

doi: 10.12029/gc20220101

宋明春, 宋英昕, 李杰, 曹春国, 丁正江, 刘晓, 周明岭, 李世勇. 2022. 深部矿阶梯找矿方法: 以胶东金矿集区深部找矿为例[J]. 中国地质, 49(1): 1-15.

Song Mingchun, Song Yingxin, Li Jie, Cao Chunguo, Ding Zhengjiang, Liu Xiao, Zhou Mingling, Li Shiyong. 2022. Stepwise prospecting method for deep-seated deposits: Take deep prospecting of ore concentration area of gold in Jiaodong Peninsula, China as an example[J]. Geology in China, 49(1): 1-15(in Chinese with English abstract).

深部矿阶梯找矿方法: 以胶东金矿集区深部找矿为例

宋明春¹, 宋英昕², 李杰³, 曹春国⁴, 丁正江¹, 刘晓⁵, 周明岭¹, 李世勇⁴

(1. 山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队, 山东 威海 264209; 2. 山东省地质科学研究院, 山东 济南 250013; 3. 河北地质大学河北省战略性关键矿产资源重点实验室, 河北 石家庄 050031; 4. 山东省物化探勘查院, 山东 济南 250013; 5. 山东理工大学资源与环境工程学院, 山东 淄博 255000)

摘要:【研究目的】胶东是中国率先开展深部找矿并取得重大突破的地区, 阶梯找矿方法在深部勘查中发挥了重要作用, 研究深部找矿方法, 有利于推动为中国“攻深找盲”找矿战略实施。【研究方法】本文基于胶东深部金矿找矿工作, 研究了深部金矿成矿模式, 分析了可控源音频大地电磁测深(CSAMT)、频谱激电测量(SIP)、大地电磁测深(MT)和反射地震等方法在深部找矿中的作用和效果。【研究结果】深部矿体常赋存于控矿断裂沿倾向的倾角变缓段, 构成阶梯成矿模式, 这一模式是地质构造作用与成矿物理化学条件等多种因素耦合的结果。深部矿阶梯找矿方法的要点是: 在地表通过高精度地球物理探测, 查明控矿断裂的深部结构和倾角变化, 根据阶梯成矿模式预测深部矿的位置、规模。【结论】阶梯成矿模式为深部找矿提供了核心技术前提和可以识别的探测目标, CSAMT、SIP、MT 和反射地震等方法能够探测控矿断裂的深部特征, 多种地球物理方法组合是阶梯找矿方法的有效技术手段。

关键词: 阶梯找矿方法; 深部金矿; 缓倾角断裂控矿; 地球物理方法; 矿产勘查工程; 金矿集区; 胶东半岛; 山东省
创新点: 采用高精度地球物理方法探测控矿断裂的深部结构和倾角变化, 依据阶梯成矿模式预测深部矿的位置、规模。

中图分类号: P618.51 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)01-0001-15

Stepwise prospecting method for deep-seated deposits: Take deep prospecting of ore concentration area of gold in Jiaodong Peninsula, China as an example

SONG Mingchun¹, SONG Yingxin², LI Jie³, CAO Chunguo⁴, DING Zhengjiang¹, LIU Xiao⁵,
ZHOU Mingling¹, LI Shiyong⁴

(1. Shandong Provincial No.6 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Weihai 264209, Shandong, China; 2. Institute of Geological Sciences of Shandong Province, Jinan 250013, Shandong, China; 3. Hebei Key Laboratory of Strategic Critical Mineral Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 4. Shandong Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Jinan 250013, Shandong, China; 5. College of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong, China)

收稿日期: 2019-10-09; 改回日期: 2020-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(NSFC-山东联合基金, U2006201, 胶东深部金矿断裂控矿机理)、山东省重点研发计划(2019RKB48002, 2017CXGC1604)和山东省泰山学者建设工程专项经费(ts201511076)联合资助。

作者简介: 宋明春, 男, 1963年生, 研究员, 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。

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

[Objective] Jiaodong Peninsula is the first region to carry out deep-seated prospecting and made significant prospecting achievements in China. Stepwise prospecting method has played an important role in the deep-seated exploration. The study of deep-seated prospecting methods will be conducive to promoting the implementation of the prospecting strategy of “prospecting deep-seated deposits” in East China. **[Methods]** In this paper, based on the deep-seated gold deposits prospecting in Jiaodong, we studied the metallogenic model of deep gold deposits, and analyzed the role and effect of controlled source audio frequency magnetotelluric sounding (CSAMT), spectral excited electric sounding (SIP), magnetotelluric sounding (MT) and reflection seismic methods in deep gold deposits prospecting. **[Results]** Deep orebodies generally occur in the gently dipping parts of alternate change of steep-dipping to gentle-dipping of the ore-controlling fault, forming a step metallogenic model. This metallogenic model is a comprehensive reflection of tectonic activities and physicochemical conditions of mineralization. The technical process of the stepwise prospecting method is outlined below. First, through high precision geophysical detection in land surface, deep characteristics of ore-controlling fault are found out. Then, according to the step metallogenic model, the location and scale of the deep-seated gold orebodies are predicted. **[Conclusions]** The step metallogenic model provides a technical premise and key exploration target for the deep-seated gold deposits prospecting. CSAMT, SIP, MT and reflection seismic methods can detect the deep characteristics of ore-controlling faults. The combination of multiple geophysical methods is an effective technical means of the stepwise prospecting method.

Key words: stepwise prospecting method; deep-seated gold deposit; gently dipping fault of ore controlling; geophysical method; mineral exploration engineering; ore concentration area of gold; Jiaodong Peninsula; Shandong province

Highlights: The deep structure and variety of ore-controlling fault dipping angle are detected by high precision geophysical method, and the location and scale of deep-seated orebodies are predicted according to the step metallogenic model.

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

Fund Support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No.U2006201, The mechanism of structural ore-controlling of the deep-seated gold deposits in Jiaodong Peninsula), key research and development program of Shandong Province (No.2019RKB48002, No.2017CXGC1604) and construction project special funding of Taishan scholars of Shandong Province (No. ts201511076).

1 引 言

随着经济社会快速发展对矿产资源需求的不断增高,地下矿产资源被大量开发,导致地表矿、浅部矿(500 m深度以浅)愈来愈少,供需矛盾日益突出,重要矿产资源短缺成为制约中国经济可持续发展的客观因素之一。为了缓解矿产资源紧张局势,提高资源保障能力,找矿向深部“第二空间”(500~2000 m深度)进军已成为中国矿产资源勘查的重要方向。然而,由于深部矿埋藏深度大、在地表显示的信息弱,常规的地表地质勘查、物探、化探和遥感等技术方法难以获取深部的矿化信息,亟待发展高精度、深穿透的深部探测技术方法。深部找矿的难点在于如何突破浅部矿自然尖灭后的无矿间隔段(或弱矿化段),这就需要深入研究深部成矿规律和控矿因素,探索新的找矿方法。为了突破深部探测

技术瓶颈,国家已将地球深部探测列入“科技创新2030重大项目”,并在国家重点研发计划中设置了“深地资源勘查开采”重点专项。

胶东地区金矿资源丰富(王成辉等,2012),是中国率先开展深部找矿并取得重大突破的地区。20世纪末,山东省地质工作者开始围绕胶东西北部的三山岛、焦家、招平3条主要成矿带实施地质调查工程,开展探索性深部找矿工作,分别在焦家金矿床深部和台上金矿床深部发现了金矿体。21世纪初,首先在莱州市寺庄金矿深部实现了中国攻深找盲的重大突破,2002—2006年完成的莱州寺庄矿区深部金矿勘查,在孔深625.16~1015.26 m范围内探获金资源储量51.83 t,证实了胶东主要金矿带深部存在第二矿化富集带。此后,相继在焦家、马塘等浅部金矿之下穿过150~200 m垂直间隔的无矿段或弱矿化段之后探明了新的深部特大型金矿。随之,

胶东深部找矿连续取得重大突破,新发现中型及以上金矿40多处,新增金资源储量3000余吨。并且发现在三山岛和焦家地区的多个以往认为独立分布的浅部金矿床向深部连为一体成为同一个矿床,二者资源储量均超过1000 t,成为中国仅有的2个千吨级超巨型金矿床(宋明春等,2019),实现了中国金矿找矿的历史性突破。胶东深部找矿的重大突破是经验找矿、理论找矿和高技术找矿有机结合的结果,即根据大量实践经验选择已知成矿断裂带深部延深位置为找矿靶区,通过总结成矿规律确定深部最佳赋矿空间,采用新的技术方法探明深部矿体(宋明春,2015)。其中,阶梯找矿方法的建立和应用是突破胶东深部找矿瓶颈的关键技术。本文在分析阶梯找矿方法的实施流程、关键技术、实施条件基础上讨论了阶梯成矿的原理及方法的适用性,以期深化深部找矿方法研究,为推动中国东部地区“攻深找盲”找矿战略提供有效的技术方法。

2 金矿找矿方法概况

2.1 浅、表部找矿方法

胶东地区浅表部矿找矿除了地质方法外,常规地球物理和地球化学方法也发挥了很大作用。地质方法主要是根据成矿规律和找矿标志等圈定找矿靶区或直接发现矿体,这些规律和标志主要有:多级断裂构造控矿规律,以黄铁绢英岩和石英脉为特征的矿化蚀变及蚀变分带标志,矿床空间展布、近等间距分布规律,矿床共生和矿床类型分带规律,矿体侧伏、尖灭再现、排列规律等(李士先等,2007;杨立强等,2014;Song et al., 2014)。

地球物理方法中电法勘探是胶东金矿找矿最常用的方法,其中电阻率法主要用于寻找和追索高阻的石英脉型矿体,激发极化法则主要用于识别极化率2%~5%的富含硫化物的蚀变岩型矿体。由于胶东破碎带蚀变岩型金矿受较大规模区域性断裂控制,控矿断裂的上、下盘分别是早前寒武纪变质岩系和晚中生代花岗岩,二者有较大的磁性差异,因此磁法勘探有时也用于探测蚀变岩型金矿。在前人总结的胶西北破碎带蚀变岩型金矿地质-地球物理找矿模型中,将矿体的识别标志总结为:高极化、中高密度、中高磁性、有限延伸倾斜板状中高电阻体(万国普,1994)。重力勘探主要是用于研究

区域地质构造,确定断层位置及规模,指导找矿。胶东破碎带蚀变岩型金矿成矿预测中将“‘舌状’不规则重力梯级带”作为重要的地球物理找矿预测要素(李士先等,2007)。

在胶东金矿找矿中实施的地球化学勘查方法包括次生晕地球化学测量和原生晕地球化学测量。胶东地区的次生晕地球化学测量已系统完成了1:20万和1:5万水系沉积物测量,部分地区开展了1:1万土壤测量,次生晕地球化学测量在区域成矿预测、靶区选择中发挥了重要作用。原生晕地球化学测量,已开展了部分地区的1:5万基岩化探测量和部分矿区的1:1万、1:5000基岩化探及化探剖面测量,为普查工作勘查工程布置提供了依据。研究表明,胶东地区金矿化指示元素主要有: Au、Ag、As、Cu、Pb、Zn、Sb、Bi、Hg、Mo等,10种元素分带性明显,原生晕水平分带内带为 Au、Ag、As、Bi,表现为 Au、Ag、As、Bi 的强正异常和 Cu、Pb、Zn 的弱正异常;中带为 Cu、Pb、Zn 的强正异常, Au、Ag、As、Bi 弱异常;外带为 Hg、Mo 的正异常及 Au、Ag、Bi 的弱异常(李惠和张文华,1999;李士先等,2007)。利用原生晕分带规律可以圈定找矿靶区。

2.2 深部找矿方法

深部找矿地质方法的基础是深部成矿规律,其中断裂构造阶梯赋矿规律是胶东深部找矿的关键地质依据。这一规律的要点是:赋矿断裂向深部延伸其倾角呈现陡、缓转折交替变化,深部金矿体主要赋存于断裂倾角的较缓部位(宋明春等,2012)。根据这一规律,可以有效预测深部矿体赋存位置。

采用大极距和小极距激电中梯、大极距激电测深,通过二阶差分、剩余极化率异常和反演解释等一系列处理,电法勘探对500 m左右深度的金矿体仍有明显的找矿效果。可控源音频大地电磁(CSAMT)和大地电磁法(MT)是胶东深部找矿常用的地球物理方法,这二种方法主要是基于胶东控矿断裂上下盘岩石组成不同、电磁性差异大的特点,探测断裂构造向深部延深的位置及产状变化特征,再根据地地质规律预测赋矿位置。频谱激电测深(SIP)法,是在超低频段做多频视电阻率测量,通过研究负电阻率频谱特征,解决地质问题。这种方法主要是利用控矿断裂上盘变质岩的低电阻率和极化率、下盘的花岗岩高阻中等

极化率,以及断裂破碎带和蚀变岩极化率高的特征(差异),通过多参数组合解释,从不同角度研究电化学场特征,提高寻找深部矿能力(曹春国等,2016)。近年来深反射地震方法应用于金属矿的深部找矿取得一系列重大突破和重要成果,特别是长江中下游成矿带的三维精细结构及成矿系统多尺度探测,为开辟第二找矿空间提供了有效支撑(吕庆田等,2010,2015,2019)。在胶东地区开展的深反射地震探测表明,地震方法对确定断裂构造的深部特征效果明显(Yu et al., 2018)。

构造地球化学方法是通过分析构造中的成矿指示元素的地球化学晕来推测深部隐伏矿化情况,由于构造作用与地球化学作用是成矿中和成矿后重要的动力学过程,所以构造地球化学在隐伏矿床的地球化学信息探测方面能发挥重要作用。目前主要是利用成矿成晕的断裂构造地球化学规律来找矿,通过分析成晕构造中的构造岩,捕捉深部隐伏矿体在地表或浅部引起的微弱的地球化学异常。构造地球化学方法找矿的基础理论,是热液矿床原生晕轴(垂)向分带,根据每种矿体的前缘晕、近矿晕和尾晕,前缘晕在矿体前缘可达100~300 m,为找盲矿提供了重要信息(李惠等,2010)。由于金矿具有多阶段脉动叠加成矿成晕的特点,因此发展出原生叠加晕找矿法,即根据金矿成矿成晕具有多阶段脉动性及不同阶段形成矿体(晕)在空间上叠加的特点寻找盲矿。方法原理是:热液矿床严格受构造控制,构造中矿体的原生晕发育特点是在构造带内强度高、范围大,特别是前缘晕在矿体的前缘可达几百米(李惠等,2010)。另外,近年来研究者在胶东深部金矿开展了多维异常体系找矿研究,发现构造蚀变带中 Na_2O 、Ba、Sr含量低于正常花岗岩,出现明显贫化,成为控矿构造蚀变带的地球化学标志(马生明等,2019)。

3 深部阶梯找矿方法及地质前提

3.1 深部阶梯找矿方法

“跟着构造走、围着异常转”是胶东地区浅表部金矿找矿的传统方法,即采用常规的地球物理和地球化学手段获取地表或浅部相关数据、圈定异常,然后再围绕着异常和有利成矿构造进行普查找矿。但是,深部矿埋藏深度大、地表信息弱、找矿线索少,采用传统的技术方法在地表很难探测到深部矿的信息,不能有效圈定深部矿化异常。21世纪以来,地质工作者不断创新深部找矿方法,不断加大胶东金矿的找矿深度,深部找矿成效显著,目前已在500~2000 m深度探明金资源储量3000余吨(宋明春等,2019),在焦家断裂带深部施工的3266.06 m深度的钻孔于近3000 m深度发现了金矿体(于学峰等,2019),在三山岛断裂带深部施工的4006.17 m深度钻孔为国内岩金勘查最深钻孔(陈玉民等,2016)。笔者等在胶东地区开展深部找矿实践中,基于金矿受倾角波状起伏的断裂构造控制的客观事实,突破用时间域直流电法直接圈定矿化异常的传统找矿思路束缚,提出了用频率域电磁法探测赋矿构造倾角变化的台阶的深部阶梯找矿新方法(Song et al., 2012;宋明春等,2017)。这一方法的核心是在地表通过高精度地球物理探测,查明控矿断裂向深部的结构变化,根据阶梯成矿模式预测深部矿的位置、规模,具体实施流程是(图1):

(1)在综合分析各种找矿信息基础上,筛选赋矿断裂的深部有利区域作为深部找矿靶区;

(2)在选定的深部找矿靶区内,按照合理的测线间距和适宜的测线方向,选用先进的仪器设备开展高精度地球物理探测;

(3)对获取的地球物理数据进行计算机处理,形成各种物探图件;

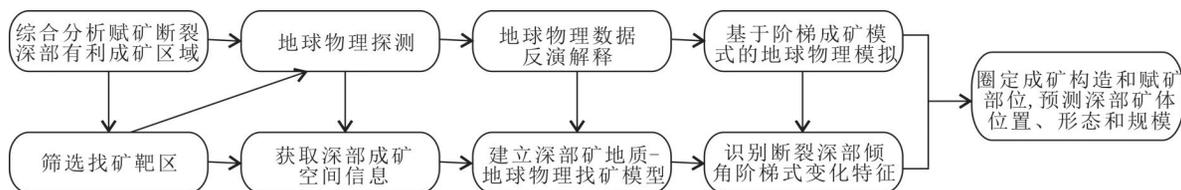


图1 深部阶梯找矿方法流程图

Fig.1 Flow chart of stepwise prospecting method for deep-seated deposits

(4)通过地球物理资料详细反演、解释,获取深部成矿空间的物性参数、空间结构、异常分布等信息,刻画断裂构造的深部变化;

(5)通过与已知浅部矿、控矿构造对比,反演模拟,建立深部矿地质-地球物理找矿模型;

(6)根据深部矿阶梯成矿模式和地质-地球物理找矿模型,判别控矿断裂倾角阶梯变化部位,识别成矿构造和赋矿部位,预测深部矿体位置、形态和规模。

3.2 深部矿阶梯成矿模式

胶东金矿有多种矿化类型,其中主要为破碎带蚀变岩型和石英脉型,深部找矿突破则集中于破碎带蚀变岩型金矿。大量找矿实践发现,胶东破碎带蚀变岩型金矿的矿体由浅部至深部一般不是连续出现的,而是断续性分布,构成阶梯式产出特点,具体表现为以下几方面:

(1)由浅部至深部矿化不连续富集,形成多重成矿空间;

(2)控矿断裂沿倾斜方向倾角陡、缓交替变化,具有台阶式特征;

(3)厚大矿体往往沿断裂构造的缓倾角段和陡、缓转折部位分布;

(4)在同一成矿区域相邻2个成矿台阶之间的无矿段的垂直距离限于一定的范围内。

蚀变岩型金矿的这些分布特征是深部矿体产出的自然规律,总体显示了由浅部至深部矿体呈阶梯式分布特征,称之为深部矿阶梯成矿模式(宋明春等,2012)。研究发现,石英脉型金矿的赋矿构造

部位与蚀变岩型金矿恰恰相反,矿床主要受倾角较陡的断裂控制,陡倾断裂的倾角相对陡的部分为断裂扩容带,是石英脉充填的有利区段,厚大金矿体主要赋存于断裂倾角的较陡部分,即在倾角阶梯式变化的断裂的陡倾角部位赋矿(图2)。不同控矿断裂带或矿区,赋矿台阶的规模、间隔距离、倾角等有较大差异,如三山岛北部海域矿区浅部台阶与深部台阶的垂直距离在400 m左右(宋明春等,2015),而焦家矿区浅、深部台阶的垂直距离为150~550 m(宋明春等,2012)。大的赋矿台阶中常常出现倾角略有变化的次级赋矿台阶,次级台阶倾角偏陡的部分矿体厚度较薄、矿化较差。阶梯成矿模式为深部找矿提供了核心技术前提和可以识别的探测目标。

3.3 阶梯成矿模式实例

阶梯成矿模式最早发现和建立于胶东西北部焦家断裂成矿带的深部找矿实践中,之后被大量深部找矿成果予以证实。其中,位于三山岛断裂带北段的三山岛北部海域金矿床是一个从浅部至深部一体勘查的矿区,展示了典型的阶梯成矿特征。该矿床位于海域20 m水深以浅的滨浅海区,累计探明金资源储量超过400 t,是中国一次性探明的最大规模金矿区。矿床受三山岛断裂带控制,矿区内钻探工程控制的三山岛断裂带长度4420 m,最大倾斜延深2156 m,走向35°左右,倾向南东。断裂倾角沿倾向总体表现为浅部较陡、深部较缓的铲式断层特征,且呈现倾角陡、缓交替变化特点,形成阶梯式断层。-400 m标高以上段断裂倾角40°左右;-400~-1000 m标高段倾角75°~85°,-1000 m标高以下

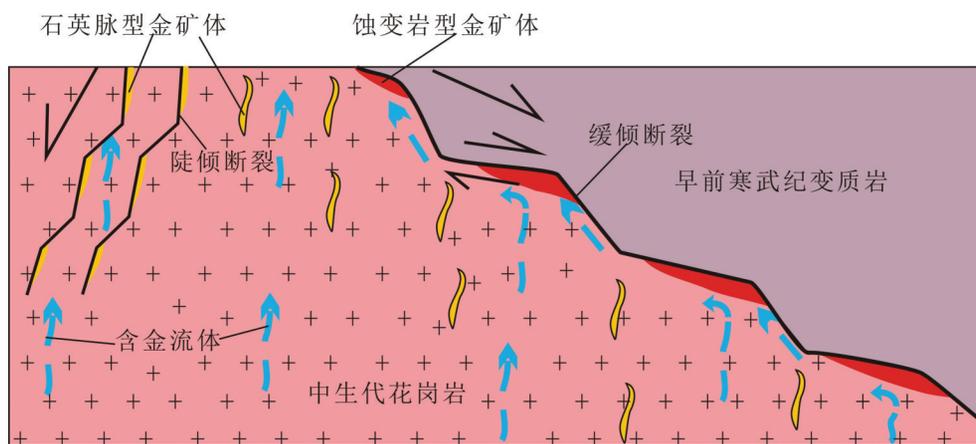


图2 深部金矿的阶梯成矿模式(据宋明春等,2020)

Fig.2 A step metallogenetic model of deep-seated gold deposit (after Song Mingchun et al., 2020)

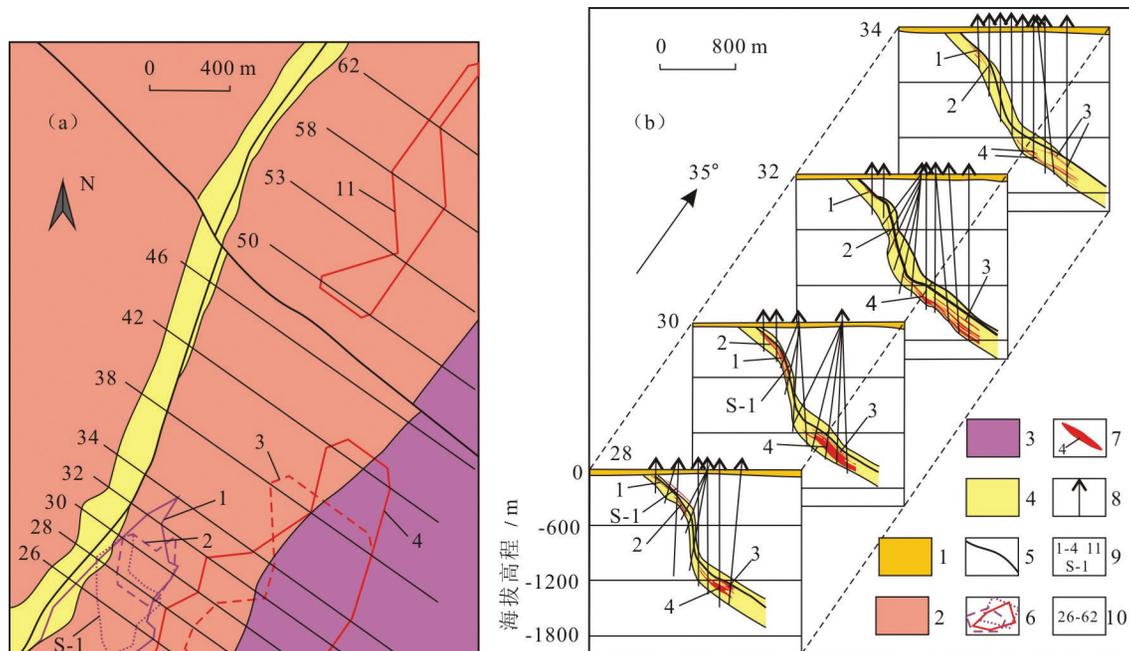


图3 胶东三山岛北部海域超大型金矿床基岩地质图(a)及勘探线联合剖面图(b)(据宋明春等, 2015)
1—第四系; 2—玲珑型花岗岩; 3—新太古代变质岩系; 4—破碎蚀变带; 5—断裂; 6—主要矿体水平投影范围; 7—金矿体; 8—钻孔位置; 9—矿体编号; 10—勘探线编号

Fig.3 The bedrock geological map (a) and joint geological sections along exploratory lines (b) for the supergiant gold deposit in offshore of northern Sanshandao, Jiaodong Peninsula (after Song Mingchun et al., 2015)

1—Quaternary; 2—Linglong-type granite; 3—Neoproterozoic metamorphic complex; 4—Structural alteration zone; 5—Fault; 6—Position of horizontal projection of gold orebodies; 7—Gold orebody; 8—Position of drill bore; 9—Number of orebodies; 10—Number of exploratory lines

倾角 $35^{\circ} \sim 43^{\circ}$, 构成上、下部缓, 中间陡的反S型或台阶式特征(图3)。这一金矿床的浅部矿体和深部矿体不连续分布, 构成2个矿体群。浅部矿体群赋存于 -600 m标高以浅的断裂区域, 矿体倾角 $23^{\circ} \sim 62^{\circ}$, 平均 40° , 赋矿位置与断裂构造的第一个缓倾角台阶大致吻合; 深部矿体群赋存于 -1000 m标高以下的断裂构造的第二个缓倾角台阶中, 矿体倾角 $16^{\circ} \sim 51^{\circ}$, 平均 40° 。第一、第二台阶之间的陡倾角矿化薄弱和无矿地段(断坡段)的垂直距离为 400 m左右(宋明春等, 2015)。可见, 受三山岛断裂带控制的金矿床, 倾角较缓的断坪段是有利赋矿部位, 而倾角较陡的断坡段则不利于成矿。

位于焦家断裂带中段的焦家矿区是一个浅部与深部分别勘查的矿床, 浅部矿床勘查完成后, 地质人员于21世纪初施工了数个 $500 \sim 700$ m深度的较深钻孔, 找矿效果不理想。其后, 根据阶梯式成矿规律, 地质人员大胆越过矿化薄弱段, 施工 ≥ 1000 m深部的钻孔, 发现并探明了深部大规模矿体。勘查结果表明, 矿床沿焦家断裂呈现2个大的

赋矿台阶, 位于地表至垂深 $350 \sim 500$ m的浅部金主矿体构成浅部赋矿台阶, 位于垂深 $450 \sim 900$ m以下的深部主矿体为深部赋矿台阶, 浅、深部赋矿台阶之间由垂直距离 $150 \sim 550$ m的弱矿化带连接。弱矿化带金品位 $1 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$, 浅部台阶矿体平均金品位 6.18×10^{-6} , 深部台阶矿体平均金品位 3.74×10^{-6} 。在弱矿化带, 除矿石金品位明显降低外, 矿体长度变短, 矿体厚度明显减薄, 矿体分支复合、膨胀夹缩变化明显(宋明春等, 2012)。

此外, 其他地区矿床也有阶梯式赋矿规律, 如山东鲁西归来庄金矿。归来庄金矿是山东省鲁西地区唯一的一个大型金矿, 为赋存于断裂带中的隐爆角砾岩型金矿。赋矿断裂出露长度 2200 m, 走向 85° , 倾向S。断裂倾角随倾向向深部逐渐变缓, 据钻探工程控制 -100 m标高以浅断裂倾角 $45^{\circ} \sim 68^{\circ}$, 平均 48° ; $-100 \sim -350$ m标高, 倾角变陡, 平均 62° ; 在 $-350 \sim -580$ m标高, 倾角变缓, 平均 44° ; 在 $-580 \sim -702$ m标高, 倾角更缓, 一般为 $8^{\circ} \sim 11^{\circ}$ (张国权, 2017), 平均 9° 。金矿体分布于 -300 m标高以

浅区域和-540~-665 m标高区域,构成阶梯式赋矿特征。浅部矿体长度550 m,斜深650 m,矿体沿走向及倾向呈舒缓波状延展,产状与控矿断裂基本一致,自上而下倾角有变缓的趋势。矿体厚度一般为2~15 m,平均厚度6.12 m。深部矿体埋深674~825 m,最大走向长450 m,斜深220 m,倾角 11° ~ 42° ,矿体产状与深部控矿断裂一致,矿体平均厚度14.76~18.95 m(张国权,2017)(图4)。可见,在归来庄金矿床中,赋存浅部矿体和深部矿体的断裂段的平均倾角均缓于二者之间的无矿断裂段,说明断裂倾角较缓的断坡段有利于成矿。江西朱溪钨(铜)矿床也存在阶梯式赋矿现象,该矿床为受逆冲推覆构造控制的含矿热液沿断裂和不整合复合界面充填而形成的矽卡岩型矿床。矿床浅部以铜矿体为主,向深部逐渐出现较多钨矿体,厚大矿体赋存在倾角较缓的构造位置。矿区在空间上形成张家坞—毛家园和塔前—朱溪上下两个成矿台阶,下成矿台阶已探明朱溪巨大钨铜矿床(欧阳永棚等,2019)。在32号勘查线,浅部倾角较缓的构造位置赋存铜矿体;而深部倾角更缓的构造位置出现厚大的钨矿体,其中

ZK3208 钻孔白钨矿体似厚度达218.10 m(王先广等,2014);而在-400~-600 m深度的断裂倾角较陡的断坡位置矿体薄且零散。另外,有研究表明,江西乐平花亭锰矿和江西永平铜矿也都有阶梯式赋矿特征(朱训,2014)。

上述实例说明,阶梯式成矿是受区域性缓倾断裂控制的热液矿床的普遍规律,这种规律成为深部找矿的地质前提。

4 深部阶梯找矿的地球物理技术

由于胶东破碎带蚀变岩型金矿的控矿断裂规模大,且多发育在早前寒武纪变质岩系与晚中生代花岗岩的接触界面附近,二者物性差异明显。因此,实际工作中阶梯找矿方法的主要技术是,采用频率域电磁法探测断裂构造向深部的延伸,确定断裂倾角的变化,根据阶梯成矿模式圈出深部找矿靶区。

4.1 可控源音频大地电磁测深(CSAMT)

通过人工控制的场源做频率测深,根据同一剖面上不同测深点和不同极距的视电阻率值绘制等值线断面图,从断面图上可以大致判别不同电性岩

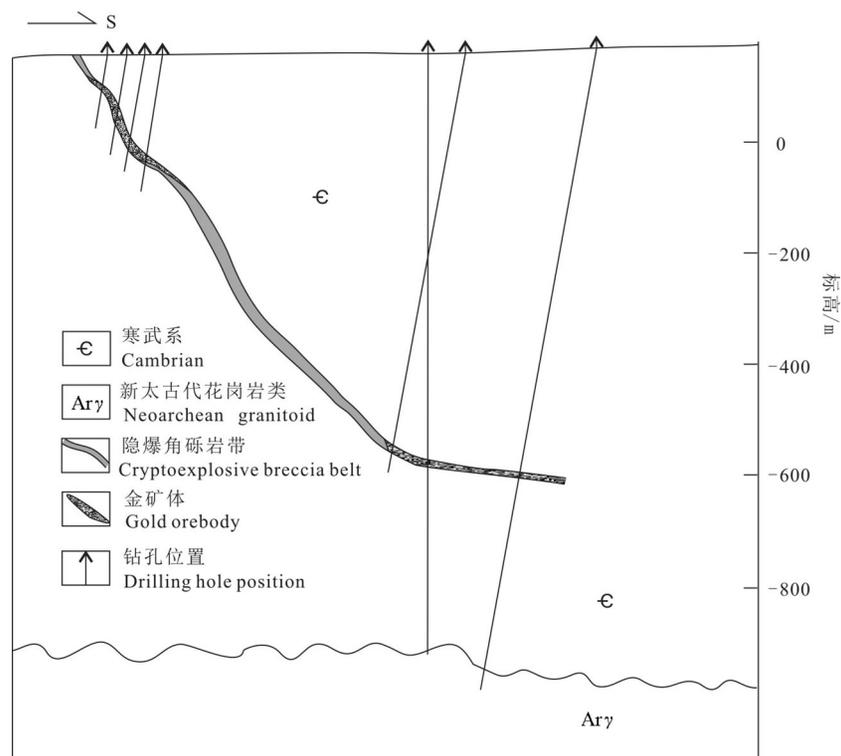


图4 鲁西归来庄金矿床28号勘查线剖面图(据张国权,2017)

Fig.4 Geological sections along No. 28 exploratory line at Guilaizhuang gold deposit, Shandong Province(after Zhang Guoqun et al., 2017)

层的接触面、产状及厚度等。在胶西北主要成矿带上开展的大量CSAMT法勘探揭示,在视电阻率断面等值线图上,由低到高的过渡梯级带为控矿断裂带分布位置,梯级带呈舒缓波状特征,梯级带上梯度变化最大的部位为断裂带主裂面下界面。视电阻率等值线同步向下弯曲、间距变大及由陡变缓部位为成矿有利部位。例如:在寺庄矿区360勘查线,视电阻率梯级带反映了焦家断裂向深部的延深特征,在视电阻率等值线同步向下弯曲的区段推测为断裂倾角变缓的部位,是有利成矿区域,据此预测了深部矿体(图5),经后期的深部钻探得到验证。

4.2 频谱激电测量(SIP)

采用超低频段作多频视复电阻率测量,分析其复电阻率的频谱特性,反映地电构造沿剖面 and 随深度的变化。通过改变隔离系数可判别深部金属硫化物赋存位置、断裂构造带及矿体与金属硫化物的关系。利用频谱反演可以得到复电阻率、充电率、时间常数和相关系数4个激电频谱参数,从不同角

度反映地下异常地质体的导电和电极化性质。例如:沿胶东纱岭矿区320勘查线的SIP测量结果显示,在复电阻率参数断面等值线图上,控矿断裂带表现为定向延深的条带串珠状低阻带,复电阻率值越低反映断裂带矿化蚀变程度愈强烈,等值线弯曲、低阻带局部膨大部位为成矿有利部位。在充电率参数断面等值线上,断裂带反映为定向延深的条带串珠状高值异常带,在矿体头部高值异常呈“八”字型特征,在一定范围内充电率值越高其矿化蚀变程度越强。在时间常数断面等值线上,控矿断裂带反映为条带串珠状高值异常带。在频率相关系数参数断面等值线上,控矿断裂带反映为低值条带状异常特征(图6)。

4.3 大地电磁测深(MT)

以天然电磁场为场源探测地球内部电性结构,通过在地表测量由高频至低频的地球电磁响应序列,获取大地由浅至深的电性结构,从而推断断裂、地质体、地质界面等。

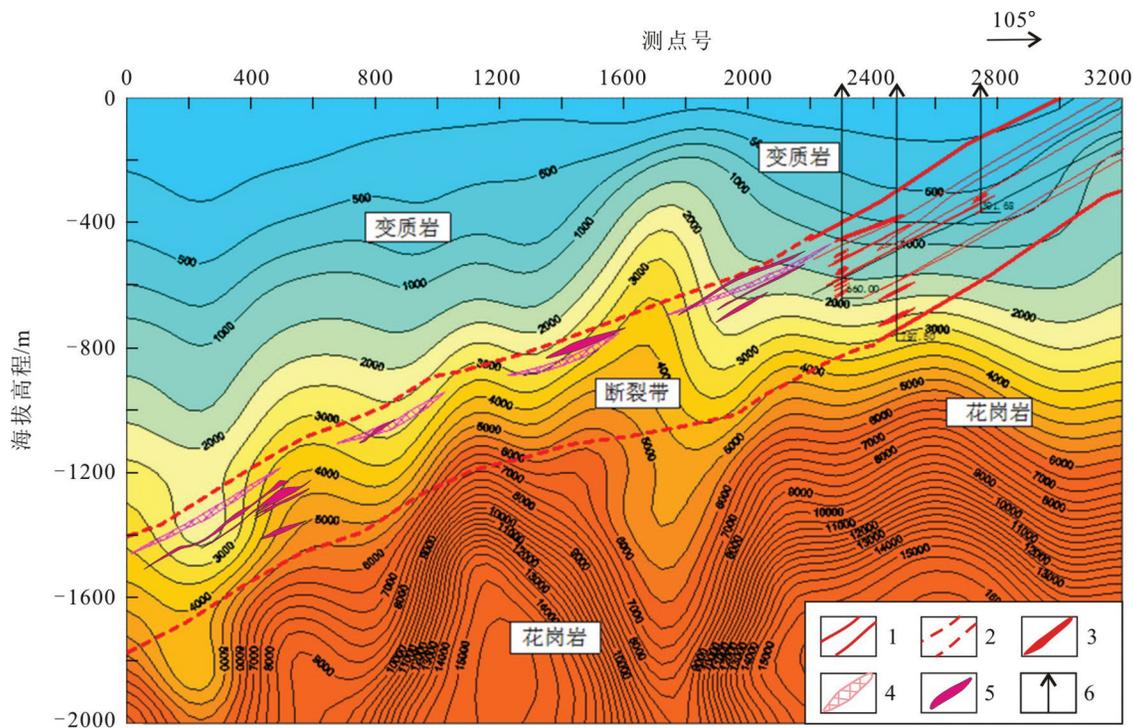


图5 胶东寺庄矿区360线CSAMT法推断解释地质剖面

1—已控制断裂蚀变带;2—推断断裂蚀变带;3—已控制金矿体;4—预测深部金矿体;5—已验证的深部金矿体;6—钻孔位置
Fig.5 CSAMT inverted apparent resistivity geological section along No.360 exploratory line at Sizhuang gold deposit, Jiaodong Peninsula

1— Actual fracture and alteration zone; 2— Inferred fracture and alteration zone; 3— Actual gold orebody; 4— Predicted gold orebody; 5— Validated deep-seated gold orebody; 6— Drilling hole positions

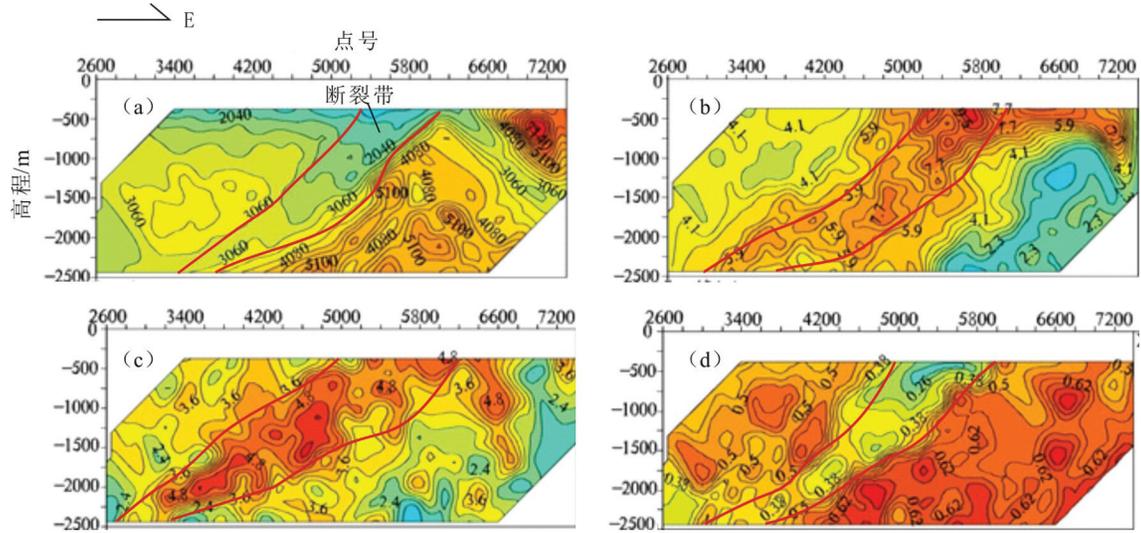


图6 胶东纱岭矿区320勘查线SIP剖面图

a—视电阻率等值线;b—视充电率等值线;c—时间常数等值线;d—频率相关系数等值线

Fig.6 SIP sections of apparent resistivity(a), apparent charging rate (b) along No.320 exploratory line at Shaling gold deposit, Jiaodong Peninsula

穿越胶西北三山岛和焦家断裂的MT剖面,较好地揭示了深部电性结构和断裂构造的深部特征。按照电性特征,剖面在垂向上总体可分为上部低阻层和底部高阻层,电阻率自上而下呈逐步增高

的变化特征。高阻电性层与低阻电性层之间具有较明显的过渡梯级带。推断低阻电性层为第四系及变质岩系,高阻电性层为玲珑花岗岩的反映(图7)。

三山岛断裂(F1),为向南东倾斜的高、低阻接

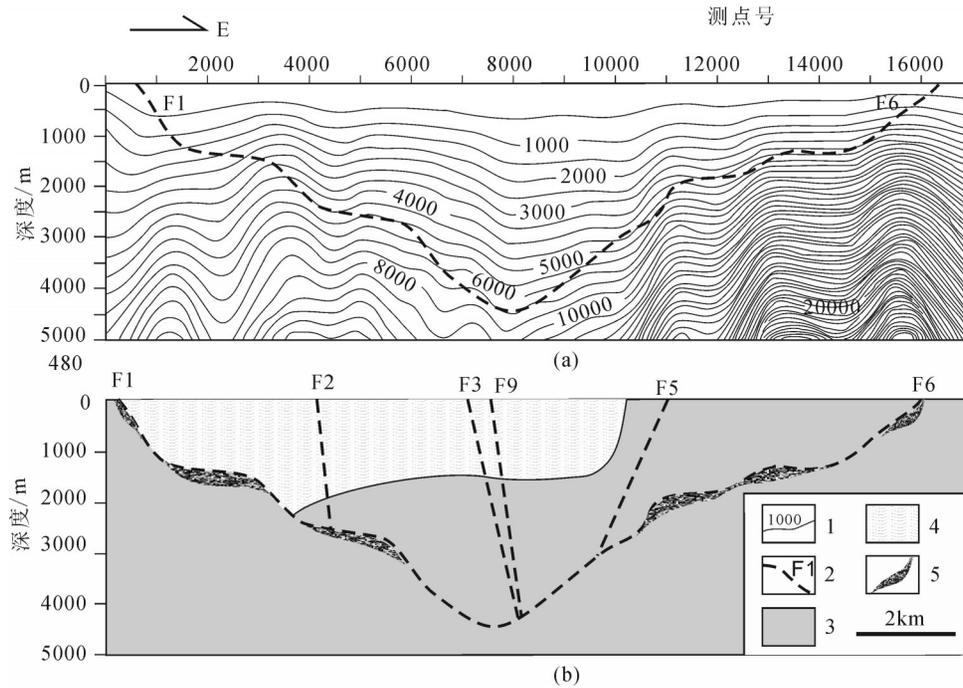


图7 胶东三山岛断裂—焦家断裂大地电磁测深剖面(a)及推断解释地质剖面(b)(据 Song Mingchun et al., 2021)

1—电阻率等值线;2—推断断裂;3—侏罗纪花岗岩;4—早前寒武纪变质岩;5—有利赋矿位置(金矿体)

Fig.7 MT inverted apparent resistivity profile (a) and inferred geological section through inversion and calculation (b) in area of Sanshandao - Jiaojia fault, Jiaodong Peninsula(after Song Mingchun et al., 2021)

1—Apparent resistivity contour; 2—Inferred fault; 3— Jurassic granite; 4—Neoproterozoic metamorphic complex; 5—Gold orebody

触带,电阻率等值线总体呈舒缓波状自西向东向下逐步延深。按照倾角陡缓变化可分为3段:200~2000号测点之间,下延深度1500 m左右,电阻率等值线大角度向下弯曲,为断裂上段,总体倾角较陡;2000~4500号测点之间,深度大致为1500~2500 m,电阻率等值线向下弯曲角度由陡变缓,为三山岛断裂倾角较缓部位;4500~7500号测点,下延深度为2500~4500 m,电阻率等值线向下弯曲角度明显增大,但曲线波动幅度平缓,反映了断裂陡缓交替变化的特征,断裂上下盘岩性电性差异较小,异常特征显示为等值线的同步弯曲过渡带。在7500~9000号测点之间,电阻率等值线呈明显的低阻“U”字型,西部电阻率曲线单边下降,向东电阻率曲线逐步上升。据此推断,在7500号测点附近,为三山岛和焦家两断裂相交部位,交汇部位深度在4500 m左右。

焦家断裂(F6)在等值线图上显示为自东向西、自上而下舒缓波状延伸的等值线梯级带异常。按梯级带等值线倾角陡缓变化,也可大致划分为三段:上段,位于14300~16000号测点之间,下延深度1200 m左右,电阻率等值线自东向西(由大号向小号方向)有一明显的向下转折的低阻梯级带异常,据此推断该段断层倾角相对较陡,16000号测点附近的低阻梯级带异常与地表已知断裂蚀变带吻合。中段,位于11000~14300号测点之间,深度相当于1200~2000 m,等值线变化相对平缓,上部等值线间距相对宽大,下部等值线间距相对密集,中间低阻梯级带向下缓倾,倾角明显小于上部;下段,位于11000~7500号测点之间,电阻率等值线下倾角度增大,在11000号测点附近,等值线出现了明显的向下拐点,下倾角度急剧增大,10000号测点以西,等值线下降角度趋于平缓。在7500~8000号测点之间,与剖面西侧的单调下降的等值线梯级带相交。

4.4 反射地震

中国以往的地震方法主要用于石油、煤炭等的勘探,很少用于金属矿勘探。近年来在胶东金矿集区尝试性开展了反射地震探测工作(Yu et al., 2018),通过人工地震勘探,利用地震反射波确定地质界面的深度和形态、圈定构造、判断地层岩性。在三山岛断裂带南段的尹家西北勘查区的地震勘探,揭示了断裂构造深部的铲式阶梯式形态特征。

在地震剖面穿过三山岛断裂的浅部区域(莱州

市尹家西北勘查区)中有2个已知钻孔,把钻孔投影到地震时间剖面上,利用钻孔内所见断裂深度和区内地层速度计算出时间,可基本确定地震反射波和地质界面的对应关系。已知的ZK228钻孔位于地震时间剖面9320桩号,见主控矿断裂带深度约600 m,实际揭露主带破碎带点位于时间剖面9270桩号,在350~450 m深度亦见破碎带;ZK400-1钻孔位于地震剖面9970桩号,见主断裂带深度约1280 m,实际揭露点投影到地震剖面上9500桩号。本区地层速度采用5000 m/s,通过计算,得到断裂带所对应的地震反射时间,从而确定了地震反射波和地质界面的对应关系。在此基础上,根据剖面上地震波的反射特征,对地震时间剖面进行分析解释。共推断解释了5条断裂(图8)。

根据区域资料分析,ZF2断裂与控矿的三山岛断裂对应。在三山岛断裂浅部(剖面图左侧),受断裂倾角较大、地震激发接收条件差以及浅部和时间剖面两端有效覆盖次数偏低等因素的影响,其反射波信噪比偏低,反射波同相轴呈现蚯蚓状,不易连续对比追踪。而深部可见连续的反射信息,资料品质较高。三山岛断裂地表位置出露于时间剖面桩号9100处,倾向南东,浅部倾角高陡,可达70°以上,自浅至深倾角逐渐变缓,深部倾角约20°,总体呈犁式特征,存在局部倾角陡、缓交替变化现象,断裂面纵向最大深度超过4000 m。从剖面解释的断裂倾角变化趋势分析,断裂带从浅至深倾角明显变缓的拐点位置位于接近剖面桩号10000处,根据阶梯成矿模式推断,该拐点附近及其下的断裂倾角较缓处为金矿床的成矿有利靶区。

5 讨论

5.1 阶梯成矿的地质原理

阶梯找矿方法的关键依据是阶梯成矿模式,而断裂倾角变缓段赋矿则是阶梯成矿模式的核心思想。阶梯成矿或断裂缓倾角段赋矿是地质构造作用的必然结果。首先,总体倾角较缓的低角度正断层或逆冲断层常呈现倾角陡、缓交替的坡、坪型式。由于地质体岩性、结构等的不均匀性,断裂沿倾向切割过程中,当遇到相对塑性的岩层或地质体界面等相对薄弱面时常顺层延展,而遇到相对脆性的岩层时常直接切穿岩层,由此形成沿倾向倾角的

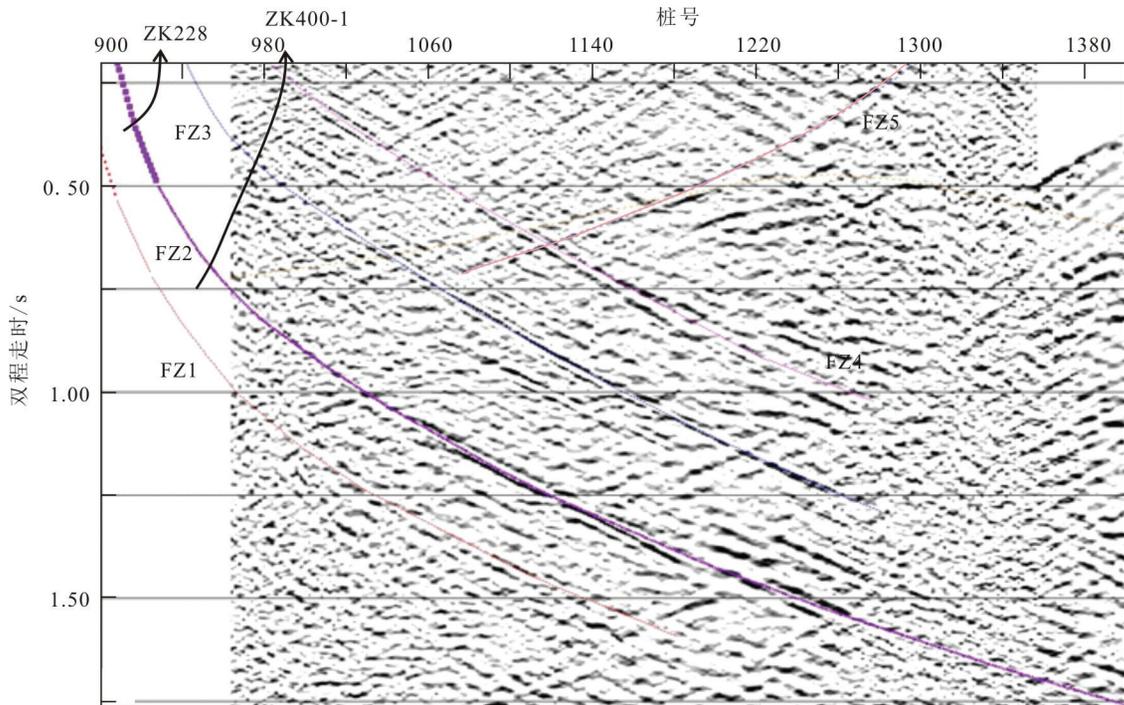


图8 胶东尹家西北矿区反射地震剖面

Fig.8 Reflection seismic profile at northwestern Yijia area, Jiaodong Peninsula

陡、缓交替变化。对于正断层性质的断裂而言,断裂陡倾段为引张开放空间,断裂缓倾段为半开放的剪切空间,流体在开放空间中不易存储成矿,因此矿化一般产生于断裂缓倾段;而对于逆断层性质的断裂而言,断坡段为挤压的封闭空间,断坪段为半开放的剪切空间,挤压封闭空间流体不宜进入,故矿化产生于倾角相对缓的断坪段。

其次,断裂倾角变缓赋矿是构造与物理化学条件耦合的结果。适宜的物理化学条件是含矿流体卸载沉淀富集的必要条件,地壳中的成矿流体只有某一深度地球化学和物理化学界面附近的适宜温度、压力条件下,其中的矿质方能沉淀成矿(陈柏林和付国立,1999)。断裂倾角由陡变缓时,其物理化学条件趋于稳定,这种倾角小或者呈平缓波状起伏的断裂段,与适宜成矿的物理化学界面夹角很小,或连续出现或穿插于这种界面附近,有利于矿质的沉淀。另外,低角度断层往往沿不同地质体的界面发育,断层上、下盘在岩性、结构、构造等方面有差异,因此表现为物理化学条件不同的地质界面。这种界面位于特定温压条件的深度范围时,与成矿物理化学界面在一定的范围内重叠,甚至控制了成矿物理化学界面,成为成矿最有利的部位。这是低角

度断层或断层缓倾段赋矿的重要原因。

再次,断裂构造型式和流体迁移—沉淀方式是阶梯式赋矿的决定因素。例如,胶东破碎带蚀变岩型金矿的赋矿断裂均为浅部倾角陡、深倾角缓的铲式断裂,断裂常常沿不同地质体界面分布,具多期活动性质(成矿前压扭性、成矿期张扭性)(苗来成等1997;汪劲草等,2003;李俊建等,2005;Deng et al.,2006,2008)。由于地质体岩性、结构等的不均匀性,断裂沿倾向呈现倾角陡、缓交替变化的台阶型式。当成矿流体沿断裂陡倾段运移时,深部含矿热液由高压区域向低压区域上升,流体快速逸散,不宜富集成矿;当成矿流体运移至断裂缓倾段时,流体在相对等压、等温条件下横向缓慢流动,而且在胶东地区的成矿断裂带中均有断层泥屏蔽障,成矿物质宜富集成矿。因此,矿体主要赋存于断裂缓倾段。胶东地区控矿断裂沿倾向的台阶型式造成了金矿的阶梯式分段富集(宋明春等,2012)。当然,断裂构造岩的孔隙率、渗透性也是影响成矿流体运移、富集的重要因素(Cox,2005;Groves et al.,2018)。

胶东地区的断裂构造发育,断裂性质和产状类型多样。胶东金矿的类型则有破碎带蚀变岩型、石英脉型、硫化物石英脉型、构造角砾岩型、蚀变砾岩

型和含黄铁矿碳酸盐型等。其中的破碎带蚀变岩型金矿主要受区域较大规模的总体缓倾斜断裂控制,控矿断裂的深部找矿潜力大,矿化常呈阶梯式富集,阶梯找矿方法主要适用于破碎带蚀变岩型金矿的深部找矿。胶东地区也有较多走滑断裂,如桃村断裂、栾家河断裂等,这种断裂倾角陡、断裂面平直,沿倾向上没有倾角陡缓变化或断坪、断坡现象,因此这些断裂中均不含矿,这从一个侧面说明断裂倾角变化是胶东金矿富集的必要条件。胶东的石英脉型金矿受陡倾角张性断裂控制,这种断裂断面不平整,沿倾向倾角也常发生变化,但矿体主要赋存于断裂的陡倾段(宋明春等,2020),与蚀变岩型金矿的赋矿位置恰好相反。其主要原因是二者的控矿构造型式和流体成矿方式不同,蚀变岩型金矿的成矿方式是压力差渗流交代,石英脉型金矿的成矿方式是大规模流体涌流充填(邓军等,1996),由于超静岩压力梯度的存在使得流体在扩容带快速充填成矿,流体补给大于耗散。高角度张性断裂的陡倾段为应力拉张区,形成连续自由空间,是强大的负压区,有利于大量流体的快速充填。石英脉型金矿和蚀变岩型金矿分别代表了不同的流体与构造配合方式。

5.2 地球物理方法的适用性

胶东传统的浅表部金矿找矿地球物理方法,是用阻率法、激发极化法等时间域直流电法圈定矿化异常体。深部找矿的探测目标是断裂的深部位置及产状变化,采用的地球物理方法则是CSAMT、MT等频率域电磁法。二者的找矿思路、探测目标、方法手段完全不同。物探方法用于深部找矿的地球物理前提是地质体的物性差异,需要有存在显著物性差异的地质找矿标志为探测目标。胶东金矿的主要控矿断裂具有深部找矿的地球物理前提。三山岛、焦家和招平3条控矿断裂的大部分区段位于两种不同性质地质体的接触带上,断裂上盘主要为新太古代变质岩系,整体呈低阻电性特征;断裂下盘为晚中生代花岗岩,呈高阻电性特征。因此,电磁法对确定断裂构造的深部特征具有良好效果。当断层埋深达到一定深度时,由于体积效应致使垂向分辨率降低,在断面等值线上显示为等值线梯度变化率的差异,断裂带下界面一般位于梯级带梯度变化最大的部位,定向延伸的低阻带或等值线

梯级带异常为断层的反映。同时,断裂上、下盘岩石的密度差异较大,造成其波阻抗差异较大,产生能量较强的反射波,为地震勘探提供了地球物理前提。胶东金矿的控矿断裂也有发育在同一种岩性内者,但由于断裂规模大、岩石破碎强烈、裂隙水发育,致使蚀变带和金矿脉中的黄铁矿等金属硫化物形成硫酸盐矿化水(矿化水的 $\rho=n \times 10 \Omega \cdot m$),这些矿化水充滞于断裂破碎带中,从而在成矿母岩的高阻背景上形成了明显的低阻带。在电阻率断面等值线图上呈“U”形或“V”形低阻异常。

CSAMT法具有探测深度大、工作效率高、视电阻率横向分辨率高、不受高阻屏蔽等特点。通过在胶东地区的深部找矿实验研究,CSAMT法有效勘探深度可达近2000 m。如果将可探测对象的厚度与其埋深之比来分析垂向分辨率,CSAMT法的垂向分辨率为10%~20%,明显高于传统方法。但这一方法产生的场源附加效应、近场效应、静态效应等造成了异常的复杂性,增加了异常解释的难度。另外,该方法易受地表附近电性不均匀体的影响,而且对低阻覆盖层区域的深部探测精度难以保证。

SIP法对覆盖层的穿透深度大,对极化体产状和形态的分辨能力强,具有较强的抗干扰能力,多参数组合解释可以提供丰富的地质信息。但该方法采用偶极-偶极几何测深装置,异常形态复杂,对异常源定位及形态解释难度较大。

MT法具有勘探深度大、不受高阻层屏蔽、对低阻层有较高的分辨能力等特点,在胶西北深部金矿勘查中,MT法采集的有效频率范围为920~0.35 Hz,可满足3000~5000 m勘探深度的技术要求。该方法的局限性主要是:体积效应、反演的非唯一性较强,纵向分辨能力随深度增加迅速减弱,对浅层地质体的分辨率偏低。

根据大量找矿实践总结,地球物理组合方法是胶东深部找矿的有效技术,主要是大比例尺高精度重力+大比例尺高精度磁测+CSAMT+SIP。

6 结 论

(1)胶东金矿受北东向断裂带控制,由赋矿断裂带的浅部至深部矿体常呈阶梯式分布,构成阶梯成矿模式,这一成矿模式为深部找矿提供了核心技术前提和可以识别的探测目标。

(2)阶梯找矿方法的主要技术流程是:通过高精度地球物理探测,查明控矿断裂向深部的结构和倾角变化,根据阶梯成矿模式预测深部矿的位置、规模。

(3)可控源音频大地电磁测深、频谱激电测量、大地电磁测深和反射地震等方法能够探测控矿断裂深部特征,多种地球物理方法组合是阶梯找矿方法的有效技术手段。

(4)阶梯成矿是地质构造作用与成矿物理化学条件等多种因素耦合的结果,断裂倾角变缓段为半开放的剪切空间,物理化学条件趋于稳定、流体流动缓慢,且顶部受断层泥屏障,有利于流体中的成矿物质富集成矿。

致谢:本文引用的三山岛北部海域金矿找矿案例和焦家矿区找矿案例分别由山东省第三地质矿产勘查院和山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队完成,地球物理方法案例由山东省物化探勘查院和山东省煤田地质规划勘察研究院完成,三位匿名审稿专家提出了宝贵的修改意见,谨此致谢。

References

- Chen Bailin, Fu Guoli. 1999. Advances in studies of ore-forming and ore-controlling structures on lode gold deposits[J]. *Gold Geology*, 5(4): 63-69(in Chinese with English abstract).
- Chen Yumin, Fan Hongrui, Cui Lun, Wang Zhaokun, Sun Zhifu, Zeng Qingdong, Ma Fengshan, Wang Juntong, Liu Qin, Sun Zongfeng, Yang Kuifeng, Hao Tianyao. 2016. The Large-Scale Gold Mineralization and Genetic Model in the Northwest of Shandong Peninsula[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-336(in Chinese).
- Cao Chunguo, Han Yuzhen, Guan Rongbin. 2016. Application of Geophysical Prospecting Technique for Deep Gold Deposits in Northwest Jiaojia Ore-Concentrated Area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-146(in Chinese).
- Cox S F. 2005. Coupling between deformation, fluid pressures, and fluid flow in ore-producing hydrothermal systems at depth in the crust[J]. *Economic Geology 100 th Anniversary Volume*, 39-75.
- Deng Jun, Xu Shouli, Fang Yun, Zhou Xianqiang, Wan Li. 1996. The Tectonic System and Metallogenic Dynamics of Gold Deposits in the Northwestern Shandong Peninsula[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-98(in Chinese).
- Deng Jun, Yang Liqiang, Ge Liangsheng, Wang Qingfei, Zhang Jing, Gao Bangfei, Zhou Yinghua, Jiang Shaoqing. 2006. Research advances in the Mesozoic tectonic regimes during the formation of Jiaodong ore cluster area[J]. *Progress in Natural Science*, 16(8): 777-784.
- Deng Jun, Wang Qingfei, Yang Liqiang, Zhou Lei, Gong Qingjie, Yuan Wanming, Xu Hao, Guo Chunying, Liu Xiangwei. 2008. The structure of ore-controlling strain and stress field in the Shangzhuang gold deposit in Shandong Province, China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 82(4): 769-780.
- Groves D I, Santosh M, Goldfarb R J, Zhang Liang. 2018. Structural geometry of orogenic gold deposits: Implications for exploration for world-class and giant deposits[J]. *Geoscience Frontiers*, 9(4): 1163-1177.
- Li Hui, Zhang Wenhua. 1999. Characteristics of geochemical zoning in large and rich deposits in Shandong Province[J]. *Journal of Precious Metallic Geology*, 8(4): 217-222(in Chinese with English abstract).
- Li Hui, Yu Bin, Li Deliang, Li Cheng, Wang Shanfei, Li Wei, He Ronghua, Ma Jiuju, Wei Jiang, Zhao Jiayang, Li Siling, Yang Qingquan, Yuan Dongcheng, Liu Rifu, Si Shuyun, Fan Yong. 2010. A structural superimposed halo model for deep blind ore prediction in Sanshandao-Cangshang fault zone, Shandong Province[J]. *Mineral Deposits*, 29(S1): 713-714(in Chinese).
- Li Junjian, Luo Zhenkuan, Liu Xiaoyang, Xu Weidong, Luo Hui. 2005. Geodynamic setting for formation of large-superlarge gold deposits and Mesozoic granites in Jiaodong area [J]. *Mineral Deposits*, 24(4): 361-372(in Chinese with English abstract).
- Li Shixian, Liu Changchun, An Yuhong, Wang Weicong, Huang Tailing, Yang Chenghai. 2007. *Gold Deposits Geology in Shandong Peninsula*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-423(in Chinese).
- Lü Qingtian, Lian Yuguang, Zhao Jinhua. 2010. Application of reflection seismic technology in metallogenic geological background and deep mineral exploration: Status and prospects [J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(6): 771-787.
- Lü Qingtian, Dong Shuwen, Tang Jingtian, Shi Danian, Chang Yinfu, SinoProbe-03-CJ Group. 2015. Multi-scale and integrated geophysical data revealing mineral systems and exploring for mineral deposits at depth: A synthesis from SinoProbe-03 [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(2): 4319-4343(in Chinese with English abstract).
- Lü Qingtian, Meng Guixiang, Yan Jiayong, Zhang Kun, Zhao Jinhua, Gong Xuejing. 2019. Multi-scale exploration of mineral system: Concept and progress-A case study in the middle and lower reaches of the Yangtze River Metallogenic Belt [J]. *Geology in China*, 46(4): 673-689(in Chinese with English abstract).
- Ma Shengming, Zhu Lixin, Zhang Liangliang, Wang Jian. 2019. Thoughts on the geochemical mechanism of gold mineralization in the northwest Jiaodong gold province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 143(1): 925-931(in Chinese with English abstract).
- Miao Laicheng, Luo Zhenkuan, Guan Kang, Huang Jiazhan. 1997. The

- evolution of the ore-controlling faults in the Zhaoye gold belt , eastern Shandong Province[J]. Journal of Geology and Exploration, 12(1): 26–35(in Chinese with English abstract).
- Ouyang Yongpeng, Rao Jianfeng, Liao Shaoping, He Xirong, Hu Qinghua, Wei Jin, Yang Mingguai. 2019. Rock- and ore-controlling structure in the Zhuxi ore concentration area in the northeastern Jiangxi Province[J]. Geology in China, 46(4): 878–893(in Chinese with English abstract).
- Song Mingchun, Wan Guopu, Cao Chunguo, He Chunyan. 2012. Geophysical- geological interpretation and deep- seated gold deposit prospecting in Sanshandong- Jiaojia area, eastern Shandong Province, China [J]. Acta Geologica Sinica(English Edition), 86(3): 640–652.
- Song Mingchun, Yi Pihou, Xu Junxiang, Cui Shuxue Shen Kun, Jiang Hongli, Yuan Wenhua, Wang Huajiang. 2012. A step metallogenetic model for gold deposits in the northwestern Shandong Peninsula, China [J]. Science China Earth Science, 55(6): 940–948.
- 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, Zhang Junjin, Zhang Pijian, Yang Liqiang, Liu Dianhao, Ding Zhengjiang, Song Yingxin. 2015. Discovery and tectonic- magmatic background of superlarge gold deposit in offshore of northern Sanshandao, Shandong Peninsula, China[J]. Acta Geologica Sinica, 89(2): 365–383(in Chinese with English abstract).
- Song Mingchun. 2015. The main achievements and key theory and methods of deep- seated prospecting in the Jiaodong gold concentration area, Shandong Province[J]. Geological Bulletin of China, 34(9): 1758–1771(in Chinese with English abstract).
- Song Mingchun, Cao Chunguo, Cun Shuxue, Xu Junxiang, Zhang Pijian, Jiao Xiumei, Hu Hong, Li Shiyong, Caojia, Song Yingxin, 2017. A Stepwise Prospecting Method for Deep- Seated Gold Deposit[P]. China: ZL 2015 1 0056575.X. 2017–11–10(in Chinese).
- Song Mingchun, Song Yingxin, Ding Zhengjiang, Wei Xufeng, Sun Shaoli, Song Guozheng, Zhang Junjin, Zhang Pijian, Wang Yongguo. 2019. The discovery of the Jiaojia and the Sanshandao giant gold deposits in Jiaodong peninsula and discussion on the relevant issues[J]. Geotectonica et Metallogenia, 43(1): 92–110(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, 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. 2021. 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. doi: 10.31035/cg2021070.
- 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 Chenghui, Wang Denghong, Huang Fan, Xu Jue, Chen Zhenghui, Ying Lijuan, Liu Shanbao. 2012. The major gold concentration areas in China and their resource potentials[J]. Geology in China, 39(5): 1125–1142(in Chinese with English abstract).
- Wang Jincao, Xia Bing, Tang Jingru. 2003. Recognition on some key geological problems of Linglong- Jiaojia ore- concentrated district in Shandong Province[J]. Geotectonica et Metallogenia, 27 (2): 147–151(in Chinese with English abstract).
- Wang Xianguang, Liu Jianguang, Chen Guohua, Zeng Hianhui, Rao Jianfeng, Qiu Ping, Luo Luchuan, Xie Tao, Zhong Shijun, Zhang Cheng. 2014. On exploration progress of W- Cu deposit in Zhuxi of Jiangxi[J]. Journal of Geology, 38(3): 483–491(in Chinese with English abstract).
- Yang Liqiang, Deng Jun, Wang Zhongliang, Zhang Liang, Guo Linnan, Song Mingchun, Zheng Xiaoli. 2014. Mesozoic gold metallogenetic system of the Jiaodong gold province, eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(9): 2447–2467(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. Deep structural framework and genetic analysis of gold concentration areas in the northwestern Jiaodong Peninsula, China: A new understanding based on high- resolution reflective seismic survey[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 characteristic and geological significance in 3000m depth of Jiaojia gold metallogenetic belt, Jiaodong Peninsula[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(9):2893–2910(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guoquan. 2017. Study on characteristics and metallogenetic mechanism of deep deposits in Guilaizhuang gold deposit in Pingyi county of Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 33 (9): 7–13(in Chinese with English abstract).
- Zhu Xun. 2014. The research and application of stepwise metallogenetic model should be emphasized[J]. The Earth, 224(12): 110–1111(in Chinese).

附中文参考文献

陈柏林,付国立. 1999. 脉状金矿成矿控矿构造的研究进展[J]. 黄金

- 地质, 5(4): 63-69.
- 陈玉民, 范宏瑞, 崔仑, 王昭坤, 孙之夫, 曾庆栋, 马凤山, 王君亭, 刘钦, 孙宗峰, 杨奎峰, 郝天珧. 2016. 胶西北大规模金成矿作用与成因模型[M]. 北京:地质出版社, 1-336.
- 曹春国, 韩玉珍, 关荣斌, 孔祥明. 2016. 胶西北矿集区深部金矿应用地球物理找矿技术实践[M]. 北京:地质出版社, 1-146.
- 邓军, 徐守礼, 方云, 周显强, 万丽. 1996. 胶东西北部构造体系及金成矿动力学[M]. 北京:地质出版社, 1-98.
- 李惠, 张文华. 1999. 胶东大型金矿床的地球化学分带特征[J]. 贵金属地质, 8(4): 217-222.
- 李惠, 禹斌, 李德亮, 李成, 王善飞, 李威, 贺容华, 马久菊, 魏江, 赵佳祥, 李思玲, 杨清泉, 原东成, 刘日富, 司淑云, 樊勇. 2010. 山东三(山岛)一仓(上)断裂带金矿床深部盲矿预测的构造叠加晕模型[J]. 矿床地质, 29(S1): 713-714.
- 李俊建, 罗镇宽, 刘晓阳, 徐卫东, 骆辉. 2005. 胶东中生代花岗岩及大型-超大型金矿床形成的地球动力学背景[J]. 矿床地质, 24(4): 361-372.
- 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, 1-423.
- 吕庆田, 廉玉广, 赵金花. 2010. 反射地震技术在成矿地质背景与深部矿产勘查中的应用: 现状与前景[J]. 地质学报, 84(6): 771-787.
- 吕庆田, 董树文, 汤井田, 史大年, 常印佛, SinoProbe-03-CJ项目组. 2015. 多尺度综合地球物理探测: 揭示成矿系统、助力深部找矿——长江中下游深部探测(SinoProbe-03)进展[J]. 地球物理学报, 58(2): 4319-4343.
- 吕庆田, 孟贵祥, 严加永, 张昆, 赵金花, 龚雪婧. 2019. 成矿系统的多尺度探测: 概念与进展——以长江中下游成矿带为例[J]. 中国地质, 46(4): 673-689.
- 马生明, 朱立新, 张亮亮, 王建. 2019. 关于胶西北金矿成矿地球化学机制的思考[J]. 物探与化探, 43(1): 925-931.
- 苗来成, 罗镇宽, 关康, 黄佳展. 1997. 胶东招掖金矿带控矿断裂演化规律[J]. 地质找矿论丛, 12(1): 26-35.
- 欧阳永棚, 饶建锋, 廖绍平, 何细荣, 胡青华, 魏锦, 杨明桂. 2019. 赣东北朱溪矿集区构造控岩-控矿特征[J]. 中国地质, 46(4): 878-893.
- 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, 张军进, 张丕建, 杨立强, 刘殿浩, 丁正江, 宋英昕. 2015. 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, 89(2): 365-383.
- 宋明春. 2015. 胶东金矿深部找矿主要成果和关键理论技术进展[J]. 地质通报, 34(9): 1758-1771.
- 宋明春, 宋英昕, 丁正江, 魏绪峰, 孙绍立, 宋国政, 张军进, 张丕建, 王永国. 2019. 胶东焦家和三山岛巨型金矿床的发现及有关问题讨论[J]. 大地构造与成矿学, 43(1): 92-110.
- 宋明春, 曹春国, 崔书学, 徐军祥, 张丕建, 焦秀美, 胡弘, 李世勇, 曹佳, 宋英昕. 2017. 一种深部金矿阶梯式找矿方法[P]. 中国: ZL 2015 1 0056575.X. 2017-11-10.
- 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.
- 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.
- 王成辉, 王登红, 黄凡, 徐珏, 陈郑辉, 应立娟, 刘善宝. 2012. 中国金矿集区及其资源潜力探讨[J]. 中国地质, 39(5): 1125-1142.
- 汪劲草, 夏斌, 汤静如. 2003. 对玲珑-焦家矿集区几个关键地质问题的认识[J]. 大地构造与成矿学, 27(2): 147-151.
- 王先广, 刘建光, 陈国华, 曾祥辉, 饶建锋, 邱萍, 罗淦川, 谢涛, 钟仕俊, 张诚. 2014. 江西朱溪钨铜矿找矿进展及建议[J]. 地质学刊, 38(3): 483-491.
- 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.
- 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3000 m深部成矿特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 35(9): 2893-2910.
- 张国权. 2017. 山东省平邑归来庄金矿深部矿床特征及成矿规律研究[J]. 山东国土资源, 33(9): 7-13.
- 朱训. 2014. 要重视阶梯式成矿模式的研究与应用[J]. 地球, 224(12): 110-1111.