文章编号: 0258-7106(2022)02-0255-18 Doi: 10.16111/j.0258-7106.2022.02.004

胶东地区招贤深部金矿床金和载金矿物化学成分及其地质意义*

王英鹏[1],祝培刚[1],张 文[1],王立功[1],王金辉[1],彭观峰[1],王永彬[2,3**],李慎斌[4]
(1 山东省地质调查院,山东 济南 250014; 2 云南大学 云南省地球系统科学研究重点实验室,云南 昆明 650500; 3 云南大学 云南省高校关键矿产成矿学重点实验室,云南 昆明 650500; 4 中国恩菲工程技术有限公司,北京 100038)

摘 要 胶东地区-1000 m以下深部找矿的重大突破,使得探明储量已达5000多t,成为探讨深部金的赋存状态及成矿作用的天然实验室。招贤金矿为焦家成矿带近年深部找矿重大突破之一,矿体主要产于-1260 m以深的晚侏罗世二长花岗岩中,受控于焦家断裂。金属矿物主要为黄铁矿、黄铜矿和银金矿等,脉石矿物包括石英、绢云母、方解石、钾长石等。围岩蚀变以钾长石化、硅化、黄铁绢英岩化、碳酸盐化为主。金矿物以自然金和银金矿为主,呈裂隙金或包体金分布于黄铁矿中,少数不可见金呈晶隙金分布于黄铁矿等矿物中。其中,黄铁矿 w(S)=52.227%~54.915%、w(Fe)=44.749%~47.134%,原子个数比 S/Fe=1.99~2.11,化学式 $FeS_{1.99}$~$FeS_{2.11}$;黄铜矿 w(S)=34.282%~35.140%、w(Fe)=29.263%~30.268%,w(Cu)=33.130%~34.114%,化学式 $Cu_{0.96}FeS_{2.01}$~$Cu_{1.01}FeS_{2.10}$,平均化学式为 $Cu_{0.99}FeS_{2.06}$;金矿物的 w(Au)=55.430%~95.473%,w(Ag)=2.908%~44.961%。金成色较高(538~951),具有自浅到深不断增加的趋势。另外,黄铁矿中的Co/Ni整体大于1,自浅到深总体变大;w(As)较高,自浅到深总体变小。综上所述,文章推断招贤金矿为岩浆成因,且深部具有成矿潜力。

关键词 地球化学;黄铁矿;电子探针;招贤金矿;焦家成矿带;胶东地区
中图分类号:P618.51 **文献标志码**:A

Geological significances and geochemical compositions of gold and gold-bearing minerals from Zhaoxian deeply-seated gold deposit, Jiaodong area

WANG YingPeng[1], ZHU PeiGang[1], ZHANG Wen[1], WANG LiGong[1], WANG JinHui[1], PENG GuanFeng[1], WANG YongBin[2,3] and LI ShenBin[4]
(1 Shandong Institute of Geological Survey, Jinan 250014, Shandong, China; 2 Yunnan Key Laboratory of Earth System Science, Yunnan University, Kunming 650500, Yunnan, China; 3 Key Laboratory of Critical Minerals Metallogeny in Universities of Yunnan Province, Yunnan University, Kunming 650500, Yunnan, China; 4 The China ENFI Engineering Co., Ltd., Beijing 100038, China)

Abstract

The major breakthroughs in deep gold prospecting −1000 m below the surface in the Jiaodong area have made the proved reserves reach more than 5000 tons, which makes Jiaodong to be a natural laboratory to explore the gold occurrence and mineralization in the deep area. The Zhaoxian gold deposit is one of the major breakthroughs in deep prospecting area of the Jiaojia metallogenic belt recently. The orebodies mainly occur below −1260 m within the Late Jurassic monzogranite, and are controlled by the Jiaojia Fault. Ore minerals are mainly pyrite, chalcopyrite and electrum, and gangue minerals include K-feldspar, quartz, sericite and calcite. The alteration is mainly

* 本文得到国家重点研发计划项目(编号:2016YFC0600107)和山东省地质勘查项目(编号:鲁勘字(2014)3号、鲁勘字(2018)1号、鲁勘字(2020)1号、鲁勘字(2021)18号)联合资助
第一作者简介 王英鹏,男,1984年生,高级工程师,主要从事金矿成因和勘查研究。Email: wangyingpeng0705@163.com
** 通讯作者 王永彬,男,1985年生,副教授,主要从事矿床成因和成矿规律研究。Email: wangyongbin0808@ynu.edu.cn
收稿日期 2021-08-20;改回日期 2021-12-05。秦思婷编辑。

characterized by K-feldspathization, silicification, pyrite-sericitization and carbonatation. The gold occurs as native gold and electrum, which are mainly distributed in the pyrite as fissure gold or inclusion gold, and partly as invisible gold in the crystal interstices of pyrite. The sulfur contents of the pyrite range from 52.227% to 54.915%, and iron contents of the pyrite vary from 44.749% to 47.134%. The pyrites have atomic number ratios (S/Fe) of 1.99~2.11, and chemical formula of $FeS_{1.99}$~$FeS_{2.11}$. Meanwhile, the sulfur contents of the chalcopyrite range from 34.282% to 35.140%, iron contents of the chalcopyrite vary from 29.263% to 30.268%, and copper contents of the chalcopyrite range from 33.130% to 34.114%. The chalcopyrite has chemical formula of $Cu_{0.96}FeS_{2.01}$~$Cu_{1.01}FeS_{2.10}$, and the average chemical formula of $Cu_{0.99}FeS_{2.06}$. The Au contents in the gold minerals are 55.430%~95.473%, and the Ag contents vary from 2.908% to 44.961%. Moreover, the fineness of gold is high (538~951), with an increasing trend from shallow to deep part. In addition, the overall Co/Ni rations in pyrite are greater than 1 with an increasing trend from shallow to deep part, in comparison, the overall As contents are high with a decreasing trend. In conclusion, it is inferred that the Zhaoxian gold deposit was formed from magmatic hydrothermal fluid and has deep metallogenic potential.

Key words: geochemistry, pyrite, EMPA, Zhaoxian gold deposit, Jiaojia metallogenic belt, Jiaodong Peninsula

胶东地区是中国最大的黄金资源及生产基地。早期的金矿勘查工作主要集中在500 m以浅，2005年之后开展的深部找矿累计探明金资源储量2700余t(宋明春等, 2015)。深部找矿成果不仅改善了中国的金资源格局，而且为深部成矿作用研究提供了新机遇。前人主要根据浅部矿体，对胶东金矿的金赋存状态、成矿时代、物质来源、流体演化、成矿模型及构造背景开展了大量研究(刘建明等, 2001; Yang et al., 2001; 翟明国等, 2004; 范宏瑞等, 2005; 毛景文等, 2005; Deng et al., 2020a; Wang et al., 2020; 2021)，建立了相应的勘查模型和技术体系(沈远超等, 2000; 李惠等, 2015)，推动了浅部资源的勘查开发(宋明春等, 2018)。但受制于深部金矿床(−1000 m标高以深)勘查控制及样品采集，金及载体矿物的化学成分和赋存状态尚缺乏系统研究，限制了相应的成矿/勘查模型的修正优化，制约了深部找矿潜力的全面评价。

胶东地区的金矿主要产于胶西北的三山岛断裂、焦家断裂和招平断裂，尤其是在焦家断裂成矿带，相继发现了寺庄矿区深部大型金矿床(42 t; 杨之利等, 2007)、焦家矿区深部特大型金矿床(105 t; 鲍中义等, 2010)、朱郭李家矿区深部特大型金矿床(126 t; 高书剑等, 2010)、纱岭矿区特大型金矿床(373 t; 宋国政等, 2016)，累计探明金资源储量超过1400 t，成为开展深部金赋存状态和成矿作用的天然实验室(李杰等, 2020; 孙雨沁等, 2020; 许杨等, 2021)。2015年，山东省地质调查院在焦家断裂成矿带招贤金矿区的勘查深度达到−2170 m，提交金矿(333+334?)金金属量105 t及低品位(333+334?)金的金属量48 t，使之成为中国平均勘查深度最大的矿区(祝德成等, 2018)。这些深部找矿成果的取得和深部岩芯样品的获得为我们开展深部成矿研究奠定了基础。

黄铁矿和黄铜矿是最重要的载金矿物，并含有Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Co、Ni、Sb、As、Se、Te、Hg、Tl、Bi、Mo等微量元素，可以很好地反映金的赋存状态、流体性质和矿床成因(Abraitis et al., 2004)。因此，本文对焦家断裂成矿带招贤矿区深部金矿体中黄铁矿、黄铜矿和金矿物，开展系统的矿相学和电子探针研究，进一步分析金的赋存状态和载体矿物的化学成分，尝试约束矿床成因和找矿潜力。

1 区域地质概况

胶东地区位于华北克拉通东南缘和郯庐断裂带东侧(图1a)。区内主要由前寒武纪变质岩和中新生代火山-沉积岩组成。前寒武纪地层主要包括新太古界胶东岩群(2.9~2.5 Ga, Jahn et al., 2008; Liu et al., 2013a; 2013b; 万渝生等, 2012)、古元古界荆山群(2.2~1.9 Ga, Wan et al., 2006; 董春艳等, 2010)和粉子山群及新元古界蓬莱群，上覆中-新生代地层包括白垩系莱阳群和青山群、古近系五图群和新近系临朐群以及第四系。区内岩浆岩分布广泛，包括少量

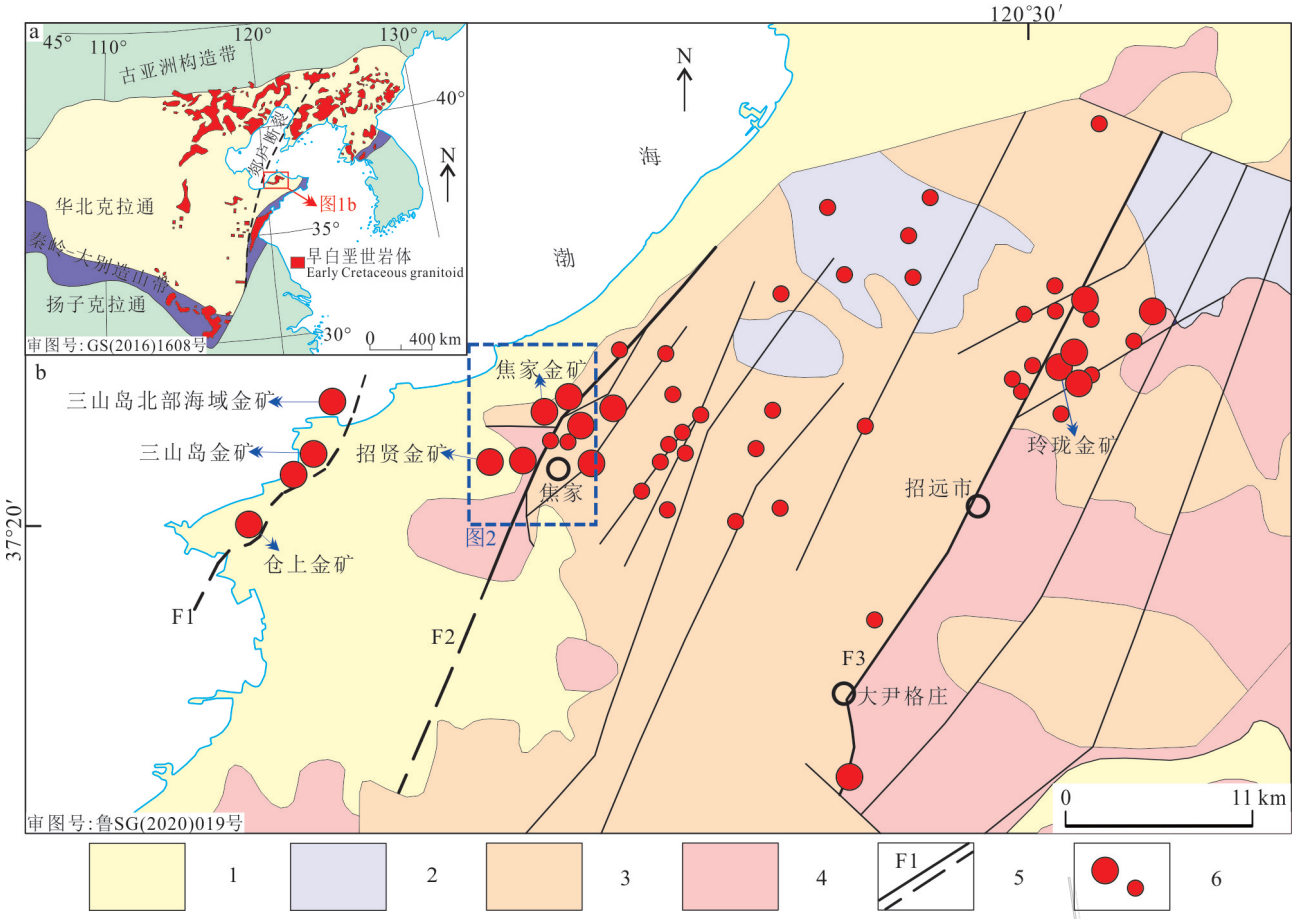

图 1　华北克拉通构造背景及金矿分布图(a, 据朱日祥等, 2015 修改)和胶东矿集区区域地质及金矿床分布图(b, 据宋明春等, 2015 修改)

1—第四系;2—白垩纪花岗闪长岩;3—侏罗纪二长花岗岩;4—新太古代变质岩系;5—实测及推测断裂;6—金矿床(直径大者为大-超大型金矿床,直径小者为中小型金矿床)

F1—三山岛断裂;F2—焦家断裂;F3—招平断裂

Fig. 1　Tectonic setting of the North China Craton (NCC) and distribution of major gold deposits (a, modified after Zhu et al., 2015) and regional geologic map showing the distribution of gold deposits in the Jiaodong peninsula (b, modified after Song et al., 2015)

1—Quaternary; 2—Cretaceous granodiorite; 3—Jurassic monzogranite; 4—Neoarchean metamorphic complex; 5—Measured and inferred fault; 6—Gold deposit (Larger diameter represent large-superlarge gold deposits, small diameter represent medium and small gold deposits)

F1—Sanshandao fault; F2—Jiaojia fault; F3—Zhaoping fault

新太古代变辉长岩、片麻状英云闪长岩,和大量中生代玲珑二长花岗岩和郭家岭花岗闪长岩及中基性脉岩。区内构造活动强烈,发育 EW 向、NNE 向-NE 向及 NW 向断裂构造,尤以 NNE-NE 向断裂构造为主,其中最大的是郯庐断裂带,存在多期次活动且深切至 70 km 以下地幔层(沈远超等, 2003; 王先美等, 2008; 2010)。该断裂带在中生代以左行走滑张裂运动为主(朱光等, 2016),伴生一系列 NNE 向次级断裂,包括三山岛断裂带、焦家断裂带和招平断裂带,其次级断裂成为大、中型金矿的控矿断裂(图 1b, Fan et al., 2021)。

招贤深部金矿受焦家断裂控制,该断裂北起黄山馆,向南经新城、焦家,至平里店,总长 27 km,宽 80~500 m。断裂总体走向 30°,倾向北西,倾角 25°~40°,局部较陡可达 60°~70°,沿走向及倾向均呈舒缓波状展布,且具明显的膨胀夹缩、分支复合特征,主裂面以灰黑色断层泥(厚约 2~40 cm)为标志,显示压扭性特征。断裂带上、下盘发育黄铁绢英岩化变辉长岩质碎裂岩、黄铁绢英岩化碎裂状花岗岩,沿断裂产出著名的焦家、新城、望儿山、河西、上庄等金矿床,总探明储量已突破 1400 t(于学峰等, 2016)。

2 矿区地质特征

招贤矿区位于焦家断裂带的中段西部，地表距焦家断裂带最近处约1.5 km(图2)。

2.1 矿区地质简况

矿区内第四系冲积层、残坡积层、海积层覆盖较严重，基岩主要为新太古代变质岩(英云闪长质片麻岩和变辉长岩)和晚侏罗世黑云二长花岗岩。前者主要分布于焦家断裂带上盘；后者主要分布于焦家断裂带的下盘。区内脉岩主要有闪长玢岩、辉绿玢岩和煌斑岩脉。

控矿断裂为焦家主干断裂，在−2000 m标高深度左右延伸到招贤勘查区深部，钻孔控制其在矿区范围内长约5400 m，宽160~500 m，最大斜深660 m，最大垂深2333 m，走向0°~30°，倾向W-NW，倾角较缓

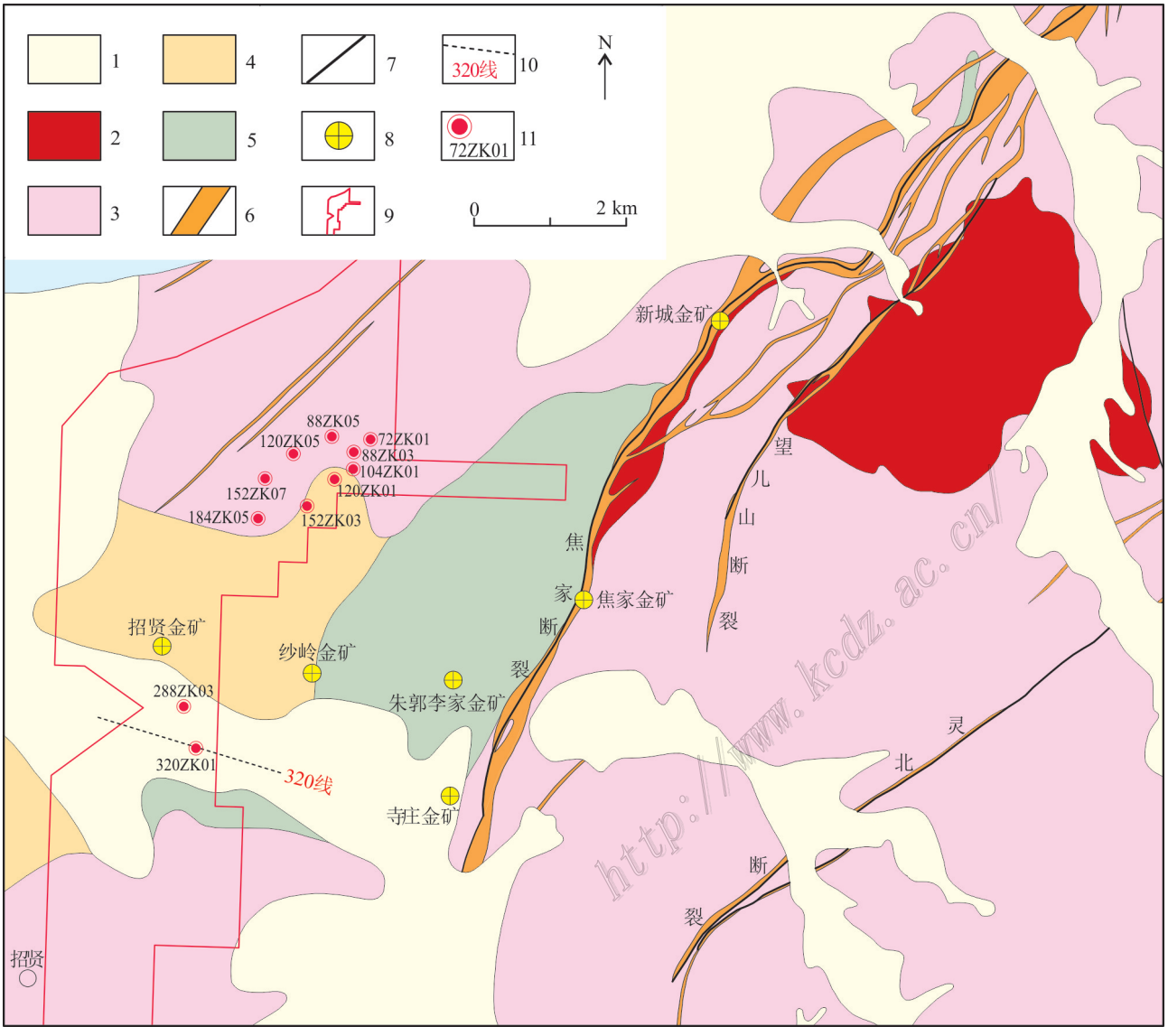

图2 胶东地区招贤金矿矿区地质图(据于学峰等, 2019修改)

1—第四系；2—白垩纪郭家岭花岗闪长岩；3—侏罗纪玲珑二长花岗岩；4—新太古代英云闪长质片麻岩；5—新太古代变辉长岩；6—蚀变带；7—断层；8—金矿床；9—勘查区范围；10—勘探线及编号；11—钻孔位置及编号

Fig. 2 Geologic map of the Zhaoxian gold deposit, Jiaodong peninsula (modified after Yu et al., 2019)

1—Quaternary; 2—Cretaceous Guojialing granodiorite; 3—Jurassic Linglong monzogranite; 4—Neoarchean tonalitic gneiss; 5—Late Neoarchean metagabbro; 6—Alteration zone; 7—Fault; 8—Gold deposit; 9—Exploration area; 10—Geological exploration line and its number; 11—Drill hole position and its number

(10°~40°)。主断裂中心发育有连续稳定的主裂面,伴生灰黑色断层泥(厚 1~30 cm)。矿后断裂呈近NS向或NNW向展布于变辉长岩体和二长花岗岩体内,碎裂岩带厚 0.5~15.0 m,部分被脉岩充填,对矿体有错移,错距小、破坏作用小,对矿体的连续性未造成影响。

焦家断裂控制着矿床的产出,自东向西,依次产出焦家、朱郭李家、寺庄、纱岭和招贤金矿。除了新发现的招贤金矿,前人对其他金矿进行了大量研究,显示金矿主要形成于早白垩世(约 120 Ma, Li et al., 2003; Deng et al., 2020b),与古太平洋板块俯冲-后撤作用有关(朱日祥等, 2015)。金矿化具有多期、多阶段叠加富集的特点,包括贫矿石英阶段(Ⅰ)、金-黄铁矿-石英阶段(Ⅱ)、金-多金属硫化物-石英阶段(Ⅲ)和石英-方解石阶段(Ⅳ),金主要产于Ⅱ、Ⅲ阶段。氢、氧同位素表明,成矿流体既有岩浆水来源,又有大气水加入(范宏瑞等, 2005; 卫清等, 2015);碳酸盐中碳同位素和黄铁矿中氦、氩同位素,表明成矿流体为与地幔作用有关的岩浆热液(刘建明等, 2003; 毛景文等, 2005)。

2.2　矿体地质简况

招贤矿区内金矿体主要产于焦家断裂带下盘,呈脉状、透镜状产出,具膨胀夹缩等特点。矿体产状与断裂主裂面基本一致,整体 NNE 走向,倾向 240°~345°,倾角在 10°~30°之间变化(图 3)。目前共圈定 27 个金矿体,由上而下,分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ号矿体群,特征分别为:Ⅰ号矿体群,主要位于断裂带下盘紧靠主裂面的黄铁绢英岩化碎裂岩内,圈定矿体 12 个,其资源量占估算总量的 64.16%;Ⅱ号矿体群位于Ⅰ号矿体群之下,分布于黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩内,圈定矿体 6 个,其资源量占估算总量的 23.34%;Ⅲ号矿体群,位于Ⅱ号矿体群之下,分布于黄铁绢英岩化花岗岩内,圈定矿体 5 个,其资源量占估算总量的 8.65%;Ⅳ号矿体群,赋存于主裂面之上黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩带和局部分布的黄铁绢英岩化碎裂岩带中,圈定矿体 4 个,其资源量占估算总量的 3.85%。其中,Ⅰ号矿体群中的Ⅰ-1 和Ⅰ-2 号矿体为区内主矿体,资源量分别占估算总量的 29.00% 和 25.07%,分布范围较广。

围岩蚀变主要沿焦家断裂构造带发育,包括钾化、硅化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化。其中钾化主要发育在二长花岗岩内,成面状分布(图 4a);硅化与黄铁绢英岩化与金矿化关系紧密,呈面状或脉状产出(图 4b~d)。矿石矿物主要为黄铁矿,少量黄铜矿等(图 4e、f);脉石矿物主要为石英、钾长石、绢云母和方解石,其中,黄铁矿、石英是主要载金矿物。根据控矿构造和热液脉体的相互关系,将热液成矿期划分为石英-黄铁矿阶段、石英-多硫化物阶段和石英-碳酸盐阶段 3 个阶段。

3　样品及测试方法

3.1　采样位置和样品特征

本次研究针对招贤金矿深部钻孔富金矿段开展了不同深度的(−1260~−2170 m)采样,包括 72ZK01、88ZK03、88ZK05、104ZK01、120ZK01、120ZK05、152ZK03、152ZK07、184ZK05、288ZK03、320ZK01 等钻孔(图 2),合计采集主成矿阶段矿石样品 36 个(表 1,表 2),磨制探针片,并开展岩相学观察和电子探针分析。

黄铁矿和黄铜矿是矿石中最主要的金属矿物,含量一般为 5% 左右,最高达 10%,其中,黄铁矿是主要的载金矿物,其含量与金品位呈正相关关系。黄铁矿呈浅黄色,强金属光泽,自形-半自形晶粒状或不规则粒状结构,立方体和五角十二面体晶形均有发育,呈稀疏或稠密浸染状分布于脉石矿物中,或呈脉状填充于裂隙中(图 5a、b),粒度介于 0.01~2.00 mm,大者可达 5 mm 以上。黄铁矿依据产出状态和晶形特征,可划分出 2 种类型:① 颗粒大,粒径 0.1~0.4 mm,自形-半自形结构,常被黄铜矿交代或胶结;② 颗粒小,粒径 < 0.1 mm,半自形-他形结构,常与石英伴生,呈脉状分布。矿石中的黄铜矿,黄铜色,强金属光泽,多为半自形或不规则粒状结构,呈浸染状、细脉状分布于黄铁矿裂隙内(图 5c、d)。

3.2　电子探针分析

本次测试分析在中国冶金地质总局山东局测试中心进行,使用 JEOL(日本电子)JXA-8230 型电子探针显微分析仪,测定黄铁矿的主要元素组成。分析条件为 15 kV 的加速电压,20 nA 的探针电流,1~2 μm 的束斑,0.02% 的检出限,分析的元素包括 Fe、S、Au、Ag、As、Sb、Co、Pb、Cu 和 Zn。主量元素(含量大于 1%):峰值积分时间 10~20 s,背景积分时间 5~10 s,分析精度约 1%~2%;微量元素(含量小于 1%):峰值积分时间 20~40 s,背景积分时间 10~20 s。

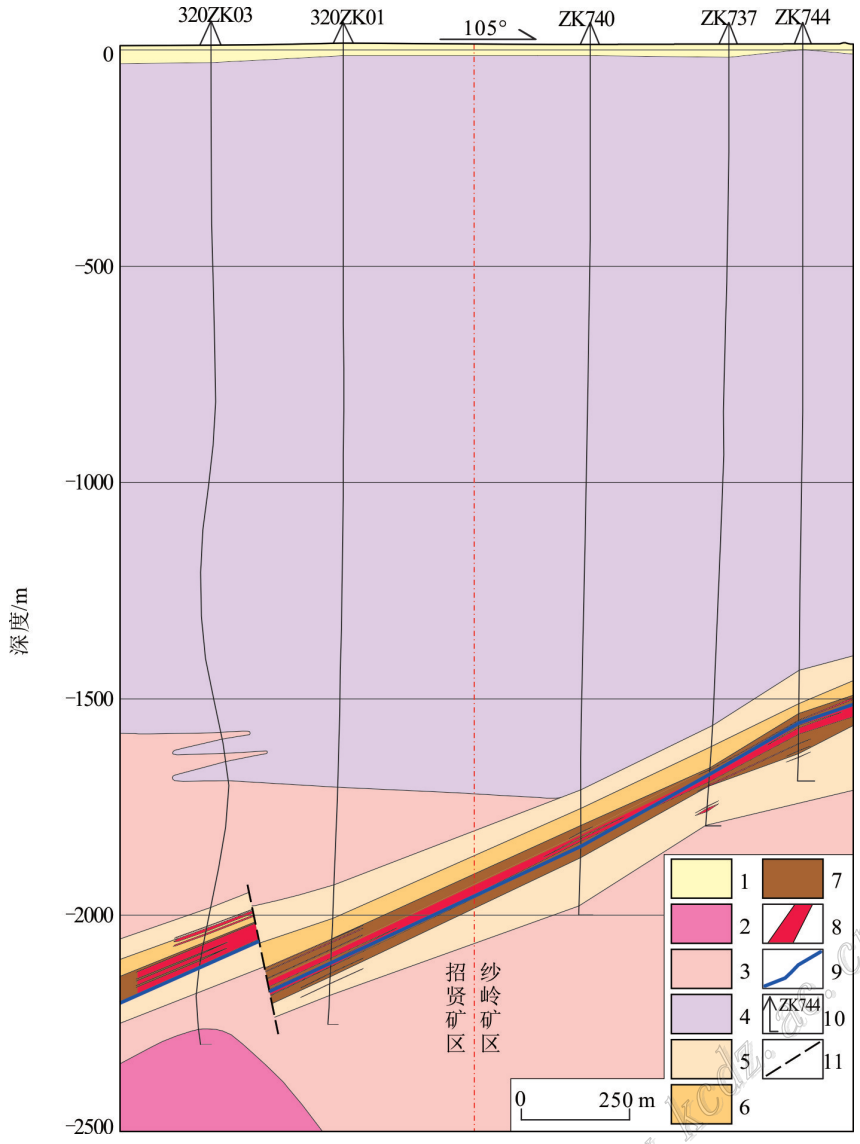

图3 招贤金矿320地质勘探线剖面图

1—第四系;2—白垩纪花岗闪长岩;3—侏罗纪二长花岗岩;4—新太古代英云闪长质片麻岩;5—绢英岩化花岗岩;6—绢英岩化花岗质碎裂岩;7—黄铁绢英岩化(花岗质)碎裂岩;8—金矿体;9—主断裂面(断层泥);10—钻孔位置及编号;11—推测断裂

Fig. 3 Geological cross-section of No.320 exploration line through the Zhaoxian gold deposit

1—Quaternary; 2—Cretaceous granodiorite; 3—Jurassic monzogranite; 4—Neoarchean tonalitic gneiss; 5—Granite with phyllic alterration; 6—Granitic cataclasite with phyllic alteration; 7—Granitic cataclasite with strong phyllic alterration; 8—Gold ore body; 9—Main fault (fault gouge); 10—Drill hole position and its number; 11—Presumed fault

测试前于矿物样品的测试面镀上一层碳导电膜,测试时,每做一个点,要在相应的电子照片上记录对应的位置。本次分析元素的标准样品为美国SPI矿物,具体如下:As:SPI-19CoAs;Zn:SPI-42Sphalerite;Cu:SPI-14Cuprite;Ni:SPI-36Pentlandite;Co:SPI-19CoAs;Fe:SPI-30Pyrite;S:SPI-30Pyrite;Pb:SPI-24Galena;Sb:SPI-Sb_2S_3;Ag:SPI-26Ag;Au:SPI-36Au。

4 实验测试结果

4.1 硫化物的主微量元素

招贤金矿硫化物电子探针分析结果见表1。

黄铁矿的 w(S) =52.227%~54.915%,平均值53.552%;w(Fe)=44.749%~47.134%,平均值45.941%;w(S)/w(Fe)=1.14~1.21,平均值1.17;原子个数比S/Fe

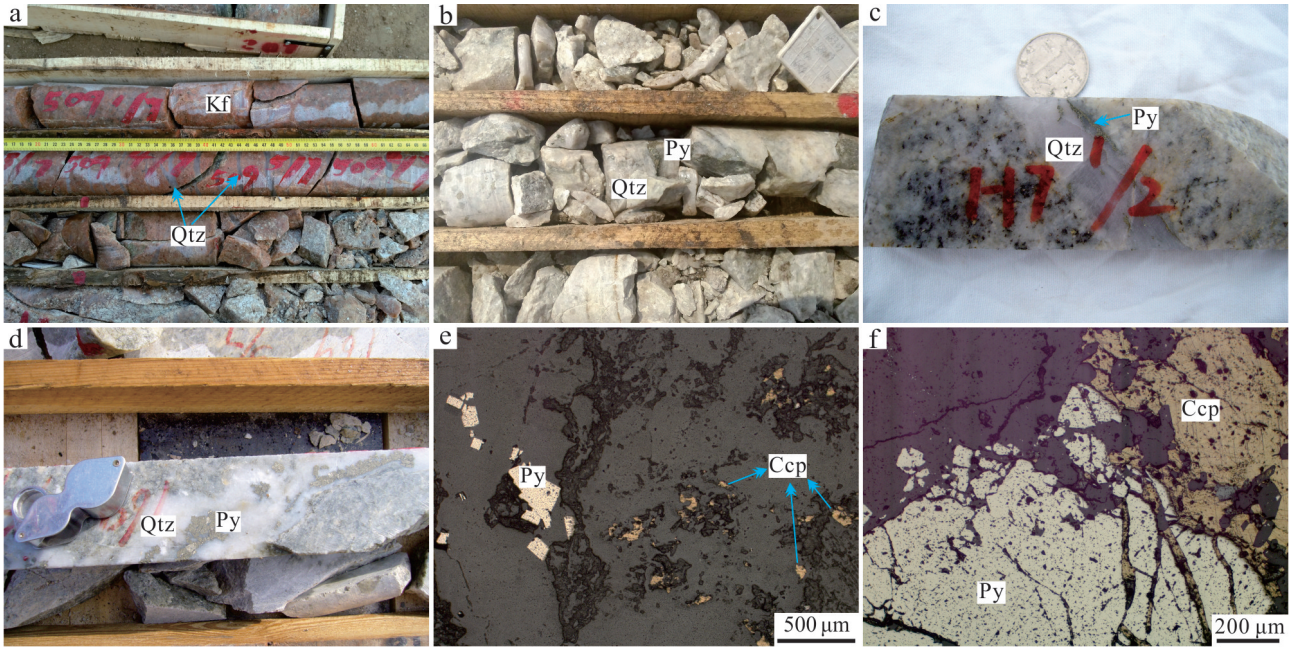

图4　招贤深部金矿矿石和围岩蚀变特征

a. 二长花岗岩发生钾长石化,被晚期硫化物-石英脉切穿;b. 二长花岗岩发育面状和脉状硅化;c. 二长花岗岩被石英-绢云母-硫化物脉切穿,伴生硅化和绢云母化;d. 石英-硫化物脉;e. 自形黄铁矿及他形黄铜矿;f. 黄铁矿被黄铜矿切穿和交代

Kf—钾长石;Qtz—石英;Py—黄铁矿;Ccp—黄铜矿

Fig. 4　Characteristics of the ore and wall-rock alteration from the Zhaoxian gold deposit

a. Monzogranite with K-feldspathization, cut by late pyrite-quartz veins; b. Monzogranite with planar and linear silicification; c. Monzogranite with phyllic alteration, cut by quartz-serite-sulfide veins; d. Quartz-sulfide vein; e. Euhedral pyrite and anhedral chalcopyrite; f. Pyrite is cut and replaced by chalcopyrite

Kf—K-feldspar; Qtz—Quartz; Py—Pyrite; Ccp—Chalcopyrite

=1.99~2.11,平均值2.04;化学式$FeS_{1.99}$~$FeS_{2.11}$,平均化学式为$FeS_{2.04}$;w(Cu)=0.001%~0.053%,平均值0.022%;w(Zn)=0.002%~0.167%,平均值0.054%;w(As)=0.001%~0.302%,平均值0.042%;w(Sb)=0.002%~0.047%,平均值0.018%;w(Au)=0.001%~0.048%,平均值0.014%;w(Ag)=0.001%~0.269%,平均值0.012%;w(Co)=0.010%~0.155%,平均值0.066%;w(Ni)=0.001%~0.059%,平均值0.019%;w(Pb)=0.002%~0.12%,平均值0.034%。

黄铜矿中的w(S)=34.282%~35.140%,平均值34.787%;w(Fe)=29.263%~30.268%,平均值29.580%;w(Cu)=33.130%~34.114%,平均值33.565%;w(S)/w(Fe)=1.15~1.20,平均值1.18;原子个数比S/Fe=2.01~2.10,平均值2.06;w(Cu)/w(Fe)=1.10~1.15,平均值1.13;原子个数比Cu/Fe=0.96~1.01,平均值0.99;化学式$Cu_{0.96}FeS_{2.01}$~$Cu_{1.01}FeS_{2.10}$,平均化学式为$Cu_{0.99}FeS_{2.06}$;w(Zn)=0.011%~0.107%,平均值0.047%;w(As)=0.011%~0.025%,平均值0.018%;w(Sb)=0.006%~0.026%,平均值0.015%;w(Au)=0.003%~0.039%,平均值0.022%;w(Ag)=0.007%~0.007%,平均值0.007%;w(Co)=0.010%~0.077%,平均值0.043%;w(Ni)=0.049%;w(Pb)=0.007%~0.031%,平均值0.019%。

4.2　金矿物的主微量元素

招贤金矿金矿物电子探针分析结果见表2。

金矿物的w(Au)=55.430%~95.473%,平均值78.155%;w(Ag)=2.908%~44.961%,平均值17.160%;原子个数比Au/Ag=1.16~10.44,平均值4.49;化学式$Au_{1.16}Ag$~$Au_{10.44}Ag$,平均化学式为$Au_{4.49}Ag$。金成色为538~951,平均值794。w(S)=0.076%~2.064%,平均值0.587%;w(Fe)=0.505%~5.386%,平均值2.006%;w(Co)=0.003%~0.043%,平均值0.023%;w(Ni)=0.003%~0.022%,平均值0.015%;w(Cu)=0.089%~0.502%,平均值0.232%;w(As)=0.006%~0.022%,平均值0.014%;w(Sb)=0.004%~0.063%,平均值0.022%;w(Se)=0.002%~0.040%,平均值

表 1 招贤金矿硫化物电子探针主、微量元素测试结果表

Table 1 EPMA major and trace element contents of the sulfides from the Zhaoxian gold deposit

样品号	采样位置		矿物名称	w(B)/%												Co/Ni
	钻孔	深度/m		Fe	S	Au	Ag	Co	Ni	Cu	As	Sb	Pb	Zn	总和	
XT-2-Py-01	72ZK01	1341.8~1343.3	黄铁矿	46.627	53.036	-	-	0.146	0.009	0.01	0.006	-	-	0.002	99.836	16.22
XT-2-Py-02	72ZK01	1341.8~1343.3	黄铁矿	46.382	53.644	-	0.013	0.082	-	-	0.066	-	-	0.04	100.227	
XT-2-Py-03	72ZK01	1341.8~1343.3	黄铁矿	45.854	53.147	0.011	-	0.075	0.028	-	0.029	-	-	0.057	99.201	2.68
XT-2-Py-04	72ZK01	1341.8~1343.3	黄铁矿	46.109	53.638	-	-	0.023	-	-	0.105	-	-	0.055	99.93	
XT-2-Py-05	72ZK01	1341.8~1343.3	黄铁矿	45.906	53.544	0.015	-	0.071	-	0.004	0.008	-	-	0.09	99.638	
XT-2-Py-06	72ZK01	1341.8~1343.3	黄铁矿	46.114	53.304	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99.418	
XT-2-Py-07	72ZK01	1341.8~1343.3	黄铁矿	45.287	53.673	0.03	-	0.073	-	0.047	-	0.002	-	0.048	99.16	
XT-2-Py-09	72ZK01	1341.8~1343.3	黄铁矿	46.111	53.431	0.008	-	0.021	0.002	0.007	0.02	0.022	-	0.029	99.651	10.50
XT-2-Py-10	72ZK01	1341.8~1343.3	黄铁矿	45.522	54.108	0.005	-	0.048	-	0.021	0.077	0.009	-	-	99.79	
XT-2-Py-11	72ZK01	1341.8~1343.3	黄铁矿	46.062	52.996	-	-	0.054	-	0.01	0.015	-	0.12	0.044	99.301	
XT-2-Py-12	72ZK01	1341.8~1343.3	黄铁矿	46.043	53.604	-	-	0.049	0.012	0.006	0.01	-	0.002	-	99.726	4.08
XT-3-Py-01	72ZK01	1346.3~1347.8	黄铁矿	45.565	53.085	0.009	-	0.035	0.012	0.019	0.061	0.014	0.025	-	98.825	2.92
XT-3-Py-02	72ZK01	1346.3~1347.8	黄铁矿	45.917	52.974	-	-	0.058	-	0.009	0.302	-	0.005	0.033	99.298	
XT-3-Py-03	72ZK01	1346.3~1347.8	黄铁矿	45.981	53.27	-	-	0.022	-	0.053	0.172	0.024	-	0.048	99.57	
XT-3-Py-04	72ZK01	1346.3~1347.8	黄铁矿	45.121	53.288	0.01	0.269	0.063	-	-	0.259	0.004	0.023	-	99.037	
XT-12-Py-01	88ZK03	1396.15~1397.72	黄铁矿	45.934	53.292	0.013	-	0.038	0.004	-	0.129	-	0.041	-	99.451	9.50
XT-16-Py-01	88ZK03	1403.52~1405.12	黄铁矿	45.894	53.664	0.011	-	0.08	-	-	0.036	-	-	-	99.685	
XT-16-Py-02	88ZK03	1403.52~1405.12	黄铁矿	45.29	53.702	0.035	0.002	0.036	0.001	0.037	-	-	-	0.07	99.173	36.00
XT-16-Py-03	88ZK03	1403.52~1405.12	黄铁矿	46.447	53.659	0.02	-	0.082	-	0.017	-	-	0.055	0.062	100.342	
XT-16-Py-04	88ZK03	1403.52~1405.12	黄铁矿	45.479	53.615	-	0.009	0.043	0.02	-	0.022	-	0.06	0.051	99.299	2.15
XT-89-Py-01	104ZK01	1427.9~1429.4	黄铁矿	45.916	53.296	0.003	-	0.092	-	-	-	-	0.035	0.053	99.395	
XT-89-Py-02	104ZK01	1427.9~1429.4	黄铁矿	46.596	53.203	0.014	-	0.075	0.04	0.024	0.01	-	-	0.031	99.993	1.88
XT-89-Py-03	104ZK01	1427.9~1429.4	黄铁矿	46.254	53.58	0.024	-	0.041	-	-	-	-	-	-	99.899	
XT-96-Py-01	120ZK01	1480.03~1481.53	黄铁矿	45.537	53.005	0.013	-	0.04	0.022	-	0.018	0.006	-	-	98.641	1.82
XT-96-Py-02	120ZK01	1480.03~1481.53	黄铁矿	46.047	53.405	-	-	0.071	-	-	-	0.023	-	0.152	99.698	
XT-96-Py-03	120ZK01	1480.03~1481.53	黄铁矿	45.463	53.453	-	-	0.078	-	0.006	-	-	-	-	99	
XT-33-Py-01	88ZK05	1525.54~1526.85	黄铁矿	45.335	53.885	0.009	-	0.032	-	0.016	-	0.046	0.03	-	99.353	
XT-33-Py-02	88ZK05	1525.54~1526.85	黄铁矿	46.343	53.629	0.009	-	0.02	-	0.022	0.034	0.019	0.046	-	100.122	
XT-33-Py-04	88ZK05	1525.54~1526.85	黄铁矿	46.378	53.576	0.005	-	0.042	0.022	0.018	0.092	-	-	-	100.133	1.91
XT-33-Py-05	88ZK05	1525.54~1526.85	黄铁矿	47.134	53.576	0.004	0.006	0.063	-	-	-	0.028	-	-	100.811	
XT-33-Py-06	88ZK05	1525.54~1526.85	黄铁矿	46.991	53.623	-	0.002	0.088	-	0.019	0.014	-	-	0.057	100.794	
XT-34-Py-01	88ZK05	1536.45~1537.65	黄铁矿	45.38	53.734	0.012	0.008	0.059	0.016	0.029	0.118	0.013	0.023	0.007	99.399	3.69
XT-98-Py-01	120ZK05	1540.96~1542.46	黄铁矿	45.94	53.475	0.011	-	0.071	0.002	-	0.046	-	0.018	-	99.563	35.50
XT-98-Py-02	120ZK05	1540.96~1542.46	黄铁矿	45.743	53.435	-	-	0.024	-	-	0.03	-	-	0.083	99.315	
XT-98-Py-03	120ZK05	1540.96~1542.46	黄铁矿	45.777	53.728	0.011	0.005	0.051	0.022	0.008	0.002	-	0.044	0.009	99.657	2.32
XT-98-Py-04	120ZK05	1540.96~1542.46	黄铁矿	45.622	53.377	0.019	-	0.098	-	-	0.007	-	0.016	-	99.139	
XT-122-Py-01	152ZK07	1639.67~1641.17	黄铁矿	45.921	53.511	-	-	0.021	-	0.043	0.018	-	0.037	0.084	99.635	
XT-122-Py-02	152ZK07	1639.67~1641.17	黄铁矿	46.467	53.608	-	-	0.042	0.037	-	-	0.003	-	-	100.157	1.14
XT-122-Py-03	152ZK07	1639.67~1641.17	黄铁矿	45.873	53.453	0.03	0.003	0.055	0.006	0.015	-	-	-	-	99.435	9.17
XT-124-Py-01	152ZK07	1642.37~1643.87	黄铁矿	45.727	52.227	0.007	-	0.09	0.02	0.03	-	-	0.025	0.075	98.201	4.50
XT-124-Py-02	152ZK07	1642.37~1643.87	黄铁矿	45.212	53.547	0.048	-	0.071	-	-	0.015	0.016	-	0.09	98.999	
XT-124-Py-03	152ZK07	1642.37~1643.87	黄铁矿	45.315	52.988	-	-	0.057	0.011	-	-	-	0.041	0.068	98.48	5.18
XT-125-Py-01	152ZK07	1643.87~1645.37	黄铁矿	45.961	53.08	0.026	-	0.069	0.002	0.022	-	-	0.016	-	99.176	34.50
XT-125-Py-02	152ZK07	1643.87~1645.37	黄铁矿	45.124	53.334	0.023	-	0.041	0.006	-	0.022	0.012	0.019	-	98.581	6.83
XT-125-Py-03	152ZK07	1643.87~1645.37	黄铁矿	45.277	52.993	0.015	0.008	0.089	0.058	0.024	0.16	-	0.023	-	98.647	1.53
XT-125-Py-04	152ZK07	1643.87~1645.37	黄铁矿	45.72	53.998	0.001	-	0.079	0.015	-	0.008	0.042	0.023	0.09	99.976	5.27
XT-138-Py-01	184ZK05	1694.5~1695.7	黄铁矿	45.111	53.264	0.009	-	0.065	-	-	0.022	0.023	0.081	-	98.575	
XT-138-Py-02	184ZK05	1694.5~1695.7	黄铁矿	45.406	53.548	0.012	0.005	0.068	0.009	0.005	0.014	-	-	0.015	99.082	7.56
XT-138-Py-03	184ZK05	1694.5~1695.7	黄铁矿	45.658	53.659	-	0.005	0.069	0.004	-	0.006	-	-	-	99.401	17.25
XT-105-Py-01	152ZK03	1709.67~1710.97	黄铁矿	45.666	53.759	-	-	0.094	0.059	-	-	0.012	-	0.123	99.713	1.59
XT-107-Py-01	152ZK03	1716.07~1717.17	黄铁矿	45.685	53.496	0.022	0.01	0	-	0.053	0.009	-	-	0.106	99.381	
XT-107-Py-02	152ZK03	1716.07~1717.17	黄铁矿	45.375	53.401	-	-	0.106	0.009	-	-	0.03	-	-	98.921	11.78
XT-108-Py-01	152ZK03	1717.17~1718.37	黄铁矿	45.67	53.519	0.024	0.006	0.043	-	0.04	0.004	0.006	-	-	99.312	
XT-108-Py-02	152ZK03	1717.17~1718.37	黄铁矿	44.749	53.813	0.011	0.002	0.058	-	0.022	-	-	-	0.037	98.692	
XT-112-Py-01	152ZK03	1723.57~1724.67	黄铁矿	46.083	53.645	0.004	-	0.079	0.01	0.019	0.003	-	-	0.011	99.854	7.90

续表 1

Continued Table 1

样品号	采样位置		矿物名称	w(B)/%												Co/Ni
	钻孔	深度/m		Fe	S	Au	Ag	Co	Ni	Cu	As	Sb	Pb	Zn	总和	
XT-112-Py-02	152ZK03	1723.57~1724.67	黄铁矿	46.606	53.577	0.005	-	0.035	0.044	-	0.021	-	-	-	100.288	0.80
XT-112-Py-03	152ZK03	1723.57~1724.67	黄铁矿	45.692	53.61	0.004	0.001	0.051	-	-	-	-	-	-	99.358	
XT-142-Py-01	184ZK05	1790~1791.4	黄铁矿	45.079	53.419	0.011	-	0.099	0.009	-	0	-	-	0.011	98.628	11.00
XT-142-Py-02	184ZK05	1790~1791.4	黄铁矿	45.572	53.517	0.005	-	0.013	0.007	-	0.01	-	-	-	99.124	1.86
XT-142-Py-03	184ZK05	1790~1791.4	黄铁矿	45.555	53.531	0.014	0.011	0.061	-	0.016	0.006	-	-	0.055	99.249	
XT-115-Py-01	152ZK03	1801.37~1802.87	黄铁矿	46.274	53.306	-	0.005	0.057	-	-	0.069	0.014	-	0.031	99.756	
XT-115-Py-02	152ZK03	1801.37~1802.87	黄铁矿	46.184	53.533	0.005	-	0.057	0.027	0.04	0.047	-	-	-	99.893	2.11
XT-115-Py-03	152ZK03	1801.37~1802.87	黄铁矿	46.171	53.774	0.006	0.002	0.051	-	0.014	0.055	0.011	0.039	-	100.123	
XT-116-Py-01	152ZK03	1802.87~1804.37	黄铁矿	46.36	53.751	-	-	0.075	0.014	0.002	-	0.004	0.007	0.042	100.255	5.36
XT-116-Py-02	152ZK03	1802.87~1804.37	黄铁矿	46.397	53.631	0.024	-	0.09	0.013	-	-	-	-	-	100.155	6.92
XT-116-Py-03	152ZK03	1802.87~1804.37	黄铁矿	46.54	53.871	-	0.001	0.064	0.019	-	0.016	-	-	0.015	100.526	3.37
XT-119-Py-01	152ZK03	1808.87~1810.37	黄铁矿	45.889	54.397	0.003	0.002	0.01	0.036	0.051	0.077	-	0.071	0.051	100.587	0.28
XT-119-Py-02	152ZK03	1808.87~1810.37	黄铁矿	45.459	54.915	0.018	0.005	0.029	0.025	-	0.031	0.019	0.023	0.167	100.691	1.16
XT-119-Py-03	152ZK03	1808.87~1810.37	黄铁矿	45.427	53.405	-	-	0.049	-	-	0.01	0.016	-	0.106	99.013	
XT-40-Py-01	288ZK03	1998.76~2000.26	黄铁矿	45.263	53.171	-	-	0.104	-	-	-	-	-	-	98.538	
XT-44-Py-01	288ZK03	2025.75~2027.25	黄铁矿	45.413	53.302	-	-	0.092	-	-	0.013	-	0.06	0.035	98.915	
XT-44-Py-02	288ZK03	2025.75~2027.25	黄铁矿	45.868	53.161	-	-	0.095	0.045	0.001	0.033	-	0.005	0.009	99.217	2.11
XT-53-Py-02	288ZK03	2049.75~2051.25	黄铁矿	45.883	53.469	0.007	0.005	0.028	0.001	-	0.008	-	-	-	99.401	28.00
XT-53-Py-03	288ZK03	2049.75~2051.25	黄铁矿	46.128	53.331	-	-	0.063	0.001	0.008	0.053	0.031	0.03	-	99.645	63.00
XT-53-Py-04	288ZK03	2049.75~2051.25	黄铁矿	46.241	53.303	-	0.001	0.069	0.006	0.011	0.026	-	-	-	99.657	11.50
XT-53-Py-05	288ZK03	2049.75~2051.25	黄铁矿	46.131	53.857	-	0.003	0.049	-	-	0.001	0.005	0.028	-	100.074	
XT-60-Py-01	288ZK03	2070.07~2071.27	黄铁矿	46.451	53.812	-	-	0.081	-	-	-	-	-	-	100.344	
XT-60-Py-02	288ZK03	2070.07~2071.27	黄铁矿	46.444	53.757	-	0.004	0.132	0.006	0.01	0.017	0.031	-	0.049	100.45	22.00
XT-61-Py-01	288ZK03	2071.27~2072.47	黄铁矿	46.336	53.752	0.029	-	0.107	0.059	-	-	0.009	-	0.007	100.299	1.81
XT-61-Py-02	288ZK03	2071.27~2072.47	黄铁矿	46.689	54.23	0.022	0.016	0.089	0.024	-	-	-	0.03	-	101.1	3.71
XT-61-Py-03	288ZK03	2071.27~2072.47	黄铁矿	45.939	53.906	-	0.004	0.101	0.054	-	0.012	-	0.018	0.053	100.087	1.87
XT-61-Py-04	288ZK03	2071.27~2072.47	黄铁矿	46.304	53.889	0.004	-	0.12	0.014	0.038	-	0.029	0.014	-	100.412	8.57
XT-62-Py-01	288ZK03	2072.47~2073.97	黄铁矿	46.311	53.78	0.011	0.004	0.091	-	-	0.003	-	-	0.024	100.224	
XT-62-Py-02	288ZK03	2072.47~2073.97	黄铁矿	46.471	53.932	0.004	0.007	0.045	0.013	0.01	-	0.019	-	-	100.501	3.46
XT-66-Py-01	320ZK01	2077.99~2079.58	黄铁矿	46.344	53.75	-	0.003	0.053	0.009	-	0.016	0.003	-	0.029	100.207	5.89
XT-66-Py-02	320ZK01	2077.99~2079.58	黄铁矿	46.019	53.425	0.018	-	0.061	-	-	0.006	-	-	0.048	99.577	
XT-66-Py-03	320ZK01	2077.99~2079.58	黄铁矿	46.366	53.672	0.01	-	0.029	-	0.009	-	0.009	-	-	100.095	
XT-71-Py-01	320ZK01	2105.83~2107.33	黄铁矿	45.616	53.213	0.03	0.003	0.096	0.026	-	0.034	0.008	0.034	0.044	99.104	3.69
XT-71-Py-02	320ZK01	2105.83~2107.33	黄铁矿	46.132	53.056	-	-	0.045	-	0.035	0.042	0.023	0.039	0.104	99.476	
XT-71-Py-03	320ZK01	2105.83~2107.33	黄铁矿	46.084	53.171	0.003	0.005	0.124	0.016	-	0.112	0.031	-	0.08	99.626	7.75
XT-77-Py-01	320ZK01	2114.83~2116.13	黄铁矿	46.526	54.133	-	-	0.052	-	-	0.084	-	0.002	0.035	100.832	
XT-77-Py-02	320ZK01	2114.83~2116.13	黄铁矿	46.439	53.77	0.032	0.004	0.082	0.022	0.03	0.017	-	-	0.101	100.497	3.73
XT-77-Py-03	320ZK01	2114.83~2116.13	黄铁矿	45.555	53.619	0.02	0.009	0.063	0.006	0.028	0.005	-	0.064	-	99.369	10.50
XT-78-Py-01	320ZK01	2116.13~2117.43	黄铁矿	46.23	54.009	-	-	0.059	-	0.016	0.028	-	-	-	100.342	
XT-78-Py-02	320ZK01	2116.13~2117.43	黄铁矿	46.289	53.724	0.012	0.018	0.088	0.051	-	0.009	-	-	0.024	100.215	1.73
XT-78-Py-03	320ZK01	2116.13~2117.43	黄铁矿	46.224	53.454	0.005	-	0.103	0.015	0.044	0.042	-	-	-	99.887	6.87
XT-82-Py-01	320ZK01	2123.18~2124.68	黄铁矿	46.016	53.712	-	0.005	0.035	0.016	-	-	0.005	-	0.049	99.838	2.19
XT-82-Py-02	320ZK01	2123.18~2124.68	黄铁矿	46.056	53.658	0.012	-	0.077	0.014	-	0.015	0.047	-	-	99.879	5.50
XT-82-Py-03	320ZK01	2123.18~2124.68	黄铁矿	46.134	53.864	0.022	0.023	0.155	0.017	0.037	0.021	-	-	-	100.273	9.12
XT-84-Py-01	320ZK01	2125.78~2126.88	黄铁矿	46.448	53.814	0.036	0.001	0.024	-	-	0.014	-	0.014	0.04	100.391	
XT-84-Py-02	320ZK01	2125.78~2126.88	黄铁矿	46.503	53.767	-	-	0.053	0.014	0.012	-	-	-	0.033	100.382	3.79
XT-84-Py-03	320ZK01	2125.78~2126.88	黄铁矿	45.873	54.071	-	-	0.118	-	-	-	-	0.054	-	100.116	
XT-2-Ccp-08	72ZK01	1341.8~1343.3	黄铜矿	29.715	34.282	-	0.007	0.077	-	33.783	0.025	0.023	0.01	0.107	98.029	
XT-33-Ccp-03	88ZK05	1525.54~1526.85	黄铜矿	30.268	34.828	0.025	-	0.01	-	33.378	-	-	-	-	98.509	
XT-36-Ccp-01	88ZK05	1546.05~1547.25	黄铜矿	29.595	34.686	0.003	-	0.054	-	34.114	-	-	-	0.067	98.519	
XT-36-Ccp-02	88ZK05	1546.05~1547.25	黄铜矿	29.554	35.14	-	-	0.042	0.049	33.641	-	0.006	0.026	0.044	98.502	
XT-122-Ccp-04	152ZK07	1639.67~1641.17	黄铜矿	29.263	34.759	-	-	0.048	-	33.184	0.017	-	0.007	0.03	97.308	
XT-122-Ccp-05	152ZK07	1639.67~1641.17	黄铜矿	29.277	35.107	0.039	-	0.056	-	33.13	-	0.006	0.031	0.011	97.657	
XT-53-Ccp-01	288ZK03	2049.75~2051.25	黄铜矿	29.388	34.705	-	0.007	0.013	-	33.728	0.011	0.026	-	0.025	97.903	

注:“-”表示低于检测限;比值单位为1。

表2 招贤金矿金矿物电子探针主、微量元素测试结果表

Table 2 EPMA major and trace element contents of gold minerals from the Zhaoxian gold deposit

样品号	采样位置		矿物名称	w(B)/%												金成色
	钻孔	深度/m		Fe	S	Au	Ag	Co	Ni	Cu	As	Sb	Se	Bi	总和	
XT-7-Au-01	72ZK01	1367.3~1368.8	银金矿	0.58	0.076	65.627	32.37	0.029	0.003	0.502	-	-	-	0.748	99.935	657
XT-33-Au-01	88ZK05	1525.54~1526.85		1.287	0.614	55.43	44.961	-	-	0.094	-	-	0.022	0.576	102.984	538
XT-33-Au-02	88ZK05	1525.54~1526.85		0.947	0.224	61.325	35.988	-	-	0.234	-	-	0.002	0.593	99.313	617
XT-33-Au-03	88ZK05	1525.54~1526.85		0.637	0.18	61.361	35.659	0.017	0.022	-	-	-	0.013	0.541	98.43	623
XT-33-Au-04	88ZK05	1525.54~1526.85		0.505	0.207	65.365	33.303	0.02	-	0.242	-	-	0.025	0.644	100.311	652
XT-124-Au-01	152ZK07	1642.37~1643.87		1.89	0.239	77.178	14.69	0.025	0.016	-	-	-	-	0.655	94.693	815
XT-124-Au-02	152ZK07	1642.37~1643.87		4.633	2.064	71.024	15.15	0.025	-	-	0.006	-	0.015	0.578	93.495	760
XT-125-Au-01	152ZK07	1643.87~1645.37		3.758	0.261	78.543	15.476	-	-	0.089	0.013	0.01	0.01	0.819	98.979	794
XT-125-Au-02	152ZK07	1643.87~1645.37	自然金	5.386	2.033	87.239	9.392	0.033	-	-	-	-	0.014	0.894	104.991	831
XT-141-Au-01	184ZK05	1788.7~1790		1.461	0.218	81.237	4.989	-	-	-	-	-	0.015	0.806	88.726	916
XT-141-Au-02	184ZK05	1788.7~1790		1.596	0.389	90.698	5.82	-	-	-	-	0.012	0.04	1.047	99.602	911
XT-116-Au-02	152ZK03	1802.87~1804.37		2.177	0.807	95.473	4.625	-	-	-	0.022	0.004	-	1.78	104.888	910
XT-119-Au-01	152ZK03	1808.87~1810.37		1.035	0.274	88.643	8.001	0.003	0.004	-	-	-	0.023	0.816	98.799	897
XT-119-Au-02	152ZK03	1808.87~1810.37		1.793	1.073	85.305	7.803	0.013	0.021	-	-	-	0.006	1.724	97.738	873
XT-61-Au-01	288ZK03	2071.27~2072.47		0.682	0.223	94.763	2.908	0.043	0.021	-	-	0.063	0.007	0.888	99.598	951
XT-61-Au-03	288ZK03	2071.27~2072.47		3.735	0.508	91.27	3.427	-	-	-	-	-	-	0.701	99.641	916

注:"-"表示低于检测限。

0.016%;*w*(Bi)=0.541%~1.790%,平均值0.863%。

5 讨 论

5.1 金的赋存状态

根据本次电子探针背散射图像观察,招贤金矿床中金矿物形态以角粒状为主,片状、麦粒状次之,枝杈状、浑圆粒状、针状少量。金矿物的赋存状态以裂隙金为主,其次为包体金,金矿物主要分布于黄铁矿裂隙及晶隙中(图5g~i)、少量分布于石英粒间(图5e、f),金矿物粒度介于1~30 μm,多数介于5~10 μm。

根据金和银含量情况,金矿物可分为自然金(Au:Au>80%、Ag<20%)、银金矿(Au-Ag:Au 80%~50%、Ag 20%~50%)和金银矿(Au-Ag:Au 50%~20%,Ag 50%~80%)。光学显微镜下由于金矿物颗粒大多数较为细小,难以区分是自然金还是银金矿,而电子探针(EPMA)具有高分辨率,可以有效区分金矿物(刘建中等, 2007)。

本次测试对16颗金矿物开展了电子探针(EPMA)点分析(表2)。测试结果显示,约50%(8颗)为自然金,50%(8颗)为银金矿。自然金的*w*(Au)为81.237%~95.473%,平均值89.329%,*w*(Ag)为2.908%~9.392%,平均值5.871%;银金矿中,*w*(Au)为55.430%~78.543%,平均值66.982%,*w*(Ag)为14.690%~44.961%,平均值28.450%。

招贤金矿中不可见金主要分布于黄铁矿和黄铜矿晶体内。本次测试对102颗黄铁矿开展了电子探针(EPMA)点分析,约38%(39颗)的金低于检测限,剩余的62%(63颗)测得*w*(Au)为0.001%~0.048%,平均为0.014%,其中,27颗检测*w*(Ag)为0.001%~0.269%,平均值0.016%;对应的*w*(Au)/*w*(Ag)=0.04~36,其中,78%(21颗)的*w*(Au)/*w*(Ag)比值大于1,推断不可见金矿物主要为自然金和银金矿为主。同时,对7颗黄铜矿开展了电子探针(EPMA)点分析(表2)。测试结果显示,约43%(3颗)测得*w*(Au)为0.003%~0.039%,平均值0.022%,对应的银低于检测限,推断金矿物可能以自然金为主;剩余的57%(4颗)金低于检测限。总体而言,不可见金含量较少。

总体而言,招贤金矿中黄铁矿是与金最密切的矿物相,是金的主要载体矿物,少量金赋存在石英中,偶见于黄铜矿内。Au主要有2种赋存形式:一是独立的金矿物,如自然金、银金矿等矿物;二是不可见金即晶格金,以自然金、银金矿等形式赋存于矿物晶格或晶格缺陷中。

5.2 矿床成因指示

前人对胶东金矿成矿物理化学性质研究发现:成矿流体性质与造山型金矿变质流体相似,以中低温(200~400℃)、低盐度*w*($NaCl_{eq}$)(0~10%)和高*x*(CO_2)(4%~25%)的含水流体为特征(Groves et al.,

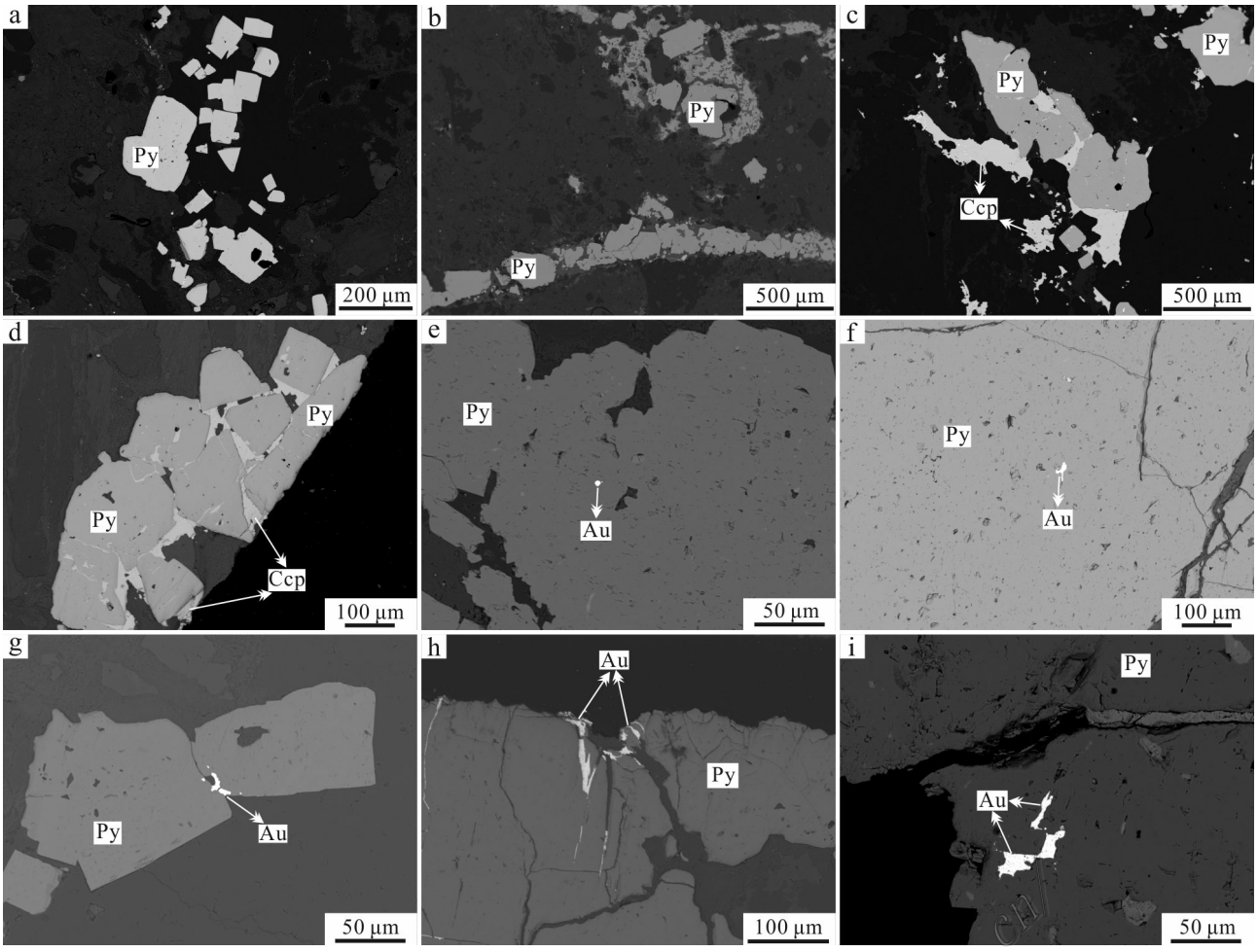

图5　招贤金矿深钻岩芯矿石BSE照片

a. 自形-半自形黄铁矿;b. 半自形-他形黄铁矿,呈脉状产出;c、d. 黄铁矿被黄铜矿胶结;e、f. 金呈包裹体产于黄铁矿内;g~i. 黄铁矿中裂隙金

Py—黄铁矿;Ccp—黄铜矿;Au—金矿物

Fig. 5　BSE images of ore minerals in deep drill cores from the Zhaoxian gold deposit

a. Euhedral-subhedral pyrite; b. Subhedral-anhedral pyrite occurring as vein-shape; c, d. Pyrite was replaced and cemented by chalcopyrite; e, f. The gold occurs in pyrite as inclusions. g~i. The gold occurs in pyrite as fissure-type

Py—Pyrite; Ccp—Chalcopyrite; Au—Gold mineral

2020; Fan et al., 2021)。然而,部分学者结合成矿时代(约 120 Ma)、构造背景及同位素特征,推断成矿流体主要来源于岩浆或地幔脱挥发分(朱日祥等, 2015; Wang et al., 2021)。本次研究,通过含金黄铁矿成分和金成色分析,尝试为限制成矿流体来源提供新的证据。

5.2.1　黄铁矿成分及其意义

黄铁矿 w(S)和 w(Fe)的理论值分别为 53.45% 和 46.55%,S/Fe(原子比)=2。在不同成因的实际样品中,黄铁矿中 w(S)、w(Fe)与理论标准值存在着不同程度的差异。一般将 S/Fe<2 称为硫亏损,S/Fe>2 称为铁亏损。严育通等(2012a; 2012b)通过对不同类型金矿中黄铁矿的成分统计,总结出不同类型金矿中黄铁矿的S、Fe平均含量:浅成低温热液型 w(S)为 52.99%、w(Fe) 为 46.35%;岩浆热液型 w(S) 为 52.66%、w(Fe)为 45.9%;变质热液型 w(S)为 52.72%、w(Fe) 为 46.76%;卡林型 w(S) 为 51.03%、w(Fe) 为 44.86%,并认为浅成低温热液型和岩浆热液型有轻度Fe、S亏损,变质热液型有富集Fe、亏损S的特点,卡林型则有Fe、S重度亏损的特点。

在本次研究的招贤矿区黄铁矿中,w(S)=52.227%~54.915%,平均值53.552%;w(Fe)=44.749%~47.134%,平均值 45.941%(表 1);其 w(S)、w(Fe)高于浅成低温热液型和卡林型金矿,接近于岩浆热液型和变

质热液型。对比岩浆热液型和变质热液型中*w*(Fe),招贤矿区黄铁矿*w*(Fe)更接近岩浆热液型。另外,*w*(S)/*w*(Fe)介于1.14~1.21,平均值1.17;原子个数比(S/Fe)为1.99~2.11,平均值2.04;化学式$FeS_{1.99}$~$FeS_{2.11}$,平均化学式为$FeS_{2.04}$,这些都显示招贤矿区黄铁矿更类似于浅成低温热液型和岩浆热液型金矿。

黄铁矿中的Fe常被其同族元素Co和Ni类质同象置换,Co通常会与Fe成连续类质同象,但Ni则一般倾向于形成不连续的类质同象。高温热液条件下,Co比Ni更易替代Fe^{2+},故不同成因的黄铁矿Co/Ni值不一样(Yuan et al., 2018),一般沉积型Co/Ni值小于1,变质热液型接近1,岩浆热液型Co/Ni值大于1(王奎仁, 1987)。本次研究中,除了XT-112-Py-02和XT-119-Py-01数据中的Co/Ni比值分别为0.8和0.28(表1)外,其他测点获得的Co/Ni比值均大于1(1.14~65.00),落在热液成因区域(图6),且半数的Co/Ni比值大于5,指示黄铁矿的形成与岩浆热液有关。同时,范宏瑞等(2005)对胶东金矿氢、氧、硫等稳定同位素测试表明,金矿的初始流体以岩浆水为主。而碳、氧、氦、氩同位素研究结果显示,岩浆流体可能为地幔去气形成的(张连昌等, 2002; 刘建明等, 2003; 毛景文等, 2005)。因此,招贤金矿的成矿流体推断主要为地幔去气形成的岩浆热液。

另外,相对于岩浆热液有关的金矿,与加热循环的大气水有关的卡林型金矿更富As(Kusebauch et al., 2019)。尤其是近年来LA-ICP-MS对黄铁矿精细环带和成分分析,揭示金矿成矿阶段从早到晚,*w*(As)逐渐增高(许杨等, 2021),暗示循环的大气水也可能对成矿热液系统有贡献(Zhang et al., 2020)。As是低温元素的一种,其含量会随着大气水与岩浆水混合比例不同而变化,两者的比值越大,*w*(As)也越高,即大气水的参与越多,*w*(As)越高(严遇通, 2012b)。在本次研究的XT-112-Py-02和XT-119-Py-01数据中,*w*(As)较高,分别为0.021%和0.077%,而Co/Ni比值小于1,与上文提到的两者分别代表加热大气水和岩浆热液的结论一致。同时,本次研究中大部分Co/Ni比值大于1的黄铁矿*w*(As)为0.002%~0.160%,表明招贤金矿成矿流体有少量大气水加入。同时,招贤金矿的围岩蚀变主要为黄铁绢英岩化,也表明成矿流体为岩浆水与大气水的混合。总体而言,招贤金矿深部成矿流体以岩浆热液为主,晚期有少量大气水加入。

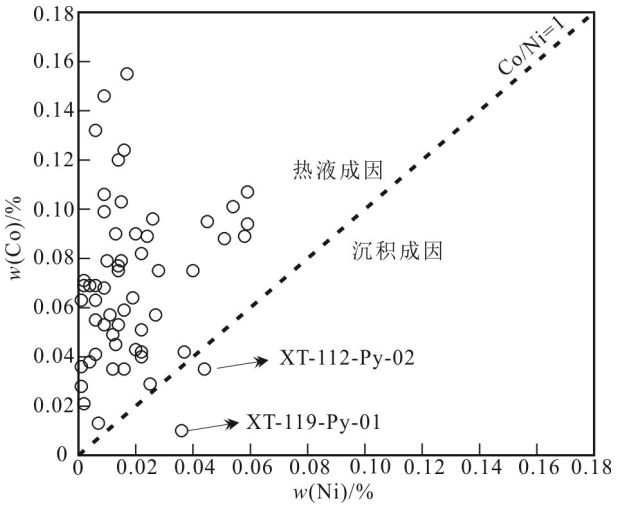

图6 招贤金矿含金黄铁矿Co-Ni图(底图据王奎仁, 1987)

Fig. 6 The Co-Ni diagram of gold-bearing pyrite from the Zhaoxian gold deposit (base map after Wang et al., 1987)

5.2.2 金的成色及其意义

金的成色是金的纯度和品级的标志,是指自然金或合金中金元素所占质量的分数(李长顺, 1995)。关于成色的概念,目前为广大金矿地质工作者所接受的是加拿大金矿地质学者Boyle(1979)的定义,是指在1000重量单位天然合金中金的含量,计算公式如下:金的成色=Au/(Au+Ag+其他微量元素)×1000;各元素的单位是质量分数。

前人研究发现金的成色受控于以下因素(刘儒, 1994; 郁云妹等, 1995; 李长顺, 1995; 张振儒等, 1995; 1998):① 温度和压力,即形成温度越高、深度越大,金的成色越高,如浅成低温热液带金矿物成色500~700,中深部中温带750~900,深部高温带800~1000;② 成矿时代,即成矿时代越老,金的成色越高;③ 成因类型,即变质热液金矿床中金的成色比沉积变质热液型、岩浆热液及热水型的高,一般为800~900。

本次研究电子探针分析结果显示,招贤金矿床中的金成色为538~951(表2),平均值794,整体较高(图7),指示矿床成矿深度较大,具有中深岩浆热液型金的特点。

5.3 深部找矿潜力指示

在深部找矿实践中,如何更好的确定成矿系统中矿体的空间位置是关键科学问题,尤其需要从不同尺度系统开展特定类型矿床的地球化学特征研究。原生异常的识别(如围岩原生晕或构造叠加晕)

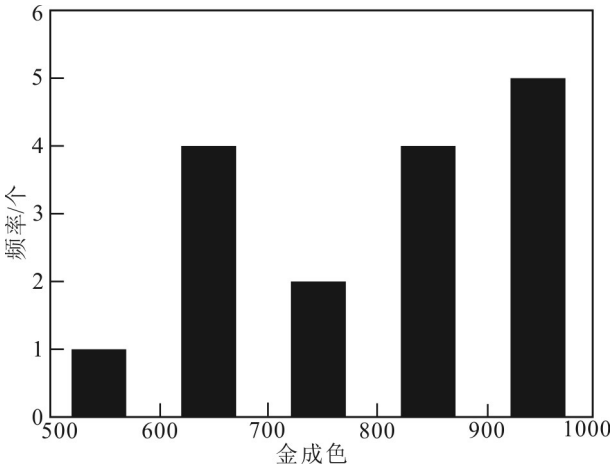

图7　招贤金矿金矿物金成色频率图

Fig. 7　The frequency diagram of gold fineness of gold minerals from the Zhaoxian gold deposit

在探测浅地表矿床方面是相对有效的(李惠等, 2015),当矿体到达一定深度后,需要获得全面的深部地球化学信息。成矿元素的富集或贫化可以用元素比值来指向矿体(矿化区)的潜在位置,尤其是成矿作用过程中流体与围岩相互作用形成的金属硫化物。硫化物中微量元素含量及关键元素比值,结合矿化蚀变规律,可以作为诊断性指标来确定矿体的位置。

5.3.1　含金黄铁矿元素含量及比值指示

许多研究者认为胶东金矿中除了壳源流体外,还有幔源流体的贡献,如张连昌等(2002)对胶东金矿中黄铁矿开展 He-Ar 同位素研究,推断深部有幔源流体贡献;刘建明等(2003)对胶东 4 类金矿的方解石开展碳、氧、锶、钕同位素研究,亦表明有深部幔源流体贡献;毛景文等(2005)对胶东十几个金矿开展碳、氢、氧、硫同位素研究,也揭示幔源流体的贡献。因此,具有幔源特征的高温元素 Co 和 Ni 和壳源特征的低温元素 As,具有深部矿体定位的诊断性作用。

李杰等(2020)报道了焦家金矿深部矿体(−600~−1100 m)中黄铁矿的 Co/Ni 比值介于 0.54~1.57,平均值 0.99。本次研究发现,招贤金矿深部矿体(−1260~−2170 m)中的黄铁矿 Co/Ni 比值普遍大于 1,较浅部呈周期性波动,总体 Co/Ni 比值小于 40;然而,从−2000 m 开始,Co/Ni 比值迅速增大,最高值达到 63,显示自浅部至深部逐渐变大的趋势。同时,黄铁矿中 w(As)随深度增加,总体显示深部变小的趋势,即在浅部显示高值(在−1346 m 处,出现 w(As)最大值 3020×10^{-6}),之后逐渐变低,并呈周期性波动(w(As)总体小于 1600×10^{-6})。相对而言,黄铁矿中的中温元素 w(Pb)和 w(Zn)并未随着深度明显变化(图 8)。综上所述,显然当前探测的矿体处于岩浆热液与大气水混合的区域,并未达到矿体发育的根部,因此推测招贤金矿深部仍具有成矿潜力。

5.3.2　金成色变化指示

前人研究表明,金的成色低,金矿床的形成温度低,深度浅;反之,金的成色高,成矿深度大,形成温度高(张振儒等, 1995)。如美国怀俄明州狄安娜矿山(高温型),金的成色高达 926(1 个样品;分析 6 点);蒙大拿州(高温热液交代型),金的成色高达 977(3 个样品;分析 16 点);科罗拉多州乔尼(中偏高温型),金的成色为 891(1 个样品;分析 5 点);科罗拉多州的迪西矿为中温型,金的成色为 808(1 个样品;分析 18 点);内华达州环山区金矿属低温型,金的成色为 786(5 个样品;分析 15 点);科罗拉多州皮克金矿属低温型,金的成色为 756(3 个样品;分析 10 点)。显然,金的成色与温度和压力存在正相关关系,即浅成低温热液带金矿物成色 500~700,中深部中温带 750~900,深部高温带大于 800(张振儒等, 1995)。

焦家成矿断裂带内浅部矿体中金成色较低,以 550~750 居多(孟繁聪等, 1998);而深部矿体(−2700~−3000 m)中金的成色较高,为 658~990,平均值 827(孙雨沁等, 2020)。这与成矿早期形成相对高成色金,后期形成低成色金的认识基本一致(Fan et al., 2021)。本次研究发现,招贤金矿深部(−1260~−2170 m)金成色为 538~951,平均值 794,与中国山东浅部“玲珑式”石英脉型金矿床中金的平均成色(761)一致,明显低于深部为“焦家式”蚀变岩型金矿床中金的平均成色(814),尤其是深部矿体的金成色(827)。同时,Fan 等(2021)报道在三山岛金矿中,金成色平均值由 420 m 深的 752 逐渐增加至 2650 m 深的 870。本次研究获得招贤金矿的金成色具有随深度不断增加的趋势(图 9),但并未达到深部金矿体的最高金成色(990),因此,作者推测招贤金矿深部仍具有成矿潜力。

5.3.3　深部找矿潜力

招贤矿区金矿体严格受焦家断裂带控制,并显示了较好的深部延伸。同时,深部金矿体的黄铁绢英岩化蚀变稳定发育。本次研究发现,招贤金矿深部矿体(−1260~−2170 m)中的黄铁矿 Co/Ni 比

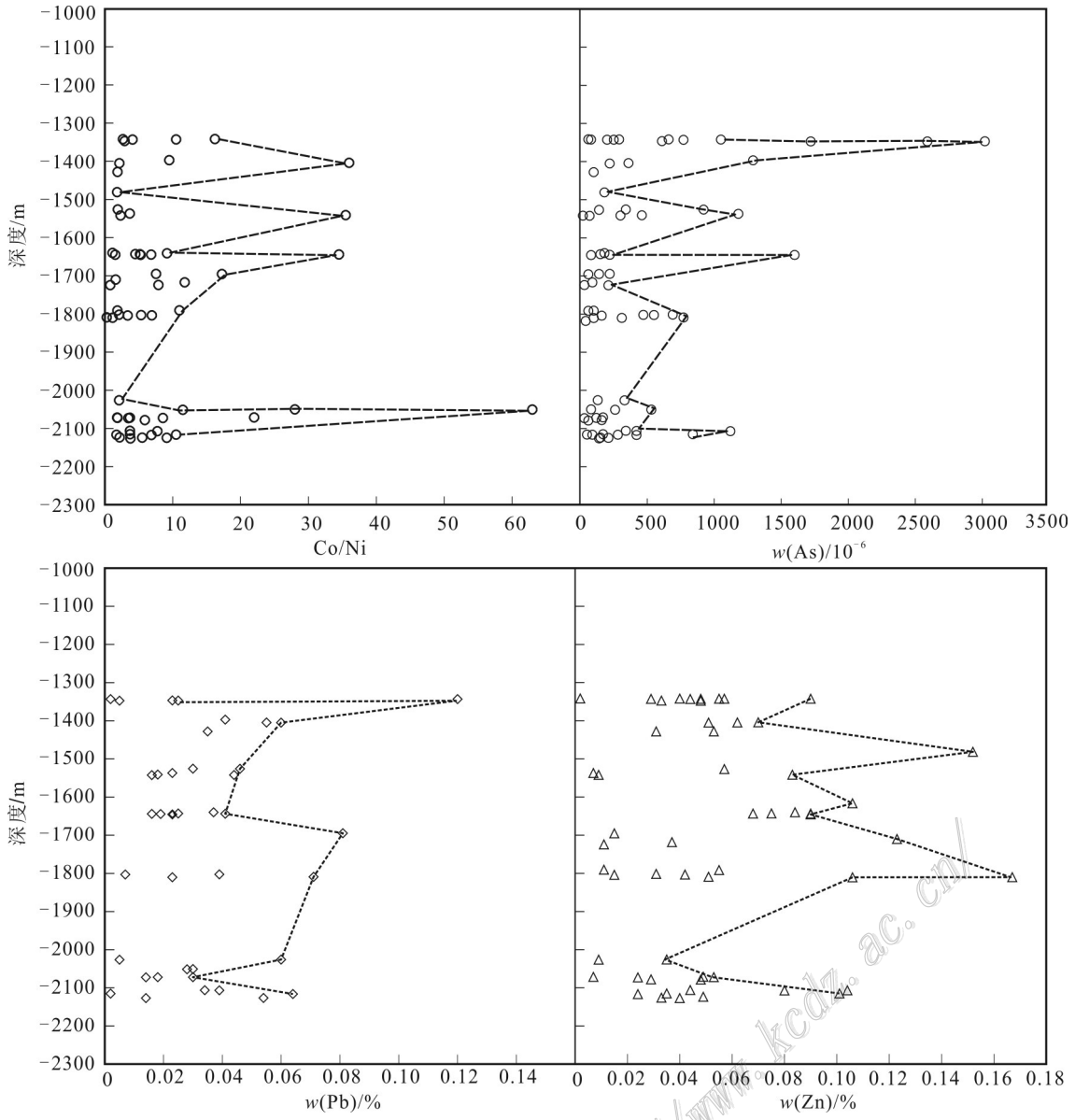

图8 招贤金矿不同深度黄铁矿Co/Ni比值和w(As)、w(Pb)和w(Zn)变化图

Fig. 8 The variable diagram of the Co/Ni ratio, and w(As), w(Pb)and w(Zn)of gold-bearing pyrite at different depth from the Zhaoxian gold deposit

值普遍大于1,明显高于浅部矿体的比值;而黄铁矿中低温元素w(As)随深度增加,总体显示深部变小的趋势,但是中温元素w(Pb)和w(Zn)随深度增加,并未发生明显的降低。另外,深部矿体金成色不断增加,但并未达到极值。综合构造蚀变特征及黄铁矿元素变化,推断招贤金矿深部仍具有成矿潜力。

2017年,山东省地质科学研究院在招贤矿区320勘探线施工了深钻钻孔(最大深度达到3266.06 m),并在−2700 m处发现厚20 m的金矿体(祝德成等, 2018; 于学峰等, 2019),很好的验证了本次研究的预测。

6 结 论

(1) 招贤金矿中金赋存状态包括可见金和不可见金,其中以可见裂隙金为主,金矿物包括自然金和银金矿。

(2)招贤金矿中黄铁矿w(S)=52.227%~54.915%,w(Fe)=44.749%~47.134%,化学式$FeS_{1.99}$~$FeS_{2.11}$,显

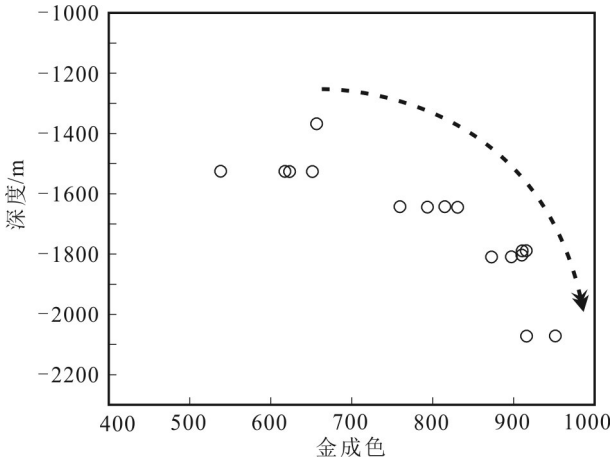

图9　招贤金矿不同深度金成色变化图

Fig. 9　The gold fineness of gold minerals at different depth from the Zhaoxian gold deposit

示弱富S、轻亏Fe特征,推断可能与岩浆热液有关。

(3) 招贤金矿中,由于金成色较高(538~951)和黄铁矿Co/Ni值均大于1(1.14~65.00),推测可能形成于中深岩浆热液。

(4) 招贤金矿中随着深度增加,Co/Ni比值总体增加;*w*(As)总体降低;金成色逐渐增加,推断深部具有成矿潜力。

致　谢　感谢中国冶金地质总局山东局测试中心王继林在电子探针分析方面提供的帮助。感谢匿名审稿专家对本文提出的宝贵意见和建议,在此表示衷心的谢忱。

Reference

Abraitis P K, Pattrick R A D and Vaughan D J. 2004. Variations in the compositional, textural and electrical properties of natural pyrite: A review[J]. International Journal of Mineral Processing, 74(1-4): 41-59.

Bao Z Y, Niu T, Gao S J, Sun R G and Li S T. 2010. Geological characteristics of ore bodies in deep part and its predication of ore-forming in Jiaojia gold deposit[J]. Shandong Land and Resources, 26 (1): 6-10(in Chinese with English abstract).

Boyle R W. 1979. The geochemistry of gold and its deposits (Bulletin 280)[M]. Ottawa: Geological Survey of Canada. 579-584.

Deng J, Yang L Q, Groves D I, Zhang L, Qiu K F and Wang Q F. 2020a. An integrated mineral system model for the gold deposits of the giant Jiaodong Province, eastern China[J]. Earth Science Reviews, 208: 103274.

Deng J, Qiu K F, Wang Q F, Goldfarb R, Yang L Q, Zi J W, Geng J Z and Ma Y. 2020b. In situ dating of hydrothermal monazite and implications for the geodynamic controls on ore formation in the Jiaodong gold Province, eastern China[J]. Econ. Geol., 115(3): 671-685.

Dong C Y, Wang S J, Liu D Y, Wang J G, Xie H Q, Wang W, Song Z Y and Wan Y S. 2010. Late Palaeoproterozoic crustal evolution of the North China Craton and formation time of the Jingshan Group: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon dating of meta-intermediate-basic intrusive rocks in eastern Shandong Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(6): 1699-1706(in Chinese with English abstract).

Fan H R, Hu F F, Yang J H, Shen K and Zhai M G. 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).

Fan H R, Lan T G, Li X H, Santosh M, Yang K F, Hu F F, Feng K, Hu H L, Peng H W and Zhang Y W. 2021. Conditions and processes leading to large-scale gold deposition in the Jiaodong Province, eastern China[J]. Science China Earth Sciences, 64(9): 1504-1523.

Gao S J, Wei X F, Sun R G and Li S T. 2010. Geological charcteristics and ore prospecting future in deep part of Matang gold deposit in Laizhou City[J]. Shandong Land and Resources, 26(6): 7-17(in Chinese with English abstract).

Groves D I, Santosh M, Deng J, Wang Q, Yang L and Zhang L. 2020. A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration[J]. Mineralium Deposita, 55: 275-292.

Jahn B M, Liu D Y, Wan Y S, Song B and Wu J S. 2008. Archean crustal evolution of the Jiaodong Peninsula, China, as revealed by zircon SHRIMP geochronology, elemental and Nd-isotope geochemistry[J]. American Journal of Science, 308(3): 232-269.

Kusebauch C, Gleeson S A and Oelze M. 2019. Coupled partitioning of Au and As into pyrite controls formation of giant Au deposits[J]. Science Advances, 5(5): eaav5891.

Li C S. 1995. Influence factor on the fineness of gold and electrum[J]. Gold Geology, 1(3): 61-66(in Chinese with English abstract).

Li H, Yu B, Li D L, Ma J J, Sun F Z, Li Y C, Wang Y D and Li S. 2015. Structural superimposed halo model of different type gold deposit for deep blind ore predication[J]. Mineral Resources and Geology, 29(5): 648-653(in Chinese with English abstract).

Li J, Song M C, Liang J L, Jiang M Y, Ding Z J and Su F. 2020. Source of ore-forming fluids of the Jiaojia deeply-seated gold deposit: Evidences from trace elements and sulfur-helium-argon isotopes of pyrite[J]. Acta Petrologica Sinica, 36(1): 297-313(in Chinese with English abstract).

Li J W, Vasconcelos P, Zhang J, Zhou M F, Zhang X J and Yang F H. 2003. $^{40}Ar/^{39}Ar$ 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.

Liu J H, Liu F L, Ding Z J, Liu C H, Yang H, Liu P H, Wang F and Meng E. 2013a. The growth, reworking and metamorphism of early Precambrian crust in the Jiaobei terrane, the North China Craton: Constraints from U-Th-Pb and Lu-Hf isotopic systematics, and REE concentrations of zircon from Archean granitoid gneisses[J]. Precambrian Research, 224: 287-303.

Liu J H, Liu F L, Ding Z J, Yang H, Liu C H, Liu P H, Xiao L L, Zhao L and Geng J Z. 2013b. U-Pb dating and Hf isotope study of detrital zircons from the Zhifu Group, Jiaobei Terrane, North China Craton: Provenance and implications for Precambrian crustal growth and recycling[J]. Precambrian Research, 235: 230-250.

Liu J M, Ye J, Xu J H, Jiang N and Ying H L, 2001. Preliminary discussion on geodynamic background of Mesozoic gold metallogeny in eastern North China-with examples from eastern Shandong Province[J]. Progress in Geophysics, 16(1): 39-46 (in Chinese with English abstract).

Liu J M, Ye J, Xu J H, Sun J G and Shen K. 2003. 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 Z, Xia Y, Deng Y M, Zhang X C and Qiu L. 2007. Re-study on modes of gold occurrence in the Shuiyindong super-large-sized gold deposit[J]. Guizhou Geology, 24(3): 165-169(in Chinese with English abstract).

Liu R. 1994. The fineness of gold[J]. Jilin Geology, 13(3): 81-83(in Chinese with English abstract).

Mao J W, Li H M, Wang Y T, Zhang C Q and Wang R T. 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 Sinca, 79: 839-857(in Chinese with English abstract).

Meng F C, Sun D S and Cun G. 1998. The fineness of native gold and its indicative significance in Jiaodong gold mines[J]. Gold Geology, 4(4): 30-32(in Chinese with English abstract).

Shen Y C, Liu T B and Yang J Z. 2000. The metallogenic prospect and geological characteristics of the interlayer-slide-breccia-type gold deposit[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemisty, 19 (4): 271-272(in Chinese).

Shen Y C, Zeng Q D, Liu T B, Li G M, Shen P and Sun X Y. 2003. The Tanlu fault zone and gold ore metallogenesis[J]. Global Geology, 22(1): 41-44 (in Chinese with English abstract).

Song G Z, Yang Z L, Li R X, Yan C M and Gao S J. 2016. Geological characteristics and prospecting potentiality of gold deposit in Shaling mine in Laizhou City[J]. Shandong Land and Resources, 32 (10): 1-4(in Chinese with English abstract).

Song M C, Zhang J J, Zhang P J, Yang L Q, Liu D H, Ding Z J and Song Y T. 2015. Discovery and tectonic-magmatic background of super-large gold deposit in offshore of northern Sanshandao Peninsula, China[J]. Acta Geologica Sinca, 89(2): 365-383(in Chinese with English abstract).

Song M C, Xu J X, Jiao X M, Meng Q B, Sun B L, Li S Y, Cao J and Fu P Y. 2018. Important prospecting achievements and the development of ore prospecting in deep hidden area gained by Shandong exploration bureau of geology and mineral resources in 60 years[J]. Shandong Land and Resources, 34(10): 1-14(in Chinese with English abstract).

Sun Y Q, Yu X F, Shan W, Xiong Y X, Zhang Y, Chi N J, Shu L, Li M and Cheng W. 2020. Mineralization characteristics and modes of occurrence of gold minerals at the depth of 3000 meters in Jiaojia fault zone, Jiaodong Peninsula[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41 (6): 919-937(in Chinese with English abstract).

Wan Y S, Song B, Liu D Y, Wilde S A, Wu J S, Shi Y R, Yin X Y and Zhou H Y. 2006. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidence for a major Late Palaeoproterozoic tectonothermal event[J]. Precambrian Research, 149(3-4): 249-271.

Wan Y S, Dong C Y, Xie H Q, Wang S J, Song M C, Xu Z Y, Wang S Y, Zhou H Y, Ming M Z and Liu D Y. 2012. Formation ages of Early Precambrain BIFs in the North China Craton: SHRIMP zircon U-Pb dating[J]. Acta Geologica Sinca, 86(9): 1447-1478(in Chinese with English abstract).

Wang C Y, Wei B, Tan W, Wang Z, and Zeng Q. 2021. The distribution, characteristics and fluid sources of lode gold deposits: An overview[J]. Science China Earth Sciences, 64(9): 1463-1480.

Wang K R. 1987. Mineralogy of earth and cosmogenesis[M]. Hefei: Anhui Education Press. 1-100(in Chinese).

Wang X M, Zhong D L and Wang Y. 2008. Geometry kinematics and thermochronology study of the Late Mesozoic movement of NW-trending faults, western Shandong[J]. Acta Geologica Sinca, 82 (9): 1258-1273 (in Chinese with English abstract).

Wang X M, Zhong D L, Li L, Ding Z Y, Li S and Zhang R Q. 2010. Relationship between NW faults of West Shandong and Yi-Shu fault zone in Late Mesozoic and their geotectonic setting operations[J]. Earth Science Frontiers, 17(3): 166-190(in Chinese with English abstract).

Wang Z C, Cheng H, Zong K Q, Geng X L, Liu Y S, Yang J H, Wu F Y, Becker H, Foley S and Wang C Y. 2020. Metasomatized lithospheric mantle for Mesozoic giant gold deposits in the North China Craton[J]. Geology, 48(2): 169-173.

Wang Z C, Xu Z, Cheng H, Zou Y, Guo J H, Liu Y H, Yang J H, Zong K Q, Xiong L and Hu Z C. 2021. Precambrian metamorphic crustal basement cannot provide much gold to form giant gold deposits in the Jiaodong Peninsula, China[J]. Precambrian Research, 354: 106045.

Wei Q, Fan H R, Lan T G, Liu X, Jiang X H and Wen B J. 2015. Genesis of Sizhuang gold deposit, Jiaodong Peninsula: Evidences from fluid inclusion and quartz solubility modeling[J]. Acta Petrologica Sinica, 31(4): 1049-1062(in Chinese with English abstract).

Xu Y, Lan T G, Shu L, Hu H L, Chen Y H and Wang H. 2021. Enrichment mechanisms of arsenic in pyrite from Sanshandao gold deposit (Jiaodong Peninsula, China) and implications for gold metallogenesis[J]. Mineral Deposits, 40(3): 419-431 (in Chinese with

English abstract).

Yan Y T, Li S R, Zhang Na, Jiang L, Jia B J, Li B K and Yan L. 2012a. Composition typomorphic characteristics and statistics analysis of metallogenic pyrite in gold deposits of different genetic types[J]. Gold, 33(3): 11-16(in Chinese with English abstract).

Yan Y T, Li S R, Jia B J, Zhang N and Yan L. 2012b. Composition typomorphic characteristics and statistical analysis of pyrite in gold deposits of different genetic types[J]. Earth Science Frontier, 19 (4): 214-226 (in Chinese with English abstract).

Yang J H and 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: 711-714.

Yang Z L, Zhang X and Jiang H L. 2007. Geological characteristics of Sizhuang gold deposit in Laizhou City of Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 23(5): 6-10(in Chinese with English abstract).

Yu X F, Song M C, Li D P, Tian J X and Wang L M. 2016. Prospecting breakthroughs and prospect of gold deposits in Shandong Province[J]. Acta Geologica Sinca, 90(10): 2847-2862(in Chinese with English abstract).

Yu X F, Yang D P, Li D P, Shan W, Xiong Y X, Chi N J, Liu P R and Yu L H. 2019. Mineralization characteristics and geological significance in 3000 m depth of Jiaojia gold metallogenic belt, Jiaodong Peninsula[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(9): 2893-2910(in Chinese with English abstract).

Yu Y M and Gammons C H. 1995. The controlling factor of gold fineness in the precious metal deposit[J]. Science in China (Series B), 25(4): 412-417(in Chinese).

Yuan M W, Li S R, Li C L, Santosh M, Alamb M and Zeng Y J. 2018. Geochemical and isotopic composition of auriferous pyrite from the Yongxin gold deposit, Central Asian Orogenic Belt: Implication for ore genesis[J]. Ore Geology Reviews, 93: 255-267.

Zhai M G, Fan H R, Yang J H and Miao L C. 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).

Zhang L C, Shen Y C, Li H M, Zeng Q D, Li G M and Liu T B . 2002. Helium and argon isotopic compositions of fluid inclusions and tracing to the source of ore-forming fluids for Jiaodong gold deposits[J]. Acta Petrologica Sinica, 18(4): 559-566(in Chinese with English abstract).

Zhang Y W, Hu F F, Fan H R, Liu X, Feng K and Cai Y C. 2020. Fluid evolution and gold precipitation in the Muping gold deposit (Jiaodong, China): Insights from in-situ trace elements and sulfur isotope of sulfides[J]. Journal of Geochemical Exploration, 218: 106617.

Zhang Z R and Chen M X. 1995. The geological application of gold fineness[J]. Gold Science and Technology, 3(6): 21-24(in Chinese).

Zhang Z R and Guo D L. 1998. Factors affecting the fineness of gold minerals and their mechanisms[J]. Gold Science and Technology, 6(4): 24-28(in Chinese with English abstract).

Zhu D C, Zhang W, Wang Y P, Tian J X, Liu H D, Hou J H and Gao H L. 2018. Characteristics of ore bodies and prospecting potential of Zhaoxian gold deposit in Laizhou City of Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 34(9): 14-19(in Chinese with English abstract).

Zhu G, Wang W, Gu C C, Zhang S and Liu C. 2016. Late Mesozoic evolution history of the Tan-Lu fault zone and its indication to destruction processes of the North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 32(4): 935-949(in Chinese with English abstract).

Zhu R X, Fan H R, Li J W, Meng Q R, Li S R and Zeng Q D. 2015. Decratonic gold deposits[J]. Science China: Earth Sciences, 45(8): 1153-1168(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

鲍中义, 钮涛, 高书剑, 孙瑞刚, 李树统 . 2010. 焦家金矿床深部矿体地质特征及深部成矿预测[J]. 山东国土资源, 26(1): 6-10.

董春艳, 王世进, 刘敦一, 王金光, 颉颃强, 王伟, 宋志勇, 万渝生 . 2010. 华北克拉通古元古代晚期地壳演化和荆山群形成时代制约——胶东地区变质中-基性侵入岩锆石 SHRIMP U-Pb定年[J]. 岩石学报, 27(6): 1699-1706.

范宏瑞, 胡芳芳, 杨进辉, 沈昆, 翟明国 . 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.

高书剑, 魏绪峰, 孙瑞刚, 李树统 . 2010. 莱州马塘金矿地质特征与深部找矿远景[J]. 山东国土资源, 26(6): 7-17.

李惠, 禹斌, 李德亮, 马久菊, 孙凤舟, 李永才, 王一大, 李上 . 2015. 不同类型金矿深部盲矿预测的构造叠加晕模型[J]. 矿产与地质, 29(5): 648-653.

李杰, 宋明春, 梁金龙, 姜梦瑶, 李世勇, 丁正江, 苏菲 . 2020. 焦家深部金矿床成矿流体来源:来自黄铁矿微量元素及S-He-Ar同位素的约束[J]. 岩石学报, 36(1): 297-313.

李长顺 . 1995. 影响自然金和银金矿成色的因素[J]. 黄金地质, 1(3): 61-66.

刘建明, 叶杰, 徐九华, 孙景贵, 沈昆 . 2003. 胶东金矿床碳酸盐矿物的碳-氧和锶-钕同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 19(4): 775-784.

刘建明, 叶杰, 徐九华, 应汉龙 . 2001. 初论华北东部中生代金成矿的地球动力学背景——以胶东金矿为例[J]. 地球物理学进展, 16 (1): 39-46.

刘建中, 夏勇, 邓一明, 张兴春, 邱林 . 2007. 贵州水银洞超大型金矿床金的赋存状态再研究[J]. 贵州地质, 24(3): 165-169.

刘儒 . 1994. 黄金的成色[J]. 吉林地质, 13(3): 81-83.

毛景文, 李厚民, 王义天, 张长青, 王瑞廷 . 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: 839-857.

孟繁聪, 孙岱生, 寸珪 . 1998. 胶东金矿金成色及其指示意义[J]. 黄金地质, 4(4): 30-32.

沈远超, 曾庆栋, 刘铁兵, 李光明, 申萍, 孙秀英 . 2003. 郯庐断裂与金

矿成矿[J]. 世界地质, 22(1): 41-44.
沈远超, 刘铁兵, 杨金中. 2000. 层间滑动角砾岩型金矿床的地质特征及成矿远景[J]. 矿物岩石地球化学通报, 19(4): 271-272.
宋国政, 杨真亮, 李瑞翔, 闫春明, 高书剑. 2016. 莱州市纱岭矿区金矿地质特征及其找矿前景[J]. 山东国土资源, 32(10): 1-4.
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, 徐军祥, 焦秀美, 孟庆宝, 孙丙伦, 李世勇, 曹佳, 傅朋远. 2018. 山东省地质矿产勘查开发局60年重要找矿成果和深部隐伏区找矿技术进展[J]. 山东国土资源, 34(10): 1-14.
孙雨沁, 于学峰, 单伟, 熊玉新, 张岩, 迟乃杰, 舒磊, 李敏, 程伟. 2020. 胶东焦家断裂带3000 m深部矿化特征及金矿物赋存状态[J]. 地球学报, 41(6): 919-937.
万渝生, 董春艳, 颉颃强, 王世进, 宋明春, 徐仲元, 王世炎, 周红英, 马铭株, 刘敦一. 2012. 华北克拉通早前寒武纪条带状铁建造形成时代——SHRIMP锆石U-Pb定年[J]. 地质学报, 86(9): 1447-1478.
王奎仁. 1987. 地球与宇宙成因矿物学[M]. 合肥: 安徽教育出版社. 1-100.
王先美, 钟大赉, 王毅. 2008. 鲁西北西向断裂系晚中生代活动的几何学、运动学及年代学研究[J]. 地质学报, 82(9): 1258-1273.
王先美, 钟大赉, 李理, 丁增勇, 李松, 张荣强. 2010. 鲁西北西向断裂系与沂沭断裂带晚中生代演化关系及其动力学背景探讨[J]. 地学前缘, 17(3): 166-190.
卫清, 范宏瑞, 蓝廷广, 刘玄, 姜晓辉, 文博杰. 2015. 胶东寺庄金矿床成因: 流体包裹体与石英溶解度证据[J]. 岩石学报, 31(4): 1049-1062.
许杨, 蓝廷广, 舒磊, 胡换龙, 陈应华, 王洪. 2021. 胶东三山岛金矿床黄铁矿As富集机制及其对金成矿作用的指示[J]. 矿床地质, 40(3): 419-431.
严育通, 李胜荣, 张娜, 蒋亮, 贾宝剑, 李斌凯, 闫丽娜. 2012a. 不同成因类型金矿床成矿期黄铁矿成分成因标型特征[J]. 黄金, 33(3): 11-16.
严育通, 李胜荣, 贾宝剑, 张娜, 闫丽娜. 2012b. 中国不同成因类型金矿床的黄铁矿成分标型特征及统计分析[J]. 地学前缘, 19(4): 214-226.
杨之利, 张旭, 姜洪利. 2007. 山东省莱州市寺庄金矿床地质特征[J]. 山东国土资源, 23(5): 6-10.
于学峰, 宋明春, 李大鹏, 田京祥, 王来明. 2016. 山东金矿找矿突破进展与前景[J]. 地质学报, 90(10): 2847-2862.
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.
郁云妹, Gammons C H. 1995. 贵金属矿床中控制金成色的因素[J]. 中国科学(B辑), 25(4): 412-417.
翟明国, 范宏瑞, 杨进辉, 苗来成. 2004. 非造山型金矿——胶东型金矿的陆内成矿作用[J]. 地学前缘, 11(1): 85-98.
张连昌, 沈远超, 李厚民, 曾庆栋, 李光明, 刘铁兵. 2002. 胶东地区金矿床流体包裹体的He、Ar同位素组成及成矿流体来源示踪[J]. 岩石学报, 18(4): 559-566.
张振儒, 陈梦熊. 1995. 金的成色研究在地质学中的应用[J]. 黄金科学技术, 3(6): 21-24.
张振儒, 郭定良. 1998. 影响金矿物成色的因素及机理[J]. 黄金科学技术, 6(4): 24-28.
朱光, 王薇, 顾承串, 张帅, 刘程. 2016. 郯庐断裂带晚中生代演化历史及其对华北克拉通破坏过程的指示[J]. 岩石学报, 32(4): 935-949.
朱日祥, 范宏瑞, 李建威, 孟庆任, 李胜荣, 曾庆栋. 2015. 克拉通破坏型金矿床[J]. 中国科学: 地球科学, 45(8): 1153-1168.
祝德成, 张文, 王英鹏, 田京祥, 刘汉栋, 侯建华, 高华丽. 2018. 山东省莱州市招贤金矿区矿体特征与找矿前景[J]. 山东国土资源, 34(9): 14-19.