

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.06.015

胶东半壁店隐伏金矿床综合地球物理探测

孟银生^{1,2}, 张瑞忠³, 汤磊³, 李瑞红², 王偲瑞⁴, 华北⁵, 王刚^{2*}MENG Yinsheng^{1,2}, ZHANG Ruizhong³, TANG Lei³, LI Ruihong², WANG Sirui⁴, HUA Bei⁵, WANG Gang^{2*}

1. 中国地质调查局地球物理调查中心, 河北 廊坊 065000;

2. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000;

3. 招金矿业股份有限公司, 山东 招远 265400;

4. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;

5. 中国冶金地质总局山东正元地质勘查院, 山东 济南 250101

1. Geophysical Survey Center, China Geological Survey, Langfang 065000, Hebei, China;

2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, Hebei, China;

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

4. State Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

5. Geological Exploration Institute of Shandong Zhengyuan, China Metallurgical Geology Bureau, Ji'nan 250101, Shandong, China

摘要:胶东半岛是中国重要的金矿集区,金矿床的分布严格受 NE—NNE 向断裂带控制,招平断裂带是其中规模最大的控矿断裂带。然而,在断裂带中段的招远—道头镇区段(半壁店地区),新生代盖层下尚未发现成规模的金矿床。在总结招平断裂带内金矿床成矿模式和控矿地质体物性差异的基础上,从区域和断裂带尺度对比分析了 1:60 万和 1:20 万 2 种比例尺的布格重力异常特征,厘清了区域构造和岩体分布情况;进而在招平断裂带中段的半壁店地区利用 1:1 万高精度磁测和代表性剖面 1:1 万可控源音频大地电磁测量,揭示隐伏控矿地质体的分布情况。区域布格重力异常揭示出近 EW 向相对低密度正值($(0\sim 6)\times 10^{-5} \text{ m/s}^2$)表征的构造带、团状正密度值(大于 $2\times 10^{-5} \text{ m/s}^2$)表征的玲珑黑云母花岗岩体和 NE—NNE 向密度值梯度带表征的招平断裂带;3 组赋矿相关地质体的空间相对展布特征显示,玲珑黑云母花岗岩体南边界被近 EW 向构造带围限,招平断裂带切穿了早期生成的玲珑黑云母花岗岩体。高精度磁测结果反映:①招平断裂带穿切玲珑黑云母花岗岩体;②近 EW 向低密度、高磁性(相对磁性场值超过 100 nT)花岗闪长岩体在深部受控于 EW 向深大构造带;③NE 向串珠状低密度、高磁异常(相对磁性场值超过 40 nT)表征了矿床尺度招平次级断裂内的系列花岗岩体(主成矿期之后生成)。可控源音频大地电磁测深和测区中部钻孔均证实,这些花岗岩脉从北向南(指向主断裂方向)埋深逐渐变浅。因此,NE 向招平断裂带和近 EW 向构造带共同控制岩体分布,其交会部位是金矿体产出的有利空间,但上侵花岗岩体本身贫矿。半壁店地区隐伏金矿床形成时间晚于招平断裂主成矿期。研究结果表明,近 EW 向低密度带内的金矿找矿前景不乐观。

关键词:地球物理探测;隐伏金矿床;控矿地质体;半壁店;矿产勘查工程

中图分类号:P618.51;P631 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)06-1095-12

Meng Y S, Zhang R Z, Tang L, Li R H, Wang S R, Hua B, Wang G. Integrated geophysical exploration of the hidden gold deposit in Banbidian, Jiaodong Peninsula. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(6): 1095-1106

Abstract: The distribution of gold deposits in Jiaodong peninsula, the most important gold concentration area of China, is strictly

收稿日期:2021-06-17;修订日期:2021-09-02

资助项目:国家重点研发计划项目《克拉通典型地区岩石圈三维物质架构的示踪方法》(编号:2019YFA0708603)、中国地质调查局项目《北山—天山造山带西北部区域基础地球物理调查》(编号:ZD20220507)、《极浅海和滩涂区音频大地电磁连续测量技术研究》(编号:JYYWF20182601)、高等学校学科创新引智计划项目《成矿作用动力学》(编号:BP0719021)和地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项经费《成矿系统的深部过程与成矿机理》(编号:MSFGPMR201804)

作者简介:孟银生(1981-),男,博士,高级工程师,从事勘探地球物理相关研究。E-mail:josemeng@163.com

* 通信作者:王刚(1981-),男,硕士,高级工程师,从事勘探地球物理相关工作。E-mail:cgsawang@mail.cgs.gov.cn

controlled by NE–NNE–trending faults. However, no large–scale gold deposits have been found under the Cenozoic rocks in Zhaoyuan–Daotouzhen section in the middle part of the fault zone. On the basis of summarizing the difference of metallogenic model and ore–controlling geological body in Zhaoping fault zone, the Bouguer gravity anomaly characteristics of 1 : 600 and 1 : 200 thousand scale are compared from regional and fault scale, and the distribution of regional structure and rock mass are clarified. Furthermore, the distribution of concealed ore–controlling geological bodies is revealed by 1 : 10000 high–precision magnetic survey and 1 : 10000 controlled–source audio magnetotelluric survey of representative section in the Banbidian area. The regional Bouguer gravity anomaly reveals the tectonic zone characterized by the relatively low density positive value ($(0\sim 6)\times 10^{-5}$ m/s²) near EW direction, the Linglong biotite granite characterized by the positive agglomerate density value ($>2\times 10^{-5}$ m/s²) and the Zhaoping fault characterized by the NE–NNE density step zone. The spatial distribution characteristics of the three groups of ore–bearing geological bodies show that the southern boundary of Linglong biotite granite is bounded by the EW–trending tectonic belt, and Zhaoping fault belt cuts through the early Linglong biotite granite. High precision magnetic measurements show that, ①Linglong biotite granite is cut by Zhaoping fault zone; ②The granodiorite with low density and high magnetism near EW–trending (relative magnetic field value is more than 100 nT) is controlled by the EW direction deep structural belt in depth; ③The series of granites within Zhaoping secondary fault (formed after the main mineralization period) of the ore deposit scale are characterized by NE–trending bead–like low density and high magnetic anomaly (relative magnetic field value over 40 nT). Both CSAMT sounding and boreholes in the middle of the survey area confirm that the buried depth of the granite dyke decreases gradually from south to north (towards the direction of the main fault). Therefore, the NE–trending Zhaoping fault belt and the nearly EW–trending tectonic zone jointly control the distribution of the rock mass, and the intersection of them is a favorable space for the production of gold orebodies, while the intruding granitic body itself is depleted in gold. The concealed gold deposits in Banbidian area were formed later than the main metallogenic period of Zhaoping fault. The result shows that the prospecting prospect of gold ore in the low–density zone near EW–trending is not optimistic.

Key words: geophysical exploration; concealed gold deposits; ore–controlling geological body; Banbidian; mineral exploration engineering

胶东半岛金矿集区是中国重要的黄金资源储/产地,在约 0.3% 的国土面积内产出中国黄金总产量的 1/4^[1–3]。金矿(化)体主要赋存于胶东半岛西北部的 3 条 NE–NNE 向断裂带内,招平断裂带是其中规模最大者。在长逾 120 km 的断裂带内发现金矿床(点)20 余处,探明金资源储量 1500 余吨^[3–4]。然而,在招远—道头镇区段,仅探明少量金矿点,金矿资源储量较带内其余区段明显偏低。

20 世纪 70 年代以来,以深部勘查技术和矿床理论研究水平巨大发展为特色的“深部找矿突破”,使得第四系覆盖区、老矿区深部及海底基岩区成为热门勘查对象^[5–7]。招平断裂带内矿(化)体分布严格受构造控制、呈雁行式分布的特征被普遍认同^[2–3, 5, 8–10]。第四系覆盖的招远—道头镇,相对贫矿的原因尚未定论,需要开展具有深部探测能力的综合地球物理勘查,并结合成矿理论探讨问题的根源。

1 地质地球物理背景

1.1 地质背景

胶东半岛位于华北克拉通东南缘,西侧以郯庐断裂带为界,北、东分别临渤海和黄海,由西侧的胶北地体和东侧的苏鲁超高压变质带北段 2 个构造单元组成^[2, 11–13]。胶北地体由胶北隆起和胶莱盆地组

成,前者金矿探明储量囊括了胶东半岛金资源总量的 90% 以上,其基底的华北克拉通早前寒武纪片麻岩由新太古代胶东群、古元古代荆山群和粉子山群^[1–2, 14–16]及新元古代蓬莱群^[14, 17]组成,地表出露前寒武纪变质岩和中生代花岗岩^[2]。胶北地体出露早中生代华北和扬子陆块碰撞形成的 EW 向构造带、晚侏罗世—早白垩世发育的一系列 NE–NNE 向断裂带^[1–2, 12, 18–19]。NE–NNE 向压扭性断裂多为郯庐断裂带的次级断裂,是胶西北金成矿系统的主要导矿、容矿构造^[5, 13, 20–26],以约 35 km 间隔近平行展布了三山岛、焦家和招平断裂带(图 1)。

招平断裂带南起平度,经招远向 NE 方向延伸,过蓬莱延伸入海,断裂破碎带宽度 40~400 m。断裂带以西分布中生代壳源玲珑型黑云母花岗岩,以东以壳幔混源的胶东群和荆山群变质岩为主,在招远市以北的断裂带展布于花岗岩体中^[11, 14]。断裂主体走向 NE30°~50°,倾向 E,倾角为 30°~50°,由浅往深倾角逐渐变缓^[2–3, 10, 13]。断裂带内广泛分布受早期深大断裂控制的中生代侵入岩,主要是晚侏罗世玲珑花岗岩、早白垩世中期郭家岭花岗岩和早白垩世晚期的艾山花岗岩^[2, 9, 27–29](图 1–b)。玲珑花岗岩由黑云母花岗岩和二长花岗岩构成^[30]。郭家岭花岗岩主要由斑状花岗闪长岩组成^[30]。未变

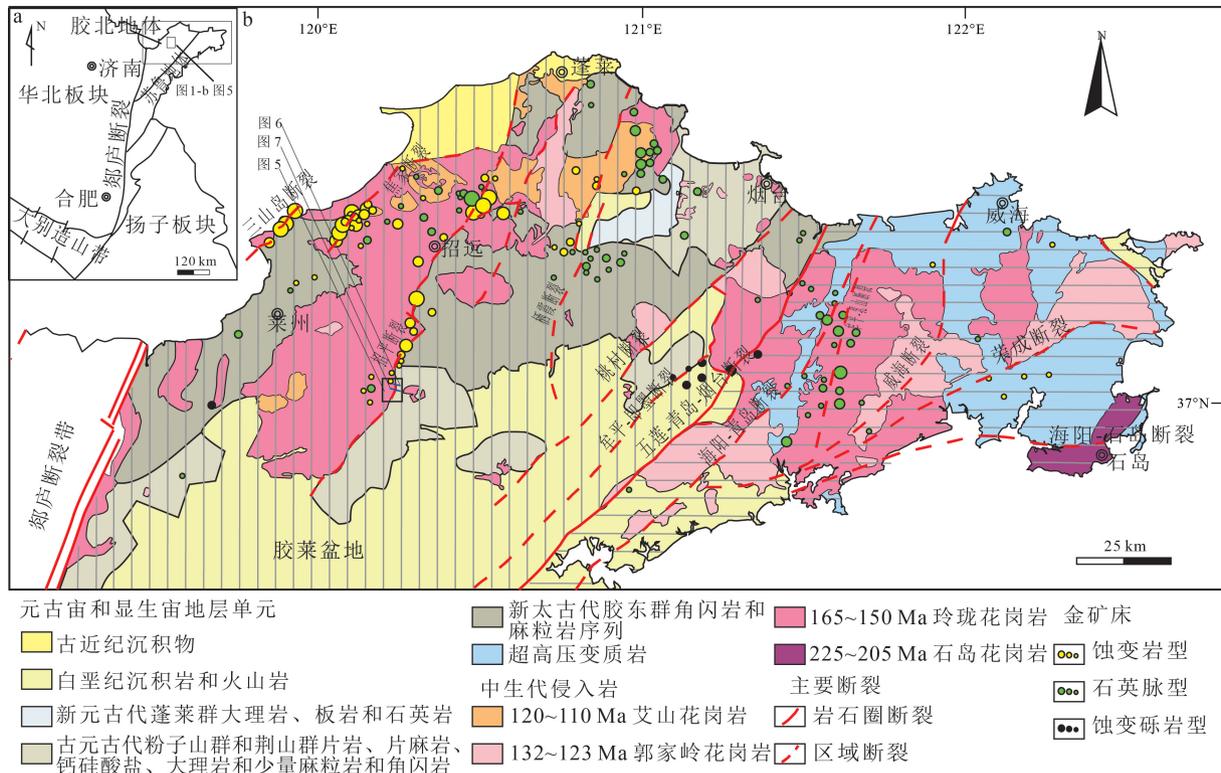


图 1 胶东大地构造位置图(a)及其地质简图(b) (据参考文献[2]修改)

Fig. 1 Tectonic location(a) and geological sketch map(b) of Jiaodong

形的艾山花岗岩主要出露在胶东半岛东部^[27,31]。

1.2 隐伏岩体与区域构造

冀鲁豫皖苏地区区域布格重力异常图(1:60万)^[32](图2)显示,胶西北地区中部存在一簇SSW—NNE走向的重力零值线。负值异常表征花岗岩体,正值异常对应变质岩体。招远市西南、平度市以北地区,以郭家店为中心的局部圈闭重力负异常,反映低密度玲珑黑云母花岗岩;周围重力正值转换带,表征其与早期岩体的接触带;其东侧NE向重力值正负转换梯级带对应招平断裂带。在胶西北地区1:20万布格重力异常图(图3)中,北侧的NW向接触带呈现为密度正值内的相对低异常条带(沿栖霞南—招远南—焦家南方向)。不同比例尺的密度分布均表明,招平带的走向在招远市以南由NNE向转为NE向。同时,布格重力低值条带与正负转换梯级带表征的招平断裂带,亦是在招远市以南交会。

近EW向低密度异常带以北的团状重力正值,为玲珑型黑云母花岗岩引起(图3)。招平带在招远

市以北展布于花岗岩体内,表明玲珑花岗岩体形成时间早于招平断裂。基于布格重力异常资料可划分出3期构造活动形迹,活动的先后顺序为近EW向低密度带→玲珑岩体→招平断裂。

从半壁店至焦家南连线约15 km为相对贫矿带^[33-34],大体与近EW向低密度带重合。本文在划分半壁店地区金成矿前后构造活动的基础上,解析高精度磁测和可控源音频大地电磁探测资料,对招平断裂带半壁店一带地质构造、隐伏岩体与金矿(化)体的空间关系进行分析,探讨贫矿和低密度异常条带的关系。

1.3 岩(矿)石地球物理特征

1.3.1 矿石特征

招平带中南段产出的金矿床,以破碎带蚀变岩型为主,石英脉型次之。金矿石中主要金属矿物为黄铁矿、黄铜矿、方铅矿和闪锌矿,非金属矿物主要有石英、绢云母、钾长石、斜长石和方解石。金矿物以银金矿和自然金为主,含少量金银矿,多数以可见金形式充填于黄铁矿、石英裂隙中,少量为晶隙

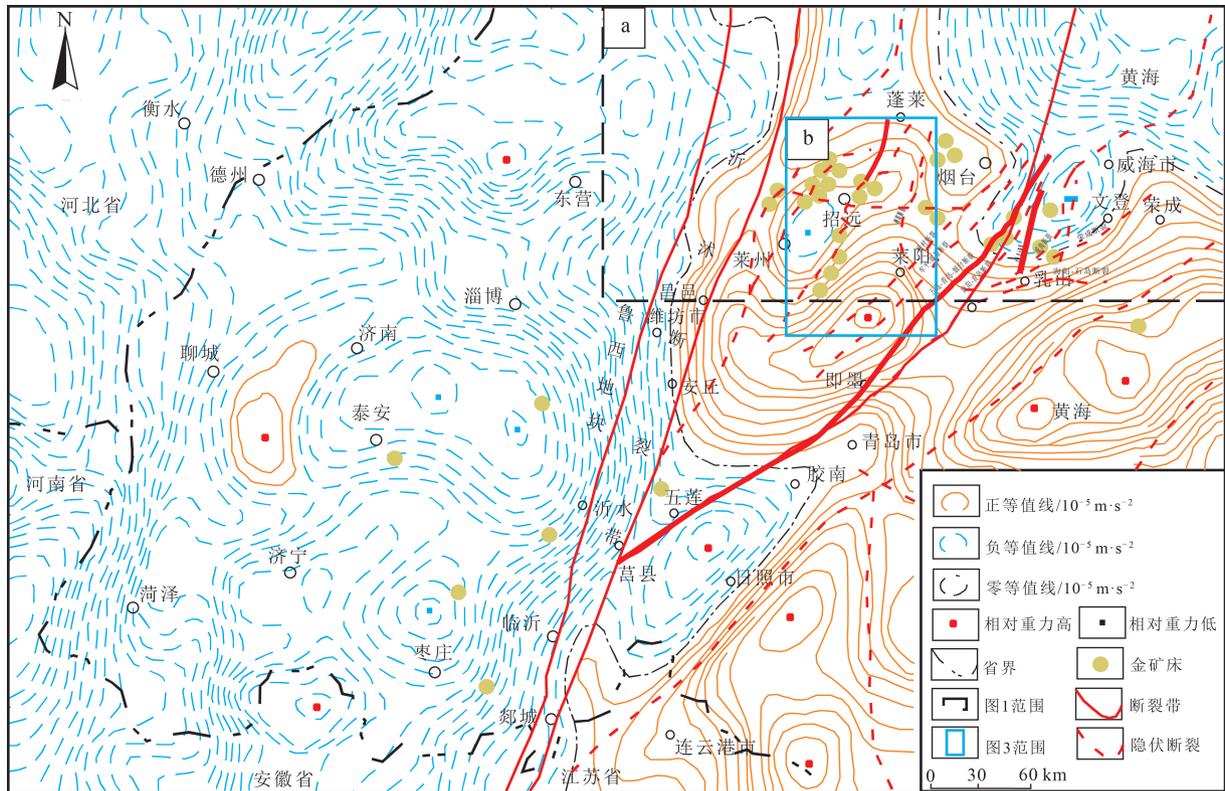


图2 冀鲁豫皖苏区域布格重力异常(据参考文献[32]修改)

Fig. 2 Regional Bouguer gravity anomaly in the Hebei, Shandong, Henan, Anhui and Jiangsu

a—图1范围;b—图3范围

金和包体金^[2, 5, 35]。成矿元素组合特征表现为中—低温蚀变矿化,热液蚀变类型多为黄铁矿化、硅化、钾长石化、绢云母化和碳酸盐化。按矿石矿物组合、结构构造、蚀变破碎程度等因素,矿石可分为4类:黄铁绢英岩化糜棱岩型、黄铁绢英岩化碎裂岩型、细脉浸染状或网脉状石英黄铁矿化蚀变花岗碎裂岩型,以及多金属硫化物蚀变碎裂岩型。矿石构造以浸染状及细脉状为主,斑点状、网脉状、交错状构造次之^[2, 10, 24, 36-37]。

1.3.2 磁场特征

为解释天然的或人工的地球物理场变化,合理推断地质构造和矿产资源分布特征,需对工作区的岩(矿)石磁性、电性等地球物理性质差异进行对比分析。招平断裂破碎带内的变质岩以新太古代胶东群齐山组和英庄乔组为主。齐山组岩性为变粒岩、片麻岩,偶见黑云片岩、斜长角闪片麻岩和斜长角闪岩,磁场特征表现为平缓磁场背景中局部高值异常;英庄乔组岩性以弱磁性变粒岩、黑云斜长角

闪片麻岩为主,夹磁性较强的磁铁石英岩,磁场幅值变化剧烈。带内岩浆岩多为晚侏罗世玲珑片麻状黑云母花岗岩和早白垩世郭家岭似斑状花岗闪长岩^[2, 13]。岩性以中粒二长花岗岩为主,相应磁场特征表现为平稳高磁场。断裂构造表征为磁场分界线和梯级带、串珠状磁异常带等^[10, 32]。总之,招平带内岩体和断裂构造的磁性差异显著,具备磁测工作的物性差异条件。

1.3.3 岩(矿)石电阻率特征

招平断裂带内不同地质体的电性差异较显著^[17, 38-39]。电阻率较高值主要由中粒二长花岗岩引起,中低值主体为胶东群各类岩石和碎裂岩、角闪岩等。破碎带蚀变岩型金矿石本身呈高阻特征,因赋存在各种碎裂岩、断层泥等低阻环境中,相应的地球物理找矿标志为低阻背景中的局部高阻^[10, 39]。

1.4 地球物理勘查思路

1.4.1 区域构造控矿特征

胶西北3条大型“S”形展布的断裂带既是导矿

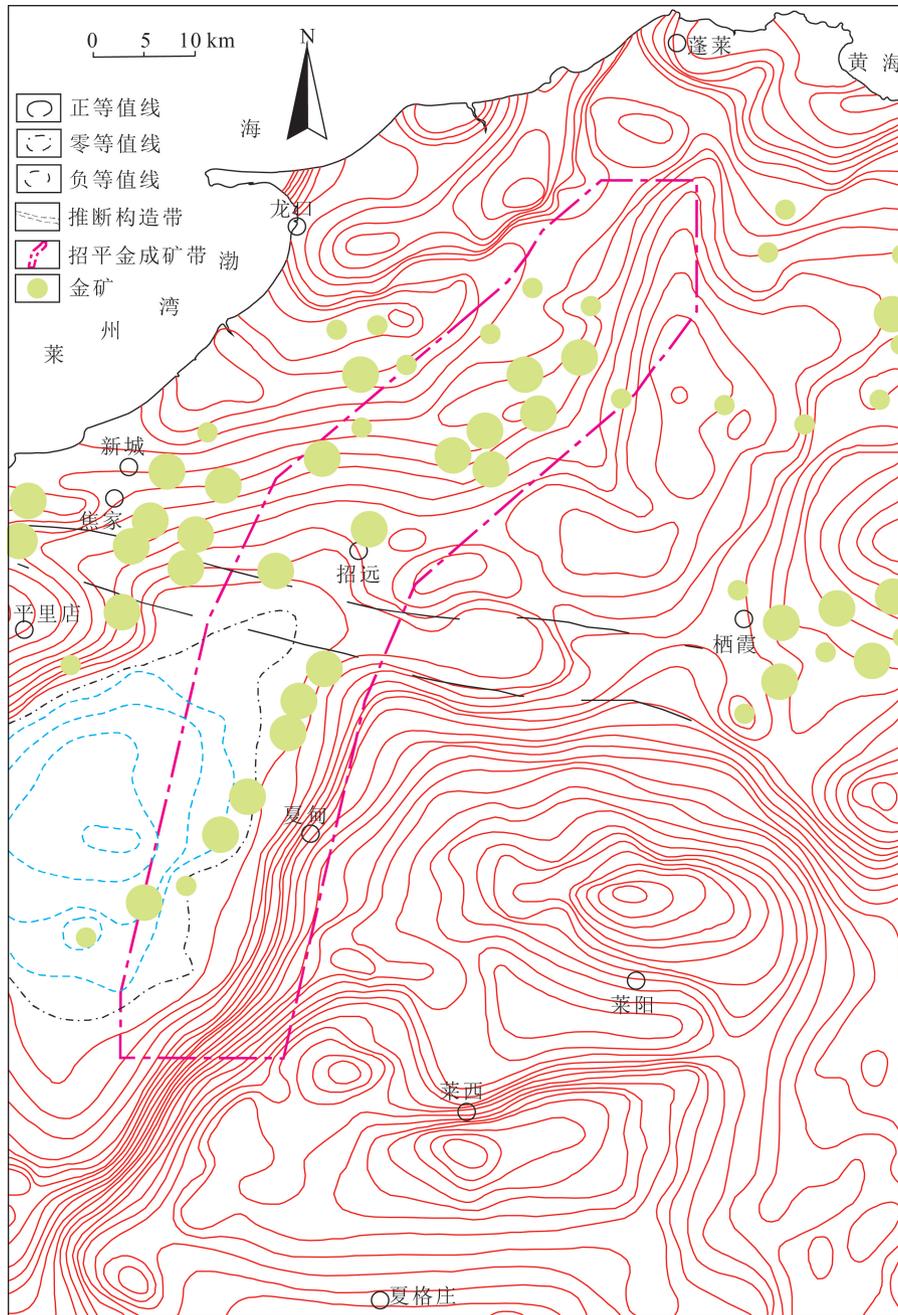


图 3 胶西北地区区域布格重力异常(据参考文献[2,4,32]修改)

Fig. 3 Regional Bouguer gravity anomaly of the Northwestern region in Jiaodong Peninsula

构造,又是容矿构造^[2],赋存胶东半岛金矿资源的90%以上^[2,13]。在区域EW向隐伏构造和NE—NNE向断裂构造共同作用下,半岛内金矿床分布具有东西成行、南北成串的特点^[3,5,40]。招平断裂及其次级断裂作为半岛内最重要的一条大型聚矿构造带,其主断裂控制了带内金矿(化)体的规模、形态

和产状,远端节理裂隙控制了矿化的局部富集,总体呈现多级有序构造—矿化(蚀变)的网络结构^[2-3,10,34]。

1.4.2 地球物理勘查流程

围岩蚀变带、动力变质带、地球物理线性异常带等是大型聚矿构造带的显著特征^[17,38]。本文在总

结地质(围岩蚀变、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年)和地球物理(重力、磁法和电法)资料的基础上,构建覆盖区综合地球物理勘查流程,针对特定地质问题对应地质体的物性特征,在构造、岩体控制金成矿理论的指导下^[2,34],利用高精度磁测和可控源音频电磁探测方法,查明半壁店地区金资源量相对匮乏的原因。

胶西北金成矿系统形成于130~110 Ma构造-岩浆作用发育的早白垩世陆缘伸展构造背景。矿化样式以破碎带蚀变(砾)岩型、(硫化物-)石英脉型和复合脉带型3种类型为主,矿石多发育压碎、晶粒状和充填结构,大体呈浸染状、细脉浸染状、网脉状、脉状、团块状和块状构造^[5,18,41-42]。断裂带中南段(贫矿区段以南)的金矿化蚀变主体,发生在主断裂相对范围较小的碎裂岩矿化蚀变带范围内。围岩蚀变和金矿(化)体关系密切,围岩蚀变产物黄铁绢英岩化为直接找矿标志。金矿(化)体普遍赋存的黄铁绢英岩化碎裂岩,自断裂带延伸至围岩,其碎裂程度呈降低趋势^[10]。

研究区金成矿系统配套岩体、断裂构造、蚀变矿化体的磁性、电性差异明显,具备开展磁法测量和可控源电磁探测研究工作的前提。本文在区域尺度上,通过密度差异,厘定区域构造、岩体与金矿(化)体之间的空间关系;在矿床尺度上,利用岩(矿)石磁性差异,圈出岩体、构造及矿化的相互关系;在矿体尺度上,利用电阻率差异,从平面和深度上定位断裂破碎带和金矿(化)体的位置^[3,10,39]。

2 数据来源和处理方法

2.1 高精度磁法测量

采用质子旋进磁力仪开展数据采集工作,测线方位角 90° ,测网网度为 $100\text{ m}\times 20\text{ m}$,每个点采集3次有效数据。磁测数据处理技术包括日变改正、正常场改正、高度改正及 ΔT 磁异常值计算。在解释面积性磁测资料时,对磁测数据进行网格化,并根据解释的需要进行化磁极和延拓等转换和处理。

高精度磁测易受浅层不均匀磁性体的噪声干扰,导致深部弱磁信息被掩盖,有效信息提取难度增大。因此,需对数据进行向上延拓处理以压制浅表干扰,分离深部有用信息。三度异常向上延拓,对任一点A向上延拓高度 h 得到新的异常值Z。具体实现过程:以A点为中心,取值由若干个不同半径圆周上的方形网格节点场值确定。公式为:

$$Z_a(\rho) \approx \sum_{i=1}^n k(\rho_i, i) \overline{Z}_a(\rho_i)$$

式中, ρ_i 代表同心圆的半径; $k(\rho_i, i)$ 表示延拓高度的变化系数; $\overline{Z}_a(\rho_i)$ 为插值点的平均值。通过向上延拓处理,使深部磁性地质体的轮廓更加清晰,能显著提升深部地质构造的可识别性。

2.2 可控源音频大地电磁测量(CSAMT)

电性源CSAMT测量技术分为发射和接收两部分。在测区沿测线布设一定点距的接收器,测量对应频率的电场分量 E_x 和磁场分量 H_y ,距离接收端5~10 km的范围内布设与测线平行、长1~2 km的接地导线,对地下依次发射多个频率 f 的交变电流。通过频率 f 、电场分量 E_x 、磁场分量 H_y 计算地下半空间的卡尼亚电阻率^[43],即:

$$\rho_s = \frac{1}{5f} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2$$

依据勘探电磁理论,在均匀介质中,平面电磁波的能量随传播距离增加呈指数衰减。电磁波能量衰减至 $1/e$ 时的距离为趋肤深度 δ :

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

式中, ρ 为地下介质电阻率; f 为发射频率。勘探大地电磁法中,定义电磁波能量衰减至50%的传播距离为勘探深度 D ,即:

$$D = 356 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

地质体背景电阻率固定不变时,发射频率增高,相应勘探深度随之减小;反之,勘探深度增大。即通过改变电磁发射信号频率,勘探地下不同深度地质体的电性特征^[43]。

2.3 观测系统和数据质量

在分析和对比招平断裂带金成矿相关地质体地球物理性质的基础上,笔者在招远南布设了面积性测量(地面高精度磁测)和剖面精细测量(电性源CSAMT)工作,以获取招平断裂带中段招远至道头镇的深部物性结构特征。

在招远南(半壁店地区)开展的地面高精度磁场数据采集(图4),工作比例尺为1:10000,测网网度为 $100\text{ m}\times 20\text{ m}$,测线方位角为 90° ,完成普查区面积 48.0 km^2 。测量检查点695个,占全区总点数的3.09%,点位中误差 $m = \pm 1.16\text{ m}$ 。

在NE向磁异常条带南、北两端各布设一条电

性源 CSAMT 测量剖面(图 4),北端的 L10 测线总长 3.00 km,点距 50 m,方位角 110°36'02",匹配 2 个发射源(A1-B1、A2-B2 距离均为 1.20 km),收、发距均为 6.80 km,发射频率范围 0.8~9600 Hz。南端测线 L14 总长 3.00 km,点距 50 m,方位角 108°51'11",匹配 2 个发射源(A1-B1 距离 0.74 km,A2-B2 距离 1.20 km),收、发距为 6.60 km 和 6.50 km,发射频率范围 0.8~9600 Hz。检查点 6 个,占总测点的 10%,个别点存在高压输电线路干扰,经校正后数据均可用于反演解释。

通过金维软件对高精度磁数据做预处理、化磁

极和上延处理,使用 SCS2D 软件对 CSAMT 数据进行二维约束反演处理。

3 结果与讨论

3.1 半壁店隐伏构造、岩体的特征及其意义

矿床地质研究证明,招平断裂为岩浆和成矿热液上涌通道,并为金的运移、富集和沉淀提供了有利空间^[2,5]。面积性磁测数据经化磁极处理后(图 5-a),测区北西部磁场值较南东部高的趋势特征凸显,多个散点状磁场高值分布在测区中部。磁场经向上延拓处理后(图 5-b),整体呈 NE—NNE

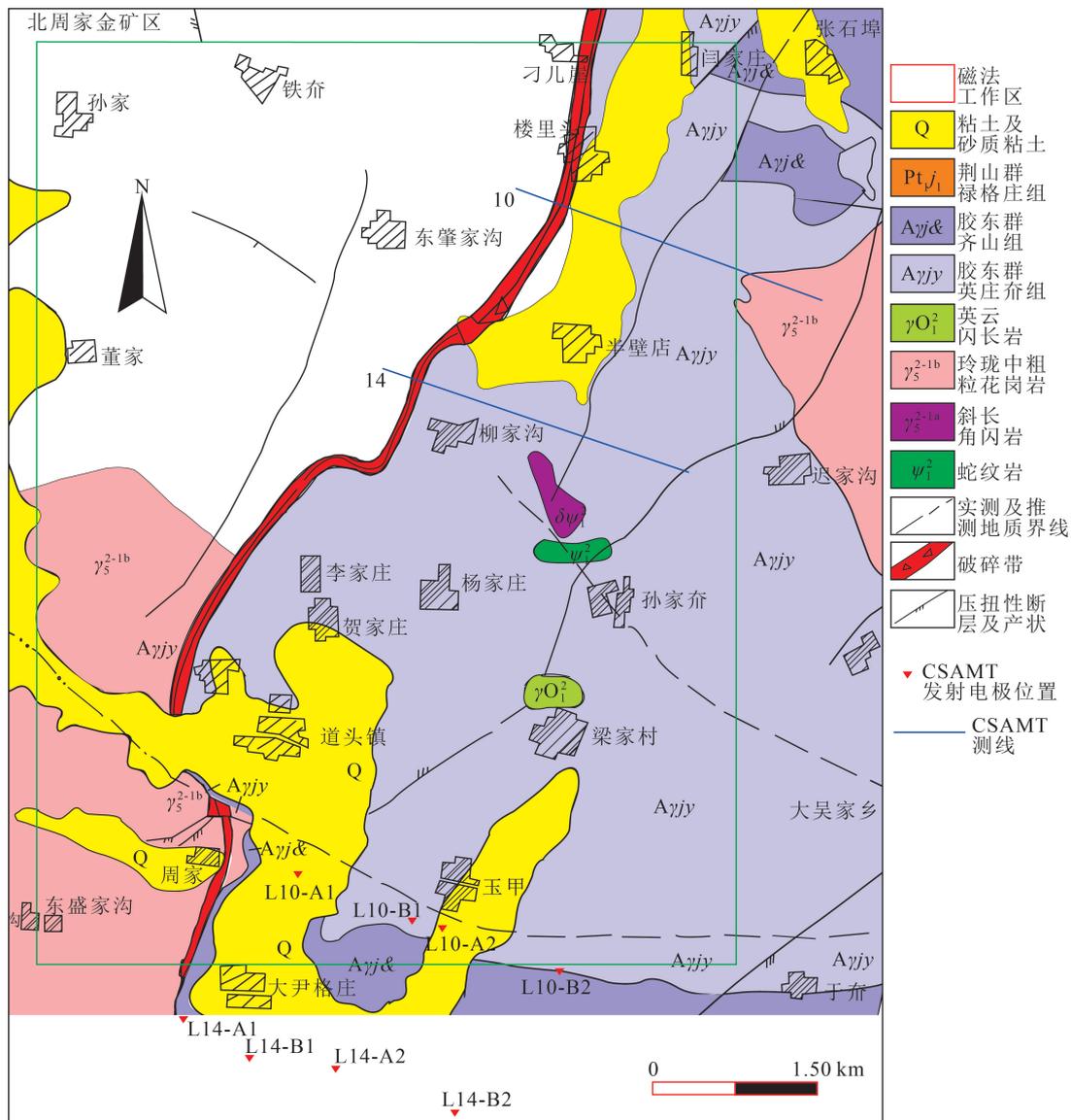


图 4 工作区地质和地球物理观测系统布设简图

Fig. 4 Geological sketch map of the study area with geophysical survey system arrangement

向带状分布,浅表散点状磁场高值干扰被有效压制,凸显了深部高磁性地质体的展布特征。

研究区西北部磁场幅值相对较高,东部磁场总体较弱并呈波状变化,二者的过渡带在平面上呈“S”形展布(图5-a)。结合区内岩、矿石磁性特征,推测研究区东部的磁场相对低值表征早期变质岩,中部楼里头—半壁店—后疃一带的磁场梯级变化表征招平断裂带,西部高磁区表征招平断裂下盘中生代花岗岩体。

西北部的高磁异常,推断为区域近EW向低密度带(图3)的南部边缘。研究区北段磁异常带与NNW向构造对应,中部偏右侧的NEE向构造更显著,凸显了NNE向构造带和NNW向构造带交叉部位特征,推断NNE向构造为右行走滑断裂,并错断了早期形成的NNW向构造。研究区东部呈北强南弱分布的高磁响应,表征招平断裂带金主成矿作用之后,次级断裂发生了强磁性花岗闪长岩底侵事件,即主成矿之后,高温高压岩体沿早期近EW向深大断裂破碎带向上侵入,并大量涌入地壳浅部,沿招平带次级断裂向上运移。

依据磁测资料,考虑到密度资料(图3),将研究区构造活动形迹及其相互穿插关系划分为4期:近

EW向隐伏低密度构造带框定了(早于)玲珑岩体的分布边界,招平断裂带穿插(晚于)玲珑岩体,贫矿韧性花岗岩体(晚于)沿近EW向隐伏构造带、招平断裂次级断裂向上底侵。

初步论断:近EW向早期构造带再活化作用,与招平断裂带招远至道头镇区段的贫矿相关。

3.2 半壁店深部控矿构造特征及其意义

招平断裂带中段的近EW向构造带在主成矿之后发生了再活化^[2,9,27-29]。前文根据密度和磁性资料,推断金成矿后的贫矿流体沿早期近EW向构造带向上运移至招平断裂的交叉部位,但向上侵位花岗岩体的空间分布特征及其与金矿体分布的关系有待查明。

半壁店地区所处位置特殊,为近EW向构造带和NNE向招平断裂的交叉部位,也在招平带与次级断裂的交叉位置。在半壁店地区(构造交叉部位)布设了2条CSAMT测线(L10、L14),对招平断裂开展详细探测,以期探寻该区段贫矿的原因。反演结果表明,测线L10的1700~3000点(图6)、L14线的850~2600点浅部(-300 m以浅)的高电阻率区(图7)对应花岗岩体岩体。L10线的低阻异常(1000~1500点向下延伸至-1300 m以深)、L14线

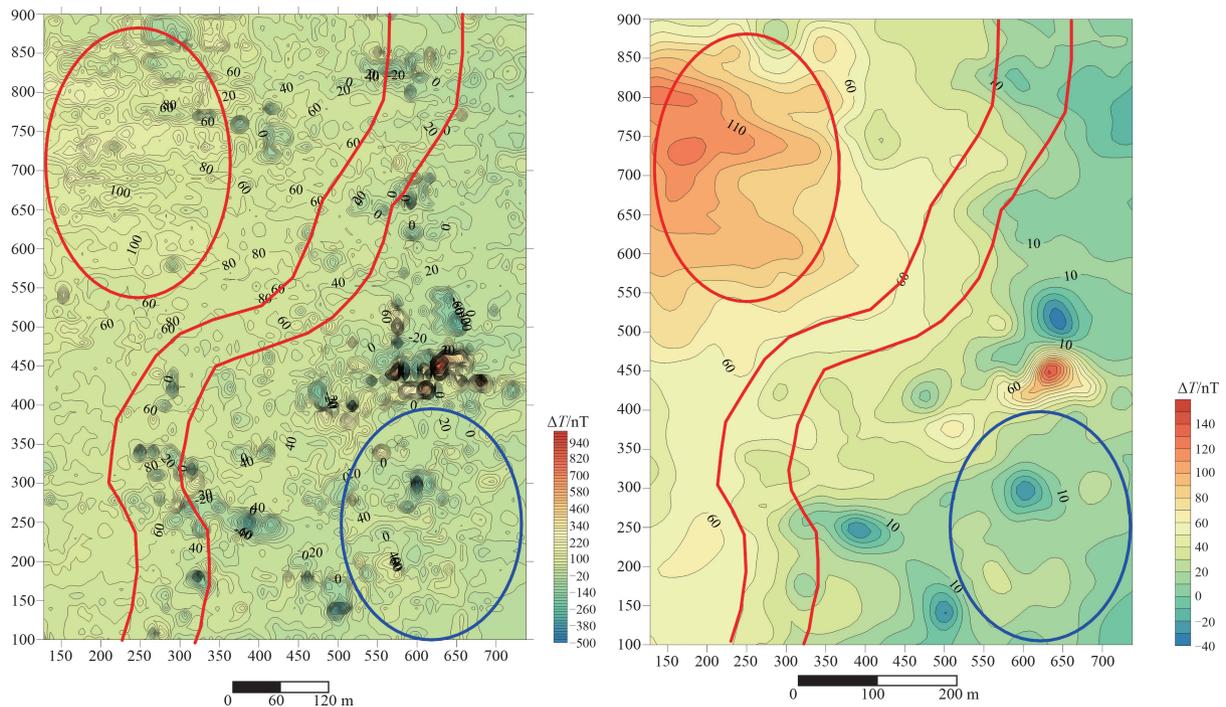


图5 半壁店地区磁法平面图(a)和磁法上延平面图(b)

Fig. 5 The floor plan of magnetic method(a) and upward continuation plan(b)

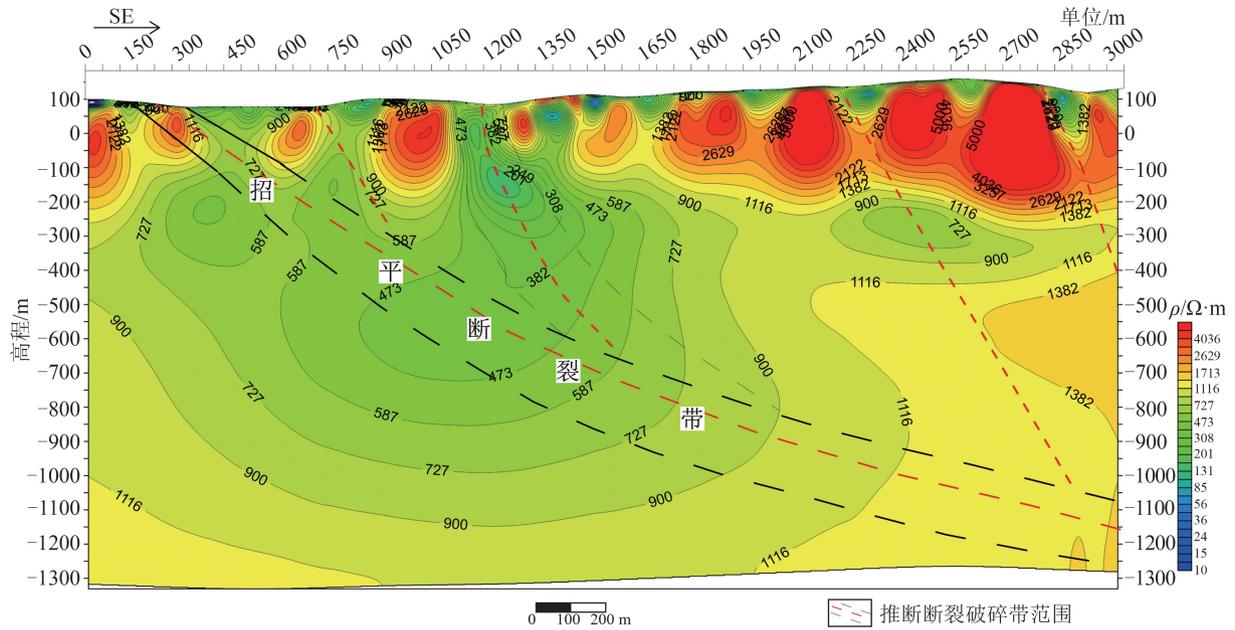


图 6 半壁店矿区 L10 线综合解释剖面

Fig. 6 Comprehensive interpretation section of Line 10 in Banbian mining district

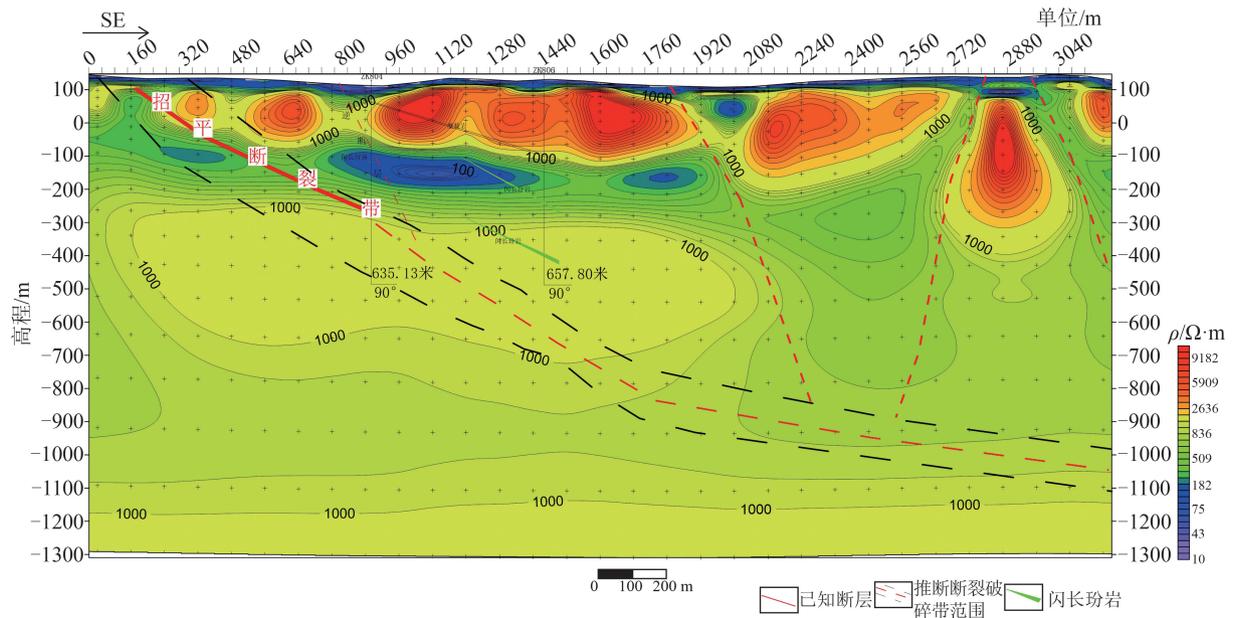


图 7 半壁店矿区 L14 线 CSAMT 法综合剖面

Fig. 7 Comprehensive section of Line 14 in the Banbian mining district by CSAMT method

低阻异常 (2000~2600 点向下延伸至 -900 m) 均表征破碎带。

底侵花岗岩体的形态和位置, 严格受招平断裂及其次级断裂控制, 表明隐伏岩体的生成时间晚于招平断裂及其次级断裂。招平断裂带中段第四系

盖层之下的花岗质隐伏岩体, 规模从南向北逐渐增大, 埋深变深 (图 6-7), 印证了磁异常解释 (底侵岩体由东北向西南底侵)。L14 线西深东浅的箕状构造 (2000~2600 点之间), 表征招平主断裂东侧隐伏岩体以自东向西挤压方式底侵。L14 线 900 点钻探

资料显示,招平断裂上盘岩体及其北西侧岩体遭受挤压应力作用;孔内糜棱岩条带亦显示,隐伏岩体在招平断裂主金成矿期之后发生过自东向西的挤压运动。

钻探岩心揭露(L10线1100点至L14线1900点连线中点位置):标高-349 m见绿泥石化和高岭土化,-422.7~-447.6 m,-470.5~-636 m,-636~-759 m均为碎裂二长花岗岩夹少量黄铁矿和矿化蚀变岩,其余为碎裂状糜棱岩、变质岩及脉岩。总体来看,-349~-905 m段为金矿(化)体相关地质体,与综合地球物理探测的预测结果吻合。

结合胶西北金成矿理论,综合地球物理探测结果推测,近EW向构造带在招平断裂带金成矿后再活化,酸性岩浆沿早期构造带(大致自东向西)上涌并挤压周围地质体形成箕状断块,高温贫矿流体熔离并萃取早期生成的金颗粒,沿招平断裂次级断裂向主断裂输运,在空间扩容、转弯处迅速降温并沉淀。底侵花岗岩体和招平断裂主次级断裂交汇界面的物性特征为低电阻率值背景中的高阻,符合金矿(化)体赋存的物性特征。

3.3 与前人研究对比

前人在胶东及邻区开展过大量金成矿相关研究,主要以构造控矿^[1-2,13,18,24,44-45]、成矿年代^[17,27,36,42]为代表,从成矿理论角度总结了胶西北金成矿作用。

招平带金成矿作用属胶东半岛区域地质作用的一部分。断裂带中段金矿(点)床形成于区域变质作用(玲珑岩体期)之后,受控于早白垩世拆离断层体系活化^[2,7,13,24-25,37-38,44-46],其产状在招远南从南向北由NNE转向NE,力学性质由拉张转为挤压^[10,13]。地质研究已证明,招平断裂是岩浆和成矿热液上涌的通道,为含矿热液的运移、Au元素富集和沉淀提供了有利空间^[2,5,24,38,47]。

大地电磁资料^[48]和S波速度结构^[49]显示招平断裂为拆离断层,其纵向延伸可达中地壳低速高导层,为中下地壳的含矿热液运移、富集成矿提供了空间。印证了本文得到的近EW向低密度带在空间上横穿招平断裂带,并被招平带错断。招平带主金成矿期之后,EW向早期深大断裂再活化,且招平带西侧活动烈度强于东侧。

招平主断裂面的变形云母样本⁴⁰Ar/³⁹Ar测年表明,金成矿年代为130~120 Ma。断裂带内金矿

(化)体多赋存于空间扩容部位的黄铁绢英岩化碎裂岩、黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩带内^[2-3,8,10,27,44]。招平主断裂中段控制了夏甸大型金矿床、大尹格庄特大型金矿床、姜家窑和曹家洼中型金矿床及焦各庄小型金矿床(点)^[2-3,10,50]。断裂带内金矿床(点)的成矿时间从北往南依次为:大磨曲家金矿(123±1 Ma)、罗山金矿(121±1 Ma、120±1 Ma)、阜山金矿(121±1 Ma、120±1 Ma)、大尹格庄(119±1 Ma)、夏甸金矿(119±1 Ma、121±1 Ma、120±2 Ma)^[27]。具有断裂带中段金成矿时间较两端更晚、北段最老的特点(图8)。

胶东半岛金成矿动力源于郯庐断裂等新华夏构造运动与应力作用,成矿物质源自区域逆时针纬向剪切构造体制下的构造岩浆热液^[51]。考虑到艾山花岗岩体缺乏有规模的金矿(化)体,同时主金成矿时间早于艾山事件(120~108 Ma)^[27],推测其属于早期近EW向深大断裂底侵形成的、不同规模的低密度贫矿花岗岩体的一部分。

4 结论

(1)招平断裂带中段存在4组构造活动形迹:近EW向深大断裂、玲珑岩体、招平金成矿带和隐伏低密度花岗岩带。

(2)近EW向低密度带在空间上横穿招平断裂带,时间上贯穿招平断裂带生成前后,导致招平断裂带在招远北侧展布于花岗岩体内、南侧分布于花岗岩体和变质岩体接触带的独特分布格局。低密度带的时空特征表明,招平断裂带形成后,近EW向早期深大断裂再活化,是招平断裂带中段金成矿

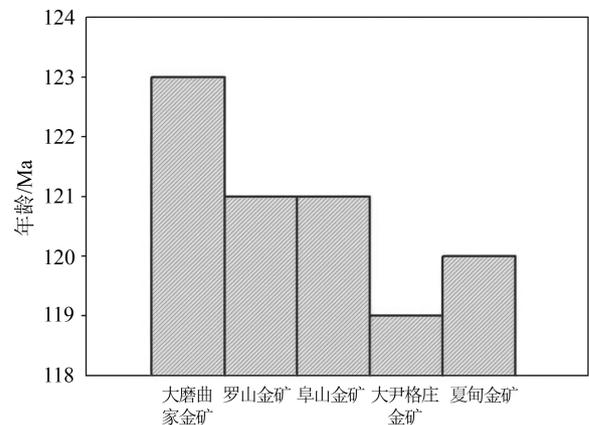


图8 招平断裂带金成矿时间对比图(据参考文献[27]修改)

Fig. 8 Ages of gold mineralization in the Zhaoping fault zone

时间(大尹格庄等)年龄较两端年轻的根源。

(3) 招远南至道头镇底侵的岩体由东北向西南沿招平断裂带之次级断裂侵入, 导致后生成的低密度花岗岩带内金资源贫化, 游离 Au 元素顺裂隙迁移至温度压力骤降处(扩容空间)富集成矿。因此, 近 EW 向低密度带内的金矿找矿前景不乐观。同时, 推测招平断裂带上盘可能存在一系列类似于招远以南沿早期近 EW 向深大断裂底侵形成的、不同规模的低密度贫矿花岗岩体。

致谢: 论文的完成得益于中国地质大学(北京)杨立强教授的指导, 张良博士后的讨论; 野外工作得到招金矿业股份有限公司的大力支持; 感谢审稿专家的建议和指导, 谨此一并致谢。

参考文献

- [1] 杨立强, 王光杰, 张中杰, 等. 胶东金矿集中区岩石圈结构与深部成矿作用[J]. 地球科学, 2000, 25(4): 90-96.
- [2] 杨立强, 邓军, 王中亮, 等. 胶东中生代金成矿系统[J]. 岩石学报, 2014, 30(9): 2447-2467.
- [3] 张瑞忠. 招平金矿带构造控矿机理及深部成矿预测[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2017: 1-176.
- [4] 孟银生. 胶东招平金矿带厚覆盖区深部矿床综合地球物理勘查模型与成矿预测[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2016.
- [5] 宋明春, 张军进, 张丕建, 等. 胶东三山岛北部海域超大型金矿床的发现及其构造-岩浆背景[J]. 地质学报, 2015, 89(2): 365-383.
- [6] 刘殿浩, 吕古贤, 张丕建, 等. 胶东三山岛断裂构造蚀变岩三维控矿规律研究与海域超大型金矿的发现[J]. 地学前缘, 2015, 22(4): 162-172.
- [7] 张宝林, 吕古贤, 梁光河, 等. 胶东金矿田的深部地球物理勘查模式初步研究[J]. 地质力学学报, 2019, 25(S1): 150-156.
- [8] Deng J and Wang Q F. Gold mineralization in China: Metallogenic provinces, deposit types and tectonic framework [J]. Gondwana Research, 2016, 36(10): 219-274.
- [9] Li L, Santosh M, Li S R. The 'Jiaodong type' gold deposits: Characteristics, origin and prospecting [J]. Ore Geology Reviews, 2016, 65(3): 589-611.
- [10] 徐述平. 招平断裂带金矿勘查模型与成矿预测[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2009.
- [11] 徐扬, 李日辉, 温珍河, 等. 胶北地块和北苏鲁超高压变质带前寒武纪基底对比研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(1): 99-110.
- [12] 林文蔚, 赵一鸣, 徐珏. 胶东招远-平度断裂活动性质及活动时代[J]. 中国区域地质, 2000, 19(1): 43-50.
- [13] 邓军, 吕古贤, 杨立强, 等. 构造应力场转换与界面成矿[J]. 地球学报, 1998, 19(3): 21-27.
- [14] 罗贤冬, 杨晓勇, 段留安, 等. 胶北地块与金成矿有关的郭家岭岩体和上庄岩体年代学及地球化学研究[J]. 地质学报, 2014, 88(10): 1874-1888.
- [15] Simon Wallis, Masaki Enami, Shohei Banno. The Sulu UHP Terrane: A review of the petrology and structural geology [J]. International Geology Review, 1999, 41(10): 906-920.
- [16] 王德洪, 林润生. 山东省平度地区下元古界荆山群变质作用特征[J]. 山东地质, 1991, 7(2): 1-16.
- [17] 张文起. 胶东地区粉子山群及蓬莱群地层铅同位素组成探讨[J]. 山东地质, 1995, 11(1): 18-24.
- [18] Deng J, Wang Q F, Yang L Q. The Structure of ore-controlling strain and stress fields in the Shangzhuang gold deposit in Shandong Province, China [J]. Acta Geologica Sinica: English Edition, 2008, 82(4): 769-780.
- [19] Deng J, Wang Q F, Wan L A. Multifractal analysis of mineralization characteristics of the Dayingezhuang disseminated-veinlet gold deposit in the Jiaodong gold province of China [J]. Ore Geology Reviews, 2011, 40(1): 54-64.
- [20] Deng J, Yang L Q, Sun Z S, et al. A metallogenic model of gold deposits of the Jiaodong granite-greenstone belt [J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(4): 537-546.
- [21] Faulkner D, Jackson C, Lunn R, et al. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones [J]. Journal of Structural Geology, 2010, 32(11): 1557-1575.
- [22] Kim Y, Peacock D, Sanderson D. Fault damage zones [J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26(3): 503-517.
- [23] Yang L Q, Deng J, Wang Q F, et al. Coupling effects on gold mineralization of deep and shallow structures in the northwestern Jiaodong Peninsula, Eastern China [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(3): 400-411.
- [24] 杨立强, 邓军, 宋明春, 等. 巨型矿床形成与定位的构造控制: 胶东金矿集区剖析[J]. 大地构造与成矿学, 2019, 43(3): 431-446.
- [25] 郭涛, 吕古贤. 胶东西北部金成矿带控矿构造系统分析[J]. 地质力学学报, 2007, 13(2): 119-130.
- [26] 郭谱. 鲁西中生代金成矿的地球动力学背景研究[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2014.
- [27] Zhang L, Weinberg R F, Yang L Q, et al. Mesozoic orogenic gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China: A focused event at 120±2 Ma during cooling of pregold granite intrusions [J]. Economic Geology, 2020, 115(2): 415-441.
- [28] Zhao Z, Zhao Z X, Xu J R. Velocity structure heterogeneity and tectonic motion in and around the Tan-Lu fault of China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 57: 6-14.
- [29] Yang J H, Zhong S L, Wilder S A, et al. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu orogenic belt, east China: Geochronology, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence [J]. Chemical Geology, 2005, 214(1/2): 99-125.
- [30] Hou M L, Jiang Y H, Jiang S Y, et al. Contrasting origins of late Mesozoic adakitic granitoids from the northwestern Jiaodong Peninsula, east China: Implications for crustal thickening to delamination [J]. Geological Magazine, 2007, 144(4): 619-631.
- [31] Yang J H, Wu F Y, Wilde S A. A review of the geodynamic setting of

- large-scale late Mesozoic gold mineralization in the North China Craton: An association with lithospheric thinning[J]. *Ore Geology Reviews*, 2003, 23(3/4): 123-152.
- [32] 徐贵忠, 王艺芬, 周瑞, 等. 胶东和鲁西地区中生代成矿作用重大差异性的内在因素[J]. *现代地质*, 2002, 16(1): 9-18.
- [33] 李瑞红. 焦家金矿带构造控矿模式[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2017.
- [34] 王中亮. 焦家金矿田成矿系统[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2012.
- [35] Yang L Q, Deng J, Wang Z L, et al. Relationships between gold and pyrite at the Xincheng gold deposit, Jiaodong Peninsula, China: Implication for gold source and deposition in a brittle epizonal environment[J]. *Economic Geology*, 2016, 111(1): 105-126.
- [36] Deng J, Liu X F, Wang Q F, et al. Isotopic characterization and petrogenetic modeling of Early Cretaceous mafic dike-lithospheric extension in the North China Craton, eastern Asia[J]. *The Geological Society of America Bulletin*, 2017, 129: 1379-1407.
- [37] Yang L Q, Deng J, Guo L N, et al. Origin and evolution of ore fluid and gold deposition processes at the giant Taishang gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 72(1): 585-602.
- [38] 张宝林, 苏艳平, 张国梁, 等. 胶东典型含矿构造岩相带的地质-地球物理信息预测方法与找矿实践[J]. *地学前缘*, 2017, 24(2): 85-94.
- [39] 孟银生, 张瑞忠. 招平金矿带半壁店矿区地球物理勘查模型及成矿预测[J]. *金属矿山*, 2016, 483: 137-143.
- [40] Deng J, Wang C M, Bagas L, et al. Crustal architecture and metallogenesis in the southeastern North China Craton[J]. *Earth - Science Reviews*, 2018, 182: 251-272.
- [41] Deng J, Qiu K F, Wang Q F, et al. In-situ dating of hydrothermal monazite and implications on the geodynamic controls of ore formation in the Jiaodong gold province, eastern China[J]. *Economic Geology*, 2020, 115(3): 671-685.
- [42] Yang L Q, Dilek Y, Wang Z L. Late Jurassic, high Ba-Sr Linglong granites in the Jiaodong Peninsula, East China: lower crustal melting products in the eastern North China Craton[J]. *Geological Magazine*, 2017, 155(5): 1040-1062.
- [43] Cagniard L. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting[J]. *Geophysics*, 1953, 18(3): 605-635.
- [44] Deng J, Yang L Q, Li R H. Regional structural control on the distribution of world-class gold deposits: An overview from the Giant Jiaodong Gold Province, China[J]. *Geological Journal*, 2019, 54(1): 378-391.
- [45] 翟裕生. 关于构造-流体-成矿作用研究的几个问题[J]. *地学前缘*, 1996, 3(4): 230-236.
- [46] Groves D I, Santosh M, Deng J, et al. A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration[J]. *Mineralium Deposita*, 2020, 55: 275-292.
- [47] Deng J, Wang Q F, Santosh M, et al. Remobilization of metasomatized mantle lithosphere: a new model for the Jiaodong gold province, eastern China[J]. *Mineralium Deposita*, 2020, 55: 257-274.
- [48] Zhang K, Lyu Q T, Yan J Y, et al. Crustal structure beneath the Jiaodong Peninsula, North China, revealed with a 3D inversion model of magnetotelluric data[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2018, 15(6): 2442-2454.
- [49] 俞贵平, 徐涛, 刘俊彤, 等. 胶东地区晚中生代伸展构造与金成矿: 短周期密集台阵背景噪声成像的启示[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(5): 1878-1893.
- [50] 孙伟清, 刘燊, 冯彩霞, 等. 招平断裂带中段金矿床控矿条件与成矿规律研究[J]. *黄金科学技术*, 2019, 27(3): 315-327.
- [51] 吕古贤, 霍庆龙, 袁月蕾, 等. 胶东金矿陆内构造岩浆杂岩隆起-拆离带蚀变成矿[J]. *地学前缘*, 2017, 24(2): 95-103.