

# 焦家金矿带 2000m 以深隐伏矿体的井中地物化综合探测

张文<sup>1</sup>, 董学<sup>1</sup>, 孙斌<sup>1,\*</sup>, 王英鹏<sup>1</sup>, 于晓卫<sup>1</sup>, 彭观峰<sup>1</sup>, 王珣<sup>2</sup>, 王欣然<sup>2</sup>, 王润生<sup>2</sup>, 王志新<sup>3</sup>, 张德明<sup>4</sup>

1. 山东省地质调查院, 济南 250014
2. 山东省物化探勘查院, 济南 250013
3. 山东省第三地质矿产勘查院, 烟台 264000
4. 山东省第四地质矿产勘查院, 潍坊 261021

**摘要:** 随着胶东金矿勘查深度持续加大, 地表探测技术的矿化信息提取能力、解译精度有所下降, 更为直接有效的井中地物化组合技术亟需探索并应用。焦家金矿带 2000m 以深的系统探矿近期在招贤金矿北段揭露大尺度金富集段, 获得重要找矿进展, 其中 120ZK07 单孔累计见矿厚度 82.71m, 为目前钻孔揭露最厚的深部矿体。主成矿阶段石英黄铁矿脉强烈发育, 矿体规模、矿化强度向深部呈增加趋势, 推断为在侧伏方向上越过浅部弱矿间隔后 200m 垂向等间距的富矿段顶部。在胶东地区首次应用五方位地一井瞬变电磁测量 (SBTEM), 各线圈异常段的感应电动势曲线特征相似, 推测蚀变带、矿体在井口四周 200m 范围延伸较稳定。构造蚀变矿化网络描述标定 T1 线圈成矿指示段深度 1750m~2060m, 与浅部 T3 线圈推断的蚀变带产状同已知蚀变带产状一致, 沿走向的 T2、T4 和向深部的 T5 线圈曲线相似特征段作为各自成矿指示段。大尺度金富集段的构造叠加晕特征为近矿晕套合前缘晕且尾晕元素弱异常, 推测其处于浅部富矿段尾端和深部富矿段前端的重叠部位。综合预测新发现的大尺度金富集段向深部延伸超过 200m, 建立的井中地物化综合探测技术广泛适用于胶东金矿和具备相似物化性质差异矿床的深部找矿。

**关键词:** 胶东金矿; 焦家金矿带深部; 招贤金矿; 地一井瞬变电磁测量 (SBTEM); 五方位; 井中综合探测技术

中图分类号: P62

收稿日期: 2025-5-23

## Borehole Integrated Geological, Geophysical, and Geochemical Exploration of Concealed Ore Bodies in the Jiaojia Gold Belt at Depths Exceeding 2000 m

ZHANG Wen<sup>1</sup>, DONG Xue<sup>1</sup>, SUN Bin<sup>1,\*</sup>, WANG Yingpeng<sup>1</sup>, YU Xiaowei<sup>1</sup>, PENG Guanfeng<sup>1</sup>, WANG Xun<sup>2</sup>, WANG Xinran<sup>2</sup>, WANG Runsheng<sup>2</sup>, WANG Zhixin<sup>3</sup>, ZHANG Deming<sup>4</sup>

1. Shandong Institute of Geological Survey, Jinan 250014, China

2. Shandong Geophysical and Geochemical Exploration Institute, Jinan 250013, China

3. Shandong No. 3 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Yantai 264000, China

4. Shandong No. 4 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Weifang 261021, China

**Abstract:** With the continuous deepening of gold exploration in the Jiaodong gold province, the mineralization information extraction capability and interpretation accuracy of surface detection technologies have declined. There is an urgent need to explore and apply more direct

**基金项目:** 国家科技重大专项 (No. 2024ZD1001900); 山东省地质勘查项目 (No. 鲁矿保字 (2020) 1 号, 鲁勘字 (2023) 3 号)  
**作者简介:** 张文 (1989-), 男, 高级工程师, 主要从事地质矿产勘查预测和矿床学研究. ORCID: 0009-0007-0035-7893. E-mail: zhangwenkobebryant@163.com

**通讯作者:** 孙斌, ORCID: 0009-0004-8717-8449. E-mail: sunbindy@shandong.cn

**引用格式:** 张文, 董学, 孙斌, 王英鹏, 于晓卫, 彭观峰, 王珣, 王欣然, 王润生, 王志新, 张德明, 2026. 焦家金矿带 2000m 以深隐伏矿体的井中地物化综合探测. 地球科学, 00(0):000-000

**Citation:** Zhang Wen, Dong Xue, Sun Bin, Wang Yingpeng, Yu Xiaowei, Peng guanfeng, Wang Xun, Wang Xinran, Wang Runsheng, Wang Zhixin, Zhang Deming, 2026. Borehole Integrated Geological, Geophysical, and Geochemical Exploration of Concealed Ore Bodies in the Jiaojia Gold Belt at Depths Exceeding 2000 m. *Earth Science*, 00(0): 000-000

and effective borehole technologies that combine geological, geophysical, and geochemical methods. The systematic exploration of the Jiaojia gold belt at depths exceeding 2000m recently revealed large-scale gold-rich zones in the northern section of the Zhaoxian gold deposit, achieving significant exploration progress. Among these, borehole 120ZK07 recorded a single-hole cumulative ore thickness of 82.71m, representing the thickest deep ore body discovered to date. During the main mineralization stage, quartz-pyrite veins developed intensely, with ore body scale and mineralization intensity increasing toward deeper parts. It is inferred that the ore bodies extend vertically at 200m intervals above the top of an enriched ore section, crossing an upper weak ore interval in the plunging direction. For the first time in Jiaodong, five-azimuth surface-borehole transient electromagnetic measurement (SBTEM) was applied. The induced electromotive force curve characteristics of anomaly sections across loops show similarity, suggesting that alteration zones and ore bodies extend stably within a 200m radius around the wellhead. The description of the structure, alteration, and mineralization network delineates the depth of the mineralization indicator section in loop T1 from 1750m to 2060m, consistent with the known alteration zone orientation inferred from the shallow loop T3. Loops T2 and T4 along the strike, along with loop T5 extending deeper, were identified as their respective mineralization indicator sections. The structural superimposed halo characteristics of large-scale gold-rich zones indicate a coexistence of front and proximal halos and weak tail halos, suggesting they lie at the overlapping area between the tail end of upper rich ore segments and the front end of deep rich ore segments. The prediction of new large-scale gold-rich zones extends to depths of more than 200 m. The borehole integrated geological, geophysical, and geochemical exploration technology is widely applicable to deep prospecting in the Jiaodong gold province and in mineral deposits with similarly varying geophysical and geochemical properties.

**Key words:** Jiaodong gold province; deep part of the Jiaojia gold belt; Zhaoxian gold deposit; surface-borehole transient electromagnetic measurement (SBTEM); five-azimuth; borehole integrated exploration technology

## 0 引言

胶东金矿是世界第三大、中国最大的金矿集区，已探获金资源量近 6000t (Deng *et al.*, 2020a; 邓军等, 2023)。焦家金矿带累计探明金资源量超 1500t, 为胶东金矿规模最大的金矿带, 是“焦家式”金矿的命名地 (Deng *et al.*, 2020b)。焦家深部取得了一系列找矿突破, 相继探明了多个大型—超大型金矿床, 分布于寺庄、南吕、纱岭、新城、滕家等地段 (Qiu *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2016), “中国岩金第一见矿深钻”的实施也验证了 - 3000m 深度资源潜力 (于学峰等, 2019)。焦家带 2000m 深度的系统探矿主要由山东省地质调查院在招贤金矿区开展, 前期已探获大尺度金富集段主要分布于南段 (祝培刚等, 2023)。

胶东金矿成矿模型研究程度高 (Qiu *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2022a; Yang *et al.*, 2024), 众多找矿技术方法手段得到成功应用 (Yu *et al.*, 2018)。然而, 随着找矿深度逐渐增加至 2000m 以深, 地表物化探技术对深部矿化信息的提取能力、解译精度和对深部蚀变带边界的识别有效性均有所下降 (宋明春等, 2024)。井中测点距离目标体更近, 响应信号和抗干扰能力更强 (Auken *et al.*, 2015), 井中物探能够直接测得电阻率、极化率、天然电位、自然伽马等物性参数 (Zou *et al.*, 2021; 刘东明等, 2024)。矿体侧伏、等间距分布等地质规律 (Song *et al.*, 2023a) 和构造叠加晕方法 (李惠等, 2021) 在矿集区浅

一中深部找矿中应用并取得良好的找矿成效，但深部矿体空间展布规律、地球化学方法在深部找矿的适用性有待总结和验证，结合有效的井中物探方法探索，建立井中地物化找矿技术组合应用是非常必要的 (Chen *et al.*, 2020; Massiot *et al.*, 2023)。

招贤北段深部找矿新发现了大尺度金富集段，取得了重大突破，并在胶东地区首次应用五方位地—井瞬变电磁测量 (SBTEM) 技术，验证了其有效性。本研究旨在全面梳理北段深部金矿特征基础上，总结建立井中地物化综合探测技术，对新探获大尺度金富集段深部开展找矿预测，为焦家带 2000m 以深金矿勘查、胶东金矿及相似地物化条件的矿床勘查工作提供参考借鉴。

## 1 成矿地质背景

### 1.1 大地构造背景

胶东金矿主要位于华北克拉通东南缘胶北隆起，东南部属秦岭—大别造山带东端的苏鲁造山带，早白垩世强烈的构造—岩浆活动形成了巨型胶东金矿省和众多金矿床 (图 1a)。

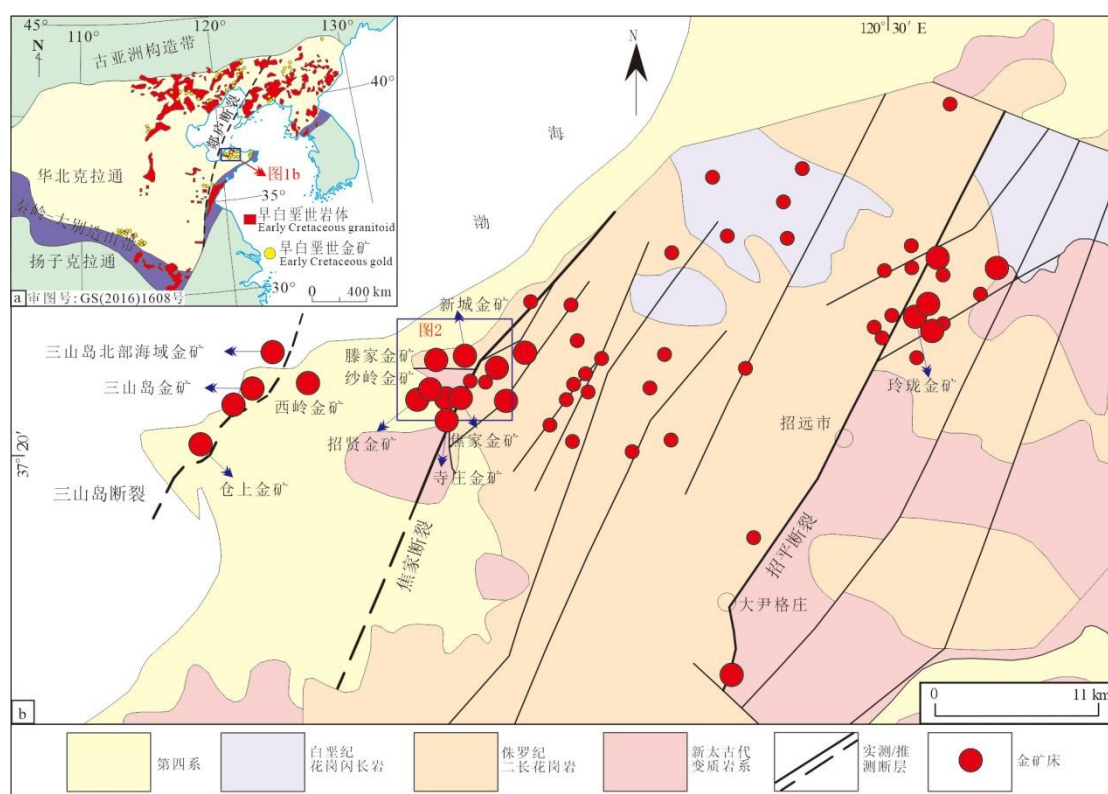


图 1 胶西北金矿集区区域地质及金矿床分布简图 (王英鹏等, 2022)

Fig.1 Regional geology and gold deposit distribution in the Northwestern Jiaodong gold province(modified after Wang *et al.*, 2022)

a. 矿集区大地构造位置; b. 矿集区地质简图

胶西北金矿集区出露岩性主要为新太古代变质岩系、侏罗纪二长花岗岩和白垩纪花岗闪长岩 (图 1b)。区内发育三条千吨级巨型金矿带，自西向东分别为三山岛金矿带、焦家金矿带和招平金矿带，代表性大型—超大型金矿有三山岛金矿带的西岭金矿、三山岛金矿、仓上金矿、北部海域金矿，焦家金矿带的焦家金矿、新城金矿、寺庄金矿、纱岭金矿、滕家金矿，招平金矿带的玲珑金矿、大尹格庄金矿、夏甸金矿等。

## 1.2 焦家金矿带地质

焦家金矿带出露的岩性包括新太古代变辉长岩、英云闪长质片麻岩、侏罗纪玲珑序列二长花岗岩和白垩纪郭家岭序列花岗闪长岩。区内规模最大的金矿带为焦家金矿带，下盘为望儿山金矿带和灵北金矿带（图2）。成矿热液沿焦家、望儿山、灵北等构造带运移，与围岩发生强烈的水岩相互作用，在主断面两侧形成宽厚的绢英岩化、钾化、硅化蚀变带（Fan *et al.*, 2021）。与此同时，多金属硫化物在构造交汇、转折等有利部位沉淀，进而导致金质沉淀富集成矿（Deng *et al.*, 2020a）。

焦家金矿带平面形态呈波状弯曲，整体走向 30°，在不同地段变化不大，自南向北依次分为：寺庄段走向约 15°；马塘—新城段呈曲率较大的“S”形，走向 5°~40°，总体约 30°；新城—高家庄子段总体走向 35°。带内赋存焦家、新城、寺庄、滕家、纱岭等大型—超大型金矿床（图2）。

焦家带 2000m 深度系统探矿主要在招贤金矿区开展，前期已施工钻孔 22 个，其中北段 18 个、南段 4 个（图2）。以往探获大尺度金富集段主要分布于南段，4 个钻孔均见矿较好：单孔累计见矿厚度 33.00m~64.55m，I-2 号主矿体厚度 18.00m~43.14m，平均品位 2.20g/t~3.95g/t（王英鹏等，2022）。

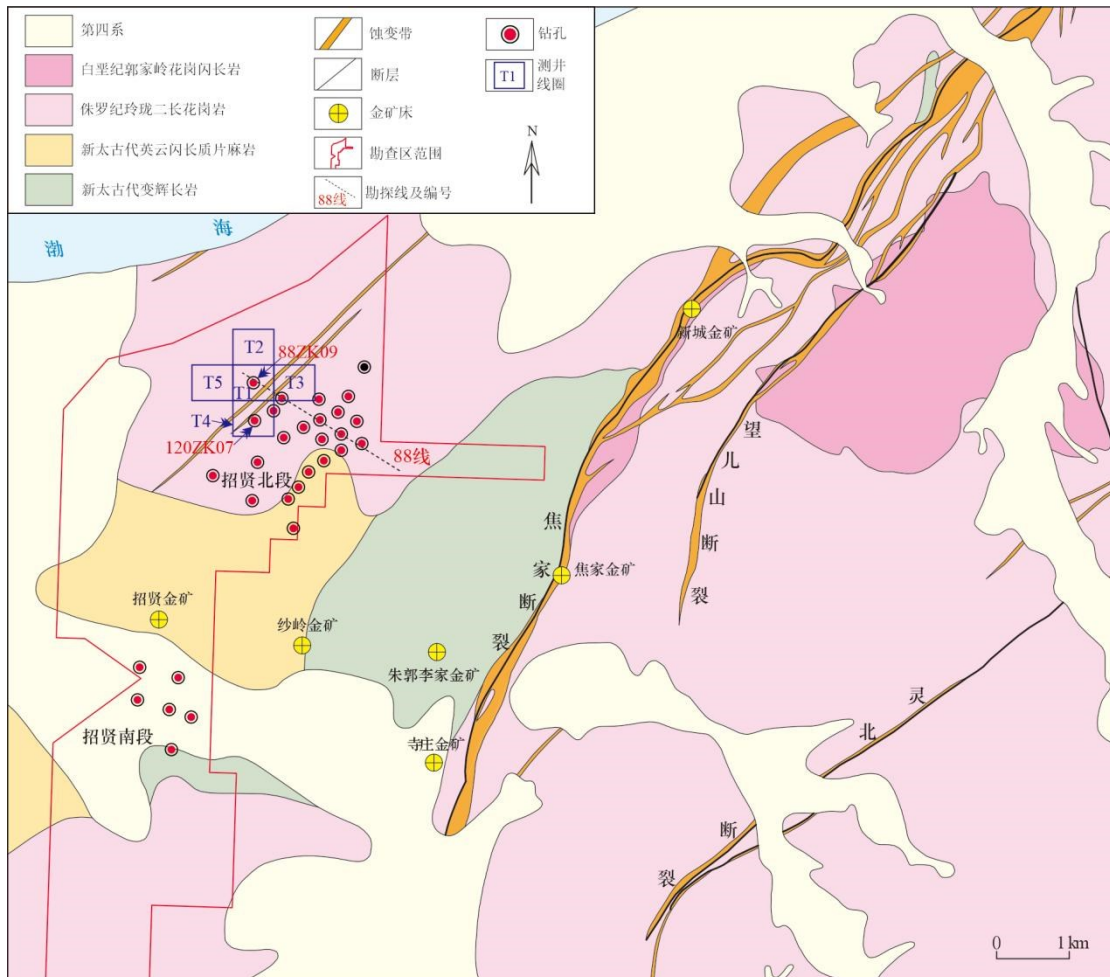


图2 焦家金矿带地质图

Fig.2 Geological map of the Jiaojia gold belt

## 2 焦家金矿带北段 2000m 深度找矿突破

招贤矿区北段是在焦家金矿带 2000m 深度首先取得找矿发现的地段，88ZK01 钻孔在越过浅部弱矿化间隔后见矿，标志着招贤地区普查工作的开始（祝德成等，2018），然而相对于南段，北段以往钻孔揭露的矿体厚度相对较小。

### 2.1 北段矿体特征

北段以往钻孔分布于 24 线~184 线，工程控制断裂在平面和剖面上均呈舒缓波状延伸，走向  $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ，倾向 NWW，倾角较缓，一般  $10^{\circ} \sim 26^{\circ}$ ，平均  $19^{\circ}$ 。蚀变带岩性由内到外依次为黄铁绢英岩、黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩、钾硅化花岗岩和碎裂状花岗岩（图 3）。

按不同蚀变岩性分带控制，划分四个矿体群 I、II、III、IV，分别赋存于底部的黄铁绢英岩、黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩、钾硅化碎裂状花岗岩和顶部蚀变带（图 3）。I-1、II-1 矿体为主矿体，其中 I-1 主矿体真厚度 1.24m~13.22m，平均真厚度 4.49m，平均品位 2.11g/t。矿体厚度小于南段矿体，矿化强度也相对较弱。

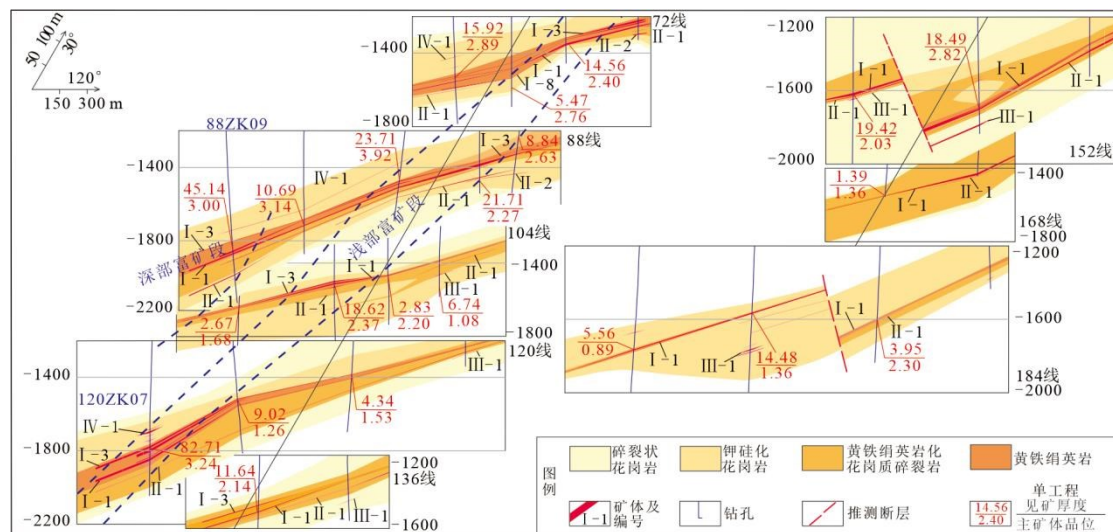


图 3 焦家金矿带 2000m 深度北段联合剖面图

Fig.3 Joint cross sections of the northern Jiaojia gold belt at a depth of 2000m

直至近期，山东省地质调查院在北段 120ZK07、88ZK09 钻孔，揭露大尺度金富集段，实现重要找矿突破。120ZK07 钻孔累计见矿厚度 82.71m，88ZK09 钻孔累计见矿厚度 45.14m，其中 120ZK07 为焦家带 2000m 深度最大累计见矿厚度钻孔。88ZK09 钻孔见矿样段 17 层，圈定矿体 6 个，主矿体部位（I-1 和 I-5 号矿体）见矿真厚度 15.74m，平均品位  $2.54\text{g/t} \sim 3.00\text{g/t}$ ；120ZK07 钻孔见矿样段 19 层，圈定矿体 7 个，主矿体部位（I-3~I-1 号矿体）见矿真厚度 50.20m，平均品位  $1.06\text{g/t} \sim 3.24\text{g/t}$ 。

### 2.2 找矿突破钻孔地质特征

88ZK09 钻孔蚀变带上盘围岩为玲珑序列二长花岗岩，下盘围岩为郭家岭序列花岗闪长岩，穿插发育闪长玢岩、辉绿玢岩等燕山期脉岩，偶见变粒岩包体（图 4a）。

钻孔内揭露出多条断裂构造（图 4c），断面见厚度、颜色、粒度特征差异的断层泥，其中蚀变带上界断裂轴夹角  $65^{\circ}$ ，指示断面倾角  $25^{\circ}$ 。节理发育，多见石英黄铁矿脉充填。

整体上，蚀变带由内向外蚀变矿化程度减弱，可分为黄铁绢英岩、黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩、（弱）钾硅化蚀变岩和碎裂状花岗岩（图 4b-d）。蚀变除全岩普遍发育外，也呈石

英、钾长石、方解石脉体或团块状产出。局部陡倾断裂构造发育部位，可见晚期高岭土化蚀变。

钻孔矿化以石英黄铁矿脉发育最为强烈（图 4b、d），其次发育浸染状、条带状、团块状黄铁矿化，零星发育浸染状铅锌矿化（图 4d）。

金矿体主要赋存于黄铁绢英岩、黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩和钾硅化花岗岩中，矿化强度与石英黄铁矿脉发育程度呈正相关（图 4a）。

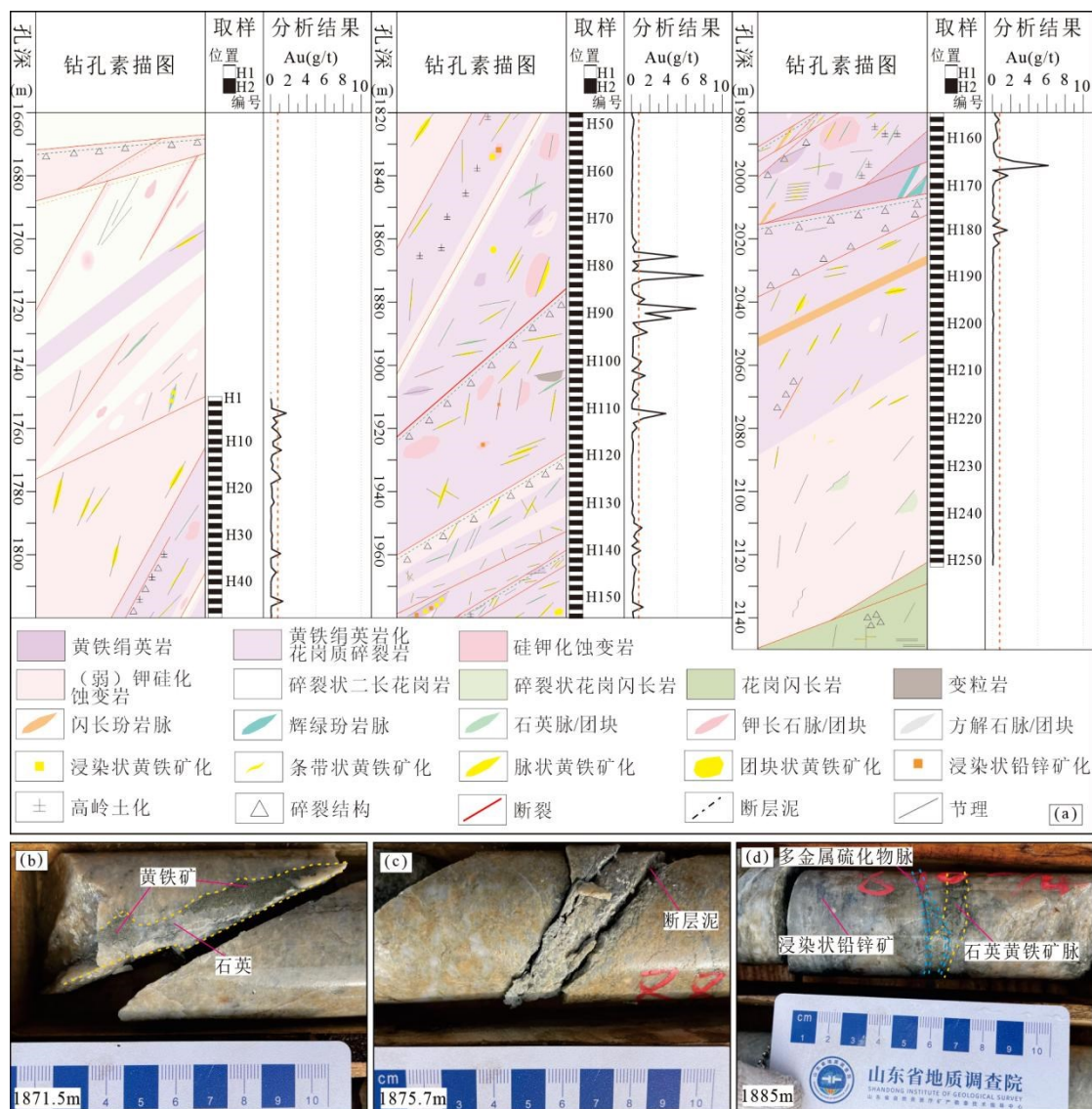


图 4 88ZK09 钻孔柱状图和典型构造蚀变矿化照片

Fig.4 Log and typical network photos of structures, alteration, and mineralization in borehole 88ZK09

a. 88ZK09 钻孔柱状图及 Au 元素富集曲线；b, d. 石英黄铁矿粗脉；c. 断面。

### 3 井中物化探测方法

#### 3.1 SBTEM

##### 3.1.1 方法原理

SBTEM 是一种地表发射、井中接收的以低阻异常体为探测对象的井中感应二次电磁场测量技术，目前广泛应用于金属矿产、煤矿、石油、工程等行业（Wang *et al.*, 2020）。

根据场源激励方式,可分为磁性源和电性源两种工作方式,后者在沼泽、湖泊等地形条件较差的环境中适用性更强。前人 SBTEM 多使用单线圈装置,野外操作相对快捷;数据解释采用矢量交会法、曲线形态解译、数值模拟分析等方法 (Dai *et al.*, 2019)。

### 3.1.2 装置布设和工作参数

SBTEM 采用五方位线圈装置,以钻孔为中心分别布设五个 600m×600m 的线圈,便可获得 2000m 深度地质结构和矿化特征等信息(图 2)。在满足信噪比前提下,本次发射基频选择 25Hz,探测范围为以井口为中心外推 200m 范围。仪器采用加拿大 GEONICS 公司生产的 PROTEM57 型瞬变电磁仪。

根据 88ZK09 钻孔地质特征,初步确定 1650m~2150m 为异常段,0~1650m 为背景区,异常段施测点距 1m,背景区采取 5m 点距测量。单点采集时间 0.0881ms~6.978ms,采样道 20 道,发射电流 15A。

每点均采集 X、Y、Z 三分量数据,其中 X 为北、Y 为东、Z 为下,三个分量的正方向适用于右手定则。以五方位发射框测量结果绘制各测道三分量随深度变化归一化感应电动势曲线,单位:  $\text{nv}/(\text{A} \cdot \text{m}^2)$ 。

## 3.2 构造叠加晕

### 3.2.1 方法原理

构造叠加晕技术研究成矿热液活动形成的指示元素轴向分带特征和空间叠加结构,建立盲矿预测模型开展找矿预测(李惠等, 2021),广泛应用于金矿勘查中,取得了较好的应用效果(Wang *et al.*, 2022b)。

### 3.2.2 样品采集

在焦家带深部前期钻孔和本次钻孔工程中,累计采集构造叠加晕样品 3975 件。对蚀变带全部取样分析,样品间隔 3m~5m,有基本分析取样处采用 2 个~3 个副样组合成一个样品;围岩取样分布于蚀变带外围 100m 范围,间隔放稀至 10m。单样间距内均匀采取 5 块~7 块 20mm 左右直径的碎块,样重 200g~300g;样品采集记录剖面、工程、样品编号及采样位置(深度)、岩矿石名称等,以便绘制构造叠加晕剖面图。

### 3.2.3 样品分析

样品测试由山东省地质科学院、山东省第六地质矿产勘查院实验室完成,分析元素为 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、Hg、Bi、Mo 共 10 种元素,所有元素数据报出率均为 100%。Au 元素采用石墨炉/火焰原子吸收法,检出限 0.3ppb;Ag 元素采用发射光谱法,检出限 20ppb;Cu、Pb、Zn 元素采用电感耦合等离子体质谱法,检出限 2ppm,Mo 也采用该方法,检出限 0.2ppm;As、Sb、Bi 元素采用氢化物发生-原子荧光光谱法,检出限 0.2ppm、0.1ppm、0.02ppm;Hg 元素采用蒸气发生-冷原子荧光光谱法,检出限 1ppb。

## 4 井中物化探测量结果

### 4.1 SBTEM

#### 4.1.1 焦家金矿带深部岩矿石电性参数

从焦家金矿带深部岩矿石电性测量结果(表 1)可知,二长花岗岩、黑云斜长片麻岩电阻率值高、变化范围大;绢英岩化、硅化等蚀变花岗岩,呈中高阻特征;花岗质碎裂岩、黄铁绢英岩化碎裂岩电阻率值低。

表 1 焦家金矿带深部岩矿石电性参数统计表

Table 1 Statistical table of electrical properties of rocks and ores in the deep Jiaojia gold belt

岩性	岩矿石 分类	块数	电阻率 $\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )		
			平均值	最小值	最大值
黑云斜长片麻岩	围岩	4	11439	1238	21860
二长花岗岩	围岩	49	6281	1163	13541
碎裂状花岗岩	蚀变岩	16	10733	7392	15078
硅化绢英岩化花岗岩	蚀变岩	16	12461	1459	25085
花岗质碎裂岩	矿石	47	3078	741	8583
绢英岩化花岗质碎裂岩	矿石	29	3599	654	8224
黄铁绢英岩化碎裂岩	矿石	20	1619	368	2705

#### 4.1.2 88ZK09 钻孔 SBTEM 曲线特征

88ZK09 钻孔 T1 线圈异常段的三分量归一化感应电动势曲线形态有所差异（图 5）：X、Y 分量曲线形态较为相似，波动起伏较大，幅值在  $0 \text{ nv}/(\text{A} \cdot \text{m}^2) \sim 300 \text{ nv}/(\text{A} \cdot \text{m}^2)$  之间；Z 分量幅值在  $0 \text{ nv}/(\text{A} \cdot \text{m}^2) \sim 80 \text{ nv}/(\text{A} \cdot \text{m}^2)$  之间。

各道曲线根据采样道数分为早中晚三期信号：1~7 道定为早期，采集时间  $0.0881\text{ms} \sim 0.3144\text{ms}$ ；8~14 道定为中期，采集时间  $0.3956\text{ms} \sim 1.6360\text{ms}$ ；15~20 道定为晚期，采集时间  $2.081\text{ms} \sim 6.978\text{ms}$ 。中期 7 道曲线幅值高于早期 7 道曲线幅值，晚期曲线逐渐衰减为零（图 5）。

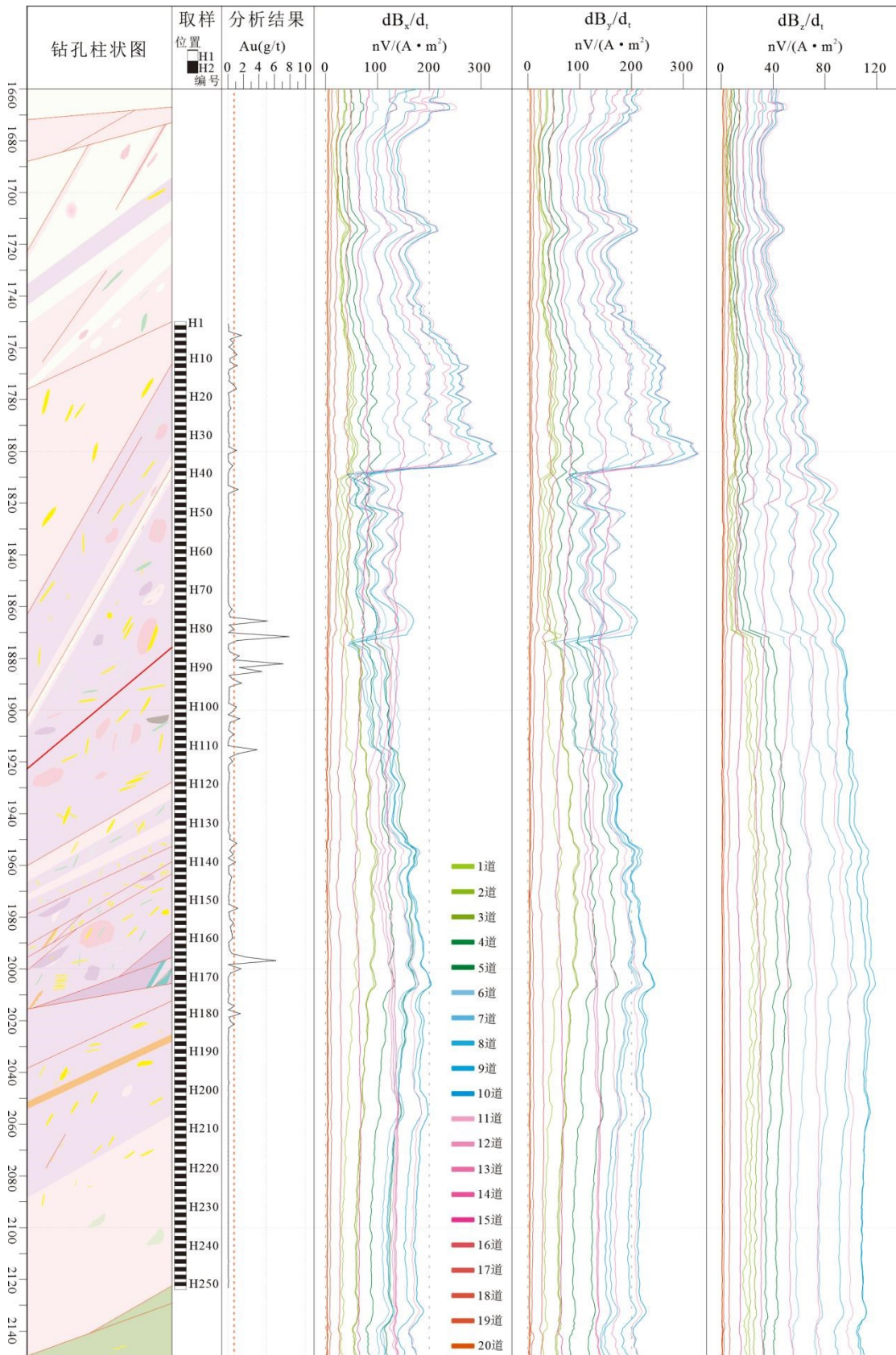


图5 88ZK09 钻孔 SBTEM T1 线圈三分量归一化感应电动势异常段曲线图

Fig.5 Abnormal sections in three-component normalized induced electromotive force anomaly curves of SBTEM loop T1 in borehole 88ZK09

## 4.2 构造叠加晕

### 4.2.1 异常下限标准确定

采用迭代法对各元素原始测试数据以平均值加减三倍标准离差进行循环剔除特高值以及特低值，然后对合理范围内的点求算数平均值及标准离差，利用平均值加两倍标准离差作为各元素的异常下限，圈连异常外带，再以异常下限 2 倍、4 倍分别作为异常中带和内带的下限标准（表 2）。

表 2 焦家金矿带北段深部成矿元素含量分带表

Table 2 Zoning contents of the indicator elements in the deep northern Jiaojia gold belt

分带		Au	Ag	Cu	Pb	Zn	As	Sb	Hg	Bi	Mo
外带	≥	120	160	20	45	45	675	0.3	2	0.6	1
中带	≥	240	320	40	90	90	1350	0.6	4	1.2	2
内带	≥	480	640	80	180	180	2700	1.2	8	2.4	4

注：Au、Ag、Hg、As 含量单位为 ppb，其它元素为 ppm。

### 4.2.2 焦家金矿带北段异常特征

从 88 勘探线构造叠加晕单元素异常图（图 6）上可以看出，Au 元素异常主要分布于浅部 88ZK03~88ZK05 区间和深部 88ZK09 钻孔；分带明显、强度高；严格受蚀变带控制，主要处于底部高蚀变程度分带内；与矿体分布高度一致，以金矿体或以金内带为中心向两侧浓度迅速降低，中外带较薄，反映其高衬值。Ag 元素异常与 Au 元素异常分布特征基本一致。

Cu、Pb、Zn 元素均呈现向深部异常规模、强度增加的趋势，深部 88ZK09 钻孔异常分带性好、峰值高；蚀变带底部异常强于顶部，但浅部 88ZK03 钻孔异常在顶部较为发育，并超出蚀变带顶界；Cu 异常与金矿体空间位置重合程度较高，Pb、Zn 主要在深部与金矿体重合。

As、Sb、Hg 元素呈现向深部异常规模、强度增加趋势；异常分带不明显、强度较低；总体受控于蚀变带范围，顶底部均有分布；与矿体分布关系不密切。

Mo、Bi 元素异常规模较小，零星分布；异常分带特征弱、强度低；分布与蚀变带、矿体无明显关系。

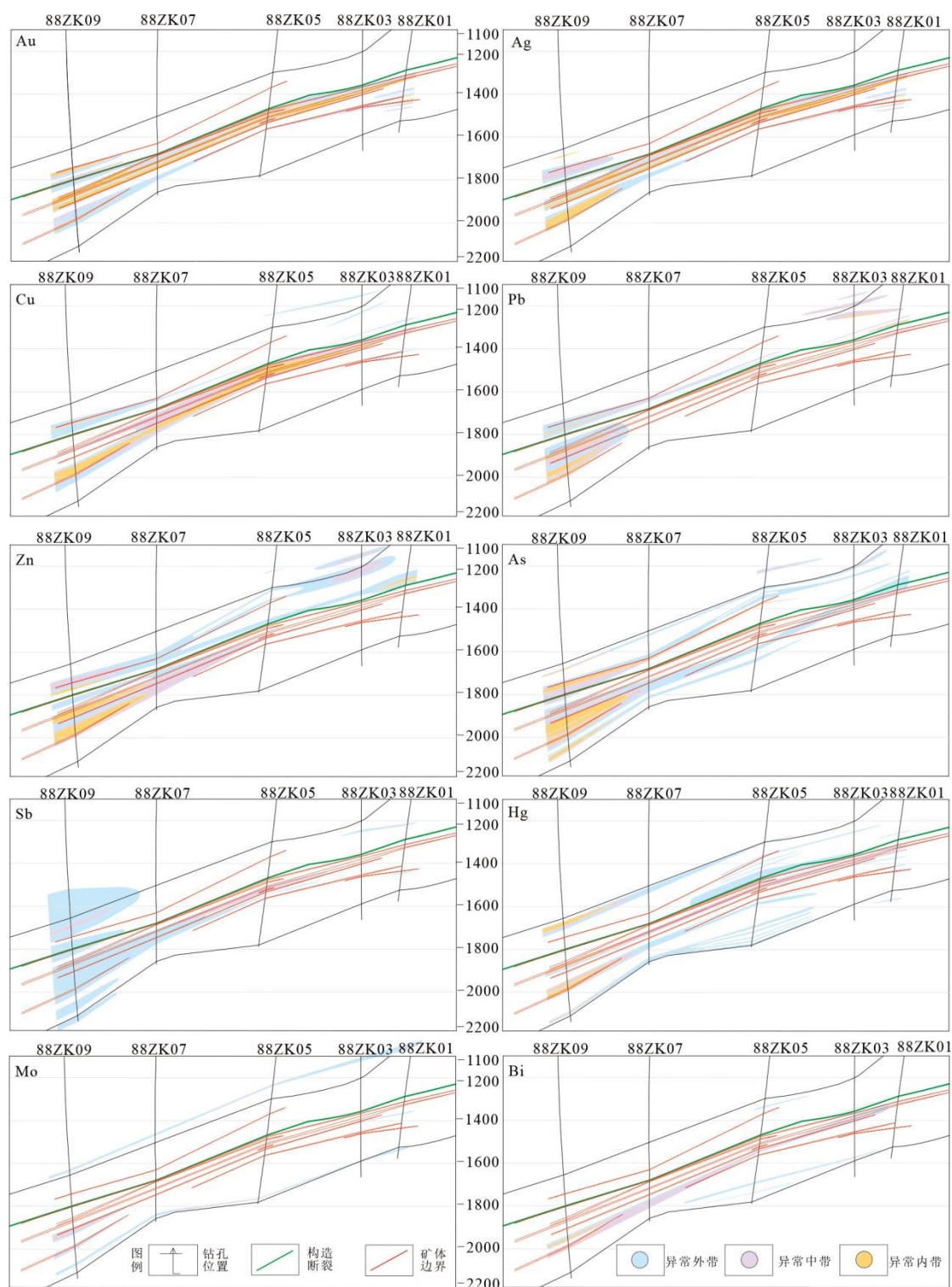


图6 焦家金矿带北段深部88勘探线构造叠加晕单元素异常剖面图

Fig.6 Superimposed halo single-element anomaly cross sections of line 88 in the deep northern Jiaojia gold belt

#### 4.2.3 焦家金矿带南段异常特征

从焦家带南段深部320勘探线构造叠加晕单元素异常图(图7)上可以看出,Au元素异常主要分布于浅部320ZK01~320ZK03区间,分带明显、强度高;严格受蚀变带控制,主要

处于底部强蚀变岩内；深部 320ZK05 异常显著减弱，与矿体分布高度一致。

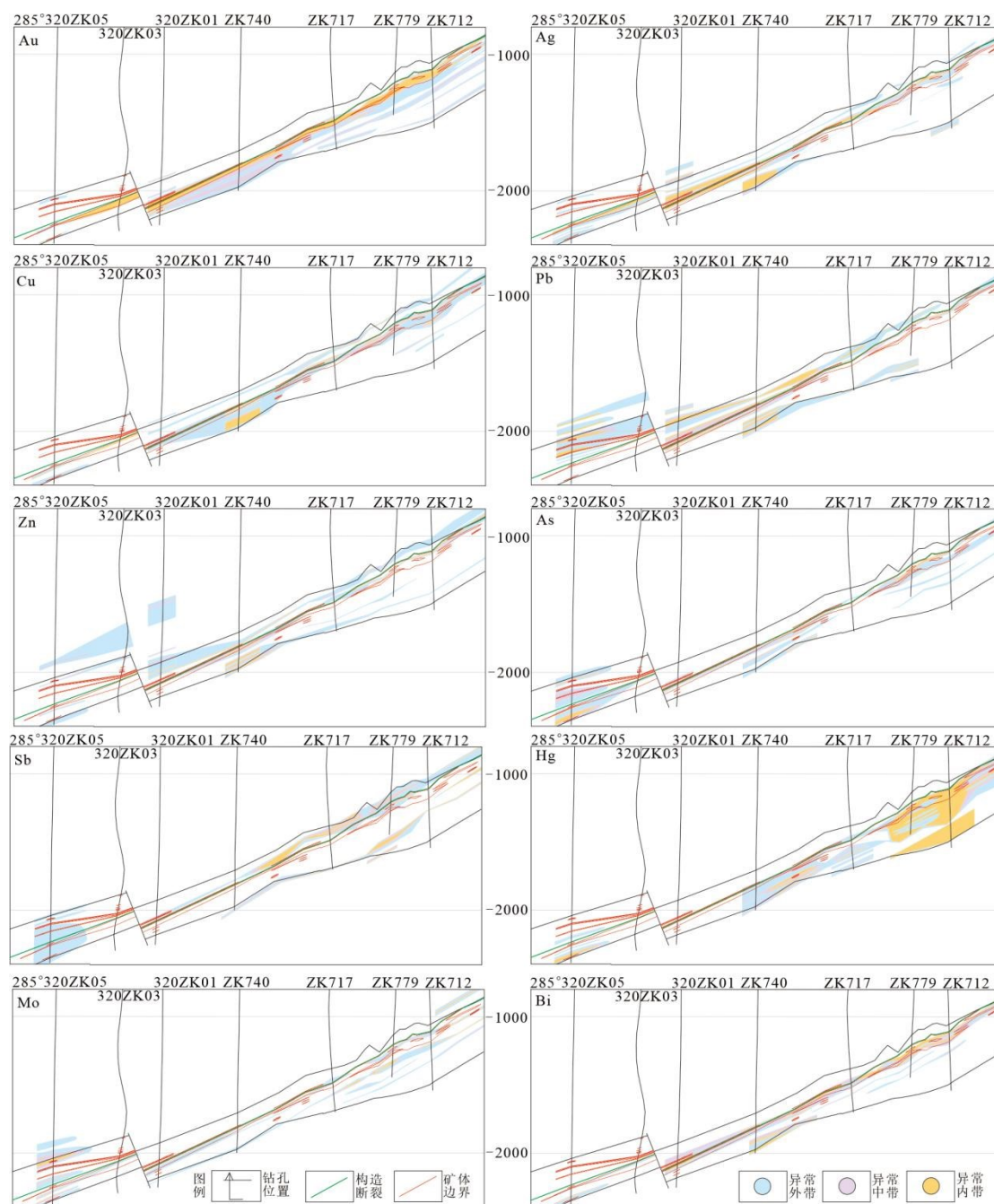


图 7 焦家金矿带南段深部 320 勘探线构造叠加晕单元素异常剖面图

Fig.7 Superimposed halo single-element anomaly cross sections of line 320 in the deep southern Jiaojia gold belt

Ag、Cu、Pb、Zn 元素在底部强蚀变岩与 Au 元素异常分布特征基本一致，除 320ZK05 钻孔异常规模有所增加，但强度仍较低。Pb 元素异常在深部 320ZK05 钻孔顶部较为发育，并超出蚀变带顶界。

As、Sb、Hg 元素浅部异常分带明显、强度高、规模大；总体受控于蚀变带范围，Ag、Hg 主要分布于底部，Sb 顶底部均有分布；浅部异常为 320ZK01~320ZK03 部位大尺度金富集段

的前缘晕。富矿体主体部位异常明显减弱，分带不明显、强度低、规模小。320ZK05 钻孔前缘晕元素异常再次增强，规模变大，分带性和强度增加。

Mo、Bi 元素异常在浅部规模较小，零星分布；异常分带特征弱、强度低。320ZK05 钻孔异常强度、规模、分带性有所增强，为浅部富矿体尾晕异常特征。

## 5 讨论

### 5.1 深部矿化网络和控矿地质规律预测

#### 5.1.1 深部矿化网络

深部金矿探测钻孔钻进过程中，通过对岩心进行详细的构造—蚀变—矿化网络描述，搜集获取各类地质异常信息，主要包括：黄铁矿、黄铜矿等硫化物矿化信息；次级断裂（碎裂岩化带）、节理密集带、糜棱岩带、断层泥等多期次构造活动信息；硅化、钾化、绢英岩化等围岩蚀变信息；不同地质体接触带构造信息；辉绿岩、煌斑岩等基性岩脉信息等（Deng *et al.*, 2020c; Hu *et al.*, 2020）。

同时，随着深部钻孔进尺增加和基本分析样品结果对矿化强度的呈现，结合前期见矿情况，能够得出矿体空间分布、形态、规模、产状等信息。根据 88ZK09 构造蚀变矿化描述取得的地质认识，金矿化强度与石英黄铁矿脉发育程度呈正相关（图 4），这与深部金矿石英黄铁矿阶段为主成矿阶段特征是相一致的。富矿段为主成矿阶段石英黄铁矿脉强烈发育部位，具备形成大尺度金富集段的成矿作用过程条件（Fan *et al.*, 2021）。

金、银等贵金属元素随成矿流体运移、沉淀富集，并伴随黄铁矿、黄铜矿、铅锌矿等金属硫化物富集，其他矿化元素迁移能力存在差异，为应用矿体部位元素轴向分带开展找矿预测提供了元素条件（Deng *et al.*, 2020a）。多金属硫化物矿脉呈现低阻高极化的典型特征，则为应用电磁法奠定了物性基础（表 1）。综上，Au、Ag、Cu、Pb、Zn 元素分布形式与形成的对应金属硫化物低阻异常存在相似的成因联系和同步的空间变化，均受构造—流体耦合作用下的矿化蚀变地质体控制。

#### 5.1.2 矿体空间展布规律预测

前人在胶东金矿勘查研究中，总结了矿体侧伏、等间距分布、趋势外推等行之有效的控矿规律，以此为指导，通过综合整理，获取预测地质信息（Song *et al.*, 2023a）。例如，矿体富矿段、弱矿段、无矿间隔存在等间距分布规律，依据相似性原理，可提取等间距控矿地质信息，对富矿段深部延伸长度、矿体尖灭再现距离进行空间定位（Song *et al.*, 2023b）。值得注意的是，在应用过程中，需要注意评价成矿地质条件突变等地质异常对控矿规律造成的影响（Wang *et al.*, 2024）。

88 勘探线已施工钻孔中，88ZK01 钻孔以浅的纱岭和滕家矿区邻近地段均未见金矿体，88ZK01 钻孔为越过无矿段后焦家带深部见矿首孔，但矿体厚度较小。浅部 88ZK03 和 88ZK05 钻孔及其走向见大尺度金富集段的钻孔构成浅部金矿富集段；再向深部，88ZK07 钻孔为弱矿化段，矿体规模减小。至本次施工的 88ZK09 钻孔实现北段找矿突破，进一步验证了深部矿体同样具备等间距分布规律（图 3）。

根据胶东金矿等间距控矿规律，88ZK09 钻孔可能为浅部矿段越过弱矿间隔后的深部富矿段。浅部矿段垂向深度约 200m，弱矿间隔垂向间距约 200m。新的深部富矿段垂向深度按照相似性原理，也可推作 200m，说明 88ZK09 钻孔大尺度金富集段仍有较大的延深空间。88ZK09 钻孔蚀变带厚度增大，矿体规模、矿化强度呈显著增加的趋势，可作为趋势外推找矿依据。

### 5.2 SBTEM 结果解译和适用性分析

#### 5.2.1 曲线解译

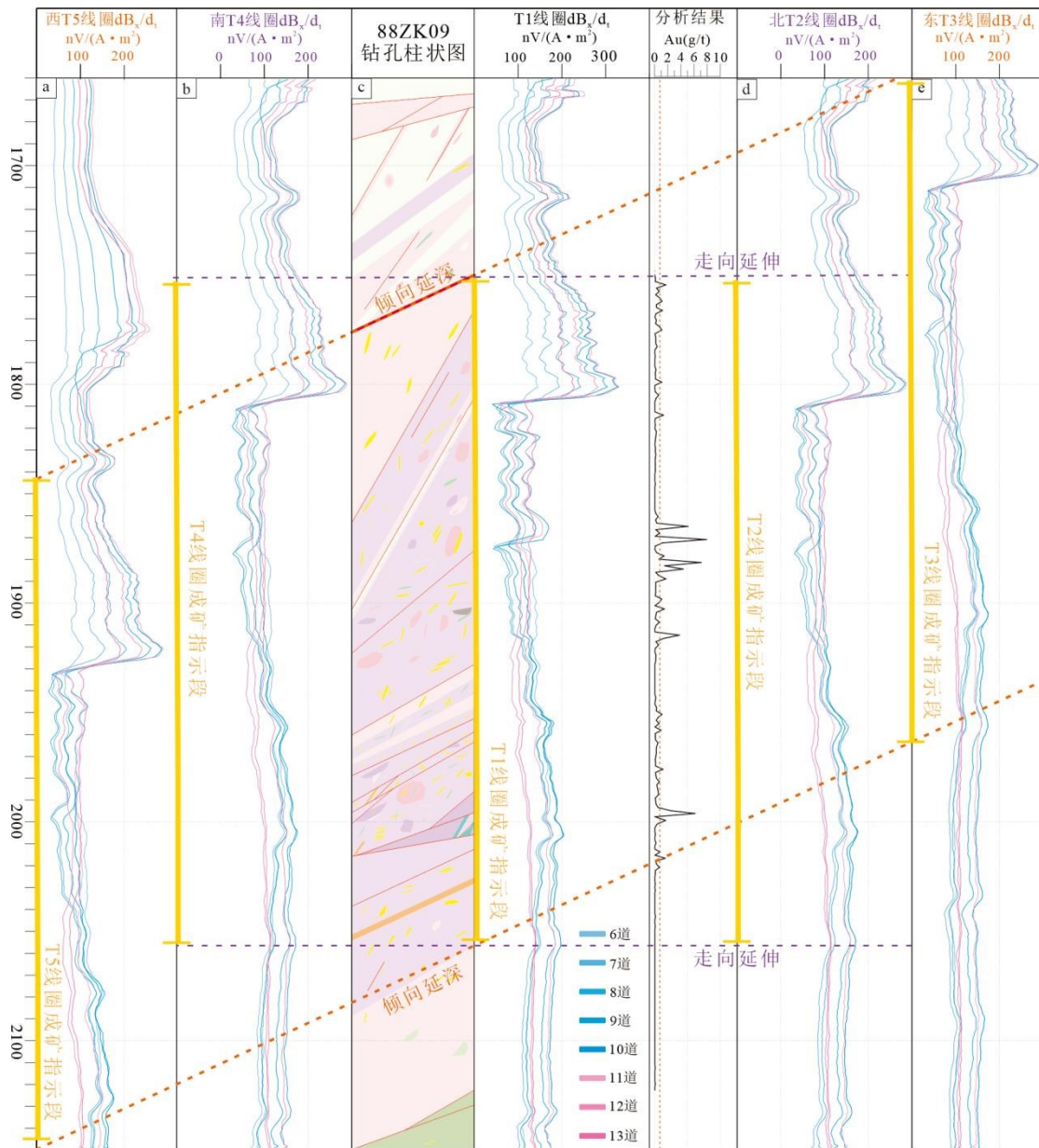


图 8 88ZK09 钻孔五方位归一化感应电动势曲线异常段解译图

Fig.8 Interpretation of abnormal sections in the five-directional normalized induced electromotive force curves of borehole 88ZK09

归一化感应电动势曲线主要为一次脉冲磁场间歇所引起的二次感应涡流场，正常情况下随时间呈现衰减特征，但存在异常地质体时，受异常体激发产生的场影响，致使感应电动势曲线表现不同（Johnson *et al.*, 2001）。88ZK09 钻孔异常段中期归一化感应电动势曲线幅值相对早期较高，为一次脉冲引起的二次感应涡流场与异常段激发引起的场双重作用引起（图 5）。

取五方位线圈感应电动势曲线起伏大、幅值高的 X 分量 6 道~13 道信号进行分析（图 8）。T1 线圈位于 88ZK09 孔位，将钻孔构造蚀变矿化描述结果与 T1 线圈曲线套合，可知：蚀变带和矿体对应的曲线段作为成矿指示段，即孔深 1750m~2060m，成矿指示段曲线起伏较大，是因为蚀变带内部矿物组分结构构造不均一，形成局部电导率梯度，进一步加剧电磁场的非均匀衰减，进而产生多峰或突变的异常响应曲线（图 8c）；孔深 1810m 曲线剧烈变

化但 H40 样品金含量无高值（图 5），可能是由于构造带引起电导率变化，说明构造带有较强的地球物理响应；主矿体位于突变带下盘 1860m~1890m，与曲线局部弱异常位置吻合（图 8c）。

周围四方位线圈与 T1 线圈曲线特征相似，推测 88ZK09 钻孔蚀变带和矿体沿走向和倾向在钻孔外推 200m 范围内稳定延伸；与 T1 线圈成矿指示段具相似特征的曲线段作为各自成矿指示段（图 8）。

浅部已知蚀变带和矿体的 T3 线圈测井曲线成矿指示段深度 1650m~1970m（图 8e），与 T1 线圈蚀变带相连，可推断蚀变带沿两线圈连线方位（90°）的空间展布。T1、T3 线圈连线剖面推断蚀变带视倾角（22°）与已知蚀变带产状基本一致，说明测井结果能够反映蚀变带特征（图 8）。

线圈方向与蚀变带走向一致时，二次场响应主要反映蚀变带横向延伸特征，异常幅值较高且形态单一，即 T2、T4 方位，T2 方位位于 T1 方位北侧，T4 方位位于 T1 方位南侧，在响应曲线特征上看，T2、T4 方位与 T1 方位相比较无明显深度上的差异，通过 T2、T1、T4 方位即可判断蚀变带走向，即南北走向（图 8b-d）。线圈与蚀变带走向正交时，二次场可揭示蚀变带垂向分层和倾向特征，即 T3、T5 方位，T3 方位位于 T1 方位东侧，T5 方位位于 T1 方位西侧，T3 方位蚀变带相比较 T1 方位位置靠上，T5 方位蚀变带相比较 T1 方位位置靠下，这与蚀变带倾向方向基本一致（图 8a、c、e）。通过 T3、T1、T5 方位推断蚀变带的倾向延深方向，通过 T2、T1、T4 方位推断蚀变带走向延伸方向，通过五方位测量即可对蚀变带空间展布特征进行预测。

深部 T5 线圈和走向 T2、T4 线圈感应电动势曲线成矿指示段，可作为自 88ZK09 向对应线圈方位外推 200m 的蚀变带和矿体赋存的推测空间位置。T2、T4 线圈异常段深度与 T1 线圈基本一致，即 1750m~2060m（图 8b、d），分别表示自 88ZK09 向北、向南外推 200m 的蚀变带预测赋存深度。T5 线圈测井曲线异常段深度 1840m~2150m（图 8a），表示自 88ZK09 向西外推 200m 的蚀变带深部预测延深部位。

### 5.2.2 深部金矿探测适用性分析

SBTEM 接收装置更接近目标地质体，可直接测量纯二次场响应，避免了地面电磁法中常见的一次场背景干扰和直接耦合信号问题，使得数据解释更为直接、可靠（Auken *et al.*, 2015）。传统 SBTEM 单线圈装置仅能从井孔部位曲线外推异常体，未能形成立体数据。采用五方位线圈装置，相较于单线圈，能够获取井孔和蚀变带走向、倾向的三维空间数据，形成测孔和四周的测井曲线，从而更有依据地、更便捷地进行异常体（蚀变带、矿体）的空间定位解译（刘洋等，2023）。五方位线圈 SBTEM 在焦家带深部金矿探测中得以成功应用，特别是能够有效识别矿化蚀变带并推断其走向、倾向空间展布特征（图 8），有效解决了胶东金矿深部低阻蚀变带边界识别困难的问题。

研究区二长花岗岩、黑云斜长片麻岩电阻率值高，又因围岩矿物组分不均匀分布和结构构造差异导致电阻率变化范围大；蚀变花岗岩，受硅化、钾化等蚀变作用影响，石英等高阻矿物含量增加，岩石结构构造致密度增加，呈现中高阻特征；矿石岩性为花岗质碎裂岩，黄铁矿等硫化物含量显著增加，导电性增强，电阻率呈现低阻反映（表 1）。围岩与矿体部位蚀变岩、矿石电导率物性差别明显，为瞬变电磁测量（TEM）提供了物性条件。胶东地区各矿带蚀变岩、矿石和围岩地质类型和物性特征空间变化不大，同样存在较大的围岩、矿石物性差异，因而在成矿地质背景相似的胶东金矿床（Ma *et al.*, 2021；杨立强等，2024），乃至具备相似导电性差异的造山型、斑岩型、矽卡岩型等成矿类型的深部探测过程中（李佳奇等，2023），该方法适用性较强。

SBTEM 在解译上具有信号纯净、分辨率高的优势；在深度穿透性方面优于常规三维电法，

与 CSAMT 相当甚至更深（尤其在低阻目标探测中）；在稳定性上因抗干扰能力强、受地形影响小，且仪器成熟，整体表现更为可靠（郭小刚等，2025）。因此，在深部矿产勘查、地热资源探测等需要精细刻画井下电性结构的场景中，SBTEM 常作为优选方法之一（Chen *et al.*, 2020）。值得注意的是，五方位 SBTEM 尚处于探索阶段，对矿体异常特征的精细化解释、单线圈预测与多线圈预测的相互印证和方法有效性的量化评价，尚需进一步研究。

### 5.3 构造叠加晕预测和区域适用性分析

#### 5.3.1 构造叠加晕预测

含金热液沿构造带侵位，Au、Ag、Cu、Pb、Zn 等矿化元素在成矿有利部位的扩容空间沉淀富集，形成一系列串珠状富矿体（Hu *et al.*, 2020）。元素迁移能力的差异，导致单一富矿体具正常轴向分带序列，包括前缘晕、近矿晕和尾晕，前缘晕是预测深部盲矿体的主要依据。上下富矿体元素轴向分带叠加，形成反常轴向分带序列，深部前缘晕叠加于浅部金矿体尾晕之上，指示深部富矿体间隔出现（李惠等，2021）。

对焦家带深部招贤金矿探矿过程中采取的 3975 件构造叠加晕样品元素分析结果进行聚类和相关性分析（严桃桃等，2022），建立了勘查区的构造叠加晕预测实用模型（李惠等，2021）。金矿体近矿晕元素为 Au、Ag、Cu、Pb、Zn，前缘晕元素为 As、Sb、Hg，尾晕元素为 Bi、Mo。上部金矿体前缘晕、近矿晕、尾晕元素异常，自浅部至深部依次分布，构成正常的元素轴向分带序列；深部金矿体前缘晕异常叠加于浅部金矿体近矿晕、尾晕异常之上，形成反常的元素轴向分带序列，指示深部存在盲矿体；深部金矿体前缘晕异常叠加深部近矿晕异常，则说明深部金矿体向深部仍延伸较大（图 9）。

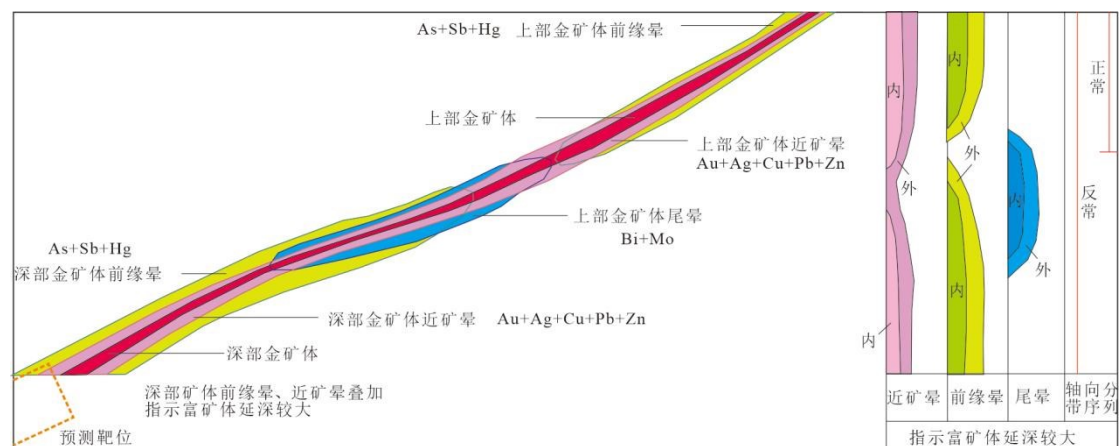


图 9 焦家金矿带北段深部构造叠加晕预测实用模型图

Fig.9 Practical predicting model diagram of structural superimposed halos in the deep northern Jiaojia gold belt

由构造叠加晕分析结果（图 6）可知，浅部矿段 88ZK03 和 88ZK05 钻孔为近矿晕和弱前缘晕元素异常叠加特征。88ZK09 钻孔所处的深部矿段近矿晕、前缘晕元素异常叠加特征明显，与矿体位置对应关系较强，且仍见尾晕元素弱异常（图 6），推测其处于浅部金矿体尾端和深部金矿体前端的叠加部位。所揭露的大尺度金富集成矿作用明显增强，可能为矿头部位，向深部有较大的延伸长度和成矿强度。

#### 5.3.2 区域金矿探测适用性分析

320 勘探线构造叠加晕预测特征与剖面见矿特征一致：320ZK01~320ZK03 钻孔之间大尺

度金富集段前缘晕元素异常在浅部特征明显；已施工最深钻孔 320ZK05 见矿规模减小，相应的，浅部富矿体近矿晕异常减弱，而尾晕异常有所增强，为尾部异常特征（图 7）。值得注意的是，320ZK05 钻孔 As、Sb、Hg 前缘晕元素异常规模、分带性和强度再次增加，则预测其深部盲富矿体可能再次间隔出现。

焦家金矿带深部南段构造叠加晕异常特征符合建立的构造叠加晕预测实用模型，说明该方法在焦家带深部南北段金矿勘查中均具有适用性。长期以来，前人在区域焦家、纱岭、新城等矿床和胶东三山岛、招平、牟乳等矿带均开展了大量构造叠加晕测量工作，建立的预测模型取得了良好的找矿效果，表明该预测方法具有区域适用性（李惠等，2021）。构造叠加晕预测方法也广泛适用于其他具备矿化元素轴向分带特征的矿床类型，但该方法对样品采集的系统性、预测模型的准确性以及矿化富集段头尾近矿晕的识别精度要求较高。

#### 5.4 井中地物化综合探测和北段找矿预测

针对深部金矿面临的地表地物化找矿方法探测深度受限等问题，井中地物化综合探测技术（图 10）能够直接系统获取深部目标地质体的地物化异常信息，并建立地质、地球物理、地球化学信息间指导、反馈、验证的耦合关系，筛选有效的地质找矿信息，提高工作效率和找矿成效。长期金矿勘查中验证的地质控矿规律和研究积累的成矿规律、矿床模型认识，和 SBTEM、构造叠加晕测量的区域适用性，均表明该井中地物化综合预测方法具区域适用性。

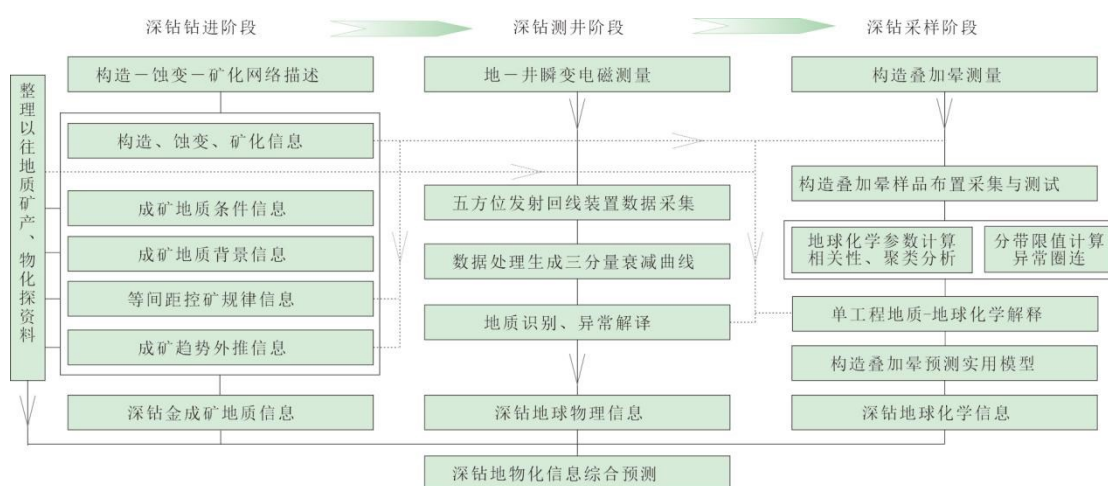


图 10 深钻井中地物化综合探测技术路线图

Figure.10 Roadmap for borehole integrated geological, geophysical, and geochemical exploration techniques

依据成矿规律、趋势外推和等间距控矿等地质认识，综合 SBTEM 结果和构造叠加晕异常特征，推测 88ZK09 钻孔所揭露大尺度金富集段为深部富矿段的前端矿头部位，向深部延伸超过 200m（图 11）。

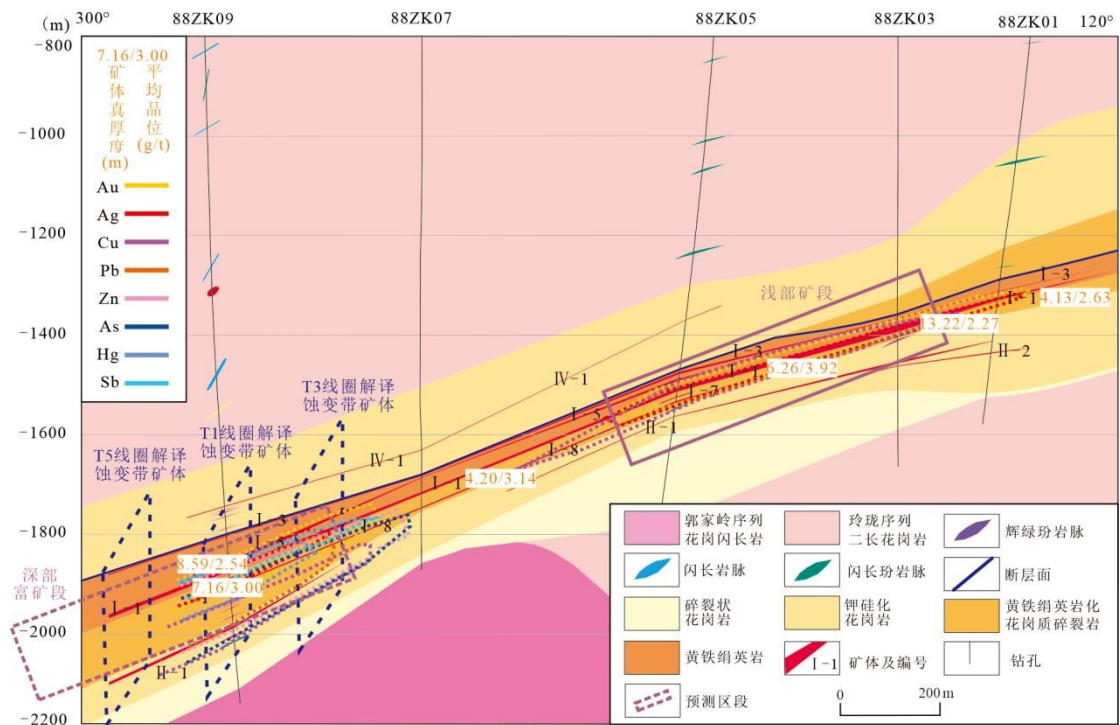


图 11 焦家金矿带北段深部 88 线找矿预测剖面图

Fig.11 Prediction cross-section of line 88 in the deep northern Jiaojia gold belt

## 6 结论

(1) 焦家带-2000m 深度北段新发现的大尺度金富集段单工程累计见矿厚度可达 82.71m, 为深部钻孔最大见矿厚度, 实现重要找矿突破。成矿流体沿构造运移并发生水岩反应形成蚀变带, 石英黄铁矿脉沿节理充填发育, 富集矿化元素、多金属硫化物, 为构造叠加晕和 SBTEM 等物化探测方法应用提供了物化条件。

(2) 胶东地区首次应用的五方位 SBTEM 线圈异常特征符合新发现大尺度金富集段和浅部已知蚀变带和见矿特征, 该技术的应用验证了其有效性。因物探解译存在多解性, 后续需进一步研究曲线突变段陡倾构造对异常的影响和矿体异常特征的精细化解译。

(3) 综合地质规律、构造叠加晕预测建立的井中地物化综合探测技术具有较强的适用性, 为胶东金矿深部探测提供了新的技术参考。结合深部 T5 线圈与已知大尺度金富集段 T1 线圈成矿指示段相似程度高、前缘晕叠加近矿晕特征明显和垂向等间距、趋势外推等控矿规律, 预测新发现大尺度金富集段为主阶段石英黄铁矿脉强烈发育的深部富矿段前端。

致谢: 郭瑞朋、刘汉栋研究员参加了野外地质工作, 审稿人对稿件提出了宝贵修改意见, 在此一并表示衷心感谢。

## References

- Auken, E., Christiansen, A.V., Kirkegaard, C., et al., 2015. An Overview of a Highly Versatile Forward and Stable Inverse Algorithm for Airborne, Ground-Based and Borehole Electromagnetic and Electric Data. *Exploration Geophysics*, 46(3): 223-235. <http://doi.org/10.1071/EG13097>
- Chen, W.Y., Han, S.X., Khan, M.Y., et al., 2020. A Surface-to-Borehole TEM System

- Based on Grounded-Wire Sources: Synthetic Modeling and Data Inversion. *Pure and Applied Geophysics*, 177(9): 4207–4216. <http://doi.org/10.1007/s00024-020-02477-1>
- Dai, X.P., Cheng, L.Z., Mareschal, J.C., et al., 2019. New Method for Denoising Borehole Transient Electromagnetic Data with Discrete Wavelet Transform. *Journal of Applied Geophysics*, 168: 41–48. <http://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.05.009>
- Deng, J., Yang, L.Q., Groves, D.I., et al., 2020a. An Integrated Mineral System Model for the Gold Deposits of the Giant Jiaodong Province, Eastern China. *Earth-Science Reviews*, 208(103274). <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103274>
- Deng, J., Qiu, K.F., Wang, Q.F., et al., 2020b. In Situ Dating of Hydrothermal Monazite and Implications for the Geodynamic Controls on Ore Formation in the Jiaodong Gold Province, Eastern China. *Economic Geology*, 115(3): 671–685. <http://doi.org/10.5382/econgeo.4711>
- Deng, J., Wang, Q.F., Santosh, M., et al., 2020c. Remobilization of Metasomatized Mantle Lithosphere: A New Model for the Jiaodong Gold Province, Eastern China. *Mineralium Deposita*, 55(2SI): 257–274. <http://doi.org/10.1007/s00126-019-00925-0>
- Deng, J., Wang, Q.F., Zhang, L., et al., 2023. Metallogenic Model of Jiaodong-Type Gold Deposits, Eastern China. *Science China-Earth Sciences*, 53(10): 2323–2347 (in Chinese with English abstract).
- Guo, X.G., Dai, S., Luo, W.B., et al. 2025. Construction of a Deep Prospecting Model for Baiyinchang Xiaotieshan VHMS-Type Deposit Based on Wide-Field Coded-Source Electromagnetic Sounding Method. *Earth Science*, 50(11): 4243–4260 (in Chinese with English abstract).
- Fan, H.R., Lan, T.G., Li, X.H., et al., 2021. Conditions and Processes Leading to Large-Scale Gold Deposition in the Jiaodong Province, Eastern China. *Science China-Earth Sciences*, 64(9SI): 1504–1523. <http://doi.org/10.1007/s11430-020-9789-2>
- Hu, H.L., Liu, S.L., Fan, H.R., et al., 2020. Structural Networks Constraints on Alteration and Mineralization Processes in the Jiaojia Gold Deposit, Jiaodong Peninsula, China. *Journal of Earth Science*, 31(3): 500–513. <http://doi.org/10.1007/s12583-020-1276-z>
- Johnson, D., Cherkaev, E., Furse, C., et al., 2001. Cross-borehole Delineation of a Conductive Ore Deposit in a Resistive Host – Experimental Design. *Geophysics*, 66(3): 824–835. <http://doi.org/10.1190/1.1444972>
- Li, H., Yu, B., Wei, J., et al., 2021. Research on Prediction of Hidden Ore Bodies at Depth in Exploration (New) Areas Using Structural Superimposed Halos and a Reference Practical Ideal Model. *Geology and Exploration*, 57(02): 351–359 (in Chinese with English abstract).
- Li, J.Q., Peng, R.H., Hu, X.Y., et al., 2023. Electrical Structure of Upper Crust in Yongxing Region, Southeast Hunan Province. *Earth Science*, 48(10): 3932–3945 (in Chinese with English abstract).

- Liu, D.M., Liang, M.X., Feng, J., et al., 2024. Response Characteristics and Its Prospecting Signs of Geophysical Well Logging in Xiaotongjiabuzi Gold Deposit, Eastern Liaoning Province. *Earth Science*, 49(03): 1066–1080 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Xu, F., Ke, G.Q., et al., 2023. Application of five-Direction Borehole TEM in the Exploration of Yueyawan Copper–Nickel Deposit in East Tianshan, Xinjiang. *Mineral Exploration*, 14(09): 1676–1682 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Y.X., Hu, J.H., Chang, Y.J., et al., 2021. Study on the Coincident-Loop Transient Electromagnetic Method in Seafloor Exploration-Taking Jiaodong Polymetallic Mine as a Model. *Journal of Earth Science*, 32(1SI): 25–41. <http://doi.org/10.1007/s12583-020-1087-2>
- Massiot, C., McIntosh, I., Deans, J., et al., 2023. Petrophysical Facies and Inferences on Permeability at Brothers Volcano, Kermadec Arc, Using Downhole Images and Petrophysical Data. *Economic Geology*, 118(7). <http://doi.org/10.5382/econgeo.4897>
- Qiu, K.F., Deng, J., Laflamme, C., et al., 2023. Giant Mesozoic Gold Ores Derived from Subducted Oceanic Slab and Overlying Sediments. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 343: 133–141. <http://doi.org/10.1016/j.gca.2023.01.002>
- Qiu, K.F., Romer, R.L., Long, Z.Y., et al., 2024. The Role of an Oxidized Lithospheric Mantle in Gold Mobilization. *Science Advances*, 10(eado626241). <http://doi.org/10.1126/sciadv.ado6262>
- Song, M.C., Wang, B., Song, Y.X., et al., 2023a. Spatial Coupling Relationship Between Faults and Gold Deposits in the Jiaodong Ore Concentration Area and the Effect of Thermal Doming–Extension on Mineralisation. *Ore Geology Reviews*, 153(105277). <http://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105277>
- Song, M.C., Wang, L., Song, Y.X., et al., 2023b. Geometry and Origin of Supergiant Gold Deposits in the Jiaodong Gold Province, Eastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 254(105744). <http://doi.org/10.1016/j.jseaes.2023.105744>
- Song, M.C., Wang, H.J., Liu, H.B., et al., 2024. Deep Characteristics of Ore Controlling Faults in Jiaoxibei Gold Deposits and Its Implications for Prospecting: Evidence from Geophysical Surveys. *Geology in China*, 51(01): 1–16 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J.L., Mao, X.C., Liu, Z.K., et al., 2024. Three-Dimensional Mineral Prospectivity Mapping Considering Structural Restoration in the Dayingezhuang gold Deposit, Eastern China. *Ore Geology Reviews*, 165(105860). <http://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105860>
- Wang, P., Li, M.X., Yao, W.H., et al., 2020. Detection of Abandoned Water-Filled Mine Tunnels Using the Downhole Transient Electromagnetic Method. *Exploration Geophysics*, 51(6): 667–682. <http://doi.org/10.1080/08123985.2020.1746182>
- Wang, Q., Wang, X.Q., Liu, H.L., et al., 2022b. 3D Geochemical Modeling of the Qujia Gold Deposit, China: Implications for Ore Genesis and Geochemical Exploration of Deep Concealed Ore Bodies. *Ore Geology Reviews*, 144(104819). <http://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104819>

- Wang, Q.F., Yang, L., Zhao, H.S., et al., 2022a. Towards a Universal Model for Orogenic Gold Systems: A Perspective Based On Chinese Examples with Geodynamic, Temporal, and Deposit-Scale Structural and Geochemical Diversity. *Earth-Science Reviews*, 224(103861). <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103861>
- Wang, Y.P., Zhu, P.G., Zhang, W., et al., 2022. Geological Significances and Geochemical Compositions of Gold and Gold-bearing Minerals from Zhaoxian Deeply-Seated Gold Deposit, Jiaodong Area. *Mineral Deposits*, 41(02): 255-272 (in Chinese with English abstract).
- Yang, L.Q., Deng, J., Wang, Z.L., et al., 2016. Relationships Between Gold and Pyrite at the Xincheng Gold Deposit, Jiaodong Peninsula, China: Implications for Gold Source and Deposition in a Brittle Epizonal Environment. *Economic Geology*, 111(1): 105-126. <http://doi.org/10.2113/econgeo.111.1.105>
- Yang, L.Q., Deng, J., Zhang, L., et al., 2024. Mantle-Rooted Fluid Pathways and World-Class Gold Mineralization in the Giant Jiaodong Gold Province: Insights from Integrated Deep Seismic Reflection and Tectonics. *Earth-Science Reviews*, 255(104862). <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104862>
- Yang, L.Q., Deng, J., Zhang, L., et al., 2024. Jiaodong-Type Gold Deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 40(06): 1691-1711 (in Chinese with English abstract).
- Yang, T.T., Nie, L.S., Wang, X.Q., et al., 2022. Regional Geochemical Distribution of Uranium in Fine-Grained Soil and Prediction of Prospecting in Erlian Basin. *Earth Science*, 47(08): 2809-2823 (in Chinese with English abstract).
- Yu, X.F., Shan, W., Xiong, Y.X., et al., 2018. Deep Structural Framework and Genetic Analysis of Gold Concentration Areas in the Northwestern Jiaodong Peninsula, China: A New Understanding Based on High-Resolution Reflective Seismic Survey. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 92(5): 1823-1840. <http://doi.org/10.1111/1755-6724.13679>
- Yu, X.F., Yang, D.P., Li, D.P., et al., 2019. Mineralization Characteristics and Geological Significance in 3000m Depth of Jiaojia Gold Metallogenic Belt, Jiaodong Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 35(09): 2893-2910 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D.C., Zhang, W., Wang, Y.P., et al., 2018. Characteristics of Ore Bodies and Prospecting Potential of Zhaoxian Gold Deposit in Laizhou City of Shandong Province. *Shandong Land and Resources*, 46(02): 383-391 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, P.G., Li, X.Z., Zhang, W. J., et al., 2023. The "Trinity" Prospecting Prediction Geological Model and Demonstration of Deep Prospecting of Jiaojia Gold Field in the Jiaodong Area. *Geological Bulletin of China*, 42(06): 909-920 (in Chinese with English abstract).
- Zou, Y.H., Chen, Y.T., Deng, H., 2021. Gradient Boosting Decision Tree for Lithology Identification with Well Logs: A Case Study of Zhaoxian Gold Deposit, Shandong Peninsula, China. *Natural Resources Research*, 30(5): 3197-3217. <http://doi.org/10.1007/s11053-021-09894-6>

## 中文参考文献

- 邓军, 王庆飞, 张良, 等, 2023. 胶东型金矿成因模型. 中国科学:地球科学, 53(10): 2323-2347.
- 郭小刚, 戴霜, 罗维斌, 等, 2025. 基于广域-编码源电磁测深的白银厂小铁山VHMS型矿床深部找矿模型构建. 地球科学, 50(11): 4243-4260.
- 李惠, 禹斌, 魏江, 等, 2021. 勘查(新)区构造叠加晕研究方法及其预测参照实用理想模型. 地质与勘探, 57(02): 351-359.
- 李佳奇, 彭荣华, 胡祥云, 等, 2023. 湘东南永兴地区上地壳电性结构及其地质意义. 地球科学, 48(10): 3932-3945.
- 刘东明, 梁明星, 冯杰, 等, 2024. 辽东小佟家堡子金矿床地球物理测井响应特征及找矿标志. 地球科学, 49(03): 1066-1080.
- 刘洋, 徐飞, 柯国秋, 等, 2023. 地-井五方位TEM在新疆东天山月牙湾铜镍矿床勘查中的应用. 矿产勘查, 14(09): 1676-1682.
- 宋明春, 王洪军, 刘洪波, 等, 2024. 胶西北金矿控矿断裂深部特征及对找矿的启示——来自地球物理探测的证据. 中国地质, 51(01): 1-16.
- 王英鹏, 祝培刚, 张文, 等, 2022. 胶东地区招贤深部金矿床金和载金矿物化学成分及其地质意义. 矿床地质, 41(02): 255-272.
- 严桃桃, 聂兰仕, 王学求, 等, 2022. 二连盆地土壤微细粒铀地球化学分布特征及找矿方向. 地球科学, 47(08): 2809-2823.
- 杨立强, 邓军, 张良, 等, 2024. 胶东型金矿. 岩石学报, 40(06): 1691-1711.
- 于学峰, 杨德平, 李大鹏, 等, 2019. 胶东焦家金矿带3000m深部成矿特征及其地质意义. 岩石学报, 35(09): 2893-2910.
- 祝德成, 张文, 王英鹏, 等, 2018. 山东省莱州市招贤金矿区矿体特征与找矿前景. 山东国土资源, 34(09): 14-19.
- 祝培刚, 李秀章, 张文佳, 等, 2023. 胶东焦家金矿田“三位一体”找矿预测地质模型与深部找矿示范. 地质通报, 42(06): 909-920.