

引用格式: 周明岭, 孙亮亮, 吕军阳, 等. 2024. 焦家式金矿勘查与研究 [J]. 地质力学学报, 30 (5): 747–767. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2024061](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2024061)

Citation: ZHOU M L, SUN L L, LYU J Y, et al., 2024. Exploration and scientific research of the Jiaojia-type gold deposit[J]. Journal of Geomechanics, 30 (5): 747–767. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2024061](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2024061)

焦家式金矿勘查与研究

周明岭^{1,2}, 孙亮亮^{1,2}, 吕军阳^{1,2}, 王 斌^{1,2}, 刘向东^{1,2}, 鲍中义^{1,2}, 张琪彬^{1,2},
周晓萍^{1,2}, 解天赐^{1,2}, 王珊珊^{1,2}, 刘彩杰^{1,2}, 徐韶辉^{1,2}, 闫春明^{1,2}, 张 朋^{1,2},
张亮亮^{1,2}, 杨真亮^{1,2}, 范家盟^{1,2}, 赵成乐^{1,2}, 郭美丽^{1,2}, 李瑞翔^{1,2}

ZHOU Mingling^{1,2}, SUN Liangliang^{1,2}, LYU Junyang^{1,2}, WANG Bin^{1,2}, LIU Xiangdong^{1,2}, BAO Zhongyi^{1,2},
ZHANG Qibin^{1,2}, ZHOU Xiaoping^{1,2}, XIE Tianci^{1,2}, WANG Shanshan^{1,2}, LIU Caijie^{1,2}, XU Shaohui^{1,2},
YAN Chunming^{1,2}, ZHANG Peng^{1,2}, ZHANG Liangliang^{1,2}, YANG Zhenliang^{1,2}, FAN Jiameng^{1,2},
ZHAO Chengle^{1,2}, GUO Meili^{1,2}, LI Ruixiang^{1,2}

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. 自然资源部深部金矿勘查开采技术创新中心, 山东 威海 264209

1. No. 6 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Weihai 264209, Shandong, China;

2. Ministry of Natural Resources Technology Innovation Center for Deep Gold Resources Exploration and Mining, Weihai 264209, Shandong, China

Exploration and scientific research of the Jiaojia-type gold deposit

Abstract: [Objective] Jiaojia-type gold deposit is a new type of gold mine discovered by Shandong geologists in northwestern Jiaodong in the 1960s, and its output is controlled by regional tectonic fracture zones. Pyrite sericitized alteration generally occurred during the ore-forming period, which is characterized by a large scale, distinct alteration zones, concentration of mineralization, simple morphology of the ore body, relatively uniform grade, and simple mineral combinations. The deposit has gone through 12 years of exploration and scientific research, from discovery to establishment. [Methods] This new type of gold deposit has been rapidly promoted since its establishment and has achieved fruitful prospecting results in China. Deep exploration achievements of the Jiaojia-type gold deposit have been coming up in the Jiaodong area since the 21st century. [Results] The accumulated gold resource reserves submitted have been 3617.12 tons by 2020, which has helped the Jiaodong area become the third largest gold cluster in the world, and gold reserves of China have risen to the second rank in the world. Research on the Jiaojia-style gold mine has also made considerable progress, with the age of mineralization accurately limited to 126~120 Ma and formation occurring under a strong regional extension background. The source of mineralization material has multiple origins, with the Archean tholeiite being the initial source rock of gold-bearing minerals. The ore-forming process is divided into four stages, and the “thermo-extension” metallogenic theory and the step metallogenic model are proposed. The metallogenic depth is about 5~10 km, and the post-metallogenic denudation thickness is 5.2±1.2 km, with the deposits well preserved. [Conclusion] The metallogenic prediction study concluded that the total gold resources in the three major metallogenic zones of Sanshandao, Jiaojia, and Zhaoping in the northwestern Jiaozhou area were 7258~10150 tons of metal at a depth of 5000 m, which demonstrates the immense potential of the deeper part of the Jiaojia-type gold deposits for exploration. A set of key exploration techniques was summarized for different exploration stages, from shallow to deep. [Significance] These studies enriched the metallogenic theory of the Jiaojia-type gold deposit, making the metallogenic prediction results highly

第一作者: 周明岭 (1968—), 男, 学士, 研究员, 从事地质矿产勘查与研究。Email: lyzhouml@126.com

收稿日期: 2024-05-29; 修回日期: 2024-09-12; 录用日期: 2024-10-09; 网络出版日期: 2024-10-10; 责任编辑: 范二平

accurate, reliable, and effective in guiding the gold exploration in the Jiaodong peninsula.

Keywords: Jiaojia-type gold deposit; mineralization characteristics; metallogenic model; gold exploration; Jiaodong

摘要: 焦家式金矿是 20 世纪 60 年代山东地质工作者在胶东西北部发现的金矿类型, 其产出受区域性构造破碎带控制, 成矿期普遍发生黄铁绢英岩化蚀变, 成矿特征是规模大、蚀变分带明显、矿化集中、矿体形态简单、品位相对均匀、矿物组合简单。从发现到确立金矿类型经历了 12 年的勘查研究历程, 在此之后得以迅速推广, 并在胶东及全国多地取得了丰硕的找矿成果。21 世纪以来, 胶东地区焦家式金矿深部勘查成果不断涌现。截至 2020 年, 累计提交金资源储量 3617.12 t, 助推胶东地区成为世界第三大金矿集区, 中国黄金储量跃居世界第二。同时, 对焦家式金矿的研究工作也取得了长足进展: 成矿时代被精确限定在 126~120 Ma; 金矿形成于区域强烈伸展背景下, 成矿物质来源具有多源性, 太古代拉斑玄武岩为含金初始矿源岩; 将成矿过程精细划分为 4 个阶段, 并提出“热隆-伸展”成矿理论和“阶梯式”成矿模式; 成矿深度为 5~10 km, 成矿后剥蚀厚度为 5.2 ± 1.2 km, 矿床保存较好; 胶西北地区三山岛、焦家和招平三大成矿带 5000 m 以浅预测金资源总量为 7258~10150 t, 显示出焦家式金矿深部巨大的找矿潜力。从浅部到深部不同勘查阶段总结出一套关键勘查技术组合。这些研究成果丰富完善了焦家式金矿成矿理论体系, 使得成矿预测更加准确可靠, 有力指导了胶东地区金矿勘查。

关键词: 焦家式金矿; 成矿特征; 成矿模式; 金矿勘查; 胶东

中图分类号: P61; P624 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2024) 05-0747-21

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2024061

0 引言

焦家式金矿是山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队(原胶东第一地质队、原山东省地质局 807 队、山东省第六地质矿产勘查院, 以下简称“六队”)地质工作者在胶东地区进行多年地质勘查中发现的金矿类型, 其发现和开发使得胶东地区成为新中国成立以来最重要的黄金基地, 可用“三个中国之最”加以概括: 已探明资源量居全国之最, 单一矿床规模居全国之最, 黄金产量居全国之最(李士先等, 2007)。

焦家式金矿的发现, 引领了以六队为代表的山东省地勘队伍金矿找矿方向的重大转移, 在胶东地区迅速发现和评价了一大批同类型金矿。随着勘查工作的不断深入, 焦家式金矿的勘查技术方法和手段也日臻完善。尤其是 21 世纪初以来, 随着“攻深找盲”和“找矿突破战略行动”的实施, 胶东地区一大批同类型金矿床被不断发现, 累计查明资源储量快速增长, 进一步巩固了胶东地区黄金产量和资源储量在全国的领头羊地位, 对中国黄金事业稳定发展和黄金储备快速增长的贡献功不可没, 同时极大地提升了焦家式金矿在国际知名金矿类型中的重要地位。

文章通过回顾焦家式金矿的发现和矿床模式

确立过程, 阐述了焦家式金矿的定义、内涵和特征, 对金矿成矿模式和成矿预测进行了研究, 系统总结了焦家式金矿的勘查历程、勘查模型与关键勘查技术, 为地质工作者对焦家式金矿的全面了解提供资料。

1 金矿的发现与焦家式金矿的确立

20 世纪 60 年代中期之前, 胶东地区金矿勘查工作以招远市玲珑地区石英脉型金矿为中心, 投入大量工作, 但找矿效果不佳。六队在 1958—1965 年的 8 年间, 探获金资源量不足 30 t(李士先等, 2007)。在对石英脉型金矿进行勘查期间, 六队通过长期观察发现, 含金石英脉两侧的蚀变岩中具有明显的金矿化。受此启示, 研究人员开始在区域性构造破碎带蚀变岩中进行金矿找矿探索。

1965 年冬季, 六队二分队矿产组在莱州湾的三山岛矿点取样、并发现找矿线索。1965 年 12 月 11—22 日, 六队三分队普查组对找矿线索开展检查评价, 进行岩石、构造、蚀变与矿化特征调查, 采样 103 件, 其中 1/3 样品的金品位高于 3 g/t, 达到工业品位, 确认含矿蚀变带的存在, 明确了进一步的工作价值。1966 年 3 月, 六队组织开展系统的普查、详查工作, 1967 年转入勘探工作, 1969 年 11 月提交《山东掖县三山岛金矿区地质勘探报告》(山东省地质局 807 队, 1969), 于 -390 m 标高以上提交金资源

储量总计 63.56 t。

三山岛金矿的发现,使六队地质工作者确信:宽度超过 100 m,长度超过 10 km 的区域性断裂是能够储矿的,并且矿床规模往往较大,这在区域性断裂带中找矿提供了实例。三山岛金矿的探索勘查开创了中国特大型金矿的找矿先例,为之后总结焦家式金矿理论奠定了基础(张韞璞和文子中, 1983)。

1966 年,六队二分队龙埠地质组在龙口-莱州弧形断裂破碎带中段(即焦家断裂带)发现金矿化。在龙埠矿点进行地质工作时,经地表追索,采矿遗迹调查,确定焦家-新城一带为寻找蚀变岩型金矿的新靶区。其后,1966—1972 年系统勘查了焦家金矿床,提交金资源储量 77.92 t; 1974—1979 年系统勘查了新城金矿床,提交金资源储量 71.07 t。此外,六队于 1967—1970 年在招远-平度断裂带勘查评价了夏甸金矿床,于 1974 年提交金资源储量 6.38 t。相同类型金矿的不断发现,极大地拓宽了金矿找矿区域,证实了蚀变岩型金矿具有广阔的找矿前景。

1976—1977 年,六队以焦家和新城金矿的勘查和研究成果为例,完成了《山东省焦家式破碎带蚀变岩型金矿地质特征》(山东省地质局第六地质队, 1977)研究报告,将焦家式破碎带蚀变岩型金矿作为一种矿床类型正式提出。在 1977 年的全国第二次金矿地质工作会议上,六队全面介绍了焦家式金矿研究成果并得到广泛认同,会议将“焦家式破碎带蚀变岩型金矿”(简称焦家式金矿)作为中国一种新类型金矿床确立下来。

2 焦家式金矿的基本特征

焦家式金矿区域上受宽大的构造破碎带控制,成矿期普遍发生黄铁绢英岩化蚀变,以矿床规模大、矿化集中、矿体形态简单、品位相对均匀、矿石易选为主要特征。焦家式金矿以其独特的控矿构造、巨大的矿床规模明显区别于世界其他类型金矿,工业价值特别巨大。其成矿作用方式、矿化蚀变、含矿建造、矿石类型、矿床规模及品位特征也与胶东地区其他类型金矿具有一定的差异。

2.1 区域产出特征

胶西北地区大地构造位置位于华北板块东南边缘部位和秦岭-大别-苏鲁造山带东北部,经历了早前寒武纪不成熟陆壳向成熟陆壳转化和陆块碰撞拼合阶段、中-新元古代大陆裂解与聚合阶段、

古生代海陆变迁/中-新生代构造体制转折和岩石圈减薄阶段,具有典型的陆块区与叠加造山弧盆系的双重特征(宋明春等, 2010)。郯庐深大断裂对区内构造格架起着重要的控制作用,按区域性构造展布特征,结合其形成演化、成岩成矿的专属性等特征,将区域性构造大致划分为基底东西向构造、北东-北北东向弧形断裂构造、北北东向断裂构造和北东向构造 4 种构造型式(郭振一和孙秀珠, 1983)。胶东地区中生代侵入岩按成岩时间可分为侏罗纪玲珑序列、白垩纪郭家岭序列、白垩纪伟德山序列、白垩纪雨山序列和白垩纪崂山序列等不同时代侵入体,反映了中生代强烈的构造-岩浆活动历史。按岩体与成矿关系可分为与侏罗纪酸性侵入岩有关的 Mo(W)-Au 矿床成矿系列、与早白垩世中酸性侵入岩有关的 Au(Ag)成矿系列和与早白垩世中酸性侵入岩有关的 Cu-Pb-Zn-Mo-Ag-Au 成矿系列,分别与玲珑序列、郭家岭序列和伟德山序列岩浆事件相对应。焦家式金矿床的分布在区域上受控于中生代岩体和北东-北北东向弧形断裂构造。在胶西北地区自西向东共有 4 条断裂带,依次为三山岛-仓上断裂带、龙口-莱州断裂带、招远-平度断裂带和西林-陡崖断裂带(图 1)。

焦家式金矿控矿断裂属于区域性北东-北北东向构造,一般认为是郯庐断裂带所派生的次级构造,其规模相似,活动历史复杂(邓军等, 1996; 任云生等, 1997)。整体上表现为复杂的继承性和新生性活动特征,成矿期在地壳隆升背景下发生了强烈的伸展活动,对矿体产出和矿化富集起到了直接的控制作用。控矿断裂一般宽大于 100 m,延伸大于 10 km,平面上呈 S 形展布,总体走向北东向。其中,三山岛-仓上断裂带(F_1)与龙口-莱州断裂带(F_2)倾向相对产出,龙口-莱州断裂带(F_2)与招远-平度断裂带(F_3)倾向相反产出;龙口-莱州断裂带(F_2)和西林-陡崖断裂带(F_4)复合古老的東西向构造,倾角一般为 $20^\circ \sim 40^\circ$,为上陡下缓的铲状形态(图 2)。控矿断裂倾角向深部逐渐变缓,而且呈现陡、缓交替特征,显示出铲式阶梯状断裂形态。焦家式金矿多产出于上述断裂构造及其分支断裂中(图 1)。

2.2 蚀变矿化和分带特征

焦家式金矿因成矿期普遍发生中温热液蚀变,主要有钾长石化、赤铁矿金红石化、硅化、绢云母化、碳酸盐化和绿泥石化,同时伴随有金属硫化物和金银矿化作用。相对于胶东其他类型金矿而言,

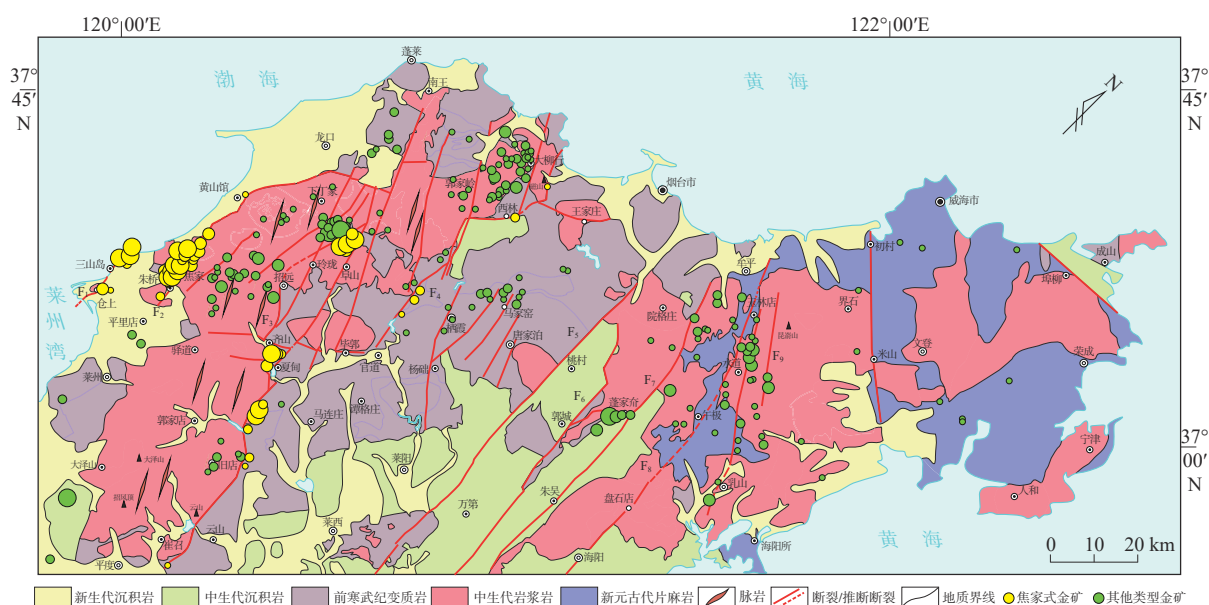


图1 胶东地区区域地质图及金矿分布图
Fig. 1 Regional geological map and distribution of gold deposits in the Jiaodong area

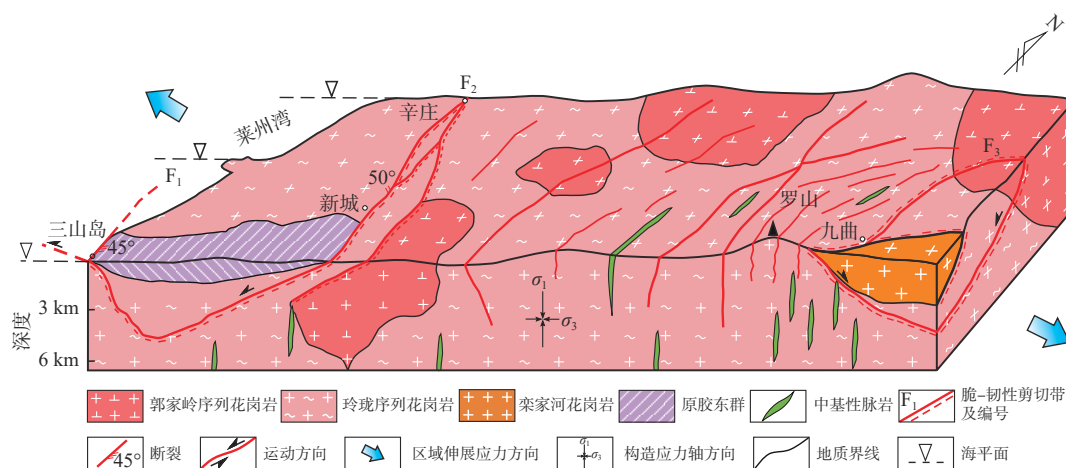


图2 胶东西北部地区焦家式金矿控矿断裂组合示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the ore-controlling fault pattern in the northwest Jiaodong area

焦家式金矿蚀变种类较全,也较为典型。黄铁绢英岩化作为黄铁矿化与绢云母化、硅化在空间上相互叠加和紧密伴生的成矿期蚀变类型组合,是焦家式金矿中与矿化关系最为密切且发育最广泛的蚀变作用。一般来说,黄铁绢英岩化越强部位,金富集程度越高。蚀变程度一般在断裂带上盘黄铁绢英岩化较弱,而下盘强。在下盘破碎带外侧,常见厚大的钾长石化花岗岩带。

焦家式金矿蚀变岩具有明显的分带特征。以焦家金矿为例,沿控矿断裂常发育稳定的断层泥,

两侧上、下盘的蚀变岩大致呈带状对称分布。根据蚀变类型、原岩及原岩破碎程度,自内向外划分为黄铁绢英岩化碎裂岩(糜棱岩)带、黄铁绢英岩化花岗质(变辉长岩质)碎裂岩带和黄铁绢英岩化花岗质(变辉长岩)带。各蚀变岩带之间呈渐变过渡接触,由内向外岩石的破碎和蚀变程度递减。不同矿化蚀变带控制不同的矿体,金矿体主要产于断裂带下盘的黄铁绢英岩化碎裂岩(糜棱岩)带和黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩带内,黄铁绢英岩化花岗质带内则分布有小规模的石英脉型金矿(图3)。

断裂分区	变形分带特征		蚀变岩分带特征				矿化分带特征		
	构造岩类型	变形强度	蚀变岩类型	厚度/m	蚀变强度	蚀变类型	矿体产出	矿石类型	岩/矿石结构
断裂上盘	TTG变质岩	弱	TTG变质岩		无		次要工业矿体	无矿化	粒状变晶结构 块状、片麻状构造
	碎裂状XXX岩	较弱	弱黄铁绢英岩化XXX岩	35 ~ 170	较弱	绢云母化、硅化、钾化		网脉状、脉状	粒状变晶结构 花岗结构 块状、片麻状构造
	XXX质碎裂岩	强	弱黄铁绢英岩化XXX质碎裂岩	15 ~ 75	强	绢云母化、硅化 黄铁矿化、绿泥石化 碳酸盐化		浸染状 网脉状	碎裂结构 斑杂状、块状构造
	花岗质角砾岩	强	弱黄铁绢英岩化碎裂岩	5 ~ 40	强			浸染状	碎裂结构 斑杂状构造
断裂中心	断层泥	极强	断层泥	0.05 ~ 0.40	微弱	无蚀变	主要工业矿体 少量工业矿体	一般无矿化	泥质结构、块状构造
断裂下盘	糜棱岩 碎裂岩 角砾岩	强	黄铁绢英岩化碎裂岩/碎斑岩 黄铁绢英岩化糜棱岩	5 ~ 30	强	绢英岩化、黄铁矿化		稠密浸染状 团块状	碎裂结构 糜棱结构 角砾结构 角砾状、斑杂状构造
	花岗质碎裂岩	强	黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩	20 ~ 65	强	绢英岩化、硅化 黄铁矿化		浸染状、细脉-脉状、团块状	碎裂结构 斑杂状构造
	碎裂状花岗岩	较弱	黄铁绢英岩化花岗岩	55 ~ 170	较弱	绢英岩化、硅化 黄铁矿化		细脉-网脉状、脉状、星散状	花岗结构 块状构造
	钾化花岗岩	弱	钾化花岗岩	50 ~ 300	弱	钾化		网脉状、脉状	碎裂结构、花岗结构 块状构造
	正常花岗岩	弱	正常花岗岩		无			脉状	花岗结构 块状构造

图 3 焦家式金矿构造-蚀变-矿化分带模式 (据李士先等, 2007 修改)

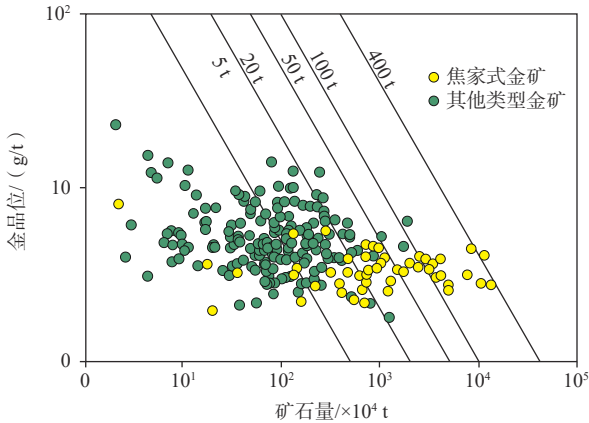
Fig. 3 Structure-alteration-mineralization zoning model of the Jiaojia-type gold deposit (modified by Li et al., 2007)

对三山岛-新立、焦家-新城、台上-水旺庄和大尹格庄 4 个典型矿床中各蚀变岩分带金资源储量的统计表明, 断裂带下盘的黄铁绢英岩化碎裂岩(糜棱岩)带和黄铁绢英化花岗质碎裂岩带内的金资源储量分别达到了总量的 34.00% 和 52.57%, 占各矿床资源量的绝大多数。断裂带下盘全部蚀变岩带的金资源储量占比达 98% 以上, 而上盘金资源储量占比不足 2%, 推测成矿期断层泥对成矿物质起到了明显的阻挡、渗滤作用。

2.3 规模、吨位和品位特征

焦家式金矿主矿体规模较大且矿化连续稳定, 形态相对简单, 多为脉状、似层状和透镜状, 可见分支复合、膨胀夹缩现象。浅部矿体形态多为相对复杂的脉状、透镜状, 深部矿体形态相对较简单, 多为脉状。三山岛-新立、焦家-新城、台上-水旺庄和大尹格庄 4 个典型焦家式金矿矿床的主矿体走向长一般为 1000~3000 m, 最长为 6280 m; 倾斜深一般为 500~2000 m, 最深为 3200 m; 揭露厚度一般为 5~30 m, 最厚可达 125.64 m。

截至 2020 年底, 对胶东各矿床的金资源储量和平均品位取对数后统计可知(图 4): 以焦家式金矿为代表(焦家式金矿查明金资源储量占蚀变岩型金矿查明总量的 96.48%)的蚀变岩型金矿床整体品位虽然较低, 但矿床规模大, 占据了胶东地区大多数大型金矿床, 其中包括金资源储量在 100 t 以上的超大型金矿床有 14 个, 进一步表明焦家式金矿的经济价值巨大。



其他类型金矿包含石英脉型、石英脉-蚀变岩型和斑岩型

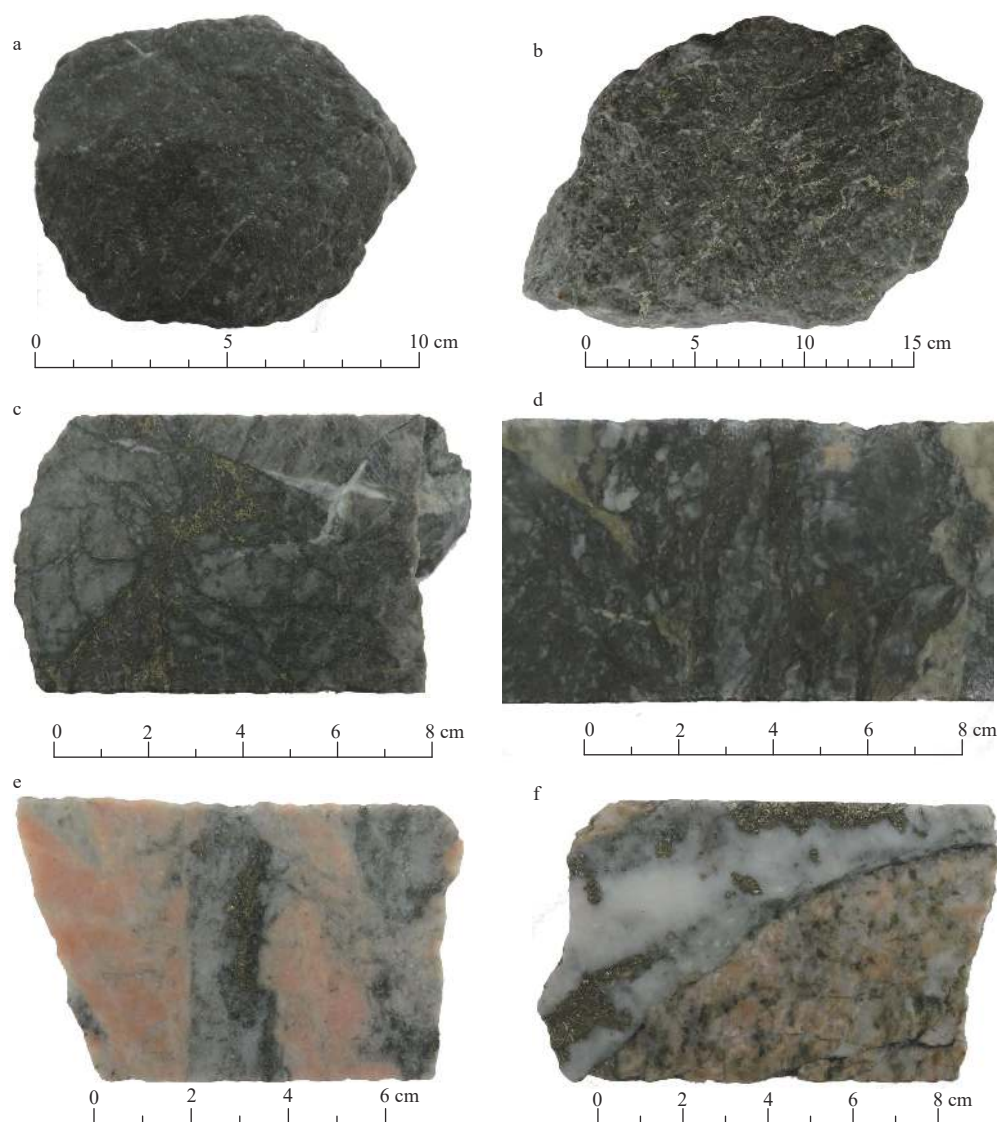
图 4 胶东各类型金矿吨位-品位图

Fig. 4 Tonnage-grade diagram of various gold deposit types in the Jiaodong area

Note: Other gold deposits include quartz vein, quartz vein-alteration and porphyry.

2.4 矿石和物质组成特征

焦家式金矿矿石类型主要有 3 种, 分别为浸染状黄铁绢英岩化碎裂岩型、浸染状-细脉状-脉状黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩型和细脉状-网脉状黄铁绢英岩化花岗岩型, 前 2 种为各矿床内的主要矿石类型(图 5)。矿石结构以晶粒状结构为主, 其次还有碎裂结构、填隙结构、包含结构、交代残余结构、交代假象结构、文象结构和乳滴状结构等。矿石构造以浸染状、脉状、细脉浸染状以及斑点状构造为



a、b—浸染状黄铁绢英岩化碎裂岩型；c、d—浸染状-细脉状-网脉状黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩型；e、f—细脉状-网脉状黄铁绢英岩化花岗岩型

图5 焦家式金矿床典型类型金矿石照片

Fig. 5 Typical gold ore photograph of the Jiaojia-type gold deposit

(a、b) Disseminated pyrite sericite cataclastic type; (c、d) Disseminated-veined-reticulated porphyritic sericite granitic cataclastic type; (e、f) Veined-reticulated pyritic sericitization granite type

主,其次为角砾状及交错脉状构造。

焦家式金矿物质组成较为单一,矿石主要有益组份除金外,银含量可达到伴生有益组分的工业指标,硫经选矿富集可以综合开发利用。矿石中主要金属矿物为黄铁矿,其次为方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、毒砂、磁黄铁矿、褐铁矿和磁铁矿等。主要非金属矿物为石英、绢云母、长石,次之为碳酸盐类矿物(方解石、白云石、菱铁矿等)。金矿物主要为银金矿,其次有自然金、金银矿。金属硫化物以黄铁矿为主,其次为方铅矿。金的赋存状态主要为晶

隙金,其次为裂隙金,少量包体金。

3 焦家式金矿的成矿模式研究与成矿预测

随着焦家式金矿勘查的全面开展和不断深入,在金矿成矿时代、成矿动力学背景、成矿物质来源和物理化学条件演化、成矿模式构建等方面的研究取得了众多重要进展。研究成果丰富完善了焦家式金矿的成矿理论体系,使得成矿预测更加准确可靠,有力地指导了胶东地区的金矿勘查。

3.1 焦家式金矿的成矿模式研究

焦家式金矿提出后, 众多学者以焦家式金矿为研究对象, 开展了矿床成因、成矿规律和成矿模式等研究, 构建了地层提供初始物质来源、岩浆岩提供直接物质来源、断裂构造提供成矿空间的焦家式金矿成矿模式。该模式有效指导了山东乃至全国金矿的勘查工作部署, 并取得了巨大找矿成果。

3.1.1 成矿时代

焦家式金矿的成矿时代研究经历了从争议较大到基本统一的历程。早期大多学者(沈保丰和骆辉, 1994; 杨敏之和吕古贤, 1996)认为其为早前寒武纪成矿, 后期大部分学者普遍认为成矿时代是燕山期(胡世玲等, 1987; Wang et al., 1998; Yang and Zhou, 2000, 2001; Qiu et al., 2002; 毛景文等, 2002; 王义文, 2002b; 陈衍景等, 2004)。

20世纪90年代末以来, 利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年技术, 对招远—莱州地区与金矿关系密切的郭家岭序列花岗岩及成矿后花岗斑岩脉进行年代学测试。郭家岭序列花岗岩的形成年龄为 130~126 Ma, 成矿后花岗斑岩脉的成岩年龄为 120±2 Ma(苗来成等, 1997; 关康等, 1998)。利用热液独居石原位 U-Pb 测年(Deng et al., 2020a)、绢云母 Ar-Ar 测年(Li et al., 2003, 2006; Zhang et al., 2003, 2020; 胡芳芳等, 2006; Yang et al., 2014)等方法获得了基本一致的测年结果。目前, 胶东地区金矿的成矿年龄厘定为 126~120 Ma, 这为研究金矿成矿事件发生提供了准确的年代学依据。

3.1.2 成矿大地构造背景

中生代构造体制的转变是导致胶东地区大规模金成矿的主导因素。一般认为胶东地区大规模爆发性成矿发生于华南—华北克拉通后碰撞挤压和伊泽奈崎(Izanagi)板块快速斜冲剪切的双重构造环境及其后的拉张构造环境中, 构造体制转换事件是大规模成矿作用发生的基础(叶杰等, 2002; 周新华等, 2002; 刘建明等, 2003a, 2003b; 陈衍景等, 2004; 邓军等, 2004; 范宏瑞等, 2005; 李俊建等, 2005)。Deng et al.(2020b)进一步推断古太平洋俯冲板片回撤生成板片窗, 诱发地幔楔中蛇绿岩在低于其熔融温度下快速脱挥发分, 释放地幔楔中储存的含金 H₂O-CO₂ 流体, 导致巨量金在中—上地壳北北东—北东向断裂构造系统中汇聚成矿。郯庐断裂带印支中晚期已深切上地幔, 将岩石圈中的地幔薄弱带连接成树枝状网络, 为新生软流圈流体的上升提供

了良好的通道, 因而被认为是形成胶东地区大型—超大型矿床的关键性因素(万天丰等, 1996; 任云生等, 1997; 邓军等, 2000; 翟裕生等, 2000; 赫英等, 2002; 沈远超等, 2003)。

胶东金矿集区的形成和演化与深部地质构造的关系也取得了进展。中—新生代板块俯冲挤压, 地幔上隆, 导致莫霍面呈波状起伏, 其实质是深部地质构造特征的显示, 反映幔隆与幔凹的交替产出。邓军等(2000)认为, 胶东金矿集区相对于周边的地幔隆起区, 莫霍面高出 2~3.5 km, 不同部位金成矿系统聚矿功能不同, 表现为凹陷区的局部隆起部位金成矿强度明显小于其他地段。孙丰月(1994)结合胶东地区暗色岩脉群和碱性玄武岩的分布特征认为, 地幔在中—新生代发生活动, 推测其与地幔柱上升有关, 是中生代花岗岩形成所需热力的重要来源, 并为金矿化提供了一定的物质来源。王登红等(1999)认为, 胶东金矿可能受到渤海地幔柱构造的制约与影响, 金主要来自于深部或地幔柱的头部。孙景贵等(2000a, 2000b)通过对胶东金矿集中区成矿规律和地球物理信息的综合研究, 认为胶东地区可能存在一个规模较大的中生代地幔热柱—幔枝热构造。牛树银等(2002)进一步指出, 胶西北金矿的集中与深部莱阳地幔亚热柱和郭家店幔枝构造的形成与演化密切相关, 深源金元素以气态—气液混合态—含矿流体的形式, 通过地幔柱—地幔亚热柱—幔枝构造向控矿构造迁移。总的看来, 越来越多的研究者肯定了胶东地区大规模金矿化的深部因素。

基于金矿产出的大地构造背景研究, 早期学者提出了绿岩带型金矿或构造期后再生型金矿(骆辉, 1993; 沈保丰等, 1993, 1997; 沈保丰和骆辉, 1994; 李洪志和吴悦斌, 1995; 于又华和程玉明, 1996; 杨敏之和吕古贤, 1996; 翟裕生等, 2001)。后期随着造山型金矿理论的兴起, 又有诸多学者将胶东金矿归类于造山型金矿(Goldfarb et al., 2001; Qiu et al., 2002; Zhou et al., 2002; 陈衍景等, 2004; 蒋少涌等, 2009; 李洪奎等, 2011; 郭春影等, 2011); 但是也有人提出不同的意见(周军等, 2001; 翟明国等, 2004; 蒋少涌等, 2009; 杨立强等, 2014; Goldfarb and Santosh, 2014), 认为胶东地区金矿与典型造山型金矿明显不同。近年来, 也有学者提出了“克拉通破坏型金矿”(朱日祥等, 2015)“胶东型金矿”(周军等, 2001; 翟明国等, 2004; 李士先等, 2007; 杨立强等, 2014; 宋明春等, 2018; 邓军等, 2023), 并得到了

越来越多的认可。

3.1.3 成矿物质来源

关于岩浆岩对金矿成矿贡献的认识历来争议较大。裘有守(1987)推测栾家河花岗岩是形成金矿成矿热液主要来源;姚凤良等(1990)也认为含金成矿热液与栾家河花岗岩来自同一岩浆源;而陈光远等(1989)和曹国权(1992)则坚持认为郭家岭花岗岩是对金矿成矿有利的岩浆岩;宋明春等(2013)依据胶东金矿成矿时代与伟德山花岗岩时代相接近,认为胶东金矿的形成与伟德山花岗岩及其脉岩有关。总的看来,胶东金矿在空间上与玲珑花岗岩、栾家河花岗岩及郭家岭花岗岩相关,在时间上与郭家岭花岗岩关系最为密切,花岗岩类侵入体与金矿化之间是同源产物,这一认识得到了许多学者的认可(张韞璞和文子中, 1983; 黄德业, 1991, 1994; 张韞璞, 1997; 苗来成等, 1999; 李士先等, 2007; 李洪奎等, 2011; 吕古贤等, 2013)。

基于成矿地质体研究,以六队为代表的学者认为,成矿物质来源与古老结晶基底相关。原胶东岩群与金矿关系密切,变质过程中中—基性火山岩内的成矿物质活化、迁移,形成金的高背景区,胶东岩群为金的矿源岩(张韞璞和文子中, 1983)。李士先等(2007)称胶东岩群变质岩系为胶东金矿的原始矿源岩系,邓军等(2001)认为胶东岩群正变质岩的原岩建造——太古代拉斑玄武岩为含金初始矿源岩。

同位素研究证实成矿物质具有多源性。邓军等(2001)提出了胶东金矿成矿流体的多源性,即存在地幔富 C-H-O 流体、中—下部地壳富硅流体和浅—表部富硫 3 个流体循环系统。3 个层次流体相互沟通混合,导致流体混合持续时间增长,萃取围岩有用元素增多,成矿元素丰度升高,并最终形成金矿集中区。周新华等(2002)研究发现胶东地区典型金矿 Sr、Nd 和 Pb 同位素组成反映的成矿物质来源具有多元性和幔源物质参与成矿的信息。毛景文等(2002, 2005)对胶东金矿进行了 S、H、O、C、N 同位素测定,发现地幔流体参与胶东金矿成矿作用;此外,对石英脉型—破碎带蚀变岩型和角砾岩型金矿进行 C、H、O 同位素测定分析,认为 2 类金矿属于同一成矿系统,在石英脉型—破碎蚀变岩型矿石中可见深刻的地幔流体和岩浆流体的“烙印”(毛景文等, 2002)。

3.1.4 成矿阶段与物理化学条件

众多学者对胶东金矿的成矿阶段进行了研究。黄德业(1991, 1994)通过稳定同位素研究论证

了 2 期成矿作用的叠加特征,认为主成矿期金矿化与郭家岭期花岗岩有关,伴生金—银成矿期则与艾山岩体关系密切。王义文等(2002a)详细统计了 2 期金矿化截然不同的 $\delta^{34}\text{S}$ 特征,主成矿期,蚀变岩型 $\delta^{34}\text{S}$ 为 7‰~12‰;伴生成矿期,金、银、铅锌矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 为 -4‰~+4‰。杨金中和李光明(2001)、刘连登等(2002)分析了 2 期金矿化作用,认为其分别形成于陆内(地体)碰撞(俯冲)的挤压动力学环境和陆内拉张裂谷带环境。研究者(张成基, 2005; 李洪奎等, 2014; 于学峰等, 2016)依据岩浆成矿专属性对胶东地区中生代以来岩浆—热液—成矿事件进行了成矿系列划分,认为存在 3 期成矿作用,后 2 个成矿系列分别与郭家岭花岗岩和伟德山花岗岩具有成因联系,与金矿主成矿期和金多金属成矿期对应。

关于胶东金矿的主成矿期成矿阶段的划分,目前有 4 阶段(王燕和卢作祥, 1988)、5 阶段(姚凤良等, 1990)和 6 阶段(陈光远等, 1989)等不同的方案。其中,王燕和卢作祥(1988)根据矿脉的穿插包裹关系将主成矿期划为 4 个成矿阶段:石英—黄铁矿阶段(I)、含金黄铁矿—石英阶段(II)、石英—多金属硫化物阶段(III)、石英—碳酸盐阶段(IV)。该划分方案得到了较广泛的认可(罗镇宽和苗来成, 2002; 范宏瑞等, 2005; 李士先等, 2007),为深入研究成矿作用提供了依据。

流体包裹体研究表明,胶东金矿床的成矿流体为 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}\pm\text{CH}_4$ 流体,成矿温度为中温,成矿压力为中等,流体表现为中—低盐度,流体密度为 0.6~1.0 g/cm³。在成矿过程中随温度、压力逐渐降低,盐度和 CO_2 包裹体密度也随之降低(赵宏光等, 2005)。第 I 成矿阶段:成矿温度为 403~250 °C,成矿压力为 300~100 MPa;第 II、III 成矿阶段:成矿温度为 335~170 °C,成矿压力为 250~70 MPa;第 IV 成矿阶段:成矿温度降为 228~96 °C(范宏瑞等, 2005)。成矿流体变化特征为第 I 成矿阶段的成矿流体为贫金流体,第 II、III 成矿阶段的流体富 CO_2 与 CH_4 (邓军等, 2005)。由此推测主成矿期成矿流体富集 CO_2 与 CH_4 ,有利于吸附基底变质岩系与侵入岩中的金元素,使成矿流体由贫金流体变为富金流体,同时引起流体的各项物理化学参数发生变化,使金易于沉淀(Benning and Seward, 1996)。在成矿过程中,成矿物理化学参数趋于递减或递增,流体由氧化状态向还原状态逐步过渡(潘瑞广, 2013; 罗栋, 2014; 张潮等, 2016)。林文蔚和殷秀兰(1998)研究指出在高温阶段成矿流体以岩浆水为主,在低温阶

段以大气降水为主。

3.1.5 成矿深度及变化

一般采用流体包裹体压力计对焦家式金矿的成矿深度进行估算, 但不同学者的研究结果不同。吕古贤(1995, 1997)利用构造校正测算方法, 估算焦家金矿 I、II 号矿体的形成深度为 2243.6m, 其深度是指构造、岩石和矿床形成时的上覆岩石厚度。孙丰月等(2000)统计胶东金矿的成矿压力绝大多数介于 40~100 MPa, 估算成矿深度为 4~8.25 km。李碧乐等(2009)通过含 CO₂ 三相流体包裹体压力估算玲珑金矿 52 号脉群成矿深度为 5~12.7 km, 集中在 6.8~9.5 km, 认为玲珑金矿深部金资源潜力较好。郭春影等(2012)通过流体包裹体压力和花岗岩形成深度综合分析, 认为胶东金矿床成矿深度上限为 2~3 km, 成矿深度下限为 5~8 km。Deng et al.(2019)认为焦家式金矿的形成深度为 5~10 km, 为浅—中深成矿床。张琪彬等(2022)通过低温热年代学方法

估算焦家巨型金矿床的剥蚀厚度为 5.2 ± 1.2 km, 判定矿床形成后被剥蚀的深度不大, 认为焦家式金矿向深部具有较好的找矿前景。

伴随着深部找矿的不断研究, 宋明春等(2011)创建了胶东金矿“热隆—伸展”成矿理论和胶西北金矿“阶梯式”成矿模式。“热隆—伸展”成矿理论指出, 在中国东部中生代岩石圈减薄背景下, 胶东地区形成了壳幔混合型花岗岩和上地壳中的伸展拆离构造, 岩浆活动为金矿形成提供了主要的物源、热源和流体; 伸展拆离构造为金矿成矿提供了有利空间(图 6)。“阶梯式”成矿模式则结合深部找矿实践进一步提出主控矿构造为铲式断裂, 沿断裂倾向分布若干个由陡变缓的台阶, 金矿体产于缓倾的台阶部位, 构成阶梯式的分布形式。“阶梯式”成矿模式的提出, 科学地解释了焦家式金矿深部是否有矿及赋矿部位等制约深部找矿的关键问题, 引领了深部找矿的重大突破(朱训, 2016)。

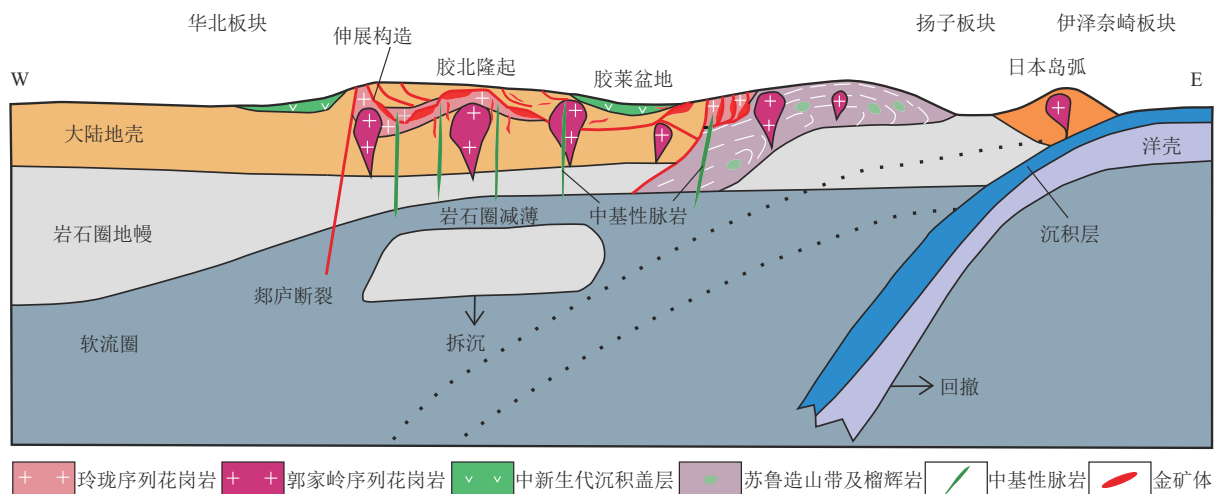


图 6 胶东金矿区域成矿模式图 (据宋明春等, 2014b 修改)

Fig. 6 Regional metallogenetic model of the Jiaodong gold deposit (modified by Song et al., 2014b)

3.2 成矿预测

3.2.1 区域成矿潜力评价

胶东金矿成矿预测工作始于 20 世纪 80 年代, 1981—1987 年, 六队和原长春地质学院联合开展了山东省金矿资源总量预测工作。利用蒙特卡罗方法和回归分析模型在胶东圈定了矿田级预测单元 36 处, 预测胶东地区 1000 m 以浅金矿资源总量为 3026 t。之后 20 余年在其预测单元中发现了旧店、大柳行、金城、宋格庄和西林等金矿床, 累计探明的新增金矿资源量与预测结果大致相当(李士先和王建收, 2006)。

1993—1994 年, 六队在胶西北主要成矿带开展了大比例尺成矿预测。1993 年完成了《山东省胶东西北部焦家金矿带 1:2.5 万金矿成矿预测报告》(常乃焕, 1993), 1994 年完成了《山东省胶东西北部招远—平度断裂带 1:5 万金矿成矿预测报告》(常乃焕, 1994)。在综合信息研究基础上, 采用数学模型—特征分析、逻辑信息法、数量化理论、多元回归分析和蒙特卡洛模拟等方法, 预测焦家矿带的金矿资源总量为 993 t, 采用多元回归分析数学法定量评价招远—平度断裂带的金矿资源总量为 849 t。后续的勘查开发证实, 截止 2019 年底, 焦家金矿田内累计查

明金矿资源储量大于 1300 t, 招(远)-平(度)金矿带内累计查明金矿资源储量大于 1000 t。

2001—2002 年, 六队开展了山东省焦家成矿带深部大比例尺金矿成矿预测研究, 采用综合信息成矿预测方法, 共圈定靶区 11 个, 预测金矿资源总量为 632 t。该预测结果经后期勘探验证, 预测资源量远小于实际探明资源量。

2007—2012 年, 六队完成的《山东省金矿资源潜力评价成果报告》(温桂军, 2011), 采用矿床模型综合地质信息预测技术, 预测 2000 m 以浅胶东地区的金资源量为 3963 t。目前, 胶东地区已探明金资源储量超过 5000 t, 最大勘探深度已超过 2000 m。

2017—2020 年, 六队完成的《深部金矿资源评价理论、方法与预测报告》(宋明春等, 2020), 以相似类比和惯性理论为指导思想, 提出了基于阶梯式成矿模式的深部成矿靶区预测方法, 依据三维地质模型、地球物理信息和地球化学信息在胶西北地区圈出 7 处深部找矿靶区; 采用基于浅部金矿资源量的深部资源潜力预测方法, 预测胶西北地区三山岛、焦家、招平 3 大成矿带 5000 m 以浅金资源总量为 7258~10150 t, 显示了焦家式金矿深部的巨大找矿潜力。

3.2.2 矿床(体)定位预测

(1) 矿床地质勘查模型

通过三山岛-新立、焦家-新城、台上-水旺庄、

大尹格庄 4 处典型矿床研究发现, 焦家式金矿深部普遍存在第二甚至第三富集带, 受构造活动形成的波状起伏面控制。三山岛-仓上断裂带控制矿体主要赋存于控矿构造产状由缓变陡的波峰部位, 而龙口-莱州和招远-平度断裂带控制矿体则主要赋存于控矿构造产状由陡变缓的波谷部位。

矿体分布与富集表现出一定的规律性。首先, 各富集带具有稳定的倾伏方向。当控矿断裂带倾向为北西向时, 矿体向南西向倾伏; 当断裂倾向为南东向时, 矿体向北东向倾伏。三山岛-仓上断裂带和招远-平度断裂带倾向为南东-南东东向, 矿体均向北东向倾伏; 龙口-莱州断裂带倾向为北西-北西西向, 矿体均向南西向倾伏。其次, 各富集带沿倾伏方向呈现分段富集的特征, 富集段之间为弱矿化段或无矿化段, 而且向深部富集段之间间距有增大趋势。在倾向上同样呈现分段富集的规律, 且深、浅部富集段富集中心在垂向上基本相互对应。

以招远-平度断裂带为例, 按上述规律性认识建立矿床地质勘查模型(图 7): ①区域性北东-北北东向招远-平度断裂带是主控矿构造, 主要金矿体均产于断裂带下盘 0~150 m 范围黄铁绢英岩化碎裂岩及黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩带内, 具有数量少、规模大、产状稳定的特征; ②矿体常赋存于断裂的倾角变化部位, 沿断裂倾角陡缓转折部位容

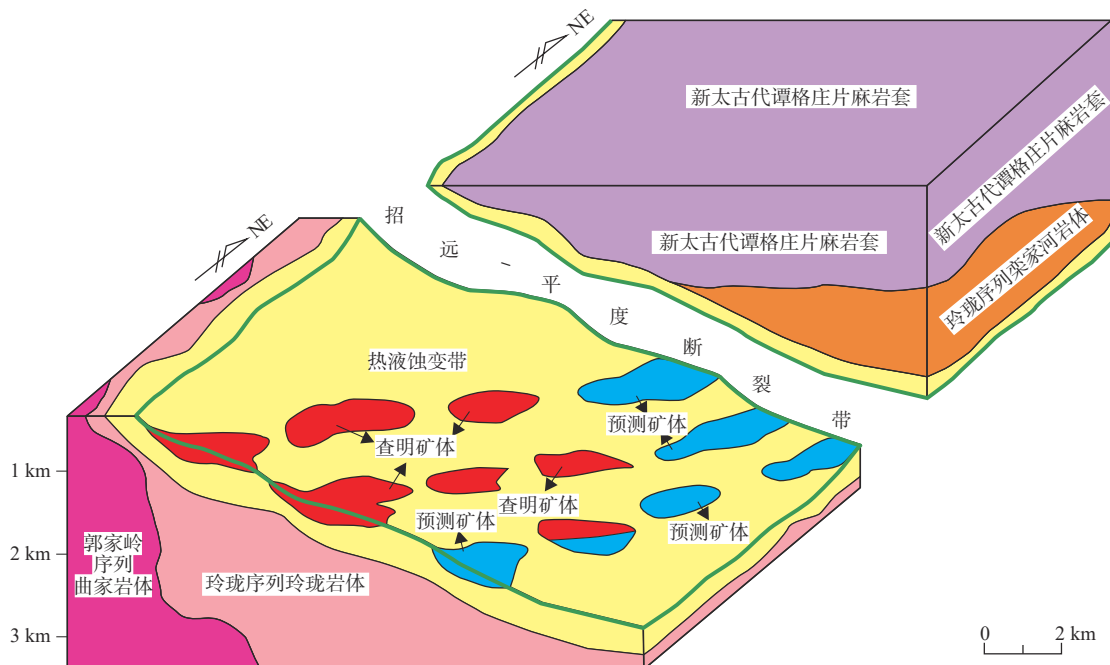


图 7 台上-水旺庄金矿床地质勘查模型

Fig. 7 Geological exploration model of the Taishang-Shuiwangzhuang gold deposit

易富集成矿;③矿区内由浅到深已基本揭露2个平行产出的矿化富集带,深部第三矿化富集带则控制程度较低,具有一致的北东东向倾伏趋势;④矿化富集带沿倾伏方向具有分段富集规律,富集段中心近似等间距韵律式交替出现,向深部富集段间距逐步变大。基于该模型,根据浅部矿体或矿化体的产状即可推断出矿体向深部的倾伏方位,预判矿体的空间位置,增加找矿的成功率。

(2) 深部矿体定位预测

六队在找矿实践中建立了深部金矿勘查模型“成矿构造带+高精度地球物理探测+阶梯式成矿模式”:选择已知的成矿构造带,实施高精度精细地球物理探测确定赋矿断裂带延深和深部产状变化,按

照阶梯式成矿模式对断裂倾角由陡变缓的有利成矿区段布置钻探验证。将成矿模式与地球物理模型有机融合,突破传统的以圈定激电异常为目标的浅表部金矿找矿思路,创造了以识别控矿断裂向深部倾角变化的台阶位置为目标的深部金矿找矿方法。

深部勘查前期,山东省物化探勘查院开展了三山岛和焦家金矿田典型矿床深部物探综合剖面测量,利用重力、磁法、可控源音频大地电磁测深(CSAMT)和大地电磁测深(MT)综合物探手段查明了断裂带深部分布特征(曹春国等,2012)。该剖面的重、磁、电反演模拟计算地质模型见图8,实测重磁剖面曲线与理论曲线具有良好的拟合性,反映了模型的合理性。反演模拟计算结果表明,早前寒武

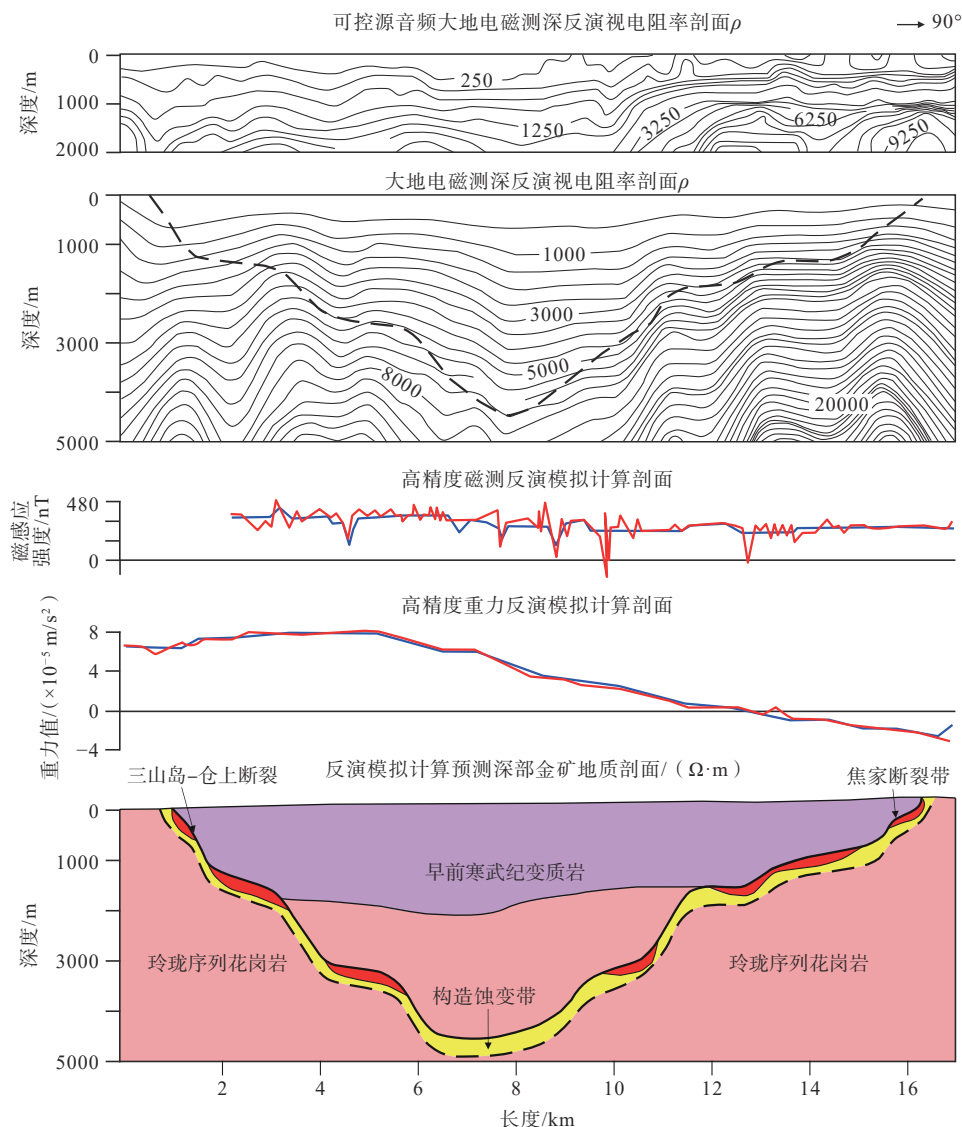


图8 三山岛-焦家金矿田重磁联合反演模拟计算的地质剖面图(据曹春国等,2012修改)

Fig. 8 Geological profile of the combined gravity and magnetic inversion simulation of the Sanshandao-Jiaojia gold field (modified by Cao et al., 2012)

纪结晶基底呈残留体的形式分布于三山岛-焦家断裂带之间,控矿断裂带呈阶梯状分布且向深部斜切入玲珑序列花岗岩内。依据物探成果结合阶梯式成矿模式圈出了6处深部成矿有利构造部位(图8),后期深孔验证也证明了预测的可靠性。

在物探厘定深部构造产状的基础上,结合成矿规律研究,对三山岛-新立等4处典型的焦家式金矿开展深部矿体定位预测(图9),共预测深部靶区10处。其中,三山岛-新立金矿床深部预测靶区2处,编号分别为A1和A2。A1位于已控制第一富

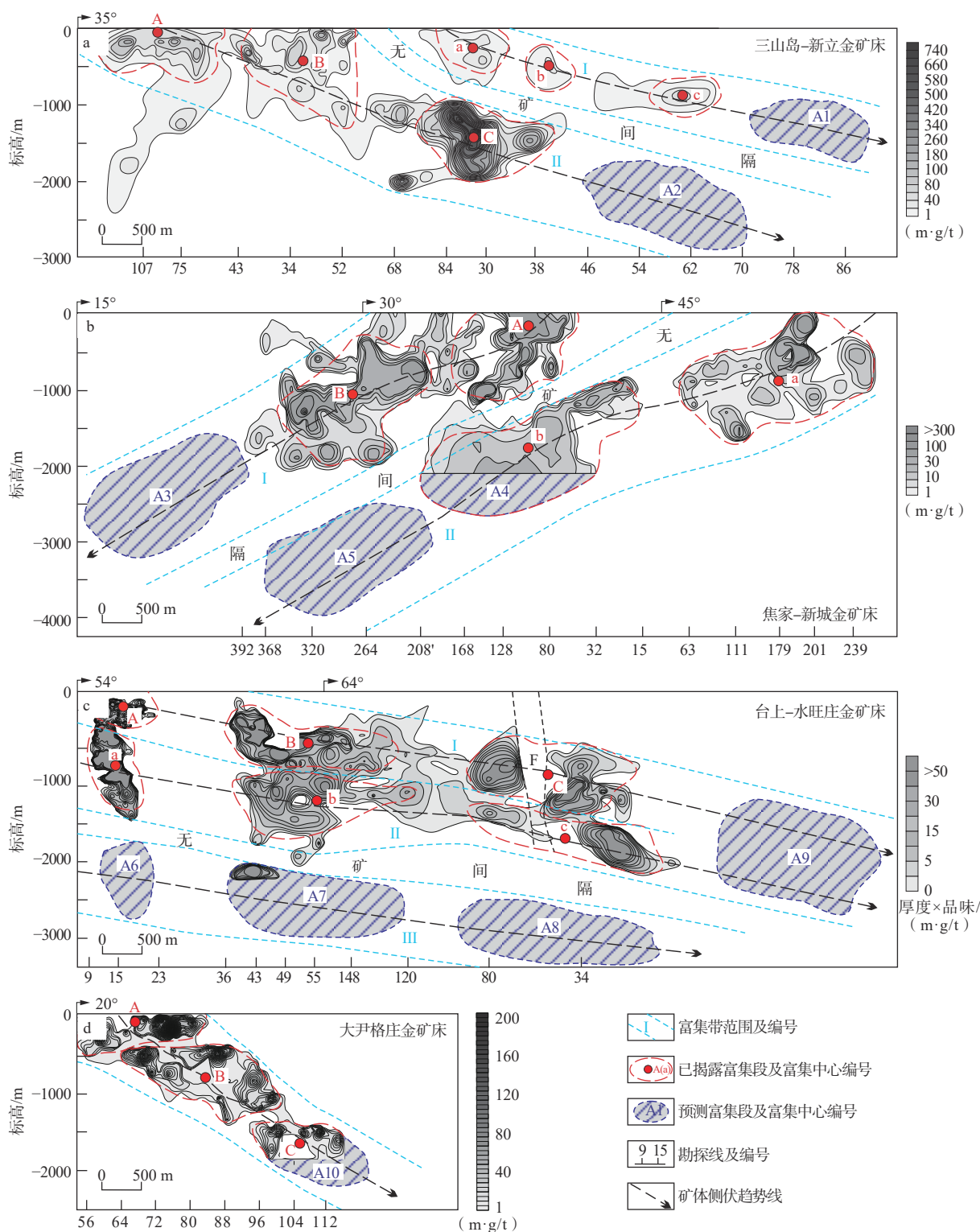


图9 焦家式金矿典型矿床矿化富集规律及成矿预测图

Fig. 9 Mineralization enrichment regularity and metallogenic prediction of the typical Jiaojia-type gold deposit

集带向深部尖灭再现的另一富集段, A2 位于目前已控制第二富集带向深部尖灭再现的另一富集段。焦家-新城金矿床深部预测靶区 3 处, 编号分别为 A3、A4 和 A5。A3 位于已控制第一富集带向深部尖灭再现的另一富集段, A4 位于已揭露第二富集带内第 2 富集段向深部的延伸, A5 位于已控制第二富集带内向深部尖灭再现的另一富集段。台上-水旺庄金矿床深部预测靶区 4 处, 编号为 A6—A9。A6—A8 位于初步揭露的第三富集带内, 分别与浅部第一、二富集带内富集段相对应, A9 位于已控制第一、二富集带内向深部尖灭再现的另一富集段。大尹格庄金矿床深部预测靶区 1 处, 编号为 A10, 为已控制第 3 富集段向深部的延伸。需要指出的是, 此次预测的 10 处靶区仅依据地质规律圈定, 后期需要结合高精度地球物理探测和化探研究结果, 进一步限定靶区位置。

4 焦家式金矿勘查实践

焦家式金矿的发现打破了当时地学界“大断裂只导矿不储矿”的传统认识, 拓展了金矿勘查的新

空间。焦家式金矿发现后, 广大学者不断深化和发展焦家式成矿理论体系, 创新发展金矿勘查技术方法, 在山东乃至全国取得了显著的金矿找矿效果。

4.1 焦家式金矿的勘查历程

截至 2020 年底, 在三山岛-仓上、龙口-莱州、招远-平度和西林-陡崖 4 条断裂带内累计发现焦家式金矿床 52 个, 包括特大型 (≥ 50 t) 17 个、大型 (20~50 t、含 20 t) 13 个、中型 (5~20 t、含 5 t) 13 个、小型 (< 5 t) 9 个 (图 10), 累计提交金资源储量 3617.12 t。按照各矿床勘查时间和深度, 可大致将焦家式金矿勘查历史划分为浅部勘查 (截至 20 世纪 90 年代中期) 和深部勘查 (20 世纪 90 年代中期至今) 2 个勘查阶段。

4.1.1 浅部勘查阶段

焦家式金矿的发现, 引领了胶东地区金矿勘查的第一轮热潮。1966—1995 年, 山东省地质勘查队伍在胶西北地区发现和勘查了焦家式金矿床 23 个, 其中包括三山岛、焦家、新城特大型金矿床 3 个, 仓上、河西、河东、上庄、破头顶、台上、大尹格庄等大型矿床 7 个, 中小型金矿床 13 个。

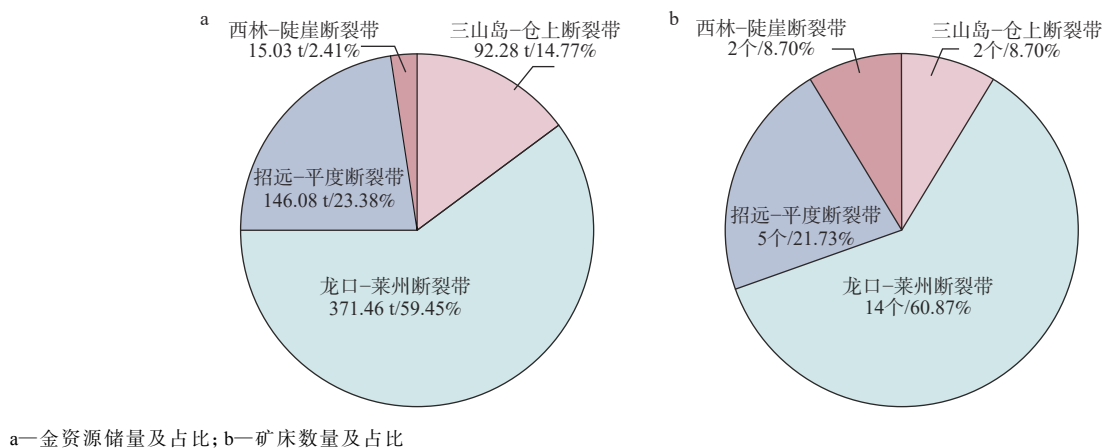


图 10 浅部勘查阶段各成矿带提交金资源储量和查明矿床数量及其占比

Fig. 10 Ratio of submitted gold resources and quantity of identified deposits in each metallogenic belt during the shallow exploration stage

(a) Gold resource reserves; (b) Proportion of deposits

浅部勘查阶段累计提交金资源储量 618.71 t, 各区域性控矿构造内累计提交金资源储量及查明矿床数量占比详见图 10。该阶段各重要金矿的整体勘查深度, 一般不超过 600 m, 仅招远-平度断裂带上的台上、大尹格庄等少数矿床局部勘查深度超过 600 m。

4.1.2 深部勘查阶段

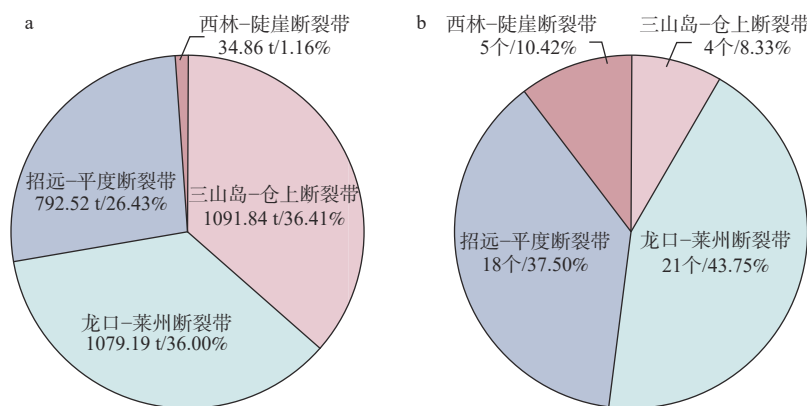
焦家式金矿于 21 世纪初进入了深部找矿阶

段。其中, 2002—2006 年间, 六队在龙口-莱州断裂带寺庄矿区深部-500~-1000 m 标高间探获金资源储量达 51.83 t 的特大型金矿床, 是焦家式金矿深部找矿具有里程碑意义的成果, 引领了深部勘查的新热潮。

1996—2020 年间, 累计在胶西北地区发现焦家式金矿 48 个, 其中包括北部海域、西岭、三山岛、寺庄、朱郭李家、纱岭、前陈、曲家、东季-南吕、南

吕-欣木、东风、水旺庄、玲南、姜家窑、夏甸等特大型金矿床 15 个, 红布、招贤、陈家-小涝洼、河

东、河西、望儿山、李家庄、后仓、曹家洼等大型金矿床 9 个, 中型金矿床 15 个, 小型金矿床 9 个(图 11)。



a—金资源储量及占比; b—矿床数量及占比

图 11 深部勘查阶段各成矿带提交金资源储量和查明矿床数量及其占比

Fig. 11 Ratio of submitted gold resources and quantity of identified deposits in each metallogenic belt during the deep exploration stage

(a) Gold resource reserves; (b) Proportion of deposits

深部勘查阶段累计提交新增金资源储量 2998.41 t, 各区域性控矿构造内累计提交金资源储量及查明矿床数量占比详见图 11。深部勘查阶段经历了初期勘查深度 1000 m 以浅, 中期勘查深度 1000~2000 m, 后期勘查深度 2000~3000 m 甚至更深。目前最大的勘查深度为 2008—2010 年在三山岛-仓上成矿带深部施工的孔深 4006.17 m 科研钻, 被称为“中国岩金勘探第一深钻”。此外, 2016—2017 年在龙口-莱州成矿带深部施工的孔深 3266.06 m 的钻孔, 被称为“中国岩金第一见矿深钻”(于学峰等, 2019); 2018—2021 年在招远-平度成矿带深部施工了 3 个超过 3000 m 的科研钻。

4.2 焦家式金矿的关键勘查技术方法

4.2.1 浅部勘查技术方法

焦家式金矿控矿断裂带覆盖比较严重, 地球物理、地球化学勘查技术方法在找矿中发挥了良好作用。勘查前期开展的工作主要有重力、磁法、激电联剖、激发极化法、土壤和岩石测量、水系沉积物测量、土壤中气汞量测量等(顾留成和肖霏岳, 1990)。万国普(1994)对磁法、电法等常规物探方法进行了总结, 建立了焦家式金矿的地质-地球物理找矿模型。

20 世纪 60 年代前, 中国的金矿勘查主要沿用苏联石英脉型金矿的勘查规范; 60 年代末, 六队在焦家式金矿勘查过程中, 针对金矿规模大、品位变化小的特点, 经过多次试验和演算改进, 将苏联规

范中坑探取样间距由 1.5 m 放稀至 5 m, 断面取样规格采用最小 7 cm×3 cm, 在掌握矿石品位变化规律后合并缩减取样个数, 大大缩减了以往复杂繁琐的工作量。同时, 对坑道刻槽及钻孔取样进行试验对比, 提出了利用钻孔代替坑道探求高级别储量的技术方案。在样品加工中, 通过对样品加工系数的试验及加工流程的改进, 大大节省了人力、物力、财力, 加快了矿床评价速度(李士先, 2015)。

4.2.2 深部勘查技术方法

勘查技术创新是深部金矿勘查取得突破的关键因素。在深部勘查中, 大功率激电、激电测井、可控源音频大地电磁(CSAMT)、频谱激电(SIP)、大地电磁(MT)等物探方法被广泛应用; 反射地震、广域电磁(WFEM)、电性源短偏移距瞬变电磁(SOTEM)、微动测深等方法也得以应用。其中, 利用综合物探资料, 对三山岛断裂带与焦家断裂带之间早前寒武纪变质岩系和中生代花岗岩的深部空间分布进行了圈定; 利用高磁、重力、MT 和 CSAMT 手段, 推断解释了焦家断裂带与三山岛断裂带深部的空间展布和形态(图 8); 结合成矿规律和找矿标志开展深部成矿预测, 圈定了 6 处深部成矿靶区, 验证获得成功(曹春国等, 2012)。

宋明春等(2020)系统梳理优选了深度 2000 m 以浅以及 2000~5000 m 深度的金矿探测的有效地球物理方法组合: 2000 m 以浅的最佳技术方法组合以“频率域电磁测深法+SIP 测量”为主, 重力勘探

辅助。探测深度 2000~5000 m 成矿结构面的最佳技术方法组合为,在微弱—中等强度的噪声干扰区,使用“大地电磁测深/广域电磁法+重力勘探+地震勘探”;在强烈电磁干扰区(如矿区、城镇等),采用以“重力勘探+地震勘探”为主、广域电磁法为辅的技术方法组合。

钻探技术为深部金矿勘查提供了重要保障。从 2006—2019 年,山东省地矿局三队和六队在三山岛金矿区施工了孔深 4006.17 m 的“中国岩金勘探第一深钻”。山东省地矿局三队自主研发的简易海上地质钻探平台和自升式浅海钻探平台“探海 1 号”成功完成了国内最大海上勘探项目,实现了焦家式金矿勘查由陆域向海域的进军(刘建奎和陈师逊, 2019)。

5 结论

焦家式金矿 50 余年的勘查、研究实践表明,地质找矿与成矿理论研究密不可分,只有充分研究总结找矿实践中发现的各类地质现象,运用最新的科学技术手段进行探索解释,才能更清晰地认识地质成矿规律。

(1)焦家式金矿是受区域性构造破碎带控制、成矿期普遍发生黄铁绢英岩化蚀变而形成的一种金矿床类型,其成矿特征是规模大、蚀变分带明显、矿化集中、矿体形态简单、品位相对均匀、矿物组合简单。

(2)焦家式金矿与郭家岭花岗岩具有密切的时空关系,金矿成矿年龄为 126~120 Ma;成矿物质具有多源性,太古代拉斑玄武岩为含金初始矿源岩;矿床形成深度约为 5~10 km,成矿后剥蚀厚度为 5.2±1.2 km,未受到大范围剥蚀,矿床保存较好;“热隆—伸展”成矿理论和“阶梯式”成矿模式的提出,科学地解释了焦家式金矿成矿过程及原理,解决了深部是否有矿和赋矿部位等关键问题。

(3)焦家式金矿床累计提交金资源储量 3617.12 t (截至 2020 年底),找矿勘查历史划分为浅部和深部 2 个阶段。浅部勘查阶段为 20 世纪 90 年代中期前,勘查深度为 600 m 以浅,累计探获金资源量 618.71 t;深部勘查阶段为 20 世纪 90 年代中期至今,勘查深度为 600 m 以深,累计探获金资源量 2998.41 t。

(4)焦家式金矿地球物流探测方法组合为:2000 m 以浅以矿化体为探测目标,最佳技术方法组

合是以“频率域电磁测深法+SIP 测量”为主、重力勘探辅助;2000~5000 m 以识别控矿断裂向深部倾角变化的台阶位置为探测目标,最佳技术方法组合为“大地电磁测深/广域电磁法+重力勘探+地震勘探”。

致谢:此文是集体工作成果,包含了几十年来在山东从事金矿勘查与研究的地质工作者的成果,在此向他们致敬;感谢为山东金矿勘查做出贡献的地质工作者们,也感谢全国金矿地质工作者对胶东金矿找矿的关注。

References

- BENNING L G, SEWARD T M, 1996. Hydrosulphide complexing of Au (I) in hydrothermal solutions from 150-400 °C and 500-1500bar[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(11): 1849-1871.
- CAO C G, YU Y W, GUO G Q, et al., 2012. Analysis on ore-forming model in deep part of Jijia gold deposit in Sanshandao by using integrated geophysical exploration method[J]. *Shandong Land and Resources*, 28(4): 19-24. (in Chinese with English abstract)
- CAO G Q, 1992. Opinions on doing a good job of Jiaojia-type gold deposit summary[R]. Jinan: Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. (in Chinese)
- CHANG N H, 1993. The metallogenic prediction report of 1: 25, 000 gold deposits in Jiaojia gold belt, northwestern Jiaodong, Shandong Province[R]. Weihai: No. 6 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. (in Chinese)
- CHANG N H, 1994. The metallogenic prediction report of 1: 50000 gold deposit in Zhaoyuan-Pingdu fault zone in the northwest of Jiaodong, Shandong Province[R]. Weihai: No. 6 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. (in Chinese)
- CHEN G Y, SHAO W, SUN D S, 1989. Genetic mineralogy of gold deposits and prospecting Jiaodong gold deposit[M]. Chongqing: Chongqing Publishing House. (in Chinese)
- CHEN Y J, PIRAJNO F, LAI Y, et al., 2004. Metallogenic time and tectonic setting of the Jiaodong gold province, eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(4): 907-922. (in Chinese with English abstract)
- DENG J, XU S L, LYU G X, et al., 1996. Researches of fracture structure and mineralization in northwest Jiaodong[J]. *Geoscience*, 10(4): 502-511. (in Chinese with English abstract)
- DENG J, YANG L Q, FANG Y, et al., 2000. Crust-mantle interaction and ore-forming effect of gold ore deposits concentrated area in Jiaodong, Shandong, China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 35(1): 60-70. (in Chinese with English abstract)
- DENG J, YANG L Q, LIU W, et al., 2001. Gold origin and fluid ore-forming effect of Zhao-ye ore deposits concentrating area in Jiaodong, Shandong, China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 36(3): 257-268. (in Chinese with English abstract)
- DENG J, WANG Q F, YANG L Q, et al., 2004. The geological settings to the

- gold metallogeny in northwestern Jiaodong Peninsula, Shandong Province[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 527-533. (in Chinese with English abstract)
- DENG J, WANG Q F, YANG L Q, et al., 2005. An analysis of the interior structure of the gold hydrothermal metallogenic system of the northwestern Jiaodong Peninsula, Shandong Province[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 30(1): 102-108. (in Chinese with English abstract)
- DENG J, YANG L Q, LI R H, et al., 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(1): 378-391.
- DENG J, QIU K F, WANG Q F, et al., 2020a. In situ dating of hydrothermal monazite and implications for the geodynamic controls on ore formation in the Jiaodong gold province, eastern China[J]. *Economic Geology*, 115(3): 671-685.
- DENG J, YANG L Q, GROVES D I, et al., 2020b. An integrated mineral system model for the gold deposits of the giant Jiaodong province, eastern China[J]. *Earth-Science Reviews*, 208: 103274.
- DENG J, WANG Q F, ZHANG L, et al., 2023. Metallogenetic model of Jiaodong-type gold deposits, eastern China[J]. *Science China Earth Sciences*, 66(10): 2287-2310.
- FAN H R, HU F F, YANG J H, et al., 2005. Fluid evolution and large-scale gold metallogeny during Mesozoic tectonic transition in the eastern Shandong province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5): 1317-1328. (in Chinese with English abstract)
- GOLDFARB R J, GROVES D I, GARDOLL S, 2001. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 18(1-2): 1-75.
- GOLDFARB R J, SANTOSH M, 2014. The dilemma of the Jiaodong gold deposits: are they unique?[J]. *Geoscience Frontiers*, 5(2): 139-153.
- GU L C, XIAO F Y, 1990. Application of geophysico-geochemical methods in reconnaissance survey of the Jiaojia typed gold deposits[J]. *Geology of Shandong*, 6(2): 11-35. (in Chinese with English abstract)
- GUAN K, LUO Z K, MIAO L C, et al., 1998. Shrimp in zircon chronology for Guojialing suite granite in Jiaodong Zhaoye district[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 33(3): 318-328. (in Chinese with English abstract)
- GUO C Y, ZHANG W Z, GE L S, et al., 2011. Spatial-temporal distribution and prospecting potential of orogenic gold deposits in China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(S1): 340-341. (in Chinese)
- GUO C Y, ZHANG W Z, GE L S, et al., 2012. Deep prospecting potential of gold deposits in the northwestern Jiaodong Peninsula and their ore-search direction[J]. *Geology and Exploration*, 48(1): 58-67. (in Chinese with English abstract)
- GUO Z Y, SUN X Z, 1983. The main tectonic system of Shandong Province and its relationship with some minerals[M]. Beijing: Geology Press. (in Chinese)
- HE Y, ZHANG Z J, MAO J W, et al., 2002. Effect of the Tan-Lu fault on the formation of mineral deposits and oil-gas fields[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 26(1): 10-15. (in Chinese with English abstract)
- HU F F, FAN H R, YANG J H, et al., 2006. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating age of sericite from altered rocks in the Rushan lode gold deposit, Jiaodong peninsula and its constraints on the gold mineralization[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 25(2): 109-114. (in Chinese with English abstract)
- HU S L, WANG S S, SANG H Q, et al., 1987. Isotopic ages of Linglong and Guojialing batholiths in Shangdong province and their geological implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 3(3): 83-89. (in Chinese with English abstract)
- HUANG D Y, 1991. A discussion on the ore-forming stages and times of endogenous gold in East Shandong province[J]. *Mineral Resources and Geology*, 5(2): 81-89. (in Chinese with English abstract)
- HUANG D Y, 1994. Sulfur isotope studies of the metallogenic series of gold deposits in Jiaodong (eastern Shandong) area[J]. *Mineral Deposits*, 13(1): 75-87. (in Chinese with English abstract)
- JIANG S Y, DAI B Z, JIANG Y H, et al., 2009. Jiaodong and Xiaolinling: two orogenic gold provinces formed in different tectonic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2727-2738. (in Chinese with English abstract)
- LI B L, WANG L, HUO L, et al., 2009. Characteristics and genesis of ore-forming fluid in 52 # vein group of Linglong gold deposit in Jiaodong[J]. *Progress in Natural Science*, 19(1): 51-60. (in Chinese)
- LI H K, LI Y F, GENG K, et al., 2011. Study on the orogenic type gold deposits in eastern Shandong province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(4): 533-542. (in Chinese with English abstract)
- LI H K, YANG Y B, GENG K, et al., 2014. Division scheme and basic characteristics of tectonic facies research methods in Shandong Province[J]. *Shandong Land and Resources*, 30(4): 1-12. (in Chinese with English abstract)
- LI H Z, WU Y B, 1995. The geochemical characteristic of gold desposits in Jiaodong greenstone belt[J]. *Journal of Precious Metallic Geology*, 4(4): 241-246. (in Chinese with English abstract)
- LI J J, LUO Z K, LIU X Y, et al., 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 J W, VASCONCELOS P M, ZHANG J, et al., 2003. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ constraints on a temporal link between gold mineralization, magmatism, and continental margin transtension in the Jiaodong gold province, eastern China[J]. *The Journal of Geology*, 111(6): 741-751.
- LI J W, VASCONCELOS P M, ZHOU M F, et al., 2006. Geochronology of the Pengjiakuang and Rushan gold deposits, eastern Jiaodong gold province, northeastern China: implications for regional mineralization and geodynamic setting[J]. *Economic Geology*, 101(5): 1023-1038.
- LI S X, WANG J S, 2006. Potentiality and ore exploration of Linglong-Jiaojia type gold resource in Jiaodong area[J]. *Shandong Land and Resources*, 22(12): 36-41. (in Chinese with English abstract)
- LI S X, LIU C C, AN Y H, et al., 2007. Geology of gold deposits in Jiaodong[M]. Beijing: Geology Press. (in Chinese)
- LI S X, 2015. Recalling the comprehensive geological research and prospecting of the six teams[G]. National Science and Technology Progress Award "The discovery of a new type of Jiaojia gold deposit and its outstanding prospecting effect" Historical review (internal data of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources). (in Chinese)
- LIN W W, YIN X L, 1998. Isotope geological characteristics of mineralizing

- fluids of gold deposits in Jiaodong area and a discussion on the application conditions of H. P. Taylor's equation[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 17(3): 249-259. (in Chinese with English abstract)
- LIU J K, CHEN S X, 2019. Technological innovation promotes the continuous advancement of deep drilling technology: summary of deep drilling technology development of Shandong Bureau of Geology and Mineral Resources[C]//Proceedings of the 20th national annual symposium on academic exchanges in prospecting engineering (geotechnical drilling and excavation engineering). Beijing: Geological Publishing House: 9-19. (in Chinese)
- LIU J M, YE J, XU J H, et al., 2003a. C-O and Sr-Nd isotopic geochemistry of carbonate minerals from gold deposits in East Shandong, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 775-784. (in Chinese with English abstract)
- LIU J M, ZHANG H F, SUN J G, et al., 2004. Geochemical research on C—O and Sr—Nd isotopes of mantle-derived rocks from Shandong Province, China[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 47(2): 171-180.
- LIU L D, CHEN G H, ZHANG H H, et al., 2002. Two geodynamic settings for mineralization in Jiaodong gold metallogenetic region[J]. *Mineral Deposits*, 21(S1): 36-39. (in Chinese)
- LUO D, 2014. Evolution of ore-forming fluids of Sanshandao gold deposit, Jiaodong peninsula, eastern China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- LUO H, 1993. Archean greenstone belt type gold deposit[J]. *Overseas Precambrian Geology*(3): 82-88. (in Chinese)
- LUO Z K, MIAO L C, 2002. Granites and gold deposits in Zhaoyuan-Lai Zhou Eara, eastern Shandong province[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press. (in Chinese)
- LYU G X, 1995. Research and calculation of metallogenic depth in Linglong gold ore field, Shandong Province[J]. *Chinese Science Bulletin*, 40(15): 1399-1402. (in Chinese)
- LYU G X, 1997. Metallogenic depth calculation and research methods in Linglong gold ore field and Jiaojia gold ore field, Shandong[J]. *Science in China (Series D)*, 27(4): 337-342. (in Chinese)
- LYU G X, WU J C, CUI S X, et al., 2013. Geology of Linglong gold Orefield, Jiaodong peninsula[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- MAO J W, HE Y, DING T P, 2002. Mantle fluids involved in metallogenesis of Jiaodong (East Shandong) gold district: evidence of C, O and H isotopes[J]. *Mineral Deposits*, 21(2): 121-128. (in Chinese with English abstract)
- MAO J W, LI H M, WANG Y T, et al., 2005. The relationship between mantle-derived fluid and gold ore-formation in the eastern Shandong Peninsula: evidences from D-O-C-S isotopes[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 839-857. (in Chinese with English abstract)
- MIAO L C, LUO Z K, HUANG J Z, et al., 1997. Zircon Sensitive High Resolution Ion Microprobe (SHRIMP) study of granitoid intrusions in Zhaoye gold belt of Shandong province and its implication[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 40(4): 361-369.
- MIAO L C, ZHAI Y S, ZHU C W, et al., 1999. Discussion on the relationship between granitoid intrusives and gold mineralization: a case study on Zhaoye gold belt, East Shandong province[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 20(S1): 332-336. (in Chinese with English abstract)
- NIU S Y, LI H Y, SUN A Q, et al., 2002. Mantle branch structure theory and exploration practice[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- No. 6 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology, 1977. Geological characteristics of altered rock type gold deposits in Jiaojia fracture zone, Shandong Province[R]. Weihai: No. 6 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. (in Chinese)
- No. 807 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology, 1969. Geological exploration report of Sanshandao gold mining area in Yexian, Shandong Province[R]. Weihai: No. 6 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. (in Chinese)
- PAN R G, 2013. Evolution of ore-forming fluids of Xinli gold deposit, Jiaodong peninsula, eastern China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- QIU Y M, GROVES D I, MCNAUGHTON N J, et al., 2002. Nature, age, and tectonic setting of granitoid-hosted, orogenic gold deposits of the Jiaodong Peninsula, eastern North China craton, China[J]. *Mineralium Deposita*, 37(3): 283-305.
- QIU Y S, 1987. The progress and prospect of gold mine geological research work in our institute[J]. *Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences*(16): 15-26. (in Chinese)
- REN Y S, LIN G, PENG X L, et al., 1997. Controlling of Tanlu fault system on gold deposits in the western part of Jiaodong Area, Shandong Province[J]. *Gold*, 18(2): 3-7. (in Chinese with English abstract)
- SHEN B F, PENG X L, LUO H, et al., 1993. Archean greenstone belts in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 67(3): 208-220. (in Chinese with English abstract)
- SHEN B F, LUO H, 1994. The metallogenetic characteristics of gold deposits of the archean greenstone belts in North China platform[J]. *Journal of Geology & Mineral Resources of North China*, 9(1): 87-96. (in Chinese with English abstract)
- SHEN B F, MAO D B, LI J J, 1997. Type and geological character of Chinese greenstone belts gold deposits[J]. *Progress in Precambrian Research*, 20(4): 1-12. (in Chinese with English abstract)
- SHEN Y C, ZENG Q D, LIU T B, et al., 2003. The Tanlu fault zone and gold ore metallogenesis[J]. *World Geology*, 22(1): 41-44. (in Chinese with English abstract)
- SONG M C, CUI S X, YI P H, et al., 2010. Prospecting and metallogenic model of deep large-super large deep gold deposits in the northwest of Jiaodong gold concentration area[M]. Beijing: Geology Press. (in Chinese)
- SONG M C, CUI S X, JIANG H L, 2011. Metallogenic structural system for Jiaojia gold field and Jiaoxibei gold deposits concentrated areas in Shandong Province, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(4): 573-578. (in Chinese with English abstract)
- SONG M C, SONG Y X, SHEN K, et al., 2013. Geochemical features of deeply-seated gold deposit and discussions on some associated problems in Jiaojia gold ore field, Shandong Peninsula, China[J]. *Geochimica*,

- 42(3): 274-289. (in Chinese with English abstract)
- SONG M C, SONG Y X, DING Z J, et al., 2018. Jiaodong gold deposits: essential characteristics and major controversy[J]. *Gold Science and Technology*, 26(4): 406-422. (in Chinese with English abstract)
- SONG M C, ZHOU M L, LI S Y, et al., 2020. Study on the theory, method and prediction of deep gold resources evaluation[R]. Weihai: No. 6 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. (in Chinese)
- SUN F Y, 1994. Mesozoic-cenozoic regional tectonic evolution and gold Mineralization in Jiaodong area, Shandong province[J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 24(4): 378-384. (in Chinese with English abstract)
- SUN F Y, JIN W, LI B L, et al., 2000. Thoughts on metallogenic depth about hydrothermal lode gold deposits[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 30(S1): 27-29. (in Chinese)
- SUN J G, HU S X, LING H F, et al., 2000a. Element geochemistry and origin of high potassic-potassic dike rocks in two types of goldfields in Northwest Jiaodong, Shandong, China[J]. *Geochimica*, 29(2): 143-152. (in Chinese with English abstract)
- SUN J G, HU S X, LING H F, et al., 2000b. Study on the geochemistry and subduction-crust mantle interaction of the high potassium-potassium dike rocks in gold deposits concentration zone of east Shandong, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3): 401-412. (in Chinese with English abstract)
- WAN G P, 1994. Geologic-geophysical prospecting model for the gold deposits of crush-zone-altered & rock type in Jiaodong (Eastern Shandong)[J]. *Geology of Shandong*, 10(2): 41-50. (in Chinese with English abstract)
- WAN T F, ZHU H, ZHAO L, et al., 1996. Formation and evolution of Tancheng-Lujiang fault zone: a review[J]. *Geoscience*, 10(2): 159-168. (in Chinese with English abstract)
- WANG D H, LIN W W, YANG J M, et al., 1999. Controlling effects of the mantle plume on the Jiaodong and Dian-Qian-Gui gold-concentration areas[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 20(2): 157-162. (in Chinese with English abstract)
- WANG L G, QIU Y M, MCNAUGHTON N J, et al., 1998. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the Northwestern Jiaodong Peninsula, China, from SHRIMP U-Pb zircon studies of granitoids[J]. *Orb Geology Reviews*, 13(1-5): 275-291.
- WANG S C, CHENG Q M, FAN J Z, 1989. Modelling of gold deposit prospecting[J]. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 19(3): 311-316. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y, LU Z X, 1988. The zoning of gold deposit of Jiaojia type in Zhao-Ye metallogenic belt, Shandong province[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 13(2): 137-146. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y W, ZHU F S, GONG R T, 2002a. Tectonic isotope geochemistry: further study on sulphur isotope of Jiaodong Gold Concentration Area[J]. *Gold*, 23(4): 1-16. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y W, ZHU F S, GONG R T, 2002b. Study on the metallogenic chronology of gold deposits in Jiaodong gold concentration zone[J]. *Gold Geology*, 8(4): 48-55. (in Chinese with English abstract)
- WEN G J, 2011. Evaluation results report of gold resources potential in Shandong province[R]. Weihai: No. 6 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. (in Chinese)
- YANG J H, ZHOU X H, 2000. The Rb-Sr isochron of ore and pyrite subsamples from Linglong gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China and their geological significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 45(24): 2272-2277.
- YANG J H, ZHOU X H, 2001. Rb-Sr, Sm-Nd, and Pb isotope systematics of pyrite: implications for the age and genesis of lode gold deposits[J]. *Geology*, 29(8): 711-714.
- YANG J Z, LI G M, 2001. Comparison of different mineralizations in mesozoic and its significance in Jiaodong region, Shandong province[J]. *Geology and Prospecting*, 37(1): 33-37. (in Chinese with English abstract)
- YANG L Q, DENG J, GOLDFARB R J, et al., 2014. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints on the formation of the Dayingezhuang gold deposit: new implications for timing and duration of hydrothermal activity in the Jiaodong gold province, China[J]. *Gondwana Research*, 25(4): 1469-1483.
- YANG L Q, DENG J, WANG Z L, et al., 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 M Z, LYU G X, 1996. The geology-geochemistry of gold deposits of the greenstone belt in Jiaodong district, China[M]. Beijing: Geology Press. (in Chinese)
- YAO F L, LIU L D, KONG Q C, et al., 1990. Gold lodes in the northwestern part of the Jiaodong peninsula[M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press. (in Chinese)
- YE J, LIU J M, LI Y B, et al., 2002. Discussion on geodynamic background of mesozoic gold metallogeny in Shandong[J]. *Mineral Deposits*, 21(S1): 755-758. (in Chinese with English abstract)
- YU X F, ZHANG T Z, WANG H, et al., 2016. A study of minerogenetic series of mineral deposits in Shandong Province[J]. *Mineral Deposits*, 35(1): 169-184. (in Chinese with English abstract)
- YU X F, YANG D P, LI D P, et al., 2019. Mineralization characteristics and geological significance in 3000m depth of Jiaojia gold metallogenic belt, Jiaodong Peninsula[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9): 2893-2910. (in Chinese with English abstract)
- YU Y H, CHENG Y M, 1996. The metallogenic environment and regularity of greenstone belt gold deposits of North China platform[J]. *Gold Science and Technology*, 4(1): 5-11. (in Chinese)
- ZHAI M G, FAN H R, YANG J H, et al., 2004. Large-scale cluster of gold deposits in east Shandong: anorogenic metallogenesis[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 85-98. (in Chinese with English abstract)
- ZHAI Y S, DENG J, PENG R M, 2000. Research contents and methods for post-ore changes, modifications and preservation[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 25(4): 340-345. (in Chinese with English abstract)
- ZHAI Y S, DENG J, DING S J, et al., 2001. Discussion on critical transition of ore-forming parameters (factors)[J]. *Mineral Deposits*, 20(4): 301-306. (in Chinese with English abstract)

- ZHANG C, HUANG T, LIU X D, et al., 2016. Hydrothermal alteration of the Xincheng gold deposit, northwestern Jiaodong, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(8): 2433-2450. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG C J, 2005. Primary study on regional-deposit forming lineage in Shandong province[J]. *Shandong Land and Resources*, 21(2): 30-38. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG L, WEINBERG R F, YANG L Q, et al., 2020. Mesozoic orogenic gold mineralization in the Jiaodong peninsula, China: a focused event at 120±2 Ma during cooling of pregold granite intrusions[J]. *Economic Geology*, 115(2): 415-441.
- ZHANG Q B, SONG M C, DING Z J, et al., 2022. Exhumation history and preservation of the Jiaojia giant gold deposit, Jiaodong Peninsula[J]. *Science China Earth Sciences*, 65(6): 1161-1177.
- ZHANG X O, CAWOOD P A, WILDE S A, et al., 2003. Geology and timing of mineralization at the Cangshang gold deposit, north-western Jiaodong Peninsula, China[J]. *Mineralium Deposita*, 38(2): 141-153.
- ZHANG Y P, WEN Z Z, 1983. Jiaojia-type gold deposit geology in Shandong province[M]. Yantai: The Sixth Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. (in Chinese)
- ZHANG Y P, 1997. Study on metallogenic regularity and prospecting direction of large-medium gold deposits in Jiaodong area of Shandong Province[R]. Weihai: No. 6 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. (in Chinese)
- ZHAO H G, SUN J G, LING H F, et al., 2005. Characteristics and geological significance of ore-forming fluids in the Jiaodong gold deposits[J]. *Geology and Exploration*, 41(5): 27-33. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU J, LIU J C, WANG R T, et al., 2001. Gold metallogeny of the Shandong peninsula gold province, China[J]. *Journal of Xi'an Engineering University*, 23(3): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU T H, GOLDFARB R J, PHILLIPS N G, 2002. Tectonics and distribution of gold deposits in China-an overview[J]. *Mineralium Deposita*, 37(3): 249-282.
- ZHOU X H, YANG J H, ZHANG L C, 2003. Metallogenesis of superlarge gold deposits in Jiaodong region and deep processes of subcontinental lithosphere beneath North China Craton in Mesozoic[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 46(1): 14-25.
- ZHU R X, FAN H R, LI J W, et al., 2015. Decratonic gold deposits[J]. *Science China Earth Sciences*, 58(9): 1523-1537.
- ZHU X, 2016. Series of books on ore prospecting[M]. Beijing: Geology Press. (in Chinese)
- 预测报告[R].威海:山东省地质勘查局第六地质大队.
- 陈光远,邵伟,孙岱生,1989.胶东金矿成因矿物学与找矿[M].重庆:重庆出版社.
- 陈衍景,PIRAJNO F,赖勇,等,2004.胶东矿集区大规模成矿时间和构造环境[J].岩石学报,20(4): 907-922.
- 邓军,徐守礼,吕古贤,等,1996.胶东西北部断裂构造与成矿作用研究[J].现代地质,10(4): 502-511.
- 邓军,杨立强,方云,等,2000.胶东地区壳-幔作用与金成矿效应[J].地质科学,35(1): 60-70.
- 邓军,杨立强,刘伟,等,2001.胶东招掖矿集区巨量金质来源和流体成矿效应[J].地质科学,36(3): 257-268.
- 邓军,王庆飞,杨立强,等,2004.胶西北金矿集区成矿作用发生的地质背景[J].地学前缘,11(4): 527-533.
- 邓军,王庆飞,杨立强,等,2005.胶东西北部金热液成矿系统内部结构解析[J].地球科学—中国地质大学学报,30(1): 102-108.
- 邓军,王庆飞,张良,等,2023.胶东型金矿成因模型[J].中国科学:地球科学,53(10): 2323-2347.
- 范宏瑞,胡芳芳,杨进辉,等,2005.胶东中生代构造体制转折过程中流体演化和金的大规模成矿[J].岩石学报,21(5): 1317-1328.
- 顾留成,肖霏岳,1990.物化探方法在“焦家式”金矿普查中的应用[J].山东地质,6(2): 11-35.
- 关康,罗镇宽,苗来成,等,1998.胶东招掖郭家岭型花岗岩锆石 SHRIMP 年代学研究[J].地质科学,33(3): 318-328.
- 郭春影,张文钊,葛良胜,等,2011.中国造山型金矿床时空分布及找矿前景[J].矿物学报,31(S1): 340-341.
- 郭春影,张文钊,葛良胜,等,2012.胶东西北部金矿床深部资源潜力与找矿方向[J].地质与勘探,48(1): 58-67.
- 郭振一,孙秀珠,1983.山东省主要构造体系及其与某些矿产的关系[M].北京:地质出版社.
- 赫英,张战军,毛景文,等,2002.初论郯庐断裂的成藏成矿效应[J].大地构造与成矿学,26(1): 10-15.
- 胡芳芳,范宏瑞,杨进辉,等,2006.胶东乳山金矿蚀变岩中绢云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其对金成矿事件的制约[J].矿物岩石地球化学通报,25(2): 109-114.
- 胡世玲,王松山,桑海清,等,1987.山东玲珑和郭家岭岩体的同位素年龄及其地质意义[J].岩石学报,3(3): 83-89.
- 黄德业,1991.胶东内生金矿成矿期次和成矿时代的讨论[J].矿产与地质,5(2): 81-89.
- 黄德业,1994.胶东金矿成矿系列硫同位素研究[J].矿床地质,13(1): 75-87.
- 蒋少涌,戴宝章,姜耀辉,等,2009.胶东和小秦岭:两类不同构造环境中的造山型金矿省[J].岩石学报,25(11): 2727-2738.
- 李碧乐,王力,霍亮,等,2009.胶东玲珑金矿 52°脉群成矿流体特征及成因[J].自然科学进展,19(1): 51-60.
- 李洪奎,李逸凡,耿科,等,2011.山东鲁东碰撞造山型金矿成矿作用探讨[J].大地构造与成矿学,35(4): 533-542.
- 李洪奎,杨永波,耿科,等,2014.山东大地构造相研究方法划分方案与基本特征[J].山东国土资源,30(4): 1-12.
- 李洪志,吴悦斌,1995.胶东绿岩型金矿地质地球化学特征[J].贵金属地质,4(4): 241-246.
- 李俊建,罗镇宽,刘晓阳,等,2005.胶东中生代花岗岩及大型-超大

附中文参考文献

- 曹春国,于义文,郭国强,等,2012.综合物探技术在三山岛断裂带与焦家断裂带深部成矿模式中的应用[J].山东国土资源,28(4): 19-24.
- 曹国权,1992.对做好《焦家式》金矿总结的意见[R].济南:山东省地矿局.
- 常乃焕,1993.山东省胶东西北部焦家金矿带 1: 2.5 万金矿成矿预测报告[R].威海:山东省地质勘查局第六地质大队.
- 常乃焕,1994.山东省胶东西北部招远-平度断裂带 1: 5 万金矿成矿

- 型金矿床形成的地球动力学环境[J]. 矿床地质, 24(4): 361-372.
- 李士先, 王建收, 2006. 胶东“玲珑-焦家式”金矿资源潜力与找矿[J]. 山东国土资源, 22(12): 36-41.
- 李士先, 刘长春, 安郁宏, 等, 2007. 胶东金矿地质[M]. 北京: 地质出版社.
- 李士先, 2015. 回忆六队地质综合研究与找矿[G]. 国家科学技术进步奖特等奖《焦家式新类型金矿的发现及其突出的找矿效果》历史回顾文汇. 济南: 山东省地矿局.
- 林文蔚, 殷秀兰, 1998. 胶东金矿成矿流体同位素的地质特征[J]. 岩石矿物学杂志, 17(3): 249-259.
- 刘建奎, 陈师逊, 2019. 科技创新推动深部钻探技术不断前行: 山东地矿局深部钻探技术发展综述[C]//第二十届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集. 北京: 地质出版社: 9-19.
- 刘建明, 叶杰, 徐九华, 等, 2003a. 胶东金矿床碳酸盐矿物的碳-氧和铈-钕同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 19(4): 775-784.
- 刘建明, 张宏福, 孙景贵, 等, 2003b. 山东幔源岩浆岩的碳-氧和铈-钕同位素地球化学研究[J]. 中国科学(D辑), 33(10): 921-930.
- 刘连登, 陈国华, 张辉煌, 等, 2002. 世界级胶东金矿集中区两类成矿地球动力学环境[J]. 矿床地质, 21(S1): 36-39.
- 罗栋, 2014. 胶东三山岛金矿床成矿流体演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 骆辉, 1993. 太古宙绿岩带金矿[J]. 国外前寒武纪地质(3): 82-88.
- 罗镇宽, 苗来成, 2002. 胶东招徕地区花岗岩和金矿床[M]. 北京: 冶金工业出版社.
- 吕古贤, 1995. 山东省玲珑金矿田成矿深度的研究与测算[J]. 科学通报, 40(15): 1399-1402.
- 吕古贤, 1997. 山东玲珑金矿田和焦家金矿田成矿深度的测算与研究方法[J]. 中国科学(D辑), 27(4): 337-342.
- 吕古贤, 武际春, 崔书学, 等, 2013. 胶东玲珑金矿田地质[M]. 北京: 科学出版社.
- 毛景文, 赫英, 丁梯平, 2002. 胶东金矿形成期间地幔流体参与成矿过程的碳氧氢同位素证据[J]. 矿床地质, 21(2): 121-128.
- 毛景文, 李厚民, 王义天, 等, 2005. 地幔流体参与胶东金矿成矿作用的氢氧碳硫同位素证据[J]. 地质学报, 79(6): 839-857.
- 苗来成, 罗镇宽, 黄佳展, 等, 1997. 山东招徕金矿带内花岗岩类侵入体锆石 SHRIMP 研究及其意义[J]. 中国科学(D辑), 27(3): 207-213.
- 苗来成, 翟裕生, 朱成伟, 等, 1999. 花岗岩类侵入体与金矿化关系探讨: 以胶东招徕成矿带为例[J]. 地球学报, 20(S1): 332-336.
- 牛树银, 李红阳, 孙爱群, 等, 2002. 幔枝构造理论与找矿实践[M]. 北京: 地震出版社.
- 潘瑞广, 2013. 胶东新立金矿床成矿流体演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 裴有守, 1987. 我所金矿地质研究工作的进展与展望[J]. 中国地质科学院沈阳地质矿产研究所刊(16): 15-26.
- 任云生, 蒯刚, 彭晓蕾, 1997. 郯庐断裂构造系统对胶东西部地区金矿的控制作用[J]. 黄金, 18(2): 3-7.
- 山东省地质局 807 队, 1969. 山东掖县三山岛金矿区地质勘探报告[R]. 威海: 山东省地质局地质调查局第六地质大队.
- 山东省地质局第六地质队, 1977. 山东省焦家式破碎带蚀变岩型金矿地质特征[R]. 威海: 山东省地质局地质调查局第六地质大队.
- 沈保丰, 彭晓亮, 骆辉, 等, 1993. 中国太古宙绿岩带[J]. 地质学报, 67(3): 208-220.
- 沈保丰, 骆辉, 1994. 华北陆台太古宙绿岩带金矿的成矿特征[J]. 华北地质矿产杂志, 9(1): 87-96.
- 沈保丰, 毛德宝, 李俊建, 1997. 中国绿岩带型金矿床类型和地质特征[J]. 前寒武纪研究进展, 20(4): 1-12.
- 沈远超, 曾庆栋, 刘铁兵, 等, 2003. 郯庐断裂与金矿成矿[J]. 世界地质, 22(1): 41-44.
- 宋明春, 崔书学, 伊丕厚, 等, 2010. 胶西北金矿集中区深部大型-超大型金矿找矿与成矿模式[M]. 北京: 地质出版社.
- 宋明春, 崔书学, 姜洪利, 2011. 山东胶西北矿集区和焦家金矿田成矿构造系统[J]. 地质通报, 30(4): 573-578.
- 宋明春, 宋英昕, 沈昆, 等, 2013. 胶东焦家深部金矿床地球化学特征及有关问题讨论[J]. 地球化学, 42(3): 274-289.
- 宋明春, 宋英昕, 丁正江, 等, 2018. 胶东金矿床: 基本特征和主要争议[J]. 黄金科学技术, 26(4): 406-422.
- 宋明春, 周明岭, 李世勇, 等, 2020. 深部金矿资源评价理论、方法与预测研究[R]. 威海: 山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队.
- 孙丰月, 1994. 胶东地区中生代区域构造演化与成矿[J]. 长春地质学院学报, 24(4): 378-384.
- 孙丰月, 金巍, 李碧乐, 等, 2000. 关于脉状热液金矿床成矿深度的思考[J]. 长春科技大学学报, 30(S1): 27-29.
- 孙景贵, 胡受奚, 凌洪飞, 等, 2000a. 胶西北两类金矿田的高钾-钾质脉岩元素地球化学与成岩作用研究[J]. 地球化学, 29(2): 143-152.
- 孙景贵, 胡受奚, 凌洪飞, 2000b. 胶东金矿区高钾-钾质脉岩地球化学与俯冲-壳幔作用研究[J]. 岩石学报, 16(3): 401-412.
- 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.
- 万天丰, 朱鸿, 赵磊, 等, 1996. 郯庐断裂带的形成与演化: 综述[J]. 现代地质, 10(2): 159-168.
- 王登红, 林文蔚, 杨建民, 等, 1999. 试论地幔柱对于我国两大金矿集中区的控制意义[J]. 地球学报, 20(2): 157-162.
- 王世称, 成秋明, 范继璋, 1989. 金矿综合信息找矿模型[J]. 长春地质学院学报, 19(3): 311-316.
- 王燕, 卢作祥, 1988. 山东招徕金矿带焦家式金矿的矿床分带[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 13(2): 137-146.
- 王义文, 朱奉三, 宫润潭, 2002a. 构造同位素地球化学: 胶东金矿集中区硫同位素再研究[J]. 黄金, 23(4): 1-16.
- 王义文, 朱奉三, 宫润潭, 2002b. 胶东金矿集中区金矿成矿年代学研究[J]. 黄金地质, 8(4): 48-55.
- 温桂军, 2011. 山东省金矿资源潜力评价成果报告[R]. 威海: 山东省地质局地质调查局第六地质大队.
- 杨金中, 李光明, 2001. 胶东中生代两期金矿化作用的对比研究及其意义[J]. 地质与勘探, 37(1): 33-37.
- 杨立强, 邓军, 王中亮, 等, 2014. 胶东中生代金成矿系统[J]. 岩石学报, 30(9): 2447-2467.
- 杨敏之, 吕古贤, 1996. 胶东绿岩带金矿地质地球化学[M]. 北京: 地质出版社.
- 姚凤良, 刘连登, 孔庆存, 等, 1990. 胶东西北部脉状金矿[M]. 长春: 吉林科学技术出版社.

- 叶杰,刘建明,李永兵,等,2002.山东金矿成矿地球动力学背景的初步讨论[J].矿床地质,21(S1):755-758.
- 于学峰,张天祯,王虹,等,2016.山东省矿床成矿系列研究[J].矿床地质,35(1):169-184.
- 于学峰,杨德平,李大鹏,等,2019.胶东焦家金矿带3000m深部成矿特征及其地质意义[J].岩石学报,35(9):2893-2910.
- 于又华,程玉明,1996.华北地台绿岩带金矿的成矿环境与规律[J].黄金科学技术,4(1):5-11.
- 翟明国,范宏瑞,杨进辉,等,2004.非造山带型金矿:胶东型金矿的陆内成矿作用[J].地学前缘,11(1):85-98.
- 翟裕生,邓军,彭润民,2000.矿床变化与保存的研究内容和研究方法[J].地球科学-中国地质大学学报,25(4):340-345.
- 翟裕生,邓军,丁式江,等,2001.关于成矿参数临界转换的探讨[J].矿床地质,20(4):301-306.
- 张潮,黄涛,刘向东,等,2016.胶西北新城金矿床热液蚀变作用[J].岩石学报,32(8):2433-2450.
- 张成基,2005.山东省区域矿床成矿谱系概论[J].山东国土资源,21(2):30-38.
- 张琪彬,宋明春,丁正江,等,2022.胶东焦家巨型金矿床的剥露历史与保存[J].中国科学:地球科学,52(7):1391-1408.
- 张毓璞,文子中,1983.山东焦家式金矿地质[M].烟台:山东省地质矿产局第六地质队.
- 张毓璞,1997.山东省胶东地区大-中型金矿成矿规律及找矿方向的研究[R].威海:山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队.
- 赵宏光,孙景贵,凌洪飞,等,2005.胶东金矿成矿流体性质及其地质意义[J].地质与勘探,41(5):27-33.
- 周军,刘建朝,王瑞腾,等,2001.胶东金矿省成矿作用初析[J].西安工程学院学报,23(3):1-10.
- 周新华,杨进辉,张连昌,2002.胶东超大型金矿的形成与中生代华北大陆岩石圈深部过程[J].中国科学(D辑),32(S1):11-20.
- 朱日祥,范宏瑞,李建威,等,2015.克拉通破坏型金矿床[J].中国科学:地球科学,45(8):1153-1168.
- 朱训,2016.就矿找矿论[M].北京:地质出版社.

获奖者简历:

周明岭,二级研究员,中共党员,原山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队副队长、总工程师。1991年毕业于中国地质大学(北京)地质学专业,获学士学位。2023年荣获第十八次李四光地质科学奖野外奖。周明岭同志长期坚持扎根野外一线,主要从事以金为主的地质矿产勘查、区域地质调查和地质科学研究工作,主持和参与完成地质勘查和科研项目100余项,在胶东地区连续探获了焦家深部、朱郭李家、前陈、纱岭、玲南、水旺庄、姜家窑、西涝口等大型—超大型金矿床10余处,累计探明金资源量1400余吨。不断丰富和发展了焦家式金矿成矿理论,参与“胶东焦家金矿田千吨金矿勘查理论和关键技术”“胶东金矿理论技术创新与深部找矿突破”等研究工作,研发创新了金矿深部找矿技术和方法。先后发表具有重要影响的学术论文20余篇(其中SCI论文5篇、EI论文4篇),专著6部,授权发明专利2项。个人荣获国家科技进步二等奖1项,省部级科学技术奖一等奖1项、二等奖2项,荣获“山东省有突出贡献的中青年专家”“山东省国土资源系统先进个人”“山东省找矿突破战略行动(2011—2013年度)先进个人”“山东省地矿局第二届曹国权地质科学奖”“山东省地矿局第二批科技领军人才”“山东省地矿局‘十一·五’优秀科技工作者”等荣誉称号。

