

胶东大尹格庄金矿床后窿矿区深部矿体定位预测

高学坎¹, 席振铎^{2,3}, 向胤合^{4*}, 杨 斌^{2,3}, 刘占坤^{2,3}, 邹艳红^{2,3}

(1. 招金矿业股份有限公司; 2. 中南大学地球科学与信息物理学院;

3. 中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室; 4. 湖南五维地质科技有限公司)

摘要:后窿矿区位于大尹格庄金矿床主矿区外围,属于深边部找矿区段。采用多元信息找矿策略,通过构造地球化学法-伽玛能谱法-多极化电磁测深技术组合,开展后窿矿区深边部成矿预测。完成地表构造地球化学与伽玛能谱测量面积 12 km²,结合因子分析,厘定后窿矿区构造地球化学找矿标志为 Au-Ag-As-Sb 组合异常。同时,采用 MPMT-18 多极化电磁测深系统,完成了 L108 测线-L136 及 L80 测线多极化电磁测深和异常反演,确定了后窿矿区深部招平断裂的位置。根据构造地球化学测量、伽玛能谱测量与大地电磁测深的异常特征、分布与关联性,结合钻探工程验证的有利程度,共圈定找矿靶区 8 处。其中,A-1、B-1、B-3、C-2 和 C-3 找矿靶区经钻探工程验证并见矿。

关键词:深部矿体;定位预测;多极化电磁测深;构造地球化学法;后窿矿区;大尹格庄金矿床

中图分类号:TD15 P618.51

文章编号:1001-1277(2024)06-0060-05

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20240613

引 言

深部找矿已成为当今成矿学领域研究的前沿和热点^[1-2]。胶东是中国最大的金矿集区之一,已探明金资源量超过 5 000 t。胶东施工了中国最深的金矿勘探钻孔,深度达 4 006.17 m^[3-4]。随着勘探深度增加,新成矿理论与多元信息找矿已成为隐伏矿体定位预测成功与否的关键^[2]。2010 年以来,招金矿业股份有限公司与中南大学合作,采用多极化电磁测深、构造地球化学法等技术,在大尹格庄金矿床、河东金矿床、上庄金矿床等深部取得了一系列重大找矿突破^[5-7]。

后窿矿区位于大尹格庄金矿床 II 号矿带外围,是大尹格庄金矿床勘探的重点区域。然而,该区找矿面临深度大、次级构造多、规律不清等问题,如何在该区开展深部成矿预测、圈定找矿靶区已成为制约金矿勘查的关键问题。结合前期工作基础与找矿经验,本次工作采用成矿理论指导、构造地球化学法-伽玛能谱法-多极化电磁测深技术组合的找矿策略,揭示与成矿有关的蚀变-构造分布情况,进而对深边部隐伏矿体进行定位。

1 矿区地质概况

胶东是中国最大的金矿集区之一,已探明金资源

储量占全国总资源量的近 1/3,是仅次于南非兰德和乌兹别克斯坦穆龙套的世界第三大金矿集中区^[4]。胶东地区大量发育的北东向-北北东向断裂是金成矿有利部位,主要控矿断裂有三山岛断裂、焦家断裂、招平断裂、西林-陡崖断裂、金牛山断裂^[8-9]。

招平断裂控制了台上、破头青、曹家洼、大尹格庄、姜家窑、夏甸等一系列特大型、大型金矿床的分布。招平断裂总体走向 14°,倾向南东,倾角 21°~58°,大致沿中生代玲珑型花岗岩与太古代胶东群变质岩接触带展布,沿走向及倾向均呈舒缓波状展布,并具多期次活动特征。

大尹格庄金矿床位于招平断裂中部,是胶东典型构造蚀变岩型金矿床。招平断裂发育以断层泥为标志的主裂面,矿体大部分产于主裂面下盘的构造蚀变带中,直接赋矿围岩为黄铁绢英岩化碎裂岩、黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩。大尹格庄金矿床存在 2 个矿带,即 II 号矿带和 I 号矿带,二者以近东西向大尹格庄断裂为界。其中,II 号矿带规模最大,向深部最大延伸已超过 2 000 m。后窿矿区位于大尹格庄金矿床主矿区北部和东部,在平面上大致对应 II 号矿带的深部和外围(见图 1)。

2 深部找矿策略与技术方法

找矿是一项成矿理论与找矿技术综合性很强的

收稿日期:2024-03-11;修回日期:2024-04-08

基金项目:国家自然科学基金项目(42372346,41872249)

作者简介:高学坎(1988—),男,工程师,从事矿山地质工作;E-mail:gaouxuekan1@qq.com

*通信作者:向胤合(1991—),男,工程师,硕士,研究方向为矿产地质勘查;E-mail:429428197@qq.com

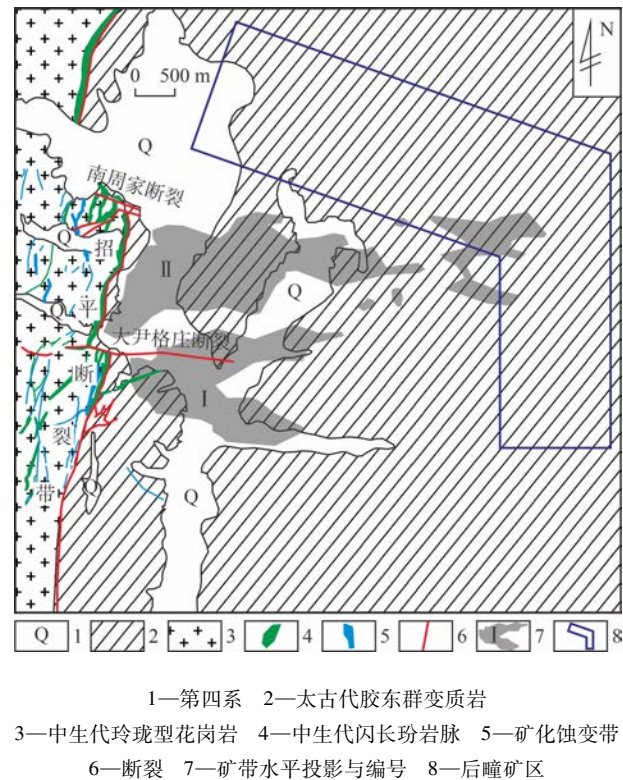


图 1 大尹格庄金矿区地质简图

Fig. 1 Geological sketch of Dayingezhuang Gold District

工作,具有探索性、创新性、实践性,选择应用最佳探测技术组合是取得找矿突破的关键^[10]。研究和建立矿床模型,是解决成矿理论和找矿实践问题的一种重要途径^[11]。COX 等^[12]将矿床模型分为描述性模型、成因模型、找矿模型等。其中,描述性模型是建立其他模型的基础;成因模型是描述性模型的理论升华,因而更加灵活和有效;找矿模型是为适应寻找隐伏矿床需要而创立的找矿新途径,也是发现矿床的最佳途径^[13]。成矿模式、找矿模型的建立,促进了地质勘查工作的深入开展,随着找矿难度增大,模式找矿具有特别重要的意义^[14-15]。

尽管胶东金矿床的研究已取得诸多进展,但对成矿事件、成矿物质来源、水岩反应机理、控矿构造性质等方面的基础认知仍存在广泛分歧。以胶西北地区金矿床成矿事件为例,较多研究者认为,其成矿与郭家岭型花岗质岩浆期后热液作用有关^[9,16-17];有的学者提出,胶东金矿床属绿岩带型金矿床^[18],成矿与变质热液有关;还有学者提出,胶东金矿床是与玲珑型花岗岩有关的混合岩化岩浆热液矿床^[19];也有学者提出,地幔来源的煌斑岩与金矿化有成因联系^[20-21];更有学者提出,伟德山型花岗岩是分凝富金流体和驱动大规模流体循环的主要原因^[22]。

团队前期深入研究了大尹格庄金矿床控矿构造性质^[23]、红化蚀变和青磐岩化蚀变与成矿的关系^[24]。基于动态成矿作用理论^[25],提出了电化

矿模式^[26],并分析了构造地球化学法、伽玛能谱法应用于深部找矿的机理^[5-6,27-28]。主要认识可以概括为:①胶东金矿床的形成与中生代岩浆活动及伴生的水岩反应作用有关;②成矿受地电作用和电化学反应制约,红化蚀变和青磐岩化蚀变反映了高氧逸度环境,是 Au 元素活化的标志;③成矿期张性断裂系统是大尹格庄金矿床导矿构造的重要组成部分,成矿热液活动在矿体上盘张性断裂系统中形成的青磐岩化等围岩蚀变,以及构造地球化学、伽玛能谱等物、化探异常,构成了丰富的多元信息找矿标志;④大尹格庄金矿床构造地球化学法、伽玛能谱法找矿原理与电解-电离成矿机理及其“烟囱效应”有关^[26,28],导矿构造中的构造地球化学异常与伽玛能谱异常强度、规模与容矿构造中的金矿化强度和规模呈正相关关系。

因此,在本次后窿矿区深部矿体定位预测研究中,采用了多元信息找矿策略和构造地球化学法-伽玛能谱法-多极化电磁测深技术组合,通过构造地球化学法和伽玛能谱法查明成矿热液对流循环过程中在矿体上盘张性导矿断裂和附近围岩中留下的热液活动信息,采用多极化电磁测深查明招平断裂在剖面上的空间位置、扩容空间和低阻异常带,二者结合实现深部矿体三维空间定位预测目标。

3 构造地球化学异常分析

构造地球化学属原生晕范畴,是将构造地质研究与地球化学研究有机结合起来的一门学科,并已广泛应用于隐伏矿体和深部矿体找矿预测^[5-6,28-30]。本次地表构造地球化学和伽玛能谱测量面积为 12 km² (见图 1),共采集构造地球化学样品 295 件。样品测试由中国有色桂林矿产地质研究院有限公司测试中心完成,测试元素包括 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Bi、Ni、Co、Mo、Sn、As、Sb、Hg、Ba、B、Mn、V、Ti、Cr 等 19 个。测试方法:①Au 采用氯化钠-硝酸溶矿-化学光谱法;②As、Sb、Bi、Hg 采用原子荧光光谱法;③Cu、Pb、Mo、Sn、Ag、Mn、Zn、V、B、Ba、Co、Ti、Cr、Ni 采用光电直读光谱法。

后窿矿区 Au、Ag、As、Sb、Mn、Co 异常分布见图 2。

Au 异常:成规模、高浓度、连续性的 Au 异常主要分布在后窿矿区北西部和中偏东部。北西部 Au 异常位于 124 勘探线—128 勘探线。中偏东部 Au 异常位于 100 勘探线和 114 勘探线。

Ag 异常:较高浓度的 Ag 异常主要分布在后窿矿区中部、中偏北西部和中偏南部,与 Au 异常有一定的套合性。

As 异常:规模较大的 As 异常分布在后窿矿区北

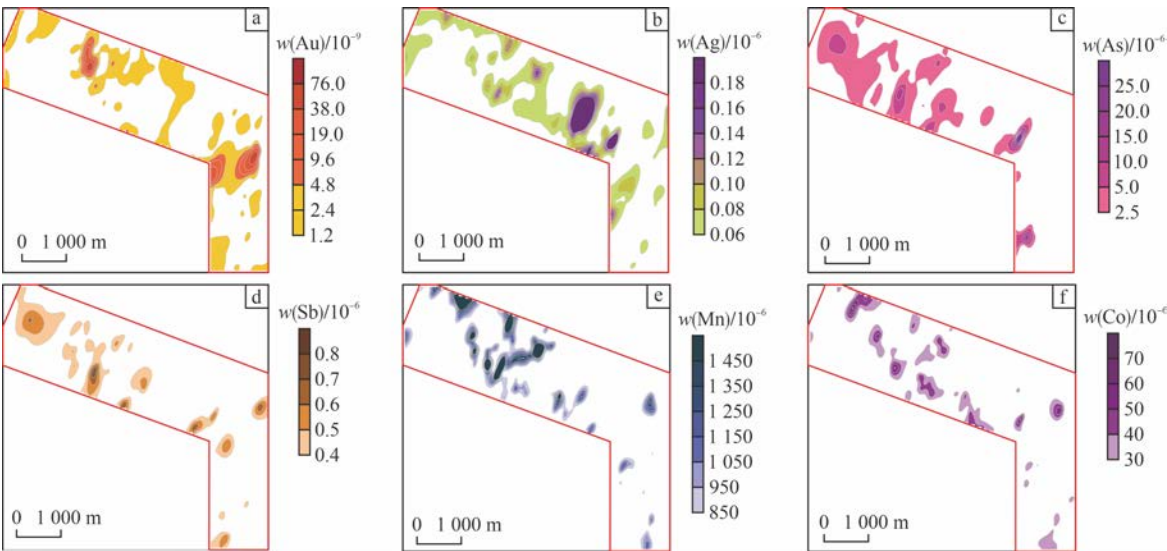


图2 后疃矿区 Au、Ag、As、Sb、Mn、Co 异常分布图

Fig. 2 Distribution of Au, Ag, As, Sb, Mn, and Co anomalies in Houtuan mining area

西部,低缓异常为主。

Sb 异常:主要分布在后疃矿区北西部和中偏东部。北西部 Sb 异常分布范围大、浓度高。中偏东部 Sb 异常浓度高。南东部 Sb 异常规模相对较小。总体上,Sb 异常和 Au、Ag 异常有一定套合性。

Mn 异常:大规模、连续性好且高浓度的 Mn 异常主要分布在后疃矿区北西部,在中部和南东部可见小规模 Mn 异常。

Co 异常:有规模的 Co 异常主要分布在后疃矿区北西部和中部。北西部 Co 异常分布范围大,浓度高。中部 Co 异常为较分散的零星异常。南东部 Co 异常为零星低缓异常。

后疃矿区构造地球化学元素斜交参考因子结构矩阵见表1。由表1可知:与 Au 元素关系最密切的为 F2 和 F6 因子。其中,F2 因子特征元素组合为 Mo、Bi、Cu、Hg、As、Au,是与金矿化关系较为密切的因子,反映了金-多金属硫化物-菱铁矿-石英阶段热液活动和元素聚集特征。F6 因子特征元素组合为 Au、Bi、Ag、-Ba,是与金矿化关系最为密切的因子,反映 Au 与 Bi、Ag 的同步聚集关系,与金-石英-(浸染状或细脉状)黄铁矿阶段热液活动有关。因此,后疃矿区构造地球化学找矿标志为 Au-Ag-As-Sb 组合异常。

4 多极化电磁测深与异常分析

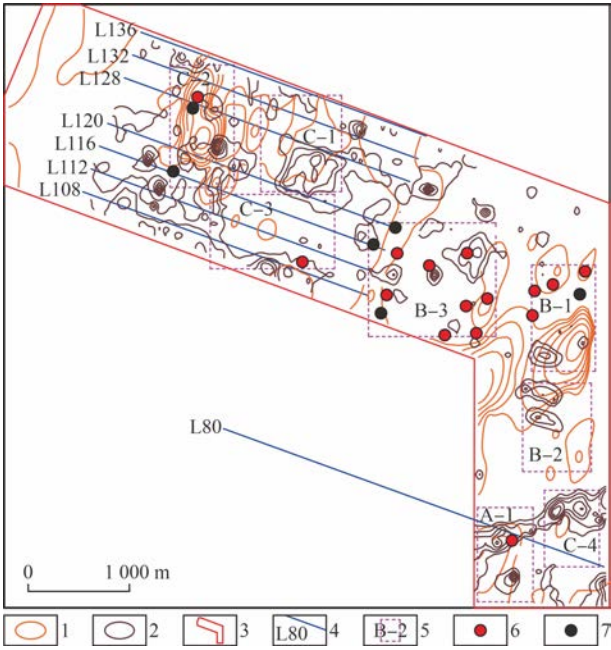
多极化电磁测深的基本原理是利用天然场源,通过在地面观测随时间变化的电磁场分量来探测地下的电性结构。在胶东地区金矿的找矿实践证明,大地电磁法是一种探测深度大、精度高、抗干扰性强的电磁测深技术^[5,7]。多极化电磁测深采用的仪器是中

表1 后疃矿区构造地球化学元素斜交参考因子结构矩阵
Table 1 Structural matrix of inclined intersection reference factors for tectonic geochemical elements in Houtuan mining area

元素	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Mn	0.868	0.091	0.201	0.442	-0.071	0.033
Ti	0.783	0.307	0.248	0.171	-0.083	-0.057
V	0.898	0.082	0.171	0.348	-0.088	-0.005
B	0.166	0.187	0.625	0.043	0.088	-0.023
Cr	0.348	0.020	0.154	0.946	0.125	-0.062
Co	0.860	0.214	0.194	0.611	-0.053	0.001
Ni	0.412	0.027	0.137	0.938	0.024	-0.029
Cu	0.496	0.830	0.317	0.048	0.068	-0.064
Zn	0.814	0.031	0.408	0.377	0.093	0.016
As	0.058	0.328	0.711	0.068	0.132	-0.158
Mo	0.202	0.898	0.391	0.023	0.018	-0.041
Ag	0.533	0.178	-0.163	-0.008	0.461	0.179
Sn	0.449	-0.016	0.663	0.101	0.311	0.070
Sb	0.102	0.189	0.691	0.177	-0.090	0.038
Ba	-0.302	0.155	-0.119	0.287	0.498	-0.418
Au	-0.051	0.244	-0.046	-0.028	0.097	0.894
Hg	0.052	0.586	0.081	0.045	0.063	0.097
Pb	-0.074	0.032	0.247	0.082	0.816	0.045
Bi	0.030	0.897	0.168	-0.004	0.079	0.317

南大学最新研发的 MPMT-18 多极化电磁测深系统,主要设备为 MPMT-18 主机和 ICMS-H 磁场传感器。该电磁传感器可实现 1~10⁵ Hz 频带的电磁信号采集,弥补了国外仪器高频不足的问题。

多极化电磁测深工作部署见图3。其中,L80 测线为试验剖面,异常反演深度达-3 000 m 标高,主测区位于后疃矿区北部 L108 测线—L136 测线,异常反演深度达-2 000 m 标高。

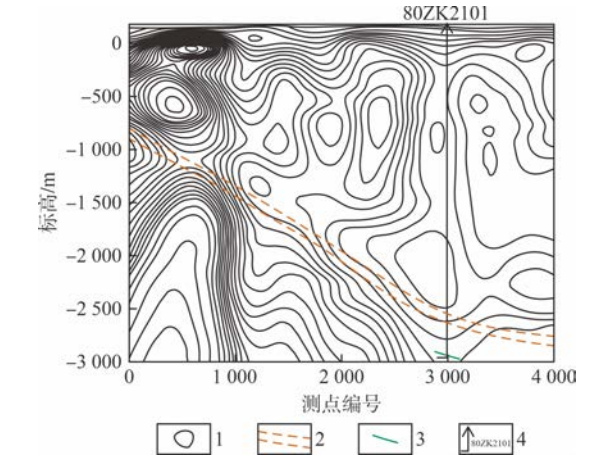


1—Au 异常 2—伽玛能谱总道异常
3—后窿矿区 4—多极化电磁测深测线及编号
5—找矿靶区及编号 6—见矿钻孔 7—未见矿钻孔

图3 后窿矿区找矿靶区预测图

Fig. 3 Prediction of prospecting targets in Houtuan mining area

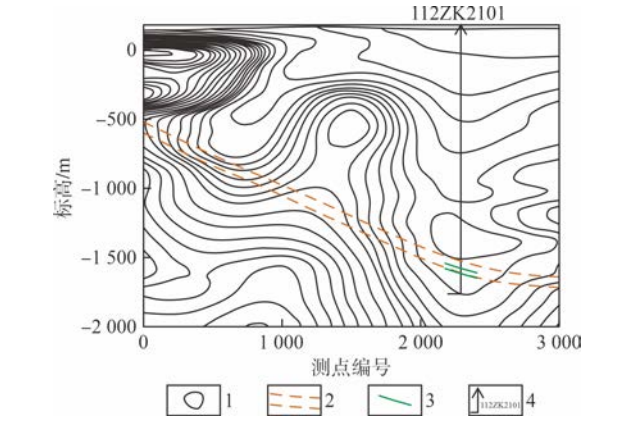
以 L80 测线和 L112 测线多极化电磁测深与异常反演为例。在后窿矿区 L80 测线多极化电磁测深二维反演电阻率等值线与钻探验证图(见图 4)上, -2 900 ~ -800 m 标高有一呈串珠状展布、向南东方向倾斜的中—低阻凹陷和高—低阻渐变组合异常, 推测为招平断裂通过处, 该断裂深部倾角变缓, 在 1800 测点右侧有显著扩容迹象。



1—电阻率等值线及异常值($\Omega \cdot m$) 2—推断招平断裂
3—矿体 4—验证钻孔及编号

图4 后窿矿区 L80 测线多极化电磁测深二维反演电阻率等值线与钻探验证图

在后窿矿区 L122 测线多极化电磁测深二维反演电阻率等值线与钻探验证图(见图 5)上, -1 700 ~ -500 m 标高有一呈串珠状展布、向南东方向倾斜的中—低阻凹陷和高—低阻渐变组合异常, 推测为招平断裂通过处, 该断裂深部倾角变缓, 在 1800 测点右侧有显著扩容迹象。



1—电阻率等值线及异常值($\Omega \cdot m$) 2—推断招平断裂
3—矿体 4—验证钻孔及编号

图5 后窿矿区 L122 测线多极化电磁测深二维反演电阻率等值线与钻探验证图

Fig. 5 Map for 2D inverse resistivity contour of multi-polarize electromagnetics and drilling verification in Line L122, Houtuan mining area

5 找矿靶区预测与钻探验证效果

本次圈定找矿靶区的主要依据是对深部隐伏矿体找矿标志的综合分析, 按构造地球化学异常规模、强度、组合, 多极化电磁测深异常特征, 结合伽玛能谱异常^[31], 并考虑到钻探工程验证的有利程度, 将找矿靶区划分为 A、B、C 3 级。本研究共圈定找矿靶区 8 处, 其中最为有利的 A 级找矿靶区 1 处, 较为有利的 B 级找矿靶区 3 处, 有一定找矿远景但找矿标志单一或异常空间套合性不够理想的 C 级找矿靶区 4 处(见图 3)。

研究设计验证钻孔 3 处, 首先施工的是位于 A-1 找矿靶区的 80ZK2101 钻孔和位于 C-3 找矿靶区的 112ZK2101 钻孔(见图 4、图 5)。

A-1 找矿靶区位于 L80 测线, 见矿岩芯进尺 3 100 ~ 3 101 m, 金品位 3.44×10^{-6} , 见矿实际位置较推断招平断裂位置深约 500 m, 表明 L80 测线多极化电磁测深二维反演电阻率异常分布与推断招平断裂位置较实际浅。

C-3 找矿靶区位于后窿矿区北部, 钻孔 112ZK2101 见矿岩芯进尺为 1 722.0 ~ 1 723.2 m、1 760.0 ~ 1 761.0 m, 对应金品位分别为 2.42×10^{-6}

和 1.75×10^{-6} , 与推断招平断裂位置基本吻合。

随后,陆续对 B-1、B-3、C-2 找矿靶区进行钻探工程验证,并先后见矿。验证效果最好的是 B-1 和 B-3 找矿靶区。

6 结 论

1) 根据后疃矿区成矿地质特征与深边部找矿性质,本次深部矿体定位预测研究采用了多元信息找矿策略和构造地球化学法-伽玛能谱法-多极化电磁测深技术组合。

2) 完成后疃矿区地表构造地球化学与伽玛能谱测量面积 12 km^2 ,发现多处 Au 元素为代表的多元元素组合异常,厘定后疃矿区构造地球化学找矿标志为 Au-Ag-As-Sb 组合异常。

3) 采用 MPMT-18 多极化电磁测深系统,完成了 L108 测线-L136 测线及 L80 测线多极化电磁测深和异常反演,确定了招平断裂位置。

4) 根据构造地球化学、伽玛能谱与多极化电磁测深异常特征、分布与关联性,结合钻探工程验证的有利程度,共圈定找矿靶区 8 处, A-1、B-1、B-3、C-2 和 C-3 找矿靶区经钻探工程验证并先后见矿。

【参考文献】

[1] 翟裕生,邓军,王建平,等.深部找矿研究问题[J].矿床地质,2004,23(2):142-149.
[2] 彭省临,邵拥军.隐伏矿体定位预测研究现状及发展趋势[J].大地构造与成矿学,2001,25(3):329-334.
[3] 宋明春.胶东金矿深部找矿主要成果和关键理论技术进展[J].地质通报,2015,34(9):1758-1771.
[4] 宋明春,杨立强,范宏瑞,等.找矿突破战略行动十年胶东金矿成矿理论与深部勘查进展[J].地质通报,2022,41(6):903-935.
[5] 杨斌,高星,彭省临,等.招平断裂带大尹格庄-后仓段深部矿体定位预测[J].中国有色金属学报,2012,22(3):872-879.
[6] 杨斌,王慧,阚靖,等.胶西北河东金矿多元异常信息找矿预测[J].地学前缘,2014,21(5):221-226.
[7] 梁琴琴,杨斌,闫复传,等.胶西北上庄金矿区多元异常信息找

矿预测[J].黄金,2014,35(2):13-17.
[8] 宋明春,崔书学,伊丕厚,等.山东省胶西北金矿集中区深部大型-超大型金矿找矿与成矿模式[M].北京:地质出版社,2010.
[9] 李士先,刘长春,安郁宏,等.胶东金矿地质[M].北京:地质出版社,2007.
[10] 陈毓川.实现找矿突破的探索[J].矿床地质,2011,30(5):767-772.
[11] 施俊法,唐金荣,周平,等.关于找矿模型的探讨[J].地质通报,2011,30(7):1119-1125.
[12] COX D P, SINGER D A. Mineral deposit models[M]. Denver: United States Geological Survey, 1986.
[13] 朱裕生.论矿床成矿模式[J].地质论评,1993,39(3):216-222.
[14] 肖克炎.试论综合找矿模型[J].地质与勘探,1994,30(1):41-45.
[15] 王世称.综合信息矿产预测理论与方法体系新进展[J].地质通报,2010,29(10):1399-1403.
[16] 孙华山,孙林,赵显辉,等.招掖地区郭家岭花岗岩控矿的几点证据及找矿指示意义[J].黄金,2007,28(4):14-18,31.
[17] 关康,罗镇宽,苗来成,等.郭家岭型花岗岩地球化学特征与金矿化的关系[J].地质找矿论丛,1997,12(4):1-8.
[18] 杨敏之,吕古贤.胶东绿岩带金矿地质地球化学特征[M].北京:地质出版社,1996.
[19] 朱奉三.混合岩化热液金矿床成矿作用初步研究——以招掖地区的金矿床为例[J].地质与勘探,1980,16(7):1-10.
[20] 申玉科,邓军,徐叶兵.煌斑岩在玲珑金矿田形成过程中的地质意义[J].地质与勘探,2005,41(3):45-49.
[21] 刘辅臣,卢作祥,范永香,等.玲珑金矿中基性脉岩与矿化关系探讨[J].地球科学,1984,9(4):37-45.
[22] 宋明春,伊丕厚,崔书学,等.胶东金矿“热隆-伸展”成矿理论及其找矿意义[J].山东国土资源,2013,29(7):1-12.
[23] 杨斌,周鑫,段磊,等.胶东大尹格庄金矿区构造演化与控矿作用[J].黄金,2020,41(9):35-40.
[24] 周鑫,杨斌,刘占坤,等.胶西北大尹格庄金矿区青磐岩化与金成矿关系[J].黄金,2019,40(6):13-17.
[25] 杨斌,赖建清,彭省临,等.动态成矿作用与找矿[M].北京:地质出版社,2014.
[26] 段磊,周鑫,杨斌,等.胶西北金成矿电化学作用探析[J].黄金,2020,41(7):12-16.
[27] 刘云杰,李晓英,向胤合,等.胶西北大尹格庄金矿区伽玛能谱法找矿预测[J].黄金,2022,43(3):3-6.
[28] 孙涛,王兴刚,向胤合,等.构造地球化学法在大尹格庄金矿区 I 号矿带的找矿应用[J].黄金,2022,43(12):5-8.
[29] 李衣鑫,刘汉栋,于晓卫,等.胶东地区招平断裂带南段构造地球化学特征及找矿方向[J].地质与勘探,2020,56(6):1105-1115.
[30] 钱建平,何胜飞,王富民,等.安徽省廖家地区地质地球化学特征和构造地球化学找矿[J].物探与化探,2008,32(5):519-524,528.
[31] 杨斌,席振铁,向胤合,等.伽玛能谱法在胶东大尹格庄金矿床后疃矿区的找矿应用[J].黄金,2023,44(7):19-22.

Deep ore body positioning and prediction in Houtuan mining area of Dayingezhuang Gold Deposit in Jiaodong

Gao Xuekan¹, Xi Zhenzhu^{2,3}, Xiang Yinhe⁴, Yang Bin^{2,3}, Liu Zhankun^{2,3}, Zou Yanhong^{2,3}

(1. Zhaojin Mining Industry Co., Ltd.; 2. School of Geosciences and Info-physics, Central South University; 3. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring (Central South University), Ministry of Education; 4. Hunan 5D Geophyson Co., Ltd.)

Abstract: Houtuan mining area is located on the periphery of the main mining area of Dayingezhuang Gold Deposit in Jiaodong, belonging to a deep and peripheral exploration area. Using a pluralized information exploration strategy, a combination of structure geochemistry - gamma spectroscopy - multi-polarize electromagnetics techniques was used to carry out ore prediction in the deep and peripheral areas of Houtuan mining area. Surface structure geochemistry and gamma spectroscopy measurements covering area 12 km^2 were conducted, and through factor analysis, Au-Ag-As-Sb combination anomalies were identified as prospecting indicators in Houtuan mining area. Additionally, using the MPMT-18 multi-polarized magnetotelluric system, multi-polarize electromagnetics and anomaly inversion along Measurement Line L108-L136 and L80 were completed, determining the location of the deep Zhaoping fault in Houtuan mining area. Based on the anomalous features, distribution, and correlation of structural geochemical measurements, gamma spectroscopy measurements, and multi-polarize electromagnetics, combined with the favorable degree verified by drilling projects, a total of 8 exploration targets were identified. Among them, the A-1, B-1, B-3, C-2, and C-3 exploration targets were verified by drilling projects and yielded mineralization.

Keywords: deep ore body; positioning prediction; multi-polarize electromagnetics; structural geochemical method; Houtuan mining area; Dayingezhuang Gold Deposit