

招平断裂带大尹格庄—后仓段深部矿体定位预测

杨 斌^{1,2}, 高 星^{1,2}, 彭省临^{1,2}, 席振铎^{1,2}, 张道军^{1,2}, 刘庚寅^{1,2},
陈 燕^{1,2}, 刘贤红^{1,2}, 李守生³, 王 慧³, 窦源东³, 杨玉泉³

(1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083; 3. 山东招金集团, 招远 265400)

摘 要: 大尹格庄—后仓测区位于招平断裂带中段之大尹格庄金矿东侧。根据深部探矿目标区的特点和方法的有效性试验, 选择构造地球化学测量和大地电磁测深作为深部矿体定位预测的手段。本次地表构造地球化学测量范围约 8 km², 在测区中部、东部和西部发现 3 处成规模的 Au 元素异常带, 结合因子分析, 提出 Au-As-Hg-Cu-Pb-Zn 元素组合异常对应深部成矿流体活跃地段, Au 和 As 元素可作为深部矿体预测的主要标志元素, Cu、Pb、Zn 等元素异常更多地反映了多金属硫化物成矿阶段流体活跃的地段, 可作为辅助标志。岩、矿石样品电阻率测定显示, 与招平断裂带有直接空间关系的富矿石、黄铁绢英岩化蚀变岩及断层泥表现为显著的低阻体, 与上、下盘的胶东群变质岩和玲珑花岗岩电阻率值差异明显, 为大地电磁测深的有效性提供了依据。根据大地电磁法获得的深部呈串珠状分布的低阻异常, 圈定出玲珑花岗岩与胶东群变质岩界线、招平断裂带位置, 深部低阻异常中心指示了断裂带局部膨大和成矿有利部位。根据构造地球化学元素组合异常和大地电磁测深电阻率异常的空间分布关系, 共圈定找矿靶位 8 处, 钻探工程验证在 1 150~1 450 m 深度发现了金矿体。

关键词: 深部矿体定位预测; 构造地球化学; 大地电磁测深; 大尹格庄—后仓测区; 招平断裂带

中图分类号: P612

文献标志码: A

Oriental prognosis of deep orebodies in Dayingezhuang—Houcang mining area of Zhaoping fault zone

YANG Bin^{1,2}, GAO Xing^{1,2}, PENG Sheng-lin^{1,2}, XI Zhen-zhu^{1,2}, ZHANG Dao-jun^{1,2}, LIU Geng-yin^{1,2},
CHEN Yan^{1,2}, LIU Xian-hong^{1,2}, LI Shou-sheng³, WANG Hui³, DOU Yuan-dong³, YANG Yu-quan³

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education,
Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

3. Shandong Zhaojin Group Corporation, Zhaoyuan 265400, China)

Abstract: Dayingezhuang—Houcang surveying area is located in the east part of Dayingezhuang gold deposit, which situates in the middle part of Zhaoping fault zone. Tectonic geochemistry and magnetotelluric sounding (MT) were chosen as the means for oriental prognosis of deep orebodies according to the characteristic of target area in depth and the efficiency of technique test. The area of tectonic geochemical measurement is about 8 km². Three scaled anomalies of Au were found in the middle, east and west parts of the surveying area. Integrated with factor analysis, the combined anomalies of Au-As-Hg-Cu-Pb-Zn could be considered as the active sites of ore-forming fluid. Au and As were the main marked elements of ore prediction. The anomalies of Cu, Pb and Zn were subsidiary signs. The resistivity measurement of rock and ore samples shows that the ore, beresite and fault gouge in Zhaoping fault zone are low-resistance bodies, which have an obvious difference from the metamorphic rocks of Jiaodong group and Linglong granite in the hanging

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAB01B07); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB416608)

收稿日期: 2011-12-01; 修订日期: 2012-02-11

通信作者: 杨 斌, 高级工程师, 博士; 电话: 0731-88836469; E-mail: 903755562@qq.com

wall and footwall. The obvious difference also provides basis for the effectiveness of MT magnetotelluric sounding. According to catenular low-resistance anomalies acquired by MT method in the deep, the boundary line between metaorphic rocks of Jiaodong group and Linglong granite is defined, which means the position of Zhaoping fault zone. The centre of low-resistance anomalies indicates the topical swell of fault zone and the favourable ore-forming positions. Eight prospecting targets are delineated according to spatial relations between element association anomalies of tectonic chemistry and resistance anomalies of magnetotelluric sounding. A gold orebody is discovered at the depth from 1 150 m to 1 450 m by drillings.

Key words: oriental prognosis of deep orebody; tectonic geochemistry; magnetotelluric sounding; Dayingezhuang—Houcang surveying area; Zhaoping fault zone

随着找矿深度和难度的不断加大,寻找隐伏矿床(体)和深部矿床(体)已成为众多国家和矿业公司新的勘查策略。正如 1993 年美国国家研究委员会指出的“正确描述和模拟成矿过程,并提高预测可能位置的能力,应是 21 世纪地学发展的主要方向之一”。

尽管地球化学、地球物理和遥感等技术已取得了长足的发展,但没有哪一套单独的数据握有矿床发现的钥匙,每一套数据都含有这个未解之迷的一小片,在这种勘探程度高的矿集区进行找矿,关键在于如何根据地质背景、成矿特征和工作环境,选取有效的技术组合,以及如何从所获的资料中抽出与找矿相关的信息,并将这些有用的信息综合集成得出更可靠的预测结论^[1]。

针对深部矿勘查难度较大的现状,为了减小深部矿勘查的盲目性和风险性、提高深部矿勘查工作的有效性,深部找矿的地质成矿理论研究和深部找矿技术与方法的研究目前已成为深部矿勘查研究的热点^[2]。

在成矿理论研究方面,以“多物质来源、多成矿阶段、多成矿作用、多成因类型和多控矿因素”为特征的“多因复成矿床”理论的提出^[3],是地洼递进成矿理论的重要组成部分,强调了矿床形成过程中的继承性和递进性,已成为找矿预测的重要理论依据。成矿系统概念和理论的提出^[4],强调了在一定地质时、空域中,控制矿床形成和保存的全部地质要素和成矿作用过程,以及所形成的矿床系列和异常系列构成的整体,对已有矿山的深、边部隐伏矿体进行综合定位预测具有现实的意义。在深部找矿技术与方法方面,物探的大地电磁法(MT)、可控源音频大地电磁法(CSAMT)、瞬变电磁法(TEM)、高精度磁法、金属矿地震方法试验等大深度探测技术的应用越来越广泛^[5],化探的构造地球化学法、地电化学法、地气法、活动态金属离子法、酶浸析法等深穿透方法的探索等也受到越来越多的关注^[6-7]。

大尹格庄金矿以往勘探深度已超过 1 000 m,钻探资料显示,在地表下 900~1 100 m 深度范围矿体有明

显变薄和尖灭的趋势。因此,在该测区深部找矿的关键有两点:一是确定处于招平断裂带延深部位的大尹格庄矿区东侧至后仓段深部(地表下 1 100~2 000 m 深度)是否有矿;二是用何种技术手段捕捉测区内 2 000 m 深度范围的潜在矿体异常信息并对隐伏矿体可能的赋存空间给出有效的预测。

1 矿区地质概况

大尹格庄金矿床位于招平断裂带的中段,北东距招远市约 18 km,是胶东地区著名的大型金矿床之一。区内胶东群变质岩及玲珑花岗岩广泛出露,各类脉岩及断裂构造发育(见图 1)。

矿区内断裂主要有招平断裂、大尹格庄断裂、南周家断裂、南沟断裂等。招平断裂在矿区内总体走向 NNE20°,倾向 SE,倾角 21°~58°,宽 40~80 m,由糜棱岩、碎裂岩及断层泥等组成。矿体大部分赋存于招平断裂主裂面下盘的黄铁绢英岩化碎裂岩和黄铁绢英岩化花岗岩中。主裂面上盘主要为胶东群变质岩,发育有碳酸盐化、绿泥石化与褐铁矿化蚀变。

矿区内共有 2 个矿体群,以大尹格庄断裂为界,南部为 I 号矿体群,北部为 II 号矿体群,它们均呈隐伏状态分布于招平断裂带的下盘,矿体形态、产状和分布严格受招平断裂带的控制。金矿体有 2 个主成矿阶段,即石英-黄铁矿(浸染状或细脉状)阶段和石英-黄铁矿-多金属硫化物阶段,前者是矿区金的主要成矿阶段,后者与黄铜矿、闪锌矿、方铅矿等多金属硫化物的形成有关,亦伴随有金(银金矿为主)的沉淀,叠加在前一阶段之上,形成金的局部富集。

2 测区深部矿体定位预测的主要策略与方法

成矿过程的遗迹和矿体本身的异常都可以作为追

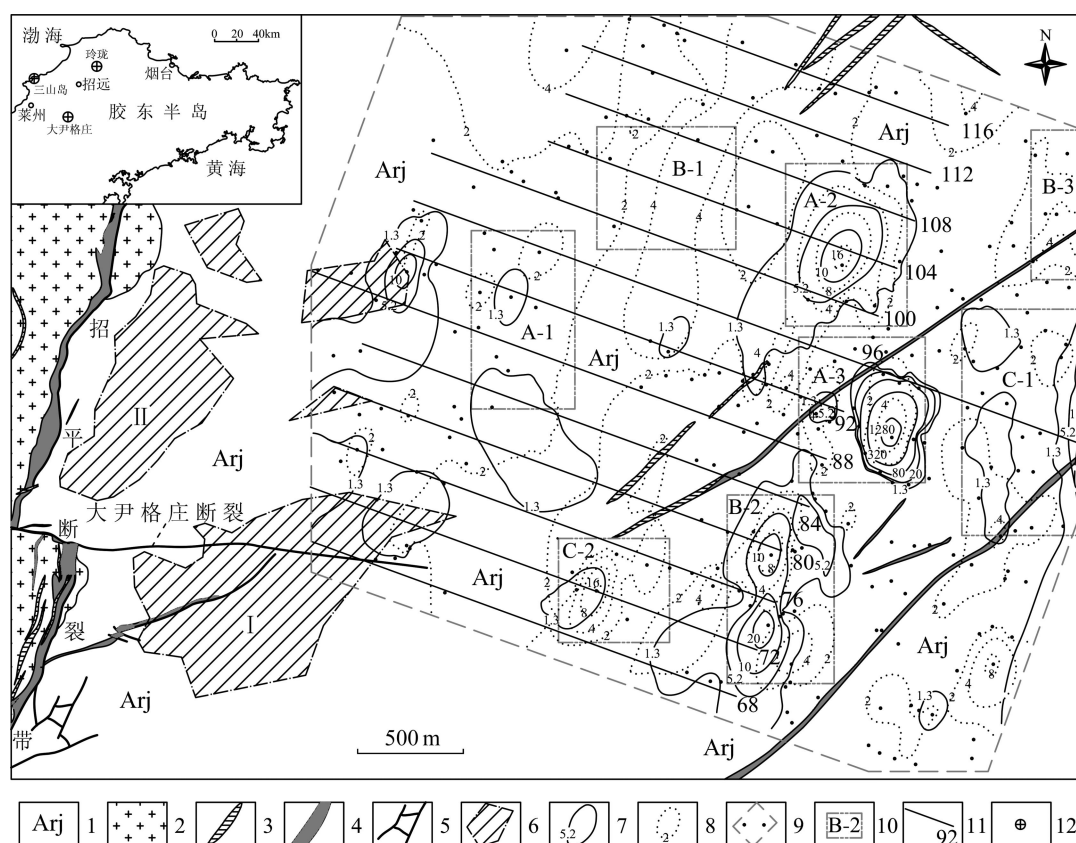


图1 大尹格庄—后仓测区构造地球化学异常分布与找矿预测图

Fig. 1 Distribution of tectonic geochemical anomalies and ore prediction in Dayingezhuang—Houcang surveying area: 1—Jiaodong group metaorphic rocks; 2—Linglong granite; 3—Diorite porphyrite; 4—Fracture zone; 5—Fault; 6—Horizontal projections of orebody I and orebody II; 7—Isoanomalous contour line and concentration of Au; 8—Isoanomalous contour line and concentration of Hg; 9—Measuring area of tectonic geochemistry and sampling sites; 10—Prospecting target and serial numbers; 11—Position of magnetotelluric sounding (MT) survey lines and serial numbers; 12—Gold deposits

踪和指示矿体存在的标志, 对它们作全面研究是深部找矿的一个基本手段^[8]。而鉴于使用某种单一技术所获得的异常信息往往有其局限性或多解性, 探索不同地质环境下找矿方法的组合, 成为当前进行深部矿体定位预测的有效途径。

大尹格庄—后仓测区位于招平断裂带深部探矿目标区所对应的地表区域, 测区内地质露头较发育, 闪长玢岩和伟晶岩脉露头多见, 石英脉、褐铁矿脉发育, 岩石钾化、硅化、绿泥石化、碳酸盐化蚀变现象普遍, 显示沿招平断裂带发生的热液成矿作用对该断裂带上盘岩石有显著影响。因此, 在找矿策略上确定了化探和物探相结合的技术路线, 其中化探测量的目的是在测区地表寻找能反映深部成矿热液活动的元素异常区, 物探测量的目标是探测深部招平断裂带位置及反映断裂带局部膨大和成矿有利部位的低阻异常中心。

通过方法的论证和有效性试验, 化探方法选择了构造地球化学测量, 物探技术则选择了大地电磁法

(MT)。国内外找矿实践证明, 勘查地球化学方法在矿产勘查工作中是一种快速、有效的技术手段, 其中原生晕找矿方法从20世纪50年代起到现在, 已发展成为地球化学找矿的最主要方法之一, 尤其是在找隐伏矿床方面更具优势^[9-10]。“构造地球化学”这一个概念由我国著名的地质科学家陈国达院士(1983)提出。通过国内外学者的共同努力, 这一学科在理论深度和实践应用上都得到了长足的发展。目前, 构造地球化学已被广泛应用于成矿作用理论研究和隐伏矿床找矿预测。构造地球化学测量属于原生晕技术范畴, 主要是通过分析、研究导通性构造控制的、由热液蚀变晕、流体渗滤和流体扩散而形成的构造地球化学晕的空间分布、形态、规模、元素组合、变化规律及其与控矿构造及其他相关成矿因素间的关系来预测分析潜在隐伏矿体。它在许多方面优于传统的原生晕技术, 主要表现在构造地球化学方法可以更有效地探测深部隐伏矿化在地表形成的微弱地球化学异常, 并且由于充分

考虑了地质构造对成矿晕的控制, 因而更加便于异常机理的解释。大地电磁法(MT), 是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。主要优点是: 勘探深度可从地表至几公里, 乃至上百公里, 取决于仪器所能记录的频率范围; 对高导层(体)十分敏感, 有利于寻找高导矿体; 横向分辨率高, 有利于圈定构造和岩体边界; 仪器设备轻便; 二维反演成熟, 也可进行三维反演^[11]。本次测量中采用的是德国 Metronix 公司研制的一种全新概念的 GMS-07 综合电磁法仪, 利用的场源是起源于高空电离层中和赤道雷击的天然场源, 设计探测深度为地表下 2 000 m。

3 大尹格庄—后仓段构造地球化学异常分析

本次地表构造地球化学测量包括大尹格庄—后仓测区约 8 km² 范围(图 1), 共采集构造地球化学样品 290 件, 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 共 19 个。

测区 Au 元素异常表现为分布范围大, 异常值高的特点(见图 1)。测区中部 Au 异常带规模最大, Au

异常值最高, 异常带呈近北北东向展布, 延伸距离近 3 000 m。出现多处 Au 异常高值点, Au 含量最高达到 $2\,228 \times 10^{-9}$ 。测区东部也出现成规模的连续 Au 元素异常带, 南北向延伸距离近 1 500 m, 该异常向东尚未封闭。测区西侧也有 Au 元素异常, 南北向延伸距离约 1 000 m, 该异常与深部已知矿体在垂向上明显的空间对应关系。

As、Hg 等头晕元素异常中心与 Au 元素异常中心的套和性明显。Cu、Pb、Zn、Ag 等元素异常中心与 Au 异常中心有明显分离, 呈现出元素套合性与分带性并存的特点。因子分析显示(见表 1), Au 元素有 2 次明显的活化—聚集过程, 分别对应于金矿化的 2 个阶段。从与 Au 元素有关的元素活化与元素聚集组合看, 矿石中的 Au 元素有 2 种主要来源, 即胶东群变质岩和玲珑花岗岩。其中 F2 因子轴元素组合为-Hg、-As、-Bi、-Pb、-Cu、-Mo、-Sb, 反映了以 Hg、As 为代表的一组亲铜元素的活化(负号表示取负值)。头晕元素 Hg、As 和尾晕元素 Bi、Mo 同时出现在该因子中, 显示它们是在同一热事件中发生活化的, 在该事件中 Au 有较微弱活化。F3 因子轴元素组合为-Mo、-Au、-Co、-Bi、-Pb、-Sn、-Mn、-Ba、-As, 反映了以 Mo、Au 为代表的一组元素的活化事

表 1 构造地球化学元素斜交参考因子结构矩阵

Table 1 Promax factors structure matrix of tectonic geochemical elements

Element	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Cu	0.354	-0.411	-0.152	0.182	0.130	0.004	-0.094	0.497	-0.255	-0.784
Pb	0.031	-0.500	-0.477	0.104	0.241	-0.014	0.119	0.847	0.209	-0.506
Mn	0.547	-0.018	-0.454	0.420	0.340	0.228	0.168	0.256	-0.785	-0.270
Cr	0.326	0.099	-0.052	0.926	0.033	0.104	0.031	0.053	-0.224	-0.055
Ni	0.404	0.065	-0.119	0.948	0.064	0.090	0.015	0.121	-0.379	-0.100
Mo	0.118	-0.402	-0.961	0.147	0.264	0.023	0.276	0.494	-0.134	-0.411
Sn	0.675	-0.095	-0.467	0.390	0.298	0.460	0.106	0.357	-0.106	-0.708
V	0.874	0.117	-0.118	0.498	0.171	0.290	-0.055	0.127	-0.548	-0.382
Ag	0.052	-0.551	-0.370	0.086	0.150	0.006	0.061	0.896	-0.250	-0.420
Ti	0.871	0.115	-0.162	0.320	0.149	0.291	-0.018	0.099	-0.273	-0.303
Zn	0.821	0.126	-0.158	0.501	0.486	0.437	-0.212	0.269	-0.394	-0.065
Co	0.720	-0.176	-0.656	0.705	0.256	0.211	0.085	0.505	-0.538	-0.522
B	0.253	-0.124	-0.079	0.088	0.312	0.961	0.080	0.091	-0.041	-0.083
Ba	0.170	-0.038	-0.349	0.206	0.161	0.169	0.947	0.142	-0.200	-0.127
As	-0.085	-0.884	-0.305	0.053	0.354	0.075	0.077	0.449	0.148	-0.594
Sb	0.076	-0.312	-0.164	0.000	0.920	0.222	0.067	0.249	-0.167	-0.074
Bi	-0.073	-0.807	-0.503	0.068	0.198	-0.095	0.089	0.794	0.135	-0.644
Hg	0.023	-0.907	-0.276	-0.005	0.229	0.138	0.021	0.575	-0.028	-0.269
Au	0.099	-0.164	-0.910	0.097	0.134	0.023	0.294	0.350	-0.221	-0.164

件,与 Au 的主要成矿阶段有关,Co、Mn 等元素在该因子轴中的出现,可能反映这组元素是从富 Co、Mn 的胶东群变质岩中活化的。F5 因子轴元素组合为 Sb、Zn、As、Mn、B,反映了头晕元素 Sb、As 的聚集及 Zn、Mn、B 等元素的伴生。F7 因子轴元素组合为 Ba、Au、Mo,反映了 Ba 的聚集,并伴有元素 Au、Mo 的聚集,可能与矿石中重晶石的生成有关。F8 因子轴元素组合为 Ag、Pb、Bi、Hg、Co、Cu、Mo、As、Au,反映了 Au 的主成矿阶段元素聚集和伴生关系,与“金-多金属硫化物成矿阶段”相吻合。F10 因子轴元素组合为-Cu、-Sn、-Bi、-As、-Co、-Pb、-Ag、-Mo,反映了以 Cu、Bi、As 等元素为代表的多金属元素活化事件之一,与 F8 因子轴有明显的对应性。

李惠等^[12]对胶东地区 8 个特大型金矿床、9 个大型金矿床、4 个小型金矿床的原生晕分带进行的研究表明,地球化学性质活泼和具挥发性的 Hg、As、Sb、Ba、B、F 等元素总是出现在矿体前缘及矿体上部,Ag、Cu、Pb、Zn 等元素总是与 Au 共同出现在矿体中部,而 Bi、Mo、Mn、Co、Ni 等元素总是出现在矿体下部及尾晕。另外,当矿体处于不同剥蚀深度时,其元素组合及异常强度往往表现出一定差异^[13]。因此,依据元素轴向组合可以判别金矿剥蚀深度。当矿体剥蚀较浅时,以前缘晕或近矿晕元素 As、Sb、Au、Ag、Cu、Pb、Zn 组合为特点,尾晕元素 Mo、Bi 异常强度低;当矿体处于中等剥蚀深度时,矿体出露于地表,元素组合齐全,异常范围较大,尾晕元素 Mo、Bi 异常强度升高;当矿体剥蚀较深时,大部分矿体被剥蚀掉,尾晕元素 Mo、Bi 异常强度很强,前缘晕元素 As、Sb 异常较弱。

就大尹格庄一后仓测区而言,该区地表构造地球化学元素异常分布反映的是远离深部隐伏矿体的浅部

条件下元素分布特点,Au、As 等元素是通过与深部招平断裂带相贯通的断裂裂隙系统发生了远距离迁移,并造成 Au、As 与 Cu、Pb、Zn、Ag 等元素在空间上的分带。Au-As-Hg-Cu-Pb-Zn 元素组合异常对应深部成矿流体活跃地段。Au 和 As 元素可作为深部矿体预测的主要标志元素,Cu、Pb、Zn 等元素异常更多地反映了多金属硫化物成矿阶段流体活跃的地段,可作为辅助标志。

4 MT 法大地电磁测深异常特征

岩、矿石样品物性参数测定显示(见表 2),与招平断裂带有直接空间关系的富矿石、(黄铁)绢英岩化蚀变岩及断层泥表现为显著的低阻体,与上、下盘的胶东群变质岩和玲珑花岗岩电阻率值差异明显,为大地电磁测深的有效性提供了依据。

根据深部出现的串珠状分布的低阻异常,圈定出玲珑花岗岩与胶东群变质岩界线及招平断裂带位置,深部低阻异常中心则指示了断裂带局部膨大和成矿有利部位(见图 2)。

据物探信息和钻孔揭露情况分析,招平断裂带主断裂在 1 000 m 深度以下倾角有变缓趋势,平均倾角在 20° 到 25° 之间(见图 2)。

5 找矿靶位优选与深部矿体定位预测效果

找矿靶位圈定的主要依据是构造地球化学元素组合异常和大地电磁测深电阻率异常,并按化探异常规

表 2 大尹格庄金矿岩(矿)石标本电阻率测定结果

Table 2 Resistivity measuring results of rocks and ores in Dayingezhuang gold deposit

Lithology	Sample count	$\rho/(\Omega\cdot\text{m})$	
		Range	Mean value
Gold ore	2	21.69–14.68	18.19
Berecite	2	718.09–1424.91	1 071.50
Beresitization cataclasite	3	153.25–365.74	243.55
Gouge in Zhaoping fault zone	1	56.47	56.47
Sericitic alteration diorite porphyrite	4	290.06–750.84	508.24
Lamprophyre	3	1 993.04–10 821.31	5 624.88
Potash feldspathization granite	4	1 482.74–2 719.36	2 014.06
Fresh granite	2	4 825.82–8 600.2	6 713.01
Metamorphic rock of Jiaodong group	5	712.7–2 893.49	1 492.92

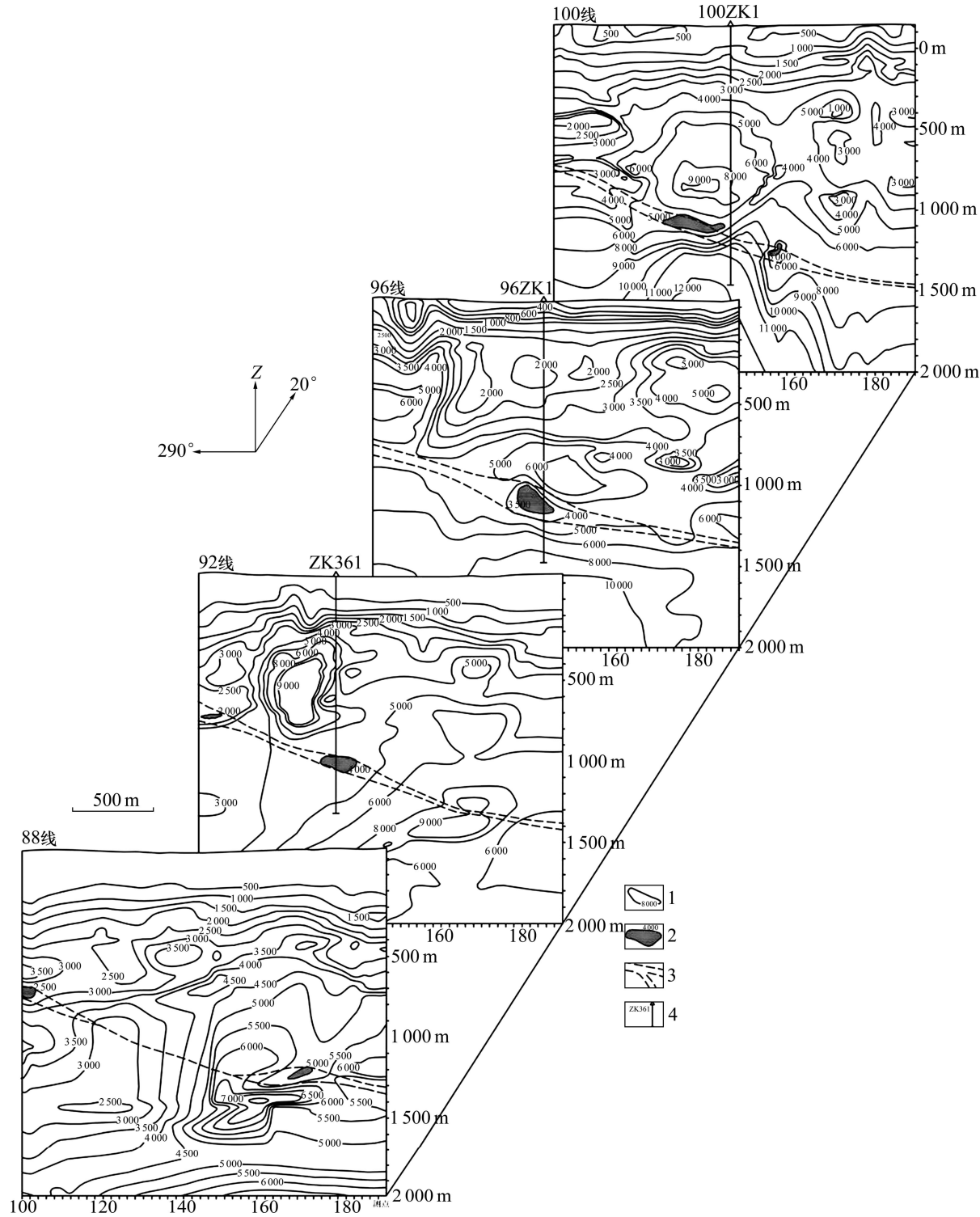


图 2 大尹格庄—后仓测区大地电磁测深二维反演电阻率等值线联合剖面图

Fig. 2 Associated profiles of planar inverting resistivity isoline of magnetotelluric sounding in Dayingezhuang—Houcang surveying area: 1—Planar inverting resistivity isoline of magnetotelluric sounding; 2—Low-resistance anomaly center in the deep; 3—Speculative Zhaoping fault zone; 4—Proof drillholes

模、强度、元素组合，物探低阻异常深度，并结合钻探工程验证的有利程度将找矿靶位分为 A、B、C 共 3 级，圈定找矿靶位 8 处，其中 A 级和 B 级靶位各 3 处，C 级靶位 2 处。

根据找矿靶位预测成果进行了钻探工程验证，首先验证的是 A-1 靶位，第一个验证钻孔编号 ZK361，该钻孔在 92 线 1 260~1 286 m 深度揭露 2 层工业矿体，与设计的钻孔见矿位置基本吻合(见图 2 和图 3)。之后

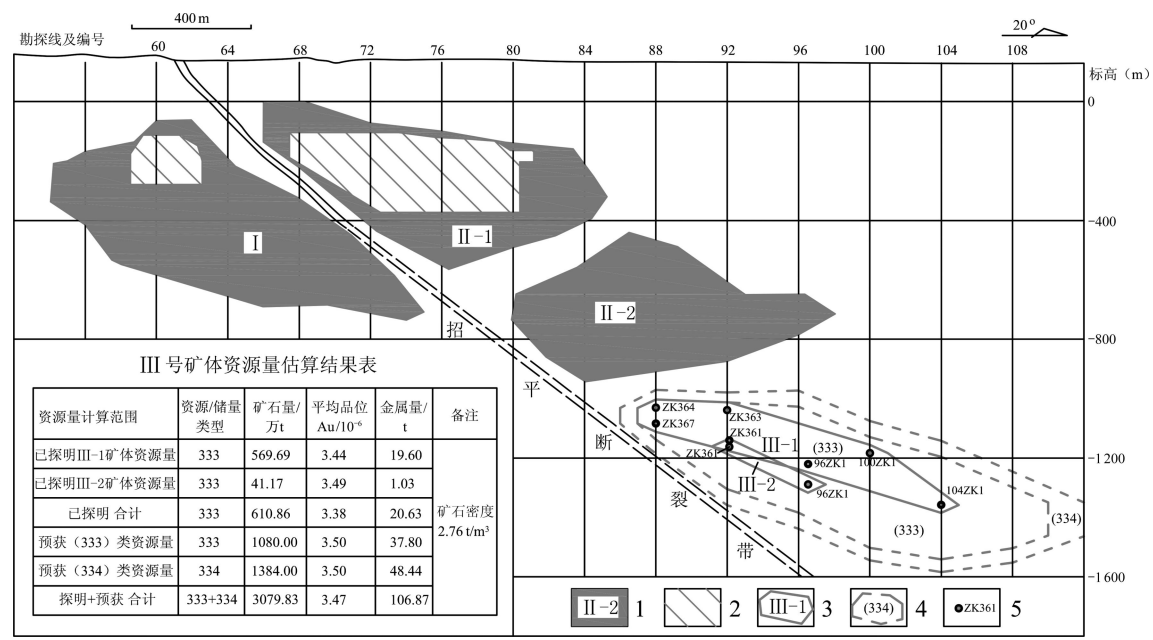


图 3 大尹格庄金矿床矿体垂直纵投影图

Fig. 3 Vertical longitudinal projection drawing of orebodies in Dayingezhuang gold deposit: 1—Orebody I and orebody II and serial numbers; 2—Gob area; 3—Orebody III and serial numbers; 4—Predicted gold resource volume; 5—Positive drillholes and serial numbers

实施了 ZK364、ZK367、ZK363、96ZK1、100ZK1、104ZK1 等钻孔，先后在 88 线、96 线、100 线及 104 线，深度 1 150~1 450 m 范围发现深部隐伏矿体。新发现矿体编号为 III 号，预测金资源量(334)106.87 t，其中已探获内蕴经济资源量(333)20.63 t (见图 3)。

6 结论

- 1) 通过方法的论证和有效性试验，化探方法选择了构造地球化学测量，物探技术则选择了大地电磁法(MT)。
- 2) Au-As-Hg-Cu-Pb-Zn 元素组合异常对应深部成矿流体活跃地段。Au 和 As 元素可作为深部矿体预测的主要标志元素，Cu、Pb、Zn 等元素异常更多地反映了多金属硫化物成矿阶段流体活跃的地段，可作为辅助标志。
- 3) 根据深部出现的串珠状分布的低阻异常，圈定出玲珑花岗岩与胶东群变质岩界线及招平断裂带位置，深部低阻异常中心则指示了断裂带局部膨大和成矿有利部位。
- 4) 根据找矿靶位预测成果进行了钻探工程验证，先后在 88 线、96 线、100 线及 104 线，深度 1 150~1 450 m 范围发现深部隐伏矿体。

REFERENCES

[1] KNOX-ROBINSON C M. Vectorial fuzzy logic: A novel technique for enhanced mineral prospectivity mapping, with reference to the orogenic gold mineralisation potential of the Kalgoorlie Terrane, Western Australia [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2000, 47(5): 929-941.

[2] 曹新志, 张旺生, 孙华山. 我国深部找矿研究进展综述[J]. 地质科技情报, 2009, 28(2): 104-109.

CAO Xin-zhi, ZHANG Wang-sheng, SUN Hua-shan. Progress in the study of deep exploration in China [J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(2): 104-109.

[3] 陈国达. 多因复成矿床并从地壳演化规律看其形成机理[J]. 大地构造与成矿学, 1982, 6(1): 1-55.

CHEN Guo-da. Polygenetic compound deposit and its forming mechanism based on crustal evolutionary regularity [J]. Geotectonica et Metallogenia, 1982, 6(1): 1-55.

[4] 翟裕生. 论成矿系统[J]. 地学前缘, 1999, 6(1): 13-27.

ZHAI Yu-sheng. Dissertation on metallogenic system [J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(1): 13-27.

[5] 腾吉文, 刘建明, 刘 财, 姚敬金, 韩立国, 张永谦. 第二度空间金属矿产勘查与东北战略后备基地的建立和可持续发展 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(4): 633-651.

TENG Ji-wen, LIU Jian-ming, LIU Cai, YAO Jing-jin, HAN Li-guo, ZHANG Yong-qian. Prospecting for metal ore deposits

- in second deep space of crustal interior, the building of strategy reserve base of Northeast China [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(4): 633–651.
- [6] 谢学锦. 战术性与战略性的深穿透地球化学方法[J]. 地学前缘, 1998, 5(1/2): 171–183.
- XIE Xue-jin. Tactical and strategic methods of deep-penetrating geochemistry [J]. Earth Science Frontiers, 1998, 5(1/2): 171–183.
- [7] 李 惠, 岑 况, 沈镛立, 吴悦斌, 张国义, 张连发, 禹 斌. 危机矿山深部及其外围盲矿预测的化探新方法及其最佳组合[J]. 地质与勘探, 2006, 42(4): 62–66.
- LI Hui, CEN Kuang, SHEN Yong-li, WU Yue-bin, ZHANG Guo-yi, ZHANG Lian-fa, YU Bin. New geochemical methods and best technique combination for prediction of blind orebody in the deep and surrounding of crisis mines [J]. Geology and Prospecting, 2006, 42(4): 62–66.
- [8] 翟裕生, 邓 军, 王建平, 彭润民, 刘家军, 杨立强. 深部找矿研究问题[J]. 矿床地质, 2004, 23(2): 142–149.
- ZHAI Yu-sheng, DENG jun, WANG Jian-ping, PENG Run-min, LIU Jia-jun, YANG Li-qiang. Researches on deep ore prospecting [J]. Mineral Deposits, 2004, 23(2): 142–149.
- [9] 刘崇民. 金属矿床原生晕研究进展[J]. 地质学报, 2006, 80(10): 1528–1538.
- LIU Chong-min. Progress in studies on primary halos of ore deposit [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(10): 1528–1538.
- [10] 蒋永建, 魏俊浩, 周京仁, 王忠铭, 纪兆家, 王发艳. 勘查地球化学新方法在矿产勘查中的应用及其地质效果[J]. 物探与化探, 2010, 34(2): 134–138.
- JIANG Yong-jian, WEI Jun-hao, ZHOU Jing-ren, WANG Zhong-ming, JI Zhao-jia, WANG Fa-yan. The application of new geochemical exploration methods to mineral exploration and its geological effect [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(2): 134–138.
- [11] 刘国栋. 矿产资源调查的物探方法和仪器设备[J]. 物探与化探, 2007, 31(S): 35–52.
- LIU Guo-dong. Geophysical methods and instruments for mineral resource survey [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 31(S): 35–52.
- [12] 李 惠, 王支农, 张文华, 李富国, 刘宝林. 山东招远灵山沟金矿床的叠加成矿成晕模式[J]. 桂林工学院学报, 1998, 18(2): 124–130.
- LI Hui, WANG Zhi-nong, ZHANG Wen-hua, LI Fu-guo, LIU Bao-lin. The model of superimposed metallogenic halos in Lingshangou gold deposit, Zhao Yuan, Shan Dong [J]. Journal of GuiLin Insititute of Technology, 1998, 18(2): 124–130.
- [13] 胡受奚, 王鹤年, 王德滋, 张景荣. 中国东部金矿地质学及地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- HU Shou-xi, WANG He-nian, WANG De-zi, ZHANG Jing-rong. Geology and geochemistry of gold mine in Eastern China [M]. Beijing: Science Press, 1998.

(编辑 何学锋)