

甘肃早子沟金矿床地球化学联合广域电磁法的深部找矿预测

朱 锐^{1,2}, 栾晓刚^{2*}, 聂 鑫³, 吴通林², 何永成², 于皓丞¹(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院; 2. 甘肃省合作早子沟金矿有限责任公司;
3. 招金矿业股份有限公司)

摘要:早子沟金矿床是西秦岭造山带最大的金矿床之一。然而,随着开采深度增加,勘探难度越来越大。尽管深部资源潜力巨大,但对深部矿体的展布认识不清。通过开展地球化学联合广域电磁法工作,在早子沟金矿床开展深部成矿预测研究并圈定靶区。代表性勘探线剖面上岩石样品的微量元素特征显示,As 与 Au 相关性最好,Sb 与 Au 相关性次之,表明毒砂和辉锑矿是与金关系最密切的矿物,且它们在一定程度上呈互补关系,即辉锑矿发育处,毒砂较为不发育,反之亦然。毒砂可能是金的主要载体,而辉锑矿的形成对于金的富集起到了增强作用。通过综合分析成矿元素分布图及广域电磁解释剖面,明确了电阻率的突变位置与矿体分布具有很好的耦合性。在电阻率突变线附近,尤其是2组突变交会处,发育矿体的可能性最大。在此基础上,在GY3剖面上划分了3个级别共5个有利勘探区,I级有利勘探区为浅部的主要含矿构造与横向显著电阻率突变带交会处,II级有利勘探区为横向显著电阻率突变带与纵向突变带交会处,III级有利勘探区为已发现M4、M6等盲矿体以深相似构造位置即横向一般电阻率突变带。有利勘探区可向两侧其他剖面延伸,为其他剖面有利勘探区划分提供参考。

关键词:早子沟金矿床;广域电磁法;地球化学;电阻率;深部找矿;圈定靶区;西秦岭

中图分类号:TD11 P618.51

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)09-0028-09

doi:10.11792/hj20250903

引 言

早子沟金矿床位于西秦岭造山带,是该造山带最大的金矿床之一^[1-3]。自1996年发现以来,探明储量超过100 t。前人研究认为,早子沟金矿床深部资源潜力较大^[4-6],然而随着开采深度增加,勘探难度越来越大。受限于钻孔分布及样品数量,单纯采用地球化学方法找矿已难以满足深部勘探需要。而在浅部密布巷道的影响下,采用普通地球物理勘探方法找矿效果不佳。因此,强化深部找矿工作已成为目前勘探工作的重点。基于构造、岩浆与热液演化分析,众多学者对早子沟金矿床的成矿规律和勘探潜力进行了分析和预测^[4-8]。前人研究表明,早子沟金矿床是典型造山型金锑矿床^[1,3,9-10],金锑成矿作用与华南—华北板块碰撞造山作用有关^[9,11-12],成矿物质来源于受区域变质作用影响的地层^[2,13-19]。陈国忠等^[8]分析了矿区构造特征,认为断裂面形态影响了矿体形态和分布,断裂面的凸峰及凹谷区是矿体赋存的主要位置。

金鼎国等^[20]总结了早子沟金矿床矿体的空间分布特征,强调矿区断裂、岩脉等对矿体的控制作用。张愿宁等^[21]综合分析了早子沟金矿床的成因,明确了其为受构造控制明显的热液蚀变岩型和石英脉型金矿床。李康宁等^[22]对夏河—合作地区与中酸性侵入岩有关的金铜多金属成矿系统进行了分析,认为岩浆作用和断裂联合控制矿体发育。野外观察表明,断裂破碎带、中酸性岩脉、硅化蚀变及Au、As、Hg、Sb元素的化探异常是重要找矿标志^[23]。矿体分布主要受控于北东东向、北西向断裂,断裂产状变化处、多组断裂交会处、断裂局部伸展处往往是利于形成高品位金矿化的位置^[7]。矿体三维建模显示,矿区深部有较大的找矿潜力^[5,6,24],与原生晕预测结果一致^[8]。上述认识和评价为圈定深部靶区提供了依据^[25]。广域电磁法是近十几年逐步发展起来的一种频率域电磁探测法,具有探测深度大、抗干扰能力强、分辨率高等优势^[26],已在深部勘探工作中得到了广泛应用^[27-29],如胶东大柳行金矿床^[30]和贵州烂泥沟金矿床^[31]。针对目前早子沟

收稿日期:2025-03-25; 修回日期:2025-05-02

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFE0125000);甘肃省合作早子沟金矿有限责任公司与中国地质大学(北京)产学研合作项目(ZJ-ZZGJK2025)

作者简介:朱 锐(1989—),男,工程师,从事矿山地质勘查工作;E-mail:zhunigold@qq.com

*通信作者:栾晓刚(1983—),男,高级工程师,从事矿山管理和地质勘查工作;E-mail:Luanxiaogang8307@163.com

金矿床的勘探需要及所面临的勘探问题,综合地球物理与地球化学手段的勘探工作势在必行。因此,本文在分析矿体地球化学元素分布特征的基础上,结合广域电磁法联合勘探,对早子沟金矿床深部构造和含矿性进行预测,以期为深部钻探、找矿提供参考。

1 地质概况

早子沟金矿床位于西秦岭成矿带夏河—合作矿集区^[3,32],已探明金资源量 118 t,平均金品位 3.42 g/t。区域北西西向褶皱、断裂发育,构造复杂,印支期中酸性侵入岩十分发育,成矿条件优越。矿区主要出露中三叠统古浪堤组下段第三层(见图1),岩性主要为青灰色含钙泥质板岩、粉砂质板岩、泥质板岩夹砂岩、粉砂岩及薄层状、透镜状灰岩、不纯灰岩。矿区西部地

层为近南北走向,东部地层为北东走向,整体为北西向单斜构造。矿区内断裂非常发育,根据走向大致可分为近东西向、近南北向、北东向、北西向、北北东向 5 组,矿体严格受控于断裂,侵入岩也基本沿断裂发育^[23,25-28,30-31,33-34]。北东向断裂是最主要的控矿构造,走向 55°,倾向多为南东向(如 Au1 矿体),少数为北西向(如 Au9 矿体),倾角陡,超过 80°。矿区含矿段分布于 1 号沟到 4 号沟,北东向、北西西向、北西向和近南北向断裂控制了 4 条矿带的空间分布。截至目前,矿区共圈定矿体 523 个。其中,以单个矿体稳定延伸大于 500 m 且有深部工程控制作为主矿体划分标准,共确定 3 个主矿体,分别为北东向 Au1、Au9 矿体及北西西向盲矿体 M6。

矿石类型包括蚀变岩型和石英脉型 2 类(见

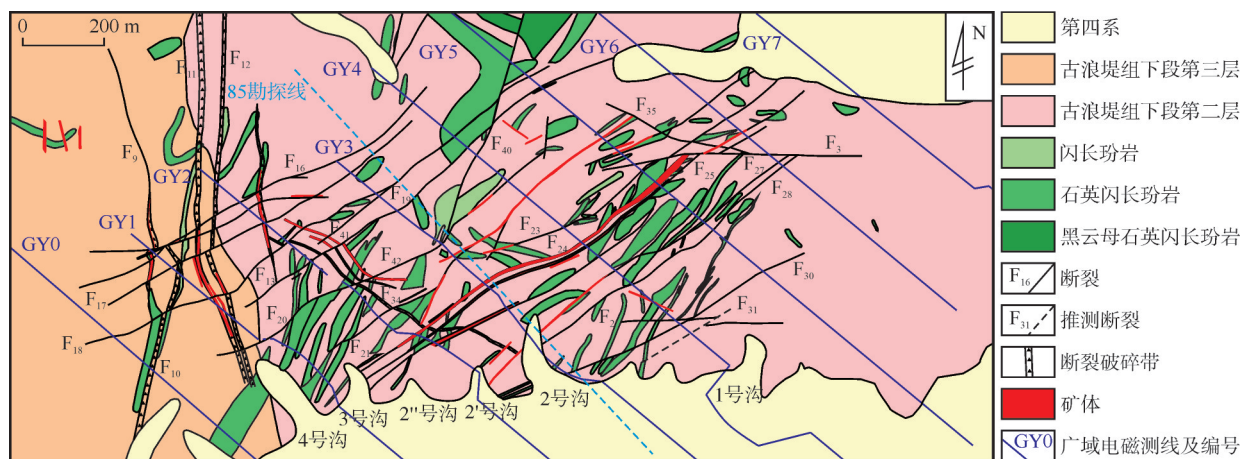


图1 早子沟金矿区地质图(据文献[4]修改)

Fig. 1 Geological map of the Zaozigou Gold District

图2-a、b)。蚀变岩型矿石根据其原岩又可划分为蚀变板岩型矿石和蚀变闪长玢岩型矿石,而石英脉型矿石主要为石英辉锑矿型矿石(见图2-c)。蚀变岩型矿石产于近南北向和北东向的陡倾斜矿体中,石英脉型矿石主要产于北西向的缓倾斜矿体中,少量产于部分北东向陡倾斜矿体中。矿石矿物主要为自然金、辉锑矿、含金黄铁矿和毒砂。其中,辉锑矿和毒砂是主要的载金矿物。辉锑矿主要发育在石英脉型矿石中,多呈他形不规则状填充于石英脉中(见图2-d)。毒砂结晶较好,呈棱形、长柱形、矛头状,往往与黄铁矿伴生(见图2-e),多呈浸染状分布于蚀变岩型与石英脉型矿石中。

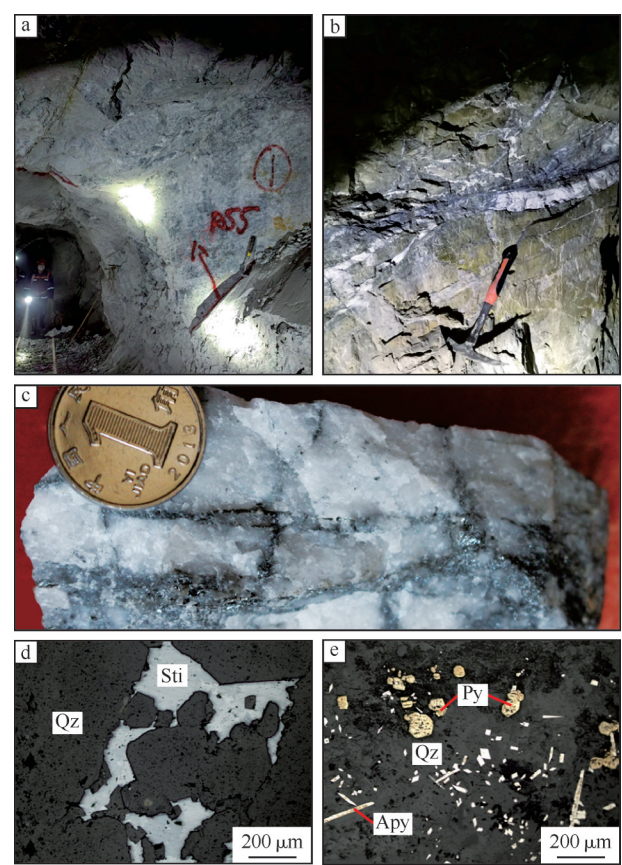
2 样品采集与测试方法

前人已经通过原生晕分析肯定了矿区深部的找矿潜力,并分析了找矿标志^[6,8,23,25]。在总结前人研究成果基础上,本研究以主竖井 10 中段为研究剖面(见图1中 85 勘探线,2 760 m 标高),开展一维地球化学填图工作,结合广域电磁资料,分析地球物理找矿标

志,进一步探究深部矿体展布特征,以期在不同勘探线上,进行精准找矿预测,探明高潜力成矿区。本文采集主巷道(2 760 m 标高)样品 108 件,跨越长度约 430 m,自北西向南东横切了 Au9、Au113、Au46 和 Au1 等矿体。

为了更好地解释成矿元素分布特征,本文对采集样品分析了 Au、As、Sb、Ag、Cu、Pb、Zn、Co、Ni、Cr、Mo、V、Rb、Sr、Ba、Mn、Ti、Bi 和 Hg 共 19 种微量元素。本次针对不同元素采用的测试仪器包括原子吸收分光光度计(GGX-900, Ag、Cu、Pb、Zn、Co、Ni、Mo、V、Rb、Sr、Ba、Mn、Ti)、原子荧光光度计(XGY1011A, As、Sb、Cr、Bi);对少数辉锑矿矿石,采用化学法测量,对于 Au、Hg 等痕量元素、低于检出限的元素,利用电感耦合等离子质谱仪(X series2/SN01831C)进行分析。

为了厘清矿区深部含矿构造的延伸和展布情况,设计和完成了 8 条广域电磁剖面,测线编号 GY0~GY7(见图1),为尽可能避免边界效应影响,对测线两端均进行了适度延长。为保证剖面完整性,野外工作时对部分因采矿区 and 沙棘林影响而无法布线的测点



a—蚀变岩型矿石 b—石英脉型矿石 c—石英辉锑矿型矿石
d—石英脉中辉锑矿呈填隙结构 e—石英脉中黄铁矿与毒砂伴生
Qz—石英 Sti—辉锑矿 Py—黄铁矿 Apy—青砂

图2 早子沟金矿床矿石特征

Fig. 2 Ore characteristics of the Zaozigou Gold Deposit

进行了适当偏移。采集仪器为湖南继善高科技有限公司与中南大学联合研制的广域电磁仪器系统^[26],采用的装置形式为广域电磁法的E-Ex装置。为保证本次工作的可靠性,先进行室内标定。本次工作共配备2台接收机(编号为GY2712J和GY2713J),野外工作时采用1发2收的工作模式(1台发射系统,2台接收

机同步接收)。

3 成矿元素展布特征及相关性分析

3.1 微量元素相关性分析

早子沟金矿床矿石微量元素分析结果见表1。由表1可知:As和Sb是矿石中含量相对较高的元素。为了更好地明确成矿标志元素,对所测试的元素与Au的相关性进行了分析,结果见图3。由图3可知:As与Au相关性最好,Sb与Au相关性次之,3件高Sb含量矿石样品偏离趋势线,剔除后相关性更好,指示部分辉锑矿可能并未与Au共生。As和Sb质量分数之和与Au表现出密切的相关性,表明As、Sb与Au伴生关系紧密。As、Sb和Au的强相关性 with 矿石矿物的共生关系相对应,即毒砂和辉锑矿是最主要的赋金矿物,且毒砂和辉锑矿在一定程度上呈互补关系,辉锑矿发育良好时,毒砂发育一般或较差;而毒砂发育良好时,辉锑矿则发育一般或较差。然而,个别样品(如z95样品)同时表现出辉锑矿、毒砂均发育良好的特征。除Sb和As外,Ag和Hg与Au表现出一定的相关性,但相关性较差,且样品中Ag、Hg含量普遍较低,对Au的指示作用有限。其他元素如Cu、Pb、Zn、Cr、Bi与Au相关性非常差,可能代表了背景含量,与金成矿无关。此外,矿石间复杂的穿插关系,以及石英脉型矿石内辉锑矿含量变化较大,导致Sb、As、Au含量难以准确识别。由此,矿石类型可进一步分为石英脉型、石英辉锑矿型、蚀变岩型和蚀变岩夹石英脉型。不同类型矿石Au、As、Sb元素特征见表2,Au-As-Sb关系见图4。由表2、图4可知:As与Au的相关性很好,表明毒砂可能是Au的主要载体。而高Sb样品中Au含量波动较大且受限于As含量,表明辉锑矿的形成可能增强了金的富集作用。

表1 早子沟金矿床矿石微量元素分析结果

Table 1 Trace element analysis results of ores from the Zaozigou Gold Deposit

×10⁻⁶

样品 编号	距起点距离/m	Au ¹⁾	As	Sb	Ag	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Cr	Mo	V	Rb	Sr	Ba	Mn ²⁾	Ti ³⁾	Bi	Hg ⁴⁾
z3	0.0	50.0	104.0	69.0	0.19	66.0	36.1	97.0	17.2	36.4	63.2	1.1	91.9	199	535	359	0.08	0.52	1.34	12
z4	0.5	50.0	146.0	36.5	0.06	2.0	14.5	42.2	9.2	22.9	75.2	1.2	45.4	59	1 781	109	0.12	0.16	0.58	42
z5	1.0	60.0	73.5	35.0	0.22	20.3	18.7	78.9	15.5	35.2	54.3	1.2	64.9	129	1 212	336	0.09	0.31	0.41	19
z6	1.5	35.0	32.3	20.0	0.16	61.0	8.5	29.9	9.1	13.3	74.7	1.0	74.1	95	1 241	94	0.08	0.60	0.91	26
z1	2.0	340.0	238.0	73.5	0.46	30.3	25.2	29.9	24.3	34.0	41.9	1.1	60.5	37	591	56	0.05	0.28	3.68	190
z2	3.0	190.0	193.0	56.5	0.15	26.3	21.6	29.7	18.4	25.4	52.1	1.0	76.1	59	920	63	0.07	0.46	1.57	143
z7	3.5	11.6	106.0	65.0	0.05	50.7	13.2	57.9	10.5	37.5	29.0	0.8	42.9	51	2 058	113	0.05	0.20	0.95	31
z8	4.5	2.3	23.2	3.5	0.02	12.2	13.0	91.5	17.0	33.5	52.1	1.1	61.7	49	1 065	265	0.11	0.41	0.38	31
z10	4.0	80.0	6 300.0	37.5	0.14	53.0	19.5	91.0	18.0	36.0	53.3	5.4	77.8	189	1 265	864	0.06	0.47	0.96	114
z11	5.5	4.1	251.0	2.5	0.08	8.9	51.4	45.8	9.6	28.8	31.9	1.0	49.1	74	1 929	330	0.09	0.22	0.51	168
z12	8.5	150.0	181.0	9.5	0.07	1.0	63.1	31.5	6.4	24.8	20.0	1.1	34.1	28	2 300	1425	0.15	0.13	0.63	24
z13	15.5	7.9	45.2	33.0	0.07	16.7	12.5	74.5	13.4	31.3	67.2	2.1	104.0	287	106	617	0.02	0.46	0.52	50

表 1 (续)
Table 1 (continued)

样品 编号	距起点距离/m	Au ¹⁾	As	Sb	Ag	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Cr	Mo	V	Rb	Sr	Ba	Mn ²⁾	Ti ³⁾	Bi	Hg ⁴⁾
z16	24.5	310.0	263.0	10.4	0.01	19.8	25.8	89.4	17.8	34.2	58.9	1.0	66.9	198	616	495	0.08	0.41	0.40	36
z18	31.5	3 100.0	16 600.0	62.5	1.14	30.6	9.5	91.0	17.1	31.9	57.2	1.0	66.4	221	407	290	0.08	0.37	0.31	161
z21	41.5	50.0	718.0	7.1	0.53	92.8	137.0	86.1	40.3	43.7	70.3	5.1	88.3	166	594	603	0.04	0.53	2.28	307
z23	49.5	3.3	266.0	2.1	0.05	10.4	23.7	97.3	18.5	35.6	62.6	1.1	86.3	158	611	1 563	0.16	0.50	0.26	144
z25	58.5	7.5	1 864.0	53.5	0.11	3.3	5.1	7.8	3.4	20.7	2.3	1.0	25.7	12	1 157	32	0.07	0.04	0.16	401
z26	63.5	5.4	632.0	49.0	0.04	42.0	17.7	90.7	17.9	37.0	64.1	2.5	75.0	213	781	1 336	0.07	0.48	0.47	83
z30	78.5	1.6	35.5	4.4	0.05	44.1	23.7	105.0	20.5	40.4	66.6	1.2	82.0	214	630	564	0.10	0.53	0.30	105
z34	98.5	2.7	59.9	61.0	0.06	73.3	20.6	96.8	20.0	36.5	52.0	1.1	71.7	65	283	109	0.08	0.47	0.30	91
z36	108.5	1.6	36.0	4.2	0.01	19.8	30.1	95.7	19.3	37.9	77.6	1.8	87.8	144	899	1 689	0.07	0.53	0.29	26
z39	118.5	6.6	85.0	61.5	0.07	83.9	29.6	117.0	20.3	37.1	43.3	2.0	81.6	22	156	62	0.06	0.57	0.56	30
z41	123.5	440.0	2 362.0	44.5	0.01	8.3	22.9	92.5	14.5	29.3	52.0	1.8	72.2	191	358	426	0.10	0.39	0.34	55
z43	126.0	11.5	144.0	27.5	0.02	15.3	18.5	80.2	14.3	28.2	53.1	1.8	69.0	193	675	441	0.18	0.33	0.94	32
z44	129.5	1 060.0	4 916.0	47.5	0.10	9.3	7.8	15.4	9.3	27.3	27.5	2.2	49.5	102	1 088	181	0.10	0.20	0.33	41
z46	129.6	4 070.0	4 612.0	152.0	0.06	5.2	5.7	9.4	2.0	8.4	7.2	1.8	28.0	23	189	48	0.03	0.04	0.24	45
z47	130.5	170.0	181.0	49 500.0	0.29	7.8	1.6	127.0	0.4	2.8	4.2	1.3	30.9	3	82	70	0.01	0.01	0.14	1 103
z48	130.6	4 450.0	7 340	140.0	0.13	13.2	14.2	36.5	7.3	20.3	22.7	1.9	53.5	101	447	181	0.04	0.15	0.56	1 101
z49	131.0	610.0	2 247.0	18.5	0.02	5.4	23.2	88.2	16.8	36.8	39.8	1.5	75.9	219	355	1 204	0.06	0.42	0.61	955
z50	131.5	9.6	158.0	35.3	0.01	19.0	26.0	88.3	17.4	37.9	52.7	10.1	70.6	191	271	566	0.07	0.43	0.52	643
z52	133.5	70.0	237.0	21.8	0.80	659.0	25.2	84.8	19.3	37.2	55.9	2.5	74.1	136	395	354	0.12	0.36	3.47	491
z55	142.5	5.0	41.5	10.0	0.03	10.7	21.6	82.9	15.1	33.3	52.7	2.6	75.5	155	255	417	0.06	0.42	0.48	195
z58	155.5	7.5	36.7	20.5	0.02	70.7	33.4	112.0	19.9	44.2	83.2	1.3	94.8	192	391	509	0.08	0.56	0.38	203
z60	165.5	60.0	109.0	66.0	0.01	44.6	29.3	103.0	17.6	32.1	77.7	1.9	89.5	272	185	230	0.05	0.53	0.61	218
z61	170.5	10.5	62.5	34.0	0.05	12.6	13.5	44.5	15.5	29.1	46.1	1.1	58.9	160	292	565	0.02	0.43	0.39	198
z63	175.5	1 790.0	2 262.0	31.0	0.14	3.3	17.8	59.2	11.2	17.6	19.7	1.6	60.3	177	288	716	0.05	0.20	8.11	221
z66	187.0	90.0	757.0	40.5	15.80	6 870.0	19.8	326.0	19.2	26.5	43.2	1.9	56.2	127	886	276	0.08	0.28	50.70	400
z68	190.0	70.0	251.0	137.0	0.04	5.8	27.6	86.5	17.5	37.4	68.9	3.1	95.9	107	221	311	0.07	0.47	0.31	529
z69	191.5	25.0	173.0	92.5	0.13	151.0	10.7	38.0	9.5	12.4	17.9	1.4	51.3	124	404	105	0.03	0.38	0.53	223
z70	192.0	10 100.0	1 835.0	78 600.0	2.10	16.2	30.0	18.1	2.2	9.3	11.2	1.2	35.4	13	392	157	0.04	0.05	3.31	819
z71	192.5	2 840.0	4 150.0	142.0	0.10	24.0	6.5	30.8	5.5	12.7	17.6	1.5	34.5	41	432	70	0.05	0.06	1.02	955
z72	193.5	16.7	60.2	118.0	0.04	24.9	9.6	20.4	6.3	10.3	29.9	1.6	46.4	135	475	194	0.04	0.33	0.42	730
z74	196.5	8.3	54.3	45.5	0.02	5.3	15.5	59.3	13.0	15.6	36.0	1.1	56.8	151	497	784	0.06	0.44	0.15	536
z75	201.5	50.0	231.0	64.0	0.04	1.0	26.2	64.6	13.9	14.2	27.2	1.2	52.5	134	511	643	0.05	0.38	0.18	397
z77	213.5	2.3	34.4	25.0	0.04	20.9	27.8	60.2	14.4	23.3	42.7	5.8	62.3	166	451	735	0.06	0.42	0.74	339
z78	219.5	21.5	242.0	78.0	0.03	25.9	14.2	81.5	12.5	50.3	82.7	2.2	45.5	61	775	59	0.03	0.27	4.00	284
z80	231.5	3.9	54.6	83.5	0.02	1.7	27.5	65.8	9.6	13.4	29.7	1.1	64.0	150	282	626	0.02	0.46	0.13	407
z82	241.5	5.6	41.2	46.8	0.03	16.2	22.4	65.7	8.1	10.7	19.8	1.1	37.7	128	410	714	0.03	0.42	0.38	273
z86	261.5	6.6	63.8	4.9	0.08	44.9	16.8	59.0	10.8	13.2	36.8	1.5	50.0	138	475	727	0.06	0.40	2.78	192
z89	276.5	21.9	787.0	3.5	0.09	9.4	21.9	71.2	11.7	14.6	30.9	1.1	51.6	159	458	665	0.06	0.38	0.65	154
z94	323.5	13.5	37.2	22.0	0.18	7.2	23.3	51.4	9.1	13.0	29.6	2.9	43.2	142	447	645	0.04	0.37	5.50	186
z95	328.5	7 400.0	6 140.0	103 400.0	1.52	6.2	16.7	208.0	1.6	4.9	9.8	1.0	30.0	37	67	179	0.01	0.05	0.65	730
z96	332.5	12 300.0	14 900.0	172.0	13.80	160.0	15.7	78.3	12.1	20.6	35.4	2.8	51.2	135	509	173	0.12	0.19	4.88	639
z97	335.5	8 150.0	24 700.0	152.0	1.73	40.3	5.0	88.3	15.5	29.3	69.3	1.5	74.4	262	411	308	0.09	0.38	0.54	384
z98	338.5	200.0	2 069.0	114.0	16.80	106.0	50.2	105.0	18.0	32.1	50.8	2.0	66.1	51	447	177	0.09	0.35	13.40	318
z100	346.5	17.3	131.0	40.0	0.04	18.3	16.1	85.9	18.4	35.2	64.7	1.1	75.4	177	859	774	0.09	0.45	0.51	273
z102	358.5	90.0	1 647.0	19.0	4.18	26.8	15.2	93.3	15.0	64.2	117.0	1.5	53.4	139	537	535	0.06	0.31	0.47	242
z105	382.5	8.6	58.2	27.3	0.03	14.9	19.1	71.4	7.1	5.3	9.0	1.1	40.0	93	236	107	0.03	0.36	0.34	319

注: 1) $w(\text{Au})/\times 10^{-9}$; 2) $w(\text{Mn})/\%$; 3) $w(\text{Ti})/\%$; 4) $w(\text{Hg})/\times 10^{-9}$ 。

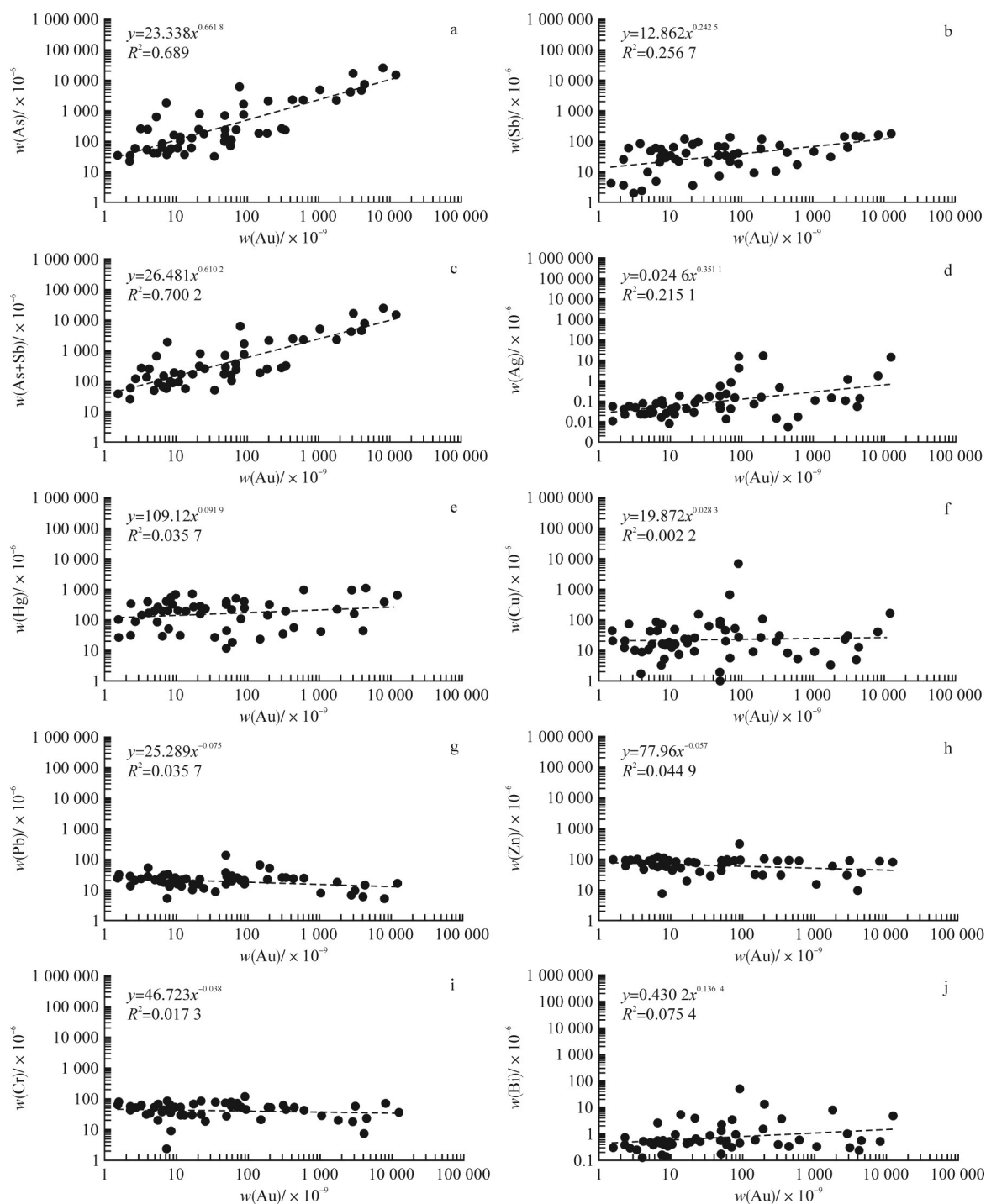


图3 早子沟金矿床不同元素与Au的相关关系

Fig. 3 Correlation diagrams between different elements and Au in the Zaozigou Gold Deposit

3.2 成矿元素的一维分布

早子沟金矿床的指示元素为As和Sb,为了更好地分析As和Sb对矿体的指示作用,展示其在矿体及围岩中的含量变化,将Au、As和Sb 3种元素的含量按采样位置沿10中段(2760 m标高)主巷道(85勘探线)投影,结果见图5。由图5可知:矿体发育处Au质量分数高。矿体均发育石英辉锑矿脉或辉锑矿化、毒砂化,表现为Sb和As含量均较高。需要指出的是,除了矿体外,还可见5个Sb或As异常的矿化带。其中,

1和3号点位表现出明显的Au和As异常,而2,4和5号点位表现出明显的As异常,可能发生了毒砂化,但并未发生明显金矿化,也可能是矿体的外延,值得进一步研究,明确其含矿性。

4 广域电磁法对深部勘探的启示

广域电磁法的基本原理是利用地面上的变化电磁场激发地下介质电流,测量地下电流产生的磁场信号,从而推断地下介质的电性结构和成分。相对于传

表 2 早子沟金矿床不同矿石类型 Au、As、Sb 元素特征

Table 2 Characteristics of Au, As, and Sb in different ore types from the Zaozigou Gold Deposit $\times 10^{-6}$

样品编号	矿石类型	Au ¹⁾	As	Sb
z1	石英脉型	340	238	74
z2		190	193	57
z25		8	1 864	54
z46		4 070	4 612	152
z48		4 450	7 340	140
z63		1 790	2 262	31
z71		2 840	4 150	142
z98		200	2 069	114
z0	石英辉锑矿型	42 100	666	188 400
z47		170	181	49 500
z70		10 100	1 835	78 600
z95		7 400	6 140	103 400
z102	蚀变岩型	90	1 647	19.0
z10		80	6 300	37.5
z12		150	181	9.45
z16		310	263	10.4
z18		3 100	16 600	62.5
z21		50	718	7.10
z41		440	2 362	44.5
z44		1 060	4 916	47.5
z49	蚀变岩夹石英脉型	610	2 247	18.5
z111		870	6 650	58.0
z96		12 300	14 900	172
z97		8 150	24 700	152
z115		1 200	1 717	86 400
z116		2 290	15 900	93.5
z117		1 240	9 650	82.0

注:1) $w(\text{Au})/\times 10^{-9}$ 。

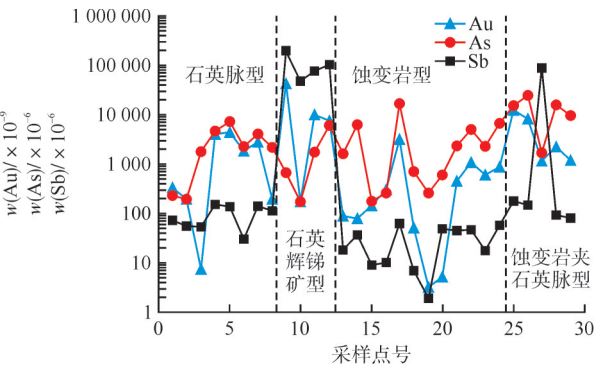


图 4 早子沟金矿床不同类型矿石 Au-As-Sb 关系图

Fig. 4 Au-As-Sb relationships in different ore types from the Zaozigou Gold Deposit

统电法勘探,广域电磁法探测深度更大、抗干扰能力

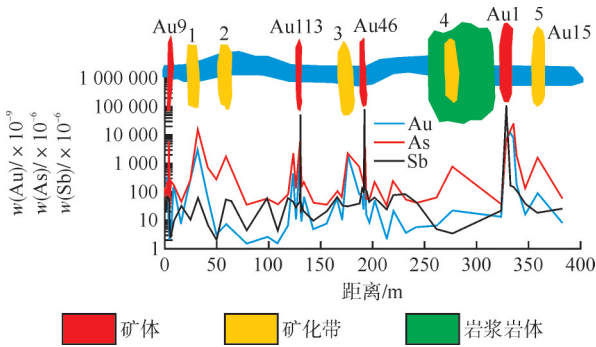


图 5 主巷道成矿元素一维分布图

Fig. 5 One-dimensional distribution of ore-forming elements along the main roadway

更强、分辨率更高^[26],非常适用于深部勘探。

4.1 地球化学数据与广域电磁剖面的耦合性

为了更好地理解矿体与广域电磁信号的关系,对 GY3 测线(与 85 勘探线相近)剖面上成矿元素的一维展布与广域电磁解释剖面进行了叠合对比,用于分析广域电磁对矿体的响应,结果见图 6。由图 6 可知:剖面上已知矿体与电阻率突变位置具有很好的耦合性,这种突变一方面来自岩性的变化,可能是侵入岩边界,但结合地质特征,更大的可能是受到断裂及其内部矿化影响,导致电阻率降低^[30]。因此,在电阻率突变处,尤其是在不同方向延伸的突变交会处,是勘探的重点区段。

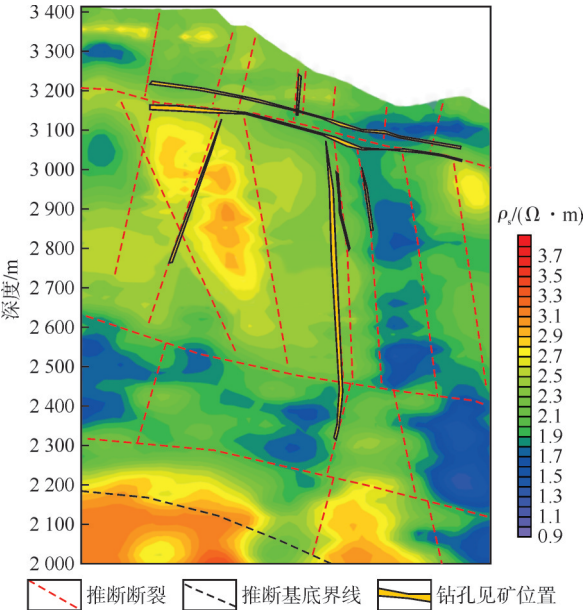


图 6 成矿元素与广域电磁解释剖面叠合图

Fig. 6 Overlay of ore-forming elements with wide field electromagnetic interpretation profile

4.2 勘探剖面 Au 分布特征

利用钻孔数据,结合前人研究成果,分析了典型勘探剖面的 Au 分布特征。为了清楚地展示不同样品的 Au 含量差异,将大于平均值 5 倍作为特高值数据,

用小于平均值5倍的最大值代替,再计算平均值、方差、标准离差等参数;同理,再次找出大于平均值5倍的特高值用小于平均值5倍的最大值代替,重复此操作,直至数据最高值小于平均值5倍为止。经过替代之后,利用算术平均值作为背景值进行异常下限的计算。

早子沟金矿床85勘探线 Au 等值线图见图7。由图7可知: Au1 和 Au9 矿体是最主要矿体,其与 Au 高值区基本重合。值得注意的是,在 2 150~2 350 m 深度, Au 高值区呈横向展布,稍向南东倾斜,可能存在着东西走向的矿体,与 F₃ 断裂中的盲矿体类似,或者为几个连续发育的、与 Au1、Au9 矿体相同走向的小矿体。此外,在 2 400~2 500 m 深度存在着一个较小规模横向 Au 高值区,与上述状态相似。

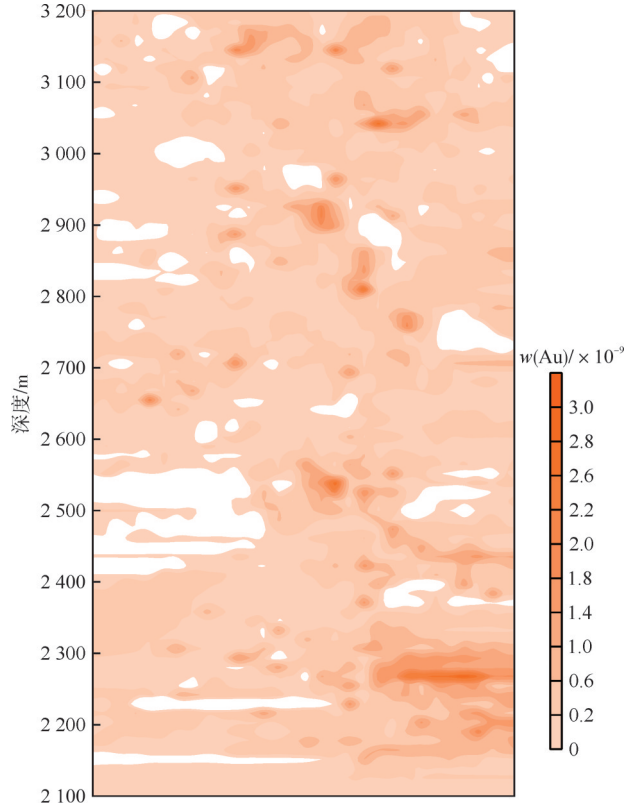


图7 早子沟金矿床85勘探线 Au 等值线图

Fig. 7 Au contour map along Exploration Line 85 of the Zaozigou Gold Deposit

4.3 找矿潜力区预测

前人对早子沟金矿床控矿规律的研究表明,岩脉和断裂是最重要的控矿因素^[4,8,20-22,35]。断裂提供了高效的容矿空间,控制了矿体的延伸与分布。地球化学特征能够直接反映矿体的展布规律。因此,在利用地球物理方法进行成矿预测时,还需要考虑断裂和地球化学特征对地球物理性质的反映。

根据前述找矿原则,结合 85 勘探线剖面上 Au 分布特征,认为电阻率突变线附近,尤其是 2 组突变线

交会处,可能存在矿体。基于这一认识,在 GY3 剖面上划分了 3 个级别共 5 个有利勘探区(见图8)。其中,Ⅰ级有利勘探区,风险最小;Ⅱ级有利勘探区,有风险;Ⅲ级有利勘探区,风险较大。GY0—GY7 联合剖面见图9。由图9可知:有利勘探区均具有一定程度的延伸和变化,可追踪探矿,为进一步勘探提供了有力支持。

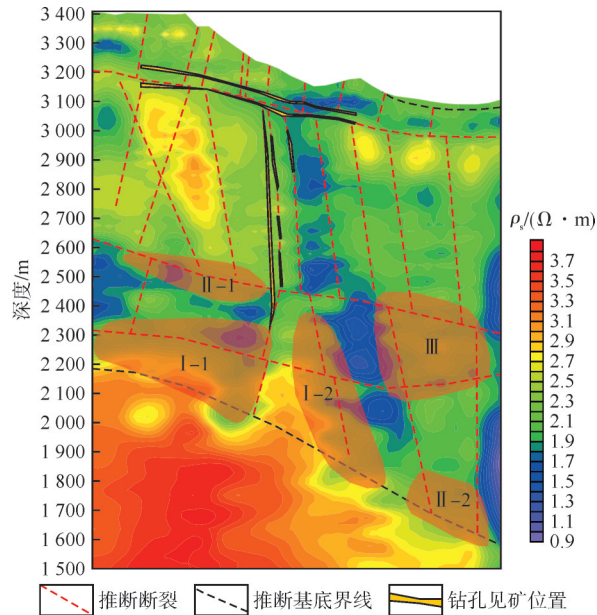


图8 GY3剖面(近85勘探线)找矿潜力区

Fig. 8 Potential prospecting zone near profile GY3 (around Exploration Line 85)

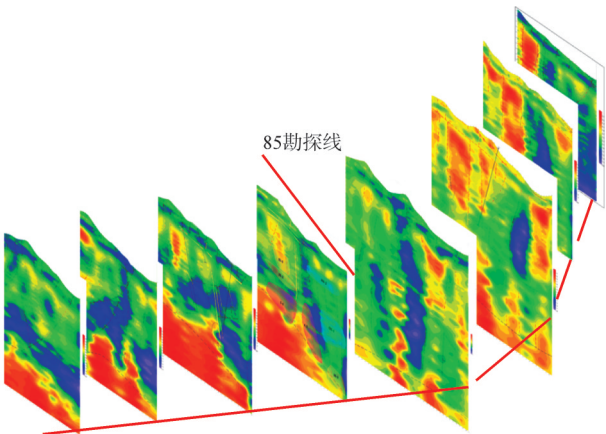


图9 GY0—GY7联合剖面

Fig. 9 Joint profile from GY0 to GY7

Ⅰ-1有利勘探区:位于 Au1 矿体的控矿构造深部。Au1 矿体控矿构造向下延伸较大,而随着构造的逐渐收敛,有望形成富矿带。在此深度(2 100~2 300 m),有利勘探区可能受控于北西向逆掩断裂系统,与控制了盲矿体 Au4 和 Au6 的 F₃ 断裂属于同一构造系统。在相同深度处也存在一个横向展布的电率率突变带,其上部的低电阻带显示其很有可能是控矿断裂。有利勘探区向 GY3 剖面的西南向延伸稳定,北

东向则因整体电阻率变高而不够清晰,这一特征与 F_3 断裂特征非常相似,因此认为该有利勘探区与 F_3 断裂属同一系列构造。鉴于 F_3 断裂对盲矿体的控矿作用,加之底部可能为基底岩层,在多边界联合控制下,推测深部的电阻率突变带具有控矿作用,可能发育类似浅层盲矿体(M4、M6)叠加北东向矿体。

I-2有利勘探区:位置与I-1有利勘探区相近,位于 F_{26} 断裂(赋存Au37矿体)深部(深度1 800~2 400 m),规模比Au1矿体小得多,因此,其含矿性不明朗。但是,鉴于其独特的构造位置,结合85勘探线深部Au1矿体东侧仍发育Au高值区,因此该有利勘探区存在矿体的可能性较大。

II-1有利勘探区:位于 F_{21} 断裂(赋存Au9矿体)下部,电阻率在垂向上突变,呈横切状,可能与I-1有利勘探区类似,受控于北西向逆掩断裂系统,与 F_3 断裂属同一构造系统,但该电阻率突变也有可能是I-1有利勘探区横切断裂导致的,即此处可能只存在1条断裂。与85勘探线钻孔Au分布特征对比发现,在此深度发育有较窄的Au高值区,因此将此区域划归为II级有利勘探区,需要进一步分析。

II-2有利勘探区:位于矿区东南侧深部,受控于基底岩体边界,同时推测有断裂在此与岩体边界交会,因此其赋矿条件很好。但是,在中浅部,其西侧低阻带的东部整体含矿较差,拉低了深部勘探的期望值。尽管如此,考虑该位置可能位于成矿流体主要运移路径上,推测其具有较好的成矿性。

III有利勘探区:位于 $F_{30} \sim F_{32}$ 断裂深部与推测的逆掩断裂交会部位。理论上讲,该有利勘探区具有较好的成矿潜力,但考虑到此处北东向断裂在浅部成矿较差,且推测的逆掩断裂是否存在尚未可知,地球化学数据也未及此处,因此勘探风险较高,需要更多的工作提供支撑。

5 结 论

1)早子沟金矿床矿石中As与Au相关性最好,Sb与Au相关性次之,表明As、Sb是与Au关系最密切的元素,可以作为找矿的标志性元素。毒砂(As的主要载体)和辉锑矿(Sb的主要载体)在一定程度上呈互补关系,即辉锑矿发育时,毒砂可能不太发育,反之亦然。辉锑矿的形成可能增强了金的富集成矿作用。

2)电阻率的突变位置与已知矿体具有很好的耦合性,为利用广域电磁法进行深部矿体预测提供了重要依据。在电阻率突变带附近,尤其是2组突变带交会处,发育矿体的概率较高。基于此,在GY3剖面深部划分了3个级别共5个有利勘探区,有利勘探区可向剖面两侧延伸。

[参 考 文 献]

- [1] QIU K F, DENG J, YU H C, et al. The Zaozigou orogenic gold-antimony deposit, West Qinling Orogen, China: Structural controls on multiple mineralization events [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2024, 136(9/10): 4 218-4 232.
- [2] TANG Q, DI P, YU M, et al. Mineralogy and geochemistry of pyrite and arsenopyrite from the Zaozigou gold deposit in West Qinling orogenic belt, central China: Implications for ore genesis [J]. *Resource Geology*, 2019, 69(3): 314-332.
- [3] 第鹏飞, 汤庆艳, 刘聪, 等. 西秦岭夏河—合作地区早子沟和加甘滩金矿床石英微量元素特征及意义[J]. *现代地质*, 2021, 35(6): 1 608-1 621.
- [4] 钱建平, 张果, 漆伟博, 等. 甘肃早子沟金矿复合成矿构造系统的构成、样式、演化和控矿规律[J]. *大地构造与成矿学*, 2020, 44(5): 913-936.
- [5] 李伟. 甘肃早子沟金矿床三维建模与预测评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- [6] 汤磊, 林成贵, 程志中, 等. 甘肃省合作市早子沟金矿原生晕三维特征及深部找矿预测[J]. *地质通报*, 2020, 39(8): 1 173-1 181.
- [7] 赵积珍, 陈国忠, 梁志录, 等. 早子沟金矿体及地球化学特征[J]. *甘肃地质*, 2013, 22(2): 38-43.
- [8] 陈国忠, 梁志录, 王建龙, 等. 早子沟金矿岩石地球化学特征及其地质意义[J]. *甘肃地质*, 2012, 21(4): 23-31.
- [9] QIU K F, YU H C, DENG J, et al. The giant Zaozigou Au-Sb deposit in West Qinling, China: Magmatic- or metamorphic-hydrothermal origin? [J]. *Mineralium Deposita*, 2020, 55(2): 345-362.
- [10] 田向盛, 孙新春, 邱昆峰, 等. 西秦岭造山带早子沟金矿床金矿化特征及找矿潜力评价[J]. *黄金*, 2024, 45(4): 65-70.
- [11] YU H C, QIU K F, DENG J, et al. Exhuming and preserving epizonal orogenic Au-Sb deposits in rapidly uplifting orogenic settings [J]. *Tectonics*, 2022, 41(8): e2021TC007165.
- [12] 马冬, 孙国胜, 李雪, 等. 青海省都兰县沟里地区金矿床地质特征及成因[J]. *黄金*, 2022, 43(11): 13-18.
- [13] 刘晓林. 甘肃早子沟金矿床地质特征及成因分析[J]. *甘肃地质*, 2011, 20(1): 52-56.
- [14] 刘春先, 李亮, 隋吉祥. 甘肃早子沟金矿的矿化特征及矿床成因[J]. *地质科技情报*, 2011, 30(6): 66-74.
- [15] 隋吉祥, 李建威. 西秦岭夏河—合作地区早子沟金矿床成矿时代与矿床成因[J]. *矿物学报*, 2013, 33(增刊2): 346-347.
- [16] 刘勇, 刘云华, 董福辰, 等. 甘肃早子沟金矿床成矿时代精确测定及其地质意义[J]. *黄金*, 2012, 33(11): 10-17.
- [17] 龚全胜, 代文军, 武雪梅. 西秦岭早子沟金矿含矿岩体地球化学特征及成因机制探讨[J]. *矿产勘查*, 2019, 10(4): 854-862.
- [18] HE D Y, QIU K F, SANTOSH M, et al. Inhomogeneous crust-mantle interaction and Triassic tectonic escape of a Proterozoic microplate: A tale of the Bikou Terrane [J]. *Lithos*, 2021, 396/397: 106227.
- [19] 陈瑞莉, 陈正乐, 伍俊杰, 等. 甘肃合作早子沟金矿床流体包裹体及硫铅同位素特征[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2018, 48(1): 87-104.
- [20] 金鼎国, 刘伯崇, 陈耀宇, 等. 甘肃早子沟金矿体空间分布特征及其控制因素[J]. *甘肃地质*, 2015, 24(3): 25-30, 41.
- [21] 张愿宁, 梁志录, 邱昆峰, 等. 西秦岭早子沟金矿床成因研究进展与展望[J]. *矿产勘查*, 2020, 11(1): 28-39.
- [22] 李康宁, 贾儒雅, 李鸿睿, 等. 西秦岭甘肃夏河—合作地区与中

- 酸性侵入岩有关的金铜多金属成矿系统及找矿预测[J].地质通报,2020,39(8):1 191-1 203.
- [23] 陈耀宇,代文军.枣子沟金矿地质特征及成矿模式探讨[J].新疆地质,2012,30(1):90-94.
- [24] 莫文毅,刘云华,刘占晋,等.冀东矿集区金厂峪金矿床“三位一体”成矿预测模型及找矿预测[J].黄金,2024,45(11):1-8.
- [25] 林成贵,程志中,吕志成,等.甘肃省早子沟金矿原生晕分带特征及深部找矿预测[J].吉林大学学报(地球科学版),2020,50(1):70-84.
- [26] 何继善.广域电磁测深法研究[J].中南大学学报(自然科学版),2010,41(3):1 065-1 072.
- [27] 陈后扬.基于广域电磁法的月形-弹岭地区深部地质结构探测[J/OL].东华理工大学学报(自然科学版),1-9[2025-03-01].
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/36.1300.N.20240929.0907.004.html>.
- [28] 郭国强,李亚东,王阳,等.鲁西北潘店重磁异常带矽卡岩型铁矿精细找矿方向——来自广域电磁法深部找矿的启示[J].物探与化探,2024,48(2):327-333.
- [29] 高忠晖,袁昆.大功率激电法在辽宁新宾南杂木金矿床勘查中的应用效果[J].黄金,2025,46(2):83-88.
- [30] 黄鑫,王勇军,宋倩,等.胶东北部大柳行金矿田成矿构造的广域电磁法勘查及对深部找矿的指示[J].地质通报,2022,41(6):1 107-1 120.
- [31] 晏兵,谢卓君,谭亲平,等.贵州烂泥沟金矿广域电磁法低阻异常带F0成因:地质、地球化学特征制约[J].矿物岩石地球化学通报,2023,42(3):557-573.
- [32] WANG J, YU H, HE D, et al. Geochronology and geochemistry of the Yidi'nan quartz diorite in the West Qinling, China: Implications for evolution of the Palaeo-Tethys Ocean [J]. Geological Journal, 2020, 56(4): 2 277-2 295.
- [33] WANG J, YU H C, PETRELLA L, et al. Fluid evolution and genesis of the Yidinan granitoid-hosted orogenic gold deposit (China) [J]. Geological Society of America Bulletin, 2024, 137 (5/6): 1 945-1 963.
- [34] 代文军,陈耀宇,刘春先,等.甘肃枣子沟金矿围岩蚀变特征及其与金矿化的关系[J].甘肃地质,2011,20(3):31-36.
- [35] 李建威,隋吉祥,靳晓野,等.西秦岭夏河—合作地区与还原性侵入岩有关的金成矿系统及其动力学背景和勘查意义[J].地学前缘,2019,26(5):17-32.

Deep prospecting prediction using integrated geochemistry and wide field electromagnetic method in the Zaozigou Gold Deposit, Gansu

Zhu Rui^{1,2}, Luan Xiaogang², Nie Xin³, Wu Tonglin², He Yongcheng², Yu Haocheng¹

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

2. Gansu Hezuo Zaozigou Gold Mine Co., Ltd.; 3. Zhaojin Mining Industry Co., Ltd.)

Abstract: The Zaozigou Gold Deposit is one of the largest gold deposits in the Western Qinling orogenic belt. However, as mining depth increases, exploration becomes increasingly challenging. Despite the significant deep resource potential, the spatial distribution of deep orebodies remains poorly understood. This study conducts deep metallogenic prediction and delineates prospective targets in the Zaozigou Gold Deposit through the integration of geochemistry and wide field electromagnetic method. Trace element characteristics of rock samples from a representative exploration profile indicate that As exhibits the strongest correlation with Au, followed by Sb, suggesting that arsenopyrite and stibnite are the minerals most closely associated with gold mineralization. These 2 minerals show a somewhat complementary relationship—arsenopyrite is less developed where stibnite is abundant, and vice versa. Arsenopyrite is likely the main carrier of Au, while the presence of stibnite enhances Au enrichment. Comprehensive analysis of ore-forming element distribution maps and wide field electromagnetic interpretation sections reveals a strong coupling between abrupt resistivity changes and orebody distribution. The highest potential for ore occurrence lies near resistivity discontinuities, especially at the intersections of 2 sets of resistivity break lines. Based on these results, 5 favorable exploration zones of 3 levels were delineated along the GY3 profile. First-level targets are located at intersections of major mineralized structures with pronounced lateral resistivity gradients near surface; second-level targets lie at intersections of significant lateral and vertical resistivity anomalies; and third-level targets are situated at deeper structural positions, similar to those hosting previously discovered blind orebodies (M4, M6), and are associated with moderate lateral resistivity gradients. These favorable zones are likely to extend laterally to adjacent profiles, providing guidance for delineating prospective targets in nearby sections.

Keywords: Zaozigou Gold Deposit; wide field electromagnetic method; geochemistry; resistivity; deep prospecting; target delineation; Western Qinling