

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

汤磊¹, 林成贵^{2,3}, 程志中^{2,3}, 贾儒雅^{2,3}, 李鸿睿⁴, 李康宁⁴

TANG Lei¹, LIN Chenggui^{2,3}, CHENG Zhizhong^{2,3}, JIA Ruya^{2,3}, LI Hongrui⁴, LI Kangning⁴

1. 招金矿业股份有限公司, 山东 招远 265400;

2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;

3. 自然资源部矿产勘查技术指导中心, 北京 100083;

4. 甘肃省地质矿产开发局第三地质矿产勘查院, 甘肃 兰州 730050

1. Zhaojin Mining Industry Co., Ltd., Zhaoyuan 265400, Shandong, China;

2. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China;

3. Technical Guidance Center for Mineral Resources Exploration, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China;

4. Third Institute of Geological and Mineral Exploration, Gansu Bureau of Geology and Mineral Resources, Lanzhou 730050, Gansu, China

摘要:为了评价早子沟金矿深部找矿潜力和找矿方向,以早子沟金矿61个钻孔为研究对象,对矿体出露较厚大的70勘查线原生晕数据进行多元统计分析和三维空间分布特征研究。研究表明:①相关分析和聚类分析结果反映,与主成矿元素Au相关性最密切的元素为As、Ag;②原生晕的形态特征和空间分布特征显示,矿体原生晕发育,且分带明显,矿床的前缘晕元素为As、Sb、Hg,近矿晕元素为Au、Ag、Cu、Pb、Zn,尾晕元素为W、Mo、Bi;③对原生晕数据进行三维插值分析,构建了早子沟金矿各元素原生晕三维模型。Au、As、Sb、Ag等指示元素和As+Sb/Au+Ag元素异常累加比值的异常模型显示,在2500m以浅,异常规模较小;在2500m以深,异常规模呈现出向深部越来越大,且延伸稳定。结合异常元素的空间分布特征,提出早子沟金矿78~85勘查线2000m以深仍有较大的找矿潜力。

关键词:深部找矿预测;三维可视化;原生晕;早子沟金矿;甘肃

中图分类号:P618.51 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2020)08-1173-09

Tang L, Lin C G, Cheng Z Z, Jia R Y, Li H R, Li K N. 3D characteristics of primary halo and deep prospecting prediction in the Zaozigou gold deposit, Hezuo City, Gansu Province. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(8): 1173-1181

Abstract: In order to evaluate the prospecting potential and direction in the depth of the Zaozigou gold deposit, the authors selected 61 drill holes in the Zaozigou gold deposit as the research objects, conducted multivariate statistical analysis and 3D spatial distribution characteristics study of the primary halo data along No.70 exploration line with thick orebodies exposed. The results are as follows: ① Correlation analysis and cluster analysis indicate that the elements most closely related to Au are As and Ag. ② The morphological characteristics and spatial distribution characteristics of the primary halo show that the ore- and halos-forming elements exhibit a clear zonation. The primary halo is characterized by the front halo elements of As, Sb, Hg, the near-ore halo elements of Au, Ag, Cu, Pb, Zn and the rear halo elements of W, Mo, Bi. ③ Based on the 3D interpolation analysis of the primary halo data, a 3D model of each element primary halo in the Zaozigou gold deposit was constructed. The anomaly model of indicator elements such as Au, As, Ag and

收稿日期:2019-04-20; **修订日期:**2020-03-05

资助项目:国家重点研发计划项目课题《深部矿产资源三维找矿预测评价示范》(编号:2017YFC0601506)和中国地质调查局项目《全国重要矿集区找矿预测》(编号:12120113032800)

作者简介:汤磊(1973-),男,硕士,高级工程师,从事金矿勘查工作。E-mail: tang126119@163.com

通讯作者:林成贵(1990-),男,硕士,工程师,从事勘查地球化学和找矿预测研究。E-mail: linchenggui1991@163.com

the anomaly accumulation ratio of $As+Sb/Au+Ag$ show that the anomaly scale is small when the anomaly is shallower than 2500 meters. In the depths greater than 2500 meters, the anomaly scale seems to be larger and larger toward the depth, and the extension is stable. Combined with the spatial distribution characteristics of anomaly elements, it is proposed that the place along No.78 line-No.85 exploration line of the Zaozigou gold deposit still has great prospecting potential in the depths greater than 2000 m.

Key words: deep prospecting prediction; 3D visualization; primary halo; Zaozigou gold deposit; Gansu Province

早在 20 世纪 50 年代,国内外学者就开始了金属矿床原生晕的研究,经过多年对众多典型矿床的研究,在工作方法、技术和原生晕分带理论方面取得了较大发展。前苏联的 C.B 格里戈良、奥勃钦尼科夫等根据前苏联 200 多个不同类型热液金属矿床原生晕的研究,通过元素原生地球化学晕的成分与矿体的空间分布关系,总结确定了热液矿床元素统一分带序列(从下至上): $W-Be-As-Sn_1-U-Mo-Co-Ni-Bi-Cu_1-Au-Sn_2-Zn-Pb-Ag-Cd-Cu_2-Sb-Hg-Ba-Sr$ ^[1]。前苏联在研究金属矿的原生晕找矿方法中取得明显的找矿效果,据统计,仅 1965—1972 年间,用原生晕方法预测深部盲矿体成功率就达 84% 以上^[2]。中国的勘查地球化学家几乎与前苏联的学者同时开展原生晕的研究工作,并提出了中国热液矿床原生晕的分带序列^[3]。此后,众多学者对铅锌矿床、斑岩型铜钼矿床、矽卡岩型铜矿床、钨钼矿床、金矿床、锡矿床等典型热液矿床的原生晕分带特征进行了深入研究,提出了各类矿床的地球化学模型^[4-10],并在多个矿床的深部矿体预测中发挥了重要作用。

然而,以往的矿床原生晕研究多在二维尺度开展,以剖面的形式表达元素的分带特征及深部矿化的预测结果。前人^[11-12]对甘肃省早子沟金矿开展了原生晕分带特征和深部找矿预测研究,建立了地质-地球化学深部找矿模型,并圈定了深部找矿预测靶区。但成矿作用往往是在三维空间进行的,因此,地球化学预测工作也应该在三维尺度上开展^[13]。

随着三维建模理论和技术方法的飞速发展,国内外学者进行了颇有成效的研究^[14-17],提出了很多三维地质模型建立和可视化的基本方法^[18-19]。与传统的二维平面地质资料表示方法相比,三维地质模型能够更完整和准确地表达各种地质现象,可快速直观地再现地质体的空间分布规律及其相互关系,挖掘潜在的地质信息,方便找矿预测、地质分析和自动制图^[20]。而钻孔又是获取深部三维地质信

息的最直观、最准确和最详细的手段,如何根据钻孔数据构建三维地质模型,进而通过构建三维地质模型指导找矿?这是今后在深部找矿预测中需要解决的棘手问题。本文以早子沟金矿 61 个钻孔原生晕资料为研究对象,将传统的二维找矿方法与三维可视化技术相结合,实现了基于钻孔数据的三维地球化学建模及可视化,并开展了深部找矿预测和综合评价,提出了下一步的找矿方向,以期原生晕找矿方法在矿床尺度的三维找矿预测提供新思路。

1 矿区地质特征

早子沟金矿的大地构造位置处于西秦岭褶皱带北部断褶带与中部裂陷槽之间的过渡部位(图 1-a),属同仁-夏河-岷县金成矿带的一部分^[23-25],成矿条件非常优越。早子沟金矿地处合作市西南方向 20 km,在一号沟—四号沟之间,是夏河-合作矿集区内的超大型金矿之一。矿床位于夏河-合作断裂带南侧,区域构造线呈北西西向展布,矿体赋存于一套以细碎屑岩为主的巨厚三叠系沉积地层中。矿区岩浆活动频繁,构造广泛发育^[26]。金矿床与断裂构造、岩浆侵入作用关系密切。

矿区出露地层主要为中三叠统古浪堤组下段,岩性为一套浅变质的钙质、粉砂质、泥质细碎屑岩^[27],地层总体走向呈近南北向,受断裂构造和岩浆侵入作用的影响,地层产状较乱,总体倾向西。矿区内中酸性岩脉密集发育(图 2),但岩脉单体产出不大,岩脉的展布受断裂构造作用明显,走向主要为北北东向,西部偏转到近南北向,少数为北西向。主要岩性有石英闪长玢岩、黑云闪长玢岩及少量花岗(闪长)斑岩等浅成侵入体,多具斑状结构,岩浆演化的时序为:石英闪长玢岩→石英黑云闪长玢岩→花岗斑岩^[28]。矿区内断裂构造发育,从走向看,大致由北东向、北西向、近南北向、近东西向和北北东向 5 组断裂组成,前 3 组断裂分别控制并构成 3 组主要金矿带。

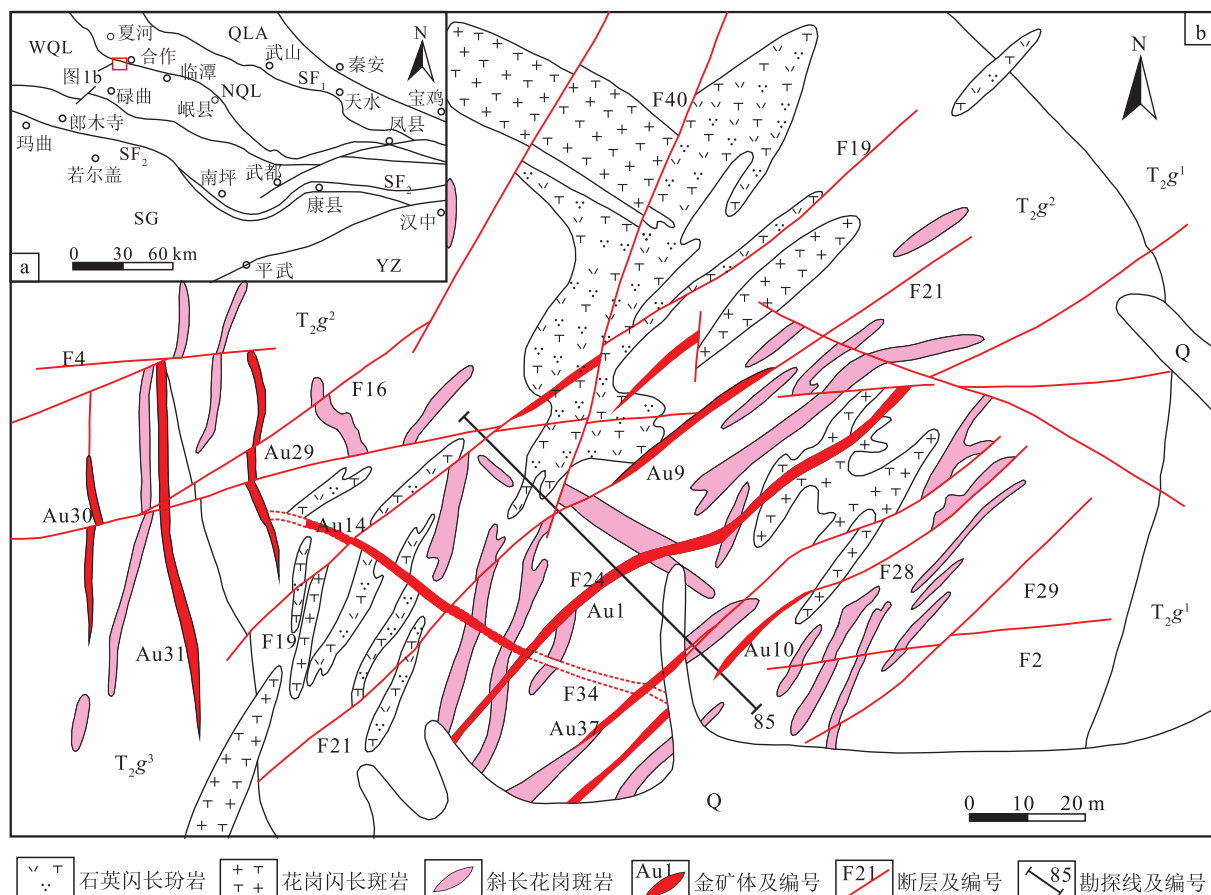


图 1 早子沟金矿地质简图(据参考文献[21-22]修改)

Fig. 1 Geological map of the Zaozigou gold deposit

Q—第四系; T_2g^3 —古浪堤组上段粉砂质板岩; T_2g^2 —古浪堤组中段含岩质粉砂质板岩; T_2g^1 —古浪堤组下段粉砂质板岩; QLA—祁连构造带; NQL—北秦岭构造带; WQL—西秦岭构造带; SG—松潘—甘孜构造带; YZ—扬子板块; SF1—武山—天水—商丹缝合带; SF2—玛曲—南坪—略阳缝合带

早子沟金矿的矿体主要呈脉状产出,受断裂构造控制非常明显。矿体主要赋存于断裂破碎带或岩体内、外接触带的断裂破碎带中及其两侧的次级裂隙构造中(图 2)。区内的北东向、北西向和南北向 3 条断裂带是主要的容矿构造,分别控制了矿区北东、北西和近南北向 3 条金矿带^[29-30]。目前,矿区共圈定金矿体 147 条,金资源量超过百余吨^[31],其中,金资源量大于 1 t 的主矿体有 17 条。代表性矿体有 Au1、Au9、Au15、Au46 等,主矿体厚度变化在 0.82~18.13 m 之间,矿体平均厚度约 3.48 m,矿体品位变化在 1.00×10^{-6} ~ 11.20×10^{-6} 之间,矿体平均品位约 4.42×10^{-6} 。同时在矿区深部发现大量缓倾斜的盲矿体,如 M4、M6 等(图 2),走向 $290^\circ \sim 320^\circ$,主要倾向南西,倾角 $8^\circ \sim 26^\circ$ 。矿体厚度变化在 0.94~15.77 m 之间,平均厚度约 4.27 m,矿体品位变化在 1.06×10^{-6} ~ $20.52 \times$

10^{-6} 之间,矿体平均品位约 4.05×10^{-6} 。这组缓倾斜盲矿体与北东向矿体相交叠加成矿,形成富含金、锑的高品位矿体,2 组矿体交而不通。

2 样品采集与分析

本次采集的样品主要来自“甘肃省合作市早子沟金矿接替资源勘查”项目开展的钻孔原生晕样品,以及早子沟金矿勘查的历年岩心进行系统采样的样品。样品主要分布于北东向 54~120 号勘查线和北西向 200~208 号勘查线,从 61 个钻孔中共计采集了 4012 件样品。采样方法为全孔连续捡块法,多点采样组合成一个样品,样品重量一般不低于 500 g。采样间隔一般在 10~20 m,在金矿体或蚀变较强的地段采样间距加密至 2~5 m。

根据以往区域上和矿区范围内开展的化探工

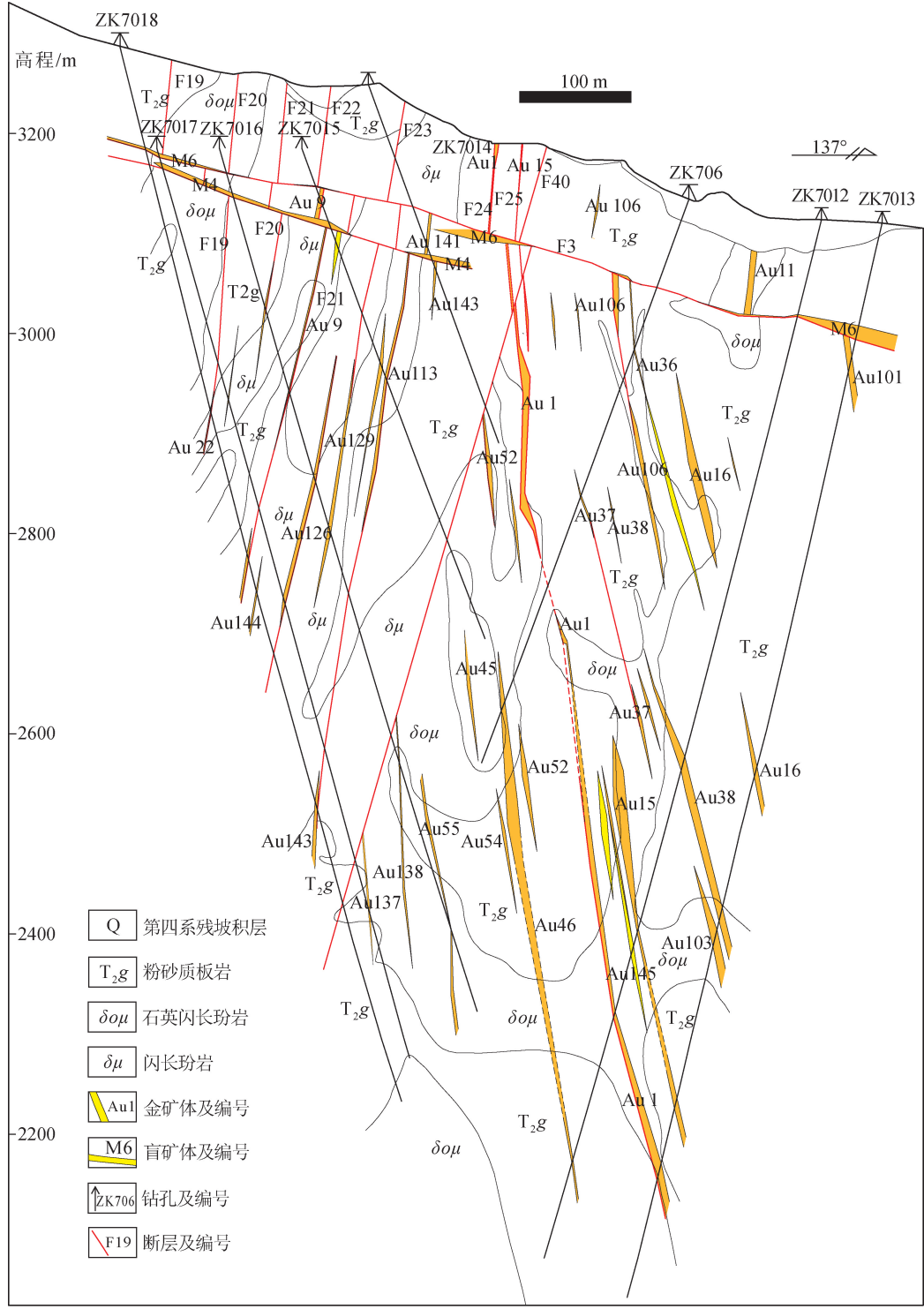


图2 早子沟金矿70勘查线剖面

Fig. 2 Sectionmap of No.70 exploration line from the Zaozigou gold deposit

作中选定的与成矿有关的元素,本次研究工作选取了12种元素进行分析测试,包括 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、Hg、W、Mo、Bi、Co。分析测试工作在自

然资源部兰州矿产资源监督检测中心实验室完成,分别采用等离子体质谱法、原子吸收法、发射光谱法、原子荧光法、X 射线荧光光谱法等多种分析方

法。采用国家一级标准物质作为质量监控,样品分析结果质量优良。

3 元素地球化学特征

矿石中的主要载金矿物为黄铁矿、毒砂、褐铁矿及辉锑矿,其他金属矿物有磁铁矿、磁黄铁矿、赤铁矿、黄铜矿等。近几年,对矿区主矿体的矿石组合样分析结果表明,矿石伴生 Sb 含量一般为 0.01%~2.50%,Ag 含量一般为 $0.04\times10^{-6}\sim1.50\times10^{-6}$,达到了伴生有用组分要求^[32]。伴生 Sb 和 Ag 的矿物分布不均匀或极不均匀,Sb、Ag 含量具有同步变化的趋势,二者的相关系数达 0.83,高含量样品主要出现在 Au1、Au46 和 M6 矿体中,说明金矿体规模大、品位较高时伴生有用组分 Sb、Ag 含量较高,分布较均匀。矿石中的 As 含量为 0.07%~3.18%,一般为 0.33%~1.73%,平均含量 1.13%,绝大部分 As 以毒砂形式存在,少量以臭葱石形式或分散于锑铁矿、褐铁矿等氧化矿物中。其他元素(Cu、Pb、Zn)含量均低于 0.05%。

为了查明成矿成晕元素的地球化学特征,本次选取了深孔多、矿体较厚大的 70 勘查线剖面上的 8 个钻孔,对 629 件原生晕样品进行参数统计、R 型聚类分析和因子分析。参数统计结果见表 1。从元素富集程度看,Au、As、Sb 等元素在早子沟矿区的含量非常高,算术平均值分别为 249.4×10^{-9} 、 695.5×10^{-6} 和 775.81×10^{-6} ,远高于地壳中这些元素的丰度值,其中 Sb 元素的平均含量是地壳丰度值的 2281.8 倍,可能与北北西向缓倾斜的金锑矿体有关。从元素的变异系数看,大部分元素属于强变异(变异系数大于 1),其中 Hg 元素的变异系数为 18.15,可能与矿区大量发育的构造有关;Cu、Pb、Zn、Co 等元素属于中等变异(变异系数介于 0.1~1 之间),说明这些元素的离散程度较小,在矿区分布较均匀。

从 R 型聚类分析谱系图(图 3)可以看出,以 0.18 为界,早子沟金矿成矿成晕元素组合可以分成三类:第一类主要为与 Au 成矿有关的 Sb、Ag、As、Au 元素组合,在矿区内,金矿体中普遍见有辉锑矿、毒砂、雄黄等矿物^[34],可能与这一类组合元素有关。第二类为 Pb、Bi、W、Mo,这套中高温元素组合,可能反映了中酸性脉岩的侵入与成矿有一定的关系。第三类主要为 Cu、Zn、Co 等中温元素组合,这组元素虽然与成矿元素 Au 和 Sb 相关性较差,但这些元素

表 1 早子沟金矿钻孔原生晕数据参数统计
Table 1 Data parameter statistics table of drilling primary halo in the Zaozigou gold deposit

元素	最小值	最大值	几何平均值	算术平均值	中位数	标准离差	浓集系数	变异系数
Au	1.80	24900	49.4	249.40	45.20	1097.40	293.47	4.40
As	1.10	12322.9	206.7	695.50	180.10	1417.30	158.07	2.04
Sb	1.98	93471.8	49.83	775.81	41.49	6112.53	2281.80	7.88
Hg	4.00	94931.0	37.00	209.00	31.00	3785.00	17.38	18.15
Cu	1.70	121.2	18.90	23.50	17.40	17.50	1.38	0.74
Pb	1.90	381.8	23.60	28.50	22.30	25.40	1.5	0.89
Zn	22.50	307.1	77.30	82.00	86.20	27.30	1.21	0.33
Co	1.90	54.9	14.30	15.90	16.70	6.20	1.59	0.39
Ag	0.045	2.86	0.107	0.151	0.09	0.255	2.52	1.69
Bi	0.08	203.92	0.61	1.64	0.51	8.94	9.1	5.45
W	0.18	1639.75	6.79	17.01	6.73	87.04	17.54	5.12
Mo	0.16	304.05	1.27	4.02	0.89	14.19	6.48	3.53

注:浓集系数为算术平均值与丰度值^[33]的比值,变异系数为标准离差与算术平均值的比值。Au、Hg 元素单位为 10^{-9} ,其余元素为 10^{-6}

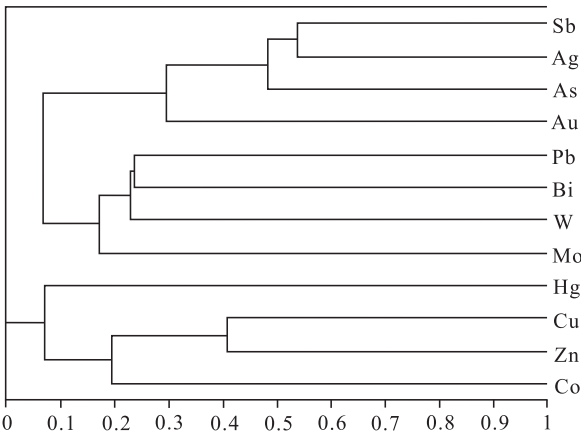


图 3 早子沟金矿 70 勘查线原生晕成晕元素 R 型聚类分析谱系图

Fig. 3 Spectrum diagram of R-type cluster analysis of primary halo elements in No.70 exploration line from the Zaozigou gold deposit

组成的硫化物与自然金、辉锑矿在空间上呈共生关系^[11]。

因子分析是把具有多个变量的原始数据按成因联系进行归纳、整理、提炼,最后获得少数的“因子”,使得数据从多到少、从繁到简,达到降维的目的。对 12 个成矿成晕元素采用正交旋转方法进行

了 R 型因子分析,提取了前 5 个主因子,主因子累积方差贡献超过 60%,可认为其包含了原始变量大部分的地球化学信息,因子分析结果见表 2。 $F1$ 主因子组成元素有 Au、As、Sb、Ag,为金的矿化因子,组成元素为低温元素组合,指示金的主成矿阶段为低温热液环境^[12]。 $F2$ 主因子组成元素有 Cu 和 Zn,为一套中温元素组合,形成了与金共生的硫化物。 $F3$ 主因子组成元素有 Pb、Bi、W,为一套中高温元素组合,有学者^[11]推测该主因子与矿区黑云母石英闪长岩的侵入有关。 $F4$ 和 $F5$ 主因子为单元素因子组合,组成元素分别为 Co 和 Hg, Hg 元素的异常可用来指示构造活动的痕迹,因此 $F5$ 主因子与金成矿相关的断裂构造关系密切。

4 原生晕三维特征

4.1 原生晕三维异常数据准备

为了研究各成矿成晕元素在三维空间的浓度分布和异常变化情况,应用美国 Golden Software 公司开发的 Voxler 软件研究早子沟金矿各成矿成晕元素的深部三维建模工作,其大致流程如下。

(1)绘制三维定向钻孔轨迹图。Voxler 软件的数据格式可以为 xlxs 文件,也可以为 dat 格式文件,按照 XYZC 数据格式编写,输入的数据由 3 个文件组成:井口文件,即 61 个钻孔开口坐标;测斜文件,

即为钻孔测斜的参数,目的是准确地将钻孔在三维空间刻画出来;样品分析文件,即为 4012 个样品的原生晕分析结果数据文件。输入钻孔数据后,需将其属性设置成钻孔输入模式,利用图形输出模块中的 WellRenger 模块输出钻孔的大致轨迹图。

(2)轨迹图修饰。在 WellRenger 模块中修改其属性,其中包括钻孔方位数据,钻孔显示的数据值的设置,钻孔数据值选用 Au 元素,其异常值会在钻孔轨迹中显示出来,Au 元素值的大小将决定钻孔轨迹中小圆柱体的大小。然后再显示坐标轴和图框,根据自己的需要可以设置其属性。

(3)绘制体积渲染图。体积渲染图可以用于显示一定区域范围内某元素的浓度在三维空间的分布特征,通过软件的数据插值处理(本次研究采用克里格插值法),在 WellRenger 模块的属性管理窗口中选中 Interval Data(区间数据),分别进行设置;分别对所有元素添加 Gridder 模型将数据进行网格化,最后输出 VolRender(体积渲染)和 Isosurface(等值面)2 个模块,元素的等值面异常下限和渲染图的显示比例根据实际设置。

4.2 三维异常模型构建

用原生晕数据进行三维地质建模的关键一步是如何确定各元素异常的临界值,即异常下限。对于 Au、Ag、Sb 三个成矿元素异常下限的确定根据原始数据的特点,结合邵跃^[3]对异常下限的划分方法,将异常的内带值定为边界品位的 1/10,然后依次以含量的 1/2 定为内亚带、中带和外带。对于其他成晕元素,其异常下限值运用均值 ± 3 倍标准离差对数据进行迭代处理后,选取背景均值加 2 倍标准差作为异常下限。异常下限即为该元素成图的临界值。在实际成图过程中不断进行调试,使各元素能在体积渲染和等值面上突显最佳效果。各元素的临界值计算结果列于表 3 中。然后采用较常用的反距离法进行插值,选择适当的渲染方式,输出体积渲染模块,调节色标模块,使渲染模式成图效果最佳。在网格化模块下输出等值面模块,其中使用的临界值即为表 3 中计算的结果,基于以上步骤,最终建立的三维地质模型见图 4。

4.3 原生晕三维找矿特征

建立早子沟金矿各元素原生晕异常模型图(图 4),可以很直观地反映各异常元素在三维空间的分布情况,其三维特征总结如下。

表 2 早子沟金矿 70 勘查线原生晕样品正交旋转载荷矩阵

Table 2 Orthogonal rotational load matrix of primary halo samples in No.70 exploration line from the Zaozigou gold deposit

因子	$F1$	$F2$	$F3$	$F4$	$F5$
Au	0.460	0.086	-0.036	-0.170	0.068
As	0.799	-0.096	-0.056	-0.062	0.016
Sb	0.567	-0.088	0.078	0.540	-0.280
Hg	-0.006	-0.087	0.001	0.442	0.878
Cu	0.274	0.761	-0.044	-0.035	0.170
Pb	-0.026	-0.02	0.778	-0.032	-0.051
Zn	-0.145	0.784	0.161	-0.053	-0.027
Co	-0.401	0.298	0.213	0.548	-0.128
Ag	0.823	0.137	0.156	0.238	-0.025
Bi	0.049	0.026	0.571	0.126	-0.052
W	0.128	-0.112	0.497	-0.476	0.293
Mo	-0.064	-0.469	0.302	-0.022	-0.030
主因子方差	2.128	1.566	1.376	1.124	0.993
累积方差贡献/%	17.840	31.078	42.493	51.612	60.886

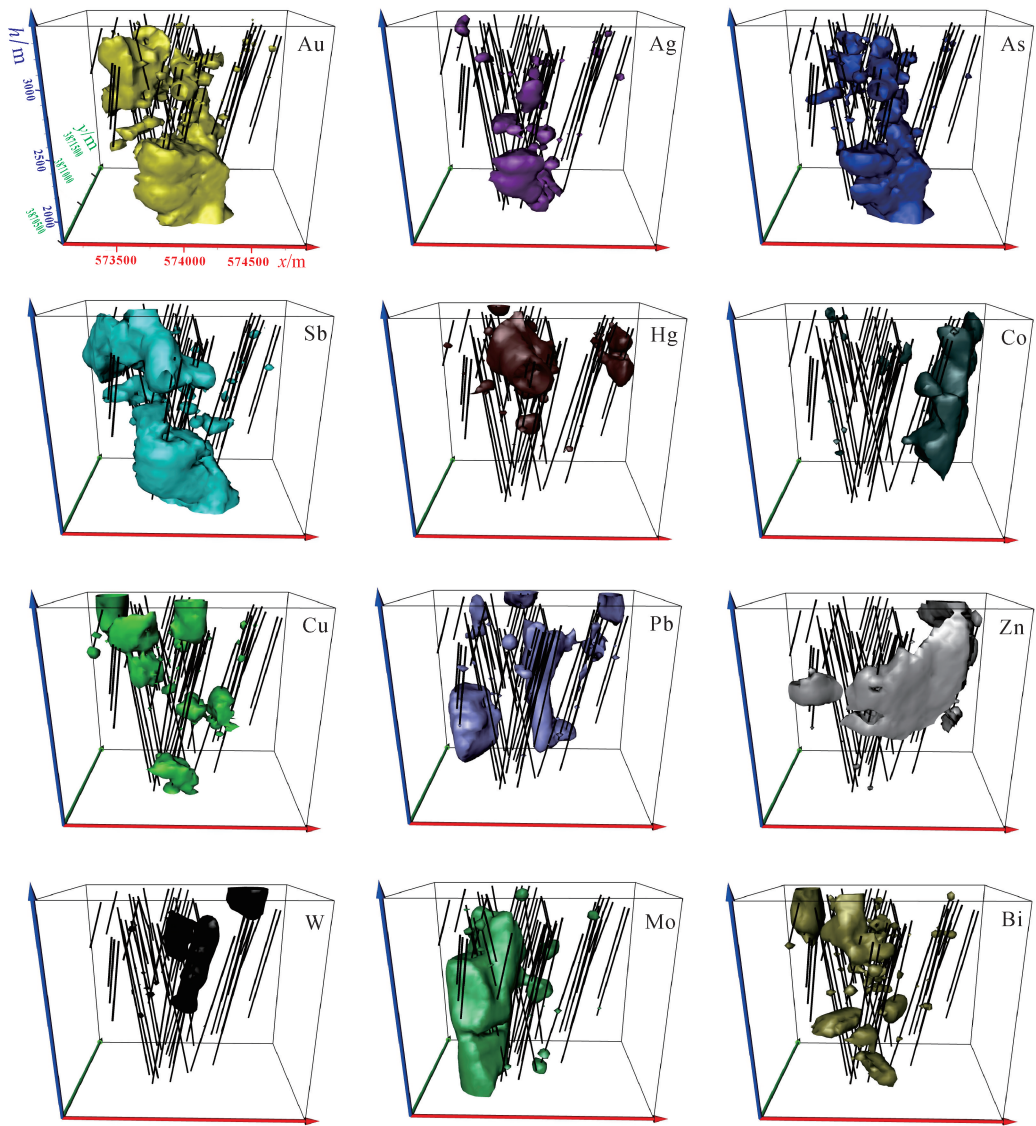


图 4 早子沟金矿各元素原生晕异常模型图

Fig. 4 Primary halo anomaly model of the Zaozigou gold deposit

表 3 早子沟金矿各元素临界值

Table 3 The critical value of elements in the Zaozigou gold deposit

元素	Au	As	Sb	Hg	Ag	Co	Cu	Pb	Zn	W	Mo	Bi
插值	0.12	800	130	0.08	0.18	20	48	30	100	25	2.8	1.2

(1) As、Sb、Hg 等元素的强异常在地表和 2500 m 以深部位均有出现,异常基本位于矿体群的头部,因此,As、Sb、Hg 等元素可以代表矿体的前缘晕元素。Au、Ag、Cu、Pb、Zn 等元素异常区位于 2500 m 以浅范围,与 2500 m 以浅的矿体套合较好,可以作

为矿体的近矿晕元素,但 Cu、Pb、Zn 等元素在 2500 m 以深,异常零星出现;W、Mo、Bi 等元素,其异常主要出现在 2500 m 以浅的矿体尾部,因此可以作为矿体的尾晕元素,但 Mo、Bi 在 2500 m 以深出现少量异常。

(2) Au 元素的异常模型与 As、Sb 等元素的异常模型基本一致,与 Ag 元素的异常模型图也较相似,说明这几个元素的相关性较好。从图 4 可以看出,这几个元素的异常在深部有逐渐增强的趋势,因此元素异常区向深部的延伸趋势可作为矿区深部找矿预测的重要依据。Au、As、Sb 元

素的异常显示,部分主矿体在深部仍有很大的延深,Au 元素的异常主要分布于构造带及其与围岩接触带内,并严格受构造控制。总体看,与 Au 相关性较好的 As、Sb、Ag、Hg 等元素的异常区代表了矿区最重要的矿化范围,也是今后勘查的重点地段。

5 深部找矿预测

从早子沟金矿各元素原生晕异常模型图(图 4)看,Au、As、Sb、Ag 的异常模型基本类似,在 2500 m 以浅,异常规模较小;在 2500 m 以深,异常规模呈现出向深部越来越大,且延伸稳定;同时也佐证了 As、Sb、Ag 等元素是矿区找 Au 的最重要指示元素^[12]。Hg 异常出现在 2500 m 以浅,构成了金矿体的前缘指示元素;Cu、W、Mo、Bi 等中高温元素异常与 Au 等元素相反,强异常出现在 2500 m 以浅。因此,前缘晕元素(As、Sb 等)和近矿晕元素(Au、Ag)在深部出现强异常,且未闭合;尾晕元素(W、Bi 等)在深部显示弱异常,由此可以推测向深部存在隐伏矿体,且规模应该很大。

早子沟金矿的主矿体大部分位于 78~85 勘查线之间,在深部 2500~2000 m,Au 元素强异常出现,延伸较稳定,向深部并未圈闭(图 5),显示出进一步增强的趋势。目前探矿工程暂未完全控制金矿体向深部的延伸,因此,矿区深部的最有利找矿空间应该是 78~85 勘查线之间,推测在 2000 m 以深,Au

的异常将稳定出现,找矿前景看好。

元素异常累加比值的变化规律可以反映该元素组合在三维空间的变化趋势。本次研究选择 As+Sb 与 Au+Ag 的异常比值,建立了早子沟金矿原生晕元素异常累加比值模型图(图 6)。由图 6 可以看出,前缘元素与近矿元素异常累加比值表现为浅部地表异常较强,向深部表现为异常逐渐变小或无异常出现的现象,反映前缘元素的累加值在浅部的异常较强。由图 4 中 Au 和 Ag 元素异常模型在深部出现强异常可知,近矿晕元素的累加值在深部也将出现强异常,也就是说下一个找矿空间即将出现,因此,可以推断深部(2000 m 以深)存在隐伏矿体。

6 结 论

(1)早子沟金矿中主成矿元素 Au 和 Sb 与成晕元素 As 和 Ag 较密切,Au、Sb、As、Ag 等元素的原生晕异常模型可以用于指导深部找矿预测。

(2)通过构建早子沟金矿各元素原生晕三维异常模型,总结了前缘晕元素为 As、Sb、Hg,近矿晕元素为 Au、Ag、Cu、Pb、Zn,尾晕元素为 W、Mo、Bi。

(3)据成矿成晕元素的原生晕在三维空间的分布特征推测,早子沟金矿深部找矿潜力巨大,在 78~85 勘查线之间的 2000 m 以深范围是今后深部找矿的重点地段,为该区下一步深部找矿工作提供了有利的依据。

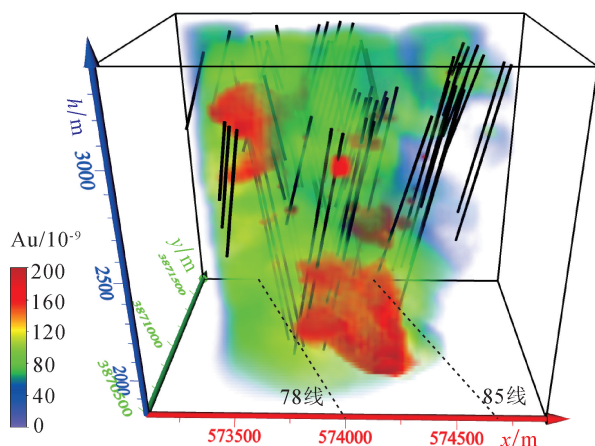


图 5 早子沟金矿 Au 元素原生晕异常模型图
Fig. 5 Primary halo anomaly model of Au in the Zaozigou gold deposit

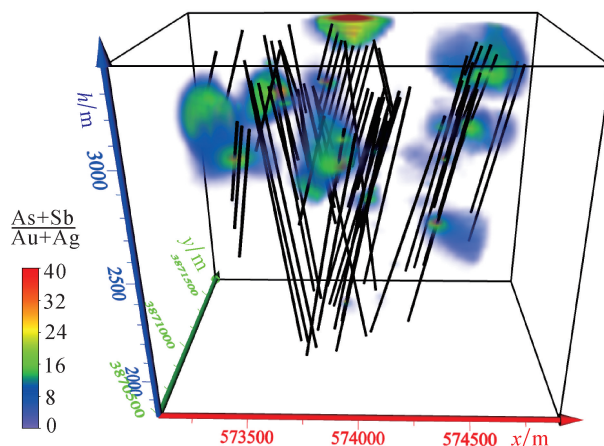


图 6 早子沟金矿 As+Sb/Au+Ag 元素异常累加比值模型图
Fig. 6 The anomaly ratio model of element accumulates in the Zaozigou gold deposit

参考文献

- [1] Beus A A, Grigorian S V. Geochemical Exploration Methods for Mineral Deposits [M]. Illinois: Applied Publishing Ltd, 1977: 1-287.
- [2] 刘崇民. 金属矿床原生晕研究进展[J]. 地质学报, 2006, 80(10): 1528-1538.
- [3] 邵跃. 热液矿床岩石测量(原生晕法)找矿[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 1-142.
- [4] 欧阳宗圻, 李惠, 刘汉忠. 典型有色金属矿床地球化学异常模式[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 1-75.
- [5] 李惠, 张文华, 刘宝林, 等. 中国主要类型金矿床的原生晕轴向分带序列研究及其应用准则[J]. 地质与勘探, 1999, 35(1): 32-35.
- [6] 孙保平, 王宗伟, 王云. 河南桐柏破山银矿床原生地球化学异常模式[J]. 西北地质, 2007, 40(1): 61-71.
- [7] 陈永清, 韩学林, 赵红娟, 等. 内蒙花敖包特 Pb-Zn-Ag 多金属矿床原生晕分带特征与深部矿体预测模型[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2011, 36(2): 236-246.
- [8] 邢利琦, 刘炳璋. 矿床原生地球化学晕分带性研究[J]. 四川地质学报, 2011, 31(4): 489-492, 495.
- [9] 方贵聪, 赵正, 陈伟, 等. 赣南长流坑钨矿年代学与原生晕地球化学[J]. 地质前缘, 2017, 24(5): 149-158.
- [10] 李昌明, 陈远荣, 陈晓雁, 等. 广西南丹县大厂矿田铜坑锡矿成矿地球化学模型和找矿预测标志[J]. 地质通报, 2012, 31(1): 136-142.
- [11] 陈国忠, 梁志录, 王建龙, 等. 甘肃合作早子沟金矿原生叠加晕特征及深部预测[J]. 物探与化探, 2014, 38(2): 268-277.
- [12] 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.
- [13] 吴俊华, 龚敏, 龚鹏, 等. 江西九江城门山铜矿三维地质地球化学特征与成矿预测[J]. 地质通报, 2010, 29(6): 925-932.
- [14] 肖克炎, 陈学工, 李楠, 等. 地质矿产勘探评价三维可视化技术及探矿者软件开发[J]. 矿床地质, 2010, 29(S1): 758-760.
- [15] 向中林, 顾雪祥, 章永梅, 等. 基于三维地质建模及可视化的大比例尺深部找矿预测研究及应用: 以内蒙古柳坝沟矿区为例[J]. 地质前缘, 2014, 21(5): 227-235.
- [16] Wang G W, Li R X, Carranza E J M, et al. 3D geological modeling for prediction of subsurface Mo targets in the Luanchuan district, China[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 71: 592-610.
- [17] Wang G W, Feng Y, Carranza E J M, et al. Typomorphic characteristics of pyrite: Criteria for 3D exploration targeting in the Xishan gold deposit, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2016, 164: 136-163.
- [18] 郭福生, 吴志春, 李祥, 等. 江西相山火山盆地三维地质建模的实践与思考[J]. 地质通报, 2018, 37(2/3): 421-434.
- [19] 向杰, 陈建平, 肖克炎, 等. 基于机器学习的三维矿产定量预测——以四川拉拉铜矿为例[J]. 地质通报, 2019, 38(12): 2010-2021.
- [20] 王润怀, 李永树, 刘永和, 等. 三维地质建模中虚拟钻孔的引入及其确定[J]. 地质与勘探, 2007, 43(3): 102-107.
- [21] 曹晓峰, Mohamed L S S, 吕新彪, 等. 甘肃早子沟金矿床成矿过程分析——来自矿床地质特征、金的赋存状态及稳定同位素证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(4): 1039-1054.
- [22] Sui J X, Li J W, Hofstra A H, et al. Genesis of the Zaozigou gold deposit, West Qinling orogen, China: constraints from sulfide trace element and stable isotope geochemistry[J]. Ore Geology Reviews, 2020, 103477. doi: 10.1016/j.oregeorev.2020.103477
- [23] Yu H C, Guo C A, Qiu K F, et al. Geochronological and geochemical constraints on the formation of the giant Zaozigou Au-Sb deposit, West Qinling, China[J]. Minerals, 2019, 9(1): 1-23.
- [24] Mohamedl S S, Lv X B, Cao X F, et al. Geology, petrography and structural characteristics of Zaozigou gold deposit[J]. Research Journal of Applied Sciences, 2008, 3(3): 206-215.
- [25] 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、时间演化和控矿规律[J]. 大地构造与成矿学, . <https://doi.org/10.16539/j.ddgzyckx.2020.02.018>.
- [26] 李伟, 陈建平, 贾玉乐, 等. 甘肃早子沟金矿三维建模与综合成矿预测[J]. 地球学报, 2020, 41(2): 144-156.
- [27] 代文军, 陈耀宇, 金鼎国, 等. 甘肃早子沟金矿床控矿因素及找矿标志[J]. 黄金, 2012, 33(8): 17-21.
- [28] 王涛. 甘肃夏河—合作矿集区早子沟金矿成矿作用与找矿预测地质模型研究[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2018.
- [29] 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.
- [30] 韦良喜, 陈正乐, 庞振山, 等. 甘肃省合作市早子沟金矿床构造应力场分析[J]. 地球学报, 2018, 39(1): 79-93.
- [31] 刘春先. 甘肃早子沟金矿矿石特征[J]. 甘肃科技, 2011, 27(22): 55-57, 7.
- [32] 付男, 陈耀宇, 金鼎国, 等. 早子沟金矿格委昂矿段原生晕异常特征[J]. 地球科学进展, 2012, 27(S1): 518-521.
- [33] 迟清华, 鄢明才. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 1-148.
- [34] 于皓丞, 李俊, 邱昆峰, 等. 西秦岭甘南早子沟金锑矿床白云石Sm-Nd同位素地球化学及其意义[J]. 岩石学报, 2019, 35(5): 1519-1531.