

doi: 10.11720/wtyht.2021.1166

陈海龙,肖其鹏,梁巨宏.湖南沃溪金矿区及其外围烃汞叠加晕找矿方法的应用效果[J].物探与化探,2021,45(2):266-280.http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1166

Chen H L, Xiao Q P, Liang J H. The application of hydrocarbon and superimposed halo method to the Woxi gold deposit, Hunan Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(2): 266-280. http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1166

湖南沃溪金矿区及其外围 烃汞叠加晕找矿方法的应用效果

陈海龙¹,肖其鹏¹,梁巨宏²

(1.湖南省有色地质勘查研究院,湖南长沙 410015; 2.湖南辰州矿业有限责任公司,湖南沅陵 419607)

摘要:为解决沃溪矿区鱼儿山矿段及其外围的红岩溪—马儿桥矿段深部找矿问题,在区内开展了构造叠加晕和烃汞综合气体测量试验工作。通过对已知矿区鱼儿山矿段的不同地质体、不同标高烃汞组分演化规律和矿体上部土壤形成的地球化学烃汞异常的特征研究,总结土壤地球化学异常场结构、叠加特点及其空间对应关系来开展深部找矿预测,并对外围的红岩溪—马儿桥预测区开展烃汞叠加晕找矿方法的综合研究。经研究发现:红岩溪—马儿桥矿段土壤地球化学场存在两种不同类型叠加场,一类是深源叠加场,Au与烃类组分相关性较好,烃类异常组分齐全,同时Au、Hg异常较好,具有深源成矿热液叠加,深部找矿潜力较大;二类是同生叠加场,Au与烃类组分相关性较差,元素组合相对简单,缺少烃类组分异常,找矿意义不大。烃类异常模式以对偶双峰异常模式为主,在烃类异常双峰之间的低值区发育有较好的烃汞类综合叠加异常,说明深部具有平行盲脉存在。经钻探验证,深源叠加场深部见真厚度8.58 m、平均品位 3.55×10^{-6} 的金矿体,而同生叠加场只见有金矿化,故本次研究取得了良好的预测效果。

关键词: 烃汞叠加异常;地球化学;新方法;金矿;沃溪;湖南

中图分类号: P632 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2021)02-0266-15

0 引言

烃汞叠加晕找矿方法是烃汞测量和构造叠加晕两种方法结合而成的一种地球化学评价新方法,它是以有机烃成矿理论和叠加晕理论为基础,通过总结烃汞与成矿元素叠加特点来实现深部找矿预测。该方法主要包含两个方面叠加特点的研究:其一,将土壤地球化学所获得的烃汞和成矿元素形成的综合异常进行分类筛选,查明是否属于与深源成矿相关的叠加异常,来开展深部找矿评价;其二,利用烃汞异常模式中的对偶双峰异常模式^[1]叠加特点来开展平行盲脉的预测。

有机烃与金属成矿关系的研究,始于20世纪30年代,90年代至今,有机烃在金属矿床勘查中的应用已进入全面试验和深入研究阶段。前人研究表明:有机烃与金属成矿作用的关系极为密切^[2-5],从成矿物质的初始富集、活化转移、富集成矿直至矿体形成后叠加改造的整个成矿过程都存在有机烃的参与并发挥重要作用^[6-7]。通过对有机质烃异常形态、分布特征以及微观上烃类各组分间的相关性和变化规律总结,建立了烃类综合气体深部预测模式,均取得了较好的预测效果^[8-15]。同时也发现烃汞异常具有多解性,有烃汞异常不一定有矿的可能^[16],这也给单一烃汞测量的异常评价带来了不确定性。

李惠教授等根据热液型金矿床具有多期、多阶

收稿日期:2020-04-07;修回日期:2020-09-16

基金项目:湖南省地质院科研基金项目“‘构造叠加晕—烃汞测量’在金矿深部找矿预测中的应用示范”(202015);湖南辰州矿业有限责任公司资助项目“沃溪矿区仙鹤洲区烃汞综合气体测量”(DT-2018-04)

作者简介:陈海龙(1968-),男,1990年毕业于桂林冶金地质学院地球化学勘查专业,获学士学位,地球化学高级工程师,现主要从事地球化学勘查和理论应用研究工作。Email:444352037@qq.com

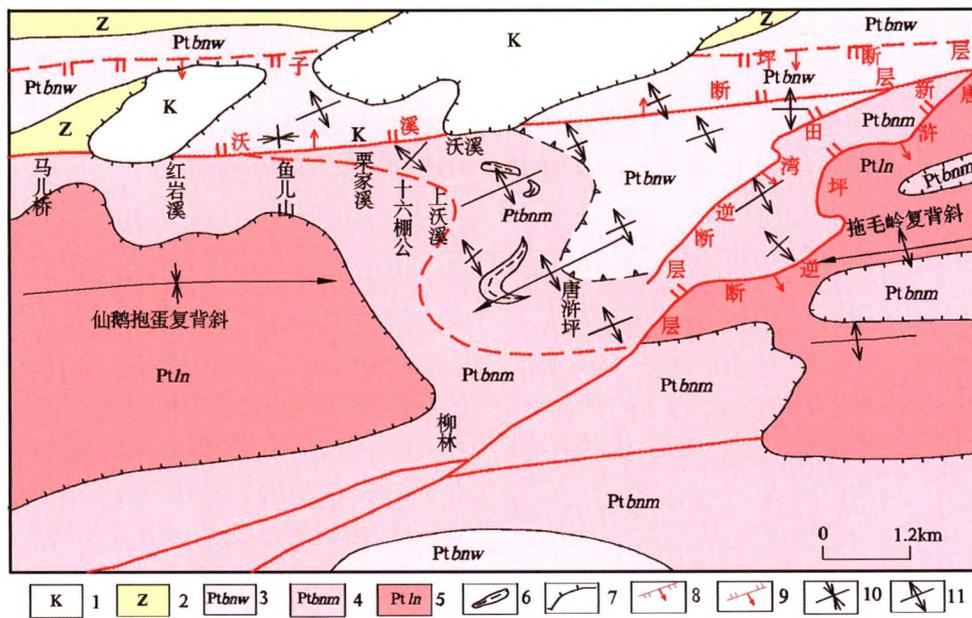
段叠加特点,总结了“异常叠加结构”实现深部找矿,同时还获得了更多、更好的深部找盲矿信息^[17-20],而将这些深部叠加信息反演到地表土壤形成的叠加异常指标研究较少,造成构造叠加晕深部预测方法局限在老矿山原生晕轴(垂)向分带方面,而对于新的预测区(缺乏深部工程)深部成矿预测显得依据还不够充分。

烃汞叠加晕找矿方法是在烃汞测量的基础上运用构造叠加晕的思路,通过对已知矿区不同地质体(包括矿体)、不同标高成矿元素及烃类组分变化规律和叠加特点研究,分析不同地质体,尤其是金矿体不同期次的成矿作用叠加演化规律,获得深部成矿关键要素,并将这些关键要素反演到地表土壤(或者岩石)形成的地球化学异常,通过总结其异常特征、异常结构和异常模式的叠加特点来开展深部成矿预测,克服了传统的烃汞测量和构造叠加晕单一

方法的不足,提高了预测的准确性,丰富了地球化学勘查评价内容。

1 沃溪矿区地质概况

沃溪矿区处于雪峰弧形隆起带由 NE 向 NEE 的弧形转折部位,经历了武陵、雪峰、加里东、印支—燕山运动长期的挤压变形作用,地层发生较强的变形和变质^[21-24]。矿区位于仙鹅抱蛋复背斜北翼,区内大面积出露一套滨海相、浅海相含钙碎屑岩建造的中元古界冷家溪、板溪群地层,其次,在矿区北部有小面积白垩系红层出露。其中,板溪群马底驿组的紫红色板岩是区内重要的金锦钨赋矿层位,该套地层围绕仙鹅抱蛋隆起,呈反“S”型展布。研究区处于该反“S”型构造的北段的鱼儿山—红岩溪—马儿桥段(图 1)。

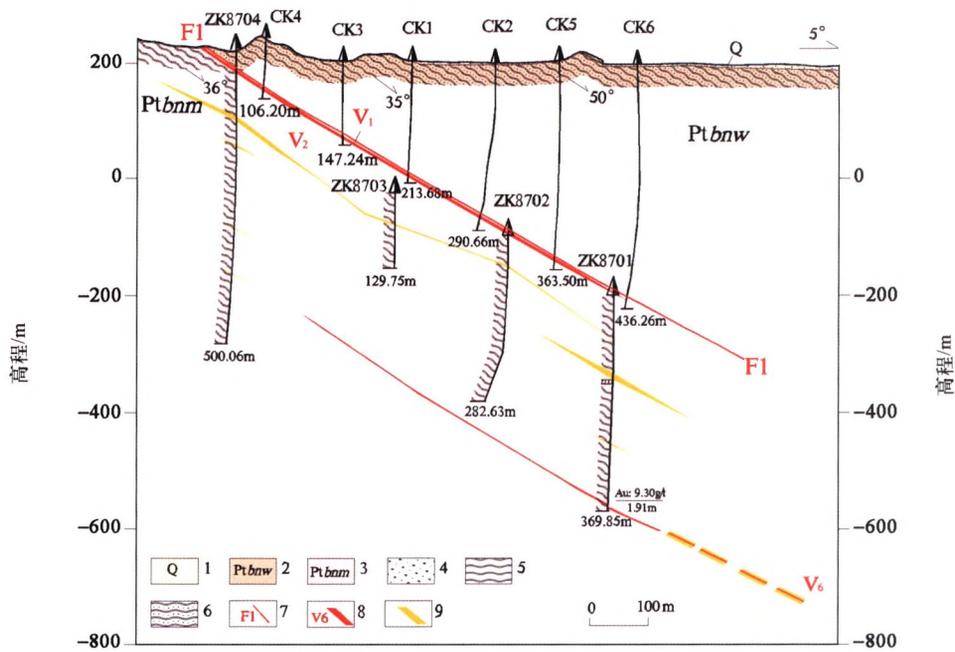


1—白垩系; 2—震旦系; 3—板溪群五强溪组; 4—板溪群马底驿组; 5—冷家溪群小木坪组; 6—蚀变岩; 7—不整合线; 8—正断层; 9—逆断层; 10—向斜; 11—背斜
 1—Cretaceous system; 2—Sinian system; 3—Wuqiangxi formation of Banxi group; 4—Madiyi formation of Banxi group; 5—Xiaomuping formation of Lengjiayi group; 6—altered rock; 7—unconformity surface; 8—normal fault; 9—thrust fault; 10—syncline; 11—anticline

图 1 矿区地质构造简图
 Fig.1 Simplified geological map of structure

鱼儿山金矿床为中—低温热液石英脉型,具有两个成矿期特点^[21-22],第一期是形成于加里东期的 W(Au),成矿物质主要来源于围岩,流体为变质热液和大气降水;第二期是印支—燕山期的 Au-Sb 成矿,成矿物质主要来自深源,流体主要为岩浆热液和大气降水。其矿脉自北往南(由上而下)分别赋存有 V₁、V₂、V₆ 脉 3 条工业矿体(图 2),产状与岩层基

本一致,走向近 EW,倾向 N。矿体沿走向呈扁豆状、透镜状。单个矿体长 20~350 m,矿脉厚 0.20~2.5 m,沿倾斜呈板柱状,倾斜延伸 180~500 m 以上。矿脉均产于马底驿组的灰紫色—紫红色绢云母含钙板岩中,受近乎顺层产出的层滑断层及脆—韧性剪切带控制,具有层控矿床特点,空间上则受褶皱、层间断裂和节理断裂控制。



1—第四系;2—板溪群五强溪组;3—板溪群马底驿组;4—浮土;5—板岩;6—砂质板岩;7—断层及编号;8—矿脉及编号;9—蚀变岩
 1—Quaternary system;2—Wuqiangxi formation of Banxi group;3—Madiyi formation of Banxi group;4—drifting dust;5—slate;6—sandy slate;7—
 fault and number;8—vein and number;9—altered rock

图2 鱼儿山金锑钨矿区87号勘探线剖面示意

Fig.2 Cross section of line-87 in Yuershan Au, Sb, W deposit

红岩溪矿段主要是鱼儿山 V_1 脉向西延伸至该区,其内赋存有 V_1 脉及支脉,产于层间破碎带中,属破碎蚀变岩型。产状与岩层基本一致,走向近 EW,倾向 N。倾角较缓,30°左右,地表出露长 200~400 m,倾向延长约 150 m,宽 2~10 余 m, Au、Sb、W 矿化都很强烈,断层下盘黄铁矿化及硅化强烈,上盘蚀变弱。

2 烃汞叠加晕试验方法及背景场特征

2.1 试验方法

本次烃汞叠加晕深部找矿试验选择沃溪矿区鱼儿山矿段 V_6 脉为研究对象,通过烃汞构造叠加晕及其矿体上方对应的土壤地球化学异常特征研究,总结土壤烃汞综合异常与矿体空间对应关系和深部找矿预测模式,并对西部延伸端的红岩溪—马儿桥矿段开展烃汞土壤地球化学异常深部找矿预测。

2.1.1 土壤中烃汞组分富集层位、富集粒级(含岩石)

为了查明区内土壤烃汞组分富集层位、富集粒级(含岩石),在沃溪矿区鱼儿山和红岩溪矿段土壤垂直剖面发育良好的地段安排了 3 条垂直剖面,分

别采集 B、C 层土壤和 D 层新鲜岩石样品作为富集层位和粒级试验样品,土壤样品按 -40 目、-80 目、-120 目、-160 目、-200 目,岩石样品按 -120 目、-160 目、-200 目划分,共分析测试了 34 件样品中 Au、Sb、W、甲烷、乙烷、丙烷、正丁烷、异丁烷、异戊烷、正戊烷、乙烯、丙烯、吸附汞等 13 个指标。结果表明(表 1):土壤 B、C 层总体来看烃类组分含量变化不大,所以在沃溪矿区开展土壤烃汞测量,采集 B、C 层土壤都能满足要求;土壤样品 5 个不同粒度级别分析结果表明,样品在 -160~-200 目之间,分析结果相对比较稳定,所以烃汞土壤测量加工粒度在 -160~-200 目均可保证其代表性,本次加工粒度确定为 -200 目;岩石样品 3 个不同粒度级别分析结果表明,样品在 -160~-200 目之间,分析结果相对比较稳定,所以岩石样品加工粒度在 -160~-200 目均可保证其代表性,本次加工粒度确定为 -200 目。

2.1.2 烃汞构造叠加晕工作方法

根据构造叠加晕采样要求^[17-20],选择在沃溪矿区鱼儿山矿段 V_6 盲脉深部不同标高,分别采集新鲜矿石、强蚀变围岩、弱蚀变围岩和未蚀变围岩样品,通过分析研究成矿元素 Au、Sb、W 和部分微量元素 As、Bi、Mo 以及烃类的甲烷、乙烷、丙烷、正丁烷、异

表 1 样品不同层位、不同粒度烃汞含量特征

Table 1 Content characteristics of hydrocarbon mercury with different granularity and horizon of sample

类型	参数	甲烷	乙烷	丙烷	异丁	正丁	异戊	正戊	乙烯	丙烯	汞
	B 层	2.84	0.16	0.089	0.053	0.087	0.025	0.061	1.36	0.53	26.2
	C 层	3.12	0.25	0.121	0.056	0.131	0.027	0.135	1.75	0.83	21.8
土壤	-40 目	1.26	0.070	0.034	0.006	0.017	0.005	0.012	0.245	0.072	38.76
	-80 目	1.25	0.053	0.028	0.008	0.016	0.007	0.020	0.301	0.075	38.49
	-120 目	1.95	0.140	0.074	0.014	0.037	0.015	0.030	0.353	0.117	41.32
	-160 目	2.42	0.162	0.127	0.027	0.097	0.018	0.072	0.787	0.302	31.41
	-200 目	2.56	0.185	0.130	0.023	0.093	0.016	0.085	0.628	0.354	34.64
岩石	-120 目	26.9	1.68	1.07	0.118	0.452	0.115	0.246	2.61	1.41	0.03
	-160 目	29.0	2.15	1.27	0.159	0.493	0.129	0.232	4.55	1.98	0.34
	-200 目	28.1	2.61	1.58	0.166	0.471	0.184	0.276	5.05	1.59	0.39

注:烃类含量单位为 $\mu\text{L}/\text{kg}$; 吸附汞含量单位为 10^{-9} 。

丁烷、异戊烷、正戊烷、乙烯、丙烯和吸附汞等 16 个指标在不同地质体,尤其是金矿体不同期次的成矿作用叠加演化规律,获得能指示深部成矿关键要素等。

2.1.3 烃汞土壤剖面测量工作方法

土壤剖面测量:采样点距 20 m,采集 B 层(或 C 层)土壤样品,分析了 Au、Sb、W、甲烷、乙烷、丙烷、正丁烷、异丁烷、异戊烷、正戊烷、乙烯、丙烯、吸附汞等 13 个指标。并统计全区(包括测区)695 件土壤样品中各指标的算术平均值 \bar{x} 和方差 σ ,进行多次循环剔除 $x \geq \bar{x} + 3\sigma$ 值后,再求得其算术平均值为该元素背景值,以 $\bar{x} + 2\sigma$ 为异常下限值,以异常背景值为纵坐标中轴绘制土壤地球化学剖面图。

2.2 烃汞背景场特征

为了查明矿区烃汞背景场特征,在矿区外围无矿区内安排 3 条长剖面,对矿区出露的冷家溪组、马底驿组、五强溪组、白垩系地层及其对应的土壤分别采集了 B、C 层土壤样 32 件和 D 层新鲜岩石样品 16

件,作为区域地层背景和土壤—岩石富集系数研究类样品;在沃溪矿区内采集未蚀变原生晕样 16 件,分别检测了 Au、Sb、W、甲烷、乙烷、丙烷、正丁烷、异丁烷、异戊烷、正戊烷、乙烯、丙烯和吸附汞 13 个指标。通过研究得到了以下认识:

区内无含煤系地层和岩浆岩活动,也无有机物河流污染,说明烃汞背景场不存在这些因素的干扰。

区域和矿区原生晕烃汞组分的算术平均值结果(表 2)表明,区域和矿区烃汞组分的变异系数相对较小,说明烃类含量变化较均匀,对背景场影响较小。

矿区地层烃汞组分含量明显高于区域地层,说明矿区烃类组分具有明显叠加特点。因此,烃类组分作为本区找矿预测的重要指标是合适的。

区域内土壤与其母岩富集系数统计结果(表 3)表明,岩石风化成壤过程中,烃类组分明显贫化,冷家溪组、马底驿组、五强溪组地层烃类组分贫化最为严重(富集系数 0.01~0.09),白垩系地层中烃类组

表 2 矿区地层原生晕烃类组分背景含量

Table 2 Hydrocarbon background values of Madiyi formation primary halo in mine district

参数	甲烷	乙烷	丙烷	异丁	正丁	异戊	正戊	乙烯	丙烯	汞	
区域	平均值	161	34.4	20.6	1.46	6.5	1.2	1.8	28.8	21.3	2.2
	C_v	0.55	0.52	0.51	0.54	0.53	0.56	0.54	0.52	0.55	0.99
矿区	平均值	817	150	69.0	4.7	21	3.7	5.6	125	82	3.9
	C_v	0.55	0.49	0.46	0.56	0.46	0.46	0.45	0.49	0.48	2.5

注:烃类含量单位为 $\mu\text{L}/\text{kg}$; 吸附汞含量单位为 10^{-9} ; C_v (变异系数)=标准差/平均值。

表 3 区域不同地层对应土壤与岩石比值(富集系数)

Table 3 Content ratios of geochemical indexes in soils and rocks of different strata in mine district (enrichment coefficients)

地层	甲烷	乙烷	丙烷	异丁	正丁	异戊	正戊	乙烯	丙烯	吸附汞
冷家溪组	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	7.2
马底驿组	0.04	0.03	0.03	0.07	0.05	0.07	0.07	0.06	0.04	23
五强溪组	0.04	0.03	0.03	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.09	18
白垩系	0.46	0.45	0.40	0.41	0.38	0.36	0.34	0.58	0.66	3.19

分贫化相对较小(富集系数 0.34~0.66)。由于区域背景研究烃类组分明显偏低,说明岩石风化成壤烃类组分含量更低,加之选用工作方法为岩石和土壤烃汞测量,烃类组分的提取以吸留相、包裹相、结合相形式^[16]为主,因此土壤烃类组分异常的形成与后期成矿活动的叠加改造关系密切,同样可以说明烃类组分作为本区找矿预测的重要指标是合适的。

3 已知矿区不同地质体烃汞异常场特征

为了查明沃溪矿区不同地质体烃汞组分的分布和 V₆ 号脉垂向分带特征,在鱼儿山矿段 V₆ 号脉 -400、-425、-450 m 标高分别采集了矿体—强蚀变—弱蚀变—未蚀变围岩新鲜岩石样,共分析测试了 83 件样品中 Au、Sb、W、As、Bi、Mo、甲烷、乙烷、丙烷、正丁烷、异丁烷、异戊烷、正戊烷、乙烯、丙烯、吸附汞等 16 个指标。

3.1 矿体及近围烃汞分布特征

矿区不同地质体样品分析结果(表 4)表明,烃汞组分在不同类型地质体中的算术平均含量均显著高于背景值,说明烃汞组分参与成矿,并起到积极的作用。从矿体—强蚀变—弱蚀变—未蚀变围岩,各烃汞组分含量明显呈由高变低的变化特征,显示

出成矿元素 Au 与烃汞组分之间具有同步消长关系,说明成矿热液在就位、沉淀成矿过程中,其伴生的烃汞组分受热力学作用、内压作用和浓度梯度变化的驱动,不断向周边围岩扩散,最终会形成一个以矿体为中心的晕圈异常。

各烃汞组分在不同地质体中的含量虽然不同,但各组分之间的高低变化组成比例是同步协调的,这表明各烃类组分与 Au 来源于同一母体,且经历了类似的地质地球化学历程。烃汞组分异常信息能较好地反映或指示金矿化信息。

3.2 矿体构造原生叠加晕特征

根据李惠教授对不同矿区金矿体构造叠加晕深部找矿预测研究成果^[18-20],通过对鱼儿山矿段 V₆ 脉成矿元素金及烃汞组分和部分微量元素进行的相关分析、R 型聚类分析和矿体构造叠加晕纵向分带特征分析,可得出如下认识:

相关性分析(表 5)表明,Au 与甲烷、乙烷、丙烷、正丁烷、异丁烷、异戊烷、正戊烷、乙烯、丙烯和吸附汞均具有较好的相关性,说明烃汞参与成矿并具有同源性。

对 V₆ 脉矿石样品 16 个变量的分析结果进行统计,得到聚类分析谱系图(图 3),按相似水平 20 进行分类,元素可以分为 3 组。

表 4 矿区不同地质体烃类组分含量特征

Table 4 Content characteristics of hydrocarbon and mercury in different geobody in mine district

	Au	甲烷	乙烷	丙烷	异丁	正丁	异戊	正戊	乙烯	丙烯	汞
背景值	8.9	161	34.4	20.6	1.46	6.5	1.2	1.8	28.8	21.3	2.2
矿体	3000	5877	865	272	17	79	12	22	747	504	36
强蚀变	1246	4331	626	199	13	62	10	17	576	411	36
弱蚀变	284	1010	163	59	4	18	3	5	138	91	89
未蚀变	28	501.2	81.8	31.5	2.0	9.2	1.5	3.0	64.6	40.9	6.5

注:烃类含量单位为 μL/kg;吸附汞、Au 含量单位为 10⁻⁹。

表 5 鱼儿山矿段各指标相关系数统计

Table 5 Calculation results of relevant parameters in Yuershan district

指标	Sb	W	Au	甲烷	乙烷	丙烷	异丁	正丁	异戊	正戊	乙烯	丙烯	汞
Sb	1.00												
W	0.06	1.00											
Au	0.64	0.18	1.00										
甲烷	0.24	0.13	0.63	1.00									
乙烷	0.21	0.12	0.64	0.99	1.00								
丙烷	0.17	0.13	0.56	0.98	0.99	1.00							
异丁	0.17	0.14	0.55	0.98	0.98	0.99	1.00						
正丁	0.16	0.15	0.57	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00					
异戊	0.14	0.16	0.54	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00				
正戊	0.15	0.16	0.57	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00			
乙烯	0.26	0.17	0.68	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.97	0.98	1.00		
丙烯	0.27	0.19	0.72	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97	0.96	0.97	0.99	1.00	
汞	0.13	0.38	0.70	0.29	0.34	0.26	0.25	0.28	0.25	0.30	0.37	0.41	1.00

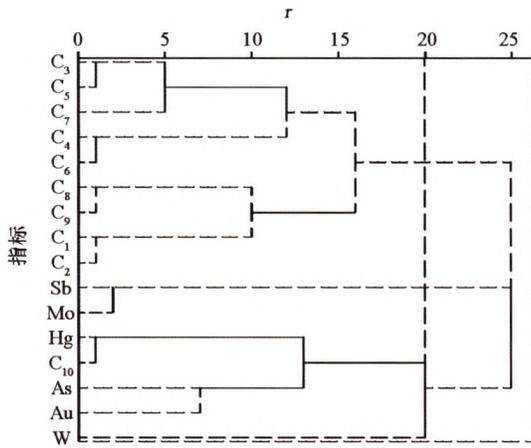


图3 鱼儿山矿段V₆脉R型聚类分析谱系

Fig.3 General graph of R-type cluster analysis of V₆-vein in Yuershan district

1组:烃类组分(C₁~C₉),相关性良好,相关系数均接近1,但该组分呈分散状态,且与成矿元素Au相关性良好,Sb、W的相关性相对较差,说明该组分在成矿过程中参与程度较高。

2组:Mo、Sb组合,该组合比较独特,相关系数达0.98,相关性良好,Mo呈分散状态,并没有形成独立的矿体。而Sb形成了独立矿体,与Au相关性比较好(相关系数0.64),表明Mo参与成矿活动。

3组:As、Hg、Au、W,该组元素中的Au、W为成矿元素,其他为分散元素,其中As、Hg、Au关系最为密切,Au跟As、Hg吸附汞相关系数分别为0.668、0.737、0.987,说明该组元素参与成矿活动。但Au

与W相关性相对较差(相关系数0.182),如果相似性水平按15分类,W单独可分一类,这说明Au、W成矿大部分不在同一期,而且W与烃类气体相关性较差(相关系数0.15),Au与烃类气体相关性较好(相关系数0.5~0.7之间),说明W矿成矿过程中烃类气体参与较少,Au矿成矿过程中烃类气体大量参与。

根据V₆脉不同中段矿石样品化验结果,分别计算了Hg、W、Au、Sb、As、Bi、Mo和烃类组分等16个指标的分带指数并进行排序,发现V₆脉元素纵向分带序列为:甲烷、Sb、Mo、W、Au、As、乙烷、乙烯、丙烯、Hg、丙烷、正丁烷、Bi、异戊烷、正丁烷、正戊烷。纵向分带比较混乱,说明V₆脉成矿具有多期次叠加的特点。据以往沃溪矿区鱼儿山矿构造叠加晕研究成果^[21],前缘晕元素为Hg、As,尾晕元素为Mo、Bi,结合本次分带指数研究,按前缘晕元素Hg、As、烃类气体,尾晕元素Mo、Bi,圈定V₆脉在-400~-450m区间元素异常范围,总结了元素垂向分带规律,建立了V₆脉构造叠加晕分带模式(图4),根据构造叠加晕判别原则^[17-20],证实V₆脉具有明显的构造叠加特点。

3.3 矿体上方土壤烃汞叠加异常特征

矿体上方烃汞土壤测量主要根据坑道调查结果与其对应的地表位置87勘探线开展,采样点距20m,采集B层(或C层)土壤样品,分析了Au、Sb、W、甲烷、乙烷、丙烷、正丁烷、异丁烷、异戊烷、正戊烷、

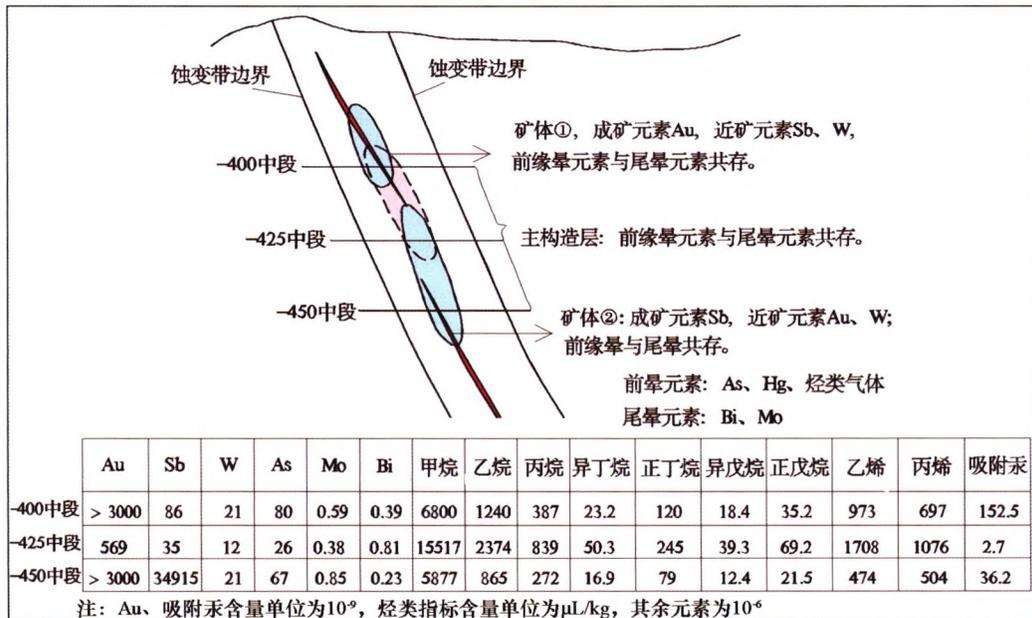


图4 鱼儿山矿段V₆脉元素垂向分带模式示意

Fig.4 Sketch of element vertical zoning mode of V₆-vein in Yuershan district

表 6 鱼儿山矿段土壤元素相关系数统计

Table 6 Relevant parameters of soil elements in Yuershan district

指标	Sb	W	Au	甲烷	乙烷	丙烷	异丁	正丁	异戊	正戊	乙烯	丙烯	汞
Sb	1.00												
W	0.37	1.00											
Au	0.45	0.85	1.00										
甲烷	0.11	0.15	0.23	1.00									
乙烷	0.11	0.23	0.30	0.76	1.00								
丙烷	0.31	0.14	0.19	0.47	0.80	1.00							
异丁	0.32	0.20	0.25	0.57	0.73	0.81	1.00						
正丁	0.40	0.12	0.17	0.39	0.65	0.92	0.78	1.00					
异戊	0.42	0.03	0.07	0.30	0.35	0.61	0.62	0.71	1.00				
正戊	0.45	-0.03	0.02	0.24	0.21	0.51	0.51	0.66	0.79	1.00			
乙烯	0.48	-0.09	-0.09	-0.03	-0.13	0.32	0.28	0.46	0.48	0.63	1.00		
丙烯	0.24	0.03	0.08	0.14	0.21	0.35	0.30	0.32	0.36	0.29	0.38	1.00	
汞	0.62	0.15	0.16	0.12	0.09	0.31	0.32	0.40	0.34	0.41	0.45	0.26	1.00

乙烯、丙烯、吸附汞等 13 个指标,目的是查明已知矿体上方土壤烃汞与成矿元素 Au、Sb、W 之间的关系,是否存在叠加的特点以及空间对应关系,以指导预测区土壤烃汞综合气体异常的评价。

3.3.1 土壤元素相关性分析

元素组合是元素亲和性在地质体内的具体表现^[25-26],为了对不同变量进行有效分类,引用相关分析等多元统计分析方法是可行的^[25-29]。相关分析(表 6)表明,土壤中 Au 与甲烷、乙烷、丙烷、正丁烷、异丁烷、异戊烷、正戊烷、丙烯、吸附汞呈正相关,说明土壤中的 Au 有部分来自深源热液叠加。

3.3.2 土壤地球化学异常特征

土壤地球化学异常分布和空间对应关系有如下特征(图 5):

土壤中 Au、Sb、W、Hg 和烃类组分形成了 3 个较好的综合异常,即 AS₁、AS₂、AS₃,总体来看,3 个综合异常中 Au、Sb、W 明显高于异常下限,异常发育良好;Hg 高于异常下限值(120×10^{-9})1~3 倍;稳定性良好的饱和链烃类 C₁(甲烷)在 AS₂ 综合异常处高于异常下限值($6 \mu\text{L}/\text{kg}$)7 倍,C₂(乙烷和丙烷)、C₃(正丁烷、异丁烷、异戊烷、正戊烷)异常发育相对较好,均高于异常下限值 1 倍;而稳定性较差的不饱和烃类 C₄(乙烯)、C₅(丙烯)异常相对较差,总体来看单元素异常套合较好。

AS₁ 和 AS₃ 综合异常峰与 V₁ 脉对应良好,两峰值之间的相对低值区对应为 V₁ 脉,烃类的高值异常峰分布在 AS₃ 号异常一带,位于矿体倾斜方向尾部,AS₁ 和 AS₃ 号异常形成了明显的对偶双峰异常模式,控制 V₁ 脉产出位置。

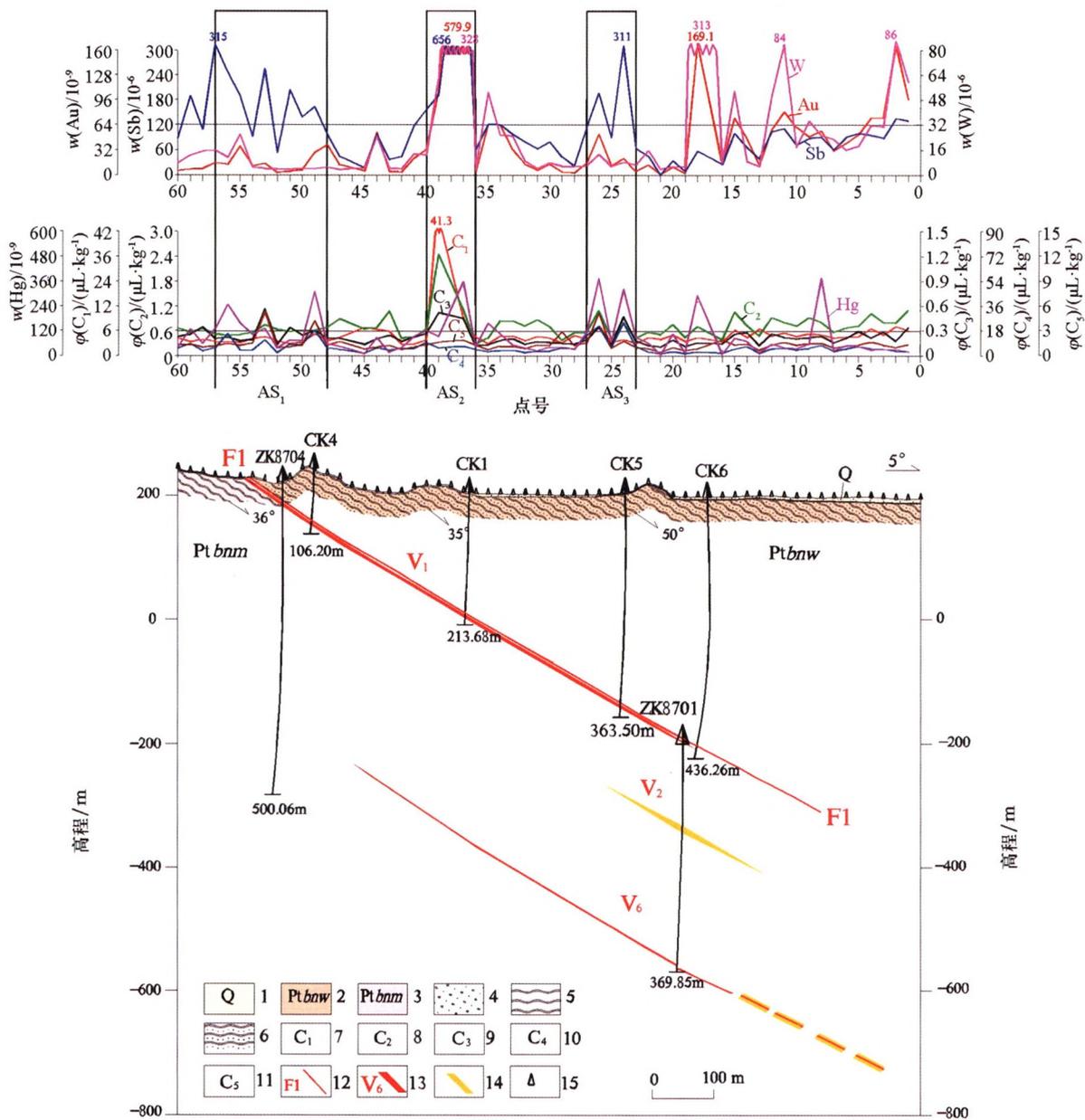
在 AS₁~AS₃ 两峰值之间的相对低值区出现 AS₂ 号烃汞异常,并且 Au、Hg、链烷烃类(C₁、C₂、C₃)和成

矿元素(Au、Sb、W)形成良好的综合异常,与深部 V₆ 盲脉头部对应良好,具有头部异常的特征,而 V₆ 盲脉尾部异常还没有出现,根据“对偶双峰异常模式”特征^[1],表明 AS₂ 以北具有较好的找矿前景。

87 线土壤烃汞综合异常空间对应关系表明,在 AS₁ 和 AS₃ 形成的对偶双峰异常模式中,头部异常峰(AS₁)和尾部异常峰(AS₃)与已知矿体 V₁ 产出位置对应良好,在两峰之间烃汞相对低值区出现具有头部特征的烃汞和成矿元素形成的综合异常(AS₂),并且与深部平行盲脉 V₆ 的头部对应良好,说明 V₆ 盲脉形成了另一个对偶双峰异常模式并且叠加在前一个(V₁ 脉)对偶双峰异常模式之上,形成对偶双峰异常叠加模式的特点比较明显。这与目前鱼儿山 V₁ 和 V₆ 脉深部开采情况十分吻合。

4 预测区土壤烃汞综合异常场特征及成矿预测

预测区主要是指红岩溪和马儿桥矿段,其中红岩溪矿段原来主要开采 V₁ 脉,因资源危机,于 2014 年停采闭坑;马儿桥矿段在 20 世纪 70 年代开展地质普查工作,地表发现较好的金钨矿化,曾施工过 12 个钻孔验证,效果不理想。2006 年沃溪危机矿山项目又开展传统的 1:1 万土壤化探扫面工作,获得一批较好的 Au、Sb、W 等元素综合异常,图 7 中地表槽探(TC4703)揭露取得过较好的找矿信息(Au 平均品位 1.93×10^{-6} ,矿体厚 1.35 m),但钻探(ZK4701)验证效果较差。通过在红岩溪和马儿桥矿段开展烃汞土壤地球化学剖面测量,采用烃汞叠加晕法进行综合评价,其结果如下。



1—第四系;2—板溪群五强溪组;3—板溪群马底驿组;4—浮土;5—板岩;6—砂质板岩;7—甲烷;8—乙烷和丙烷;9—异丁烷、正丁烷、异戊烷、正戊烷;10—乙烯;11—丙烯;12—断层及编号;13—矿脉及编号;14—蚀变岩;15—采样点
 1—Quaternary system;2—Wuqiangxi formation of Banxi group;3—Madiyi formation of Banxi group;4—drifting dust;5—slate;6—sandy slate;7—methane;8—ethane, propane;9—isobutane, N-butane, isopentane, N-contour;10—ethylene;11—propylene;12—fault and number;13—vein and number;14—altered rock;15—sampling point

图5 鱼儿山矿段 87 线土壤地球化学剖面

Fig.5 Soil geochemistry profiles of line 87 in Yuershan district

4.1 烃汞叠加异常特征

4.1.1 红岩溪矿段

相关分析(表 7)表明,红岩溪矿段 131 线土壤中 Au 与甲烷、乙烷、丙烷、丙烯、正丁烷、异丁烷、异戊烷、正戊烷、乙烯、丙烯、汞相关性较好,且 Au、Sb、W 之间相关性较好,说明 Au 与烃类组分具有同源性^[30],土壤中的 Au、Sb、W 具有深源叠加的特点,对深部找有利。

土壤烃汞异常分布、异常结构和空间对应关系研究表明(图 6),土壤中 Au、Sb、W、Hg 和烃类组分形成了 3 个较好的综合异常,即 AS₁、AS₂、AS₃,其中,AS₁ 综合异常相对较差(因采矿丢样);AS₂、AS₃ 综合异常发育相对较好,异常元素 Au、Sb、Hg、C₁(甲烷)、C₂(乙烷和丙烷)、C₃(正丁烷、异丁烷、异戊烷、正戊烷)均形成较好异常,Au、Hg 异常峰值高于背景 2 倍,其他指标均在 1 倍以上,C₄(乙烯)、C₅

表 7 红岩溪 131 线土壤元素相关系数

Table 7 Relevant parameters of line 131 soil elements in Hongyanxi district

指标	Sb	W	Au	甲烷	乙烷	丙烷	异丁	正丁	异戊	正戊	乙烯	丙烯	汞
Sb	1.00												
W	0.29	1.00											
Au	0.66	0.29	1.00										
甲烷	0.39	0.02	0.31	1.00									
乙烷	0.44	0.03	0.24	0.84	1.00								
丙烷	0.65	0.06	0.51	0.73	0.75	1.00							
异丁	0.62	0.06	0.41	0.57	0.58	0.75	1.00						
正丁	0.62	0.03	0.41	0.56	0.62	0.89	0.78	1.00					
异戊	0.54	0.01	0.33	0.26	0.26	0.55	0.71	0.61	1.00				
正戊	0.63	0.14	0.47	0.38	0.41	0.69	0.76	0.86	0.72	1.00			
乙烯	0.67	0.11	0.49	0.56	0.49	0.86	0.75	0.83	0.57	0.72	1.00		
丙烯	0.41	0.08	0.30	0.54	0.42	0.54	0.45	0.40	0.26	0.32	0.49	1.00	
汞	0.64	0.18	0.71	0.30	0.23	0.50	0.44	0.44	0.29	0.48	0.56	0.35	1.00

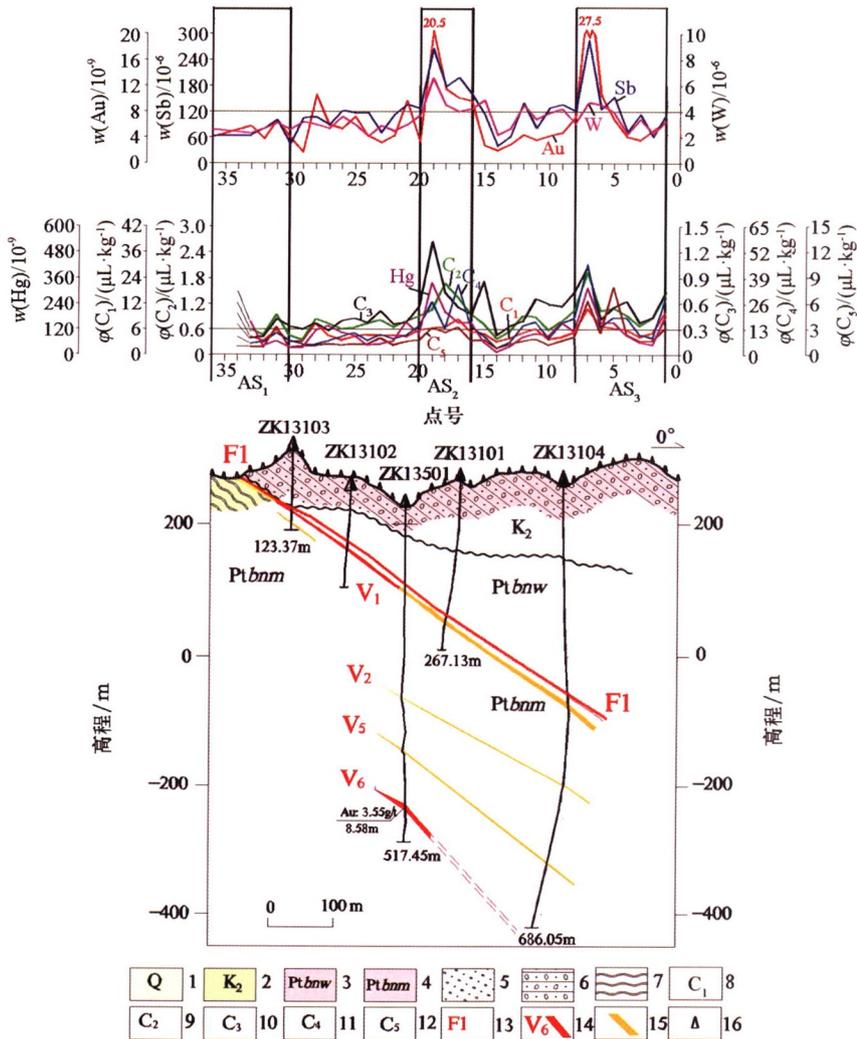


图 6 红岩溪矿段 131 线土壤地球化学剖面

Fig.6 Soil geochemistry profiles of line 131 in Hongyanxi deposit

1—第四系;2—白垩系;3—板溪群五强溪组;4—板溪群马底驿组;5—浮土;6—砂砾岩;7—板岩;8—甲烷;9—乙烷、丙烷;10—异丁烷、正丁烷、异戊烷、正戊烷;11—乙烯;12—丙烯;13.断层及编号;14.矿脉及编号;15.蚀变岩;16.采样点

1—Quaternary system;2—Cretaceous system;3—Wuqiangxi formation of Banxi group;4—Madiyi formation of Banxi group;5—drifting dust;6—graywacke;7—slate;8—methane;9—ethane, propane;10—isobutane, N-butane, isopentane, N-contour;11—ethylene;12—propylene;13—fault and number;14—vein and number;15—altered rock;16—sampling point

(丙烯)相对较差,单元素异常套合相对较好。

烃类异常结构和空间分布表明:AS₁和AS₃综合异常与V₁脉对应良好,两峰值之间的相对低值区对应为V₁脉,烃类的高值异常峰分布在AS₃号异常一带,位于矿体倾斜方向尾部,并呈现明显的对偶双峰异常模式,并与V₁脉产出位置对应良好。

在AS₁~AS₃两峰值之间的相对低值区出现AS₂号烃汞异常,Au、Hg、链烷烃类(C₁、C₂、C₃)和成矿元素(Au、Sb、W)形成良好的综合异常,并与深部V₆盲脉头部对应良好,具有头部异常的特征,而V₆盲脉尾部异常还没有出现,表明AS₂以北具有较好的找矿前景。

131线土壤烃汞综合异常空间对应关系与鱼儿

山矿段87线具有相同的特点,131线中AS₁和AS₃综合异常形成对偶双峰异常模式,控制V₁脉位置。在两峰之间烃汞相对低值区出现AS₂综合异常,并且与深部平行盲脉V₆的头部对应良好,说明V₆盲脉形成了另一个对偶双峰异常模式并且叠加在前一个(V₁脉)对偶双峰异常模式之上,形成对偶双峰异常叠加模式,表明AS₂综合异常就近找矿及以北地段均具有较好的找矿前景。

4.1.2 马儿桥矿段

相关分析(表8)表明,马儿桥矿段161线土壤中Au与烃汞相关性较差(相关系数接近0),说明土壤中的Au没有深源叠加的特点,因此其深部找矿潜力较差。

表8 马儿桥161线土壤元素相关系数

Table 8 Relevant parameters of line 161 soil elements in Maerqiao district

指标	Sb	W	Au	甲烷	乙烷	丙烷	异丁	正丁	异戊	正戊	乙烯	丙烯	汞
Sb	1.00												
W	0.11	1.00											
Au	0.18	0.38	1.00										
甲烷	(0.04)	(0.18)	(0.06)	1.00									
乙烷	(0.07)	(0.16)	(0.07)	0.99	1.00								
丙烷	0.15	(0.11)	(0.03)	0.87	0.87	1.00							
异丁	0.21	(0.17)	(0.02)	0.72	0.69	0.85	1.00						
正丁	0.24	(0.05)	0.00	0.71	0.70	0.94	0.84	1.00					
异戊	0.21	(0.19)	(0.05)	0.43	0.40	0.67	0.87	0.74	1.00				
正戊	0.28	(0.00)	0.02	0.54	0.50	0.77	0.79	0.87	0.80	1.00			
乙烯	0.60	(0.05)	0.21	0.19	0.13	0.48	0.58	0.58	0.60	0.64	1.00		
丙烯	0.44	(0.15)	0.06	0.77	0.73	0.89	0.84	0.85	0.65	0.75	0.74	1.00	
汞	0.55	(0.05)	0.15	0.02	(0.01)	0.31	0.35	0.40	0.37	0.42	0.81	0.54	1.00

土壤烃汞异常分布、异常结构和空间对应关系研究表明(图7),土壤中Au、Sb、W、Hg和烃类组分形成了AS₁、AS₂、AS₃、AS₄4个综合异常,其中AS₁、AS₂、AS₃主要以Hg异常为主,C₁(甲烷)、C₂(乙烷和丙烷)、C₃(正丁烷、异丁烷、异戊烷、正戊烷)、C₄(乙烯)、C₅(丙烯)异常均较差。AS₄综合异常中烃汞异常相对较好,Hg、C₁(甲烷)、C₂(乙烷和丙烷)、C₃(正丁烷、异丁烷、异戊烷、正戊烷)、C₄(乙烯)、C₅(丙烯)均形成相对较好异常,但往北未封闭。

成矿元素Au、Sb在AS₁异常区发育较好,其他异常区只见Sb异常。

烃类异常结构和空间分布表明,AS₂号和AS₄号异常虽然具有对偶双峰异常模式,但中部低值区控制V₅蚀变带,缺乏Au异常,烃类异常较差,找矿意义不大。

AS₃号异常产于AS₂和AS₄号异常形成的对偶双峰异常模式相对低值区,与F1断层(V₁脉)地表出露位置对应,Hg和C₂(乙烷和丙烷)为弱异常,具

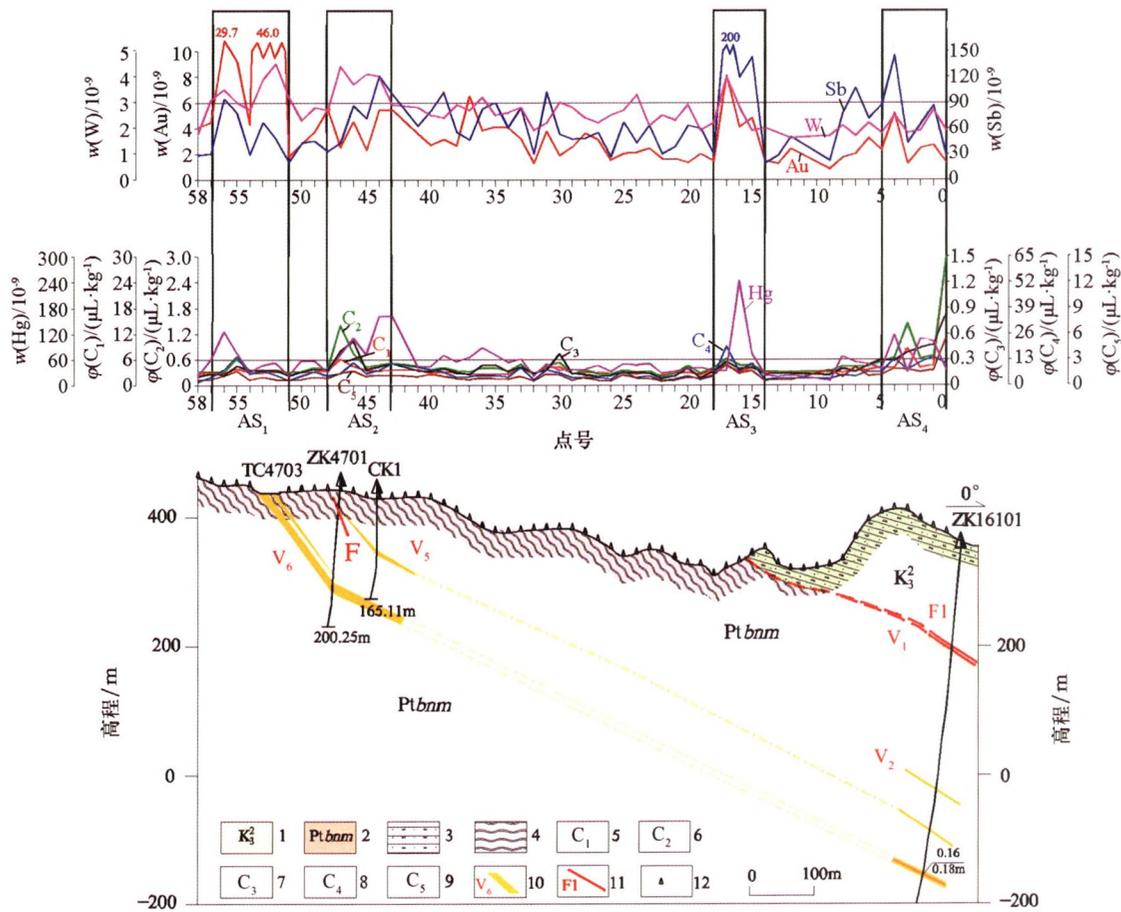
有V₁脉头部异常特点,但由于该异常烃汞和成矿元素异常强度较低,找矿意义不大。

AS₄综合异常烃汞异常发育较好,异常元素组合全,强度相对较强,异常往北未封闭,存在深部盲脉(V₁、V₆)叠加的可能,但成矿元素异常较差,AS₄综合异常就近找矿意义不大,但不排除往北找矿的可能。

4.2 成矿预测及验证情况

对上述红岩溪和马儿桥矿段土壤烃汞综合异常特征总结和烃类组分异常衬度计算结果(表9)表明,沃溪矿区蚀变带矿化至少存在两种不同的地球化学成矿叠加作用,形成两类叠加异常,即同生叠加异常和深源叠加异常。

深源叠加异常以红岩溪矿段为代表,其特征是:土壤中的Au与烃类组分相关性较好,说明土壤中的Au与烃类组分具有同源性,而烃类组分异常反映其为深部成矿热液带来的。该区形成的AS₁、AS₂、AS₃综合异常烃汞组分比较齐全,异常强度相对较强,异



1—白垩系;2—马底驷组;3—杂砂岩;4—板岩;5—甲烷;6—乙烷、丙烷;7—异丁烷、正丁烷、异戊烷、正戊烷;8—乙烯;9—丙烯;10—矿脉及编号;11—蚀变带;12—采样点

1—Cretaceous system;2—Madiyi formation of Banxi group;3—graywacke;4—slate;5—methane;6—ethane, propane;7—isobutane, N-butane, isopentane, N-contour;8—ethylene;9—propylene;10—vein and number;11—alteration zone;12—sampling point

图7 马儿桥矿段 161 线土壤地球化学剖面

Fig.7 Soil geochemistry profiles of line 161 in Maerqiao district

表 9 红岩溪—马儿桥矿段异常元素衬值

Table 9 Contrast value of each abnormal element of Hongyanxi-Ma'erqiao ore block

矿段	特征值	Hg	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
全区	异常下限	120	6	0.6	0.3	13	3
红岩溪	异常均值	188	7.5	1.3	0.7	24.4	3.9
	衬值	1.56	1.25	2.17	2.33	1.87	1.3
马儿桥	异常均值	177	5.84	0.56	0.27	10.57	1.94
	衬值	1.47	0.97	0.93	0.9	0.81	0.64

注:烃类含量单位为 μL/kg;吸附汞含量单位为 10⁻⁹;衬值=异常平均值/异常下限值。

常衬度值相对较高(表 8),具有明显的深源叠加特征,预示深部找矿潜力较大。同时,在已知 V₁ 脉由 AS₁~AS₃ 两烃汞综合异常组成的对偶双峰异常模式低值区出现 AS₂ 深源叠加异常,预示 V₁ 脉下部存在平行盲脉,推测为深部 V₆ 脉叠加形成,具有较好的找矿潜力。

同生叠加异常以马儿桥矿段为代表,土壤中的 Au 与烃汞不相关(表 7),说明土壤中没有深源热液

带来成矿物质的叠加,该区形成的 AS₁、AS₂、AS₃、AS₄ 4 个综合异常烃汞组分异常组分较简单,异常强度较弱,异常衬度值相对较低(均小于 1)(表 8),并且都缺乏稳定性良好的饱和链烃类 C₂(乙烷和丙烷)、C₃(正丁烷、异丁烷、异戊烷、正戊烷)异常和不饱和烃类 C₄(乙烯)、C₅(丙烯)异常。结合以往勘查成果,认为该类异常形成是在区域变质或动力变质作用下,地层中元素的进一步活化、迁移、初步富集

而成,为同生叠加异常,找矿意义不大。

通过对红岩溪矿段 131 线和马儿桥 161 线开展钻探验证,结果如下:

红岩溪矿段在 131 线 AS_2 异常中心位置施工了一个钻孔 ZK13501(图 6),在标高-210 m 处发现了真厚度 8.58 m、Au 平均品位为 3.55×10^{-6} 的金矿体,同时,矿山企业在 131 线东面的 129 线、西面的 135 线、137 线同时施工了 7 个钻孔,目前有 4 个钻孔取得了良好的找矿效果,其他还在施工中。

在马儿桥矿段 161 线 AS_4 异常位置,为了验证烃汞异常结论,施工了一个钻孔 ZK16101(图 7),在标高-160 m 处发现厚度 9.27 m 蚀变带,取样分析 Au 品位 0.16×10^{-6} ,与预测结果一致。

5 分析与探讨

研究表明,中大型金矿床大多具有多期成矿的特点^[17-31],按地质成因,地球化学场可分为地球化学同生场和地球化学叠加场两大部分。同生场反映成岩作用的元素分布,叠加场反映后期蚀变矿化作用的元素分布^[25]。通过对沃溪矿区土壤烃汞组分与成矿元素异常叠加特点研究发现,土壤中烃汞组分与成矿元素形成的综合异常与矿化蚀变关系十分密切,一般来说,构造蚀变带地表出露或者深部矿体产出的位置均形相对较好的烃汞综合异常,前人大量的烃类异常与矿体对应关系以及烃类异常形成的机理研究成果都得到了较好的证明^[7-16]。但由于不同的地质地球化学成矿作用或者多期成矿作用的叠加,使得地球化学场通常表现为复杂的叠加场。根据叠加场形成的机理不同,笔者将地球化学叠加场划分为同生叠加场和深源叠加场。同生叠加场反映区域变质或者动力变质作用形成的,成矿元素主要来自地层,由于变质作用,变质热液将地层中成矿元素重新活化、迁移、富集,在构造有利部位形成良好的成矿元素的地球化学叠加异常,这类叠加异常由于缺乏后期成矿热液带来成矿物质的叠加,一般形成异常面积较小,异常元素组合不全,除成矿元素外其他组分异常强度相对较低,可能会形成较好的矿点,形成中大型矿床的机遇相对较小;深源叠加场反映深源含矿热液带来成矿物质叠加形成的异常,是对同生叠加场的再次叠加,其异常元素组合相对齐全,成矿元素异常不一定很强,但能代表深源组分的异常强度都处于较高水平,多种研究方法表明具有深源热液带来成矿物质的叠加特点。两者虽然都具有叠加特点,但从找矿意义来讲,代表的是性质和意

义截然不同的两种地质地球化学作用过程。所以,传统的地球化学勘查或者单一的地球化学勘查新方法虽然可表征元素异常模式和异常结构特征,但由于缺乏异常元素叠加特点的进一步研究,在地球化学意义的表征、变化规律和结构的揭示等还是不够严格。一般来说,元素组合的成因特征能有效地反映地质地球化学的多期性^[26]。而有效的多元统计分析方法,能够对研究矿床形成环境、成矿期次、成矿阶段、不同的元素组合等提供支持^[29]。所以,利用多元统计分析方法,从分布复杂、无序的地球化学元素中提取与深部成矿有关的参数,来阐明地球化学异常与深部成矿统一的表征和定位,才是地球化学深部找矿评价的有效途径。

基于上述分析,通过运用烃汞叠加晕找矿方法对研究区内土壤地球化学所获得的烃汞和成矿元素形成的综合异常进行分类筛选,认为鱼儿山—红岩溪矿段为深源叠加异常,马儿桥矿段为同生叠加异常,再加强了烃汞对偶双峰异常模式的叠加特点研究并进行深部找矿预测,通过钻探研究取得了良好的预测效果。

6 结论

1) 研究区烃汞测量土壤采样层位以 C 层(或 B)为主;土壤和原生晕(岩石)样品加工粒度为-200 目。

2) 烃汞组分在区域地层处于较低含量水平,对背景场影响较小;区域烃汞组分背景含量明显低于矿区背景,说明矿区烃类组分具有明显的叠加特点;区域地层岩石风化成壤烃类组分贫乏严重,从而证明土壤烃类组分异常的形成与后期成矿活动的叠加改造关系密切。

3) 烃汞组分含量在矿石与蚀变围岩中明显高于未蚀变岩,矿脉中 Au 与烃汞组分相关性良好,说明本区成矿过程中存在有机物的参与,其中的烃汞组分可作为该区找矿预测的重要标志。

4) 研究区内土壤地球化学叠加场存在同生叠加场和深源叠加场 2 大类。

同生叠加场深部找矿效果较差,而深源叠加场深部找矿效果良好,从找矿意义来讲,深源叠加场又可分为 2 类综合异常,一类是成矿元素和烃汞类组分异常均发育良好,异常强度较强,如果成矿元素异常峰值较高,异常面积较大,说明浅部(就近)找矿效果较好,并且沿矿脉倾斜方向的深部找矿潜力较大;二类是成矿元素和烃汞类组分异常均发育一般,

异常强度相对较弱,说明浅部(就近)找矿效果一般,但沿构造控矿层倾斜方向的深部存在一定的找矿潜力,是下一步深部找矿的重点靶区。

5) 研究区烃汞综合异常模式主要以对偶双峰异常模式为主,头部峰和尾部峰控制矿脉产出位置,两峰值之间的相对低值区对应为矿脉,如果在低值区内出现成矿元素和烃汞类异常峰,表明由深部平行盲脉叠加造成,矿体的剥蚀深度,取决于矿体尾部异常的位置。

6) 矿区烃汞叠加晕研究成果及钻探验证,不但显示了红岩溪矿段及以北白垩系红层地区具有较大的深部找矿潜力,马儿桥矿段深部找矿潜力相对较差,同时表明了烃汞叠加晕法在盖层厚和红层覆盖区也能发挥其独特的技术优势,开拓了地球化学深部找矿新的技术手段。

参考文献(References):

- [1] 陈远荣,戴塔根,贾国相,等.金属矿床有机烃气常见异常模式和成因机理研究[J].中国地质,2001,15(87):738-742.
Chen Y R, Dai T G, Jia G X, et al. The common anomaly pattern of organic hydrocarbon of metallic ore deposit and its mechanism study[J]. Mineral Resources and Geology, 2001, 15(87): 738-742.
- [2] 李生郁,徐丰孚.轻烃与硫化物气体测量寻找金矿隐伏矿方法试验[J].物探与化探,1997,45(2):499-504.
Li S Y, Xu F F. The test of light hydrocarbon and sulphide gas measurement for gold concealed ore[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1997, 45(2): 499-504.
- [3] 李生郁,徐丰孚.土壤空隙烃气测量及其初步应用效果[C]//第五届全国勘查地球化学学术讨论会论文集,1994.
Li S Y, Xu F F. Measurement of hydrocarbon gas in soil voids and its preliminary application effect[C]//Proceedings of 5th National Symposium on Exploration Geochemistry, 1994.
- [4] 祁士华,阮天健.金矿床上的轻烃异常研究[R].中国地质大学(北京),1996.
Qi S H, Ruan T J. Research of hydrocarbon anomalies in gold deposits[R]. China University of Geosciences(Beijing), 1996.
- [5] 殷鸿福,张文怀,张志坚.等.生物成矿系统论[M].武汉:中国地质大学出版社,1999.
Yin H F, Zhang W H, Zhang Z J, et al. Biomineralization system theory[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999.
- [6] 胡凯.金矿床中的有机质及其成矿作用[J].矿物岩石地球化学通报,1998,17(2):71-75.
Hu K. Organic matter and its mineralization in gold deposits[J]. Geochemical Bulletin of Minerals and Rocks, 1998, 17(2): 71-75.
- [7] 陈远荣,贾国相,徐庆鸿.气体集成快速定位预测隐伏矿新技术研究[M].北京:地质出版社,2003.
Chen Y R, Jia G X, Xu Q H. Study on new technology of gas integrated rapid location and prediction of concealed ore[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003.
- [8] 陈远荣,戴塔根,当玉涛,等.有机烃气法在个旧锡矿松树脚矿田中的应用[J].物探与化探,2001,25(3):180-184.
Chen Y Y, Dai T G, Dang Y T, et al. The application of organic hydrocarbon gas technique to the Songshujiao ore field in the Gejiu tin mine, Yunnan province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2001, 25(3): 180-184.
- [9] 蒋惠俏,陈远荣,黄祥林,等.烃气测量法在龙口铅锌矿区找矿预测中的应用[J].金属矿山,2013,42(1):104-106,154.
Jiang H Q, Chen Y R, Huang X L, et al. Application of hydrocarbon measurement to evaluation and prediction of ore prospecting in Longkou lead-zinc deposit[J]. Metal Mine, 2013, 42(1): 104-106, 154.
- [10] 徐庆鸿,陈远荣,毛景文,等.有机烃在预测隐伏金矿床中的应用及其成因探索[J].地质论评,2005,51(5):105-112.
Xu Q H, Cheng Y R, Mao J W, et al. Application for hydrocarbon in prognosis buried gold deposits and implicaton for genesis[J]. Geological Review, 2005, 51(5): 105-112.
- [11] 贾国相,陈远荣,姚锦其,著.中国特色景观油气综合化探技术[M].北京:石油工业出版社,2002.
Jia G X, Chen Y R, Yao J Q. Comprehensive geochemical exploration technology of landscape oil and gas with Chinese characteristics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [12] 徐庆鸿,谢文清,陈远荣.福建邱庄金矿综合地球化学异常分带模型与找矿预测标志[J].地质与勘探,2005,41(1):56-61.
Xu Q H, Xie W Q, Chen Y R. Comprehensive geochemical anomaly zoning model and prospecting prediction criteria of Qiuzhuang gold deposit, Fujian Province[J]. Geology and Exploration, 2005, 41(1): 56-61.
- [13] 中国地球化学研究所.有机地球化学论文集[M].北京:科学出版社,1986.
China Institute of Geochemistry. Papers on organic geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1986.
- [14] 谢桃园,陈远荣,张璟,等.烃气测量法在黑龙江乌拉嘎金矿区找矿预测评价中的应用[J].地质与勘探,2010,46(3):506-514.
Xie T Y, Cheng Y R, Zhang J, et al. Application of hydrocarbon measurement to evaluation and prediction of mineralization in the Wulaga gold deposit of Heilongjiang province[J]. Geology and Exploration, 2010, 46(3): 506-514.
- [15] 段炼,陈远荣,段海东,等.烃气测量法在黄土覆盖区找矿中探索研究[J].矿产与地质,2016,30(2):234-239.
Duan L, Chen Y R, Duan H D, et al. Research on hydrocarbon method in the prospecting of the loess covered area[J]. Mineral Resources and Geology, 2016, 30(2): 234-239.
- [16] 张苗苗,陈远荣.烃气测量法在陕西略阳煎茶岭金矿床及其外围地区的应用[D].桂林:桂林工学院,2009.
Zhang M M, Chen Y R. Application of hydrocarbon gas measurement in Jianchaling gold deposit and its peripheral area, Lueyang, Shaanxi Province[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2009.
- [17] 李惠,禹斌,李德亮,等.构造叠加晕找盲矿法及研究方法[J].

- 地质与勘探, 2013, 49(1): 154 - 161.
- Li H, Yu B, Li D L, et al. Prediction of blind ore bodies using structural superimposed halo and research methods [J]. *Geology and Exploration*, 2013, 49(1): 154 - 161.
- [18] 李惠, 张国义, 王支农, 等. 构造叠加晕法在预测金矿区深部盲矿中的应用效果 [J]. *物探与化探*, 2003, 27(6): 438 - 440.
- Li H, Zhang G Y, Wang Z N, et al. The effect of applying structural superimposed halos to the prognosis of deep blind orebodies in the gold ore district [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2003, 27(6): 438 - 440.
- [19] 李惠. 石英脉和蚀变岩型金矿床地球化学异常模式 [M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- Li H. Geochemical anomaly patterns of quartz veins and altered rock gold deposits [M]. Beijing: Science Press, 1991.
- [20] 李惠, 张国义, 禹斌. 金矿区深部盲矿预测的构造叠加晕模型及找矿效果 [M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- Li H, Zhang G Y, Yu B. Structural superposition halo model and prospecting effect of blind ore prediction in deep gold area [M]. Beijing: Geological Publishing Press, 2006.
- [21] 彭南海. 湖南沅陵沃溪金—铋—钨矿床地质地球化学特征及成因研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2017.
- Peng N H. Study on geological and geochemical characteristics and genesis of Woxi Au-Sb-W deposit Yuanling, Hunan province [D]. Changsha: Central South University, 2017.
- [22] 中国人民武装警察部队黄金指挥部. 湖南省沃溪式金矿地质 [M]. 北京: 地震出版社, 1996.
- Gold Headquarters of the Armed Police of the Chinese People's Armed Police Force. *Geology of Woxi-Type stratabound gold deposit, Hunan Province* [M]. Beijing: Seismological Press, 1996.
- [23] 罗献林. 论湖南前寒武系金矿床的形成时代 [J]. *桂林冶金地质学院学报*, 1989, 9(1): 25 - 34.
- Luo X L. On the epoch of the formation of precambrian gold deposits in Hunan Province [J]. *Journal of Guilin College of Geology*, 1989, 9(1): 25 - 34.
- [24] 黎盛斯. 湖南金矿地质概论 [M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1991.
- Li S S. Introduction of Hunan gold deposits [M]. Changsha: Journal of Central South University, 1991.
- [25] 孟宪伟, 窦明晓, 余先川. 地球化学场分解的理论与方法 [J]. *地球科学进展*, 1994, 6(6): 59 - 64.
- Meng X W, Dou M X, Yu X C. The theories and methods on the dispersion of geochemical field [J]. *Advance in Earth Sciences*, 1994, 6(6): 59 - 64.
- [26] 戚长谋. 元素地球化学分类探讨 [J]. *长春科技大学学报*, 1997, 21(4): 361 - 365.
- Qi C M. A discussion for geochemical classification of elements [J]. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 1997, 21(4): 361 - 365.
- [27] 王秀璋. 中国改造型金矿床地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- Wang X Z. *Geochemistry of reformed gold deposits in China* [M]. Beijing: Science Press, 1992.
- [28] 中国科学院黄金科技领导小组. 中国金矿地质地球化学研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- Gold Technology Leading Group of Chinese Academy of Sciences. *Geological and geochemical study of gold deposits in China* [M]. Beijing: Science Press, 1993.
- [29] 吴锡生. 化探数据处理方法 [M]. 北京: 冶金出版社, 2008.
- [30] 吴二, 陈远荣. 基于烃汞综合气体测量技术的金矿深部找矿预测 [D]. 桂林: 桂林工学院, 2014.
- Wu E, Chen Y R. The gas measurement technology of hydrocarbon mercury to forecast deep hidden gold deposits [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2014.
- [31] 吴二, 陈远荣, 刘巍, 等. 烃气测量法在辽宁白云金矿找矿潜力评价中的应用 [J]. *物探与化探*, 2014, 38(2): 248 - 254.
- Wu E, Chen Y Y, Liu W, et al. The application of hydrocarbon determination method to the prospecting potential evaluation of the Baiyun gold deposit in Liaoning [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2014, 38(2): 248 - 254.
- Wu X S. Data processing method of geochemical exploration [M]. Beijing: Metallurgical Publishing House, 2008.
- [32] 陈远荣, 戴塔根, 庄晓蕊, 等. 烃汞气体组分垂向运移的主要控制因素 [J]. *中国地质*, 2001, 28(8): 28 - 32.
- Chen Y R, Dai T G, Zhuang X R, et al. Main controlling factors for vertical migration of hydrocarbon components such as hydrocarbons and mercury [J]. *Chinese Geology*, 2001, 28(8): 28 - 32.

The application of hydrocarbon and superimposed halo method to the Woxi gold deposit, Hunan Province

CHEN Hai-Long¹, XIAO Qi-Peng¹, LIANG Ju-Hong²

(1. Research Institute of Hunan Provincial Nonferrous Metal Geological Exploration Bureau, Changsha 410015, China; 2. Hunan Chenzhou Mining Co., Ltd., Yuanling 419607, China)

Abstract: In order to solve the problem of deep prospecting in the Yuershanore ore block and its peripheral Hongyanxi-Ma'erqiaore-block in the Woxi mining area, the authors carried out the tests of structural superimposition halo and hydrocarbon mercury comprehensive gas measurement in this area. Based on the study of the evolution law of hydrocarbon and mercury components in different geological bodies and different elevations and the characteristics of geochemical hydrocarbon and mercury anomalies formed in the upper soil

of the orebody, the authors summarized the structure and superposition characteristics of soil geochemical anomaly field as well as the corresponding relationship with space so as to carry out the deep prospecting prediction. In addition, the test of the hydrocarbon and mercury superposition halo was carried out in the Hongyanxi-Ma'erqiao prediction area in the periphery. Based on the comprehensive study of prospecting methods, it is found that there are two different types of superposition fields in the soil geochemical field of Hongyanxi-Ma'erqiao ore block: one is deep source superposition field, where the correlation between Au and hydrocarbon components is good, the hydrocarbon anomaly components are complete, the Au and Hg anomalies are good, with deep source ore-forming hydrothermal superposition, and the deep prospecting potential is great; the other is syngenetic superposition field, where the correlation between Au and hydrocarbon components is poor, the element combination is relatively simple, and there is no hydrocarbon component anomaly, exhibiting little significance for ore prospecting. The hydrocarbon anomaly mode is dominated by dual bimodal anomaly mode, and there is a good hydrocarbon mercury comprehensive superposition anomaly in the low value area between the two peaks of hydrocarbon anomaly, indicating that there is a parallel blind vein in the depth. Drilling verification shows that the deep source superposition field has a gold orebody with a real thickness of 8.58 m and an average grade of 3.55×10^{-6} gold, while the syngenetic superposition field only has gold mineralization. Good prediction results have been achieved.

Key words: hydrocarbon-mercury superposition anomaly; geochemistry; new method; gold deposit; Woxi; Hunan

(本文编辑:蒋实)