



Pre-pub. on line: www.
geojournals.cn/georev

胶西北焦家断裂带成矿后断裂活动对 焦家式金矿破坏作用及找矿方向探讨

范世家, 薛伟

有色金属矿产地质调查中心, 北京, 100012

内容提要: 本文以焦家断裂带深部上盘发现金矿体的地质事实为依据, 将焦家断裂在成矿后对矿体的破坏作用作为讨论重点, 根据现今焦家断裂上、下盘金矿体以断层泥为界, 有被错断的明显特征, 指出发育在焦家断裂主断裂面中的断层泥为成矿后断裂活动的产物。依据上、下盘金矿在矿石类型、围岩蚀变、矿石矿物、成矿阶段等方面具有极为相似一致特征, 提出在 117.69~121 Ma 成矿期, 焦家断裂带中的上、下盘蚀变岩型金矿统一形成于深度 3~9 km 之间成矿期的焦家断裂带中, 二者在成矿时具有时、空上的完全统一性。受焦家断裂总体正断层效应影响, 现今焦家断裂深部新发现的上盘金矿(化)体应为下盘金矿(化)体被错断的部分。

关键词: 焦家断裂; 焦家式金矿; 成矿后断裂; 断层泥; 正断层效应

焦家式(“碎裂蚀变岩型”)金矿为发育于蚀变构造岩中的黄铁绢英岩化碎裂(碎粒)岩型金矿化(沈远超, 2001)。宋明春等(2018)总结其详细特征为: 破碎带蚀变岩型金矿, 也称为焦家式金矿, 因金矿石主要是蚀变的断裂破碎岩石而得名。矿石类型主要有 3 种: 浸染状黄铁绢英岩(或浸染状黄铁绢英岩质碎裂岩)型、细脉—浸染状黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩型和细脉—浸染状黄铁绢英岩化花岗岩型。围岩蚀变主要有黄铁绢英岩化、硅化和钾化, 矿床受区域性较大规模断裂的控制, 主矿体常产于断裂下盘靠近主断面附近, 矿体规模大, 矿化连续稳定, 矿体形态较简单。

焦家式蚀变岩型金矿是胶东最重要的金矿类型, 其资源总量占胶东金矿的 87%, 中型及以上矿床数量占总数量的 64%(宋明春等, 2020)。无疑焦家式金矿是胶东式金矿中最重要的类型。

近年来的金矿深部勘查工作, 发现了赋存于焦家断裂深部上盘中的焦家式金矿, 突破了以往焦家式金矿多赋存于焦家断裂下盘的认识。其中 2017 年对焦家成矿带深部招贤勘查区(赋存标高-1260~-2170 m)的找矿勘查, 发现赋存于焦家断裂带深部主裂面(断层泥)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的 IV 号矿体群, 圈定矿体 4 个, 其资源量占招贤勘查区估算总

量的 3.85%(祝德成等, 2018)。

2018 年在莱州吴一村勘查区完成深度 3266.06 m 的科研深钻 ZK01 孔(“中国岩金第一见矿深钻”), 新发现金矿体 6 层, 该孔深部矿体位于主断裂面(断层泥)之上, 累计见矿厚度 20.87 m, Au 平均品位 1.85×10^{-6} , 最高品位 13.65×10^{-6} 。深钻控制的吴一村预测区-2000~-4000 m 区间推断金矿资源量约 900t 的资源潜力(于学峰等, 2019)。

上述金矿体的新发现, 使焦家断裂深部上盘金矿的成因成为研究的焦点, 焦家断裂深部上盘金矿与下盘金矿是同期成矿还是两次成矿? 紧邻焦家主断裂面上、下盘的金矿体是否在成矿期时是连续的? 其矿床成矿过程及成矿后演化开始被广大地质工作者所聚焦。

研究矿床形成后的变化、改造过程和保存现状, 有重要的实际和理论意义, 它有助于全面认识矿床的生成环境和现存环境, 在结合研究矿床的形成和保存两个方面, 可以系统地了解矿床生成、演变的全过程(翟裕生等, 1999)。本人参与焦家金矿带中新城金矿下盘次级断裂控矿研究的项目, 在收集前人资料的基础上, 本文通过对成矿后断裂对原有矿体明显的破坏分析, 以综述的形式对山东胶西北金矿区焦家断裂带上盘碎裂蚀变岩型金矿的成矿加以讨论, 以加深对焦家主断裂面上盘(断层泥之上)金矿

注: 本文为 XXX 项目的成果。

收稿日期: 2021-04-22; 改回日期: 2021-10-11; 网络首发: 2021-10-20; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.10.065

作者简介: 范世家, 男, 1967 年生, 博士, 高级地质工程师, 主要从事矿产地质调查工作; Email: 497675821@qq.com。

成矿的重视,同时指出焦家断裂带上、下盘金成矿为一个同时、同空间的统一地质作用产物;现今金矿多位于断裂带下盘的原因是成矿后的焦家断裂再活动对原有矿体的破坏造成的,进而对胶西北金矿深部金矿体的赋存位置提供找矿方向的建议。

1 地质概况

胶东半岛位于华北克拉通东南缘和太平洋板块西缘,是一个主要由前寒武纪基底岩石和超高压变质岩块组成、中生代构造—岩浆作用发育的内生热液金矿集区(杨立强等,2014;于学峰等,2019)。大规模金成矿作用受控于 NNW—SSE 向主构造应力场引起的韧性形变,形成于剪压—剪张构造体制转换过程中(杨立强等,2019;Deng Jun et al., 2020)。

本文区内地层有新太古宇胶东岩群及古近系五图群,胶东岩群是区内最老的地层,为一套角闪岩相

和角闪麻粒岩相区域变质岩;古近系五图群为一套含煤、油页岩的碎屑沉积[黄县组地层清理后归为五图群(迟培星等,1994)],分布于新城金矿北部一带,与玲珑花岗岩为焦家断裂接触关系^①。

区内岩浆侵入活动强烈而频繁,中生代的侵入岩主要由 160~150 Ma 的中生代玲珑序列原地重熔型钙碱性的黑云二长花岗岩(范宏瑞等,2005;邓军等,2006;Deng Jun et al., 2015)和 132~126 Ma 的中生代郭家岭序列壳幔混合高钾钙碱性的似斑状花岗闪长岩类(杨立强等,2014)组成,同时也发育有煌斑岩、闪长玢岩、辉绿玢岩等基性岩脉(于学峰等,2019)。

焦家断裂带则位于胶东西北部莱州市紫罗姬家至龙口市姚家一线。断裂长度近 70 km,宽 50~500 m;断裂平均走向 30°,倾向 NW,倾角一般为 29°~43°。断裂下盘发育较多分支断裂。断裂大致沿早前寒武纪变质岩系与中生代玲珑及郭家岭花岗岩的

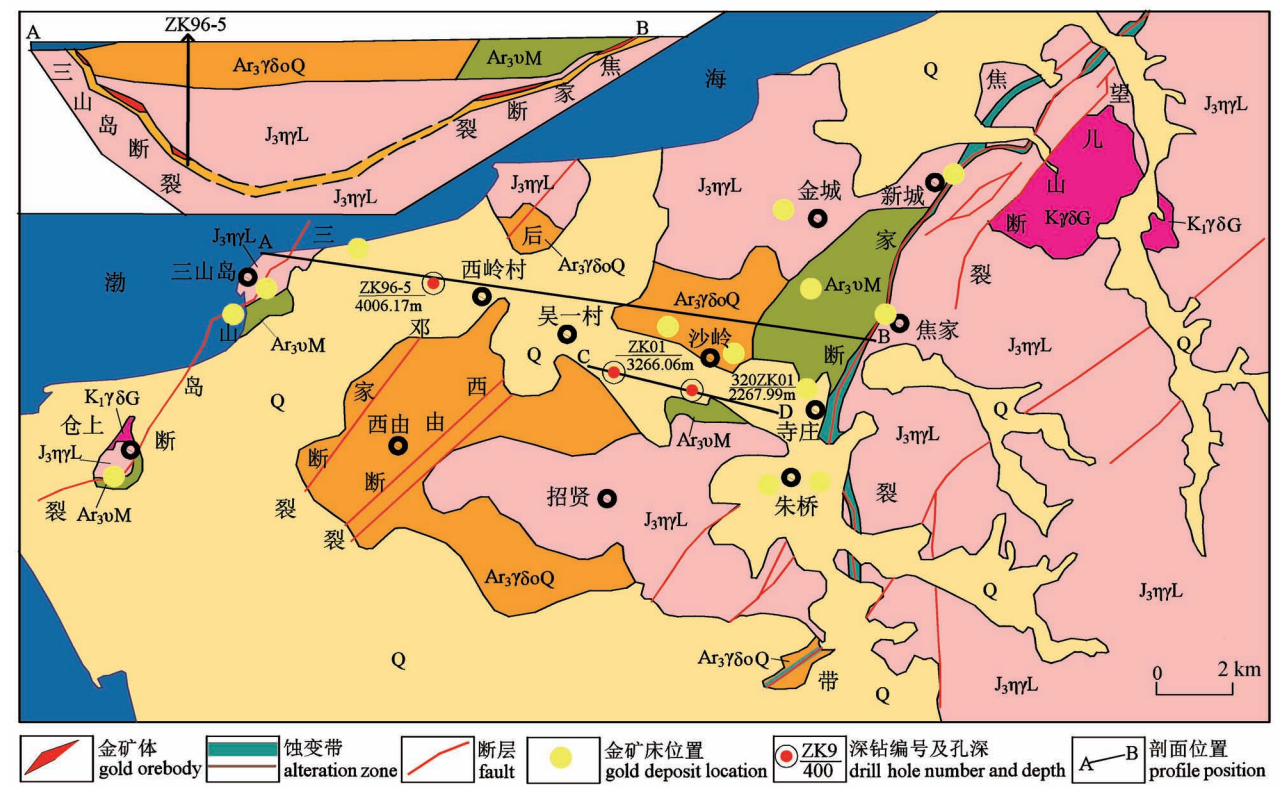


图 1 焦家金矿区域地质简图(据于学峰,2019;宋英昕,2017 修改)

Fig. 1 Simplified regional geolocal map of the Jiaojia Deposit (modified from

Yu Xuefeng et al., 2019& Song Yingxin et al., 2017&)

Q—第四系;K₁γδG—早白垩世郭家岭序列花岗闪长岩;J₃ηγL—晚侏罗世玲珑序列黑云母二长花岗岩;

Ar₃γδoQ—新太古界栖霞序列英云闪长质片麻岩;Ar₃vM—新太古界马连庄序列变辉长岩

Q—Quaternary; K₁γδG—Early Cretaceous Guojialing series granodiorite; J₃ηγL—Late Jurassic Linglong series biotite monzonitic granite; Ar₃γδoQ—Neo-archean Qixia series dactodiorite gneiss; Ar₃vM—Neo-archean Malianzhuang series metagabbro

接触带分布(宋明春等,2018)。现今 ZK01 深钻揭示焦家断裂带从浅部到深部倾角逐步变缓,从垂深-2000 m 的 25°左右逐步转变为-2850 m 的 20°左右,是一上陡下缓的铲式断裂(于学峰等,2019)。焦家断裂及其下盘次级断裂控制了新城、滕家、焦家、河东、河西、纱岭和朱郭李家等 20 余处金矿床,累计探明金资源储量超过 1500 t(宋明春等,2018)。

2 焦家断裂带内金矿成矿时代及深度

构造不仅可以控制矿床的形成,而且能够制约矿床的演化(吴淦国,1998)。焦家断裂带对金矿的控制作用是无疑的,但焦家断裂多期次的活动,尤其是成矿后断裂对矿体的破坏作用一直以来为大地质工作者所忽视。而讨论该问题,需要首先确定焦家断裂带内金矿成矿时代及深度。

2.1 焦家断裂带内金矿成矿时代

胶东金矿同位素年龄范围为 110.6~123.0 Ma,胶东大多数金矿床形成于 120±5 Ma(宋明春等,2018)。前人对焦家式金矿(仓上、新立、新城、焦家、望儿山金矿)获得的成矿年龄集中于 118.8~121 Ma 之间(表 1),测年矿物为(热液蚀变)绢(白)云母,测年方法为⁴⁰Ar-³⁹Ar。其成矿年龄分布较为集中,由于绢云母化是焦家式金矿直接近围岩蚀变,绢(白)云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 的测年结果与焦家式金矿成矿时代应近于同时,可代表焦家式金矿的成矿年龄。测年结果反映本区焦家断裂带中的焦家式金矿主成矿时代为早白垩世欧特里夫阶期间。

2.2 焦家断裂带内金矿成矿深度

焦家式金矿成矿深度的确定,前人主要从流体包裹体方面进行了研究,本文在此引用前人对焦家断裂带内金矿的研究成果。

焦家金矿在 105~100 Ma±期间成矿深度-1632.38~-2243.6 m±,即使考虑地形、后期构造及

地质作用的影响等因素,胶东玲珑—焦家式金矿床仍然表现出在大约-3 km±浅层地壳深度形成的特征,因而该类金矿属于中浅成矿床(吕古贤等,1996)。

焦家金矿床成矿流体为 CO₂—H₂O—NaCl 体系,成矿流体具低盐度(1.43%~4.79%NaCleq)、低密度(0.624~0.870 g/cm³)的特征,成矿温度集中在 260~340℃之间,属中温范围,成矿压力区间为 63~126 MPa,成矿深度为 6.40~7.34 km(张佳楠,2012)。

新城金矿其成矿流体为中温、低盐度、富含 H₂O 和 CO₂ 的 H₂O—CO₂—NaCl 体系。成矿温度集中于 260~320℃之间,成矿压力为 62~112 MPa,成矿深度为 -6.34~-9.23 km 之间(刘峰旭,2016)。

此外,胶西北金矿集区新立、焦家和大尹格庄金矿床成矿流体具有中—低盐度(变化范围为 1.36%~11.85%NaCleq),低密度(变化范围为 0.45~0.94 g/cm³)的特点,主成矿温度为 219~388℃,主要成矿压力集中在 40~70 MPa(尹业长,2020),推测其成矿深度为-5.0~-6.80 km 之间。

前人采用岩浆岩绿帘石压力计,计算玲珑花岗岩的侵位深度为 10~15 km(张华锋等,2006)。采用角闪石全铝压力计,计算早白垩世郭家岭岩体侵位深度为(13.0±1.6) km。郭家岭岩体在 130 Ma 形成后到艾山岩体侵位(116 Ma),地壳总体隆升剥蚀达 10±1.6 km 左右(豆敬兆等,2015),而早白垩世区域上出露于焦家断裂带以东的艾山、海阳、牙山、三佛山、伟德山等岩体(伟德山型花岗岩)侵位深度则普遍小于 3.5 km(张华锋等,2006)。其中 126±3~108±2 Ma 的伟德山型花岗岩的侵入年龄(宋明春等,2020)与胶东式金矿的成矿时间段吻合较好。

伟德山型花岗岩大量出露于胶东东部大别—苏

表 1 焦家金矿带及邻区焦家式金矿测年成果表

Table 1 Outcome table of dating forJiaojia type-ore in Jiaojia metallogenic belt and adjacent region

序号	矿床名称	测试对象	测试方法	成矿时代PH	参考文献
1	仓上金矿	绢云母	³⁹ Ar- ⁴⁰ Ar 定年	121.3±0.2 Ma(p); 121.1±0.5 Ma(I)	Zhang Xiao'ou et al.,2003
2	新立金矿	钾长石	³⁹ Ar- ⁴⁰ Ar 定年	121.5±1.3~120.5±1.2 Ma	Zhang Liang et al.,2017
3	焦家金矿	绢云母	³⁹ Ar- ⁴⁰ Ar 定年	120.5±0.6~119.2±0.2 Ma	Li Jianwei et al.,2003
4	新城金矿	绢云母	³⁹ Ar- ⁴⁰ Ar 定年	120.7±0.2~120.2±0.3 Ma	Li Jianwei et al.,2003
5	望儿山金矿	绢云母	³⁹ Ar- ⁴⁰ Ar 定年	121±0.4 Ma; 119.4±0.2 Ma	Li Jianwei et al.,2003
6	望儿山金矿	绢云母	³⁹ Ar- ⁴⁰ Ar 定年	120.7±0.6~119.2±0.5 Ma	Yang Liqiang et al.,2017
7	界河金矿	绢云母	³⁹ Ar- ⁴⁰ Ar 定年	120.7±0.8~118.8±0.7 Ma	Bi Shijian and Zhao Xinfu, 2017
8	新城金矿	绢云母	³⁹ Ar- ⁴⁰ Ar 定年	119.78±0.90 Ma	刘跃,2015

鲁造山带中,在金成矿区则隐伏在深部,与之对应的浅成小岩体和大量中—基性岩脉常见于金成矿区内(宋明春等,2014)。该岩体现今出露至地表,可类比概略估算焦家式金矿的成矿深度。其岩体就位深度为3.5 km 加上现今焦家金矿的延深2.5 km,推算焦家式金矿的成矿深度约为6.0 km。这与焦家断裂带内金矿包裹体测压估算的成矿深度较为一致。以上为结合区域上与焦家式金矿形成时代接近的岩体抬升的高度来估算成矿深度,但介于区域上伟德山型花岗岩岩体空间上与焦家断裂有一定的距离,本区抬升量在此供参照认识。

前人对焦家断裂带内金矿成矿深度的认识虽有一定偏差,但总体介于3~9.23 km 之间,以现有金矿出露地表现状来分析,本文对成矿深度的认定,可估算成矿后焦家断裂对矿体的抬升高度。

3 早白垩世以来焦家断裂对地质体的构造错动

构造不仅是局部的控矿因素,还可以从大区域上控制或影响岩浆活动、沉积作用等各类地质作用(翟裕生等,2002)。前人研究了焦家断裂多期活动特征,以金成矿作为划分节点,总体可归纳为对成矿前断裂构造活动,成矿期断裂活动,成矿后断裂活动的三大阶段,尽管认识难以完全统一,但都肯定了焦家断裂多期活动的特点(吕古贤等,1993;杨敏之等,1996;苗来成等,1997;李厚民等,2002)。焦家断裂早白垩世以来对地质体的构造改动,主要体现在对胶西北前寒武纪及古近纪地层、侏罗纪以及早白垩世岩体的相对抬升方面。因此现今的地层、构造、



图2 焦家金成矿带地质简图 (据温桂军等^①修改)
Fig. 2 Simplified geolocal map of the Jiaojia Metallogenic Belt (modified from Wen Guijun et.al.^①)

岩体分布状况是焦家断裂多期活动最终造成的结果。

3.1 焦家断裂带“总体正断层性质”

断层两侧岩层的缺失或重复是判断断层存在及其性质的重要地质依据(陈国达,1985)。焦家金成矿带地质简图(图2)中,焦家断裂带在基岩出露区大体沿前寒武纪地质体与玲珑花岗岩接触带展布,至深部切入玲珑花岗岩中(宋国政等,2017),断裂带下盘为白垩纪郭家岭似斑状花岗岩体及侏罗纪玲珑花岗岩体,而断裂带上盘自北向南依次为新太古界马连庄序列、古近纪五图群地层及侏罗纪玲珑花岗岩体。

三山岛西岭矿区 ZK96-5 钻孔剖面图(图1中A—B)、焦家金矿区 112 勘探线剖面、及莱州吴一村勘查区内被誉为“中国岩金第一见矿深钻”的 ZK01 孔显示 28.70~1321.84 m(焦家断裂上盘)为前寒武系栖霞序列新庄单元和马连庄序列莱家寨单元(见图5)。已有剖面图中揭示,前寒武系变质岩系仅分布于断裂带上盘,呈“悬浮状”分布于玲珑花岗岩体之上。

焦家断裂带下盘没有前寒武纪变质岩系及古近纪五图群地层的分布,仅有玲珑花岗岩体及郭家岭似斑状花岗岩体,前寒武系变质岩及古近纪地层只出现在焦家断裂带上盘浅部,这一地质事实表明焦家断裂带下盘相对其上盘总体抬升,其所遭受剥蚀程度相对较深。是焦家断裂带“总体正断层性质”的有力证据。

而古近纪五图群地层仅分布于焦家断裂上盘,宏观上被焦家断裂带所截切^①。作为受焦家断裂带影响的最新地层,其地层年代可代表区内焦家断裂带当时活动年代的下限,即其活动时限至少要在古近系五图群形成之后,大致 40 Ma 左右。这与焦家断裂主断裂面内白色断层泥测年年龄(48.57~41.18 Ma,宋明春等,2010)较为吻合。

3.2 焦家断裂带“总体正断层”的断距

焦家断裂带对断层两侧地层及岩体分布改造的特征表明,早白垩世以来焦家断裂对本区改造较大,早白垩世以来的焦家断裂带总体为“正断层性质”。

假设焦家断裂带下盘存在与焦家断裂带上盘同厚度的前寒武纪变质岩地层(现今焦家断裂上盘前寒武纪变质岩地层厚度:吴一村勘查区内 ZK01 孔浅部前寒武系变质岩地层厚 1321.84 m;招贤勘查区内 320ZK01 孔前寒武系变质岩地层厚度约 1800 m(于学峰等,2019)),若仅从断层两侧被错移的岩

层厚度分析断层相对抬升量,则早白垩世热隆—伸展起始时(宋明春等,2020)其下盘相对上盘垂直抬升高差至少为 1.3~1.8 km。这样才会导致焦家断裂带下盘玲珑花岗岩体抬升至地表,地层仅分布于断裂带上盘这一地质现状。此外,来自三山岛金矿热力学演化的数据表明(Liu Xuan et al.,2017),三山岛—仓上断裂构造两个阶段的正断层活动导致三山岛—仓上断裂上、下盘产生了 0.5~2.3 km 的垂直差异抬升(Liu Xuan et al.,2017)。尽管其成果为三山岛—仓上断裂的研究成果,但三山岛—仓上断裂与焦家断裂共为同一上盘,其上盘的运动方向及上、下盘垂直差异抬升断距都可为焦家断裂的参考。

这一相对位移量仅能保守代表本区早白垩世以来焦家断裂带、下盘垂向上的“总体相对抬升量”。而早白垩世以来焦家断裂带水平方向的位移量因缺少相对应的标志点,本文不在此讨论。

4 成矿期后焦家断裂对金矿体的破坏作用分析

胶东金矿的成矿过程是早白垩世以来焦家断裂构造演化中的一个部分。胶东金矿成矿时的地质、构造格架,对了解成矿后焦家断裂对矿体的破坏作用有非常重要的意义。对胶东金矿成矿时的地质、构造背景状况精确的确定,是与现今金矿出露于地表的状况相对比的基本前提条件。

4.1 金成矿构造地质背景

本区焦家断裂带中的焦家式金矿主成矿时代为早白垩世欧特里夫阶期间。前人对成矿背景提出了各自的认识。陈衍景等(2004)提出中生代花岗岩类侵入和大规模成矿作用藕合于碰撞造山带的三阶段地球动力学演化,即早阶段挤压—地壳缩短—隆升,中阶段岩石圈折沉并转向伸展构造体制,晚阶段伸展,最强烈的成矿作用发生在碰撞造山过程的挤压向伸展转变期;宋明春等(2020)认为胶东金矿为热隆—伸展成矿模式,即在早白垩世期产生大规模岩浆活动和流体活动,伴生地壳拉张和岩浆隆升形成花岗岩穹窿—伸展构造,与岩浆活动有关的高强度含矿流体活动和交代蚀变作用是胶东金矿大规模集中产出的基础条件,地壳快速隆升引起强烈减压、降温是大量金质从流体中析出、沉淀的重要原因,伸展构造则为大规模金成矿提供了充足的空间(宋明春等,2014;宋明春等,2020)。

这些认识很好地阐述了胶东金矿成矿时的构造、岩浆及地质背景,对成矿流体的热驱动力、伸展

构造导致矿床在断裂阶梯处就位等方面作了全面的总结。同时也明确了胶东式金矿形成于伸展构造演化之中,即胶东成矿形成的时间既不在伸展构造之前也不在伸展构造演化之后。因此早白垩世以来焦家断裂构造对金矿化形成以前的地层、岩体的构造错动的演化,与早白垩世以来焦家断裂构造对金矿体的错动改变不是完全一致,二者之间存在时间差,不能拿地层、岩浆岩体的抬升量简单适用类比于金矿体。金矿体成矿后的改变有其自身的特殊性。

4.2 成矿后焦家断裂带内断层泥测年成果

焦家金矿田内 NE—NNE 向断层构造系统具有继承性活动的特点,对已有矿体的改造比较明显,主要表现为断层泥的形成以及断裂带内的石英硫化物脉和黄铁绢英岩发生破碎(王中亮,2012)。在焦家金矿田内,焦家主断裂主要控制着断裂构造分带中的断层泥和挤压片理带。断层标志性特点是主断裂面具有厚 15~60 cm 断层泥(张潮,2015)。

宋明春等(2010)对焦家断裂带内断层泥开展 K-Ar 法同位素测年,其测年年龄分为两组,灰黑色断层泥年龄为 131.1~123.5 Ma,白色断层泥年龄为 48.57~41.18 Ma,指示焦家断裂早期活动时代为早白垩世,晚期活动时代为古近纪,焦家断裂的早期活动年龄与金矿成矿年龄接近,断裂构造的主要形成期与金矿的主成矿期是同步的,属早白垩世成矿期断裂。古近纪时,由于太平洋板块向西俯冲于欧亚板块之下,所产生的弧后拉张效应及郯庐断裂中段强烈拉张作用影响,断裂构造受到叠加改造,产生成矿后断裂,已形成的金矿体也相应受到断裂的破坏(宋明春等,2010)。

黑色断层泥含有浸染状黄铁矿或绢英岩、黄铁绢英岩角砾,角砾呈次棱角状、次圆状。白色断层泥含钾长花岗岩角砾,角砾也为次棱角状(张潮,2015)。

在对新城金矿 19 个断层泥 X 射线粉晶衍射物相鉴定,其断层泥成分归为以下 4 组:① 花岗质岩石残留矿物:为花岗质岩石中石英和少量各种长石类矿物。② 热液蚀变黏土矿物:主要是花岗质岩石中长石、云母类矿物热液蚀变形成的伊利石、蒙脱石、高岭石,可能也有部分石英为热液蚀变过程中析出。③ 热液带入矿物:主要是各种碳酸盐矿物和硫化物,包括白云石、方解石、黄铁矿等,部分石英也可能属于热液带入矿物。④ 次生风化及其他矿物:包括绿泥石等以及不确定杂质等(张潮,2015)。

2018 年在莱州吴一村勘查区完成深度 3266.06

m 的科研深钻 ZK01 孔也见有焦家断裂主断裂面断层泥,孔深 2801.34~2801.58 m 处为第一层断层泥,为次级断裂;孔深 2854.59~2854.69 m 处是主断裂面,厚度 10 cm,呈黑色—浅绿色,深黑色断层泥和浅绿色断层泥分别厚 5 cm,呈疏松破碎状,断层泥在科研深钻 ZK01 深孔中也稳定出现,说明焦家断裂主断裂面断层泥具有相当稳定的“层位”;焦家金矿带深部有两处断层泥发育,主要为成矿后的断层活动形成,成矿期的主裂面可能已被矿化作用掩盖。(于学峰等,2019)。

金矿形成之后,断裂系统发生了正断层性质的构造活动,使矿体抬升、剥蚀,同时形成未固结的断层泥,空间上与碎裂岩紧紧伴随,十分醒目,常被称为主裂面。该主裂面有时将矿体分隔或错断(李厚民等,2002)。因此尽管前人有黑色断层泥的测年 131.1~123.5 Ma 数据,但这并不代表黑色断层泥就形成于 131.1~123.5 Ma 间,确切的是黑色断层泥中的测年矿物形成于 131.1~123.5 Ma 间;且即使黑色断层泥能形成于 131.1~123.5 Ma 之间,但后期的断裂继承性活动则使其被完好保留至今是难以令人理解的,因此黑色断层泥本身是否参与金成矿,值得进一步探讨。

前人对焦家断裂带内断层泥的测试及研究表明,焦家主断裂具有成矿后活动的特点,而成矿后焦家断裂活动对先期形成的金矿体造成了破坏错动这是毫无疑问的。

4.3 成矿后焦家断裂对金矿体的破坏

成矿后焦家断裂表现为对金矿体的破坏及错动,从新城矿区 175 线剖面图(图 3)及 I、V 号矿体不同中段矿体与焦家断裂关系平面组合图来看(图 4),焦家断裂截切了新城金矿的 I 号矿体,表现为矿体紧邻焦家断裂主断裂面,而过了主断裂面(断层泥),金矿体则消失;图 5 焦家金矿中的 112 剖面,其中的 I 号矿体,也与新城金矿的特点一致,说明成矿后焦家断裂破坏了原有矿体的连续性,其上、下盘的矿体则由于错动距离大,剖面图上则出现上盘金矿体“缺失”的状况,是成矿后断裂活动的特征之一。体现出金矿体被成矿后焦家断裂活动破坏的特点。

2018 年焦家断裂深部勘查钻孔(ZK01 孔)在莱州吴一村勘查区完成,该孔孔深 3266.06 m,2854.59~2854.69 m 处为焦家断裂主断裂面,其上盘紧靠断层泥(2849.39~2854.59 m 处),为编号 I-6 黄铁绢英岩化碎裂岩型的金矿体,(I-6 金矿体,

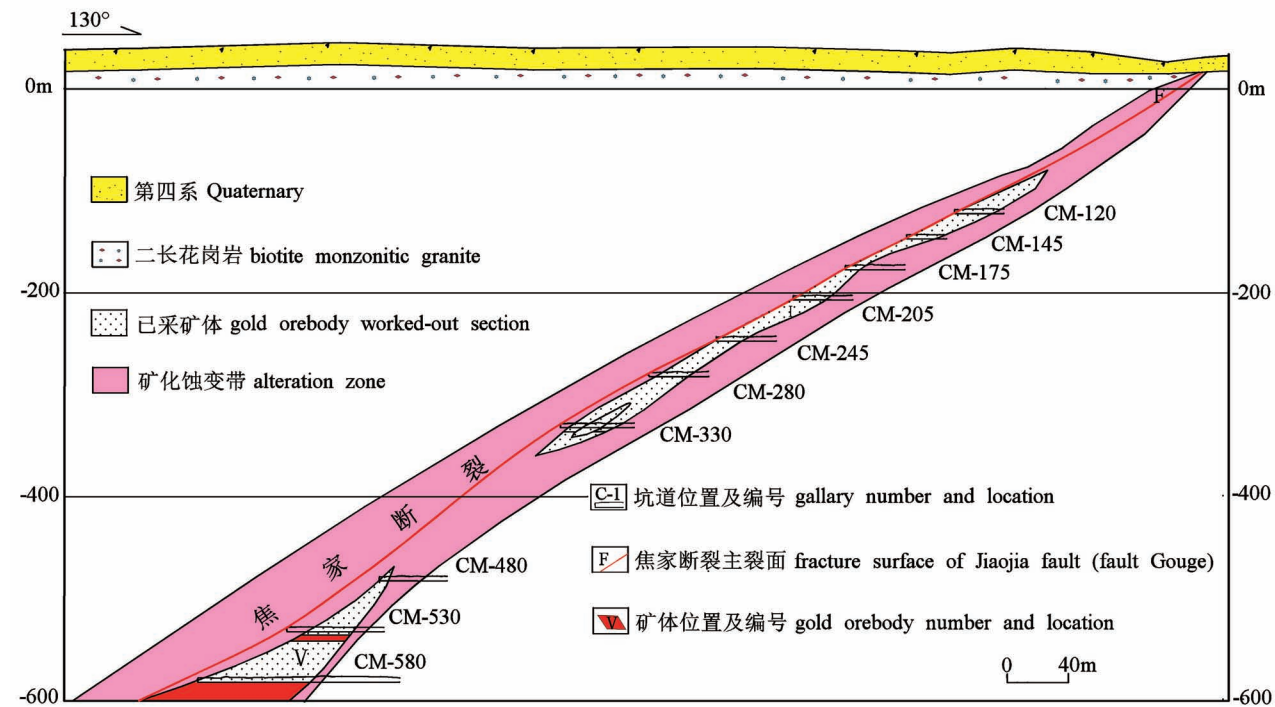


图 3 胶东新城金矿 175 线地质剖面简图 (据崔秋波等^②修改)
Fig. 3 Simplified section of the exploration line175 in Xincheng gold deposit, eastern Shandong
(Modified from Cui Qiubo et al. ^②)])

视厚度 5.2 m,金平均品位 1.37×10^{-6}) (于学峰等, 2019),而断层泥下,则无金矿体,且断层泥呈疏松破碎状,深部金矿体在焦家断裂主断裂面(断层泥)处的“突然截止”现象,与浅部矿体被焦家断裂破坏、错断极为一致,断层泥作为焦家断裂明显成矿期后断裂活动的特征之一,使得原有完整金矿体被错断为上、下盘分开的现状,表现出成矿期后焦家断裂对原有上下盘金矿体完整一体性的破坏作用(图 5)。

焦家金矿 I 号矿体 112 剖面图与焦家金矿深部钻孔剖面图(图 5)的联合分析可以看出,以焦家断裂主断裂面(断层泥)为界,焦家断裂主断裂面浅部出现下盘的金矿、深部则出现上盘金矿,是成矿后焦家断裂正断层效应的显示,导致其下盘中的金矿相对抬升至近地表处;而其上盘的金矿体则被错动到埋深更深。

柳振江等(2010)通过磷灰石裂变径迹热年代学测试获得玲珑花岗岩距今 110 Ma 以来的隆升演化历史,结果显示岩体剥蚀速率平均为 30.3 ± 4.4 mm/ka, 根据剥蚀速度计算玲珑花岗岩剥蚀量仅为 2.0~ 4.2 km (柳振江等,2010)。但从其文中附图可看出焦家断裂及三山岛断裂的共同的

上盘,与焦家断裂带下盘的剥蚀速率是不一样的,其上盘的剥蚀速率为 18~24 mm/ka;而焦家断裂下盘(大尹格庄及夏甸金矿西部)的剥蚀速率为 33~36 mm/ka;从其 110 Ma 年以来剥蚀情况图来看,焦家断裂上、下盘的差异抬升约为 1.0~1.98 km。新城金矿床(焦家断裂下盘)自~113~99 Ma 以来剥蚀量约 5 ± 1 km;自成矿(~120 Ma)以来剥蚀量约 6 ± 1 km,其中自~113~99 Ma 至 15 ± 3 Ma 剥蚀和冷却速率分别为 50 ± 14 m/Ma 和 2.0 ± 0.9 °C/Ma; 15 ± 3 Ma 至今剥蚀和冷却速率分别为 93 ± 38 m/Ma 和 3.3 ± 1.3 °C/Ma (张良,2016)。

锆石裂变径迹和(U—Th)/He 与磷灰石裂变径迹数据结果显示,胶西北区大致分别于早白垩中晚期、早白垩世晚期至晚白垩世和古近纪冷却至 240 ± 50 °C、 $193\sim175$ °C 和 $125\sim60$ °C。其中早白垩世晚期—晚白垩世早期,主断裂下盘隆升和剥蚀相对较快。主控矿断层活动等导致了其上下盘差异化的冷却、隆升和剥蚀,但玲珑拆离断层和焦家断裂所夹持的地块总体隆升和剥蚀差异不大。根据矿物对法评估的成矿后总体剥蚀量为 3~7 km (张良,2016)。

上述来自热力学演化的数据及结论,区域上其时间节点基本为从 120 Ma 开始,因此可以视为金已

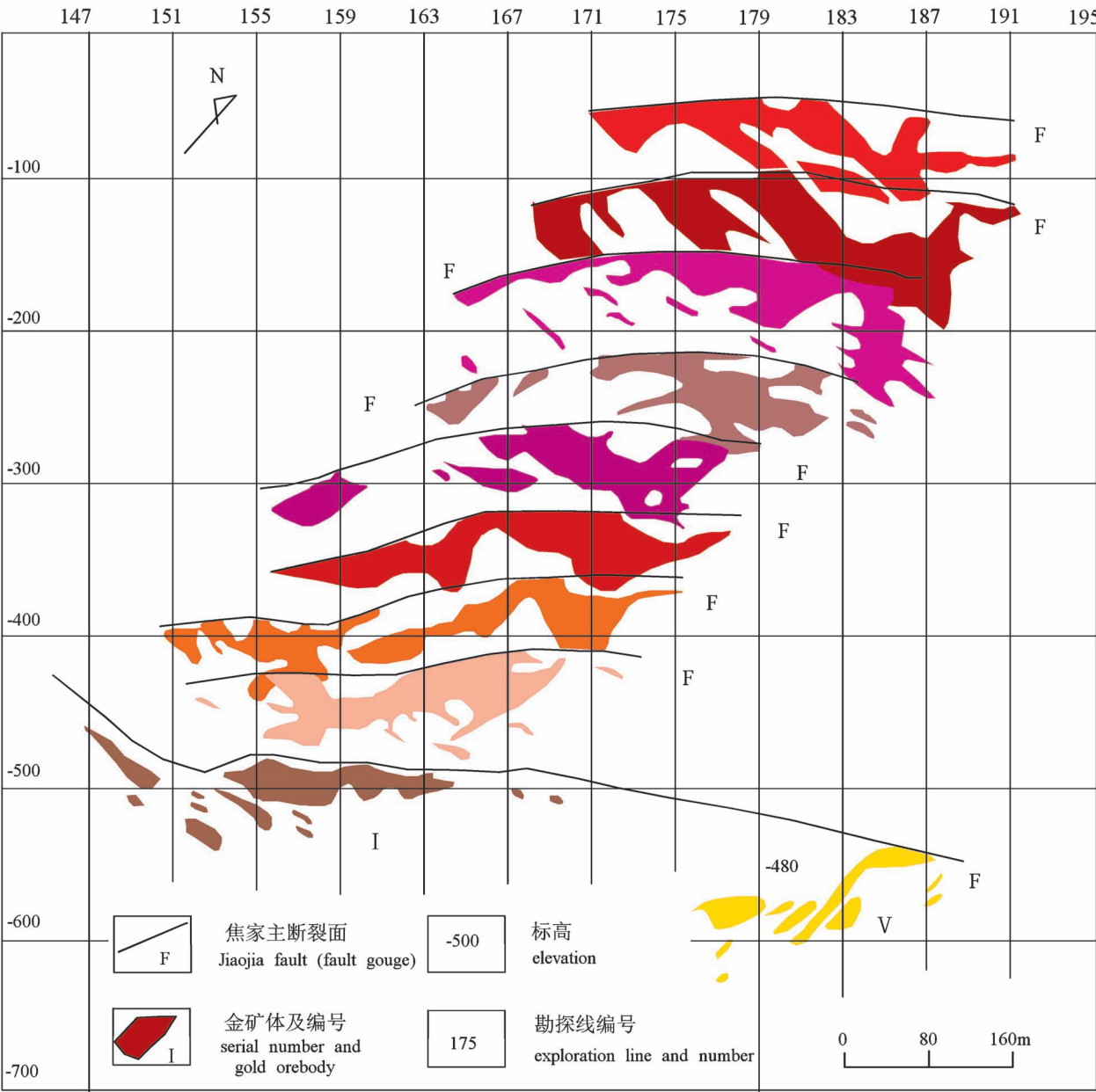


图 4 新城金矿不同中段矿体与焦家断裂关系平面组合图(引自马学东,2011)

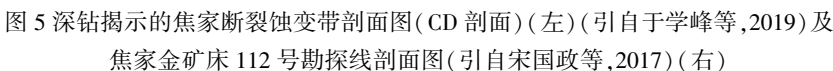
Fig. 4 Constitutional diagram of gold ore body and Jiaojia fault by several elevation in Xincheng gold deposit (modified from Ma Xuedong, 2011&)

经成矿之后的抬升及剥蚀,而具体到焦家断裂带上的新城金矿而言,从张良(2016)的研究成果来看,因其采样位置均取自焦家断裂带下盘的原因,应是特指下盘金矿的抬升。而焦家断裂带上、下盘的差异抬升距离,从柳振江等(2010)图件中的数据进一步的推断,从其 110 Ma 年以来剥蚀来看,焦家断裂上、下盘的差异垂直抬升为 1.0~1.98 km 之间。来自热力学演化的数据也表明,焦家断裂上、下盘发生具

有正断层性质的差异抬升,差异垂直抬升距离为 1.0~1.98 km 之间,而这也必然也是已经成矿的金矿体的上、下盘的差异垂直抬升距离。

5 焦家断裂成矿期上、下盘金矿成矿时空的统一性

前人对“焦家式金矿”成矿模式作了较多的总结,其中之一可概括归纳为成矿期成矿热液受断层



Q—Quaternary; Ar₃J—Neoproterozoic Jiaodong group amphibolite, biotite monzogranulite, biotite amphibole granulite; Ar₃γδQ—Neoproterozoic Qixia series Xinzhuan unit tonalitic gneiss; Ar₃υM—Neoproterozoic malianzhuang series metagabbro (amphibolite); J₃ηγ—Late Jurassic Linglong series biotite monzonitic granite; SγJH—beresitization granitic cataclasite; γSJH+SγJ—beresitization broken granite and phyllic granitic cataclasite; SνJ—phyllic amphibolite cataclasite; SJ—phyllic cataclasite; SJH—beresitization broken granite; γSJH—beresitization broken Granite; γJH—beresitization granite; νJ—phyllic amphibolite; γJ—phyllic granite

而产生了焦家断裂成矿期上、下盘金矿成矿是否具有统一时空性的问题探讨。

以莱州吴一村勘查区完成深度 3266.06 m 的科研深钻 ZK01 孔中所见的上盘金矿资料为讨论对象,其矿石类型为黄铁绢英岩化碎裂状花岗岩型、黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩型、黄铁绢英岩化碎裂岩(碎斑、碎粒、碎粉岩)型,总体可归为黄铁绢英岩化碎裂状花岗岩型;矿石矿物组成方面,深部矿石中所见矿物可分为 3 类:① 原岩残留矿物:主要是斜长石、钾长石、石英、黑云母;② 蚀变非金属矿物:包括绢云母、微粒石英、钾长石、碳酸盐矿物、绿泥石、高岭石等;③ 金属矿物:黄铁矿、方铅矿、黄铜矿、闪锌矿、磁黄铁矿、自然金、银金矿、局部见碲铋矿、辉碲铋矿及自然铋等。其中黄铁矿是主要载金矿物,其次为黄铜矿和方铅矿;围岩蚀变类型有钾化、硅化、黄铁矿化、绢云岩化、黄铁绢英岩化、绿泥石化、碳酸盐化等蚀变类型(于学峰等,2019)。上述矿石类型、矿石矿物、围岩蚀变类型、成矿阶段的划分等与浅部下盘金矿完全相同,二者具有一期成矿统一性的“亲缘”特征,尽管焦家断裂带深部上盘金矿还没有确切的定年测试成果发表来进行二者的验证,但形成的金矿体及各方面特征应是较一致的,初步判断焦家断裂成矿期上、下盘金矿成矿不应当是两期成矿的产物,而是同一期成矿的产物。同时焦家断裂上、下盘金矿体都有紧靠断层泥的特征,金矿体有明显被焦家断裂成矿期后断层错断的特征,将这种成矿后正断层效应消除之后,则成矿期时焦家断裂上、下盘金矿体都处于统一的空间内。

现今焦家式金矿的分布状况只是受成矿期及成矿后焦家断裂的共同影响造成焦家断裂面(断层泥)下盘金矿抬升至地表处,上盘金矿相对下降,埋深加大,形成了空间上焦家断裂上、下盘金矿空间分离的现状。但焦家断裂上、下盘金矿在成矿时具有统一空间,二者并非分离。只是由于成矿后上、下盘金矿被相对错动的距离较大,使得上、下盘金矿在空间上的连续性被破坏。

6 焦家断裂上盘金矿找矿预测探讨

基于本文对成矿期后焦家断裂活动的分析,认为焦家断裂上、下盘金矿成矿时具有时间、空间统一性特点,现今的矿体分布状况,是成矿期后焦家断裂对原有矿体造成了错断及破坏的改动结果。尤其是其二者成矿时空间统一性的认识,对于焦家断裂深部上、下盘的金矿找矿预测有着更重要的现实意义。

(1) 对于焦家断裂深部上盘的金矿预测,必然存在有浅部下盘金矿被错断的部分,莱州吴一村勘

查区钻孔 ZK01,该孔孔深 2854.59~2854.69 m 处是主断裂面(断层泥),其上紧靠断层泥 2849.39~2854.59 m 处,编号为 I-6 黄铁绢英岩化碎裂岩型的金矿体就属于这种情况。而其上盘这类金矿体的大小受成矿后焦家断裂对原有“完整金矿体”的具体错动情况而定。

(2) 前人在总结焦家金矿浅部矿化时,认为金矿体的形成和空间分布受断裂流体输导系统的控制,流体总体沿焦家主断裂从南西方向向上和侧向运移(郭涛等,2008)。按照流体成矿沿成矿期焦家断裂运移的特点,假设成矿期成矿流体通道与现今焦家主断裂面一致,对焦家断裂深部上盘金矿成矿预测时,应意识到焦家断裂深部上盘也发育有与浅部下盘金矿完全一致的金矿围岩蚀变类型及相似的分带,而这也意味着在焦家断裂深部上盘赋存焦家式金矿的可能性也会极大。现今焦家断裂内出露于地表的马塘金矿 II-1 金矿体(金资源量 100t)就位于焦家断裂主断裂面(断层泥)之上(刘玉琪,1995;高书剑等,2010),说明焦家断裂上盘浅部就有大金矿赋存的现状,其焦家断裂深部上盘不仅仅有被错断的金矿体部分,也具有赋存大金矿的可能性。如果以金矿资源量为参考指标,设想成矿后焦家断裂对原有完整金矿体的二分之一处错断,其上下盘各自具有原有矿体一半的金资源量,则以下盘金矿资源量为参考,其现今上盘深部也应该有相对应的另一半的金矿资源量,则其潜力也非常巨大,以上焦家断裂上盘深部金矿资源量估算仅供阅者参考。

(3) 本文也在此初步探讨一下焦家断裂深部下盘金矿的找矿预测问题,从莱州吴一村勘查区 ZK01 钻孔位置及钻孔资料显示,在 2416.29~3234.16 m 成功控制焦家金矿带,其蚀变带厚度达 817.87 m;该孔孔深 2854.59~2854.69 m 处是主断裂面(断层泥),该孔内金矿(化)体仅位于主断裂面之上,主断裂面(断层泥)之下 2854.69~3234.16 m 主要为黄铁绢英岩化碎裂状二长花岗岩夹黄铁绢英岩化花岗质碎斑岩、黄铁绢英岩化花岗质碎斑岩、弱黄铁绢英岩化碎裂状黑云二长花岗岩等,几乎不再有矿化;3234.16~3266.06 m 为钾化黑云母二长花岗岩(于学峰等,2019),基于本文对成矿后焦家断裂对矿体改造的认识,作者初步认为焦家断裂深部下盘发现金矿可能性变小,其原因之一是下盘深部金矿已经被错至近地表;其二是深部焦家金矿带其蚀变带厚度达 817.87 m(吴一村勘查区 ZK01 钻孔资料)明显比浅部下盘金矿围岩蚀变带要宽,结合三山岛西岭

矿区 ZK96-5 及 ZK01 钻孔位置分析,其原因有可能是 ZK01 钻孔见矿位置靠近铲式断裂深部后的根部,有接近深部成矿热液流体上升通道处的特征,而成矿热液流体上升通道处主要是导矿构造,其温压条件并不是沉淀成矿的最佳场所。

7 结论及认识

(1)焦家断裂带中的上、下盘蚀变岩型(焦家式)金矿具有统一的时空属性,空间上,焦家断裂带中的上、下盘蚀变岩型(焦家式)金矿统一形成于深度 3~9 km 之间的成矿期焦家断裂带中;成矿时间为 117~121 Ma。

(2)经分析,现今焦家断裂深部新发现的上盘金矿(化)体应为下盘金矿(化)体被错断的部分。成矿期及成矿后焦家断裂两次断裂活动的联合正断层效应结果,导致现今地表蚀变岩型(焦家式)金矿赋存于成矿后焦家断裂下盘,焦家断裂带中统一空间形成的上盘蚀变岩型(焦家式)金矿则相对上盘埋深加大;从现有较少深孔勘查成果资料分析,二者垂直高差错距可达 2.1 km。

(3)白色断层泥为成矿后的产物,而黑色断层泥则有可能不是成矿期就存在的产物,对发育于焦家断裂中的断层泥参与了成矿期金矿化成矿过程,有待于进一步探讨。

(4)从现有深孔勘查成果资料分析,受成矿后焦家断裂的正断层效应影响,焦家断裂深部上盘中必然存在有完整金矿体被错断的的部分;现有上盘深部金矿体初始见矿标高约为-2100 m;推断在焦家断裂上盘标高-2100 m 以深的部分区段存在金矿体。

8 存在问题

本文在综述焦家断裂带蚀变岩型(焦家式)金矿上、下盘找矿认识时,断裂构造性质及断距主要是依据上、下盘地层、岩体、金矿体被成矿后断裂错动的“结果现状”分析恢复得来的,本文中,图 5 中吴一村勘查区的钻孔 ZK01 内焦家断裂主断裂面上盘内的 I-6 号金矿体与焦家金矿内焦家断裂主断裂面下盘的 I 号金矿体也并不绝对确定是一个矿体,因为成矿后焦家断裂带也具有水平方向的错动,但可作为上盘金矿见矿的标高参考,而具体垂向及水平方向的错动距离的这一问题,有待后续构造学方面研究加以论证。

其次,笔者等也注意到蚀变岩型(焦家式)金矿

围岩蚀变分带中,钾化为位于最外带,但钾化带的温度却是最高的,比靠近断裂面处黄铁绢云岩化的形成温度明显要高,与金成矿温度自中心向外,由高到低的正常模式不同,然而从焦家金矿 112 剖面图分析来看,钾化带仅分布于玲珑花岗岩中,而没有分布于前寒武系斜长角闪岩中;但与金矿密切相关的绢云岩化却分布于前寒武系斜长角闪岩中,并形成绢英岩化斜长角闪岩及绢英岩化斜长角闪岩质碎裂岩,说明本区钾化与花岗岩有更密切的内在关系,而与金成矿关系不大,应归属于成矿前期的蚀变,是否将其划归为金矿的直接围岩蚀变之一? 本文在此将其作为问题提出,仅供审阅者参阅。

致谢:首先对在山东新城金矿一起相处过的矿山领导及地质同仁表示谢忱! 本文成文之前,得到过中国地质科学院矿产资源研究所裴荣富院士对本文核心思路的肯定! 两位审稿专家对文章提出了很好的修改建议,特表谢忱! 在此对促成疫情期间给予联系的王浩琳女士特表谢忱! 本人曾与中国地质科学院地质力学研究所施炜研究员,刘建民研究员,中国地质科学院刘刚博士一起进行过有益的讨论,特表谢忱!

注 释 / Notes

- ① 温桂军,周明岭,徐韶辉,迟义宾,荆永渠,袁文花,魏绪峰,高书剑,于舰慧,王和立. 2008. 山东省胶西北金矿集中区金矿资源潜力调查及深部远景预测研究报告. 报告完成单位:山东省第六地质矿产勘查院; 现资料保存单位:全国地质资料馆.
- ② 崔秋波,兆和,黄自旭. 2016. 山东省莱州市新城金矿资源储量核实报告. 报告完成单位:山东正元地质资源勘查有限责任公司; 现资料保存单位:山东黄金矿业股份有限公司.

参 考 文 献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 陈国达. 1985. 成矿构造研究法. 北京:地质出版社: 1 ~ 421.
- 陈衍景, Pirajno F, 赖勇, 李超. 2004. 胶东矿集区大规模成矿时间和构造环境. 岩石学报, 20(4): 907 ~ 922.
- 迟培星, 奕恒彦, 刘明渭, 徐立军. 1994. 山东省新生代岩石地层清理意见. 山东地质, 10(增刊): 70 ~ 86.
- 邓军, 杨立强, 葛良胜, 王庆飞, 张静, 高帮飞, 周应华, 江少卿. 2006. 胶东矿集区形成的构造体制研究进展. 自然科学进展, 16(5): 513 ~ 518.
- 豆敬兆, 付顺, 张华锋. 2015. 胶东郭家岭岩体固结冷却轨迹与隆升剥蚀. 岩石学报, 31(8): 2325 ~ 2335.
- 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. 岩石学报, 21(5): 1317 ~ 1328.
- 高书剑, 李秀章, 宋国政. 2010. 马塘金矿床浅深部矿体地质特征对比. 科技传播, 2010 下(7): 166 ~ 168.

- 郭涛, 邓军, 吕古贤, 孙之夫. 2008. 焦家金矿床成矿流体运移的通道、方式及驱动机制. 地球学报, 29(1): 81 ~ 88.
- 李厚民, 沈远超, 毛景文, 刘铁兵. 2002. 焦家式金矿构造—流体成矿作用特征——以胶西北金城金矿床为例. 大地构造与成矿学, 26(4): 396 ~ 403.
- 刘峰旭. 2016. 山东莱州新城金矿床矿化富集规律及矿床成因探讨. 导师: 王力. 长春: 吉林大学硕士学位论文: 1 ~ 62.
- 刘玉琪. 1995. 山东省莱州市马塘金矿区控矿规律的研究与应用. 黄金, 16(1): 13 ~ 22.
- 刘跃. 2015. 胶东早白垩世早期新城花岗岩成因及其成矿贡献. 导师: 杨力强. 北京: 中国地质大学(北京). 硕士学位论文: 1 ~ 92.
- 刘钊. 2018. 焦家矿田金矿床地质特征及成矿规律研究. 导师: 王建国. 北京: 中国地质大学(北京). 硕士学位论文: 1 ~ 69.
- 吕古贤, 孔庆存. 1993. 胶东玲珑—焦家式金矿地质. 北京科学出版社: 1 ~ 253.
- 卢焕章, Arcam G, 李院生, 魏家秀, 陈娜娜. 张国平, 袁万春, 陈晓枫, 龙洪波. 1999. 山东玲珑—焦家地区形变类型与金矿的关系. 地质学报, 73(2): 174 ~ 188.
- 吕古贤, 孔庆存, 邓军, 李晓波. 1996. 山东玲珑和焦家金矿成矿深度研究与测算. 地质论评, 42(6): 550 ~ 559.
- 马学东. 2011. 胶东新城金矿床构造—蚀变—矿化网络结构. 导师: 杨立强. 北京: 中国地质大学(北京) 硕士学位论文: 1 ~ 99.
- 苗来成, 罗镇宽, 关康, 黄佳展. 1997. 胶东招掖金矿带控矿断裂演化规律. 地质找矿论丛, 12(1): 26 ~ 35.
- 沈远超, 李厚民, 刘铁兵, 张连昌, 李光明. 2001. 胶西北焦家式金矿化类型及其研究意义. 地质与勘探, 37(01): 48 ~ 51.
- 宋国政, 闫春明, 曹佳, 郭志峰, 鲍中义, 刘国栋, 李山, 范家盟, 刘彩杰. 2017. 胶东焦家成矿带超千米深部金矿勘查突破及意义——以纱岭矿区为例. 黄金科学技术, 25(3): 19 ~ 27.
- 宋明春, 崔书学, 周明岭, 姜洪利, 袁文花, 魏绪峰, 吕古贤. 2010. 山东省焦家矿区深部超大型金矿床及其对“焦家式”金矿的启示. 地球学报, 84(9): 1349 ~ 1356.
- 宋明春, 李三忠, 伊丕厚, 崔书学, 徐军详, 吕古贤, 宋英昕, 姜洪利, 周明岭, 张丕建, 黄太岭, 刘长春, 刘殿浩. 2014. 中国胶东焦家式金矿类型及其成矿理论. 吉林大学学报(地球科学版), 44(1): 87 ~ 104.
- 宋明春, 宋英昕, 丁正江, 李世勇. 2018. 胶东金矿床: 基本特征和主要争议. 黄金科学技术, 26(4): 407 ~ 422.
- 宋明春, 林少一, 杨立强, 宋英昕, 丁正江, 李杰, 李世勇, 周明岭. 2020. 胶东金矿成矿模式. 矿床地质, 9(2): 215 ~ 236.
- 宋英昕, 宋明春, 丁正江, 魏绪峰, 徐韶辉, 李杰, 谭现峰, 李世勇, 张照录, 焦秀美, 胡弘, 曹佳. 2017. 胶东金矿集区深部找矿重要进展及成矿特征. 黄金科学技术, 25(3): 4 ~ 18.
- 王中亮. 2012. 焦家金矿田成矿系统. 导师: 杨立强. 北京: 中国地质大学(北京) 博士学位论文: 1 ~ 226.
- 吴淦国. 1998. 矿田构造与成矿预测. 地质力学学报, 4(2): 1 ~ 4.
- 杨立强, 邓军, 王中亮, 张良, 郭林楠, 宋明春, 郑小礼. 2014. 胶东中生代金成矿系统. 岩石学报, 30(9): 2447 ~ 2467.
- 杨立强, 邓军, 宋明春, 于学峰, 王中亮, 李瑞红, 王偲瑞. 2019. 巨型矿床形成与定位的构造控制: 胶东金矿集区剖析. 大地构造与成矿学, 43(3): 431 ~ 446.
- 杨敏之, 吕古贤. 1996. 胶东绿帘带金矿地质地球化学. 北京: 地质出版社: 1 ~ 228.
- 尹业长. 2020. 胶西北金矿集区金成矿作用与成矿模型. 导师: 郝立波. 长春: 吉林大学博士学位论文: 1 ~ 118.
- 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. 岩石学报, 35(9): 2893 ~ 2910.
- 翟裕生, 邓军, 李晓波. 1999. 区域成矿学. 北京: 地质出版社: 1 ~ 287.
- 翟裕生, 吕古贤. 2002. 构造动力体制转换与成矿作用. 地球学报, 23(2): 97 ~ 102.
- 张潮. 2015. 焦家金矿田断裂带构造控矿模式. 导师: 邓军. 北京: 中国地质大学(北京) 博士学位论文: 1 ~ 185.
- 张华锋, 李胜荣, 翟明国, 郭敬辉. 2006. 胶东半岛早白垩世地壳隆升剥蚀及其动力学意义. 岩石学报, 22(2): 285 ~ 295.
- 张良. 2016. 胶西北金成矿系统热年代学. 导师: 杨立强. 北京: 中国地质大学(北京) 博士学位论文: 1 ~ 148.
- 张佳楠. 2012. 山东莱州焦家金矿床矿化富集规律及矿床成因探讨. 导师: 王力. 长春: 吉林大学硕士学位论文: 1 ~ 72.
- 赵泽霖, 李俊建, 党智财, 付超, 唐文龙, 郭瑞鹏, 张文. 2020. 胶西北焦家金矿深部成矿流体性质及成矿作用. 地质论评, 66(2): 425 ~ 438.
- 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. 山东国土资源, 34(9): 14 ~ 19.
- Bi Shijian, Zhao Xinfu. 2017. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Jiehe gold deposit in the Jiaodong Peninsula, eastern North China Craton: Implications for regional gold metallogeny. Ore Geology Reviews, 86: 639 ~ 651.
- Chen Guoda. 1985. Methods of Metallotectonic Researches. Beijing: Geological Publishing House: 1 ~ 421.
- Chen Yanjing, Pirajno F, Lai Yong, Li Chao. 2004. Metallogenic time and tectonic setting of the Jiaodong gold province, eastern China. Acta Petrologica Sinica, 20(4): 907 ~ 922.
- Chi Peixing, Luan Hengyan, Liu Mingwei, Xu Lijun. 1994. On the division and correlation of the Cenozoic lithostratigraphy units in Shandong Province. Shandong Geology, 10(suppl.): 70 ~ 86.
- Deng Jun, Yang Liqiang, Ge Liangshen, Wang Qingfei, Zhang Jing, Gao Bangfei, Zhou Yinghua, Jiang Shaoqing. 2006. Study on the structural system of Jiaodong mining concentration area. Progress in Natural Science, 16(5): 513 ~ 518.
- Deng Jun, Yang Liqiang, Groves D I, Zhang Liang, Qiu Kunfeng, Wang Qingfei. 2020. An integrated mineral system model for the gold deposits of the giant Jiaodong province, eastern China. Earth-Science Reviews, 208(2): 103 ~ 274.
- Dou Jingzhao, Fu Shun, Zhang Huafeng. 2015. Consolidation and cooling paths of the Guojialing granodiorites in Jiaodong Peninsula: Implication for crustal uplift and exhumation. Acta Petrologica Sinica, 31(8): 2325 ~ 2335.
- Fan Hongrui, Hu Fangfang, Yang Jinhui, Shen Kun, Zhai Mingguo. 2005. Fluid evolution and large-scale gold metallogeny during Mesozoic tectonic transition in the eastern Shandong Province. Acta Petrologica Sinica, 21(5): 1317 ~ 1328.
- Gao Shujian, Li Xiuzhang, Song Guozheng. 2010. Comparison of geologic feature of ore between superficial part and deep part in Matang gold deposit. Applied Technology, (7): 166 ~ 168.
- Guo Tao, Deng Jun, Lü Guxian, Sun Zhifu. 2008. The channel way, style and driving mechanism of ore fluid migration in the Jiaojia gold deposit. Acta Geoscientica Sinica, 29(1): 81 ~ 88.
- Li Houmin, Shen Yuanchao, Mao Jingwen, Liu Tiebing. 2002. Tectonics—mineralization of Jiaojia-type gold deposits—An example from Jincheng gold deposit, northwestern Jiaodong Peninsula. Geotectonica et Metallogenia, 26(4): 396 ~ 403.
- Li Jianwei, Vasconcelos Paulo M, Zhang Jun, Zhou Meifu, Zhang

- Xiaojun, Yang Fenghua . 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. *The Journal of Geology*, 111(6): 741 ~ 751.
- Liu Fengxu. 2016&. Mineralization Enrichment Regularity and the Genesis Discussion of Xincheng Gold Deposit, Laizhou Shandong. Supervisor: Wang Li. Changchun: Master's Dissertation of Jilin University; 1 ~ 62.
- Liu Xuan, Fan Hongrui, Evans Noreen J., Yang Kuifeng, Danišik Martin, McInnes Brent I. A., Qin Kezhang, Yu Xuefeng. 2017. Exhumation history of the Sanshandao Au deposit, Jiaodong: Constraints from structural analysis and (U—Th)/He thermochronology. *Scientific Reports*, 8(1)1 ~ 12.
- Liu Yuqi. 1995#. Research and use on ore-controlling regularity of Matang gold deposit, Laizhou, Shandong Province. *Gold*, 16(1): 13 ~ 22.
- Liu Yue. 2015&. Petrogenesis of the Gold-hosting Granitoids and Their Contribution to Mineralization in the Xincheng Gold Deposit, Jiaodong Peninsula. Supervisor: Yang Liqiang. Beijing: Master's Dissertation of China University of Geosciences; 1 ~ 92.
- Liu Zhao. 2018&. Study on Geological Characteristics and Metallogenic Regularity of Gold Deposits in Jiaojia Ore-field. Supervisor: Wang Jianguo. Beijing: Master's Dissertation of China University of Geosciences; 1 ~ 69.
- Lu Huanzhang, Arcam G, Li Yuansheng, Wei Jiaxiu, Chen Nana, Zhang Guoping, Yuan Wanchun, Chen Xiaofeng, Long Hongbo. 1999&. The relation between deformation types and gold mineralization in the Linglong—Jiaojia district, Shandong Province, China. *Acta Geologica Sinica*, 73(2): 174~188.
- Lü Guxian, Kong Qingcun. 1993&. *Geology of Linglong — Jiaojia Type Gold Deposit in Jiaodong*. Beijing Science Press; 1 ~ 253.
- Lü Guxian, Kong Qingcun, Deng Jun, Li Xiaobo. 1996&. Study and estimate of depths of the formation of the Linglong and Jiaojia gold deposit, Shandong. *Geological Review*, 42(6): 550 ~ 559.
- Ma Xuedong. 2011&. Structure—Alteration—Mineralization Network of Xincheng Gold Deposit, Jiaodong Peninsula. Supervisor: Yang Liqiang. Beijing: Master's Dissertation of China University of Geosciences; 1 ~ 99.
- Miao Laicheng, Luo Zhenkuan, Guan Kang, Huang Jiazhan. 1997&. The evolution of the ore-controlling faults in the Zhaoye gold belt, eastern Shandong Province. *Contributions to Geology and Mineral Resources Reserch*, 12(1): 26 ~ 35.
- Shen Yuanchao, Li Houmin, Liu Tiebing, Zhang Lianchang, Li Guangming. 2001&. Types of gold mineralization of Jiaojia type's gold deposits in Jiaodong district, Shandong Province, and their importance of studying. *Geology and Prospecting*, 37(1): 48 ~ 51.
- Song Guozheng, Yan Chunming, Cao Jia, Guo Zhifeng, Bao Zhongyi, Liu Guodong, Li Shan, Fan Jiameng, Liu Caijie. 2017&. Breakthrough and significance of exploration at depth more than 1000 m in Jiaojia Metallogenic Belt, Jiaodong: A case of Shaling Mining Area. *Gold Science and Technology*. 25(3): 19 ~ 27.
- Song Mingchun, Cui Shuxue, Zhou Mingling, Jiang Hongli, Yuan Wenhua, Wei Xiufeng, Lü Guxian. 2010. &. The deep oversize gold deposit in the Jiaojia Field, Shandong Province and its enlightenment for the Jiaojia-type Gold Deposits. *Acta Geologica Sinica*. 84(9): 1349 ~ 1356.
- Song Mingchun, Li Sanzhong, Yin Pihou, Cui Shuxue, Lü Guxian, Song Yingxin, Jiang Hongli, Zhou Mingling. Zhang Pijian, Huang Tailing, Liu Changchun, Liu Dianhao. 2014&. Classification and metallogenic theory of the Jiaojia-Style Gold Deposit in Jiaodong Peninsula. China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*; 44(1): 87 ~ 104.
- Song Mingchun, Song Yingxin, Ding Zhengjiang, Li Shiyong. 2018&. Jiaodong gold deposits: essential characteristics and major controversy. *Gold Science and Technology*, 26(4): 406 ~ 422.
- Song Mingchun, Lin Shaoyi, Yang Liqiang, Song Yingxin, Ding Zhengjiang, Li Jie, Li Shiyong, Zhou Mingling. 2020&. Metallogenic model of Jiaodong Peninsula gold deposits. *Mineral Deposits*, 39(2): 215 ~ 236.
- Song Yingxin, Song Mingchun, Ding Zhengjiang, Wei Xuefeng, Xu Shaohui, Li Jie, Tian Xianfeng, Li Shiyong, Zhang Zhaolu, Jiao Xiumei, Hu Hong, Cao Jia. 2017&. Major advances on deep prospecting in Jiaodong gold ore cluster and its metallogenic characteristics. *Gold Science and Technology*, 25(3): 4 ~ 18.
- Wang Zhongliang. 2012&. *Metallogenic System of Jiaojia Gold Orefield*, Shandong Province, China. Supervisor: Yang Liqiang. Beijing: Doctor's Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 1 ~ 226.
- Wu Ganguo. 1998&. Mine field structure and metallogenic prediction. *Journal of Geomechanics*, 4(2): 1 ~ 4.
- Yang Liqiang, Guo Linnan, Wang Zhongliang, Zhao Rongxin, Song Mingchun, Zheng Xiaoli. 2017&. Timing and mechanism of gold mineralization at the Wang'ershan gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China. *Ore Geology Reviews*, 81: 491 ~ 510.
- Yang Liqiang, Deng Jun, Wang Zhongliang, Zhang Liang, Guo Linnan, Song Mingchun, Zheng Xiaoli. 2014&. Mesozoic gold metallogenic system of the Jiaodong gold province, eastern China. *Acta Petrologica Sinica*. 30(9): 2447 ~ 2467.
- Yang Liqiang, Deng Jun, Song Mingchun, Yu Xuefeng, Wang Zhongliang, Li Ruizhong, Wang Sirui. 2019&. Structure control on formation and localization of giant deposits: An example of Jiaodong gold deposits in China. *Geotectonica et Metallogenia*, 43(3): 431 ~ 446.
- Yang Minzhi, Lü Guxian. 1996&. *The Geology—Geochemistry of Gold Deposits of the Greenstone Belt in Jiaodong District*. China. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese); 1 ~ 228.
- Yin Yechang. 2020&. Gold Mineralization and Metallogenic Model of the Jiaoxibe Gold Deposit Concentrated Area. Supervisor: Hao Libo. Changchun: Doctor's Dissertation of Jilin University; 1 ~ 118.
- Yu Xuefeng, Yang Deping, Li Dapeng, Shan Wei, Xiong Yuxin, Chi Naijie, Liu Pengrui, Yu Leiheng. 2019&. Mineralization characteristics and geological significance in 3000m depth of Jiaojia gold metallogenic belt, Jiaodong Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9): 2893 ~ 2910.
- Zhai Yushen, Deng Jun, Li Xiaobo. 1999&. Regional Metallogeny. Beijing Geological Publishing House, 1 ~ 287.
- Zhai Yushen, Lü Guxian. 2002&. Transition of tectonic and dynamic regime and mineralization. *Acta Geoscientica Sinica*. 23(2): 97 ~ 102.
- Zhang Chao. 2015&. Ore-Controlling Model of Structures in Fault Zone, Jiaojia Gold Orefield, Shandong Province, China. Supervisor: Deng Jun. Beijing: Doctor's Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 1 ~ 185.
- Zhang Huafeng, Li Shenrong, Zhai Mingguo, Guo Jinghui. 2006&. Crust uplift and its implications in the Jiaodong Peninsula, eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 285 ~ 295.
- Zhang Liang. 2016&. Application of Thermochronology to Hydrothermal Gold Deposits, Northwestern Jiaodong Peninsula, China. Supervisor: Yang Liqiang. Beijing: Doctor's Dissertation of China

University of Geosciences(Beijing) ,1 ~ 148.

Zhang Jianan. 2012&. MineralizationEnrichment Regularity and the Genesis Discussed of Jiaojia Gold Deposit, Shandong Province Laizhou. Supervisor: Wang Li. Changchun;Master’s Dissertation of Jilin University: 1 ~ 72.

Zhang Liang, Yang Liqiang, Wang Yu, Roberto Weinberg, An Ping, Chen Bingyu. 2017. Thermochronologic constrains on the processes of formation and exhumation of the Xinli orogenic gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China. Ore Geology Reviews, 81(1): 140 ~ 153.

Zhang Xiao’ou, Cawood Peter A. , Wilde Simon A. , Liu Ruci, Song Hailin, Li Wen, Snee Lawrence. W. 2003. Geology and timing of mineralization at the Cangshang gold deposit, north-western Jiaodong Peninsula, China. Mineralium Deposita, 38: 141 ~ 153.

Zhao Zelin, Li Junjian, Dang Zhicai, Fu Chao, Tang Wenlong, Guo Ruipeng, Zhang Wen. 2020&. The characteristics of deep ore – forming fluid and metallogenesis of Jiaojia gold deposit, northwest Jiaodong Peninsula. Geological Review, 66(2): 425 – 438.

Zhu Decheng, Zhang Wen, Wang Yingpeng, Tian Jinxian, Liu Handong, Hou Jianhua, Gao Huali. 2018&. Characteristics of ore bodies and prospecting potential of Zhaoxian gold deposits in Laizhou city of Shandong Province. Shandong Land and Resources, 34(9): 14 ~ 19.

Adiscussion on katogene of Jiaojia-type gold deposit by post-mineralization fault activities and prospecting direction in Jiaojia Fault Zone, Northwestern Shandong

FAN Shijia,XUE Wei

China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing, 100012

Abstract:On the basis of summarizing the achievements of previous researches on Jiaojia type gold deposit in the Jiaojia fault zone, In terms of the fact that "gold orebody" was found in the deep hanging wall of the Jiaojia fault zone, This paper focuses on the destruction of the ore body by the Jiaojia fault after mineralization. According to the fact that the gold ore bodies in the hanging wall and footwall of the Jiaojia fault are bounded by fault gouge and have obvious characteristics of being staggered, it is pointed out that the fault gouge formed in the main fault plane of Jiaojia fault is the product of fault activity after mineralization. In terms of ore type, alteration of surrounding rock, ore minerals and metallogenic stage, the upper and footwall gold ore body have very similar and consistent characteristics, it is propose that Altered rock type (Jiaojia type) gold deposit in hanging wall and footwall wall have complete unity in time and space during mineralization with a depth of 3~9 km in the Jiaojia fault zone, between 118.8~121Ma. Under the influence of the normal fault effect of post-mineralization Jiaojia fault, the newly discovered hanging wall gold (mineralization) body in the deep of Jiaojia fault should be the part of the footwall gold (mineralization) body that had been broken.

Keywords: Jiaojia fault zone; Jiaojia-type gold deposit; postmetallogenic fault; Fault gouges; Normal fault effect

Acknowledgements: First of all, I would like to express my gratitude to the leaders and geological colleagues I have being along with in Xincheng Gold Company, Shandong Gold Mining Stock Co. , Ltd. in Shandong province. High tribute shall be paid to Pei Rongfu, the academician of institute of Mineral Resources, who affirmed the core idea of this paper before this paper was written! Special thanks to two reviewers for putting forward good suggestions to revising the article. Special thanks to Ms. Wang Haolin who helped me during the special new crown pneumonia epidemic. Thanks for the helpful discussion I had with Researcher Shi Wei and Liu Jianmin from Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences. and Dr. Liu Gang from Chinese Academy of Geological Sciences.

First author: FAN Shijia, male, born in 1967, doctor, senior engineer, mainly engaged in regional geological survey and regional ore prediction; Email: 497675820@qq.com

Manuscript received on: 2016-07-22;Accepted on: 2017-10-11; Network published on: 2021-03-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2021.03.005 **Edited by:** ZHANG Yuxu

