2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):2479-2493
地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn
ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

齐勇攀,冯攀,李水平. 2026. 河南省嵩县庙岭—九仗沟金矿带深部地质结构特征. 地球物理学进展,41(5):2479-2493, doi:10.6038/pg2026KK0038.

QI YongPan, FENG Pan, LI ShuiPing. 2026. Characteristics of deep geological structure of Miaoling—Jiuzhanggou metallogenic belt in Songxian County, Henan Province. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):2479-2493, doi:10.6038/pg2026KK0038.

河南省嵩县庙岭—九仗沟金矿带深部地质结构特征

Characteristics of deep geological structure of Miaoling—Jiuzhanggou metallogenic belt in Songxian County, Henan Province

齐勇攀,冯攀,李水平*

QI YongPan, FENG Pan, LI ShuiPing*

河南省第二地质矿产调查院有限公司,郑州 450001

Henan No. 2 Institute of Geological & Mineral Resources Survey Co., Ltd., Zhengzhou 450001, *China*

摘 要 河南省嵩县庙岭—九仗沟金矿带位于熊耳山—外方山金及多金属矿集区的东段,为豫西重要的金矿集中产地,该金矿带上发现的金矿床均位于重磁推断的隐伏岩体区,矿床的形成严格受陡—中倾斜断裂构造控制.研究该金矿带地球物理场特征,推断隐伏岩体和含矿断裂构造的空间分布,是开展深部勘查找矿的有效途径和实现找矿突破的关键.针对以往该金矿带上存在的物探勘查投入少,探测深度浅,观测精度低,无法深入了解深部地质结构特征等问题,通过研究解译区域重磁异常特征,在该金矿带及其典型矿区内实施了低成本、大深度、高分辨率的大地电磁测深、大地微动测深和大功率时间域激电测深剖面综合探测,获取了剖面内电磁、微动和激电异常信息,结合已有成果,基本查明庙岭—九仗沟金矿带及金矿床深部地质结构,分析厘定了中生代侵入岩、太华群变质基底、新生代盆地地层的深部空间分布特征及主要控矿构造的深部形态特征,并进行深部找矿潜力预测及找矿靶位确定.研究成果可以为该金矿带深部找矿以及其他相关研究工作提供一定的参考价值.

关键词 深部地质结构特征;断裂构造;大地电磁测深;大功率时间域激电测深;大地微动测深;庙岭—九仗沟金矿带

中图分类号 P631

Abstract The Miaoling—Jiuzhanggou gold belt in Song County, Henan Province, is situated in the eastern part of the Xiong'er Mountain—Waifang Mountain gold and polymetallic ore concentration area, serving as a major gold-producing zone in western Henan. All gold deposits discovered within this gold belt are situated in concealed rock mass regions inferred from gravity and magnetic data, and the formation of these deposits is strictly controlled by steep to moderately inclined fault structures. Studying the geophysical field characteristics of this gold belt, inferring the spatial distribution of concealed rock masses and ore-bearing fault structures, constitutes an effective approach for deep exploration and prospecting and is key to achieving breakthroughs in mineral exploration. In response to previous issues in this gold ore belt, such as limited geophysical exploration investment, shallow detection depth, and low observation precision, which hindered a deep understanding of the deep geological structural characteristics, this study interpreted regional gravity and magnetic anomaly features. Comprehensive profiling surveys using low-cost, deep-penetration, high-resolution magnetotelluric sounding, microtremor sounding, and high-power time-domain induced polarization sounding were carried out in the gold ore belt and its typical mining areas. Electromagnetic, microtremor, and induced polarization anomaly information within the profiles were obtained. Combined with existing results, the deep geological structures of the Miaoling—Jiuzhanggou gold ore belt and its gold deposits were essentially clarified. The deep spatial distribution characteristics of Mesozoic intrusive rocks, the Taihua Group metamorphic basement, and Cenozoic basin strata, as well as the deep morphological features of major ore-controlling structures, were analyzed and delineated. Furthermore, deep prospecting potential predictions and target area determinations were conducted. The research findings can provide valuable references for deep prospecting in this gold belt and other related studies.

收稿日期 2026-02-12; **修回日期** 2026-05-08. **投稿网址** http://www.progeophys.cn

基金项目 河南省地矿局财政规划地质科研项目(豫地矿勘查〔2022〕04 号)资助.

第一作者简介 齐勇攀,男,1981 年生,高级工程师,从事地球物理矿产勘查和研究工作. E-mail:592510049@qq.com

***通讯作者** 李水平,男,1963 年生,正高级工程师,长期从事地球物理矿产勘查和研究工作. E-mail:hndzlsp@126.com

文献标识码 A
doi:10.6038/pg2026KK0038
CSTR:32085.14.pg2026KK0038

Keywords Characteristics of deep geological structure; Fault structure; Magnetotelluric sounding; High power time domain IP sounding; Geodetic microtremor sounding; Miaoling—Jiuzhanggou metallogenic belt

0 引 言

河南省嵩县庙岭—九仗沟金成矿带位于熊耳山—外方山金及多金属矿集区的东段,为豫西重要的金矿集中产地(丁培超等,2020),是国内矿产勘查和科学研究的热点地区,其上自北向南发现了东湾、九仗沟、赵岭、小南沟、庙岭等9个大中型金矿床,均为典型的受岩浆热液蚀变形成的构造蚀变岩型中低温热液金矿(朱随洲等,2022),主要由中生代的大规模成矿作用形成,并与大规模岩浆活动(花山、五丈山、合峪花岗岩基等)关系密切(段存基等,2017),产于中元古代熊耳群火山岩系中,金矿体的产出严格受陡—中倾斜切层断裂破碎带 F_1 控制.

前人通过地质勘查了解了庙岭—九仗沟金成矿带内的矿床地质特征、地球化学特征、构造特征、成矿时代(模式)、矿床成因和成矿物质来源等(张伟和伍刚,2007;杨春蕾,2017;丁培超等,2020;刘玉刚等,2022;王颖辉等,2022;朱随洲等,2022;张勇等,2024),获取的丰富详实资料,为该成矿带内矿产开发提供了一定的指导作用.通过研究分析该成矿带内的含矿构造行迹、矿体空间赋存规律、区域构造岩浆活动事件以及构建地球化学勘查模式等,为开展成矿预测提供了重要信息和参考,认为该成矿带成矿地质条件优越,矿床深部具有较大找矿潜力(崔来运等,2005;石建喜等,2008;庞绪成等,2011,2012a;尤阳阳等,2020;刘玉刚等,2022;秦军强等,2022;丁培超等,2023;张勇等,2024),但上述研究缺乏从地球物理方法角度研究庙岭—九仗沟金矿带深部地质结构特征.以往该金矿带内及其周边矿床的地球物理测量,受施工要求、工作方法和勘查投入限制,主要以浅、中深度测量为主(张海龙等,2022;程华等,2024;王东伟等,2024),深部地球物理勘查工作较少,对地下深部地质结构特征的研究程度总体上较低,无法深入了解与金成矿相关的深部构造、地层及岩体的深部空间特征,对深部资源潜力和找矿前景预测缺乏有力的地球物理依据.

地球深部物质与能量的交换和深层动力过程表明,第一深度空间(0~500 m)已有矿产资源,并非是地下矿产资源的整体或全部,在第二深度空间(500~2000 m)必然存在着矿体的继续伸展和聚集(滕吉文等,2022).庙岭—九仗沟金矿带内已有的金矿床储量由第一深度空间找矿获得,深部第二空间尚未进行找矿勘查(尤阳阳等,2020;程华等,2024).庙岭—九仗沟金矿带上发现的金矿床均位于重磁推断的隐伏岩体区,矿床的形成严格受陡—中倾斜断裂构造控制.研究该金矿带地球物理场特征,推断隐伏岩体和含矿断裂构造的空间分布,是进行深部勘查找矿的有效途径和实现找矿突破的关键(程远等,2018).地球物理勘探技术是深部矿产资源勘查的主要技术手段,发挥着越来越重要的作用(李鹏等,2021;侯爵等,2022;滕吉文等,2022),本文根据综合地球物理测深(大地电磁测深、大功率时间域激电测深和大地微动测深)资料,结合庙岭—九仗沟金成矿带的区域地质、1∶20万重磁场和1∶5万重力场异常特征,进行系统地研究该金矿带和典型金矿床的深部地质结构,确定庙岭—九仗沟金矿带及典型金矿床深部地层、构造形迹和侵入岩体的空间分布形态(或位置),以期为该金矿带(床)的深部找矿以及其他相关研究工作提供更加有效的深部信息.

1 区域地质背景

河南省嵩县庙岭—九仗沟金矿带位于华北地台南缘,豫西熊耳山—外方山地区金多金属矿集区的东段(图1).

区域内出露的主要地层为新太古界太华群片麻岩、中元古界熊耳群火山岩和官道口群碳酸盐岩,次为新生界沉积物(刘馨等,2021).区域断裂构造发育,以NWW向和NE向断裂为主,NW向与近SN向断裂次之,NE向断裂延伸较稳定,一般斜切NWW向断裂,区内规模较大的为NWW向马超营断裂带、NE向洛宁断裂带.

区域岩浆活动十分频繁,比较发育的为晚中生代侵入岩,出露强度、规模最大的为晚侏罗世五丈山岩体和早白垩世花山岩体,另处还有一些小型斑岩体及爆破角砾岩体(梁新辉,2019;刘馨等,2021),它们侵位于太华群变质岩系及熊耳群火山岩系中,

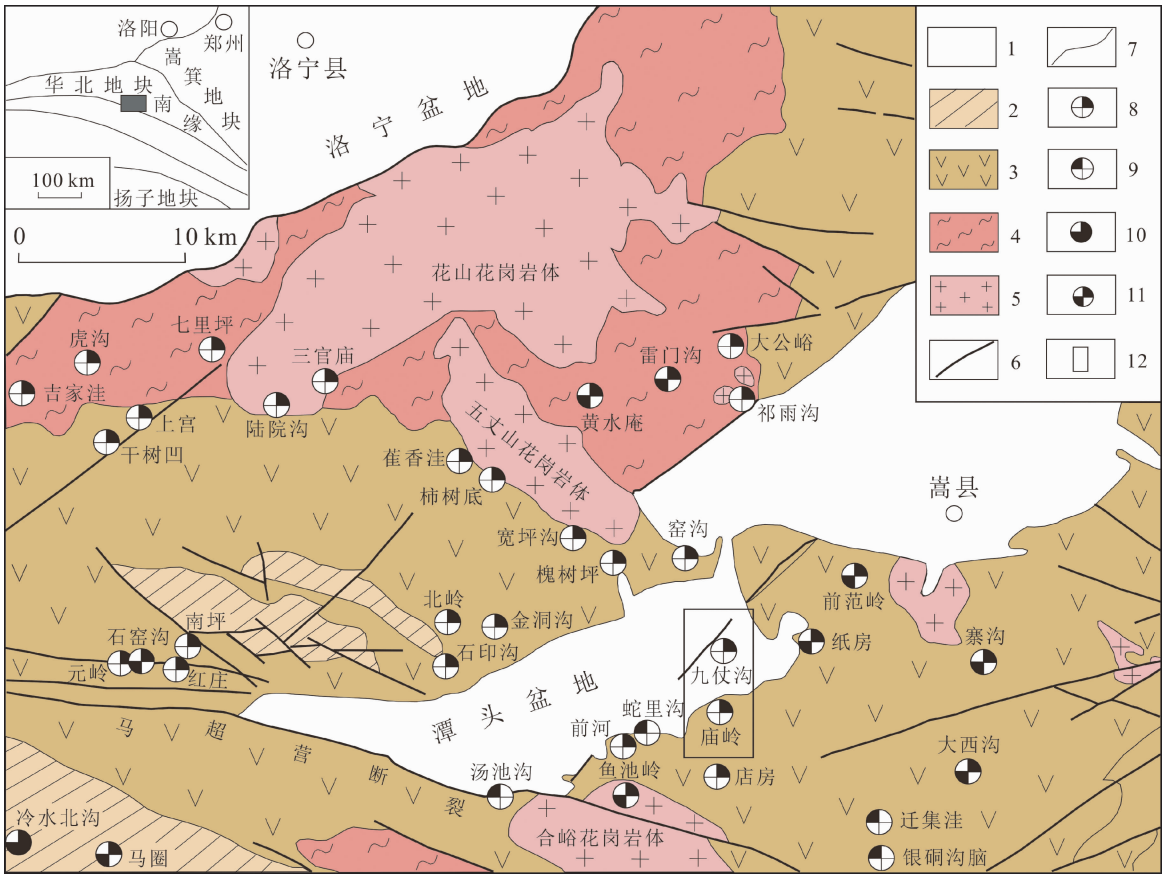


图 1　区域地质图(丁培超等,2020,有修改)

1-新生界沉积岩;2-官道口群碎屑岩及碳酸盐岩;3-熊耳群鸡蛋坪组火山岩;4-太华群片麻岩;5-中生代花岗岩; 6-断裂; 7-地质界线;8-Au 矿床;9-Ag 矿床;10-Ag-Pb-Zn 矿床;11-Mo 矿床;12-研究区.

Fig. 1　Regional geological map(adapted from Ding *et al.*,2020, there are changes)

1-Sedimentary rocks in Cenozoic; 2-Clastic rocks and carbonate rocks in Guandaokou group; 3-Volcanic rocks in Middle Proterozoic Xionger Group Jidanping Formation; 4-Gneisses in Neoarchean Taihua Group; 5-Mesozoic granite; 6-Fracture; 7-Line of geological limitation; 8-Au deposit; 9-Ag deposit; 10-Ag-Pb-Zn deposit; 11-Mo deposit; 12-The study area.

岩浆活动为矿床提供了热动力和热液来源,与该区金、银、钼(钨)及多金属矿产的形成关系密切(齐楠等,2019),这些矿床常与小斑岩体和大花岗岩基相伴产出(高昕宇等,2010),往往围绕岩体分布,或者分布在岩体内部,两者具有明显的时间、空间及成因关系(陈树民等,2019;尤阳阳等,2020).

熊耳山—外方山矿集区内矿产种类众多,且分布密集,北部钼金成矿带以大型祁雨沟金矿和大型雷门沟钼矿为代表,中部金成矿带以九仗沟、庙岭和店房等大中型金矿为代表,南部旧县-付店金银铅锌钼成矿带以大型前河金矿和汤池沟、蛇里沟等中型铅锌银矿为代表(程远等,2018).

2　庙岭—九仗沟金成矿带地质特征

该金矿带位于区域性马超营断裂北部,大章—潭头断陷盆地东南侧(丁培超等,2020),夹持于花山岩体和合峪岩体之间(图 2). 该金矿带空间上呈近南北方向延展,延长大于 8.5 km,其上自北向南分布着东湾、九仗沟、赵岭、石板沟、通峪沟、大南沟、小南沟、庙岭、贾材沟等大中型金矿床,矿床属中-低温热液型,为受岩浆热液作用形成,基本上分布在近南北向(20°~30°)F_1 含矿断裂构造带上,倾向北西(50°~75°),F_1 构造表现为右行压扭性特征. 熊耳群鸡蛋坪组火山岩在金矿带内出露范围较大,占比约 80% 以上,与金成矿关系比较密切,其岩性以英安岩、流纹岩为主. 地层呈单斜,多为 NW 走向,倾向 NE(丁培超等,2020;刘玉刚等,2022). 矿体呈脉状产出,矿石为蚀变岩型.

庙岭—九仗沟金矿带内断裂十分发育,主要为近南北向和近东西向断裂,两者均有多期多阶段活

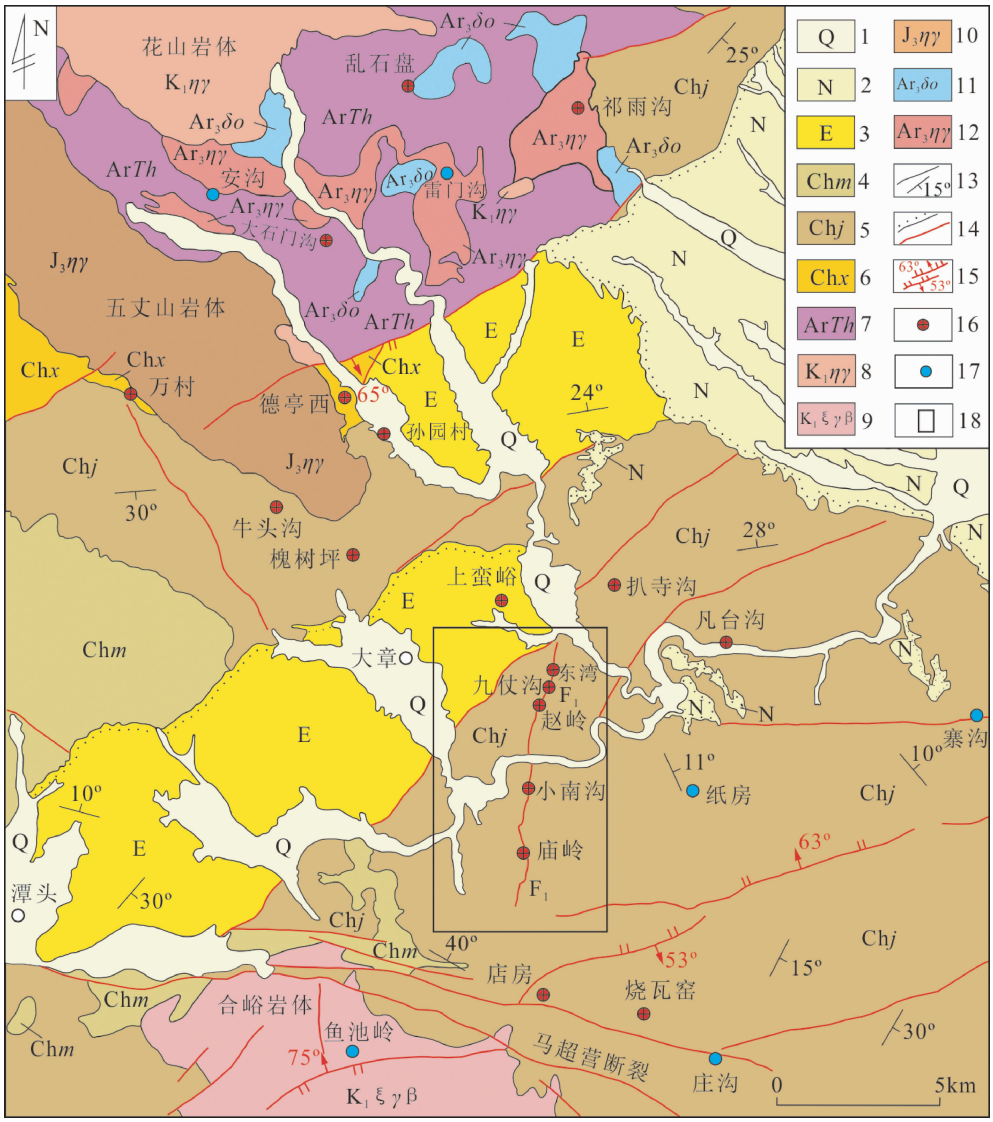


图 2 庙岭—九仗沟金成矿带地质图(据刘玉刚等,2022;齐勇攀等,2025,有改动)

1-新生界第四系;2-新生界新近系;3-新生界古近系;4-长城系马家河组;5-长城系鸡蛋坪组;6-长城系许山组;7-太华群;8-二长花岗岩(早白垩世);9-黑云正长花岗岩(早白垩世);10-二长花岗岩(晚侏罗世);11-石英闪长岩(新太古代);12-二长花岗岩(新太古代);13-地层界线及产状;14-不整合面及断裂;15-正、逆断裂及产状;16-Au 矿床;17-Mo 矿床;18-研究区位置.

Fig. 2 Geological map of Miaoling-Jiuzhanggou gold metallogenic belt(adapted from Qi *et al.*,2025, there are changes)

1-Cenozoic Quaternary;2-Cenozoic Neogene;3-Cenozoic Paleogene;4-Majiahe formation of Changcheng system;5-Jidanping formation of Changcheng system;6-Xushan formation of Changcheng system;7-Archean Taihua group;8-Early Cretaceous monzonitic granite;9-Early Cretaceous biotite syenogranite;10-Late Jurassic monzonitic granite;11-Neoarchean quartz diorite;12-Neoarchean monzonitic granite;13-Line of geological limitation and occurrence;14-Unconformable boundary line and fracture;15-Normal and reverse fracture and occurrence;16-Au deposit;17-Mo deposit;18-Location of the study area.

动的迹象(张海龙等,2022),其中近南北向断裂 F_1 为主要的含矿构造,其内充填构造角砾岩、碎裂岩、碎裂岩化糜棱岩等,延伸(深)稳定、蚀变矿化较为连续,是最有前景的控矿构造(庞绪成等,2011),F_1 断裂构造既是成矿热液的运移通道,又是控矿和容矿场所(朱随洲等,2022);F_1 虽非区域构造,但具有区域性质.近东西向断裂主要分布在该金矿带南段,含矿性较差,仅局部矿化(丁培超等,2020).受多期次构造活动叠加影响,该金矿带内的矿体在走向方向连续性较差,倾向方向连续性相对较好,进行深部(倾向方向)找矿具有一定的前提(尤阳阳等,2020).

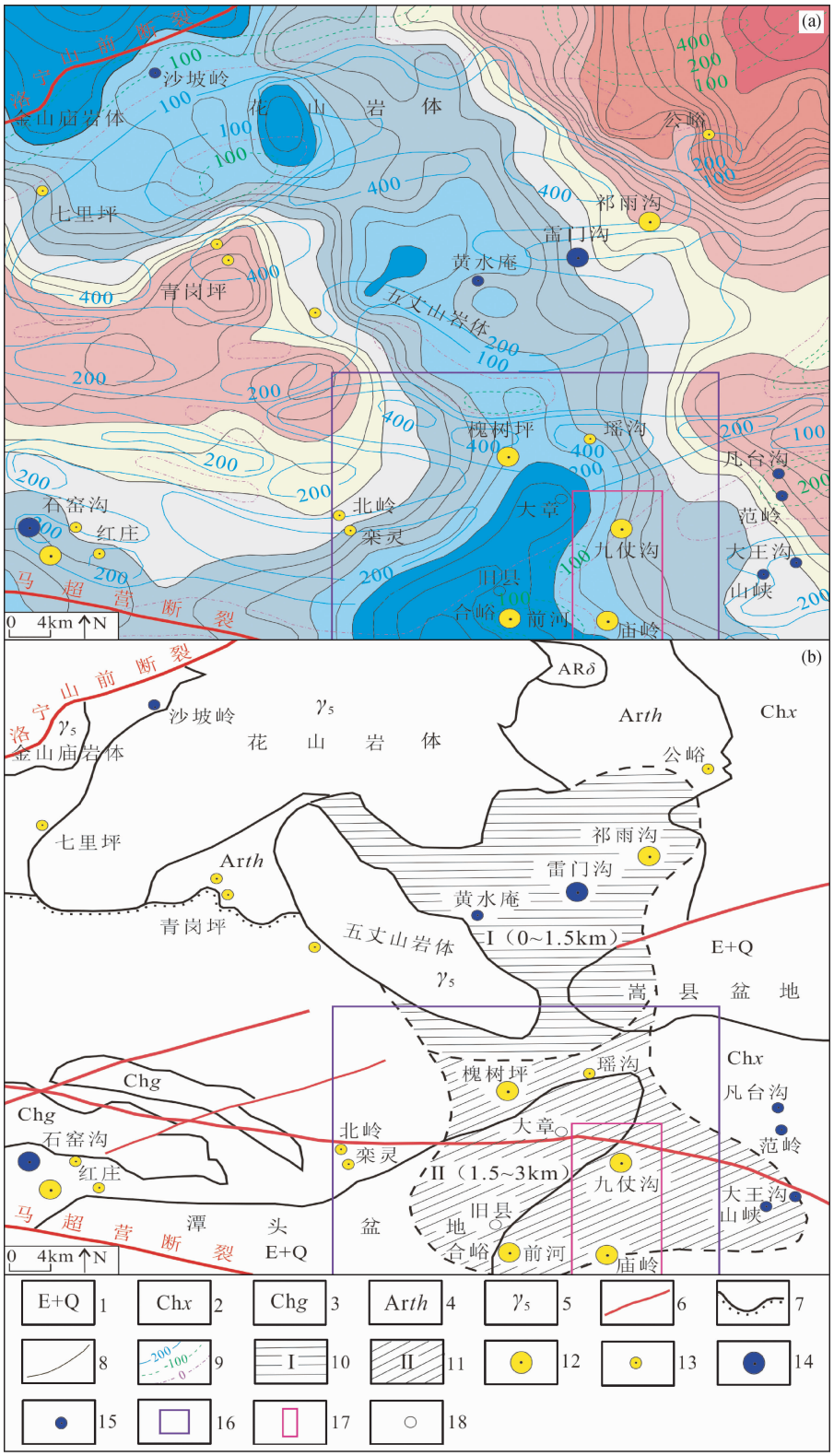


图 3　1∶20 万重磁及推断解释(据程华等,2024,有改动)

(a)重磁异常;(b)推断解释.

1-新生界断陷盆地;2-熊耳群;3-官道口群;4-太华群;5-中生代花岗岩;6-断裂;7-不整合界线;8-Δg 等值线(10^{-5} m/s^2);9-ΔT 等值线(nT);10-0~1.5 km 深度隐伏岩体分布区域;11-1.5~3 km 深度隐伏岩体分布区域;12-大型金矿;13-中-小型金矿;14-大型钼矿;15-中-小型钼矿;16-1∶5 万重力异常范围;17-研究区范围;18-乡镇.

Fig. 3　1∶200,000 gravity and magnetic and inferred explanation (modifiedafter Cheng *et al.*, 2024, there are changes)

(a) Gravity and magnetic anomaly; (b) Inferred explanation.

1-Cenozoic faulted basin; 2-Xiong'er group; 3-Guandaokou group; 4-Taihua group; 5-Mesozoic granite; 6-Fracture; 7-Unconformable boundary line; 8-Δg isoline(10^{-5} m/s^2); 9-ΔT isoline(nT); 10-The distribution area of concealed rock mass at 0~1.5 km depth; 11-The distribution area of concealed rock mass at 1.5~3 km depth; 12-Big type Au deposits; 13-Medium and small Au deposits; 14-Big type Mo deposits; 15-Medium and small Mo deposits; 16-1∶50,000 gravity anomaly range; 17-Scope of study area; 18-Town.

庙岭—九仗沟金矿带内,主要为出露较广的火山岩地层,发育有零量的岩脉.据重磁异常,推断该金矿带地下深部存在着隐伏花岗岩体(图3),同时解译认为,此隐伏岩体应当是南部出露的合峪花岗岩体在地下深部往北面的延续,即庙岭—九仗沟金矿带内的金矿床(东湾、九仗沟、小南沟、庙岭等)均分布在隐伏岩体区中,表明了这些金矿床的形成与花岗岩体有着密切关系.

3 区域地球物理特征

3.1 区域岩石物性特征

据程远等(2018)、陈树民等(2019)、王俊鹤等(2020)、张海龙等(2022)研究,区域岩石物性(密度、磁性及电性)具有以下特征:

(1)密度特征

盖层熊耳群火山岩系和基底太华群变质岩系一般密度较高,通常产生重力高异常.侵入岩自超基性-基性-中性-酸性,其密度值逐渐降低,超基性-基性及中性岩石的密度相对较高,但规模通常较小(多为脉状),引起的重力异常不突出,酸性花岗岩虽然为较低密度体,但一般分布范围较大,相对高密度地层存在着一定的密度差,可以产生较突出的重力低异常.新生界地层与酸性花岗岩一样,同为低密度地体,其产生的重力低异常通过地表或断陷盆地来进行区分.

(2)磁性特征

盖层中元古界熊耳群具中强磁性,基底太华群变质岩系具中弱磁性.侵入岩自超基性-基性-中性-酸性,其磁性逐渐降低,超基性-中性类岩石通常面积较小,小比例尺图中产生不了突出磁异常,分布规模较大的酸性花岗岩一般具中等磁性,常引起云雾状等面积性磁异常.新生界、第四系为无磁性.

(3)电性特征

区域岩性标本测定及分类统计显示,熊耳群火山岩系和太华群变质岩系一般具高电阻率、低极化率特征,侵入岩类的超基性岩和基性岩具低电阻率,低极化率,中性岩和酸性岩具高电阻率、低极化率特征.

区域内典型金矿床岩矿石的电性特征表明(庞绪成等,2012b;张参辉等,2018;陈志刚,2021;荆鹏等,2024;王东伟等,2024),各类岩(矿)石的极化率(η)值随其金属硫化物的含量增多而升高;遭受矿化蚀变作用的各类岩石及金矿石,一般呈“高极化、低-中阻”特征,未矿化蚀变原岩则具“低极化、高阻”特征,它们之间存在着极化特性和电性差异.

3.2 1∶20万重磁异常特征

1∶20万布格重力异常表现为中部重力低、东西两侧重力高的特征(图3a),中部重力等值线呈北北西向宽缓带状展布,与东西部重力高之间呈现出明显的重力梯级带.中部重力低异常区,对应地表出露的是高密度的熊耳群、太华岩群地层,表明其深部存在着规模较大的低密度体,该低密度体推测是隐伏的中酸性花岗岩体的反映;九仗沟—庙岭成矿带位于北北西向重力低异常带的南东段重力梯级带上.中部连续的低重力异常带,可能反映的是中生代岩浆岩带,即从合峪岩体始,经五丈山岩体,至花山岩体(图3b).

1∶20万航磁 ΔT 大体上显示为比较杂乱的正负波动磁场(图3a).上述重力推断的隐伏岩体赋存区,ΔT 表现为 100 ~ 200 nT 的正磁场;西部 0 ~ -200 nT 的负磁场,反映了潭头—嵩县断陷盆地的弱磁或无磁特征.九仗沟—庙岭成矿带位于航磁 ΔT 负磁区内.

1∶20万重磁资料推断解释的隐伏岩体顶面埋深和分布位置如图3b,北部(Ⅰ区)顶面深度较浅,大致为0~1.5 km,南部(Ⅱ区)顶面深度较深,大致为1.5~3 km,即从北向南隐伏岩体顶面深度逐渐增大(王俊鹤等,2020).九仗沟—庙岭成矿带位于Ⅱ区内.

3.3 1∶5万重力异常特征

1∶5万布格重力异常形态不封闭,重力异常整体表现为图幅东西两边异常高,中部异常低.中部异常呈“入”字状,异常区内包含多个小的子异常(图4),其中2个子异常闭合,形态呈椭圆形或等轴状.布格重力异常值变化范围为(-128.705 ~ -95.767)$\times 10^{-5}$ m/s^2,重力高值与重力低值相差 32.938$\times 10^{-5}$m/s^2.

根据1∶5万重力异常特征,共划分5个布格重力异常分区,2个重力高(G-DZ-01、G-DZ-05)和3个重力低(L-DZ-02、L-DZ-03、L-DZ-04).重力异常低区又进一步分为五个小区(L-DZ-02-01、L-DZ-02-02、L-DZ-03-01、L-DZ-03-02、L-DZ-04)(图4).

G-DZ-01重力高区与该区域出露的熊耳群火山岩密度较大有关.L-DZ-02重力低区包含的2个主要子异常低(L-DZ-02-01、L-DZ-02-02)为五丈山岩体的反映.L-DZ-03重力低区包含的2个主要子异常低(L-DZ-03-01、L-DZ-03-02),推测与第三系、第四系覆盖较厚且密度较小有关,因其极值相对幅值

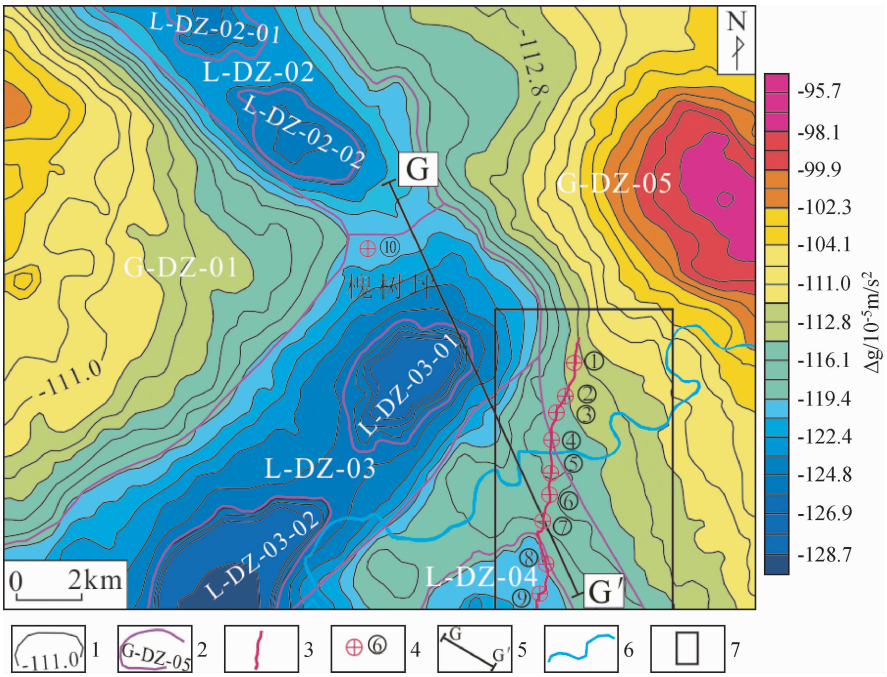


图 4　1∶5 万布格重力异常及分区图

1-布格重力异常等值线及标注;2-布格异常分区线及编号;3-金矿带;4-金矿床及编号;5-大地电磁测深剖面;6-河流;7-研究区范围.

①东湾;②九仗沟;③赵岭;④石板沟;⑤通峪沟;⑥大南沟;⑦小南沟;⑧庙岭;⑨贾材沟;⑩槐树坪.

Fig. 4　1∶50,000 Bouguer gravity anomaly and zoning map

1-Bouguer gravity anomaly isoline and labeling; 2-Lattice anomaly partition line and number; 3-Gold belt; 4-Gold Deposits and number; 5-Geo-electromagnetic sounding profile; 6-Stream; 7-Study area range.

①Dongwan;②Jiuzhanggou;③Zhaoling;④Shibangou;⑤Tongyugou;⑥Danangou;⑦Xiaonangou;⑧Miaoling;⑨Jiacaigou;⑩Huaishuping.

较大,下部可能有隐伏岩体叠加. L-DZ-04 重力低区推测是合峪岩体隐伏侵入所致. G-DZ-05 重力高区一方面与该区域出露的熊耳群火山沉积地层岩石密度较大有关,另一方面推测为基底地层隆起.

4　金矿带及金矿床深部地质结构特征

4.1　探测方法原理、流程及可靠性验证

庙岭—九仗沟金矿带及金矿床深部地质结构探测选用大地电磁测深法、大地微动测深法和大功率时间域激电测深法进行剖面测量.

大地电磁测深法以天然交变大地电磁场为探测场源,基于地下不同地质体电阻率差异实现深部探测,电磁波穿透深度随频率降低而增大,可实现深浅部地质结构解析. 金矿区内,含金构造蚀变带和金矿体一般呈低阻特征,完整基岩为高阻特征,断裂带表现为电性梯度带,通过地表观测电磁场分量,计算视电阻率、阻抗相位,经反演来重建地下电性结构,其应用一般定位为区域深部地质框架构建. 该方法工作流程为:前期收集地质资料、布设测线测点;野外规范布设传感器,采集天然电磁场数据并降噪处理;后续完成数据预处理、正反演计算,生成电性剖面;最终结合地质资料解译深部地质结构. 其可靠性通过数据质量分级、正反演拟合残差校验、棋盘灵敏度测试来实现,确保电性异常真实反映地质特征.

大地微动测深法属于被动源面波勘探,利用天然微动噪声提取瑞利面波,依托地质体横波速度差异探测深部结构(张凡斌等,2024). 构造破碎带、含金蚀变带岩体完整性差,表现为横波低速异常,完整基岩则为高速异常,且低频面波探测深度更深. 通过台阵采集微动信号,提取频散曲线并开展速度反演,可获取地下横波速度剖面,从而进行地质体精细划分,构造定位. 其工作流程为:矿区踏勘后布设观测台阵,野外采集微动振动信号;经滤波、面波提取处理后,反演得到横波速度结构;最终结合地质规律解译成矿有利部位. 可靠性验证通过频散曲线质量检验、台阵重复性试验、反演模型稳定性分析等来实现,保障探测结果精准可靠.

大功率时间域激电测深法依托岩矿石激发极化

效应与电阻率差异,采用人工大功率直流供电探测,含金硫化矿体、蚀变带具有高极化率、中低阻特性,与围岩电性特征差异显著.通过逐级增大供电极距实现深浅部探测,采集一次、二次电场信号,计算视电阻率、视极化率等参数,反演后可精准定位深部金矿体.该方法流程为:前期开展供电试验、确定探测参数;野外布设电极,逐级完成数据采集;计算激电参数并绘制探测剖面,经二维反演圈定高极化-低阻矿化异常;最终结合成矿规律解析矿体空间特征.其可靠性通过单测点数据误差校验、正反演拟合、矿区岩矿石物性标定来实现,确保矿化异常的可信度.基于上述各方法的探测原理、应用条件和适用范围,以及在充分研究区域地质及重磁场资料基础上,首先于庙岭—九仗沟金矿带上开展大地电磁测深法调查工作,大致了解该金矿带区域的深部控矿断裂、岩体接触界面等.之后,在选择的典型金矿床内应用大地微动测深和大功率时间域激电测深,以矿区尺度进行联合精细探测,微动和激电异常经过叠合与约束,共同确定矿床中深部地层结构以及构造破碎带、矿化蚀变带和金矿体赋存空间.

4.2 金矿带深部地质结构特征

地表至深部 10 km 范围,理论上为有利成矿空间,对 10 km 以浅进行地质结构研究,可以确定隐伏中酸性侵入体空间分布,认识控矿构造样式、规模及深部延展,会对预测深部找矿、分析构造控矿规律起着非常重要的作用(张明辉等,2019;侯爵等,2022,薛建玲等,2025).九仗沟—庙岭金成矿带受控于 F_1 断裂,且其展布方向与 F_1 断裂带吻合,该带内的中低温岩浆热液型金矿床成矿地质体为隐伏中酸性侵入体,因此研究 F_1 断裂带深部延伸特征、确定隐伏岩体空间位置,可以为该金矿带深部找矿预测提供地球物理依据.

大地电磁测深(Magnetotelluric Sounding, MT)技术具有精度高、探测深度大、不受高阻层屏蔽影响、对低阻层反应灵敏、设备轻便、成本低等特点(胡浩等,2020;张昆等,2024),可以直观地反映剖面内深部地质信息,被广泛应用于深部结构研究及深部隐伏矿产勘探中(李鹏等,2021),并在该领域取得了一系列研究成果(Zhang *et al*., 2019,2023;赵凌强等,2023;薛国强等, 2023).布设的穿过潭头—大章盆地的北西-南东向大地电磁测深剖面 G-G′位置如图 4 所示,长度 13.5 km,点距为 0.5 m ~ 1 km,野外测量使用 v8 电法工作站,采用“十”字型布站方式,有效观测频率范围为 320 ~ 0.0006 Hz,采集时间长度不少于 5 h.利用软件对大地电磁测深数据进行了转换、处理分析及二维反演,其 G-G′剖面二维电性结构显示(图 5a),电阻率从地表往深部逐渐升高,基本上可分为 3 个电性区,即 800 Ω·m 以下的低阻区,介于 800 ~ 20000 Ω·m 之间的中高阻区和大于 20000 Ω·m 的高阻区.低阻区、中高阻区及高阻区分别位于剖面的浅部、中部及深部.

根据大地电磁测深剖面异常显示特征,结合区域地质特征和岩石电性特征,推断 0 ~ 1 km 处、约 3000 m 以浅为太华岩群(Arth)变质基底出露区,2 ~ 12 km 之间、埋深约 300 ~ 1000 m 的浅部低阻区为新生代潭头—大章盆地沉积物及沉积岩的反映,1 ~ 13 km 之间下方的中高阻区为该金矿带赋矿地层熊耳群鸡蛋坪组(Chj)火山岩的反映,其深部的高阻区推断为隐伏岩体(早白垩世花岗岩),1 km 及 12 km 处左右下方存在着的电性梯级带,推断为断裂构造带的反映(图 5b),其中 12 km 处左右显示的断裂为含矿构造 F_1,其在倾向上显示出产状较陡,延深可达 4.0 km 左右,基本可达推断隐伏岩体顶界面附近,表明其在空间上规模较大,倾向延深稳定,据此推断赋存的矿体可能延深亦较大,深部找矿前景较好.

上述 G-G′大地电磁测深推断解释为大致认识了解庙岭—九仗沟金矿带深部地质结构特征提供了相关参考依据和指导.

4.3 典型金矿床深部地质结构

嵩县庙岭—九仗沟金矿带内的金矿床主要以构造破碎蚀变型为主,已探明金矿储量约占该区金矿探明储量的 80% 以上(李国平,2013).东湾金矿是金矿带内构造蚀变型金矿床的典型代表,位于该金矿带的最北段,为隐伏大型金矿床,金矿体的产出严格受陡倾斜切层断裂破碎带控制.以东湾金矿床为例,用矿区尺度更加精细地了解深部地质结构特征.

(1)矿床地质特征

东湾金矿区内主要出露地层为中元古界熊耳群鸡蛋坪组上段($Chxj^3$),金矿床即赋存于该地层内,主体由酸性火山岩构成,包括紫红色流纹岩、英安岩等,地层为单斜状(谢彦军等,2025).其次为古近系古新统高峪沟组(E_1g)及第四系(Q),岩性主要为砂砾岩及河流相松散沉积物(图 6).

矿区构造主要以 NNE 向断裂构造为主,其中 F_1 构造规模最大,沿走向(20° ~ 30°)延伸稳定,倾向 NW,倾角 50° ~ 75°,并严格控制着 M_1 含金蚀变破碎带,主矿体主要呈脉状或透镜状产于构造破碎带

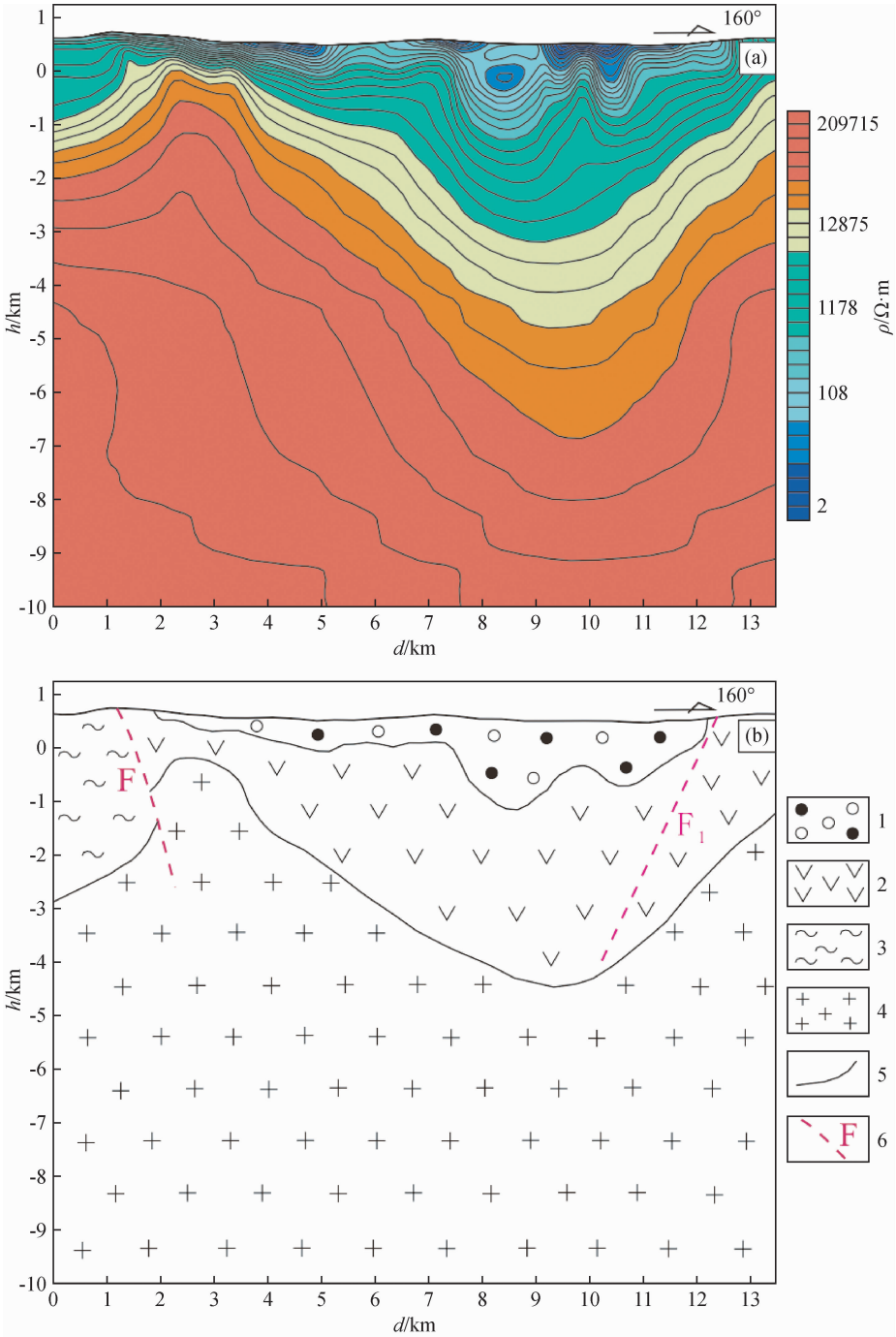


图 5　大地电磁测深 G-G′剖面异常特征及推断解释(河南省第二地质矿产调查院,2024)

(a)大地电磁测深断面异常图;(b)推断解释图.

1-第四系沉积物及古近系-新近系沉积岩;2-熊耳群鸡蛋坪组(Chj)火山岩;3-太华岩群片麻岩;

4-推测隐伏侵入岩;5-推测地质界线;6-推断断层.

Fig. 5　Anomaly characteristics and inference interpretation of magnetotelluric sounding G-G′ section

(Henan No. 2 Institute of Geological & Mineral Resources Survey,2024)

(a) Anomaly map of magnetotelluric sounding section; (b) Inference interpretation diagram.

1-Quaternary sediments and Paleogene-Neogene sedimentary rocks; 2-Volcanic rocks of Xionger Group Jidanping Formation (Chj);

3-Gneiss of Taihua Group; 4-It is speculated that concealed intrusive rock; 5-Speculate the geological boundary; 6-Inferred fault.

中心的内蚀变带内,倾角 65°~85°,具有膨大收缩、分支复合特征.构造破碎蚀变带内碎裂岩、蚀变岩、泥砾岩及角砾岩比较发育,并具有强烈的黄铁矿化、黄铁绢英岩化、硅化和绢云母化蚀变(程华等,2024).

(2)岩(矿)石物理性质

熊耳群鸡蛋坪组火山岩、控矿断裂 F_1 是东湾金矿床矿(化)体赋存地层及构造,为地球物理方法勘查该矿床的探测目标体.由表 1 可以看出,该金矿的构造破碎蚀变带(探测目标体)与英安岩(围岩)之间存在着明显的电性和激发极化特性差异(程华等,2024).同时,东湾金矿地层或岩石的横波速度随着地层(自新到老)和深度(由浅至深)呈逐渐增高趋势,地层之间具有清晰的波速差异界面(荆鹏等,2024).断裂一般会因岩石破碎、断层泥或角砾岩、矿物蚀变、流体渗入及泥(黏)土充填等缘故,导致电阻率降低,横波速度减小,在电阻率和横波速度剖面内,表现为低阻或低速的下凹异常带及梯级变化带,周边完整围岩通常显示为高阻或高速异常.上述岩石物性变化特征为大功率时间域激电测深和大地微动测深对断裂深部位置和金矿体识别定位以及地层划分奠定了良好的物理基础.

表 1 东湾金矿地层及岩石物性特征

Table 1 The physical characteristics of strata and rock in Dongwan gold mine

地层单位			主要岩性	横波速度(m/s)	电阻率(Ω·m)	极化率(%)	物性分级
界	群(系)	代号			几何平均值	算术平均值	
新生界	第四系	Q	黄土、冲积砂砾岩	50~400	—	—	低速
	新近系	E	粉沙质黏土	50~2800	—	—	中速
中元古界	长城系熊耳群	Pt_2x	英安岩	2300~6300	18500	2.36	中高速、高阻、微极化
			构造破碎蚀变带	—	2800	12.4	低-中阻、高极化
早白垩世	侵入岩	γ_5^3	花岗岩	5500~7300	—	—	高速

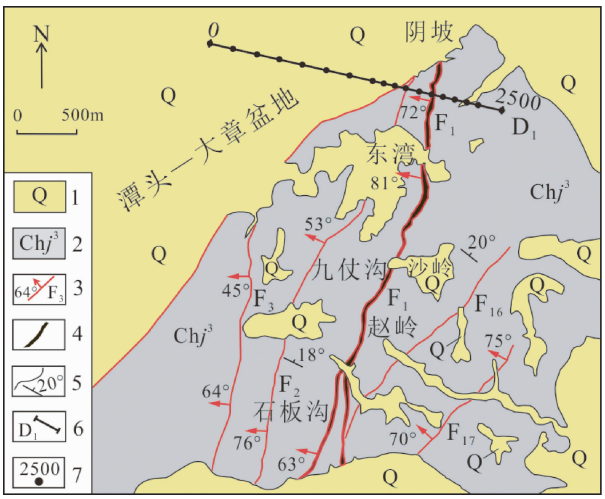


图 6 东湾矿区地质图

1-第四系;2-鸡蛋坪组;3-实测断裂;4-含金构造矿化蚀变带;5-地层产状及界线;6-物探剖面位置;7-物理点.

Fig. 6 Geological map of Dongwan mining area

1-Quatemary; 2-Jidanping Formation; 3-Measured fracture; 4-Gold mineralization alteration zone; 5-Stratigraphic boundaries; 6-Stratigraphic occurrence; 7-Geophysical survey profile; 8-Physical point.

(3)矿床深部地质结构特征

大功率时间域激电测深是一种基于岩(矿)石激发极化效应的主动源勘探方法(张参辉等,2022),通过采用大功率设备提高观测精度和深度,来提供深部金矿化蚀变等信息(白德胜等,2021a,荆鹏等,2024).大地微动测深是一种被动源地震勘探方法,利用天然噪声信号,不依赖主动源激发地震波(张凡斌等,2024),具有抗干扰能力强、探测深度大、分辨率高、低成本、绿色环保、易执行等特点(田宝卿和丁志峰,2021;郑福龙等,2023),为电磁背景和人文因素干扰大、环境保护要求高的地区,无法进行常规电磁法及主动源地震法探测金属矿提供了有益的方法补充或替代选项(刘国峰等,2021;闫浩飞和刘国峰,2024).

电阻率与 S 波速度通常对地层、构造有着比较强的表现能力(徐佩芬等,2013;白德胜等,2021b),极化率参数则对判析断裂构造的含矿性或蚀变特征有着一定的可靠性(李水平等,2019;Yuan *et al.*, 2019),两种方法联合勘查能够提高其探测精度和深度,起到相互补充、佐证作用.大功率时间域激电测深和大地微动测深 D_1 剖面与东湾金矿第 84 号地质勘探线重合(图 6),大功率时间域激电测深使用对称四极测深装置($AM = NB$),大地微动测深采用嵌套式四重圆形(等边三角形)阵列观测系统,台阵半径分别为 75 m(R1)~150 m(R2)~300 m(R3)~600 m(R4).异常解译以该勘探线内钻孔控制的 F_1

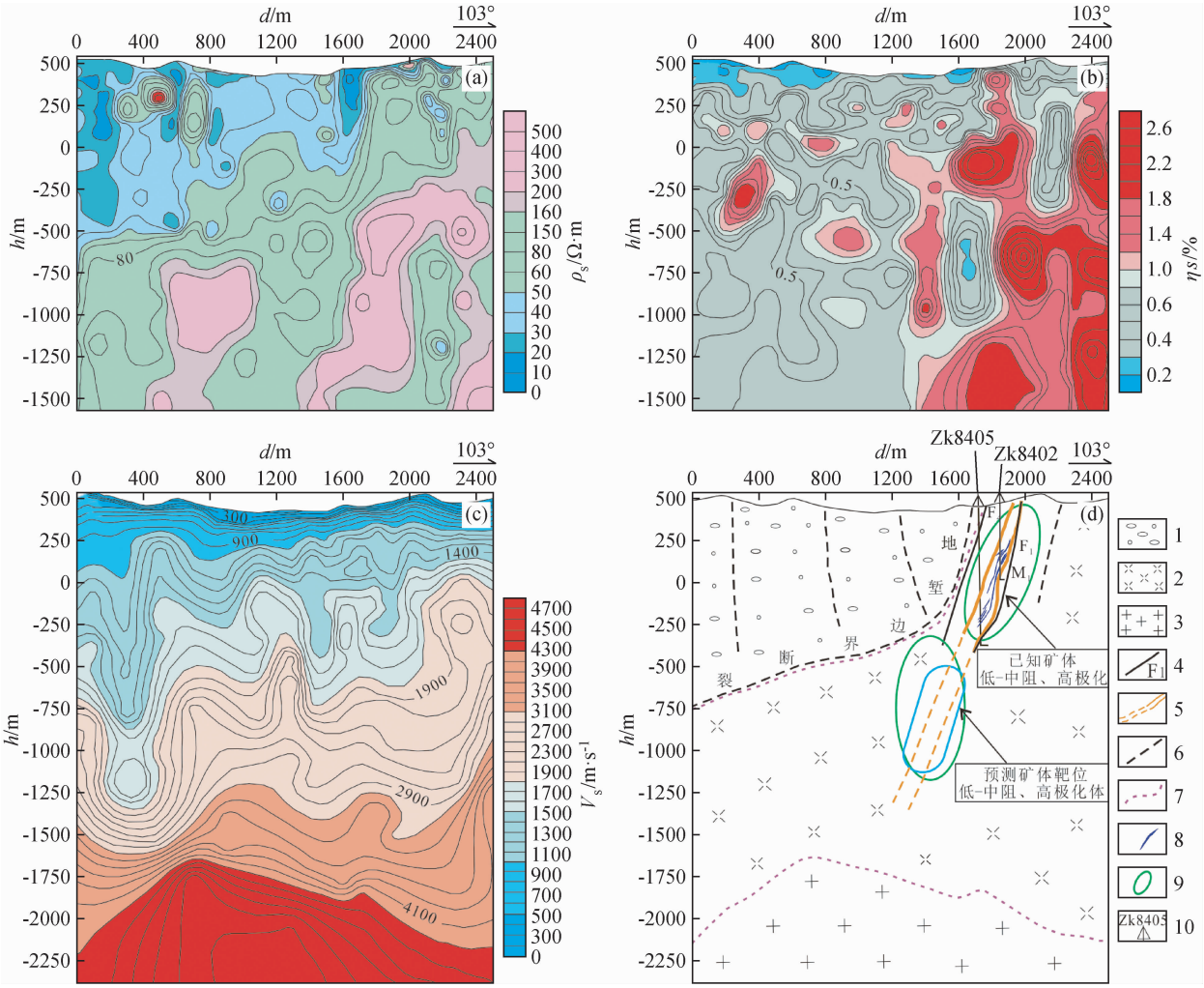


图 7　东湾金矿 D_1 地质-物探综合剖面图

(a)电阻率剖面图;(b)极化率剖面图;(c) S 波速度剖面图;(d)综合解释图.

1-新生界;2-鸡蛋坪组火山岩;3-花岗岩;4-实测断裂;5-已知及推断的矿(化)带;6-推断断裂;7-推测地层界线;8-金矿脉;9-η_s 高异常区;10-钻井.

Fig. 7　D_1 geological-geophysical comprehensive profile of Dongwan gold mine

(a) Resistivity profile map; (b) polarizability profile map; (c) S-wave velocity profile; (d) comprehensive interpretation diagram.

1-Cenozoic erathem; 2-Volcanic rocks of Jidanping formation; 3-Granites; 4-Fracture in known; 5-Mineralization in known and inferred; 6-Fracture is inferred; 7-Line of geological limitation is inferred; 8-Ore body of gold; 9-η_s high anomaly area; 10-Bore hole.

构造蚀变带和金矿体为基准(齐勇攀等,2025),浅部的已知地质和地球物理异常信息作为先验模式,以达到深部地球物理异常合理解释.

大功率时间域激电测深电阻率结果显示(图 7a),剖面内电阻率异常变化可明显划分为 3 个电性体,分别为:ρ_s 小于 50 Ω·m 的低电性体、ρ_s 处在 50 ~ 200 Ω·m 范围内的中等电性体和 ρ_s 大于 200 Ω·m 的高电性体. 结合东湾金矿区地质、岩石电性特征,低电性体、中-高电性体分别推断是第四系黄土(或残坡积)及高峪沟组(E_1g)地层、熊耳群鸡蛋坪组上段(Chj^3)地层的反映. 大功率时间域激电测深与大地微动测深相比勘查深度较小,在地表至标高 -1200 m 范围内,二者反映的地层、构造大体上一致,但在标高 -1200 m 以下,因它的勘查深度有限缺少探测信息.

大功率时间域激电测深极化率结果显示(图 7b),在容、控矿构造 F_1 的倾向延长线内,显示出 2 个高极化异常,以串珠状或陡变梯度带展布,第 1 个为 1800 号点下方、标高 500 ~ -250 m 之间的浅中部高极化异常,它与已知主矿体 M_1 位置相对应,

显示出此处具有的蚀变、矿化特征.第2个为1400号点下方、标高 -400 ~ -1100 m之间存在的高极化体异常,它位于容矿构造 F_1 推测延伸方向上以及主矿体 M_1 侧伏方向下方,同时又与已知主矿体 M_1 处的物探异常特征基本一致,依此推断 F_1 在深部延伸方向上将会有金矿体产生.

大地微动测深结果显示(图7c),剖面内S波速度异常变化可划分为低速体(v_s <300 m/s以下)、中速体(v_s 介于300 ~ 1800 m/s)、中高速体(v_s 介于1800 ~ 4300 m/s)和高速体(v_s >4300 m/s以上),结合东湾金矿地层波速特征、已知地质资料,它们分别对应解释为第四系黄土或残坡积、古近系高峪沟组地层、长城系熊耳群鸡蛋坪组地层和侵入岩,推断此剖面内侵入体顶面埋深在2200 m左右,与区域重磁、大地电磁测深异常解释结果比较一致.

电阻率剖面和S波速度剖面各自在横向上显示出多处串珠状低阻(或等值线梯度变化带)及低速"下凹"(或高低速异常梯度带)异常,且异常位置基本一一对应,两者相结合,推断由断裂构造引起(图7d),其中1950号点处的低波速"下凹"异常和串珠状中-低阻异常位置与实测 F_1 一致,其展布角度与 F_1 产状吻合.F_1 为压扭性断裂构造,延伸相对稳定(荆鹏等,2024),结合 V_s 在浅中部反映的 F_1 延伸趋势和其深部变化情况,预测 F_1 会延伸到深部产出的早白垩世花岗岩边缘.

根据矿区地质资料,结合电阻率(ρ_s)、极化率(η_s)及S波速度(V_s)参数剖面图(图7a、b、c)显示出的物探异常信息,进行了地质推断综合解释(图7d),据此划分了东湾金矿 D_1 剖面内的地层及构造,厘清了 F_1 含矿构造蚀变带的空间展布状态,并将沿 F_1 深部侧伏方向上的极化率高异常区,预测为深部寻找金矿体靶位,给矿区实施钻探工程提供了有利地段.

5 结 论

(1)区域重磁异常初步确定了庙岭—九仗沟金矿带深部存在隐伏中酸性侵入岩(早白垩世合峪岩体),反映了该隐伏岩体为庙岭—九仗沟金矿带内金矿的掩伏岩体(成矿地质体).大地电磁测深剖面大致确定了庙岭—九仗沟金矿带深部隐伏岩体顶部接触带范围,并推测了其顶部埋深.大地微动测深以矿区尺度进一步确定了金矿床深部隐伏侵入岩体的空间分布形态.区域上金矿床(点)的分布位置、形成与中酸性岩体有关(往往围绕岩体或岩体内部分布),上述物探方法推断的隐伏岩体区及岩体周缘是重要的找矿靶区.

(2)大地电磁测深成果显示 F_1 含矿构造带向深部存在连续延伸特征,倾向延深长度可达4.0 km,表明庙岭—九仗沟金矿带内沿含(控)矿构造 F_1 向深部延深稳定,印证了含(控)矿构造 F_1 具有区域控矿构造性质,存在着大规模成矿的可能性.东湾金矿内大功率时间域激电测深和大地微动测深成果信息,预示着该矿床深部有较好的找矿靶位.在上述地球物理信息指导下,提升庙岭—九仗沟金矿带成矿规律认识水平,拓宽深部找矿空间,有望取得深部找矿突破.

致 谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Bai D S, Li S P, Zhao Z Q, *et al*. 2021a. Study on application of geophysics method for gold mine prospecting in around Lake Victoria region, Tanzania. Progress in Geophysics (in Chinese), 36(3): 1029-1045, doi: 10.6038/pg2021EE0146.

Bai D S, Li S P, Zong R, *et al*. 2021b. Geophysical and geochemical anomalies and ore prospecting model for the Dongjianian structural altered rock type silver deposit in western Henan Province. Geology and Exploration (in Chinese), 57(2): 241-253, doi: 10.12134/j.dzykt.2021.02.001.

Chen S M, Qin X, Zhao X X, *et al*. 2019. Geophysical field characteristics and deep ore prospecting prediction of the Zhaiwa concealed rock mass in western Henan. Geology and Exploration (in Chinese), 55(5): 1117-1131, doi: 10.12134/j.dzykt.2019.05.001.

Chen Z G. 2021. Discussion on the geological characteristics and deep prospecting direction of the Xiaonangou gold deposit in the Dongwan mining area in the western part of Xiong'ershan in western Henan. World Nonferrous Metals (in Chinese), (14): 61-62, doi: 10.3969/j.issn.1002-5065.2021.14.026.

Cheng H, Li S P, Bai D S, *et al*. 2024. Deep geophysical characteristics and prospecting prediction of Jiuzhanggou-Dongwan gold mining area, Songxian County, Henan Province. Mineral Exploration (in Chinese), 15(4): 600-611, doi: 10.20008/j.kckc.202404010.

Cheng Y, Qin X, Zhao X X, *et al*. 2018. Geophysical characteristics and prospecting model based on comprehensive information in the molybdenum, lead, zinc and silver polymetallic ore concentration area of the East Qinling Mountains. Geology and Exploration (in Chinese), 54(4): 747-761.

Cui L Y, Li S H, Ding H D, *et al*. 2005. The geochemical anomaly pattern of the Xiaonangou gold deposit in Songxian County, Henan Province. Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese), 29(4): 312-315.

Ding P C, Wang Z Q, Guo Q Q, *et al*. 2020. Mineralization and enrichment characteristics and deep prospecting prospect evaluation of the Miaoling-Jiuzhanggou gold metallogenic belt in Henan Province. Gold (in Chinese), 41(10): 7-12, 18, doi: 10.11792/hj20201002.

Ding P C, Guo Q Q, Liu Y G, *et al*. 2023. Occurrence regularity of orebody and deep prospecting prediction of Miaoling gold deposit in Songxian County, He'nan Province. Geological Bulletin of China (in Chinese), 42(6): 953-965, doi: 10.12097/j.issn.1671-2552.

2023.06.008.

Duan C J, Zhang X, Liu Y H, *et al*. 2017. Discussion on tectonic evolution and superimposed mineralization: a case study on mineralization concentration area in western Henan. Mineral Exploration (in Chinese), 8(5): 789-798.

Gao X Y, Zhao T P, Yuan Z L, *et al*. 2010. Geochemistry and petrogenesis of the Heyu batholith in the southern margin of the North China block. Acta Petrologica Sinica (in Chinese), 26(12): 3485-3506.

Henan No.2 Institute of Geological & Mineral Resources Survey. 2024. Research report on deep prospecting prediction of Jiuzhanggou-Dongwan gold deposit in Songxian County, Henan Province (in Chinese). Zhengzhou: Henan No. 2 Institute of Geological & Mineral Resources Survey.

Hou J, Wu C L, Yu G P, *et al*. 2022. Research progress on the deep structure of Jiaodong gold deposit concentration area. Progress in Geophysics (in Chinese), 37(3): 952-963, doi: 10.6038/pg2022GG0084.

Hu H, Zhang K, Yan J Y, *et al*. 2020. Electrical structures in the southern reach of the Jiaojia fault belt inferred from audio-frequency magnetotelluric sounding in the Jiaodong Peninsula, Shandong Province. Acta Geologica Sinica (in Chinese), 94(2): 661-674, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019179.

Jing P, Sun J, Li S P, *et al*. 2024. Application of geodetic microtremor sounding and time-domain IP sounding to the exploration of the Dongwan gold deposit in Songxian County, Henan Province. Geology and Exploration (in Chinese), 60(5): 982-992, doi: 10.12134/j.dzykt.2024.05.009.

Li G P. 2013. Study on structural ore-controlling regularities of altered rock type gold deposit in the fracture zone of Xiong'ershan ore concentration area, Henan Province. Gold (in Chinese), 34(7): 22-26.

Li P, Luo Y Q, Tian Y, *et al*. 2021. Research progress of geophysical exploration technology for deep geological resources. Progress in Geophysics (in Chinese), 36(5): 2011-2033, doi: 10.6038/pg2021EE0407.

Li S P, Si J T, Cheng H, *et al*. 2019. Application of time-domain IP sounding in the exploration of gold deposits in Tanzania. Progress in Geophysics (in Chinese), 34(2): 588-595, doi: 10.6038/pg2019CC0097.

Liang X H. 2019. Discovery and significance of deep large-scale blind ore body in Ganshu Gold Deposit of Xiongershan ore concentration area. Gold (in Chinese), 40(1): 13-17, doi: 10.11792/hj20190103.

Liu G F, Liu Y, Meng X H, *et al*. 2021. Surface wave and body wave imaging of passive seismic exploration in shallow coverage area application of Inner Mongolia. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 64(3): 937-948, doi: 10.6038/cjg2021O0064.

Liu X, Yan J M, Wu S K, *et al*. 2021. Wall rock alteration and trace elements of pyrite in Qiyugou No. 189 porphyry gold deposit in western Henan Province and their constraints on metallogenic process. Geological Bulletin of China (in Chinese), 40(9): 1530-1546.

Liu Y G, Ding P C, Xu J W, *et al*. 2022. Discussion on genesis of F_8 ore-bearing structure in Miaoling-Jiuzhanggou gold belt in Songxian, Henan province. Gold (in Chinese), 43(8): 5-9, doi: 10.11792/hj20220802.

Pang X C, Xin Z G, Hou G S, *et al*. 2011. Geological characteristics of the Dongwan gold ore field in Songxian County, Henan Province and its ore-search prospect. Geology and Exploration (in Chinese), 47(5): 765-771.

Pang X C, Wang L, Chen L N, *et al*. 2012a. Vertical zoning characteristics and significance of primary halo in Dongwan gold deposit, Songxian County. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science) (in Chinese), 31(2): 165-171.

Pang X C, Zong J, Li J J, *et al*. 2012b. The application and significance of IP sounding to the blind-ore forecast—Taking F_{40} fault mineral prediction of Xiahaoping gold deposit for example. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science) (in Chinese), 31(4): 415-421.

Qi N, Wang P, Chen Y J, *et al*. 2019. Ore geology and fluid inclusion constraints on the origin of the 189# deposit in Qiyugou gold orefield, Henan Province. Geotectonica et Metallogenia (in Chinese), 43(3): 558-574, doi: 10.16539/j.ddgzyckx.2019.03.001.

Qi Y P, Yang J D, Li S P, *et al*. 2025. Application of gold mineralization potential investigation of microtremor exploration technology in Jiuzhanggou area, Songxian County, Henan Province. Progress in Geophysics (in Chinese), 40(4): 1492-1506, doi: 10.6038/pg2025II0176.

Qin J Q, Qu W X, Zhou Y L, *et al*. 2022. Vertical zoning characteristics and deep prediction of primary halos in the Jiuzhanggou gold deposit in western Henan Province. Mining Technology (in Chinese), 22(6): 202-206.

Shi J X, Wang Z J, Yue H Q, *et al*. 2008. Geological characteristics and predicting for blind orebodies of Dongwan gold deposit in Songxian, Henan Province. Geology and Resources (in Chinese), 17(1): 30-34.

Teng J W, Xue G Q, Song M C. 2022. Theory on exploring mineral resources in the second deep space and practices with electromagnetic method. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 65(10): 3975-3985, doi: 10.6038/cjg2022P0762.

Tian B Q, Ding Z F. 2021. Review and prospect prediction for microtremor survey method. Progress in Geophysics (in Chinese), 36(3): 1306-1316, doi: 10.6038/pg2021FF0145.

Wang D W, Li Z R, Zhang B. 2024. Application of comprehensive geophysical and geochemical exploration technology in the exploration of a gold deposit in Song County, Henan. Mineral Resources and Geology (in Chinese), 38(4): 761-767, doi: 10.19856/j.cnki.issn.1001-5663.2024.04.020.

Wang J H, Li C, Wang A, *et al*. 2020. Characteristics of gravity and magnetic fields and deep metallogenic prediction in Xiongershan area, western Henan Province. Geological Bulletin of China (in Chinese), 39(5): 735-745.

Wang Y H, Han D, Pan B D, *et al*. 2022. Characteristics and ore-forming material source of gold minerals in Jiuzhanggou Gold Deposit, Henan Province. Gold (in Chinese), 43(7): 3-8, doi: 10.11792/hj20220702.

Xie Y J, Cao J, Li S P, *et al*. 2025. Integrated prospecting model of Jiuzhanggou gold deposit in Songxian county, Henan province. Geology and Resources (in Chinese), 34(2): 177-191.

Xu P F, Li S H, Du J G, *et al*. 2013. Microtremor survey method: a new geophysical method for dividing strata and detecting the buried fault structures. Acta Petrologica Sinica (in Chinese), 29(5): 1841-1845.

Xue G Q, Chen W Y, Zhao P, *et al*. 2023. Three-dimensional electrical structure model of the Yangbajain geothermal field in Xizang: evidence obtained from magnetotelluric data. Science China Earth Sciences, 66(8): 1839-1852.

Xue J L, Pang Z S, Cheng Z Z, *et al*. 2025. Geological model for prospecting and prediction of medium to low temperature magmatic-hydrothermal gold deposits. Acta Petrologica Sinica (in Chinese), 41(1): 4-30, doi: 10.18654/1000-0569/2025.01.02.

Yan H F, Liu G F. 2024. Application of active and passive source seismic exploration in mineral exploration. Progress in Geophysics (in Chinese), 39(5): 1810-1823, doi: 10.6038/pg2024II0336.

Yang C L. 2017. Geological-geochemical characteristics of Jiuzhanggou Gold Deposit, Songxian, Henan Province [Master's thesis] (in Chinese). Jiaozuo: Henan Polytechnic University.

You Y Y, Wang X G, Zhao Y J. 2020. Geological characteristics and resource potential of the Miaoling gold deposit, western Henan Province. Mineral Exploration (in Chinese), 11(9): 1831-1836.

Yuan Y S, Li S P, Peng J, *et al*. 2019. An integrated ore prospecting model for the Nyasirori gold deposit in Tanzania. China Geology, 2(4): 407-421, doi: 10.31035/cg2018127.

Zhang C H, Guo Y X, Bai D S, *et al*. 2018. Relationship between the enrichment regularity and electrical characteristics of Huaishuping gold deposit in Song County, Henan Province. Modern Mining (in Chinese), 34(4): 46-51, doi: 10.3969/j.issn.1674-6082.2018.

04.010.
Zhang C H, Li S P, Bai D S, *et al*. 2022. Application of the time-domain IP method to the exploration of concealed fluorite deposits: a case study of the Tielu fluorite deposit in Fangcheng County, Henan Province. Geology and Exploration (in Chinese), 58(2): 369-380, doi: 10.12134/j.dzykt.2022.02.011.
Zhang F B, Han S, Zeng A P. 2024. 3D shear wave velocity inversion with passive seismic surface wave in a mineral exploration. Progress in Geophysics (in Chinese), 39(5): 2013-2024, doi: 10.6038/pg2024HH0440.
Zhang H L, Chen Y, Zhang N, *et al*. 2022. Application of aeromagnetism of power glider in exploration of the Miaoling gold deposit in Songxian County, Henan Province. Mineral Exploration (in Chinese), 13(7): 990-998, doi: 10.20008/j.kckc.202207013.
Zhang K, Lü Q T, Yan J Y, *et al*. 2019. The three-dimensional electrical structure and metallogenic prospect of the Ning (Nanjing)-Wu (Wuhu) basin and the southern adjacent area in eastern China. Journal of Asian Earth Sciences, 173: 304-313.
Zhang K, Lü Q T, Zhao J H, *et al*. 2023. Intra-continental orogeny: insights from magnetotelluric data into the Mesozoic uplift history of the eastern Jiangnan Orogen in South China. Acta Geologica Sinica-English Edition, 97(1): 55-67.
Zhang K, Liu L, Ma X Z, *et al*. 2024. Technical progress of processing methods for magnetotelluric sounding data. Geological Survey of China (in Chinese), 11(5): 129-138, doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.119.
Zhang M H, Liu Y S, Hou J, *et al*. 2019. Review of seismic tomography methods in near-surface structures reconstruction. Progress in Geophysics (in Chinese), 34(1): 48-63, doi: 10.6038/pg2019CC0534.
Zhang W, Wu G. 2007. Structure analysis for ore body controlling of Jiuzhanggou gold deposit in Henan. Nonferrous Metals (in Chinese), 59(2): 70-74.
Zhang Y, Li S P, Jing P, *et al*. 2024. Geochemical characteristics and exploration model of the Jiuzhanggou gold deposit, Songxian County, Henan Province. Gold Science and Technology (in Chinese), 32(2): 258-269, doi: 10.11872/j.issn.1005-2518.2024.02.131.
Zhao L Q, Sun X Y, Zhan Y, *et al*. 2023. Characteristics of the three-dimensional deep electrical structure in the Helan Mountains-Yinchuan Basin and its geodynamic implications. Science China Earth Sciences, 66(3): 505-520.
Zheng F L, Yu Z, Cai C D, *et al*. 2023. Analysis of the effect of combining microgravity and microdynamic methods for the detection of hidden karst: take a shale gas drilling platform in Changning as an example. Progress in Geophysics (in Chinese), 38(2): 967-976, doi: 10.6038/pg2023FF0224.
Zhu S Z, Chu Z B, Jin G, *et al*. 2022. Geological characteristics and genetic mechanism of Jiuzhanggou gold deposit in southwest Henan Province. China Manganese Industry (in Chinese), 40(2): 72-78, doi: 10.14101/j.cnki.issn.1002-4336.2022.02.015.

附中文参考文献

白德胜, 李水平, 赵志强, 等. 2021a. 坦桑尼亚环维多利亚湖地区金矿勘查地球物理方法应用研究. 地球物理学进展, 36(3): 1029-1045, doi: 10.6038/pg2021EE0146.
白德胜, 李水平, 纵瑞, 等. 2021b. 豫西董家埝构造蚀变岩型银矿物化探异常特征及找矿模型. 地质与勘探, 57(2): 241-253, doi: 10.12134/j.dzykt.2021.02.001.
陈树民, 秦曦, 赵晓晓, 等. 2019. 豫西寨凹隐伏岩体地球物理场特征与深部找矿预测. 地质与勘探, 55(5): 1117-1131, doi: 10.12134/j.dzykt.2019.05.001.
陈志刚. 2021. 豫西熊耳山西部东湾矿区小南沟金矿段地质特征及深部找矿方向探讨. 世界有色金属, (14): 61-62, doi: 10.3969/j.issn.1002-5065.2021.14.026.
程华, 李水平, 白德胜, 等. 2024. 河南省嵩县九仗沟—东湾金矿区深部地球物理特征与找矿预测. 矿产勘查, 15(4): 600-611, doi: 10.20008/j.kckc.202404010.
程远, 秦曦, 赵晓晓, 等. 2018. 东秦岭钼铅锌银多金属矿集区地球物理场特征及综合信息找矿模型. 地质与勘探, 54(4): 747-761.
崔来运, 李世华, 丁汉铎, 等. 2005. 嵩县小南沟金矿床地球化学异常模式. 物探与化探, 29(4): 312-315.
丁培超, 王振强, 郭勤强, 等. 2020. 河南省庙岭——九仗沟金矿带矿化富集特征及深部找矿远景评价. 黄金, 41(10): 7-12, 18, doi: 10.11792/hj20201002.
丁培超, 郭勤强, 刘玉刚, 等. 2023. 河南嵩县庙岭金矿矿体赋存规律及深部找矿预测. 地质通报, 42(6): 953-965, doi: 10.12097/j.issn.1671-2552.2023.06.008.
段存基, 张先, 刘运华, 等. 2017. 构造演化与叠加改造成矿问题探讨——以豫西矿集区为例. 矿产勘查, 8(5): 789-798.
高昕宇, 赵太平, 原振雷, 等. 2010. 华北陆块南缘中生代合峪花岗岩的地球化学特征与成因. 岩石学报, 26(12): 3485-3506.
河南省第二地质矿产调查院. 2024. 河南省嵩县九仗沟—东湾金矿区深部找矿预测研究报告. 郑州: 河南省第二地质矿产调查院.
侯爵, 武澄泷, 俞贵平, 等. 2022. 胶东金矿集中区深部结构研究进展. 地球物理学进展, 37(3): 952-963, doi: 10.6038/pg2022GG0084.
胡浩, 张昆, 严加永, 等. 2020. 山东胶东半岛焦家断裂带南缘电性结构研究. 地质学报, 94(2): 661-674, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019179.
荆鹏, 孙进, 李水平, 等. 2024. 大地微动测深与时间域激电测深在金矿床中的勘查应用——以河南省嵩县东湾金矿床为例. 地质与勘探, 60(5): 982-992, doi: 10.12134/j.dzykt.2024.05.009.
李国平. 2013. 河南熊耳山矿集区破碎带蚀变岩型金矿床构造控矿规律研究. 黄金, 34(7): 22-26.
李鹏, 罗玉钦, 田有, 等. 2021. 深部地质资源地球物理探测技术研究发展. 地球物理学进展, 36(5): 2011-2033, doi: 10.6038/pg2021EE0407.
李水平, 司建涛, 程华, 等. 2019. 时间域激电测深在坦桑尼亚金矿床勘查中的应用例析. 地球物理学进展, 34(2): 588-595, doi: 10.6038/pg2019CC0097.
梁新辉. 2019. 熊耳山矿集区干树金矿床深部大型盲矿体的发现及意义. 黄金, 40(1): 13-17, doi: 10.11792/hj20190103.
刘国峰, 刘语, 孟小红, 等. 2021. 被动源面波和体波成像在内蒙古浅覆盖区勘探应用. 地球物理学报, 64(3): 937-948, doi: 10.6038/cjg2021O0064.
刘馨, 闫建明, 吴少魁, 等. 2021. 豫西祁雨沟 189 号斑岩型金矿床围岩蚀变和黄铁矿微量元素特征及其对成矿过程的约束. 地质通报, 40(9): 1530-1546.
刘玉刚, 丁培超, 徐金武, 等. 2022. 河南省嵩县庙岭——九仗沟金矿带 F_8 含矿构造成因探讨. 黄金, 43(8): 5-9, doi: 10.11792/hj20220802.
庞绪成, 辛志刚, 侯广顺, 等. 2011. 河南嵩县东湾金矿田地质特征及找矿远景. 地质与勘探, 47(5): 765-771.
庞绪成, 王路, 陈丽娜, 等. 2012a. 嵩县东湾金矿床原生晕垂直分

带特征及其意义. 河南理工大学学报(自然科学版), 31(2): 165-171.

庞绪成, 宗静, 李俊杰, 等. 2012b. 激电测深在盲矿预测中的应用及意义——以下蒿坪金矿 F_{40} 断裂隐伏矿体预测为例. 河南理工大学学报(自然科学版), 31(4): 415-421.

齐楠, 王玭, 陈衍景, 等. 2019. 河南祁雨沟金矿田 189 号矿床流体包裹体与矿床成因研究. 大地构造与成矿学, 43(3): 558-574, doi: 10.16539/j.ddgzyckx.2019.03.001.

齐勇攀, 杨九鼎, 李水平, 等. 2025. 微动勘查技术在河南省嵩县九仗沟金成矿潜力调查中的应用. 地球物理学进展, 40(4): 1492-1506, doi: 10.6038/pg2025II0176.

秦军强, 曲伟勋, 周宇乐, 等. 2022. 豫西九仗沟金矿床原生晕垂向分带特征及深部预测. 采矿技术, 22(6): 202-206.

石建喜, 王志军, 岳海泉, 等. 2008. 嵩县东湾金矿地质特征及深部盲矿预测. 地质与资源, 17(1): 30-34.

滕吉文, 薛国强, 宋明春. 2022. 第二深度空间矿产资源探查理念与电磁法找矿实践. 地球物理学报, 65(10): 3975-3985, doi: 10.6038/cjg2022P0762.

田宝卿, 丁志峰. 2021. 微动探测方法研究进展与展望. 地球物理学进展, 36(3): 1306-1316, doi: 10.6038/pg2021FF0145.

王东伟, 李卓然, 张斌. 2024. 综合物化探技术在河南嵩县某金矿勘查中的应用. 矿产与地质, 38(4): 761-767, doi: 10.19856/j.cnki.issn.1001-5663.2024.04.020.

王俊鹤, 李璨, 王安, 等. 2020. 豫西熊耳山地区重磁场特征与深部成矿预测. 地质通报, 39(5): 735-745.

王颖辉, 韩东, 潘柏东, 等. 2022. 河南省九仗沟金矿床金矿物特征及成矿物质来源. 黄金, 43(7): 3-8, doi: 10.11792/hj20220702.

谢彦军, 曹杰, 李水平, 等. 2025. 河南省嵩县九仗沟金矿综合找矿模型. 地质与资源, 34(2): 177-191.

徐佩芬, 李世豪, 杜建国, 等. 2013. 微动探测: 地层分层和隐伏断裂构造探测的新方法. 岩石学报, 29(5): 1841-1845.

薛国强, 陈卫营, 赵平, 等. 2023. 西藏羊八井地热田三维电性结构模型——来自大地电磁的证据. 中国科学: 地球科学, 53(8): 1859-1871.

薛建玲, 庞振山, 程志中, 等. 2025. 中低温岩浆热液型金矿床找矿预测地质模型. 岩石学报, 41(1): 4-30, doi: 10.18654/1000-0569/2025.01.02.

闫浩飞, 刘国峰. 2024. 主被动源地震勘探在金属矿勘查中的应用. 地球物理学进展, 39(5): 1810-1823, doi: 10.6038/pg2024II0336.

杨春蕾. 2017. 河南省嵩县九仗沟金矿地质地球化学特征[硕士论文]. 焦作: 河南理工大学.

尤阳阳, 王兴国, 赵玉洁. 2020. 豫西庙岭金矿床地质特征及资源潜力. 矿产勘查, 11(9): 1831-1836.

张参辉, 郭玉溪, 白德胜, 等. 2018. 河南嵩县槐树坪金矿矿体富集规律与电性特征的关系. 现代矿业, 34(4): 46-51, doi: 10.3969/j.issn.1674-6082.2018.04.010.

张参辉, 李水平, 白德胜, 等. 2022. 时间域激电法在浅覆盖区萤石矿勘查中的应用——以河南省方城县铁炉萤石矿床为例. 地质与勘探, 58(2): 369-380, doi: 10.12134/j.dzykt.2022.02.011.

张凡斌, 韩帅, 曾爱平. 2024. 被动源面波三维横波速度反演在山东某矿区应用研究. 地球物理学进展, 39(5): 2013-2024, doi: 10.6038/pg2024HH0440.

张海龙, 陈玉, 张楠, 等. 2022. 动力滑翔机航磁在河南嵩县庙岭金矿区勘查中的应用. 矿产勘查, 13(7): 990-998, doi: 10.20008/j.kckc.202207013.

张昆, 刘磊, 马兴知, 等. 2024. 大地电磁测深数据处理方法技术进展. 中国地质调查, 11(5): 129-138, doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.119.

张明辉, 刘有山, 侯爵, 等. 2019. 近地表地震层析成像方法综述. 地球物理学进展, 34(1): 48-63, doi: 10.6038/pg2019CC0534.

张伟, 伍刚. 2007. 河南省九丈沟金矿控矿构造分析. 有色金属, 59(2): 70-74.

张勇, 李水平, 荆鹏, 等. 2024. 河南嵩县九仗沟金矿床地球化学特征与勘查模式. 黄金科学技术, 32(2): 258-269, doi: 10.11872/j.issn.1005-2518.2024.02.131.

赵凌强, 孙翔宇, 詹艳, 等. 2023. 贺兰山-银川盆地三维深部电性结构特征及其地球动力学意义. 中国科学: 地球科学, 53(3): 481-496.

郑福龙, 余舟, 蔡从德, 等. 2023. 微重力和微动法相结合的隐伏岩溶探测效果分析——以长宁某页岩气钻井平台为例. 地球物理学进展, 38(2): 967-976, doi: 10.6038/pg2023FF0224.

朱随洲, 储照波, 金刚, 等. 2022. 河南九仗沟金矿地质特征及成因机制探讨. 中国锰业, 40(2): 72-78, doi: 10.14101/j.cnki.issn.1002-4336.2022.02.015.