nayang section of Shuiyindong Carlin-type gold deposit

上方土壤 > 矿石黄铁矿的关系。

用 SPSS 软件对指示效果较好的微细粒土壤微量元素 Au、As、Sb、Hg 与铅同位素进行相关性分析(表 6), $w(^{206}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 与 Au、Hg 在 $p < 0.01$ 水平(双侧)上显著正相关, 相关系数分别为 0.711、0.679, 与 $\delta^{34}\text{S}$ 在 $p < 0.01$ 水平(双侧)上显著正相关, 相关系数为 0.679; $w(^{207}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 同样与 Au、Hg 在 $p < 0.01$ 水平(双侧)上显著正相关, 相关系数分别为 0.689、0.655, 与 $\delta^{34}\text{S}$ 在 $p < 0.01$ 水平(双侧)上显著正相关, 相关系数为 0.655; $w(^{208}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 与 4 种元素呈负相关关系; 此外 $w(^{206}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 和 $w(^{207}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 在 $p < 0.01$ 水平(双侧)上显著正相关, 相关系数为 0.966。

^{207}Pb 、 ^{206}Pb 为 ^{235}U 和 ^{238}U 的子体, ^{208}Pb 为 ^{232}Th 的子体, 土壤的 $w(^{207}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 、 $w(^{206}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 、 $w(^{208}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 均高于矿石黄铁矿, 说明土壤母质中含有更多的 U 和 Th, 有更高的放射成因铅。而隐伏矿体和断层上方土壤中 $w(^{207}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 、 $w(^{206}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 显著高于围岩区上方土壤, 但它们的 $w(^{208}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 组成差异不大, 这可能因为深部矿体周围的 U 含量较高, 迁移至地表后, 致使隐伏矿体和断层上方土壤放射成因的 $w(^{207}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 、 $w(^{206}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 比围岩区高。谭亲平等^[20] 对水银洞金矿构造地球化学特征研究发现, 在 SBT、断层 F_{101} 附近以及背斜核部靠近地表处 U 显示出与 Au 一致的富集特征, 前人研究同样指出 U 是黔西南卡林型金矿的异常元素之一^[63-64]。隐伏矿体和断层上方土壤中 $w(^{207}\text{Pb})/$

$w(^{204}\text{Pb})$ 、 $w(^{206}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 一部分来源于土壤母质及母质中 U 的衰变, 一部分来源于从深部矿体迁移至地表的 U 的衰变。综上所述, 研究区可以用 $w(^{206}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 、 $w(^{207}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 示踪地表微细粒土壤中的异常来自于深部的隐伏矿体。

4.4 迁移方式

本文用地表微细粒土壤全量测量技术在水银洞卡林型隐伏金矿区开展试验, 发现 Au-Hg-As-Sb 多元素异常组合与深部隐伏矿体和断层在空间上分布较一致, 而硫同位素、 $w(^{206}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 、 $w(^{207}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 共同证明这些地表的异常均来自于深部的隐伏矿体。那么研究区与矿体有关的金属如何迁移至地表, 并形成 Au-Hg-As-Sb 的组合异常呢? 这与它们的地球化学性质和研究区的构造活动有关。

刘建中等^[65] 的研究表明, 水银洞卡林型金矿在燕山期时与深部隐伏花岗岩有关的富含 Au^{2+} 、 Sb^{2+} 、 Hg^{2+} 、 As^{2+} 的热液, 在区域构造作用下沿深大断裂上涌, 且沿 P_2m 与 P_3l 间的不整合界面侧向迁移交代形成 SBT, 局部形成隐伏金矿体。在热液成矿早期往往生成毒砂和含砷黄铁矿, 辉锑矿形成稍晚, 而雄黄、辰砂形成更晚, As 与 Au 呈明显正相关, As 含量越高, Au 含量也随之增高, 含砷黄铁矿往往具环带结构, 环边相对富 Au; 辉锑矿一般不含 Au, 但二者关系密切; Hg、Au 具类似的地球化学性质从而共存于矿床中, 可见 Au、As、Sb、Hg 这 4 种元素关系密切^[66]。隐伏金矿体附近微米级、纳米级的 Au 颗粒浓度较高, 可随地气迁移至地表^[67-68]; Hg、As、

Sb 易挥发,是典型的前缘晕元素^[69],容易沿裂隙或断层迁移较远的距离,三者的活动顺序依次为 $Hg > As > Sb$ ^[70],因此 Hg 异常最为显著(Hg 在矿体上方土壤中含量的中位数、算术平均值、几何平均值与围岩区上方土壤中 Hg 含量的中位数、算术平均值、几何平均值的比值分别为 4.01、5.47、5.60,As 的比值分别为 2.91、2.84、3.42,Sb 的比值分别为 5.11、2.68、4.66,表 2),指示效果最好。由深部迁移至地表的金属被土壤中的有机质、铁锰氧化物(氢氧化物)、黏土矿物吸附从而在土壤中富集^[67-68, 71-72]。

研究区构造活动强烈,在形成宏观构造(灰家堡背斜、 F_{101} 断层等,图 1、图 2)的同时,在隐伏矿体上伏沉积岩(图 2)中形成大量微裂隙^[73],共同为成矿物质向地表运输提供迁移通道^[74],因此水银洞金矿可用 Au、As、Sb、Hg 在地表土壤中的微量元素全量异常指示下伏的隐伏矿体。

5 结论

本文以已知隐伏水银洞金矿纳秧段为研究对象,沿 A-B 勘探线采集地表土壤样品(围岩 12 件、隐伏矿上方 8 件),分析 5 种微量元素(Au、As、Cu、Sb、Hg)的含量以及 S、Pb 同位素的组成,验证微细粒土壤全量测量技术在该隐伏矿区的找矿效果,并根据 S、Pb 同位素组成示踪地表异常来源。研究表明:

1) 研究区用微细粒土壤全量测量技术取得了较理想的指示深部隐伏矿体的效果,地表微细粒级土壤的 Au、As、Sb、Hg 高异常区与下伏隐伏矿体和断层吻合,具 Hg-As-Sb-Au 多元素组合异常的特征,4 个元素中 Hg 的指示效果最好。

2) 自围岩区上方→隐伏矿体和断层上方→围岩区上方土壤, $\delta^{34}S$ 先增加后降低,隐伏矿体和断层上方土壤的 $\delta^{34}S$ 平均值明显高于矿石硫化物和围岩区上方土壤,且 $\delta^{34}S$ 与主成矿元素 Au 相关性较好。与深部矿体有关的 $(S_2)^{2-}$ 或 S^{2-} 迁移至地表土壤,被氧化富集重同位素,那么研究区用 S 同位素组成在一定程度上示踪了地表与成矿有关的金属异常来源于深部隐伏的金矿体。

3) 研究区可以用 $w(^{206}Pb)/w(^{204}Pb)$ 、 $w(^{207}Pb)/w(^{204}Pb)$ 示踪地表微细粒土壤中的异常来自于深部的隐伏矿体。因为 $w(^{207}Pb)/w(^{204}Pb)$ 、 $w(^{206}Pb)/w(^{204}Pb)$ 与成矿元素 Au、Hg 以及硫同位素相关性较强,且有隐伏矿体和断层上方土壤 > 围岩区上方土壤 > 矿石黄铁矿的关系;深部矿体周围的 U 含量

较高,迁移至地表后,隐伏矿体和断层上方土壤放射成因的 $w(^{207}Pb)/w(^{204}Pb)$ 、 $w(^{206}Pb)/w(^{204}Pb)$ 比围岩区高。

4) Au、As、Sb、Hg 的地球化学特征和该矿床的热液流体组成特征决定了它们在隐伏金矿体附近的含量较高,同时研究区强烈的构造活动为这些元素的迁移提供通道,所以可以在地表微细粒土壤中检测到与深部隐伏矿体有关的 Au-As-Sb-Hg 组合异常。

参考文献(References):

- [1] 龚敏.非常规化探方法在地质勘查中的应用浅析[J].科技资讯,2012(34):86-87.
Gong M. Application of unconventional geochemical exploration methods in geological exploration[J]. Science and Technology Information, 2012(34):86-87.
- [2] Kristiansson K, Malmqvist L. Evidence for nondiffusive transport of ^{222}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 Science, 1993, 102: B19-B29.
- [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, 1998, 61(1/13):87-102.
- [5] Wang X Q. Leaching of mobile forms of metals in overburden: Development and application[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1998, 61(1/3):39-55.
- [6] Antropova L V, Goldberg I S, Voroshilov N A, et al. New methods of regional exploration for blind mineralization: Application in the USSR[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1992, 43(2):157-166.
- [7] 谢学锦.用新观念与新技术寻找巨型矿床[J].科学中国人,1995(5):15-16.
Xie X J. Searching for giant deposits with new ideas and new technologies[J]. Scientific Chinese, 1995(5):15-16.
- [8] 王学求,刘占元,白金峰,等.深穿透地球化学对比研究两例[J].物探化探计算技术,2005,27(3):250-255,183.
Wang X Q, Liu Z Y, Bai J F, et al. Deep-enetration geochemistry-comparison studies of two concealed deposits.[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2005, 27(3):250-255,183.
- [9] 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.
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.

- [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]. Geoscience, 2012, 26(5): 1104-1116.
- [11] 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.
- [12] R·W·博伊尔.金的地球化学及金矿床[M].北京:地质出版社,1984.
Boyle R W. Gold geochemistry and gold deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984.
- [13] Radtke A S. Geology of the Carlin gold deposit, Nevada[G]//U. S. Geological Survey Professional Paper, Geological Survey (U.S.), 1985.
- [14] 蒲含科.板其金矿物岩石特征及矿床成因讨论[J].贵州地质,1987(2):151-161.
Pu H K. Mineral and rock characteristics and ore genesis of Banqi gold ore [J]. Geology of Guizhou, 1987(2): 151-161.
- [15] 陈潭钧.册亨板其金矿床地质特征及成因初探[J].贵州地质,1986,13(4):325-339.
Chen T J. A preliminary discussion on geological features and origin of Banqi Au-ore deposit in Ceheng [J]. Geology of Guizhou, 1986, 13(4): 325-339.
- [16] 谭运金.滇黔桂地区微细粒浸染型金矿床的矿床地球化学类型[J].矿床地质,1994,13(4):308-321.
Tan Y J. Geochemical types of the micro-and fine-grained disseminated gold deposits in Yunnan-Guizhou-Guangxi region [J]. Mineral Deposits, 1994, 13(4): 308-321.
- [17] 刘建中,邓一明,邱林,等.中国第一个I类型卡林型金矿床—水银洞金矿地质[J].矿床地质,2006,25(S1):175-178.
Liu J Z, Deng Y M, Qiu L, et al. Geological characteristic of the Shuiyindong gold deposit, the first I-type Carlin-type gold deposit in China [J]. Mineral Deposits, 2006, 25(S1): 175-178.
- [18] 刘建中,李建威,周宗桂,等.贵州贞丰—普安金矿整装勘查区找矿与研究新进展[J].贵州地质,2017,34(4):244-254.
Liu J Z, Li J W, Zhou Z G, et al. New progress of exploration and research of Zhenfeng-Puan gold fully equipped exploration area. [J]. Guizhou Geology, 2017, 34(4): 244-254.
- [19] 陈发恩,刘建中,杨成富,等.贵州省贞丰县水银洞超大型金矿床地质特征及构造控矿分析[J].贵州地质,2019,36(1):18-27.
Chen F E, Liu J Z, Yang C F, et al. Geological characteristics and structural ore control analysis of Shuiyindong super large gold deposit in Zhenfeng County, Guizhou Province [J]. Guizhou Geology, 2019, 36(1): 18-27.
- [20] 谭亲平,夏勇,谢卓君,等.黔西南水银洞卡林型金矿构造地球化学及对隐伏矿找矿的指示[J].地球学报,2020,41(6):886-898.
Tan Q P, Xia Y, Xie Z J, et al. Tectono-geochemistry and cocealed ores prospecting in the Shuiyindong gold deposit of Southwestern Guizhou [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2020, 41(6): 886-898.
- [21] 林鲁军,庞振山,薛建玲,等.水银洞金矿床地质特征、成因及找矿标志[J].矿物学报,2015,35(S1):1017-1018.
Lin L J, Pang Z S, Xue J L, et al. Geological characteristics, genesis and prospecting signs of the Shuiyindong gold deposit [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2015, 35(S1): 1017-1018.
- [22] 齐少烽,陈发恩,冯琳,等.贵州省水银洞金矿地质特征及成因浅析[J].中国地质调查,2015,2(6):53-58.
Qi S F, Chen F E, Feng L, et al. Geological characteristic and genesis of the Shuiyindong gold deposit, Guizhou [J]. Geological Survey of China, 2015, 2(6): 53-58.
- [23] 刘建中,夏勇,邓一明,等.贵州水银洞超大型金矿床金的赋存状态再研究[J].贵州地质,2007,24(3):165-169.
Liu J Z, Xia Y, Deng Y M, et al. Restudy on modes of gold occurrence in the Shuiyindong super-large-sized gold deposit [J]. Guizhou Geology, 2007, 24(3): 165-169.
- [24] 谭亲平,夏勇,王学求,等.黔西南灰家堡金矿田成矿构造模式及构造地球化学研究[J].大地构造与成矿学,2017,41(2):291-304.
Tan Q P, Xia Y, Wang X Q, et al. Tectonic model and tectonic-geochemistry characteristic of the Huijiabao gold orefield, SW Guizhou Province [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2017, 41(2): 291-304.
- [25] 夏勇,张瑜,苏文超,等.黔西南水银洞层控超大型卡林型金矿床成矿模式及成矿预测研究[J].地质学报,2009,83(10):1473-1482.
Xia Y, Zhang Y, Su W C, et al. Metallogenic model and prognosis of the Shuiyindong super-large stratabound carlin-type gold deposit, Southwestern Guizhou Province, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(10): 1473-1482.
- [26] 郭振春.黔西南灰家堡金矿田“两层楼”模式及找矿意义[J].黄金地质,2002,8(4):18-23.
Guo Z C. The two-stairs model of the Huijiapu gold field in southwestern Guizhou and its prospecting significance [J]. Gold Geology, 2002, 8(4): 18-23.
- [27] 刘建中,杨成富,王泽鹏,等.贵州省贞丰县水银洞金矿床地质研究[J].中国地质调查,2017,4(2):32-41.
Liu J Z, Yang C F, Wang Z P, et al. Geological research of Shuiyindong gold deposit in Zhenfeng County, Guizhou Province [J]. Geological Survey of China, 2017, 4(2): 32-41.
- [28] 刘世川.水银洞金矿成矿构造特征再认识与找矿思路[J].西部探矿工程,2021,33(1):88-91.
Liu S C. Reunderstanding of metallogenic tectonic characteristics of Shuiyindong gold deposit and ideas for prospecting [J]. West-China Exploration Engineering, 2021, 33(1): 88-91.
- [29] 周正均.水银洞金矿区矿床地质特征分析[J].世界有色金属,2017,483(15):117,119.
Zhou Z J. Analysis of geological characteristic of gold deposit in mercury cave gold mine [J]. World Nonferrous Metals, 2017, 483

- (15):117,119.
- [30] 王崇予.贵州贞丰水银洞金矿床矿石矿相学特征[J].新疆有色金属,2018,41(5):58-59.
Wang C Y.Mineral facies characteristics of ore deposits in Shuiyindong gold deposit, Zhenfeng, Guizhou [J]. Xinjiang Nonferrous Metals,2018,41(5):58-59.
- [31] 刘建中,陈景河,邓一明,等.贵州水银洞超大型金矿勘查实践及灰家堡矿集区勘查新进展[J].地质调查与研究,2009,32(2):138-143.
Liu J Z,Chen J H,Deng Y M,et al.Exploration of the Shuiyindong super-scale gold deposit and the evolution of exploration for metallogenic belt of the Huijiabao Anticline in Guizhou Province [J]. Geological Survey and Research,2009,32(2):138-143.
- [32] 苏信明.太平洞金矿床成因及找矿标志[J].建材与装饰,2016,419(15):192-193.
Su X M.Genesis and prospecting signs of Taipingdong gold deposit [J].Construction Materials & Decoration,2016,419(15):192-193.
- [33] 赵静,梁金龙,李军,等.贵州贞丰水银洞金矿床成因与成矿模式:来自载金黄铁矿 NanoSIMS 多元素 Mapping 及原位微区硫同位素的证据[J].地学前缘,2018,25(1):157-167.
Zhao J,Liang J L,Li J,et al.Genesis and metallogenic model of the Shuiyindong gold deposit, Guizhou Province: Evidences from high-resolution multi-element mapping and in situ sulfur isotopes of Au-carrying pyrites by NanoSIMS [J]. Earth Science Frontiers,2018,25(1):157-167.
- [34] 郑禄林,杨瑞东,刘建中,等.黔西南泥堡金矿床大型隐伏金矿体地质特征研究[J].地质与勘探,2014,50(4):689-699.
Zheng L L,Yang R D,Liu J Z,et al.Geological features of a large concealed gold orebody in the Nibao gold deposit, Southwestern Guizhou Province [J].Geology and Exploration,2014,50(4):689-699.
- [35] 靳晓野.黔西南泥堡、水银洞和丫他金矿床的成矿作用特征与矿床成因研究[D].武汉:中国地质大学(武汉),2017.
Jin X Y.Geology, mineralization and genesis of the Nibao, Shuiyindong and Yata gold deposits in SW Guizhou Province, China [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan),2017.
- [36] 夏勇.贵州贞丰县水银洞金矿床成矿特征和金的超常富集机制研究[D].贵阳:中国科学院研究生院地球化学研究所,2005.
Xia Y.Characteristics and model for Shuiyindong gold deposit in southwestern Guizhou, China [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences Guiyang, China,2005.
- [37] 宋发治.贵州水银洞金矿床地质特征及成因研究[D].成都:成都理工大学,2009.
Song F Z.Geological characteristics and genesis of the Shuiyindong gold deposit, Guizhou, China [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology,2009.
- [38] 谭代卫,刘建中.贵州水银洞金矿簸箕田1矿段940~1060 m 标高地质与生产勘探的矿体特征分析[C]//中国地球物理学会,2021.
Tan D W,Liu J Z.Analysis of the orebody characteristics of 940~1060 m elevation geology and production exploration in the 1st mining section of Fujitian, Shuiyindong Gold Mine, Guizhou [C]// Chinese Geophysical Society,2021.
- [39] 林鲁军.贵州省贞丰县水银洞金矿床地质地球化学特征和成因[D].北京:中国地质大学(北京),2017.
Lin L J.Geological and geochemical characteristics and genesis of the Shuiyindong gold deposit, Zhenfeng County, Guizhou Provnce [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing),2017.
- [40] 成杭新,李括,李敏,等.中国城市土壤化学元素的背景值与基准值[J].地学前缘,2014,21(3):265-306.
Cheng H X,Li K,Li M,et al.Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China [J]. Earth Science Frontiers,2014,21(3):265-306.
- [41] 鲁美,叶荣,张必敏,等.覆盖区地球化学勘查进展[J].矿床地质,2019,38(6):1408-1411.
Lu M,Ye R,Zhang B M,et al.Progress in geochemical exploration of covered areas [J]. Mineral Deposits,2019,38(6):1408-1411.
- [42] 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,2007,26(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,2007,26(12):1579-1590.
- [43] 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):247-250,254.
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):247-250,254.
- [44] 张必敏,王学求,贺灵,等.内蒙古半干旱草原区隐伏矿地球化学勘查方法试验[J].物探与化探,2013,37(5):804-810.
Zhang B M,Wang X Q,He L,et al.Geochemical exploration for concealed deposits on semi-arid grasslands of Inner Mongolia [J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2013,37(5):804-810.
- [45] 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].物探化探计算技术,2014,36(6):763-770.
Liu H L,Wang X Q,Zhang B M,et al.Geochemical exploration for concealed Cu-Ni deposit, Shaquanzi, Xinjiang [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration,2014,36(6):763-770.
- [46] 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.
- [47] 张必敏,王学求,叶荣,等.土壤微细粒分离测量技术在黄土覆盖区隐伏金矿勘查中的应用及异常成因探讨[J].桂林理工大学学报,2019,39(2):301-310.
Zhang B M,Wang X Q,Ye R,et al.Fine-grained soil prospecting method for mineral exploration in loess covered areas and discussion on the origin of geochemical anomalies [J]. Journal of Guilin University of Technology,2019,39(2):301-310.
- [48] 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,2007,53(6):807-813.

- Chang H J, Chu X L, H J, et al. Sulfur isotope fractionation accompanying bacterial action under sedimentary condition [J]. *Geological Review*, 2007, 53(6): 807-813.
- [49] Bin L, Shao Y J. Genesis of the giant Zijinshan epithermal Cu-Au and Luoboling porphyry Cu-Mo deposits in the Zijinshan ore district, Fujian Province, SE China: A multi-isotope and trace element investigation [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 88: 753-767.
- [50] 陕亮, 郑有业, 许荣科, 等. 硫同位素示踪与热液成矿作用研究 [J]. *地质与资源*, 2009, 18(3): 197-203.
Shan L, Zheng Y Y, Xu R K, et al. Review on sulfur isotopic tracing and hydrothermal metallogenesis [J]. *Geology and Resources*, 2009, 18(3): 197-203.
- [51] 曾键年, 范永香, 林卫兵. 江西金山金矿床成矿物质来源的铅和硫同位素示踪 [J]. *现代地质*, 2002, 16(2): 170-176.
Zeng J N, Fan Y X, Lin W B. The lead and sulfur isotopic tracing of the source of ore-forming material in Jinshan gold deposit in Jiangxi Province [J]. *Geoscience*, 2002, 16(2): 170-176.
- [52] 席明杰, 马生明, 朱立新, 等. 硫同位素在地球化学异常成因研究中的应用 [J]. *地质学报*, 2009, 83(5): 705-718.
Xi M J, Ma S M, Zhu L X, et al. The application of sulfur isotope in the cause of geochemical abnormality [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(5): 705-718.
- [53] 唐龙飞, 谭泽模, 黄敦杰, 等. 大厂矿田硫同位素特征及找矿预测 [J]. *有色金属: 矿山部分*, 2014, 66(6): 30-35.
Tang L F, Tan Z M, Huang D J, et al. Sulfur isotope characteristic and prospecting prediction of Dachang tinpolymetallic ore field [J]. *Nonferrous Metals; Mining Section*, 2014, 66(6): 30-35.
- [54] 王成辉, 王登红, 刘建中, 等. 贵州水银洞超大型卡林型金矿同位素地球化学特征 [J]. *地学前缘*, 2010, 17(2): 396-403.
Wang C H, Wang D H, Liu J Z, et al. Characteristics of isotope geochemistry of Shuiyindong super-large Carlin gold deposit in Guizhou [J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(2): 396-403.
- [55] 朱赖民, 金景福, 何明友, 等. 黔西南微细浸染型金矿床深部物质来源的同位素地球化学研究 [J]. *长春科技大学学报*, 1998, 28(1): 39-44.
Zhu L M, Jin J F, He M Y, et al. A study of isotopic geochemistry on plutonic material source for the fine-disseminated gold deposits in Southwestern Guizhou Province [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 1998, 28(1): 39-44.
- [56] 刘建中, 邓一明, 刘川勤, 等. 贵州省贞丰县水银洞层控特大型金矿成矿条件与成矿模式 [J]. *中国地质*, 2006, 33(1): 169-177.
Liu J Z, Deng Y M, Liu C Q, et al. Metallogenic conditions and model of the superlarge Shuiyindong stratabound gold deposit in Zhenfeng County, Guizhou Province [J]. *Geology in China*, 2006, 33(1): 169-177.
- [57] 熊灿娟, 栗梅. 水银洞金矿区硫同位素地球化学研究 [J]. *科技与创新*, 2015(9): 8-9.
Xiong C J, Su M. Shuiyindong goldfields sulfur isotope geochemistry [J]. *Science and Technology & Innovation*, 2015(9): 8-9.
- [58] 王泽鹏, 夏勇, 宋谢炎, 等. 黔西南灰家堡卡林型金矿田硫铅同位素组成及成矿物质来源研究 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2013, 32(6): 746-752.
Wang Z P, Xia Y, Song X Y, et al. Sulfur and lead isotopic composition of the Huijiabao carlin-type gold field and the ore-forming material sources in sources in southwest of Guizhou [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2013, 32(6): 746-752.
- [59] 汪明启. 铅同位素地球化学勘查方法及其在应用 [J]. *地质地球化学*, 1991(6): 37-40, 43.
Wang M Q. Lead isotope geochemical prospecting method and its application [J]. *Geochemistry*, 1991(6): 37-40, 43.
- [60] 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]. *Geochemistry*, 2007, 36(4): 391-399.
- [61] 李中兰, 崔学军, 刘红英, 等. 铅同位素方法在隐伏矿深度与资源量定量预测中的应用研究——以北祁连西段寒山金矿为例 [J]. *大地构造与成矿学*, 2007, 31(4): 441-451.
Li Z L, Cui X J, Liu H Y, et al. Application of Pb isotope for quantitative forecasting of blind ore deposits: A case study from the Hanshan gold deposit in the Northwestern Qilian Orogenic Belt [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2007, 31(4): 441-451.
- [62] 崔学军, 李中兰, 朱炳泉, 等. 铅同位素在矿产资源评价中的应用——以甘肃省鹰嘴山金矿区为例 [J]. *矿床地质*, 2008, 27(1): 88-100.
Cui X J, Li Z L, Zhu B Q, et al. Application of Pb isotopes to evaluation of mineral resources: A case study of Yingzuishan gold deposit, Gansu Province [J]. *Mineral Deposits*, 2008, 27(1): 88-100.
- [63] Zhang X C, Spiro B, Halls C, et al. Sediment-hosted disseminated gold deposits in Southwest Guizhou, PRC: Their geological setting and origin in relation to mineralogical, fluid inclusion, and stable-isotope characteristics [J]. *International Geology Review*, 2003, 45(5): 407-470.
- [64] Hu R Z, Su W C, Bi X W, et al. Geology and geochemistry of Carlin-type gold deposits in China [J]. *Mineralium Deposita*, 2002, 37(3): 378-392.
- [65] 刘建中, 夏勇, 张兴春, 等. 层控卡林型金矿床矿床模型——贵州水银洞超大型金矿 [J]. *黄金科学技术*, 2008, 16(3): 1-5.
Liu J Z, Xia Y, Zhang X C, et al. Model of strata karlin-type gold deposit: The shuiyindong super-scale gold deposit [J]. *Gold Science and Technology*, 2008, 16(3): 1-5.
- [66] Spycher N F, Reed M H. Evolution of a broadlands-type epithermal ore fluid along alternative P-T paths: Implications for the transport and deposition of base, precious, and volatile metals [J]. *Economic Geology*, 1989, 84(2): 328-359.
- [67] Wang X Q, Cheng Z Z, Lu Y X, et al. Nanoscale metals in earthgas 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(1): 63-72.
- [68] Wang X Q, Xie X J, Ye S Y, et al. Concepts for geochemical gold exploration based on the abundance and distribution of ultrafine gold [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1995, 55(1/3): 93-101.
- [69] 苏航, 陈功新, 邢林啸, 等. 冀中坳陷典型地热田前缘晕元素特

- 征及其对地热学意义[J].有色金属:矿山部分,2021,73(3):88-97.
- Su H, Chen G X, Xing L X, et al. Characteristics of the front halo elements of typical geothermal fields in Jizhong depression and their geothermal significance [J]. *Nonferrous Metals: Mining Section*, 2021, 73(3): 88-97.
- [70] 王小春. 微细浸染型金矿中 As Sb Hg Ti Ba 元素的找矿指示意义[J]. *矿产与地质*, 1992, 6(4): 307-312.
- Wang X C. Indicator significance of As, Sb, Hg, Ti and Ba for the micro-disseminated type gold deposits [J]. *Mineral Resources and Geology*, 1992, 6(4): 307-312.
- [71] Schuster E. The behavior of mercury in the soil with special emphasis on complexation and adsorption processes-A review of the literature [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1991, 56(1): 667-680.
- [72] Yin Y J, Herbert E A, Huang P, et al. Adsorption/Desorption isotherms of Hg(II) by soil [J]. *Soil Science*, 1997, 162(1): 35-45.
- [73] Li R H, Wang X Q, Yang L Q, et al. The characteristic of micro-structural deformation of gold bearing pyrite in Jiaodong: The links between nanoscale gold enrichment and crystal distortion [J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 122: 103495
- [74] 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 Geoscientica Sinica*, 2020, 41(6): 977-986.

Sulfur-lead isotopes based tracing of the metal element anomalies identified in the total metal measurement of surface fine-grained soils: A case study of the Shuiyindong Carlin-type concealed gold deposit

YUAN Yu-Ting¹, LIU Xue-Min¹, WANG Xue-Qiu², TAN Qin-Ping³

(1. *Applied Nuclear Technology in Geosciences Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China*; 2. *Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China*; 3. *State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China*)

Abstract: Exploring concealed deposits in covered areas is an important way to solve the current resource dilemma. Extensive experimental studies using the deep-penetration geochemical methods developed at home and abroad have been conducted targeting some known concealed deposits, yielding satisfactory results. However, these methods have yet to be widely employed for prospecting in unknown covered areas due to the failure in determining whether surface metal element anomalies are directly from deep ore bodies. Accordingly, it is urgent to develop a tracing technique for surface anomalies. The Shuiyindong gold deposit in Guizhou Province is a super-large fully-concealed Carlin-type gold deposit in China, and its ore-forming fluids are rich in elements such as S, Au, As, Sb, and Hg. This study sampled surface fine-grained soils in the Shuiyindong gold deposit for the concentration analysis of five trace elements (Au, As, Cu, Sb, and Hg), verifying the prospecting effect of the total metal measurement technique of fine-grained soils in this deposit. Moreover, the source of surface soil anomalies was identified using sulfur (S) and lead (Pb) isotopes. This study found that: ① The total metal measurement technique of fine-grained soils showed encouraging indicative effects, with the high Au-As-Sb-Hg anomalies obtained roughly consistent with the distribution of concealed ore bodies and faults, and Hg exhibited the best indication effect on concealed ore bodies. ② The $\delta^{34}\text{S}$ values and the ratios of radiogenic $w(^{207}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ and $w(^{206}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ in the soil above concealed ore bodies and faults were significantly higher than those in the soil of the surrounding rock area, effectively indicating that the anomalies in the surface fine-grained soils were from deep concealed ore bodies. This study provides a theoretical basis for exploring concealed Carlin-type gold deposits in the same type of covered areas using the total metal measurement technique of fine-grained soils.

Key words: sulfur and lead isotopes; total metal measurement of fine-grained soils; anomaly source tracing; Shuiyindong gold deposit

(本文编辑:蒋实)