

doi: 10.12029/gc20231124001

宋明春, 王洪军, 刘洪波, 贺春艳, 魏印涛, 李杰, 曹静杰, 牛树银, 田京祥, 李秀章, 张尚坤, 张文, 李大鹏, 王英鹏, 董磊磊, 李健, 王怀洪, 高继雷, 朱裕振, 陈大磊, 王润生. 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[J]. 中国地质, 51(1): 1-16.

Song Mingchun, Wang Hongjun, Liu Hongbo, He Chunyan, Wei Yintao, Li Jie, Cao Jingjie, Niu Shuyin, Tian Jingxiang, Li Xiuzhang, Zhang Shangkun, Zhang Wen, Li Dapeng, Wang Yingpeng, Dong Leilei, Li Jian, Wang Huaihong, Gao Jilei, Zhu Yuzhen, Chen Dalei, Wang Runsheng. 2024. Deep characteristics of ore-controlling faults in Jiaoxibei gold deposits and its implications for prospecting: Evidence from geophysical surveys[J]. Geology in China, 51(1): 1-16(in Chinese with English abstract).

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

宋明春^{1,2}, 王洪军², 刘洪波², 贺春艳², 魏印涛², 李杰¹, 曹静杰¹, 牛树银¹,
田京祥³, 李秀章⁴, 张尚坤³, 张文⁴, 李大鹏³, 王英鹏⁴, 董磊磊⁵, 李健⁶,
王怀洪⁷, 高继雷⁸, 朱裕振⁷, 陈大磊², 王润生²

(1. 河北省战略性关键矿产资源重点实验, 河北地质大学地球科学学院, 河北 石家庄 050031; 2. 山东省物化探勘查院, 山东 济南 250013; 3. 山东省地质科学研究所, 山东 济南 250013; 4. 山东省地质调查院, 山东 济南 250014; 5. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083; 6. 山东理工大学资源与环境工程学院, 山东 淄博 255049; 7. 山东省煤田地质规划勘察研究院, 山东 济南 250104; 8. 山东省第一地质矿产勘查院, 山东 济南 250100)

摘要:【研究目的】胶东是全球著名的金成矿区, 金矿床主要受断裂构造控制, 该区尚有很多断裂是无矿的, 以往对断裂的深部形态及赋矿断裂与无矿断裂的区别特征缺乏深入研究。【研究方法】本文通过在胶东西北部实施重、磁、电长剖面 and 穿越主要金矿集区的广域电磁剖面、反射地震剖面, 揭示了断裂深部特征, 为赋矿断裂和无矿断裂的识别提供了重要证据。【研究结果】地球物理探测表明, 胶西北地区的断裂构造有陡倾角的深断裂、缓倾角的铲式断裂和陡倾角的小断裂, 其中控矿的三山岛、焦家和招平断裂均是铲式断裂。结合对金矿床的研究发现, 矿床主要赋存于缓倾角断裂中, 矿体呈阶梯分布特征, 陡倾角的深断裂中未见明显的金矿化蚀变, 现今金矿床赋存的最大深度在 5 km 左右。【结论】综合分析认为, 低角度拆离断层和连续性不好的高角度小断层有较好的物理圈闭条件, 有利于矿化富集; 而产状平直、陡倾的深断裂不具备物理圈闭的条件, 不利于成矿。胶东型金矿的找矿方向应集中于缓倾角的铲式断裂及其派生、伴生的陡倾角小断裂附近。

关键词: 金矿床; 深部探测; 地球物理剖面; 断裂构造; 阶梯赋矿; 矿产勘查工程; 胶东

创新点: 胶东地区的断裂构造类型有陡倾角的深断裂、缓倾角的铲式断裂和陡倾角的小断裂, 缓倾角的铲式断裂及陡倾角的小断裂有利于矿化富集, 而平直、陡倾的深断裂不利于成矿。

中图分类号: P618.51; P631 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)01-0001-16

Deep characteristics of ore-controlling faults in Jiaoxibei gold deposits and its implications for prospecting: Evidence from geophysical surveys

SONG Mingchun^{1,2}, WANG Hongjun², LIU Hongbo², HE Chunyan², WEI Yintao², LI Jie¹,

收稿日期: 2023-11-24; 改回日期: 2023-12-25

基金项目: 国家自然科学基金重点支持项目 NSFC—山东省联合基金“胶东深部金矿断裂控矿机理”(U2006201)资助。

作者简介: 宋明春, 男, 1963 年生, 教授, 地质矿产勘查专业, 主要从事矿产勘查、区域地质调查和相关研究; E-mail: mingchuns@163.com。

CAO Jingjie¹, NIU Shuyin¹, TIAN Jingxiang³, LI Xiuzhang⁴, ZHANG Shangkun³, ZHANG Wen⁴,
LI Dapeng³, WANG Yingpeng⁴, DONG Leilei⁵, LI Jian⁶, WANG Huaihong⁷, GAO Jilei⁸,
ZHU Yuzhen⁷, CHEN Dalei², WANG Runsheng²

(1. Hebei Key Laboratory of Strategic Critical Mineral Resources, College of Earth Sciences, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 2. Shandong Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Jinan 250013, Shandong, China; 3. Shandong Institute of Geological Sciences, Jinan 250013, Shandong, China; 4. Shandong Institute of Geological Survey, Jinan 250014, Shandong, China; 5. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 6. School of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, Shandong, China; 7. Geological Planning and Exploration Institute of Shandong Coalfield, Jinan 250104, Shandong, China; 8. Shandong Provincial No.1 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Jinan 250100, Shandong, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] Jiaodong Peninsula is a famous gold metallogenic area in the world. The gold deposits are mainly controlled by fracture. Certainly, there are still many fractures in this area without ore. In the past, the deep form of the fracture and the distinction between the ore-bearing faults and the ore-free faults have not been thoroughly studied. **[Methods]** In this paper, the gravity, magnetic and electric length profiles, wide area electromagnetic profiles and reflection seismic profiles that traverse the main gold deposits areas in Jiaoxibei area are used to reveal the deep characteristics of the fractures, providing important evidence for the identification of ore-bearing faults and ore free faults. **[Results]** The geophysical detection shows that there are deep faults with steep dip angle, shovel faults with gentle dip angle and small faults with steep dip angle in Jiaoxibei area, among which the ore-controlling Sanshandao, Jiaojia and Zhaoping faults are shovel faults. Combined with the study on the gold deposits, it is found that the deposits mainly occur in the gentle dip faults, the ore bodies present the step-like mineralization pattern, while no obvious gold mineralization alteration has been found in the deep faults, and the maximum depth of the present gold deposits are about 5 km. **[Conclusions]** Comprehensive analysis shows that the low-angle detachment faults and the large-angle small faults have better physical trap conditions, which are conducive to mineralization enrichment. However, the deep faults with flat and steep dip do not have the condition of physical trap, which are not conducive to mineralization. The prospecting direction of Jiaodong type gold deposits should be concentrated in the vicinity of the gentle dip shovel faults and its derived and associated small steep dip faults.

Key words: gold deposits; deep exploration; geophysical profile; faults; step-like mineralization pattern; mineral exploration engineering; Eastern Shandong Province (Jiaodong Peninsula)

Highlights: There are deep faults with steep dip angle, shovel faults with gentle dip angle and small faults with steep dip angle in Jiaodong Peninsula. The low-angle detachment faults and the large-angle small faults are conducive to mineralization enrichment. However, the deep faults with flat and steep dip are not conducive to mineralization.

About the first author: SONG Mingchun, male, born in 1963, professor, mainly engaged in mineral exploration and regional geological survey; E-mail: mingchuns@163.com.

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC-Shandong Joint Fund) "The mechanism of structural ore controlling of the deep-seated gold deposits in Jiaodong Peninsula" (No.U2006201).

1 引 言

中国胶东半岛累计探明金资源量近 6000 t, 是世界第三大金成矿区。胶东金矿主要受断裂构造控制, 其中三山岛、焦家和招平 3 条主要断裂成矿带已探明超过 4000 t 金资源量。前人对金矿床的断裂构造控矿特征进行了较多研究, 发现和提出了

大断裂成大矿、脆性断裂与基底构造复合控矿、主断裂控制蚀变岩型矿体次级断裂控制石英脉型矿体、金矿体赋存于断裂拐弯和分枝断裂发育部位、受同一条断裂控制的矿体具有一致的侧伏向等断裂控矿规律(李宏骥, 2002; 李士先等, 2007; Song et al., 2014; Deng et al., 2019)。尤其是通过近年来的深部找矿钻探工程, 揭示了主要控矿断裂呈由浅部

向深部倾角渐趋变缓而且陡、缓交替变化的铲式、阶梯状特征,厚大金矿体通常赋存于断裂倾角变缓的区段,由此提出了金矿阶梯式成矿模式(Song et al., 2012a, 2021a; 宋明春等, 2012, 2020)。通过对招远大尹格庄金矿床的三维地质建模,以及断裂形态与矿床分布的三维空间关系的深入分析,认为金矿体主要赋存于断裂坡度较缓段(Mao et al., 2019; Liu et al., 2022)。胶东地区除金矿赋矿断裂外,还有许多无矿断裂,如栾家河断裂、桃村断裂、郭城断裂、朱吴断裂、海阳断裂等,以往对赋矿断裂与无矿断裂的区别特征缺乏系统研究。此外,虽然已有较多钻探工程揭露了断裂的深部形态,但对钻探工程控制部分之外的断裂向深部延深情况尚不清楚。加强断裂深部特征及其与金成矿关系的研究,对于深化分析断裂控矿规律,进而指导找矿具有重要的应用价值。

地球物理勘探一直是胶东金矿找矿和断裂构造识别的主要手段之一。在以往的浅部找矿阶段,主要利用航空和地面磁测、重力测量等手段识别隐伏的断裂构造并圈定找矿靶区,利用激电联剖和激电测深等手段辅助开展矿区普查和布设钻探工程;在大量地球物理工作的基础上,集成建立了浅部找矿的地质-地球物理找矿模型,其中针对破碎带蚀变岩型金矿的关键地球物理找矿标志是低磁、低阻、高极化率异常,而低磁、高阻、高极化率异常则是石英脉型金矿的重要地球物理标志(万国普, 1994; 李士先等, 2007);在深部找矿阶段,基于第二深度空间探测理念(滕吉文等, 2022),针对深部矿床的地球物理信息被厚覆盖层屏蔽的问题,改变了深部探测的目标体和探测方法,探测目标由浅部的矿化异常体转为控矿断裂的深部结构,勘查方法主要有可控源音频大地电磁测深(CSAMT)、大地电磁测深(MT)、音频大地电磁测深(AMT)、高精度重力和磁测剖面等,也尝试将地震勘探、广域电磁法(WFEM)等用于深部找矿,并且建立了深部找矿的地质-地球物理模型(Song et al., 2012b, 2021b; 贺春艳等, 2022a; 黄鑫等, 2022; 孟银生等, 2022)。部分研究者采用深反射地震勘探、主动源深地震宽角反射/折射探测、短周期密集台阵成像等方法探测和研究胶东深部地质结构,并探讨金成矿的深部背景

(潘素珍等, 2015; Yu et al., 2018; 俞贵平等, 2020)。本文基于 1 条穿越胶北隆起和胶莱盆地的重、磁、电综合地球物理剖面 and 2 条穿过胶东西北部主要控矿断裂的深反射地震和广域电磁剖面,进行了区域和主要金成矿带的深部地质结构剖析,重点阐释了断裂构造与金成矿的关系,提出了赋矿断裂和无矿断裂的判识标志,以期深化胶东大规模金成矿认识和指导深部找矿提供依据。

2 区域地质和地球物理背景

胶东半岛位于郯庐断裂以西,其大部分属于华北克拉通东南缘,但东部的威海一带属于苏鲁超高压变质带。前人将胶东地区划分为胶北隆起、胶莱盆地和威海隆起等构造单元(图 1)。位于华北克拉通东南缘的胶北隆起为前寒武纪基底隆起区,由太古宙变质杂岩和元古宙沉积变质地层组成,前者主要为中-新太古代 TTG 片麻岩,少量基性-超基性岩体和唐家庄岩群、胶东岩群;后者以古元古代荆山群和粉子山群为主,少量出露长城纪芝罘群和南华纪-震旦纪蓬莱群。胶莱盆地为白垩纪陆相火山-沉积盆地,属于胶北隆起与威海隆起之间的裂陷盆地,早期沉积了以河湖相为主的下白垩统莱阳群,其后出现下白垩统青山群火山岩系,晚期的上白垩统王氏群主要为河流相沉积。威海隆起是被郯庐断裂左行平移的秦岭-大别-苏鲁造山带(超高压变质带)的东北段,主要地质单元为新元古代花岗岩片麻岩,少量古元古代变质地层和基性-超基性岩残片,零星分布三叠纪超高压榴辉岩。胶东地区于中生代发生了强烈的岩浆活动,形成了广泛分布的侵入体,除威海地体中有少量晚三叠世花岗岩类(石岛花岗岩)外,主要是侏罗纪-白垩纪侵入岩,它们大面积侵入到胶北隆起和威海隆起中。主要侵入岩类型有:晚侏罗世玲珑型花岗岩和文登型花岗岩,早白垩世郭家岭型花岗岩、柳林庄型闪长岩、伟德山型花岗岩和崂山型花岗岩,另外有较多脉岩和超浅成斑岩体。郯庐断裂(山东境内称为沂沭断裂)和牟平-即墨断裂带控制了胶东地区的断裂格架,与二者平行和近平行的 NE-NNE 走向断裂是该区最发育的断裂构造,其次为近 EW-NEE 走向者, NW 向断裂规模较小。胶东地区共有金矿床(区)

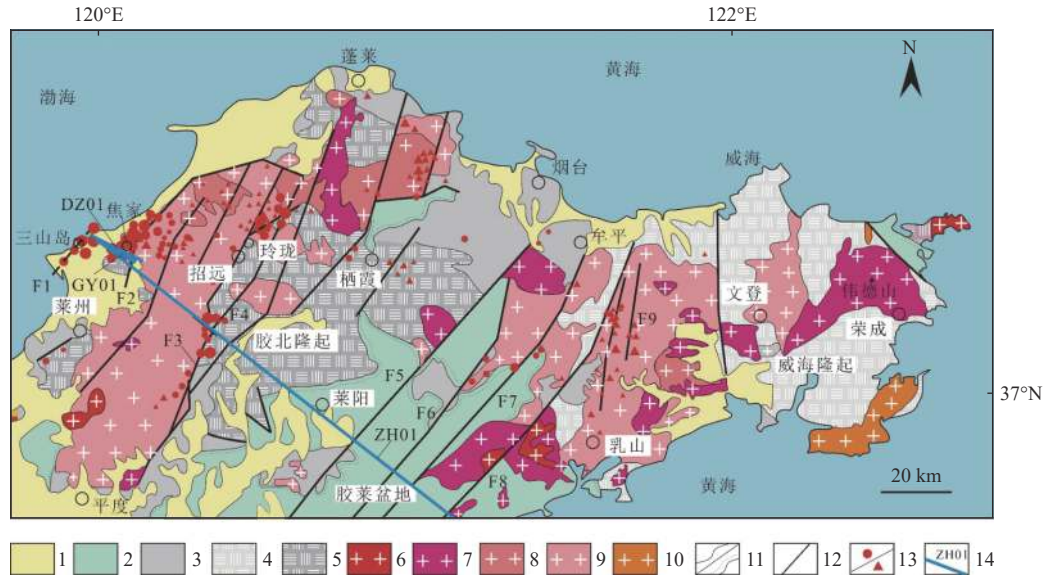


图1 胶东区域地质和金矿床分布图

1—第四系; 2—白垩系; 3—元古宙沉积变质地层; 4—新元古代花岗质片麻岩; 5—中—新太古代变质杂岩; 6—早白垩世崂山型花岗岩; 7—早白垩世伟德山型花岗岩; 8—早白垩世郭家岭型花岗岩; 9—晚侏罗世玲珑型花岗岩; 10—晚三叠世石岛花岗岩; 11—整合/不整合地质界线; 12—断层; 13—蚀变岩型/石英脉型金矿床; 14—地球物理剖面位置及编号; F1—三山岛断裂; F2—焦家断裂; F3—招平断裂; F4—栾家河断裂; F5—桃村断裂; F6—郭城断裂; F7—朱吴断裂; F8—海阳断裂; F9—金牛山断裂

Fig.1 Sketch map of regional geology and gold deposits distribution in Jiaodong Peninsula

1—Quaternary; 2—Cretaceous; 3—Proterozoic sedimentary-metamorphic strata; 4—Neoproterozoic granitic gneiss; 5—Archean metamorphic complex; 6—Cretaceous Laoshan-type granites; 7—Cretaceous Weideshan-type granites; 8—Cretaceous Guojialing-type granites; 9—Jurassic Linglong-type granites; 10—Triassic Shidao granites; 11—Conformity/unconformity geological boundary; 12—Fault; 13—Gold deposit of altered rock type/quartz vein type; 14—Location and number of geophysical profile; F1—Sanshandao fault; F2—Jiaojia fault; F3—Zhaoping fault; F4—Luanjiahe fault; F5—Taocun fault; F6—Guocheng fault; F7—Zhuwu fault; F8—Haiyang fault; F9—Jinniushan fault

200 余处, 金矿床主要受三山岛、焦家、招平、西林—陡崖断裂和金牛山等断裂构造控制。

胶东区域布格重力异常具有南北成带、带中有块的总体特征, 表现为沿胶莱盆地的重力高异常带和其南、北二侧的重力低异常带(贺春艳等, 2022b)。胶北隆起的招平断裂以西地区, 表现为以莱州郭家店为中心的呈 NNE 向“S”形展布的重力低异常区; 胶莱盆地为块状重力高异常夹局部重力低异常特征, 南部青岛市附近出现近等轴状的局部重力低异常; 威海隆起区以大面积重力低异常为主, 乳山—荣成一线东南部重力值逐渐抬升, 呈现带状重力高异常特征, 向西南延伸与胶莱盆地重力高异常连为一体。区域磁场特征自西向东呈“低—中—高”的 NE—NNE 向带状展布特征(李士先等, 2007)。胶东西部招平断裂带以西地区整体呈低磁特征, 局部分布有 NE 向串珠状的相对高磁块体; 胶东中部的莱阳—烟台一带, 磁异常整体呈 NNE 向展布的高、低跳跃磁场区; 胶东东部的青岛—威海一带, 为

NNE 向延伸的带状高磁异常。区域较大规模的断裂带表现为密集的重力梯级带和狭窄的低磁异常带。

3 地球物理剖面位置及探测方法

3.1 重磁电综合剖面

剖面西端起始于莱州市朱桥镇西的风毛寨, 东端终止于海阳小纪镇东的二十里店, 剖面线方位 130°, 全长约 120 km(剖面线编号 ZH01)。剖面西部为胶北隆起, 东部为胶莱盆地, 终点位于苏鲁超高压变质带边部(图 1)。沿剖面同时完成了高精度重力、高精磁测和 MT 测量。

重力测量使用 CG-5 型全自动重力仪, 磁法测量采用 GSM-19T 型质子磁力仪, MT 测量使用 V8 多功能电法仪, 数据采集和处理方法见贺春艳等(2022b)和陈大磊等(2022)。

3.2 广域电磁测量

WFEM 剖面位于胶西北莱州市, 剖面方位为

106°, 剖面西侧起始于三山岛村东, 东侧终止于寺庄村东部, 总长度为 13.46 km, 剖面线编号 GY01 (图 1)。剖面穿越胶西北三山岛断裂和焦家断裂之间胶东最密集的金矿床集中区, 剖面的西段位于三山岛断裂沿倾向向东的深部延伸区段, 东段控制了焦家断裂地表出露位置及向西倾斜的深部区段。沿该剖面线及附近已施工了很多金矿勘探和深部探测钻孔, 包括控制三山岛断裂深部的孔深 4006.1 m “中国岩金勘探第一深钻”(ZK96-5 孔) 和控制焦家断裂深部的孔深 3266.06 m 中国岩金“第一见矿深钻”(ZK01 孔)。

测量仪器采用 JSGY-2 广域电磁接收机(8 通道), 装置形式为 E-E_x 装置, 观测范围位于场源 AB 中垂线两侧 30°角扇形范围内。采用 180 kW 大功率发送系统, 频率范围为 8192~3/256 Hz。数据采集和处理方法见王洪军和熊玉新(2020)。

3.3 反射地震测量

测线(编号 DZ01, 图 1)西起莱州三山岛街道距海边约 165 m 处, 向东经西岭、吴二村、河套于家、寺庄一线, 止于山上贾家村东侧约 1.55 km 处。测线位置大致与 WFEM 剖面线一致, 但长度略长, 测线东段沿寺庄—纱岭金矿区的 320 勘探线进行。测线方位角 106°, 采用双线接收, 全长 19.4 km×2。

采用的地震仪器为法国 Sercel 公司 428XL 型多道遥测数字地震仪检波器, 采用 10 Hz 的低频检波器, 型号 20DX-10, 采样间隔 1.0 ms, 记录长度 15 s。检波距 20 m, 炮距 100 m, 炮线长度 13.18 km。采用 6000-20-20-20-6000 观测系统, 双线采集, 线距 20 m。601 道接收、120 次覆盖, 中间激发, 双边不对称接收。激发形式为单井、井中激发, 井深 18~20 m, 激发药量 8 kg。接收参数: 采用 6 只检波器串联组合, 堆放接收, 挖坑埋置。最终获得了 16.22 km 地震时间剖面。

4 观测结果

4.1 重磁电综合剖面及推断解释

4.1.1 岩石物性

在重磁电综合剖面(ZH01)测量时, 对主要地质单元进行了岩石物性测试。胶莱盆地以陆相碎屑岩为主的地层单元显示为低密度、低阻、弱或无磁性特征(在火山岩发育段出现局部的强磁异常), 平

均密度值为 $(2.6\pm 0.2)\times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 电阻率值多小于 $500 \Omega\cdot\text{m}$ 。中生代侵入岩显示为低密度、高阻、弱磁性特征(在中基性脉岩发育区出现局部高磁异常), 平均密度值为 $(2.61\pm 0.3)\times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 左右, 电阻率值一般为 $1000\sim 8000 \Omega\cdot\text{m}$ 。基底隆起区的新太古代变质杂岩, 一般显示为中等密度、中阻、弱磁性特征, 局部出现的高磁异常为镁铁质、超镁铁质岩包体的反映。基底隆起区的古元古代变质地层显示为高密度、高阻、磁性变化大特征, 为剖面中密度最高的地质单元, 密度值主要变化于 $2.74\times 10^3\sim 2.84\times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 电阻率平均值约为 $10000 \Omega\cdot\text{m}$ 。

4.1.2 ZH01 剖面物性特征及深部推断解释

在重力、磁法和 MT 测量数据剖面上, 不同区段具有明显的物性差异, 自西向东划分为以下 5 段(图 2):

(1) 第一段(0~7.5 km)。磁力和重力曲线较平坦, 均在 0 值左右变动, 重力值明显高于该段以东部分。地质调查表明, 该段地表为第四系松散沉积物, 厚度数米至十余米, 钻孔揭示第四系之下隐伏的地质体为新太古代变质杂岩。在 MT 测量数据剖面上, 该段浅部为低阻区, 最大深度约 2 km, 其下为高阻区, 根据地质资料确定浅部为变质杂岩, 推断深部存在晚侏罗世花岗岩(玲珑型花岗岩)。对地质体的岩石物性分析表明, MT 推断解释的 2 km 以浅的变质岩和其下的花岗岩不足以产生实测幅值的重力异常, 推断在 6 km 深度以下仍有高密度的变质杂岩存在。

(2) 第二段(7.5~33.5 km)。该段总体特征为高电阻率、低重力、微弱磁性, 与其右侧区段的密度和电阻率差异明显, 重力值是整个剖面中的最低值区。该段剖面地表出露地质体为玲珑花岗岩体, 通过布格重力异常反演拟合, 花岗岩体垂向深度超过 10 km, 推断主体为晚侏罗世玲珑型花岗岩, 深部有早白垩世伟德山型花岗岩。花岗岩体在 33.5 km 右侧以 40°左右倾角斜插入新太古代变质杂岩中。

(3) 第三段(33.5~64 km)。该段重力值是剖面中的最高值段, 磁力值呈高、低起伏的锯齿状变化, MT 测量显示为中—高电阻率异常特征。该段剖面地表为新太古代变质杂岩, 根据地球物理特征结合地质情况推断, 剖面整体为变质杂岩。重力异常呈现为向东逐渐升高特征, 推断第二段的花岗岩体向

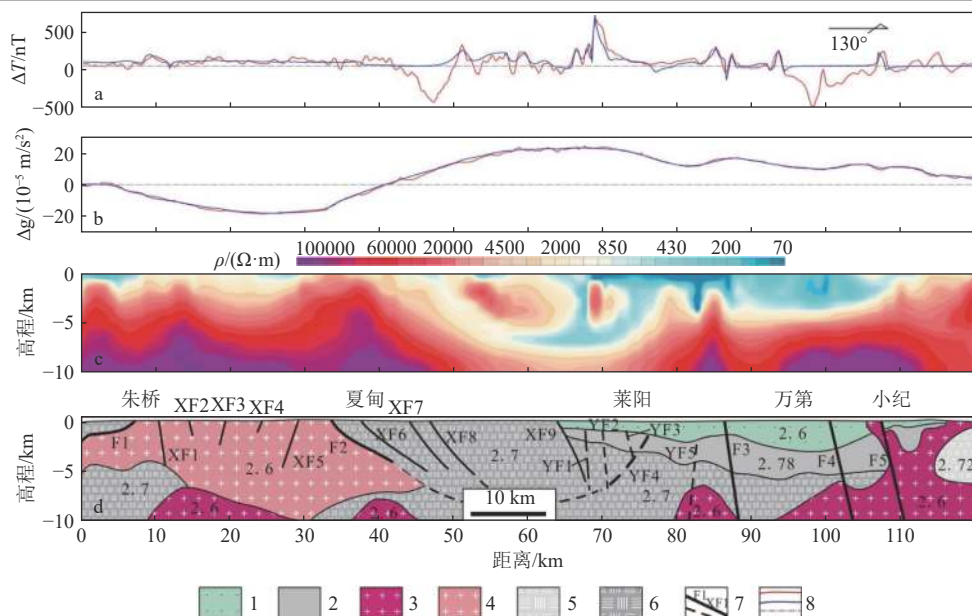


图2 胶东莱州凤毛寨—海阳二十里铺地球物理剖面及推断解释(据贺春艳等, 2022b 修改)

a—重力曲线; b—磁场曲线; c—MT 视电阻率剖面; d—推断解释地质剖面(图中的数字为模拟密度值); 1—白垩系; 2—古元古界; 3—早白垩世花岗岩类; 4—晚侏罗世花岗岩类; 5—花岗质片麻岩(苏鲁超高压变质带); 6—胶北新太古代变质杂岩; 7—断层、推测断层及编号; 8—实测数据/理论数据/背景场曲线

Fig.2 Geophysical profile and inferred interpretation of Fengmaozhai—Ershilipu in Jiaodong Peninsula (modified from He Chunyan et al., 2022b)

a—Gravity fitting curve; b—Magnetic field fitting curve; c—MT apparent resistivity profile; d—Inferred and interpreted geological profile, the numbers in the figure assign values to the analog density; 1—Cretaceous; 2—Proterozoic strata; 3—Early Cretaceous granites; 4—Late Jurassic granites; 5—Granitic gneiss of Sulu ultra-high pressure metamorphic belt; 6—Neoarchean granitic-greenstone belt in northern Jiaodong Peninsula; 7—Fault and number; 8—Measured data/theoretical data/background field curve

东插入到变质岩系中; 磁异常的锯齿状变化推断是受强磁性的镁铁质-超镁铁质岩包体和低磁性的断裂构造影响; MT 剖面显示深部有带状低阻异常带, 推断为断裂构造的反映。

(4)第四段(64~106 km)。浅部与深部地球物理特征有明显差异, 浅部总体显示为低阻、低密度特征, 深部呈现中-高阻、高密度特征。磁性不均匀、幅值变化大, 重力值表现为总重力高、局部重力低的特征。该段位于中生代胶莱盆地陆相火山-沉积地层分布区, 推断解释盆地的最大深度约 2800 m, 盆底之下依次分布有古元古代变质地层、新太古代变质杂岩和白垩纪侵入岩。

(5)第五段(106~120 km)。该段重力值逐渐降低、磁力值变化较大、电阻率呈升高特征。沿剖面地表主要出露白垩纪青山群火山岩, 局部有伟德山型花岗岩和潜火山杂岩体。根据地球物理特征推断反演, 该段的深部主要为早白垩世花岗岩体, 剖面东端出现隶属于苏鲁超高压变质带的花岗质片麻岩。

4.1.3 断裂构造推断解释

(1)区域较大断裂。表现为明显的重磁和电阻率异常或高值、低值过渡梯级带, 是切割深度或规模较大的断裂, 推断解释的区域较大断裂包括图 2d 的中 F1~F5 断裂。F1 和 F2 断裂上、下盘地质体的电阻率和密度都有较大差异, 为界岩构造, 二者分别对应焦家断裂和招平断裂, 其中 F2 断裂在 MT 视电阻率剖面中表现为密集的等值线梯级异常带, 异常带倾角总体在 40°左右, 在 5 km 左右深度以浅呈现出浅部较陡、深部较缓的铲式断裂特征, 5 km 以深断裂平缓延伸。F3、F4 断裂发育在白垩纪盆地中, 浅部表现低阻异常带, 深部在高阻背景中仍有断裂异常表现, 推断其切割深度超过 10 km, 二者分别对应地表的桃村断裂带和郭城断裂带。F4 和 F5 断裂重磁场特征表现为明显的条带状负异常, F5 断裂为地表的朱吴断裂。

(2)小断裂。表现为小规模的低磁异常和低阻异常, 推断解释了 XF1~XF9 断裂, 断裂延伸深度一

般不超过 5 km, 倾角较陡, 呈近直立。对照地表地质调查确定, 这些断裂的规模均较小, 破碎带宽度较窄、延伸长度不大, 对地质体的破坏不明显。

(3) 隐伏断裂。在莱阳及以西的白垩纪沉积盆地下伏基底中发现多条低阻异常带, 其与两侧地质体的电阻率值有明显差异, 推断解释为隐伏断裂, 将其编号为 YF1~YF5。其中 YF4 电阻率梯级异常明显, 推断为规模较大断裂, 显示为向西倾斜的铲式特征, 深部与招平断裂(F2)趋于相交; YF1~YF3 为 YF4 上盘的次级小断裂。

4.2 广域电磁剖面及推断解释

WFEM 剖面总体呈浅部低阻、中深部高阻特征(图 3a, 王洪军和熊玉新, 2020), 沿剖面线方向和垂向电阻率特征有明显变化, 指示了地质结构的变化。在垂向上, 电磁剖面曲线类型为 HKH 型, 浅部显示为高频段 H 型中低阻, 视电阻率值主要在 800

$\Omega \cdot m$ 以下, 对应的地质体已知为新太古代变质杂岩, 剖面东段的浅部出现局部高阻异常, 是采矿干扰的原因; 中部显示为中频段 K 型高阻, 视电阻率值主要为 1000 $\Omega \cdot m$ 以上, 经金矿勘探验证为玲珑花岗岩; 深部出现的低频段 H 型低阻, 为视电阻率等值线密集的低阻带, 与其上部和下部的低阻体形成明显对比, 为厚度较大的断裂矿化蚀变带, 剖面东段属于焦家断裂, 剖面西侧是三山岛断裂向深部的延伸; 底部高阻体与中部高阻体具有相似的电磁特征, 推断为玲珑花岗岩引起。根据 WFEM 剖面推断的深部地质结构与由钻探控制的地质剖面吻合良好(图 3a、b)。

断裂构造在 WFEM 剖面中反映明显。以剖面东端 350~360 点附近为端点, 出现一条由浅向深、由东向西倾斜延深的低阻梯级带, 与两侧高阻形成明显的对比, 是已控制的焦家断裂蚀变带的反映。

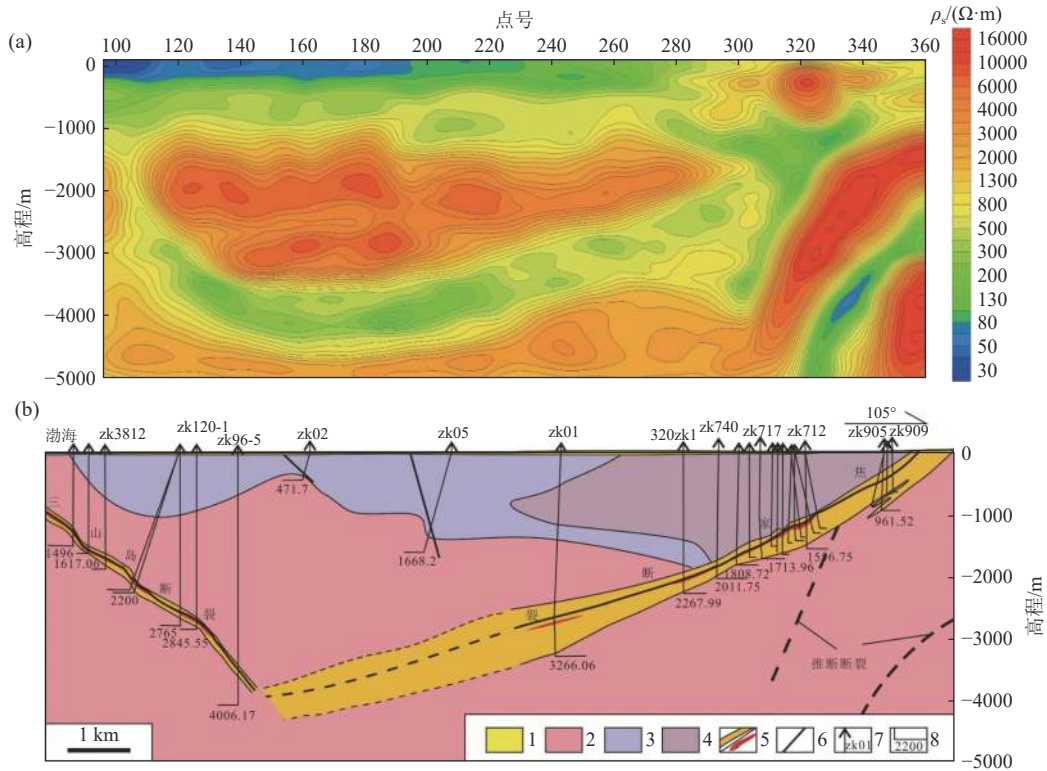


图 3 胶东三山岛—寺庄广域电磁反演 ρ_s 断面图(a)和钻探控制的地质剖面图(b)(据王洪军和熊玉新, 2020)
 1—第四系; 2—晚侏罗世玲珑型花岗岩; 3—早前寒武纪 TTG 片麻岩; 4—早前寒武纪斜长角闪岩; 5—破碎蚀变带/金矿体; 6—断层; 7—钻孔及编号; 8—钻孔深度/m

Fig.3 (a) Cross-section diagram of the ρ_s of two-dimensional continuum inversion for WFEM and (b)geological profile map controlled by drilling in Sanshandao—Sizhuang, Jiaodong Peninsula (after Wang Hongjun and Xiong Yuxin, 2020)
 1-Quaternary; 2-Jurassic Linglong-type granites; 3-Early Precambrian TTG gneiss; 4-Early Precambrian amphibolite; 5-Fragmented alteration zone/gold ore body; 6-Fault; 7-Drilling and number; 8-Drilling depth/m

低阻带向西缓倾,呈舒缓波状,总体倾角在 30°左右,至 160 点附近达到最大倾斜深度为-4000~-4500 m 标高。这一低阻带与金矿勘探钻孔控制的焦家断裂蚀变带吻合(图 3b),在这一带上施工的 ZK01 钻孔,在孔深 2428.00~3234.16 m 控制了断裂蚀变带(于学峰等, 2019)。在剖面西段(95~140 点)-1000~-4000 m 标高,WFEM 断面显示有向东倾斜的低阻带,低阻带上部相对较窄、倾角较陡,深部变宽、变缓,与东部焦家断裂带引起的低阻带在 160 点的剖面深部相交,该低阻带为三山岛断裂带的反映。WFEM 剖面揭示胶东的三山岛和焦家两条主要控矿断裂均表现为明显的相对低阻特征,二者在深部交会,交会深度在-4000~-4500 m 标高左右。

在广域电磁剖面中还显示有多条小规模断裂。在剖面中部的 190 点附近,于-1000~-2000 m 高程视电阻率值西高东低,等值线梯级带由西侧的近水

平,转为向下弯曲向东倾斜,在-1500 m 高程左右显示为“U”字型低阻异常,推断为断裂带的反映,地表对应已知的西由断裂。在 160 点附近的-1000 m 标高以下,视电阻率等值线也出现“U”字型低阻特征,地表对应邓家断裂。在 300 点以东,-2000 m 标高以下有两条向西陡倾的近平行低阻带,推断为焦家断裂下盘的次级断裂。

4.3 反射地震剖面及推断解释

4.3.1 地震反射波特征及深部地质结构

在地震时间剖面中(图 4a), 2 s 以浅反射波同相轴少,能量弱,杂乱,呈倾斜或拱弧状。2 s 以深反射波多且能量较强、连续性较好,但东西两侧能量变弱、连续性变差,反射波组频率一般在 30~60 Hz 左右。在约 7000 m 深度范围内,识别出 T1~T3 三组地震反射波组,对应推断解释和实际控制的三条地质界面(R1~R3),这些地质界面将深度剖面划分为四段,对应 4 层地质体,与由已知钻孔实际控制

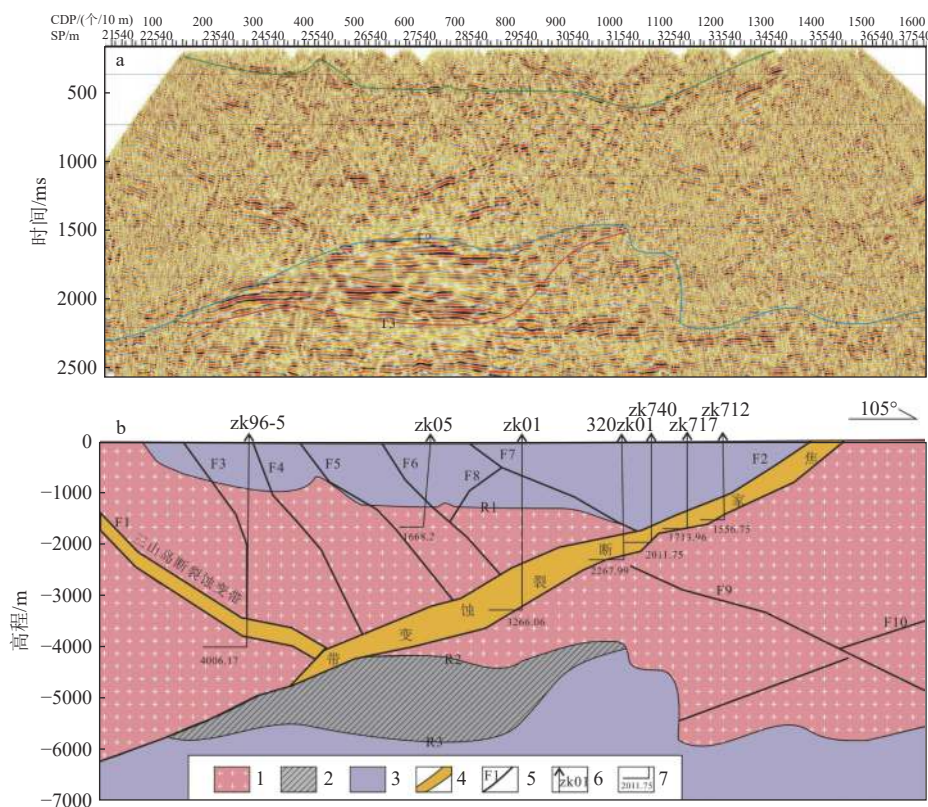


图 4 胶东三山岛—贾家反射地震时间剖面(a)和推断地质剖面(b)

1—晚侏罗世玲珑型花岗岩; 2—新元古代变质地层; 3—新太古代花岗绿岩带; 4—断裂蚀变带; 5—断裂及编号; 6—钻孔及编号; 7—钻孔深度/m

Fig. 4 (a) Reflection seismic time profile and (b) inferred geological profile in Sanshandao-Jiajia, Jiaodong Peninsula

1—Jurassic Linglong-type granites; 2—Neoproterozoic strata; 3—Archean granitic greenstone belt; 4—Fragmented alteration zone; 5—Fault and number; 6—Drilling and number; 7—Drilling depth/m

部分的地质结构非常吻合(图 4b)。

(1) T1 反射波组及浅部地质体。波组发育在 200~500 ms 时段,对应深度 525~1625 m。为弱反射,波组连续性差,起伏变化较大。该波组之上时段,呈现分叉、合并、不同方向的反射波斜交、向上的弧线形状等特征(图 4),是早前寒武纪变质杂岩的反映。

(2) T2 反射波组及中部地质体。波组发育在 1400~2200 ms 时段,对应深度 3.8~6.2 km。反射界面大致呈宽扁“几”字形形态,两侧低,中间高,该反射层将时间剖面分为上、下具有不同反射波场特征的两部分。T2 上部反射不均匀,弱反射,没有可连续追踪的反射波,同相轴呈蚯蚓状、波状、拱弧状,且横向延续长度短,或呈空白反射区,为玲珑花岗岩的反映。玲珑花岗岩被限于与 T1、T2 相对应的 R1、R2 之间的剖面中部,岩体厚度 2.4~6.0 km,东西两侧较厚,中部薄,形似“哑铃”状。

(3) T3 反波组及 T3 与 T2 之间的地质体。波组发育在 1900~2200 ms 时段,对应深度 3.84~6.25 km。在时间 2 s 附近为强反射波组底界面,能量强,连续性较好。在 T3 与 T2 之间加持一规模不大的“梭形”体,厚度 0~1.7 km,形成强反射带,与剖面中其他反射波带反射特征差别较大,其内部波组较丰富,能量强,有相互交叉、上下叠置和分叉合并现象。区内的花岗岩类和变质岩系很难形成如此强的反射,推断此强反射带是由原岩为沉积地层的荆山群变质地层引起。

(4) T3 反波组之下的深部段。波组能量由西向东变弱,连续性一般,反射波大多呈水平状,倾角很缓,其间分布少量波状或不规则反射波。推断该段地质体为变质结晶基底岩系。

4.3.2 断面波特征及断裂构造

在地震时间剖面中,断层主要表现为反射波系统的错断或断面反射波;两侧波阻抗存在差异,局部表现为能量较强、有一定连续性的地震反射波组特征。较大规模的断裂破碎带在时间剖面上反射波较凌乱,呈断续状,且有斜交、交叉、干涉现象。共推断断层 10 条,其中 F1 和 F2 为区域较大规模断层,分别对应三山岛和焦家断裂,其他断裂规模均较小。

三山岛断裂(F1),在地震剖面上表现为浅部倾

角较大、深部(约 3.3 km 以深)变缓,波状起伏的断面波。由于该断裂位于剖面线最西端的海边及村镇中,受地表接收条件差和覆盖次数偏低的影响,反射波信噪比偏低,但断面波尚可连续追踪,且深层波组能量较强,说明该断裂有连续稳定的主裂面。断面波反映的断裂宽度 50~220 m(时间 20~80 ms),延伸深度在 4.07 km 左右。断裂地表出露位置距离地震剖面最西端约 1.19 km,受施工条件的影响,未对三山岛断裂 2000 m 以浅形成有效控制。

焦家断裂(F2),断裂在剖面东端出露地表,呈舒缓波状向西延伸/深,几乎横跨整条地震剖面,剖面的东段(浅部)断裂倾角陡,向西(深部)倾角逐渐变缓,在剖面最西端断裂延伸最大深度达 6.2 km 左右。断裂在 1.6 km 深度以浅(位于剖面东段, SP32180 m 和 CDP1091 以东),断面波特征明显,能量较强,呈舒缓波状变化,局部呈台阶状变化,断面倾角上陡、下缓,破碎蚀变带宽度上宽下窄。在 1.6~4.2 km 深度范围(位于剖面中段 SP26540~32180 m 和 CDP527~1091 之间),断面波断续相连,能量不稳定,围岩内反射波发育较少,局部可见蚯蚓状、拱弧状反射波,呈舒缓波状变化,断面倾角较缓,破碎蚀变带宽度中间宽两边窄。

在 4.2 km 深度以深(位于剖面西段, SP26540 m 和 CDP527 以西),断面波条带特征明显,界面较清晰。断裂面两盘反射波差异较大,上盘反射波发育较少,能量弱,大多呈空白反射区,下盘波组较丰富,能量强;断面倾角上部缓、下部稍变陡,破碎蚀变带宽度总体变化不大。

地震反射波特征显示,三山岛断裂与焦家断裂带在剖面位置 SP25600 和 CDP433 的深部交会,交会深度大致在 4000 m 左右,断裂展布于强反射“梭形”体上部,在“梭形”体内未发现明显的断面波。推断在断裂交会部位三山岛断裂可能终止向深部延伸,而焦家断裂可能继续向深部延伸。焦家断裂向深部延伸的主要依据是,“梭形”体的西侧强反射波组截然终止,断面反射波可以向深部继续追索,波组特征相对明显。两条断裂在剖面上形成了焦家断裂为主、三山岛断裂为辅的“y”字形特征。

F3~F8 是三山岛和焦家断裂上盘的次级断裂,断裂深部被三山岛和焦家断裂限制,延伸深度在 1.8~4.2 km。断裂均向东倾斜,自剖面西部向东部

的断裂其倾角逐次变缓, F3 断裂倾角达 80° , F4~F6 倾角为 60° ~ 80° , F7 倾角为 40° ~ 50° 。F8 断裂是夹持于 F6 和 F7 之间的反倾断裂, 断裂倾向西, 倾角约 45° 。F9 和 F10 是焦家断裂下盘的次级断裂, 二者交叉产出, F9 与焦家断裂上盘的 F7 近平行分布, 其顶端与焦家断裂相交, 位于深度 2.24~5.14 km 范围; F10 与焦家断裂近平行展布, 深度在 3.4~4.77 km。

5 讨论

5.1 断裂空间形态及赋矿特征

胶东金矿受断裂构造控制是客观地质规律, 然而尚有很多断裂是无矿的, 以往对断裂的深部形态及赋矿断裂与无矿断裂的区别特征尚缺乏深入研究。本文的地球物理剖面揭示了断裂深部特征, 为赋矿断裂和无矿断裂的识别提供了重要依据。

莱州凤毛寨至海阳二十里店的剖面显示, 莱阳以东的剖面东段发育平直的、切割深度大的陡倾角断裂, 这些断裂分别对应桃村断裂、郭城断裂和朱吴断裂, 他们与其东侧的海阳断裂共同组成了区域上的牟即断裂带, 是胶莱盆地东侧的走滑断裂。主动源深地震宽角反射/折射探测剖面揭示, 郭城断裂和朱吴断裂切割深度达 15 km 左右, 为基底尺度深断裂; 而桃村断裂切割深度超过 30 km, 为地壳尺度深断裂(潘素珍等, 2015)。位于胶东半岛西侧的郯庐断裂与牟即断裂共同控制了胶莱走滑—拉分盆地, 利用地震的 Pn 波到时资料, 获得郯庐断裂带 Pn 波成像结果表明, 断裂切割深度达上地幔顶部, 为岩石圈尺度深断裂(苗庆杰等, 2021)。在这些深断裂中均没有发现金矿化蚀变, 他们是典型的无矿断裂。在莱阳以西的剖面西段有 2 条重要的缓倾角断裂, 断裂产于侏罗纪玲珑岩体与上覆的早前寒武纪变质岩系之间, 对应于招平和焦家断裂, 这 2 条断裂是胶东两条最重要的控矿断裂, 控制了大量破碎带蚀变岩型金矿床的分布(李士先等, 2007)。在两条缓倾角断裂之间有一系列切割深度较浅的陡倾角断裂, 为缓倾断裂下盘的次级断裂, 其中常有石英脉型金矿产出(张丕建等, 2015; 李世勇等, 2022)。本文重磁和 MT 剖面反演的断裂特征与前人根据短周期密集台阵背景噪声成像提取的断裂特征(俞贵平等, 2020)一致。在胶东东部的

牟乳成矿带, 石英脉型金矿受控于陡倾角的金牛山断裂带, 短周期密集台阵背景噪声成像显示断裂带延伸至约 4 km 深度后即没有明显的显示, 指示其不是深大断裂, 可能是拆离断层上盘的张性断层系(杨喜安等, 2011), 其延伸深度受限于深部的拆离断层。

WFEM 剖面和反射地震剖面大致位于同一位置, 二者揭示的同一区域的深部地质结构特征非常一致, 尤其是较清晰地展现了焦家断裂和三山岛断裂的深部形态特征, 断裂形态为整体缓倾斜而且倾角不稳定的波状特征。不同方法地球物理剖面推断解释深部地质结构的一致性, 既表明了在该区所采用地球物理方法的有效性, 又相互佐证了深部地质结构推断的合理性。地球物理推断解释的深部控矿断裂特征已被钻探工程证实和精细揭示, 由钻探工程控制的三山岛、焦家、招平断裂均呈现了浅部倾角较陡向深部倾角变缓及倾角陡、缓交替出现的铲式、阶梯状特征(Song et al., 2023)。三山岛断裂向北延伸到海域的部分是断裂铲式、阶梯状特征的典型代表, 从根据钻孔资料构建的矿床三维地质模型中提取三山岛断裂主断面形态, 呈现明显的缓—陡—缓的阶梯状(图 5a)。在断裂倾角与矿体品位×厚度曲线对比图上, 两条曲线显示负相关特征(图 5b), 即断裂倾角陡的部位没有矿化或矿化较弱, 而断裂倾角缓的部位矿化强。如在 -420~-800 m 标高, 断裂倾角 70.75° ~ 80.78° , 是断裂倾角最陡的段落, 该段不含矿, 矿体品位×厚度值为 0; 在 -1000~-1800 m 标高, 断裂倾角为 39.47° ~ 52.86° , 倾角总体较缓且波动不明显, 该段为矿化富集段, 矿体品位×厚度值位于 150~550 m·(g/t) 范围内。对比断裂的倾角变缓与矿体品位×厚度值发现, 金矿体主要分布于断裂倾角的较缓和陡缓转折部位, 断裂的陡倾角段通常是无矿或弱矿化段, 构成金矿体空间上的阶梯成矿模式。

许多研究表明, 焦家、玲珑和三山岛断裂是发育于侏罗纪玲珑花岗岩与前寒武纪变质岩之间的拆离断层(Charles et al., 2011; 林少泽等, 2013; 杨立强等, 2019)。结合前述对控矿断裂特征的分析表明, 胶东金矿的赋矿断裂主要是缓倾角拆离断层及拆离断层上、下盘的切割深度不大的陡倾角断裂, 而具走滑性质的陡倾角深断裂是无矿断裂。因此,

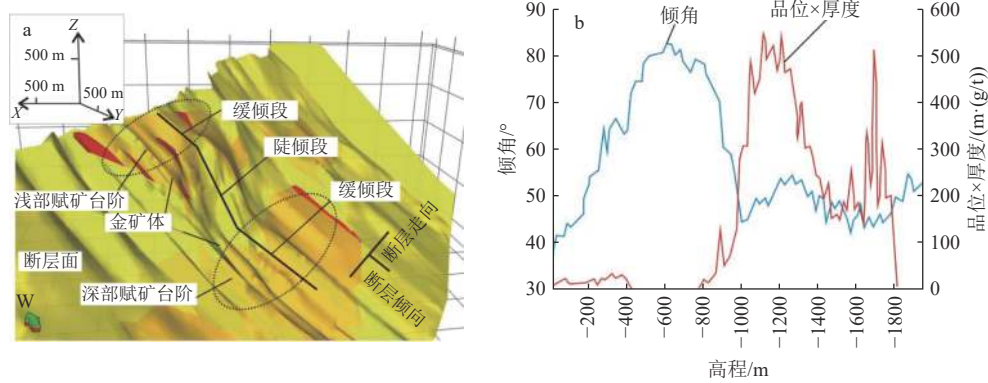


图 5 三山岛北海域断裂空间形态与赋矿位置(a)及断裂倾角与矿体品位×厚度曲线(b)

Fig.5 (a) 3D views of the spatial relationships between the fault planes and the emplacement of gold ore bodies, and (b) curves of dip angle variations of the fault and grade×thickness of gold orebody in the Sanshandao north offshore gold deposit

胶东地区今后找矿的方向应集中于产状有明显变化的区域较大规模断裂附近。另外,综合地球物理剖面在莱阳一带的中生代盆地底部反演解释了一条向西缓倾斜的铲式断裂(YF4),这条断裂与招平断裂在深部交会,应是一条具有找矿潜力的赋矿断裂,值得在今后找矿中关注。

许多研究者认为深大断裂是金成矿的流体通道,有研究者指出深切地幔的郯庐断裂是深部含金流体运移的通道(Goldfarb and Santosh, 2014; Yang and Santosh, 2015),也有研究者提出胶东深切地幔的小位移量剪切带为流体通道(Yu et al., 2018)。然而,在郯庐断裂和小位移量剪切带中及附近均未发现明显的流体蚀变现象,而且金矿床主要产于郯庐断裂以东的胶东地区,其西侧的鲁西地区金矿床则很少,因此本文认为将郯庐断裂和无蚀变的断裂构造作为含金流体通道的认识有待商榷。识别流体通道是非常困难的,主要原因如:流体通道可能是不连续、不可见的;流体在深部高压驱动下向浅部快速流动过程中,不会与围岩发生明显的水岩交代作用(郑义, 2022)。从金矿与岩浆活动,尤其是基性脉岩的紧密伴生关系分析(Li et al., 2016; Song et al., 2020),本文认为成矿流体的通道应当是与岩浆通道一致的,即深部大规模岩浆活动为金成矿提供了通道,郯庐和牟即等深断裂不是胶东金矿的流体运移通道和沉淀场所。

5.2 控矿断裂的延深及成矿深度

地球物理信息揭示了胶西北地区金矿赋矿断裂的垂向深度,招平断裂在 5 km 深度范围内有明显的显示,金牛山断裂切割深度不超过 4 km。焦家

断裂与三山岛断裂在约 4 km 深度范围交会,其后向深部的延伸存在多解性:本文的反射地震剖面显示,焦家断裂在深部切过三山岛断裂,向深部继续延伸;WFEM 剖面及 MT 剖面显示二者交会后,向深部的延深不清晰;Yu et al. (2018)根据地震剖面推断,三山岛断裂在深部切割焦家断裂后继续向深部延伸。

前人对胶东金矿床的流体包裹体进行了大量研究,并据之估算成矿压力和温度,进一步推断了成矿深度。典型矿区的成矿深度估算结果如:招远谢家沟金矿的成矿深度为 7.2~9.7 km,招远玲珑金矿的成矿深度为 5.4~9.0 km,招远大尹格庄金矿的成矿深度为 9.2~14.0 km,招远夏甸金矿的成矿深度为 8.8~12.6 km,牟平辽上金矿的成矿深度为 2.97~3.24 km(Chai et al., 2017, 2019a, b; Li et al., 2020; Guo et al., 2020)。另外,根据对直接赋矿围岩(玲珑花岗岩)中的锆石和磷灰石裂变径迹测试,推断金成矿深度为 6~11 km(Zhao et al., 2018)。综合分析,胶东地区除了胶莱盆地东北缘金矿床(如辽上金矿)的成矿深度较浅外,金矿床主体形成于 5~10 km 深度,为中成—浅成矿床。

前人也对胶西北地区金成矿后的抬升剥蚀情况进行了研究,主要通过对矿石中锆石和磷灰石的(U-Th)/He 及裂变径迹测年计算了抬升剥蚀厚度。如:通过对三山岛金矿 3563 m 深度钻孔的采样测试,估算成矿后剥蚀量>5.1 km(Liu et al., 2017);通过对三山岛金矿床矿石中的黑云母、钾长石进行³⁹Ar-⁴⁰Ar 测年,及对锆石、磷灰石进行裂变径迹测

年,计算的总剥蚀量约(6 ± 2) km(Zhang et al., 2020);对焦家金矿田剥露历史的研究表明,95 Ma 以来的剥蚀量约 3 km(Sun et al., 2017);通过测试焦家超巨型金矿床钻孔样品(采样深度-1100~-2000 m 标高)的锆石和磷灰石裂变径迹年龄,估算 120 Ma 成矿以来矿床的总剥蚀厚度约(5.2 ± 1.2) km(Zhang et al., 2022)。总体分析,胶西北三山岛—焦家地区金矿成矿后的剥蚀厚度在 5 km 左右。

综上,地球物理探测揭示,胶西北主要控矿断裂在 5 km 深度以内有明显的显示,而大于 5 km 深度后断裂或近水平延伸,或缺乏地球物理显示,指示该区 5 km 以深断裂不发育,缺乏适宜的赋矿空间;地质研究表明,金矿床成矿深度主体为 5~10 km,成矿后上覆地质体的剥蚀厚度约 5 km。地球物理探测和地质研究共同指示,胶西北金矿在现今地表以下的 5 km 深度范围内是有找矿潜力的,超过 5 km 深度的空间找矿潜力不大。

5.3 金成矿的构造岩浆背景与过程

对胶西北地区进行的反射地震探测表明,玲珑花岗岩体的中浅部发育“X”形交叉裂隙,其下出现蘑菇状的弧形反射界面,类似拱弧构造,深部显示有垂向的岩浆房和岩浆通道(Yu et al., 2018)。本文的综合地球物理剖面揭示,招平断裂与焦家断裂之间玲珑花岗岩呈厚大的蘑菇状岩体形态。这些地球物理特征,结合焦家断裂和招平断裂的拆离断层性质,使我们相信这一区域经历了岩浆快速隆升和伸展拆离构造。有研究者将这一区域构造称为玲珑变质核杂岩构造(Charles et al., 2011; 杨立强等, 2014, 2019)。鉴于胶东地区晚中生代变质核杂岩、拆离断层、伸展断陷盆地等伸展构造与岩浆活动、地壳快速隆升同时发生,笔者提出他们构成了热隆—伸展构造(宋明春等, 2018; Song et al., 2023)。

白垩纪,受古太平洋板块俯冲及其回撤影响,华北克拉通软流圈上涌,岩石圈及地壳强烈减薄,这一具有长期稳定演化历史的克拉通发生破坏(Zhu et al., 2011),在华北克拉通东部和胶东地区发生大规模岩浆活动和伸展构造作用(林伟等, 2013, 2019; 宋明春等, 2018)。胶东地区早白垩世的岩浆活动具有壳幔混合源特点,而且在早白垩世前后地幔性状和岩浆岩的地球化学性质发生了显著的变化(Goss et al., 2010; Yang and Santosh, 2015; Song

et al., 2020; 王斌等, 2021),强烈的岩浆活动为成矿流体活化和运移提供了热动力条件,岩浆岩地球化学性质转化为成矿元素的聚集提供了物质基础;岩浆岩快速上侵的顶托作用引起地壳浅部强烈隆升,产生变质核杂岩、断陷盆地等伸展构造,沿地质体的界面等构造薄弱面形成缓倾角拆离断层,其中沿玲珑花岗岩体与早前寒武纪变质岩系界面发育的招平断裂和焦家断裂是胶东拆离断层的典型代表,缓倾角的拆离断层主断裂带及其下盘伴生的陡倾角共轭“X”形裂隙为成矿流体聚集、成矿提供了有利空间(宋明春等, 2020, 2022)。在拆离断层主断裂带中,岩石破碎较均匀、裂隙密集,成矿流体在疏松的碎裂岩间隙通过水岩交换作用形成蚀变岩型金矿;在主拆离断层下盘的陡倾角张裂隙中,产生引张虚脱空间,成矿流体受泵吸作用控制快速充填到负压空间中形成石英脉型金矿。由于岩石物性和构造应力的差异,主拆离断层的倾角不断发生变化,来自于地壳深部和幔源的成矿流体顺断层迁移到倾角陡、缓剧烈转折部位时,流体压力突然降低,流体在断裂倾角变缓段缓慢流动造成金卸载成矿(图 6)。成矿流体聚集和矿化富集与物理圈闭作用有关,低角度拆离断层和连续性不好的高角度小断层有较好的物理圈闭条件,有利于矿化富集;而产状平直、陡倾的深断裂不具备物理圈闭的条件,不利于成矿。因此前者是胶东型金矿的主要找矿目标。

6 结 论

(1)地球物理剖面揭示,胶西北地区的断裂构造类型有陡倾角的深断裂、缓倾角的铲式断裂和陡倾角的小断裂,其中控矿的三山岛、焦家和招平断裂均是铲式断裂。地球物理信息也指示了广泛的晚中生代岩浆活动特征。

(2)金矿床主要赋存于缓倾角断裂和陡倾角的小断裂中,陡倾角的深断裂中未见明显的金矿化蚀变。根据地球物理推断的断裂深度和地质研究综合判断,胶西北地区现今金矿床赋存的最大深度在 5 km 左右。

(3)伴随白垩纪软流圈上涌、岩石圈减薄产生的大规模岩浆作用、流体活动、伸展构造为胶东金成矿提供了有利条件。其中,低角度拆离断层和连续性不好的高角度小断层有较好的物理圈闭条件,

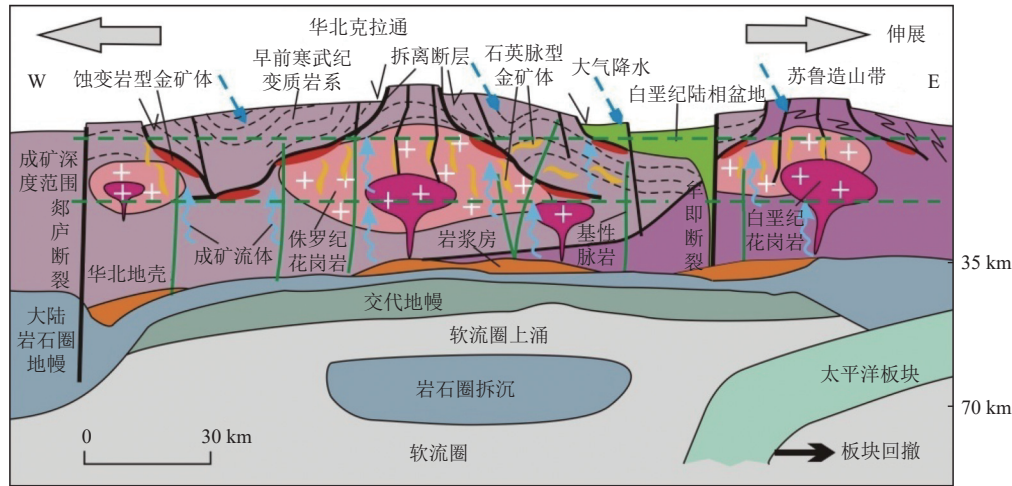


图 6 胶东型金矿与区域构造岩浆活动模式(据宋明春等, 2020 修改)

Fig.6 The model of Jiaodong type gold deposits and regional tectonic magmatic activity(after Song Mingchun et al., 2020)

有利于矿化富集; 而产状平直、陡倾的深断裂不具备物理圈闭的条件, 不利于成矿。

致谢: 郝梓国、杨立强、刘善宝等专家提出了宝贵的建设性修改意见, 谨表衷心感谢。

References

- Chai Peng, Hou Zengqian, Zhang Zhiyu. 2017. Geology, fluid inclusion and stable isotope constraints on the fluid evolution and resource potential of the Xiadian gold deposit, Jiaodong Peninsula[J]. *Resource Geology*, 67(3): 341–359.
- Chai Peng, Zhang Hongrui, Dong Leilei, Zhang Zhiyu. 2019a. Geology and ore-forming fluids of the Dayingezhuang gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China: Implications for mineral exploration[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 204: 224–239.
- Chai Peng, Hou Zengqian, Zhang Hongrui, Dong Leilei. 2019b. Geology, fluid inclusion, and H–O–S–Pb isotope constraints on the mineralization of the Xiejiagou gold deposit in the Jiaodong Peninsula[J]. *Geofluids*, 1–23.
- Charles N, Gumiaux C, Augier R, Chen Yan, Zhu Rixiang, Lin Wei. 2011. Metamorphic core complexes vs. synkinematic plutons in continental extension setting: Insights from key structures (Shandong Province, eastern China)[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40: 261–278.
- Chen Dalei, Wang Runshen, He Chunyan, Wang Xun, Yin Zhaokai, Yu Jiabin. 2022. Application of integrated geophysical exploration in deep spatial structures: A case study of Jiaodong gold ore concentration area[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 46(1): 70–77 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jun, Yang Liqiang, Li Ruihong, David I. Groves, M. Santosh, Wang Zhongliang, Sai Shengxun, Wang Sirui. 2019. Regional structural control on the distribution of world-class gold deposits: An overview from the Giant Jiaodong Gold Province, China[J]. *Geological Journal*, 54(6): 378–391.
- Goldfarb R, Santosh M. 2014. The dilemma of the Jiaodong gold deposits: Are they unique? [J]. *Geoscience Frontiers*, 5: 139–153.
- Goss C S, Wilde S A, Wu Fuyuan, Yang Jinhui. 2010. The age, isotopic signature and significance of the youngest Mesozoic granitoids in the Jiaodong Terrane, Shandong Province, North China Craton[J]. *Lithos*, 120(3/4): 309–326.
- Guo Linnan, Deng Jun, Yang Liqiang, Wang Zhongliang, Wang Sirui, Wei Yuji, Chen Binghan. 2020. Gold deposition and resource potential of the Linglong gold deposit, Jiaodong Peninsula: Geochemical comparison of ore fluids[J]. *Ore Geology Reviews*, 120: 103434.
- He Chunyan, Wang Yang, Wang Hongjun, Chen Dalei, Liu Congwei, Chen Hongjie. 2022. 3D geological modeling of Jiaojia–Sanshandao fault zone in Jiaodong based on comprehensive geophysical constraints: Metallogenic characteristics and implications for ore prospecting[J]. *Geological Bulletin of China*, 41(6): 936–945 (in Chinese with English abstract).
- He Chunyan, Yao Zeng, Guo Guoqiang, Liu Hongbo, Song Mingchun, Li Shiyong, Chen Dalei, Liu Wei. 2022b. Deep structural features of the Jiaobei terrane of Jiaodong and the North Sulu orogenic belt –The inspiration from deep exploration of the geophysics[J]. *Progress in Geophysics*, 37(4): 1392–1404 (in Chinese with English abstract).
- Huang Xin, Wang Yongjun, Song Qian, Cui Kai, Xu Chang, Shao Yubao, Li Silong, Zhu Yuzhen. 2022. Wide field electromagnetic exploration and prospecting of metallogenic structures in Daliuhang gold field, the north of Jiaodong[J]. *Geological Bulletin of China*, 41(6): 1107–1120 (in Chinese with English abstract).
- Li Hongji. 2002. Ore-forming rule of endogenous gold deposit in north of Jiaodong area[J]. *Geology of Shandong*, 18(3/4): 72–77 (in Chinese with English abstract).

- Li Junjian, Zhang Pengpeng, Li Guohua, Liu Wengang, Zhao Zhelin, Li Xiuzhang, Ding Zhengjiang, Fu Chao, Tang Wenlong, Dang Zhicai, Tian Jiepeng. 2020. Formation of the Liaoshang gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China: Evidence from geochronology and geochemistry[J]. *Geological Journal*, 55: 5903–5913.
- Li Lin, Li Shengrong, Santosh M, Li Qing, Gu Yue, Lü Wenjie, Zhang Huafeng, Shen Junfeng, Zhao Guochun. 2016. Dyke swarms and their role in the genesis of world-class gold deposits: Insights from the Jiaodong Peninsula, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 130: 2–22.
- Li Shiyong, Li Jie, Song Mingchun, Ding Zhengjiang, Zhou Mingling, Fan Jiameng, Xie Tianci, Liu Xiangdong, Wang Bin, Zhang Liangliang, Yang Zhenlian. 2022. Metallogenic characteristics and mineralization of the Linglong gold field, Jiaodong Peninsula[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(9): 3234–3260 (in Chinese with English abstract).
- Li Shixian, Liu Changchun, An Yuhong, Wang Weicong, Huang Tailing, Yang Chenghai. 2007. *Geology of Jiaodong Gold Deposit*[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Lin Shaoye, Zhu Guang, Yan Lejia, Jiang Qinqin, Zhao Tian. 2013. Discussion on uplifting mechanism of the Linglong batholith in eastern Shandong[J]. *Geological Review*, 59(5): 832–844 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wei, Wang Jun, Liu Fei, Ji Wenbin, Wang Qingchen. 2013. Late Mesozoic extension structures on the North China Craton and adjacent regions and its geodynamics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(5): 1791–1810 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wei, Xu Deru, Hou Qaunlin, Li Shuangjian, Meng Lingtong, Ren Zhiheng, Qiu Huabiao, Chu Yang. 2019. Early Cretaceous extensional dome and related polymetallic mineralization in the central and eastern China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 43(3): 409–430 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xiangdong, Ding Zhengjiang, Song Mingchun, Zhou Mingling, Xu Shaohui, Yang Zhenliang, Xie Tianci, Cui Tao, Song Yingxin, Gao Xuekan, Li Ruixiang, Zhang Liangliang, Zhang Qibin, Wang Shanshan, Wang Bin. 2022. Geology and mineralization of the Dayin'gezhuang supergiant gold deposit (180 t) in the Jiaodong Peninsula, China: A review[J]. *China Geology*, 5: 696–721.
- Liu Xuan, Fan Hongrui, Evans N J, Yang Kuifeng, Danišik Martin, McInnes Brent I A, Qin Kezhang, Yu Xuefeng. 2017. Exhumation history of the Sanshandao Au deposit, Jiaodong: Constraints from structural analysis and (U–Th)/He thermochronology[J]. *Scientific Reports*, 7(1): 7787.
- Mao Xiancheng, Ren Jia, Liu Zhankun, Chen Jin, Tang Lei, Deng Hao, Bayless Richard C, Yang Bin, Wang Mijun, Liu Chunming. 2019. Three-dimensional prospectivity modeling of the Jiaojia-type gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China: A case study of the Dayingezhuang deposit[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 203: 27–44.
- Meng Yinsheng, Zhang Ruizhong, Tang Lei, Li Ruihong, Wang Sirui, Hua Bei, Wang Gang. 2022. Integrated geophysical exploration of the hidden gold deposit in Banbidian, Jiaodong Peninsula[J]. *Geological Bulletin of China*, 46(1): 1095–1106 (in Chinese with English abstract).
- Miao Qingjie, Lei Jianshe, He Jing, Du Mofei, Yin Weiwei, Zhang Zhihui, Shi Yuyan. 2021. Pn velocity and anisotropy beneath the Yishu fault zone and surrounding areas[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 64(7): 2324–2335 (in Chinese with English abstract).
- Pan Suzhen, Wang Fuyun, Zheng Yanpeng, Duan Yuling, Liu Lan, Deng Xiaoguo, Song Xianghi, Sun Yinan, Ma Cejun, Li Yiqing. 2015. Crustal velocity structure beneath Jiaodong Peninsula and its tectonic implication[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(9): 3251–3263 (in Chinese with English abstract).
- Song Mingchun, Yi Pihou, Xu Junxiang, Cui Shuxue, Shen Kun, Jiang Hongli, Yuan Wenhua, Wang Huajiang. 2012a. A step metallogenetic model for gold deposits in the northwestern Shandong Peninsula, China[J]. *Science China Earth Science*, 55(6): 940–948.
- Song Mingchun, Wan Guopu, Cao Chunguo, He Chunyan. 2012b. Geophysical-geological interpretation and deep-seated gold deposit prospecting in Sanshandao-Jiaojia area, eastern Shandong Province, China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 86(3): 640–652.
- Song Mingchun, Deng Jun, Yi Pihou, Yang Liqiang, Cun Shuxue, Xu Junxiang, Zhou Mingling, Huang Tailing, Song Guozheng, Song Yingxin. 2014. The kiloton class Jiaojia gold deposit in eastern Shandong Province and its genesis[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 88(3): 801–824.
- Song Mingchun, Li Jie, Li Shiyong, Ding Zhengjiang, Tan Xianfeng, Zhang Zhaolu, Wang Shijin. 2018. Late Mesozoic thermal upwelling-extension structure and its dynamics background in eastern Shandong Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 48(4): 941–964 (in Chinese with English abstract).
- Song Mingchun, Lin Shaoyi, Yang Liqiang, Song Yingxin, Ding Zhengjiang, Li Jie, Li Shiyong, Zhou Mingling. 2020. Metallogenetic model of Jiaodong Peninsula gold deposits[J]. *Mineral Deposits*, 39(2): 215–236 (in Chinese with English abstract).
- Song Mingchun, Zhou Jianbo, Song Yingxin, Wang Bin, Li Shiyong, Li Jie, Wang Shanshan. 2020. Mesozoic Weideshan granitoid suite and its relationship to large-scale gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China[J]. *Geological Journal*, 55: 5703–5724.
- Song Mingchun, Ding Zhengjiang, Zhang Junjin, Song Yingxin, Bo Junwei, Wang Yuqun, Liu Hongbo, Li Shiyong, Li Jie, Li Ruixiang, Wang Bin, Liu Xiangdong, Zhang Liangliang, Dong Leilei, Li Jian, He Chunyan. 2021a. Geology and mineralization of the Sanshandao supergiant gold deposit (1200 t) in the Jiaodong Peninsula, China: A review[J]. *China Geology*, 4(4): 686–719.
- Song Mingchun, Xue Guoqiang, Liu Hongbo, Li Yixin, He Chunyan, Wang Hongjun, Wang Bin, Song Yingxin, Li Shiyong. 2021b. A

- geological-geophysical prospecting model for deep-seated gold deposits in the Jiaodong peninsula, China[J]. *Minerals*, 11(12): 1393.
- Song Mingchun, Ding Zhengjiang, Liu Xiangdong, Li Shiyong, Li Jian, Dong Leilei, Wei Xufeng, Bao Zhongyi, Wang Bin, Zhang Qinbin, Zhang Liangliang, Liu Hongbo, He Chunyan. 2022. Structural controls on the Jiaodong type gold deposits and metallogenic model[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(5): 1774–1802 (in Chinese with English abstract).
- Song Mingchun, Wang Bin, Song Yingxin, Li Jie, Zheng Jifei, Li Shiyong, Fan Jiameng, Yang Zhenliang, He Chunyan, Gao Meixia, Wang Yongqing, Li Ruixiang. 2023. Spatial coupling relationship between faults and gold deposits in the Jiaodong ore concentration area and the effect of thermal doming-extension on mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 153: 105277.
- Sun Huashan, Li Huan, Liu Liu, Chen Qiaomei, Yang Hui, Wu Pan. 2017. Exhumation history of the Jiaodong and its adjacent areas since the Late Cretaceous: Constraints from low temperature thermochronology[J]. *Science China Earth Sciences*, 60(3): 531–545.
- Teng Jiwen, Xue Guoqiang, Song Mingchun. 2022. Theory on exploring mineral resources in the second deep space and practices with electromagnetic method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(10): 3975–3985 (in Chinese with English abstract).
- Wan Guopu. 1994. Geologic-geophysical prospecting model for the gold deposits of crush-zone-altered and rock type in Jiaodong(eastern Shandong)[J]. *Shandong Geology*, 10(2): 41–50 (in Chinese with English abstract).
- Wang Bin, Song Mingchun, Huo Guang, Zhou Mingling, Xu Zhonghua, Jiang Lei, Song Yingxin, Li Jie. 2021. Source characteristics and tectonic evolution of Late Mesozoic granites in Jiaodong and their implications for gold mineralization[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(2): 288–320 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hongjun, Xiong Yuxin. 2020. The application of wide field electromagnetic method to deep exploration in Jiaoxibei (northwest Shandong) gold concentration area[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 44(5): 1039–1047 (in Chinese with English abstract).
- Yang Liqiang, Deng Jun, Wang Zhongliang, Zhang Liang, Guo Linnan, Song Mingchun, Zheng Xiaoli. 2014. Mesozoic gold metallogenic system of the Jiaodong gold province, eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2447–2467 (in Chinese with English abstract).
- Yang Liqiang, Deng Jun, Song Mingchun, Yu Xuefeng, Wang Zhongliang, Li Ruihong, Wang Sirui. 2019. Structure control on formation and localization of giant deposits: An example of Jiaodong gold deposits in China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 43(3): 431–446 (in Chinese with English abstract).
- Yang Qiongyan, Santosh M. 2015. Early Cretaceous magma flare-up and its implications on gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 65(3): 626–642.
- Yang Xian, Zhao Guochun, Song Yubo, Tian Fei, Dong Hanwen, Gao Jianwei. 2011. Characteristics of ore-controlling detachment fault and future prospecting in the Muping-Rushan metallogenic belt, eastern Shandong province[J]. *Geotectonica Et Metallogenia*, 35(3): 339–347 (in Chinese with English abstract).
- Yu Guiping, Xu Tao, Liu Juntong, Ai Shuangyin. 2020. Late Mesozoic extensional structures and gold mineralization in Jiaodong Peninsula, eastern North China Craton: An inspiration from ambient noise tomography on data from a dense seismic array[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(5): 1878–1893 (in Chinese with English abstract).
- Yu Xuefeng, Shan Wei, Xiong Yuxin, Geng Ke, Sun Yuqin, Chi Naijie, Guo Baokui, Li Dapeng, Li Hongkui, Song Yingxin, Yang Deping. 2018. 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[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(5): 1823–1840.
- Yu Xuefeng, Yang Deping, Li Dapeng, Shan Wei, Xiong Yuxin, Chi Naijie, Liu Pengrui, Yu Leiheng. 2019. Mineralization characteristics and geological significance in 3000m depth of Jiaojia gold metallogenic belt, Jiaodong Peninsula[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9): 2893–2910 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Liang, Groves D I, Yang Liqiang, Wang Gongwen, Liu Xiangdong, Li Dapeng, Song Yingxin, Shan Wei, Sun Sichen, Wang Zhaokun. 2020. Relative roles of formation and preservation on gold endowment along the Sanshandao gold belt in the Jiaodong gold province, China: Importance for province- to district-scale gold exploration[J]. *Mineralium Deposita*, 55: 325–344.
- Zhang Pijian, Song Mingchun, Liu Dianhao, Ding Zhengjiang, Hu Peiqiang, Yang Guofu, Wang Haibo. 2015. Features of deep seated gold deposit of No. 171 lode and controlled ore by structures in Linglong gold field, Shandong Peninsula[J]. *Mineral Deposits*, 34(5): 855–873 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qibin, Song Mingchun, Ding Zhengjiang, Guo Meili, Zhou Mingling, Dai Changguo, Huo Guang, Zhang Peng. 2022. Exhumation history and preservation of the Jiaojia giant gold deposit, Jiaodong Peninsula[J]. *Science China Earth Sciences*, 65(6): 1161–1177.
- Zhao Rui, Wang Qingfei, Liu Xuefei, Santosh M. , Yuan Wanming, Wang Wei. 2018. Uplift history of the Jiaodong Peninsula, eastern North China Craton: implications for lithosphere thinning and gold mineralization[J]. *Geological Magazine*, 155(4): 979–991.
- Zheng Yi. 2022. Large-scaled structure-alteration-mineralization mapping of the hydrothermal deposits: Basic principle and precautions[J]. *Earth Science*, 47(10): 3603–3615 (in Chinese with English abstract).

Zhu Rixiang, Chen Ling, Wu Fuyuan, Liu Junlai. 2011. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton[J]. *Science China Earth Sciences*, 54(6): 789–797.

附中文参考文献

- 陈大磊, 王润生, 贺春艳, 王珣, 尹召凯, 于嘉宾. 2022. 综合地球物理探测在深部空间结构中的应用——以胶东金矿集区为例[J]. *物探与化探*, 46(1): 70–77.
- 贺春艳, 王阳, 王洪军, 陈大磊, 刘聪伟, 陈宏杰. 2022a. 基于综合地球物理约束的胶东焦家—三山岛断裂带三维地质建模: 成矿特征与找矿启示[J]. *地质通报*, 46(1): 936–945.
- 贺春艳, 姚铮, 郭国强, 刘洪波, 宋明春, 李世勇, 陈大磊, 刘伟. 2022b. 胶东胶北地体与北鲁鲁造山带深部结构特征——来自地球物理深部探测的启示[J]. *地球物理学进展*, 37(4): 1392–1404.
- 黄鑫, 王勇军, 宋倩, 崔凯, 徐昌, 邵玉宝, 李泗龙, 朱裕振. 2022. 胶东北部大柳行金矿田成矿构造的广域电磁法勘查及对深部找矿的指示[J]. *地质通报*, 46(1): 1107–1220.
- 李宏骥. 2002. 胶北地区内生金矿成矿规律[J]. *山东地质*, 18(3/4): 72–77.
- 李世勇, 李杰, 宋明春, 丁正江, 周明岭, 范家盟, 解天赐, 刘向东, 王斌, 张亮亮, 杨真亮. 2022. 胶东玲珑金矿田成矿特征和成矿作用[J]. *地质学报*, 96(9): 3234–3260.
- 李士先, 刘长春, 安郁宏, 王为聪, 黄太岭, 杨承海. 2007. 胶东金矿地质[M]. 北京: 地质出版社.
- 林少泽, 朱光, 严乐佳, 姜芹芹, 赵田. 2013. 胶东地区玲珑岩基隆升机制探讨[J]. *地质论评*, 59(5): 832–844.
- 林伟, 王军, 刘飞, 冀文斌, 王清晨. 2013. 华北克拉通及邻区晚中生代伸展构造及其动力学背景的讨论[J]. *岩石学报*, 29(5): 1791–1810.
- 林伟, 许德如, 侯泉林, 李双建, 孟令通, 任志恒, 邱华标, 褚杨. 2019. 中国大陆中东部早白垩世伸展穹隆构造与多金属成矿[J]. *大地构造与成矿学*, 43(3): 409–430.
- 孟银生, 张瑞忠, 汤磊, 李瑞红, 王德瑞, 华北, 王刚. 2022. 胶东半壁店隐伏金矿床综合地球物理探测[J]. *地质通报*, 46(1): 1095–1106.
- 苗庆杰, 雷建设, 何静, 杜沫霏, 殷伟伟, 张志慧, 石玉燕. 2021. 沂沭断裂带及周边区域 Pn 波速度结构与各向异性[J]. *地球物理学报*, 64(7): 2334–2335.
- 潘素珍, 王夫运, 郑彦鹏, 段玉玲, 刘兰, 邓晓果, 宋向辉, 孙一男, 马策军, 李怡青. 2015. 胶东半岛地壳速度结构及其构造意义[J]. *地球物理学报*, 58(9): 3251–3263.
- 宋明春, 伊丕厚, 徐军祥, 崔书学, 沈昆, 姜洪利, 袁文花, 王化江. 2012. 胶西北金矿阶梯式成矿模式[J]. *中国科学:地球科学*, 42(7): 992–1000.
- 宋明春, 李杰, 李世勇, 丁正江, 谭现锋, 张照录, 王世进. 2018. 鲁东晚中生代热隆伸展构造及其动力学背景[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 48(4): 941–964.
- 宋明春, 林少一, 杨立强, 宋英昕, 丁正江, 李杰, 李世勇, 周明岭. 2020. 胶东金矿成矿模式[J]. *矿床地质*, 39(2): 215–236.
- 宋明春, 丁正江, 刘向东, 李世勇, 李健, 董磊磊, 魏绪峰, 鲍中义, 王斌, 张琪彬, 张亮亮, 刘洪波, 贺春艳. 2022. 胶东型金矿床控矿构造及成矿模式[J]. *地质学报*, 96(5): 1774–1802.
- 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[J]. *地球物理学报*, 16(10): 3975–3985.
- 万国普. 1994. 胶东破碎带蚀变岩型金矿地质—地球物理找矿模型[J]. *山东地质*, 10(2): 41–50.
- 王斌, 宋明春, 霍光, 周明岭, 徐忠华, 蒋雷, 宋英昕, 李杰. 2021. 胶东晚中生代花岗岩的源区性质与构造环境演化及其对金成矿的启示[J]. *岩石矿物学杂志*, 40(2): 288–320.
- 王洪军, 熊玉新. 2020. 广域电磁法在胶西北金矿集中区深部探测中的应用研究[J]. *物探与化探*, 44(5): 1039–1047.
- 杨立强, 邓军, 王中亮, 张良, 郭林楠, 宋明春, 郑小礼. 2014. 胶东中生代金成矿系统[J]. *岩石学报*, 30(9): 2447–2467.
- 杨立强, 邓军, 宋明春, 于学峰, 王中亮, 李瑞红, 王德瑞. 2019. 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*, 43(3): 431–446.
- 杨喜安, 赵国春, 宋玉波, 田飞, 董汉文, 高建伟. 2011. 胶东牟平—乳山成矿带拆离断层控矿特征及找矿方向[J]. *大地构造与成矿学*, 35(3): 339–347.
- 俞贵平, 徐涛, 刘俊彤, 艾印双. 2020. 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*, 63(5): 1878–1893.
- 于学峰, 杨德平, 李大鹏, 单伟, 熊玉新, 迟乃杰, 刘鹏瑞, 于雷亨. 2019. 胶东焦家金矿带 3000m 深部成矿特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 35(9): 2893–2910.
- 张丕建, 宋明春, 刘殿浩, 丁正江, 胡培强, 杨国富, 王海波. 2015. 胶东玲珑金矿田 171 号脉深部金矿床特征及构造控矿作用[J]. *矿床地质*, 34(5): 855–873.
- 郑义. 2022. 热液矿床超大比例尺构造-蚀变-矿化填图: 基本原理与注意事项[J]. *地球科学*, 47(10): 3603–3615.