

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2021.03.014

西秦岭寨上卡林型金矿南矿段 综合找矿模型及地质意义

薛仲凯¹, 李朋伟^{2,3}, 常铭³, 黄豪擎^{4,5}

(1. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100; 2. 中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 河北 廊坊 065000; 3. 中国地质大学(北京), 地球科学与资源学院, 北京 100083; 4. 中国地质调查局应用地质研究中心, 四川 成都 610036; 5. 成都理工大学, 环境与土木工程学院, 四川 成都 610036)

摘要:寨上金矿床位于西秦岭地区, 是中国卡林-类卡林金矿床的最重要的富集地之一。寨上金矿矿体赋存于板岩与灰岩接触界面及板岩一侧破碎带内, 围岩蚀变主要发育硅化、黄铁矿化、毒砂化和褐铁矿化等, 可作为直接的找矿标志; 可控源音频大地电磁测量显示 H1 高阻异常和 L2 低阻异常间的电性梯度带对应 32 号脉, 表明在电性梯度带内含矿的可能性很大; 剖面原生晕分带序列为 As - Mo - Sb - Ag - Cu - Bi - Au - Zn - W - Pb; 前缘晕元素为 Pb、Sb, 近矿晕元素为 Au、Ag、As、W, 尾晕元素为 Mo、Cu、Bi、Zn, 尾晕元素 Mo、Bi 分别位于序列的前缘晕和近矿晕元素位置, 近矿晕元素 Pb 位于序列的尾晕元素位置, 表明浅部矿体有可能被风化剥蚀, 深部有可能存在盲矿体; 根据地球物理、地球化学信息特征和矿床地质特征、控矿因素及找矿标志, 建立了综合找矿模型。并在南矿段进行钻孔验证, 取得较好的找矿效果。

关键词:大地音频电磁测量; 格里格良法; 综合找矿模型; 寨上金矿

中图分类号: P618.51 文献标志码: A 文章编号: 1009-6248(2021)03-0174-14

Comprehensive Prospecting Model and the Geological Significance for Zhaishang Carlin-Type Gold Deposit in West Qinling

XUE Zhongkai¹, LI Pengwei^{2,3}, CHANG Ming³, HUANG Haoqing^{4,5}

(1. Xi'an Mineral Resources Survey Center of China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China; 2. Langfang Comprehensive Survey Center of Natural Resources, China Geological Survey, Langfang 065000, Hebei, China; 3. China University of Geosciences (Beijing), College of Geosciences and Resources, Beijing 100083, China; 4. Research Center of Applied Geology of China Geological Survey, Chengdu 610036, Sichuan, China; 5. School of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610036, Sichuan, China)

Abstract: Zhaishang gold deposit, located in west Qinling, is one of the most important enrichment places of Carlin gold deposits in China. The orebody of Zhaishang gold deposit occurs in the

收稿日期: 2020-06-13; 修回日期: 2021-03-20

基金项目: 中国地质调查局“甘肃岷县寨上-马坞金矿整装勘查区关键基础地质研究”(12120114050301)、“北山地区月牙山-合黎山一带萤石铜铅矿调查评价”(DD20211552)。

作者简介: 薛仲凯(1992 -), 男, 2019年毕业于中国地质大学(北京), 获硕士学位, 主要从事矿床学与矿床地球化学研究。
E-mail: 670327085@qq.com。

interface between slate and limestone and in the fracture zone on one side of slate. The surrounding rock alteration mainly develops silicification, pyrite, arsenopyrite and limonite mineralization, which can be used as a direct indicator of ore prospecting. Controlled source audio magnetotelluric survey shows that the electrical gradient zone between H1 high resistivity anomaly and L2 low resistivity anomaly corresponds to 32 vein, indicating the great possibility of ore-bearing in the electrical gradient zone. The primary halo zoning sequence of the section is As - Mo - Sb - Ag - Cu - Bi - Au - Zn - W - Pb. The leading edge halo elements are Pb and Sb; the near ore halo elements are Au, Ag, As, W; the tail halo elements are Mo, Cu, Bi, Zn. Tail halo elements Mo and Bi are respectively in the leading edge halo and near ore halo elements, and the near ore halo element Pb is in the tail halo element position of the sequence, which indicate that the shallow orebody may be weathered and denuded, and there may be blind orebodies in the deep. A comprehensive prospecting model is established based on the geophysical and geochemical information, the geological characteristics of ore deposits, the ore-controlling factors and the prospecting criteria. The drilling verification in the south section of mine received good prospecting effect.

Keywords: CSAMT; Grignard method; comprehensive prospecting model; Zhaishang gold deposit

20世纪60年代开始,自美国率先提出卡林型一类卡林型金矿床概念之后,该类型矿床便获得世界范围内普遍关注,截至目前,卡林型金矿床已经成为世界上重要黄金来源之一(陈国忠等,2017)。位于西秦岭造山带的寨上金矿床,属超大型金矿(陈衍景等,2014),近年来专家学者们在寨上矿区做了大量的工作,同时也取得了一定的成果,例如刘新会(2005)通过研究矿床成因,认为泥盆系的沉积地层与矿区成矿物质来源有一定的联系;路彦明(2006b)通过 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素测年,得出绢云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 $(125\pm 5)\text{Ma}$,提出寨上金矿床成矿阶段主要是在燕山晚期;刘新会(2010)通过电子探针观测到闪长玢岩中存在辉砷镍矿、黝铜矿、锌黝铜矿交代黄铜矿现象;刘家军等(2015)通过元素和同位素地球化学工作成果,推测可能有岩浆流体参与成矿过程中,很多矿物学组合符合本区的成矿物质组合特征。

虽然寨上金矿已经成为地质工作者们最为关注的几个热点矿床之一,众多专家学者们对寨上金矿床均进行了系列的研究和探索。建立矿区综合找矿模型是寻找同一矿床深部盲矿体的关键手段之一,郝迪(2016)、张沛(2018)完成了矿区原生晕找矿模型的建立,但研究重点仍主要放在了北矿段,支撑南矿段深部找矿的系统性研究很少,对于南矿段而言仍没有很强的说服力,严重制约后期工作开展。

笔者通过分析物化探调查结果,综合研究找矿信息,建立了南矿段地质-地球物理-地球化学综合找矿模型,经过后期钻孔验证与模型预测吻合,有效的指导了南矿段下一步找矿工作。

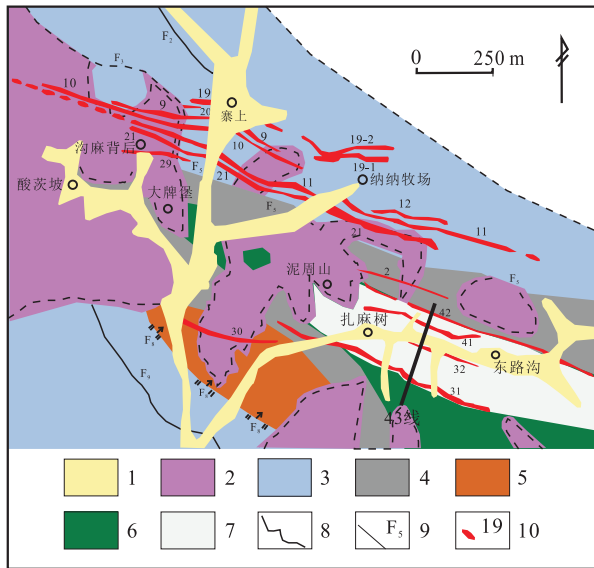
1 区域地质

西秦岭寨上金矿床位于岷(县)-礼(县)多金属成矿带西段,大地构造位置为秦岭褶皱系中礼县-镇安华力西褶皱带的新寺-大草滩复背斜,北接祁连山褶皱系和北秦岭加里东褶皱带,南邻西秦岭印支褶皱带(刘一平,2012;岳连雄等,2009;喻万强2010a,2010b;柯昌辉等,2020)。区域为一北西向复式背斜。因构造活动强烈,华力西期和印支期最为明显,有利于成矿;柯昌辉燕山期在一定程度上对前期区域构造进行了推进;到喜山期和新构造期,使断块发生位移,这些对形成地形地貌都有重要的推进作用。区域出露的地层以晚古生界为主,中、新生代地层次之,极少量早古生界地层只有在东北部可见,以泥盆系和二叠系为主,原岩为滨-浅海相碎屑岩、碳酸盐岩、泥质岩建造,断裂构造主要以北西向和近东西向为主。

2 矿床地质

该矿床中主要构造为卓洛-牛场次级背斜,矿体

大致分布为以 F5 断裂为界的南、北矿段。北矿段位于背斜北翼,存在于 F3 和 F5 断裂带之间(图 1)。南矿段位于背斜核部,位于 F5 断裂带以南(廖延福,2013,王增涛等,2015)。该背斜对成矿元素的保存和运移起着关键作用,伴生构造为矿体的形成提供了有利构造条件,二者在寨上矿区矿床形成过程中密切配合,缺一不可(胡建民等,2008)。背斜地层从内向外逐渐变新,依次为中泥盆统(D₂)、上泥盆统(D₃)和下二叠统(P₁),是一个不对称北倾倒转背斜,北翼为正常翼,地层特点为缓薄,南翼为倒转翼,地层特点陡厚(陈勇敢等,2004;郭红乐等,2003)(图 2)。矿脉赋存于中泥盆统安家岔组(D₂a),脉体成分主要为碎裂岩,碎裂岩化钙质板岩,蚀变砂岩、灰岩,矿化、蚀变也比较发育,碳质是富集矿的重要场所,碎裂化岩石更利于富矿,岩石特征明显,是找矿最明显的标志(孙延光等,2013)。金属矿物有自然金、金属互化物、碲化物、白钨矿、黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、黝铜矿、方铅矿、菱铁矿,脉石矿物有方解石、石英、重晶石等(刘家军等,2010a;刘新会等,2010)。矿石的结构主要有自形结构、他形结构、草莓状结构等,构造有块状构造、浸染状构造、网脉状构造等。



1. 第四系;2. 老第三系砾岩;3. 下二叠统碳质板岩;4. 上泥盆统大草滩群 B 组下段含石英砂岩粉砂质板岩;5. 上泥盆统大草滩群 B 组上段粉砂质板岩;6. 中泥盆统灰岩、灰质板岩;7. 中泥盆统安家岔组;8. 地质界线;9. 断层及编号;10. 矿体及编号
 图 1 寨上地区地质简图(据李福生等,2016 修改)
 Fig.1 Geological map of Zhaishang area(According to LI Fusheng, et al., 2016)

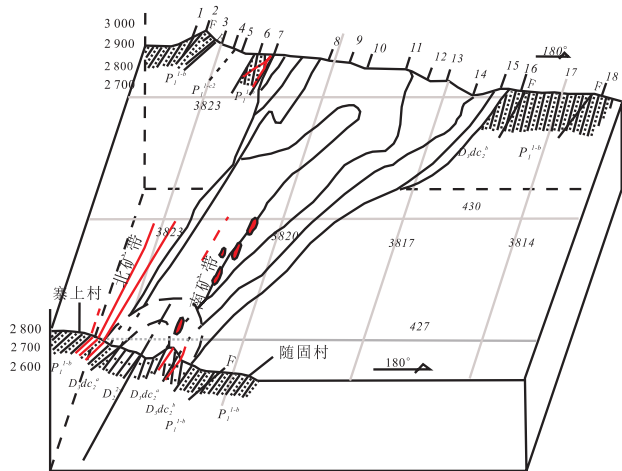


图 2 矿区褶皱-断裂示意图(据李福生等,2016 修改)
 Fig.2 Schematic diagram of fold - fault in the mining area (According to LI Fusheng, et al., 2016)

围岩蚀变类型主要有硅化,黄铁矿化、白钨矿化、方解石化、毒砂矿化,可作为直接的找矿标志,其次,锑与金密切共生,锑矿出露特征明显,可作为金最好的找矿标志成矿物质来源。次生蚀变有褐铁矿化、高岭土化。寨上金矿床的形成经历了 3 个成矿期:沉积-成岩作用、中低温热液成矿作用和表生氧化作用等 3 个成矿期(刘家军等,2008;吕喜旺等,2007;张永文,2012),根据热液脉的互相穿插关系以及矿物共生组合特征,将热液成矿阶段划分为以下 5 个成矿阶段:少硫化物-石英早阶段(I)、含 As 黄铁矿-毒砂-石英主阶段(II)、多金属硫化物-石英-碳酸盐主阶段(III)、少硫化物-碲化物-石英-碳酸盐阶段(IV)和碳酸盐晚阶段(V)(刘家军等,2010d)。

3 成矿区物探找矿标志

由于矿区浅部工作已开展很多,对于深部研究程度不够,可控源音频大地电磁法(CSAMT)因其在探测深度、横向分辨率和抗干扰能力等方面特点,对于解决深部矿体和地质问题具有重要的意义,为后期地球物理勘探地质解释提供解释依据(石昆法,1999;于泽新等,2009)。

3.1 矿区主要岩石电阻率信息

测定本区不同岩性的岩石电性资料,是开展野外工作的前提(表 1)。

表 1 寨上矿区主要地质体电性参数

Tab. 1 Electrical parameters of main geological bodies in Zhaishang mining area

位置	岩性	处数	电阻率区间	电阻率平均值	备注
31 号脉	弱黄铁矿化破碎蚀变岩	10	88~295	132	南矿段东部(围岩:板岩、砂岩)
纳纳牧场	碳质板岩(无碳化)	8	251~374	315	局部第四系覆盖
纳纳牧场	砂岩	8	518~900	680	局部第四系覆盖
纳纳牧场	灰岩	9	472~1 231	712	局部第四系覆盖
纳纳牧场	板岩	7	304~426	387	局部第四系覆盖
沟麻背后	砾岩	8	398~672	456	局部第四系覆盖
	碳质板岩	15	140~187	171	寨上东部
19 号脉	蚀变砂岩板岩	8	59~98	81	
卓落	粉砂岩	15	286~464	361	
卓落	碳质泥质板岩	15	78~116	103	

通过表 1 看出,本区岩石间存在明显的电阻率差异,其中弱黄铁矿化破碎蚀变岩、碳质板岩电阻率相对较低,电阻率基本在 $100 \sim 250 \Omega \cdot m$;砾岩、板岩电阻率相对中等,基本在 $300 \sim 600 \Omega \cdot m$;灰岩、砂岩电阻率相对较高,电阻率在 $500 \sim 1\ 200 \Omega \cdot m$ 。该矿区的围岩与矿体的电阻率差异很大,围岩为高阻体,矿体为低阻体,由于矿体范围小,经常由于叠加,导致测量结果无异常显示。含矿破碎蚀变带常常位于刚性与软性岩层的接触位置,对应为高阻与低阻的接触位置。另一方面,可以看出,蚀变的破碎的岩体其电阻率明显低于完整的岩层,故剖面中的显著的低阻异常所对应的破碎带也是赋矿有利空间。

3.2 可控源音频大地电磁测量的条件及方法

本次野外实际工作中使用美国 Zonge 公司生产的 GDP-32 多功能电法工作站,是目前国内外主流电法勘探仪器。测量方式采用 CSAMT 标量测量(图 3),其中本次工作供电电极距 AB 约 1.5 km,剖面观测点及供电电极位置采用 RTK 定点布设,收发距 r 约 10 km,测量极距 MN 为 40 m。工作频率为 $1 \sim 18\ 192 \text{ Hz}$,自最低频率 1 Hz 始以为倍数依次递增,采集全部 27 个频点数据,确定本工区最低远场频率为 32 Hz,后以为倍数采集加密频点数据,共计 22 个频点。通过对实测数据观察,本测区于 32

Hz 进入远场区,后续采集时于最低远场频率 32 Hz 后加密观测频点。

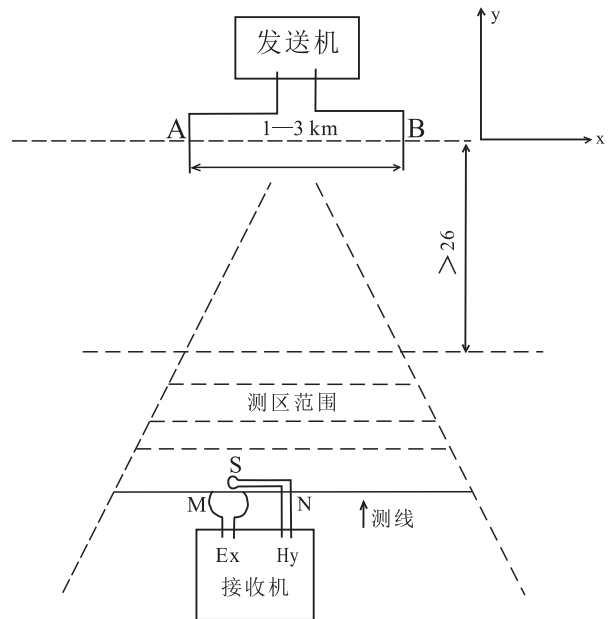


图 3 可控源音频大地电磁法工作方法示意图(据汤井田等,2005)

Fig. 3 Schematic diagram of the CSAMT working method(According to TANG Jingtian et al., 2005)

可控源音频大地电磁法实现效果需要满足以下条件:被测目的体位于探测盲区以下且具有一定厚

度,并与围岩存在电性差异,各层电性稳定,测区无较强磁场干扰以及地形切割较弱。

3.3 南矿段 43 线可控源音频大地电磁法反演和解释

完成测深点的数据处理及基本数据分析工作

后,需通过反演计算构建工区地下介质的电性结构模型,并在对模型进行分析的基础上,最终获得工区地下深层岩石电阻率值。实验剖面数据经处理成图后(图 4),与地质剖面相结合进行综合解释。

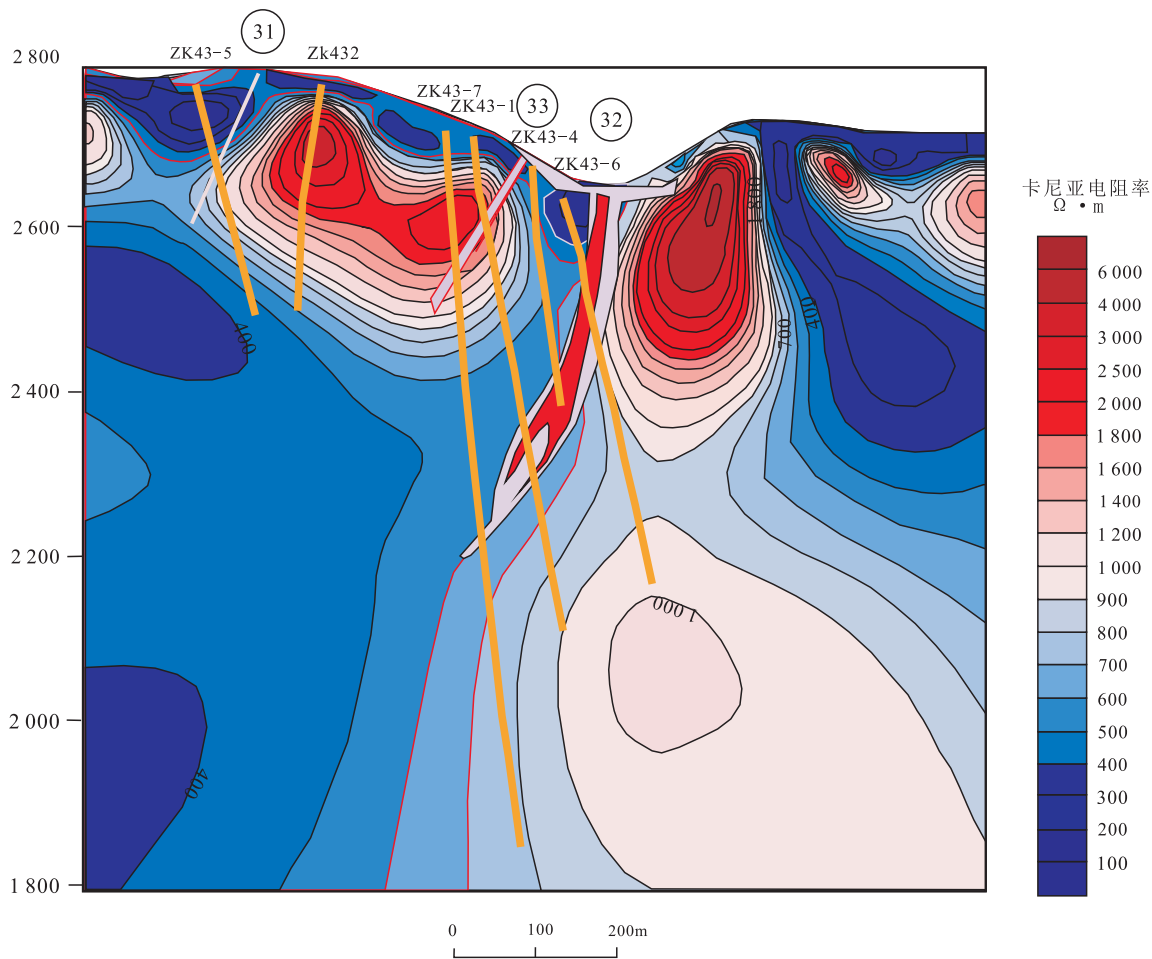


图 4 寨上金矿区 43 线二维反演电阻率剖面图

Fig. 4 Two-dimensional inversion resistivity profile of 43 line in Zhaishang gold mining area

由 43 线二维反演电阻率剖面显示,沿剖面方向呈现高低阻异常间隔排列的形态,异常以剖面中部的东路沟为中心,两侧异常对称出现。结合地表观测和前期钻探工程 ZK43-1、ZK43-2 等钻孔揭露,43 线地下主要以板岩和灰岩互层为主,结合上述岩石电阻率实验,剖面中 1 000 Ω·m 以上的部分为灰岩,在 400 Ω·m 以下的部分为碳质。板岩,在两者之间的部分为钙质板岩,剖面中部电阻率极低的部分为板岩的破碎带。剖面南侧的高低阻异常过渡部位经钻孔验证为区内 31 号矿脉,见矿部

位位于脆性板岩同刚性灰岩的接触地带,于板岩中见矿,在电阻率剖面图中反应为电阻率快速变化的部位。在剖面中部位于研究区内东路沟处是剖面中明显的低阻异常 L2,低阻异常两侧同高阻异常的横向电性梯度带均是赋矿有利部位,ZK43-1 钻孔在 L2 低阻异常区域见矿及低阻异常北侧电性过渡带两处见矿,在 H1 高阻异常和 L2 低阻异常间的电性梯度带对应 32 号脉,矿脉成舒缓波状延深,略向南倾,下延深度较大有膨大富集可能。剖面北侧同南侧近似对称,高低阻异常间隔排列,结合剖面南侧钻

探工程控制及规律总结,在剖面 800 m 处的电性梯度带应为研究区 41 号脉在 43 勘探线的延伸位置,对应的层间破碎带沿灰岩界面展布,整体北倾,产状稳定。

结合上述对于研究剖面的推测并结合钻探工程控制,对 43 线深部地质情况做以推测,以 43 线为代表的寨上矿区南矿段,处于卓洛-国营牛场背斜的构造控制下,研究区域内 43 线,以剖面中部的低阻异常为背斜核部,核部为板岩、破碎蚀变岩,两翼为灰岩和板岩互层,层厚逐渐变宽,即在电性模型中对应剖面中部两侧高低阻间隔排列。由北北东向应力的挤压,背斜两翼各地层产状近直立,剖面中显示为高低阻异常陡立接触。寨上矿区南矿段矿脉主要产在背斜核部及层间破碎带,矿脉产状与硬性岩石边界有关,背斜轴部及两翼层间裂隙发育,脆性板岩与刚性灰岩间岩性接触界面是深部构造薄弱部位,有利于含矿热液在这些部位赋存,而传统卡林型金矿的赋矿岩层碳酸盐岩即本区内的灰岩,在本研究区仅为含矿热液的阻挡层,因而地球物理找矿标志应确立为寻找在刚性灰岩两侧同板岩的接触部位,以及研究区内次一级的断裂或顺层裂隙对应的电性过渡带。在剖面中 31 号脉、40 号脉等多条矿脉均符合这一方式。另一方面,由本次可控源音频大地电磁勘探来看,除了上述矿体赋存位置外,在背斜构造核部的低阻异常,其电阻率明显低于完整岩层的电阻率水平,应是大量密集裂隙的集中体现,故也是成矿有利部位。

3.4 地质-地球物理综合解译

结合上述地质-地球物理综合解译所确定的可控源音频大地电磁法深部找矿标志,对于笔者所研究的 43 线剖面地下成矿部位作出推断,布设了钻孔 ZK43-6、ZK43-7,其中 ZK43-7 穿过高阻异常对应灰岩,在高阻异常南侧边界见矿 33 号矿脉,深部进入剖面深部低阻异常核心部位,于标高 2 200 m 见矿 32 号脉。同样,ZK43-6 直接定位于 32 号脉深部延伸趋势,结合物探剖面显示推测矿脉延伸同高阻异常边界相关,即深部向南陡倾的推断,于标高 2 500 m 处见矿。钻孔见矿位置同 CSAMT 断面对应的横向电性梯度带及低阻异常核心部位相吻合,且对

矿脉深部延展情况的推测符合实际情况,CSAMT 法在寨上矿区深部探矿具有不俗效果(图 5)。

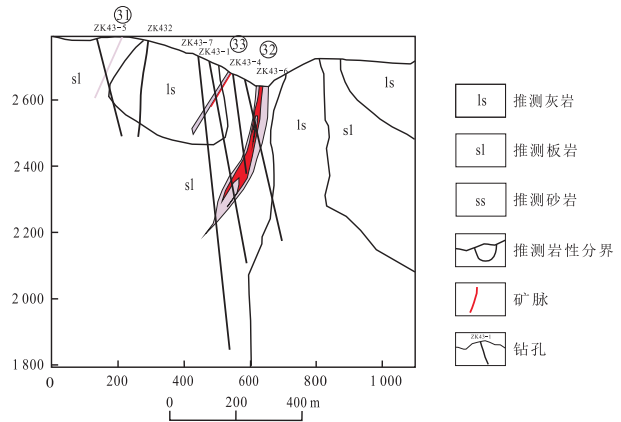


图 5 寨上金矿区 43 线地质解译图

Fig. 5 Geological interpretation map of line 43 in Zhaishang gold mine

4 成矿区原生晕化探找矿标志

随着地质工作的研究不断深入,发现南矿段钻孔见矿效果好,潜力大,使其逐渐作为重点研究区域,根据对南矿段各勘探线钻孔剖面研究,发现 43 线钻孔控矿效果好,样品多,所以选择 43 勘探线控制的脉体进行分析研究。

4.1 样品采集和分析

选定 43 号勘探线上的 ZK43-1、ZK43-3、ZK43-6、ZK43-7 五个钻孔,按照规范的采样方法,根据不同的岩性、矿化蚀变程度挑选地化样品共 508 件,对 Ag、Au、Sb 等 10 种元素进行测试分析。

4.2 因子分析

在用数据前还要通过计算检查是否符合计算要求,一般通过 KMO 和 Bartlett's 球度检验进行检验,KMO 值大于 0.6 就说明处理后的数据相关性好,适合做因子分析,数据处理后得到 KMO 值为 0.712,大于 0.6, Bartlett 的球度检验相伴概率为 0.000,小于 0.05,均符合因子分析条件。

从元素相关系数表(表 2)中可以观察到,各因子之间有关联且强度不同,通过把有一定关联关系的因子组合进行系统解译,最大程度达到解译效果。

利用“方差极大旋转”的方法,通过正交旋转因子分析得到因子载荷。从解译的总方差表(表3)中得到前3个因子的累积贡献方差为80.762%,故将前3个因子作为反应样品的主因子。

从得出的表(表4)中可以总结出,将研究对象的矿石组分划分为3组正交因子组合。

F1:Zn-Cu-Bi-Pb;

F2:Au-Ag-As;

F3:Mo-W-Sb。

从解译的总方差得出,F1因子组合贡献值最大,最能代表这段的矿化信息,F1因子组合中的

Cu,Zn以及Pb,所对应的成矿阶段为多金属硫化物-石英-碳酸盐主阶段,发育有方铅矿、黄铜矿等金属硫化物;F2的Au-Ag-As的组合中富集多种矿产,As在F2因子组合中的解译,含As黄铁矿导致Au的富集成矿,在该阶段可见黄铁矿和辉锑矿等,F2对应成矿阶段为含As黄铁矿-毒砂-白钨矿-石英主阶段和多金属硫化物-石英-碳酸盐主阶段。通常表现为Au与Hg、Sb、As共生为中低温成矿元素,基本与W富集无关。F3中W与Mo代表高温成矿元素阶段,主要由于热液中的钨杂多酸络合物,W与Hg、Sb、As在中低温热液矿床中共生。

表2 寨上金矿南矿段元素相关系数

Tab.2 Element correlation coefficient of south ore block of Zhaishang gold mine

元素	Au	Ag	As	Sb	Bi	W	Mo	Zn	Pb	Cu
Au	1.000									
Ag	0.482	1.000								
As	0.697	0.741	1.000							
Sb	0.397	0.223	0.400	1.000						
Bi	0.322	0.695	0.511	0.148	1.000					
W	0.332	0.056	0.255	0.957	0.024	1.000				
Mo	0.52	0.605	0.605	0.386	0.682	0.318	1.000			
Zn	0.093	0.486	0.486	0.006	0.805	-0.070	0.471	1.000		
Pb	0.160	0.461	0.461	0.106	0.263	0.054	0.246	0.444	1.000	
Cu	0.271	0.664	0.664	0.110	0.954	-0.003	0.608	0.847	0.417	1.000

表3 寨上金矿南矿段元素总方差

Tab.3 Total variance of elements in the southern ore block of Zhaishang gold mine

成分	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	合计	方差的(%)	累积(%)	合计	方差的(%)	累积(%)	合计	方差的(%)	累积(%)
1	4.784	47.844	47.844	4.784	47.844	47.844	3.507	35.069	35.069
2	2.231	22.314	70.158	2.231	22.314	70.158	2.521	25.212	60.281
3	1.060	10.604	80.762	1.060	10.604	80.762	2.048	20.481	80.762
4	0.857	8.567	89.329						
5	0.391	3.910	93.239						
6	0.334	3.341	96.581						
7	0.166	1.657	98.237						
8	0.130	1.297	99.534						
9	0.025	0.251	99.785						
10	0.022	0.215	100.000						

表4 寨上金矿南矿段元素旋转成分矩阵

Tab. 4 Element rotation component matrix of the southern ore block of Zhaishang gold mine

元素	成分		
	1	2	3
Zn	0.944	0.131	0.001
Cu	0.932	0.240	0.002
Bi	0.877	0.335	0.011
Mo	0.250	0.346	0.590
Pb	0.624	0.127	0.053
As	0.245	0.886	0.159
Au	0.014	0.849	0.231
Ag	0.278	0.677	0.151
W	0.001	0.119	0.986
Sb	0.022	0.240	0.953

4.3 原生晕轴向分带

4.3.1 异常特征

在利用地球化学方法寻找盲矿过程中,确定异常值和背景值是首要任务,异常值能够反映元素富集情况。通过分析测试结果可以观察出一定程度的

矿化异常。对异常下限的计算,可以将研究区分为外、中、内带。通过区域划分可以直观的看清楚从内带向外带区域的分布以及含矿可能性的递减变化(吴运喜,1990;严汝珍等,1989)。

先计算求得所有元素的平均值 X 和标准离差 S ,通过对 $X+(-)2S$ 求出 $X_{\max}(X_{\min})$,剔除范围外数据,重复计算直到没有异常值平均值即为背景值,再用背景值加上 $2S$ 即为异常下限(Ca),原生晕的对应 $Ca, 2Ca, 4Ca$ 。其中,Ag 的外、中、内带为 $Ca, 3Ca, 9Ca$ (表5)。根据矿体分布剖面图(图6a)绘制各元素异常剖面图(图6b—图6k),对比各元素异常剖面图可得到以下结论:①元素 Pb、Sb 都具有完整的内中外三带,在矿体头部富集,越往深部含量越少,所以把这2个元素定为前缘晕元素。②Au、Ag、As、W 4个元素,内中外三带完整,在矿体中部比较富集,所以它们定为近矿晕元素。③Mo、Cu、Bi、Zn 四个元素内中外三带完整,集中于矿体下部,故定为尾晕元素。综上所述,根据原生晕图和矿体的剖面图可以得到 Pb、Sb 为前缘晕元素,Au、Ag、As、W 为近矿晕元素,Mo、Cu、Bi、Zn 为尾晕元素。这些元素都用来研究指示可能存在的盲矿体。

表5 寨上金矿南矿段成晕元素浓度分带参数

Tab. 5 Zoning parameters of halo-forming element concentration in the southern ore block of Zhaishang Gold Mine

参数	Au	Ag	As	Sb	Bi	W	Mo	Zn	Pb	Cu
X	1.50	0.06	7.98	1.28	0.33	4.58	0.22	73.30	9.71	25.14
S	0.41	0.01	3.82	0.45	0.04	1.83	0.08	10.02	2.50	3.30
Ca	2.33	0.08	15.61	2.19	0.42	8.24	0.37	93.35	14.71	31.73
2Ca	4.66	0.23	31.22	4.38	0.85	16.49	0.75	186.70	29.43	63.46
4Ca	9.31	0.70	62.44	8.75	1.69	32.98	1.49	373.39	58.86	126.92

4.3.2 轴向分带序列

原生晕分带共有横向分带、纵向分带和轴向分带3种形式,对于深部找矿都有很好的指示意义,依据综合原生晕异常套合的特征,对深部隐伏矿体进行定位预测(王长明等,2007),其中轴向分带被应用的最为频繁。在本次深部盲矿体预测中主要运用轴向分带形式进行分析预测,主要方法为格里戈良分带指数法(Beus et al., 1977;张艳宜,1996;白斌等,2018)。

对所得数据运用格里戈良分带指数法进行计算,剔除不符合要求的数值,再根据计算公式进行计

算得到的比值就是每种元素的分带指数(表6)。依据此方法,将矿体从深到浅的轴向分带序列初步定为:As - Mo - Sb - Ag - Cu - Bi - Au - Zn - W - Pb。李惠(1999)根据研究推导出的典型分带序列,由浅至深: B - I - As - Hg - F - Sb - Ba - Pb - Ag - Au - Zn - Cu - W - Bi - Mo - Mn - Ni - Cd - Co - V - Ti。与前人典型序列进行对比,43线剖面原生晕具有以下特点。

(1)典型分带序列的尾晕元素 Mo、Bi 分别位于43线剖面原生晕分带序列的前缘晕和近矿晕元素位置,说明以前上端可能存在矿体,已经开采过或长

期地质作用破坏。

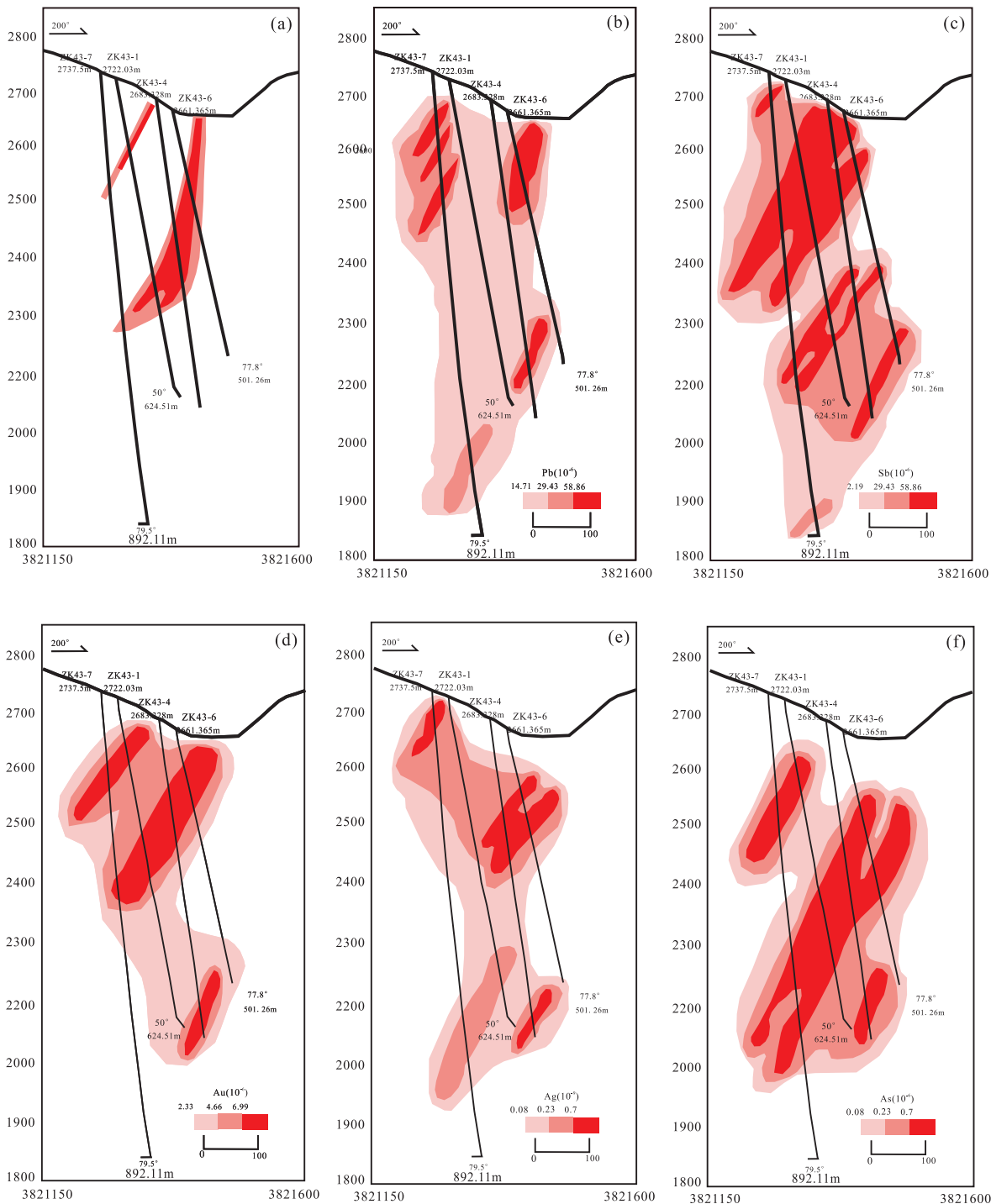
(2)典型分带序列的近矿晕元素 Pb 位于分带序列的尾晕元素位置,说明 43 线剖面深部有存在盲矿体的可能。

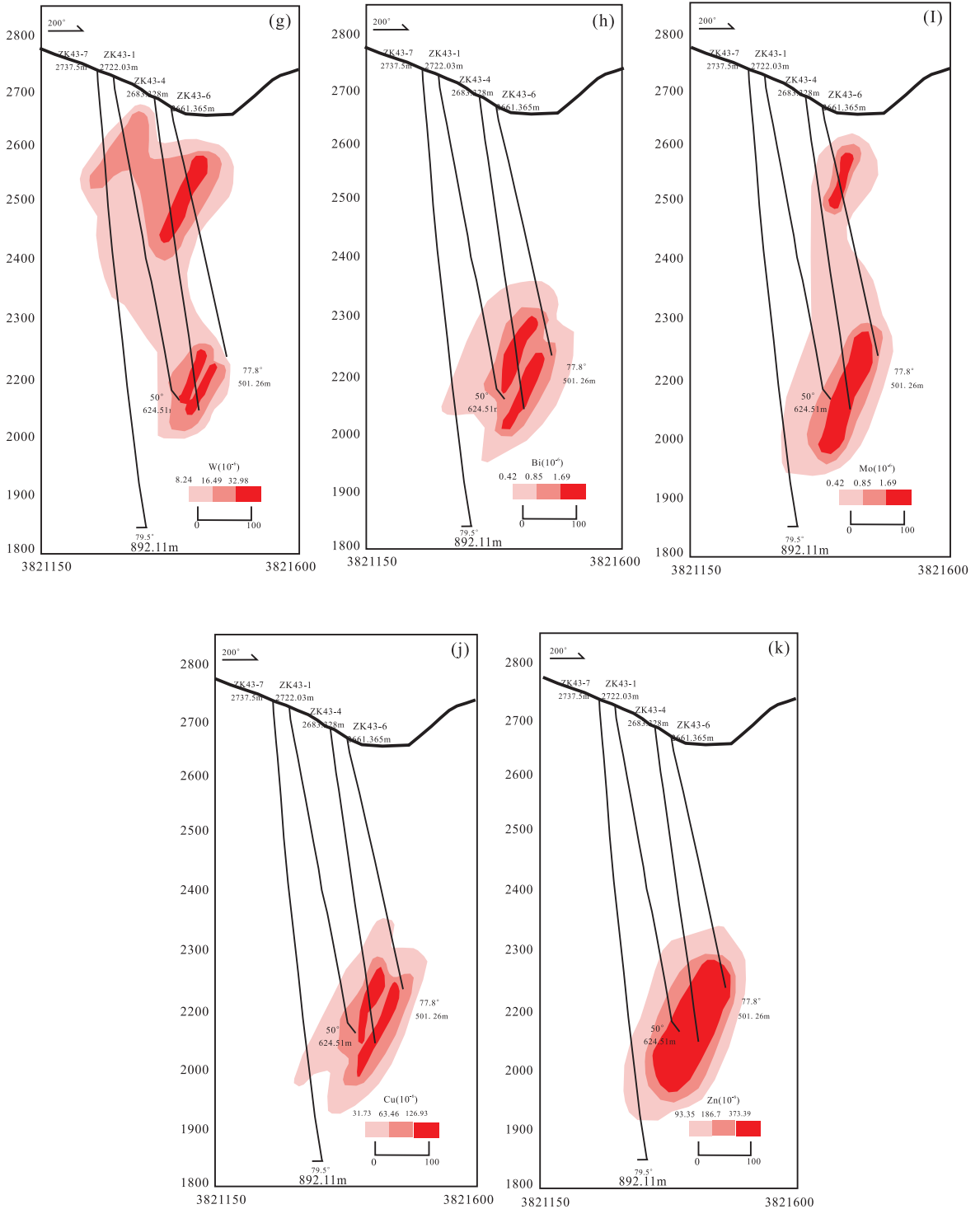
4.3.3 深部成矿预测

通过对南矿段 43 线剖面钻孔原始数据进行计算从而得出元素分带指数值,利用矿体对应各钻孔

不同深度具有代表性的前缘晕元素组合与尾晕元素组合分带指数累乘值比值,该值大小反映前缘晕相比尾晕发育程度,进而预测深部矿体。

矿体预测模型:矿体头部选为标高 2 500 m,其比值为 8.7;矿体中上选为标高 2 400 m,其比值为 3.17;矿体下部选为标高 2 300 m,其比值为 28;矿体尾部选为标高 2 200 m,其比值为 1。





a. 矿体剖面图; b—k. 元素异常剖面

图 6 寨上南矿段 43 勘探线矿体和元素异常剖面图

Fig. 6 Section of the ore body and element anomalies in the 43 exploration line of the Zhaishang Southern ore block

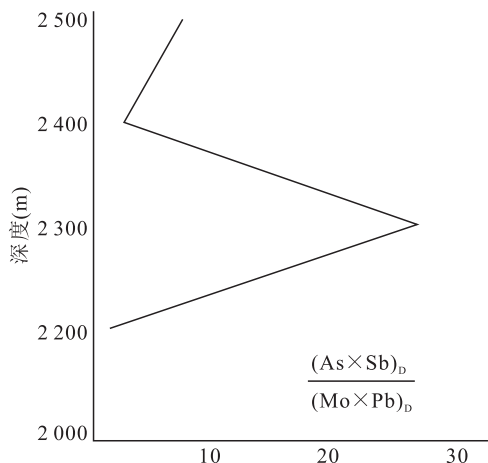
从矿体深部预测模型(图 7)可以得出,矿体的指标数经历了从减小到增大再减小的过程,表明矿体头部到中上部的时候,尾晕在不断发育,从矿

体中上部到矿体中下部过程中,前缘晕不断发育,而后尾晕不断发育,指示矿体深部有可能不存在盲矿。

表6 南矿段43线剖面原生晕分带指数表

Tab.6 The index table of original halo in 43 line of the southern ore block

元素	标准化系数	标准化线金属量(10^{-6})				分带指数			
		ZK43-1	ZK43-4	ZK43-6	ZK43-7	ZK43-1	ZK43-4	ZK43-6	ZK43-7
Au	10	274 211.12	347 320	98 577.53	15 544.72	0.386 567 697	0.107 864 701	0.101 753 767	0.016 065 022
Ag	1 000	78 909.67	823 528	72 130.885	26 414.84	0.111 242 496	0.255 757 23	0.074 454 993	0.027 298 979
As	10	124 544.12	629 810	254 556.83	30 279.91	0.175 575 424	0.195 595 61	0.262 758 83	0.031 293 418
Sb	10	47 646.086	107 631	80 244.059	31 480.424	0.067 168 821	0.033 426 194	0.082 829 579	0.032 534 115
Bi	1 000	77 611.9	607 700	60 158	77 110.9	0.109 412 971	0.188 729 064	0.062 096 333	0.079 691 902
W	10	63 526.349	107 161.8	279 875.31	520 980.8	0.089 555 939	0.033 280 478	0.288 893 089	0.538 418 707
Mo	1 000	34 350	174 860	55 164	8 760	0.048 424 733	0.054 305 026	0.056 941 423	0.009 053 209
Zn	10	1 000	174 902	29 330	124 899.84	0.001 409 745	0.054 318 069	0.030 275 033	0.129 080 4
Pb	10	6 090	95 780	37 207.45	127 174.91	0.008 585 346	0.029 745 713	0.038 406 3	0.131 431 62
Cu	1	1 459.007	151 267	1 541	4 966.396	0.002 056 828	0.046 977 916	0.001 590 652	0.005 132 628
		709 348.252	3 219 959.8	968 785.064	967 612.74				



(选取 $(Sb \times As)_D / (Mo \times Pb)_D$ 作为定量评价指标预测深部矿体)

图7 寨上金矿南矿段深部预测模型

Fig.7 Deep prediction model of southern ore block of Zhaishang gold Mine

5 综合找矿模型和找矿突破

整理分析多种找矿标志,综合观察各类标志信息,才能够更加准确为找矿服务。因此,综合考虑各类找矿信息标志,提出矿床综合找矿模型(表7)。根据上述找矿标志,结合物探和化探结果,在32号脉55号勘探线施工,进行钻孔验证,钻孔55-4孔深320 m,见矿位置为孔深27~47 m和118~

135 m,Au平均品位分别为 3.42×10^{-6} 和 4.28×10^{-6} ,真厚度为6.37 m和2.80 m,岩性为碎裂岩化钙质板岩,蚀变岩化主要为黄铁矿化和硅化,该孔的见矿证明了该模型及方法对于本区域找矿是可行的,找矿工作有了突破性进展,对于以后工作开展具有重要的指导意义。

6 结论

笔者通过在南矿段部分剖面运用地球物理和地球化学方法,对深部盲矿进行预测和深入研究,总结物理和化学找矿特征,结合地质找矿特征,建立综合找矿模型,对下一步找矿具有一定的指导意义,现将研究成果总结如下。

(1)ZK43-1钻孔在电性过渡带见矿,32号脉也存在于电性过渡带,且矿脉成舒缓波状延深,略向南倾,下延深度较大有膨大富集可能,在横向电性梯度带含矿可能性大。

(2)结合各元素原生晕分布图与格里格良法计算结果推出南矿段43线剖面原生晕序列为:As-Mo-Sb-Ag-Cu-Bi-Au-Zn-W-Pb,通过与前人典型分带序列相比,分析得出一是典型分带序列的尾晕元素Mo、Bi分别位于43线剖面原生晕分带序列的前缘晕和近矿晕元素位置,说明以前上端可能存在矿体,已经过开采或长期地质作用破坏。

表 7 寨上金矿南矿段综合找矿模型

Tab. 7 Comprehensive prospecting model for the south ore block of Zhaishang gold mine

评价项目	评价内容	
矿化有利评价信息	含金建造	建造组合以砂岩与碳质板岩、砂岩与钙质板岩、砂质板岩与碳质板岩、砂质板岩与灰岩和泥质板岩灰岩为主,成矿有利部位为砂岩与板岩界面和砂质板岩岩与灰岩界面
	构造	国营-牛场背斜,对成矿元素的保存和运移起着关键作用,伴生的构造为矿体的形成提供了有利的构造条件
	蚀变作用	与成矿关系最为密切硅化、黄铁矿化、毒砂化、褐铁矿化,可作为直接的找矿标志;其次,锑与金密切共生,锑矿出露特征明显,可作为金最好的找矿标志
成矿评价信息	地球化学	在矿区南部是金矿脉的重要找矿区域
	深部找矿	As、Ag 异常可作为找金重要标志,Au 的水系、土壤和岩石低值异常可一定程度指示矿体,原生晕轴向序列:As - Mo - Sb - Ag - Cu - Bi - Au - Zn - W - Pb
	地球物理	在刚性灰岩两侧同板岩的接触部位,研究区内次一级的断裂或顺层裂隙对应的电性过渡带和背斜核部低阻异常区
矿床评价信息	岩石	①碎裂化碳质板岩和碎裂岩。②碳质是富集矿的重要场所,碎裂的岩石更利于富矿,岩石特征明显是找矿最明显的标志
	微观特征	①硫化物当中的硫是岩浆硫与地层硫混合作用的结果。②壳源铅与深源铅的混合反应成矿作用与区内揭露的辉绿玢岩岩脉的岩浆活动有一定的关系。③成矿流体主要来自循环加热的地下水的补给来自大气降水,部分的流体来源可能与岩浆热液的混入相关。④沉积的硅和闪长玢岩当中的硅可能均为热液当中的硅提供了来源。⑤包裹体均一温度为 92~293℃。⑥冰点温度范围为-25.6~0.6℃。⑦成矿流体盐度范围为 0.18~23.01%,0.75~1.03 g/cm ³ 。⑧气相成分除了 H ₂ O 外尚有少量 CO ₂ 和 CH ₄ (LIU J et al., 2015;路彦明, 2006a, 2006b)

二是典型分带序列的近矿晕元素 Pb 位于 43 线剖面原生晕分带序列的尾晕元素位置,说明 43 线剖面深部有存在盲矿体的可能。从矿体深部预测模型可以得出,矿体的指标数经历了从减小到增大再减小的过程,表明矿体头部到中上部的时候,尾晕在不断发育,从矿体中上部到矿体中下部过程中,前缘晕不断发育,从矿体中下部到深部过程中,尾晕不断发育,指示矿体深部有可能不存在盲矿,物探发现的深部异常有可能是含碳的破碎带或者是含碳地层。

(3)运用综合找矿模型,在南矿段 55 线进行钻孔验证,并得到理想效果。

致谢:感谢刘家军教授为本文提供写作思路,及修改意见建议,感谢郝迪、张沛师兄为本文写作提供指导意见。

参考文献(References):

白斌,俞胜,余小龙,等. 西秦岭锁龙金矿床原生晕叠加特征及深部靶位预测[J]. 西北地质,2018, 51(4): 202-214.
BAI Bin, YU Sheng, SHE Xiaolong, et al. Superposition

characteristics of primary halo and prediction of deep targets in Suolong gold deposit, West Qinling [J]. Northwest Geology, 2018, 51 (4): 202-214.
陈衍景,张静,张复新,等. 西秦岭地区卡林-类卡林型金矿床及其成矿时间、构造背景和模式[J]. 地质评论, 2004,50(2):134-152.
CHEN Yanjing, ZHANG Jing, ZHANG Fuxin, et al. Carlin-like Carlin type gold deposits and their metallogenic time, tectonic setting and model in West Qinling area. [J]. Geological Review, 2004. 50 (2): 134-152.
陈勇敢,赵玉锁,张国立,等. 甘肃寨上金矿床构造地球化特征[J]. 黄金地质,2004,10(4):61-65.
CHEN Yonggan, ZHAO Yusuo, ZHANG Guoli, et al. Tectonic geochemical characteristics of the Zhaishang gold deposit, Gansu [J]. Gold Geology, 2004, 10 (4): 61-65.
陈国忠,龚全胜,梁志录,等. 西秦岭甘肃段特大型金矿床的地质地球化学特征及其成岩成矿年龄[J]. 西北地质, 2017, 50 (4): 91-104.
CHEN Guozhong, GONG Quansheng, LIANG Zhilu, et al. Geological and geochemical characteristics and diagenetic and metallogenic age of super-large gold deposits in

- Gansu section of West Qinling[J]. Northwest Geology, 2017, 50 (4): 91-104.
- 郭红乐,陆志平,刘爽,等. 甘肃寨上卡林型金矿床地质特征与控矿因素[J]. 黄金地质,2003, 9(3):21-26.
- GUO Hongle, LU Zhiping, LIU Shuang, et al. Geological characteristics and ore-controlling factors of Zhaishang Carlin type gold deposit in Gansu Province[J]. Gold Geology, 2003, 9 (3): 21-26.
- 郝迪. 甘肃寨上金矿床原生晕特征与成矿预测[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- HAO Di. Characteristics of primary halo and metallogenic prediction of Zhaishang gold deposit, Gansu [D]. Beijing ;China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- 胡建民,刘光智,刘新会,等. 西秦岭寨上金矿地质-地球化学特征及成因探讨[J]. 地质找矿论丛,2008, 23(4): 298-304.
- HU Jianmin, LIU Guangzhi, LIU Xinhui, et al. Discussion on geological-geochemical characteristics and genesis of Zhaishang gold deposit in West Qinling [J]. Series of Geological Prospecting, 2008,23 (4): 298-304.
- 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应用准则[J]. 地质与勘探,1999,35 (1):32-35.
- LI Hui, ZHANG Wenhua, LIU Baolin, et al. Study on axial zoning sequence of primary halo of main types of gold deposits in China and its application criteria [J]. Geology and Exploration, 1999, 35 (1): 32-35.
- 廖延福. 甘肃省岷县寨上金矿床成矿规律与成矿模式研究 [D]. 西安:长安大学, 2013.
- LIAO Yanfu. Study on metallogenic regularity and model of Zhaishang gold deposit in Minxian County, Gansu Province [D]. Xi'an; Chang'an University, 2013.
- 刘家军,刘光智,廖延福,等. 甘肃寨上金矿床中白钨矿体的发现及地质特征 [J]. 中国地质, 2008a, 35 (6): 1057-1064.
- LIU Jiajun, LIU Guangzhi, LIAO Yanfu, et al. Discovery and geological characteristics of scheelite orebody in Zhaishang gold deposit, Gansu [J]. Geology of China, 2008a, 35 (6): 1057-1064.
- 刘家军,毛光剑,吴胜华,等. 甘肃寨上金矿床矿物组成特征与矿质沉淀机理[J]. 中国地质,2010a,37(2):453-462.
- LIU Jiajun, MAO Guangjian, WU Shenghua, et al. Mineral composition characteristics and mineral precipitation mechanism of Zhaishang gold deposit, Gansu [J]. Geology of China, 2010a, 37 (2): 453-462.
- 刘家军,毛光剑,吴胜华,等. 甘肃寨上金矿床的矿石建造特征及成因[J]. 黄金科学技术,2010d,18(1):11-15.
- LIU Jiajun, MAO Guangjian, WU Shenghua, et al. Ore formation characteristics and genesis of the Zhaishang gold deposit, Gansu [J]. Gold Science and Technology, 2010 d,18 (1): 11-15.
- 刘新会,刘家军,陈彩华. 西秦岭寨上特大型金矿床硫盐矿物特征及其成因意义[J]. 黄金科学技术,2010a, 18 (4): 6-11.
- LIU Xinhui, LIU Jiajun, CHEN Caihua. Sulphide mineral characteristics and genetic significance of Zhaishang super-large gold deposit in West Qinling [J]. Gold Science and Technology, 2010a, 18 (4): 6-11.
- 刘新会,于岚,张复新,等. 甘肃岷县寨上金矿床地质特征及成因初探[J]. 西北地质, 2005, 38(4):45-53.
- LIU Xinhui, YU Lan, ZHANG Fuxin, et al. Geological characteristics and Genesis of Zhaishang Gold Deposit in Minxian County, Gansu Province [J]. Northwest Geology, 2005,38 (4): 45-53.
- 刘一平,吴自成. 西秦岭构造格局及找矿方向[J]. 甘肃冶金, 2012(01):91-94.
- LIU Yiping, WU Zicheng. Tectonic framework and prospecting direction of West Qinling [J]. Gansu Metallurgy, 2012 (01): 91-94.
- 路彦明,李汉光,陈勇敢,等. 甘肃岷县寨上金矿床地球化学特征及成因[J]. 地质与勘探,2006a,42(4):25-31.
- LU Yanming, LI Hanguang, CHEN Yonggan, et al. Geological and geochemical characteristics and genesis of Zhaishang gold deposit in Minxian County, Gansu Province[J]. Geology and Exploration, 2006a. 42 (4): 25-31.
- 路彦明,李汉光,陈勇敢,等. 西秦岭寨上金矿床中石英和绢云母⁴⁰Ar/³⁹Ar定年[J]. 矿床地质, 2006b, 25(5): 590-597.
- LU Yanming, LI Hanguang, CHEN Yonggan, et al. ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of quartz and sericite in the Zhaishang gold deposit, West Qinling [J]. Deposit Geology, 2006b, 25 (5): 590-597.
- 吕喜旺,王建中,郑卫军,等. 甘肃省岷县寨上金矿床白钨矿成因及找矿潜力[J]. 西北地质, 2017, 50(2): 156-166.
- LÜ Xiwang, WANG Jianzhong, ZHENG Weijun, et al. Genesis and prospecting potential of scheelite in Zhaishang gold deposit, Minxian County, Gansu Province [J]. Northwestern China, 2017,50 (2): 156-166.
- 石昆法. 可控源音频大地电磁法理论与应用[M]. 北京:科学出版社,1999.
- SHI Kunfa. Theory and application of controllable source audio magnetotelluric method [M]. Beijing: Science Press, 1999.
- 孙延光,刘敬. 寨上金矿床南矿段地质特征及找矿标志[J].

- 陕西地质, 2013, 31(1):20-26.
- SUN Yanguang, LIU Jing. Geological characteristics and prospecting criteria of the south section of Zhaishang gold deposit [J]. *Geology of Shaanxi*, 2013, 31 (1): 20-26.
- 汤井田, 何继善. 可控源音频大地电磁法及其应用[M]. 长沙:中南大学出版社, 2005.
- TANG Jingtian, HE Jishan. The method and application of the CSAMT[M]. Changsha: Central South University Press, 2005.
- 王长明, 邓军, 张寿庭, 等. 河南崔香注金矿原生晕地球化学特征和深部找矿预测[J]. *地质与勘探*, 2007, 43(1): 58-63.
- WANG Changming, DENG Jun, ZHANG Shouting, et al. Geochemical characteristics and deep prospecting prediction of primary halo in Huoxiangwa gold deposit, Henan Province [J]. *Geology and Exploration*, 2007, 43 (1): 58-63.
- 柯昌辉, 王晓霞, 聂政融, 等. 西秦岭中川岩体年代学、元素地球化学、Nd-Hf 同位素组成及其与金成矿的关系[J]. *中国地质*, 2020, 47(4): 1127-1154.
- KE Changhui, WANG Xiaoxia, NIE Zhengrong, et al. Age, geochemistry, Nd-Hf isotopes and relationship between granite and gold mineralization of Zhongchuan granitoid pluton in West Qinling[J]. *Geology in China*, 2020, 47 (4): 1127-1154(in Chinese with English abstract).
- 王增涛, 王建中. 甘肃省岷县寨上金矿床构造序列及控矿模式初探[J]. *陕西地质*, 2015, (1):9-17.
- WANG Zengtao, WANG Jianzhong. Preliminary study on structural sequence and ore-controlling model of Zhaishang gold deposit in Minxian County, Gansu Province [J]. *Geology of Shaanxi*, 2015, (1): 9-17.
- 吴运喜. 用算法确定地球化学背景值及异常下限值的一些认识[J]. *地质与勘探*, 1990, 26(8):52-54.
- WU Yunxi. Some understanding of determining geochemical background value and anomaly lower limit value by calculation method [J]. *Geology and Exploration*, 1990, 26 (8): 52-54.
- 严汝珍, 王文华. 钻孔原生晕组分分带及圈定异常方法[J]. *四川地质学报*, 1989, (02):64-70.
- YAN Ruzhen, WANG Wenhua. The zoning of primary halo components in boreholes and the method of delineating anomalies [J]. *Sichuan Journal of Geology*, 1989, (02): 64-70.
- 喻万强, 刘纲, 王晓军, 等. 甘肃寨上金矿床的控矿因素[J]. *黄金科学技术*, 2010a, 18(3):46-50.
- YU Wanqiang, LIU Gang, WANG Xiaojun, et al. Ore-controlling factors of Zhaishang gold deposit in Gansu Province [J]. *Gold Science and Technology*, 2010a, 18 (3): 46-50.
- 喻万强, 刘纲, 王建国, 等. 甘肃岷县寨上金矿床构造控矿特征及找矿预测[J]. *黄金*, 2010b, 31(9):15-20.
- YU Wanqiang, LIU Gang, WANG Jianguo, et al. Structural ore-controlling characteristics and prospecting prediction of Zhaishang gold deposit in Minxian County, Gansu Province[J]. *Gold*, 2010b, 31 (9): 15-20.
- 于泽新, 敖颖锋, 吕景增, 等. CSAMT 法在辽西康杖子区深部探矿中的应用[J]. *地质与勘探*, 2009, (05): 110-115.
- YU Zexin, AO Yingfeng, LÜ Jingzeng, et al. Application of CSAMT method in deep prospecting in Kangzhangzi area, western Liaoning [J]. *Geology and Exploration*, 2009, (05): 110-115.
- 岳连雄, 王增涛, 魏立勇. 西秦岭寨上特大型金矿床成矿规律与成矿模式[J]. *陕西地质*, 2009, 27(2):21-28.
- YUE Lianxiong, WANG Zengtao, WEI Liyong. Metallogenic regularity and model of Zhaishang super-large gold deposit in West Qinling [J]. *Geology of Shaanxi*, 2009, 27 (2): 21-28.
- 张沛. 甘肃寨上金矿原生晕分带与深部矿体预测模型[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2018, 1-59.
- ZHANG Pei. Primary halo zoning and prediction model of deep orebody in Zhaishang gold deposit, Gansu [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018, 1-59.
- 张艳宜. 格里戈良分带指数法在小龙钨矿区深部地球化学找矿预测中的应用[J]. *矿产与地质*, 1996, (05): 346-351.
- ZHANG Yanyi. Application of Gregorian zoning index method to deep geochemical prospecting prediction in Xiaolong tungsten mining area [J]. *Minerals and Geology*, 1996, (05): 346-351.
- 张永文. 甘肃省岷县寨上超大型金矿成矿作用研究[D]. 西安:长安大学, 2012, 1-123.
- ZHANG Yongwen. Study on mineralization of Zhaishang super-large gold deposit in Minxian County, Gansu Province [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012, 1-123.
- A. Beus, S. V. Grigorian. *Geochemical Exploration methods for mineraldeposits*[M]. Wilmette, Illinois: Applied Publishing Ltd, 1977; 120-125.
- Liu J, Dai H Z, Zhai D G, et al. Geological and geochemical characteristics and formation mechanisms of the Zhaishang Carlin-like type gold deposit, western Qinling Mountains, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 64:273-298.