

# 基于断裂带分段结构与应力转移模拟的胶东焦家断裂带南段深部成矿预测

李施庆<sup>2</sup> 王中亮<sup>1\*</sup> 王恩敬<sup>2</sup>

1. 中国地质大学（北京）地球科学与资源学院，北京 100083
2. 山东黄金矿业（莱州）有限公司焦家金矿，山东莱州 261438

**摘要：**胶东焦家断裂带为华北克拉通破坏与滨太平洋构造域叠加背景下形成的既导矿又储矿的巨型金矿带，其南段被第四系广泛覆盖，尽管已实施综合物化探工作和大量钻探工程，仍未找到工业矿体。本文通过地表及坑道填图，查明焦家断裂带分段结构，并应用应力转移模拟，揭示断裂带南段深部有利成矿部位。结果表明，焦家断裂带由中-北段位于新城以北张性断层桥、中-南段位于新城-后赵主断裂段及南段位于后赵以南断裂末端三部分组成；中-南段焦家主断裂面下盘库仑破裂应力变化量（ $\Delta CFS$ ）为0.15-0.5MPa的区域与已知金矿床空间分布高度吻合，南段后赵以南直径为3-5km的近圆形区域（ $\Delta CFS$ 为0.15-0.5MPa）是余震网络集中发生及可持续、长时间高流体通量汇聚的高渗透率带，为重点勘探方向。目前已施工共八个钻孔，六个钻孔均揭露金矿体。综上提出在查明区域上高位移、大型断裂分段结构的基础上，通过应力转移模拟计算主破裂活动导致的周围库仑破裂应力的变化，揭示高渗透率带的分布，从而预测成矿靶区，是在覆盖区勘查构造控制的脉状金矿床的一种有效方法。

**关键词：**构造找矿；焦家断裂；库仑破裂应力；应力转移模拟；断裂分段；脉状金矿床

**中图分类号：**P612      **收稿日期：**2025-12-15

## Deep Ore-forming Prediction of the Southern Segment of the Jiaojia Fault Zone, Jiaodong Peninsula Based on the Fault-segment Rupture and Stress Transfer Modelling

Li Shiqing<sup>2</sup>, Wang Zhongliang<sup>1</sup>, Wang Enjing<sup>2</sup>

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
2. Jiaojia Gold Company, Shandong gold mining stock co., LTD, Laizhou city, Shandong province 261438, China

**Abstract:** The Jiaojia fault zone in the Jiaodong Peninsula, a giant gold metallogenic belt, which both conduits and hosts ore deposits, is formed under the superimposed tectonic setting of the destruction of the North China Craton and the West Pacific tectonic domain, the southern segment of which is extensively covered by Quaternary deposits, and no economic ore bodies have been identified to date despite the deployment of comprehensive geophysical-geochemical surveys and extensive drilling programs. To address this issue, this study clarifies the segmented structure of the Jiaojia Fault Zone by means of surface and underground adit mapping, and further reveals the favorable deep-seated metallogenic targets in the southern segment by applying stress transfer

**基金项目：**国家重点研发计划项目（No.2022YFC2903602）；国家自然科学基金面上项目（No. 41772061）；矿山横向找矿项目“前陈-上杨家矿权西南部成矿机理研究及找矿应用（No.24B1002）”和“焦家整合带先存构造的控矿作用与隐伏矿体定位预测（No.24B1013）”。

**作者简介：**李施庆（1979-），男，高工，硕士，主要从事矿产勘查与采矿研究。E-mail: lishq@sd-gold.com, ORCID: 0009-0007-6011-8579。

**\*通讯作者：**王中亮（1977-），男，副教授，主要从事矿田构造与成矿预测。E-mail: zlwang@cugb.edu.cn。

**作者贡献度：**李施庆：研究思路和方法设计、文稿撰写；王中亮：科学问题及研究思路提出、修改和编辑文稿；王恩敬：软件模拟、图件绘制、格式修改。

modelling. The results indicate that the Jiaojia Fault Zone consists of a dilatant fault bridge, i.e. the middle-northern fault-segment to the north of Xincheng, the main fault-segment in the middle-southern part from Xincheng to Houzhao, and the fault tip in the southern fault-segment to the south of Houzhao. In the central-southern segment, positive Coulomb failure stress changes ( $+\Delta\text{CFS}$ ) on the footwall of the main Jiaojia fault plane exhibit a striking spatial correlation with the distribution of known gold deposits. In the southern segment, south of Houzhao, the approximately circular positive  $\Delta\text{CFS}$  zone with a diameter of 3–5 km constitutes a high-permeability belt, which is characterized by clustered aftershock networks and protracted elevated fluid flux, and thus delineated as a priority prospecting target. Based on these insights, a total of eight drill holes have been drilled to date, six of which have successfully intersected gold ore bodies. Therefore, we propose an effective method for mineral exploration as to the lode gold deposits in the Quaternary covered area, which is to, firstly, identify the fault segments of the regional-scale large faults with high-displacement and the locations for paleo-rupture arrest (such as fault bridges, fault bends and tips), then, calculate the  $\Delta\text{CFS}$  in surrounding crust resulting from the main rupture activity by applying the stress-transfer modeling, and lastly predict the locations of high-permeability zones corresponding to the regions of increased  $\Delta\text{CFS}$  and thus the new targets for gold exploration.

**Key words:** Structural ore prospecting; Jiaojia fault; Coulomb failure stress; Stress transfer modeling; Fault-segment; Lode gold deposit

## 0 引言

多数易发现和易开采的金矿床已被找到,覆盖区深部隐伏金矿的寻找是世界范围内相当关注的问题(Kerr, 2012; 王赞等, 2025)。位于华北克拉通东南缘的胶东半岛为中国第一大黄金生产基地(图1),形成于华北克拉通破坏与滨太平洋俯冲构造叠加带,区别于全球其它形成于前克拉通化构造背景下的前寒武纪克拉通内巨型金成矿省,如加拿大苏必利尔和西澳大利亚伊尔干金成矿省等(Wang et al., 2022),然而区内地表矿、浅部矿已多数被发现,“攻深找盲”成为区域找矿的重点方向,金矿找矿难度增大。胶东半岛西北部莱州-招远金矿集区内的金矿床自西向东分别受三山岛断裂、焦家断裂、招平断裂控制(图1),其已探明金矿资源储量和年产量约占整个胶东金矿集区的90%(Deng et al., 2020)。在焦家断裂带内,自20世纪60年代以来已发现了焦家、新城、寺庄三个特大型金矿床及马塘、东季、红布、龙埠等一批大中型金矿床,累计探明金储量超过1500吨;本世纪初,这些矿山均进入后期开采,保有储量严重不足,属于资源危机矿山,寻找接替资源来增加矿山保有资源量,已成为当务之急(Song et al., 2014)。

焦家断裂为莱州-招远金矿集区内一级控矿断裂,总体呈北北东向,倾向西北西,倾角缓至中等,为 $20^{\circ}$ - $50^{\circ}$ ;其北起龙口黄山馆,南至莱州市朱桥镇,长约40km(Wang et al., 2022)(图1和图2a)。目前已发现的金矿床以约2km间距主要分布于焦家断裂中-南段长度不超过10km的新城-后赵段的焦家金矿田内,自北向南分别为新城、龙埠、东季、焦家、马塘、寺庄金矿床(图2a);在新城以北约20km长的焦家断裂中-北段内仅赋存有小涝洼、大涝洼金矿化点(图2a、b)。由于后赵以南的焦家断裂南段为第四系广泛覆盖,该区域内断裂空间展布及矿体赋存情况一直尚未查明。幸运的是,近十年来,高精度磁测、视电阻率联合剖面、可控源音频大地电磁(CSAMT)及频谱激电(SIP)等综合物探工作(智云宝等, 2014; 王洪军等, 2020)已初步查明后赵至朱桥镇紫罗姬家一带的断裂带空间展布(图2a)。另外,大量深部钻探揭示焦家、马塘金矿床内的矿体总体向南西侧伏,其在-800m以浅呈雁

列排列,而深部连为一体向南西侧伏至寺庄金矿床深部,在约-2000m以深仍有延伸(图2c),指示成矿流体可能来源于寺庄金矿床以南的深部,焦家断裂南段的覆盖区深部具有较大的成矿潜力,应为找寻接替资源的首选地段(Song et al., 2014)。但是,近年来山东省地质矿产勘查院第六地质大队等多家单位在该区域已投入大量钻探工程,仅在徐村院-紫罗寨家一带揭露了蚀变强度和矿化程度较低的蚀变带,并没有找到工业矿体,一直未有较大的找矿突破。

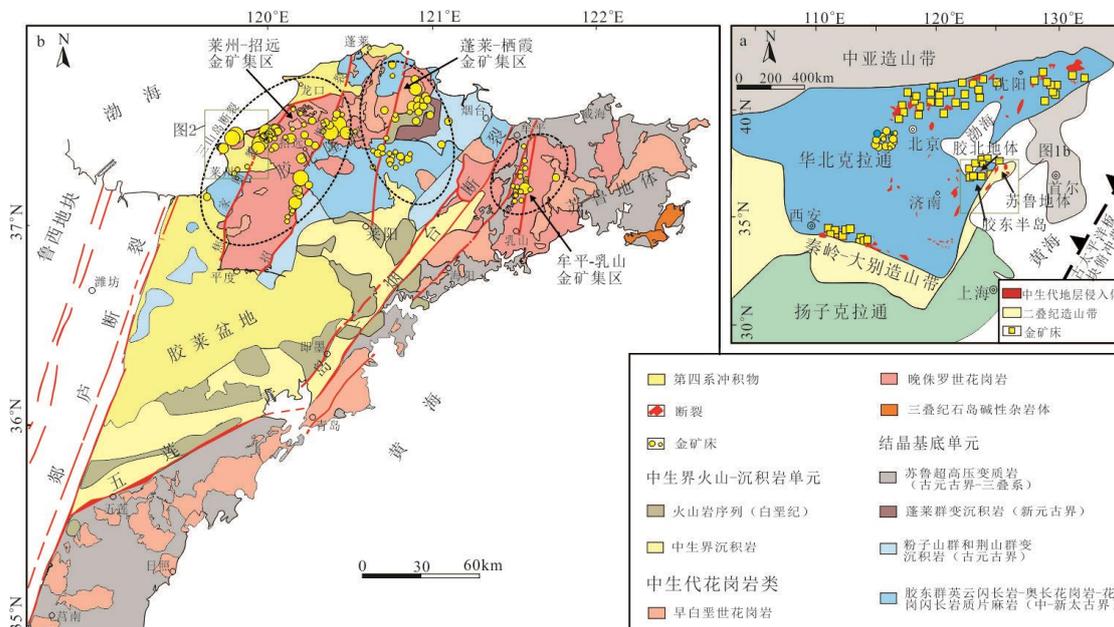


图1 胶东半岛大地构造位置(a)和区域地质构造简图(b)(据Wang et al., 2022改)

Fig. 1 Tectonic location(a)and regional geologic sketch map of the Jiaodong Peninsula (b)(modified from Wang et al., 2022)

越来越多的研究表明大规模、高位移断裂并不是一单一的平面构造,而是由两个或多个断裂段组合而成的复杂的体积带(Balsamo et al., 2019; Celestino et al., 2020; 赫洪哲等, 2024);通常具有复杂的断裂带结构,包含主滑动面、断层岩石组合和次级变形构造等多种内部构造(Choi et al., 2016),尤其是在大规模断裂的末端、弯曲及断层桥等部位,断裂带结构更加复杂,常发育一系列小规模、低位移的分支断裂或连接断裂(Kirkpatrick et al., 2008),其通常是金矿床群聚的位置(Cox and Ruming, 2004; Micklethwaite and Cox, 2004)。因此,如何正确区分大规模、高位移断裂带内的含矿构造与非含矿构造,厘定有利的成矿部位,是进行隐伏矿体定位预测的关键。

对于断裂带控制的矿床,通过厘定断裂带结构的几何学和运动学,确定断层桥的位置,从而进行隐伏矿体定位预测是一种经典的构造分析方法(Sibson, 1987)。可是该方法认为断层桥本身就是成矿靶区,其基本上忽略了断层桥周围的区域(Cox and Ruming, 2004),且大量研究表明多数金矿床群聚在邻近大规模、高位移断裂几公里范围内的小规模、低位移的分支断裂内,如澳大利亚西部太古宙伊尔干克拉通内东部金矿省的金矿床(Cox and Ruming, 2004; Micklethwaite and Cox, 2004)。实际上,发育在大规模、高位移断裂上的一些较大的不规则几何形态(断层弯曲和断层桥)通常起到阻碍破裂传播的作用,从而导致周围的应力状态发生变化,在应力状态接近破裂的区域内发育小规模、低位移的次级断裂(Sibson, 2001)。相对于大规模、高位移的主断裂,小规模、低位移的次级断裂内可以维持长达几个月到几十年的高流通量的流体,因此通常是成矿的有利部位(Cox and Ruming, 2004; Micklethwaite and Cox, 2004)。应力转移模拟(Coulomb 2.2.1)可以用来计算主断

裂发生时其周围应力状态的变化，从而判断周围可能发生破裂的区域（King et al., 1994; Kirkpatrick et al., 2008），并且已被成功的用来预测了澳大利亚西部太古宙伊尔干克拉通东部金矿省内受断裂控制的金矿床的空间分布（Cox and Ruming, 2004; Micklethwaite and Cox, 2004）。

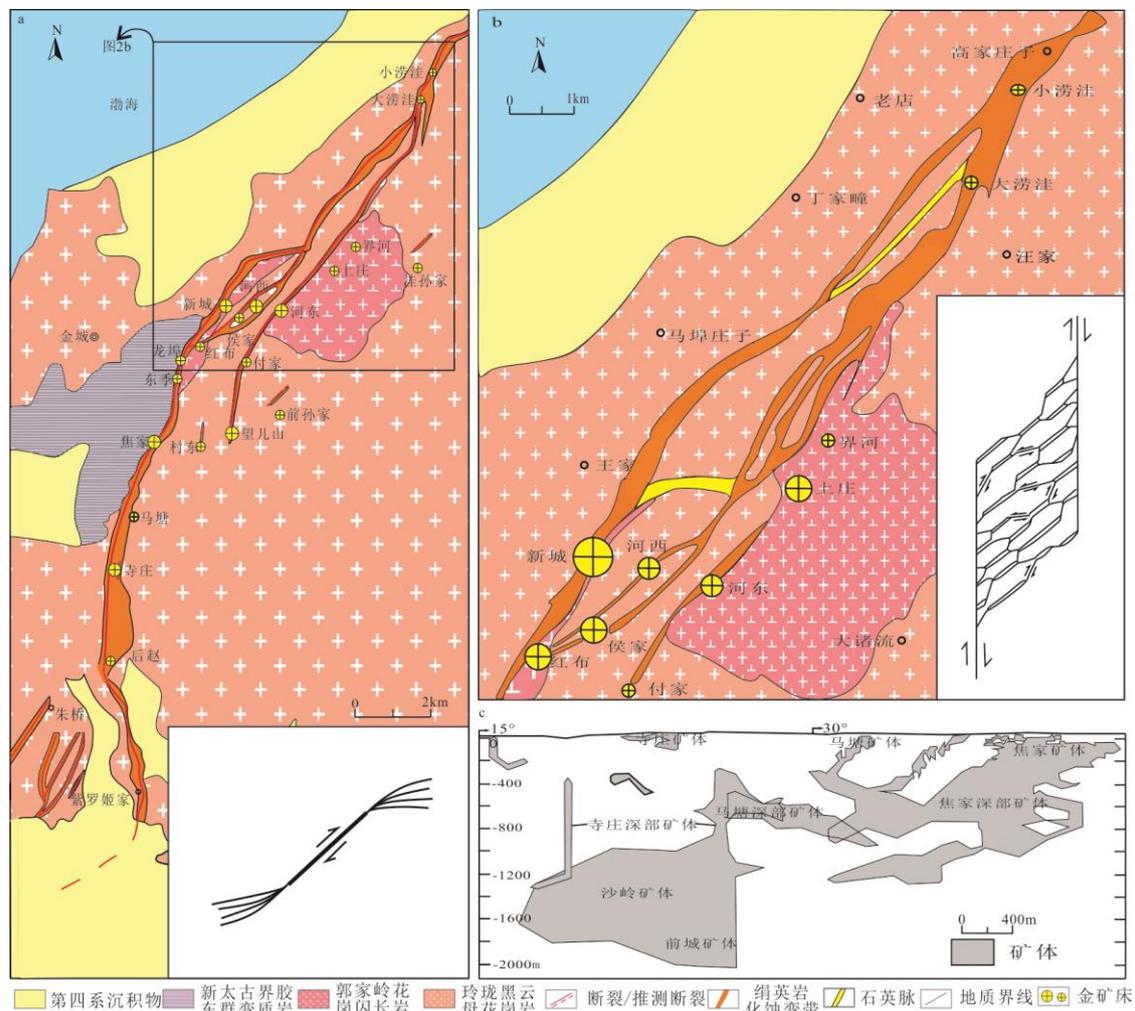


图2 a-焦家金矿田地质图（据Wang et al., 2022改），插图为右行走滑断裂末端马尾状次级断裂示意图（Mcgrath, 1995）； b-焦家断裂带中-北段地质简图（据Wang et al., 2022改），插图为右行走滑断裂张性断层桥示意图（Sibson, 1987）； c-焦家断裂带内主要金矿体垂直纵投影图（据Song et al., 2014改）

Fig. 2 a-A simplified geological map of the Jiaojia gold camp (modified from Wang et al., 2022), the inset indicates the schematic of horsetail-shaped secondary faults at right-lateral strike-slip fault tips; b-Simplified geological map of the middle-northern segment of the Jiaojia fault zone (modified from Wang et al., 2022), the inset indicates the schematic of extensional fault bridge at right-lateral strike-slip fault (Sibson,1987); c-vertical projection map of the main orebodies within the Jiaojia fault (modified from Song et al., 2014)

本文系统总结了作者近几年在焦家断裂带南段第四系覆盖区的找矿工作及取得的进展，首先根据在地表及坑道内所观察到的焦家断裂带中-南段和中-北段的地质特征，厘定了焦家断裂带的分段结构及其对金矿化的控制作用；接着详细介绍了构造应力转移模拟方法及其理论基础，并对焦家断裂带进行了应力转移模拟，揭示了可持续、长时间的高流体通量汇聚区，即高渗透率带的分布区域，从而预测了成矿靶区；最后介绍了工程验证情况，并提出了一种在覆盖区勘查构造控制的脉状金矿床的一种有效方法。

## 1 金成矿地质背景

中国东部大陆边缘的胶东半岛（图 1a）被认为形成于中晚三叠世扬子克拉通与华北克拉通碰撞过程中，以地壳尺度的东北东-北北东向五莲-青岛-烟台断裂为界被分为位于西北部的胶北地体和东南部的苏鲁地体（图 1b）（Wang et al., 2022）。约 180Ma 以来，古太平洋板块俯冲到中国东部大陆之下，导致中国东部大陆在晚侏罗世-早白垩世发育了大量岩浆活动，并在胶东半岛形成了大量早白垩世金矿床（Wang et al., 2015）。目前在胶东半岛已发现 260 多个金矿床，探明资源量金金属量超过 5000 吨（Song et al., 2014），使其成为中国最大的金矿集中区。胶东半岛内的金矿床自东向西主要群聚分布在牟平-乳山、蓬莱-栖霞、莱州-招远三个金矿集区（图 1b），其中，莱州-招远金矿集区内已探明金矿资源储量和年产量约占整个胶东金矿集区的 90%（Deng et al., 2020）。

莱州-招远金矿集区位于胶北地体西北部的胶北隆起内，其结晶基底为华北克拉通前寒武纪高级变质岩（图 1b），主要由中-新太古界胶东群英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩质片麻岩、古元古界粉子山群和荆山群变沉积岩、新元古界蓬莱群变沉积岩组成（Faure et al., 2004）。区内岩浆活动发生在晚侏罗世-早白垩世（图 1b）（Wang et al., 2022），其中晚侏罗世玲珑黑云母花岗岩于 163-149 Ma 侵入到前寒武纪基底岩石中，随后约 143-128 Ma 其在玲珑变质核杂岩剥露并伴随胶莱盆地形成过程中发生了隆升（Liu et al., 2021）；早白垩世花岗岩由似斑状二长花岗岩、花岗闪长岩和正长花岗岩组成，多呈东北东-北北东向岩株于 130-110 Ma 侵入到玲珑黑云母花岗岩中（Wang et al., 2022）。

胶北地体前寒武纪变质岩石内发育露头尺度的近东西向逆断层和伴生的小尺度紧闭斜卧褶皱，指示晚侏罗世玲珑黑云母花岗岩侵位之前的构造变形主要形成于南北向挤压的构造体制中（Lu et al., 2007）。总体呈北东-北北东向展布的晚侏罗世玲珑黑云母花岗岩、玲珑变质核杂岩和胶莱盆地（图 1b）标志着胶东半岛以伸展为主的构造活动的开始，其一直持续到早白垩世（Liu et al. 2015）。相应的，晚侏罗世以来，胶北地体内的构造变形主要集中在区域尺度高位移的北东至北北东向断裂带，自西向东分别为三山岛、焦家、招平断裂带，其内发育了胶东半岛所有的大型-超大型金矿床（图 1b）。高精度热液锆石定年表明胶北地体金成矿事件集中发生在约 120Ma 的一个非常短暂时期（Deng et al., 2020），形成于区域构造体制由近东西向伸展到北西-南东向伸展转换过程中（Wang et al., 2022）。

## 2 焦家断裂带分段结构及其对金矿床的控制

### 2.1 焦家断裂带的分段结构

焦家断裂带位于胶北隆起中西部，长约 40km（图 1b）（Wang et al., 2022）。在新城以北的新城至高家庄子段即焦家断裂带中-北段，发育一个顺时针方向偏离焦家断裂总体走向 20°的约 2km 宽、6km 长的透镜体带（图 2a），其南、北边界为分别发育在新城和高家庄子的走向为 20°断裂，呈右阶雁列分布，中间发育一系列北东向及近东西向石英脉和绢英岩化角砾岩带（图 2b），标志其为一张性断层桥（Sibson, 1987）。此外，该断层桥南端发散，向北逐渐收敛（图 2b），指示断裂活动发生时破裂由南向北扩展并在北端逐渐终止（Sibson, 1987）；结合断层桥内发育的石英脉及绢英岩化角砾岩带与其边界断裂的锐夹角方向（图 2b），推测焦家断裂为一右行走滑断裂（Sibson, 2001），这与焦家主断裂面上发育的擦痕方向的指向是一致的（详见后文）。该张性断层桥及其以北主断裂围岩为晚侏罗世玲珑黑云母花岗岩，断层桥内未有金矿床发育，仅在以北的主断裂内赋存有小涝洼、大涝洼

金矿化点（图 2a、b）。

在新城以南的新城至后赵段，即断层桥以南的焦家断裂带中-南段，焦家主断裂总体沿上盘（北西盘）的中新太古界胶东群变质岩与下盘的晚侏罗世玲珑黑云母花岗岩的接触带发育，走向总体为 20°-25°，局部变化较大，呈“S”形分布；其中在约 2km 长的东季至焦家段和寺庄至后赵段内均发生了较大的弧形弯曲，逆时针偏离焦家断裂总体走向约 20°，呈近南北向；此外，在马塘发生了逆时针偏离焦家断裂总体走向约 5°的较小的弯曲；在焦家、龙埠和新城发生了顺时针偏离焦家断裂总体走向约 10°-15°的中等弯曲。

在新城-后赵段，有限的地表露头、大量的钻孔及地下坑道观察均揭示焦家主断裂倾角缓至中等（20°-50°），类似于其它通常发育不对称应变模式的断层核的具缓至中等倾角的断裂带（Berg and Skar, 2005），其由包含主滑动面（即焦家主断裂面）的断层核及在断裂上、下盘单侧或不对称发育的破碎带组成（图 3）。焦家主断裂面上发育的缓至中等侧伏的擦痕指示焦家主断裂为一右行走滑断裂（图 3a）；断层核通常由 3-10cm 厚的强烈面理化的断层泥和 0.5-5m 厚的中等至弱面理化的碎裂岩及伴生的角砾岩组成（图 3b）；破碎带由面理不发育的花岗质碎裂岩和碎裂质花岗质组成（图 3c），其宽度沿断裂走向变化较大，在马塘金矿床内最窄处仅有 20m 宽，而在寺庄金矿床内最厚处可达 200m 宽。由于断裂围岩的岩性比较单一并且未揭露到被断裂错断的地质体边界线和脉体等标志物，未能对焦家断裂的总位移量直接进行很好的约束。不过前人通过对所获取的大量破碎带宽度（Y）和相应的断裂累积滑动量（位移 X）数据进行分析，揭示其在宽度（Y）-位移（X）双对数图上呈近线性的变化趋势，获得了指数为 0.74、系数为 0.69 的最优拟合的幂律函数  $Y=0.69 X^{0.74}$ （Choi et al., 2016, 图 2）。由此，根据本研究的焦家断裂破碎带最大宽度 200m，可获得对应的位移量高达 2km。根据 Wells and Coppersmith（1994）提出的地震震级与断裂最大滑动位移关系，与走向长度 10km 断裂对应的 6.0-6.5 级地震产生的最大位移约 1 米，推测焦家断裂带是数千次单独破裂事件累积形成的。

高精度磁测、视电阻率联合剖面、可控源音频大地电磁（CSAMT）及频谱激电（SIP）等综合物探工作揭示在焦家断裂带南段即后赵至紫罗姬家一带，在焦家主断裂面上盘一东西向宽约 1.5km 的带内发育一系列走向上长达约 3km 的北北东至北东向马尾状分支次级断裂（智云宝等，2014；王洪军等，2020），其顺时针方向偏离主断裂面，与主断裂面夹角为 10°-60°，平均约 30°（图 2a）；在下盘发育一相对规模较大的次级断裂，其与焦家主断裂面呈约 20°的夹角，走向为 340°，但是远离主断裂面走向发生顺时针偏转，逐渐变为近南北向，与主断裂面近平行，然后逐渐尖灭，长达约 7km（图 2a）。焦家主断裂及其上盘分支断裂的总体几何学特征类似于在世界范围内所观察到的许多其它走滑断裂末端的地质特征（Pachell and Evans, 2002），即在主断裂末端的张性扩容带内通常发育一系列马尾状分支次级断裂（Mcgrath, 1995；Micklethwaite and Cox, 2004）。因此，后赵至紫罗姬家一带为焦家主断裂的末端带，其上盘为张性扩容带，下盘为挤压收缩区域，同时也证实了焦家主断裂的右行走滑运动学特征（Kirkpatrick et al., 2008）。

综上所述，焦家断裂带是一区域尺度高位移的右行走滑脆-韧性剪切带，由位于中-北段的张性断层桥及其以北的主断裂、中-南段的主断裂及南段的断裂末端三部分组成。

## 2.2 焦家断裂带对金矿化的控制

焦家金矿田位于焦家断裂带中-南段，累计探明金储量超过 1500 吨（Song et al., 2014）。尽管中生代玲珑黑云母花岗岩经历了多阶段变形史（Liu et al., 2021），焦家金矿田内岩石变形主要集中在焦家断裂带内。其中，断层核内岩石发生了强裂的构造变形和绢英岩化、硅化等热液蚀变，金矿化主要发育在浸染状、网脉状及细脉状黄铁矿化的绢英岩内。地表露头

及不同深度的地下坑道观测揭示 0m 及以上标高的中段内焦家断层核带岩石主要为碎裂岩、角砾岩和断层泥，而 0m 以下标高的中段内断层泥普遍发育面理化，且邻近断层面的岩石亦发育强烈的面理化，面理由绢云母、石英、绿泥石、绿帘石等蚀变矿物组成（图 3b）。

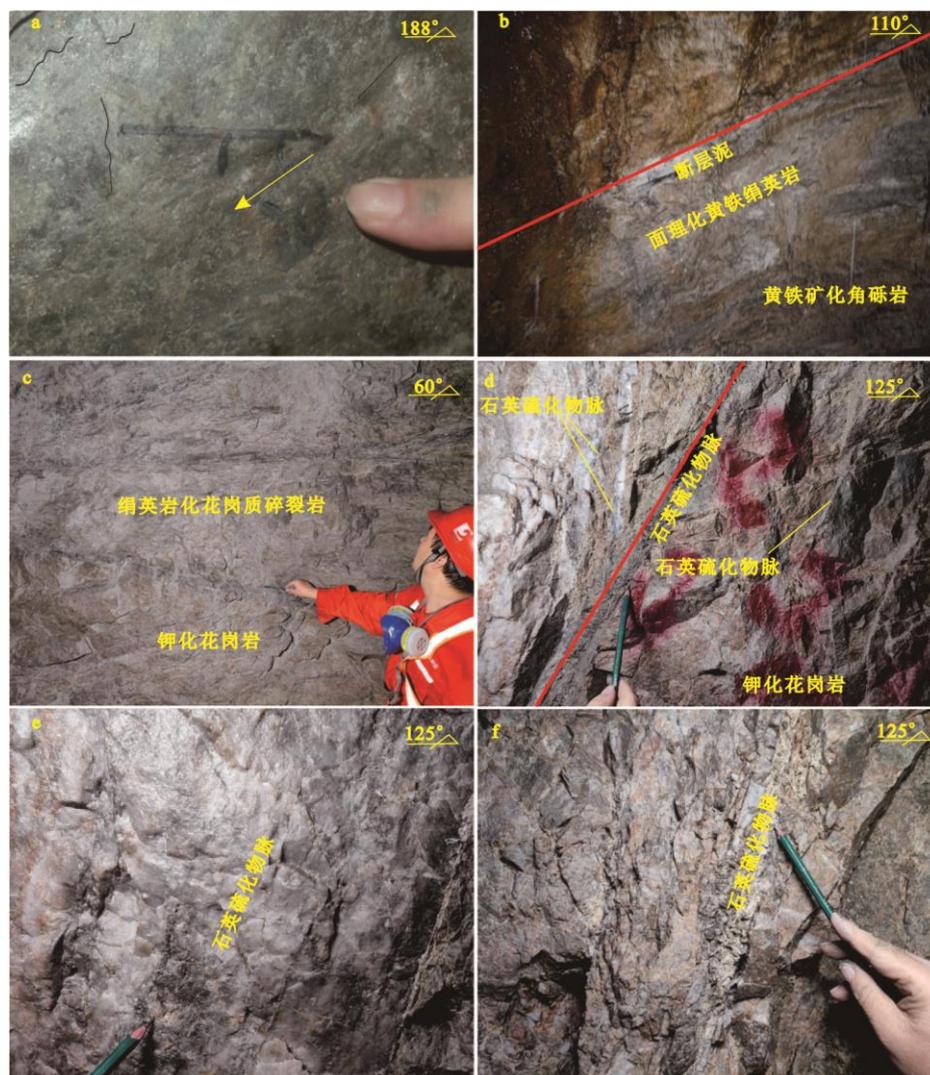


图3 金矿床地下坑道内揭露的焦家断裂带照片

a. 新城金矿床内焦家主断层面上发育的指向为顶部向左下的擦痕，侧伏角为与方位北呈 30°；b. 焦家金矿床内面理化断层泥和碎裂岩及角砾岩组成的断层核；c. 焦家金矿床内邻近断层核的绢英岩化碎裂岩；d. 焦家金矿床钾化花岗岩内发育的北北东向陡倾断裂内及其上下盘伴生的陡倾石英硫化物脉；e. 寺庄金矿床北北东向陡倾断裂内发育的薄层状剪性石英硫化物脉；f. 寺庄金矿床北北东向陡倾断裂上下盘伴生的张性和张剪性石英硫化物脉

Fig. 3 Underground photographs of the Jiaojia fault zone exposed in gold deposits

a. Slickensides with top-to-left-down sense developed on the Jiaojia main fault, having a pitch angle of 30° with the north in Xincheng gold deposit; b. Fault core composed of foliated fault gouge, cataclasite, and breccia in Jiaojia gold deposit; c. Sericitized cataclasite adjacent to the fault core in Jiaojia gold deposit; d. Steeply dipping NNE-trending faults developed in the potassic granite, and the associated steeply dipping quartz-sulfide veins in the hanging wall and footwall in Jiaojia gold deposit; e. Laminated shear quartz-sulfide veins within the steeply dipping NNE-trending faults in Sizhuang gold deposit; f. Extensional and extensional-shear quartz-sulfide veins within the hanging walls and footwalls of the steeply dipping NNE-trending faults in Sizhuang gold deposit

相比之下，由断层核带向外，破碎带及远离断裂带的岩石应变和热液蚀变逐渐变弱，岩性依次为绢英岩化花岗岩、钾化花岗岩和新鲜的黑云母花岗岩（图 3c、d），金矿化主要集

中在绢英岩化花岗岩和钾化花岗岩内一系列北北东向和东北东向陡倾的断裂内及其上下盘伴生的石英硫化物脉内（图 3d）。这些含矿断裂一般规模较小，其走向上长约 0.2-0.5km，很少超过 1km，内通常发育 0.1-0.5m 厚（很少超过 1m）的块状、薄层状的剪性石英硫化物脉（图 3e），而在上下盘伴生一系列厚约 0.01-0.1m（很少超过 0.5m）、走向长约 5-50m（最长可达 200m）的张性和张剪性石英硫化物脉（图 3f），指示金矿化可能形成于较低差应力的构造环境中（Sibson, 2001）。这些张性和张剪性石英硫化物脉产状变化很大，走向主要为 0-45°（平均 17°），倾角较陡，主要为 50-80°（平均 55°），应力场反演揭示其形成于一倾斜的区域应力场中， $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  的方位分别为 212-21°、326-47°和 106-36°，流体压力远大于  $\sigma_2$  和  $\sigma_3$  的大小，接近于  $\sigma_1$  的大小（Wang et al., 2022）。

焦家断裂带内的蚀变矿物组合及流体包裹体数据指示构造变形和金成矿发生的温度接近 300°C，流体压力为 80-210MPa，形成于约地壳的 10-13km 深度范围（Wang et al., 2015），这与前已述及的 0m 以下标高的中段内焦家断裂带发育面理化的岩石是一致的；根据 Sibson（2001）提出的断裂带岩石垂向演化序列，目前焦家金矿田内的 0m 标高相当于 10km 的成矿深度。此外，近水平和近垂直的张性石英脉在破碎带内均广泛发育，指示构造变形过程中，成矿流体压力往复循环波动于  $\sigma_2$  和  $\sigma_3$  的大小之间，多次处于超静岩压力状态（Wang et al., 2022）。相比之下，张性含矿石英硫化物脉在断裂带南端的寺庄金矿床内非常发育（图 4a、b），脉体间距为 10-15cm，规模较大，通常厚度大于 5cm，走向长度大于 20m（图 4c、d）；

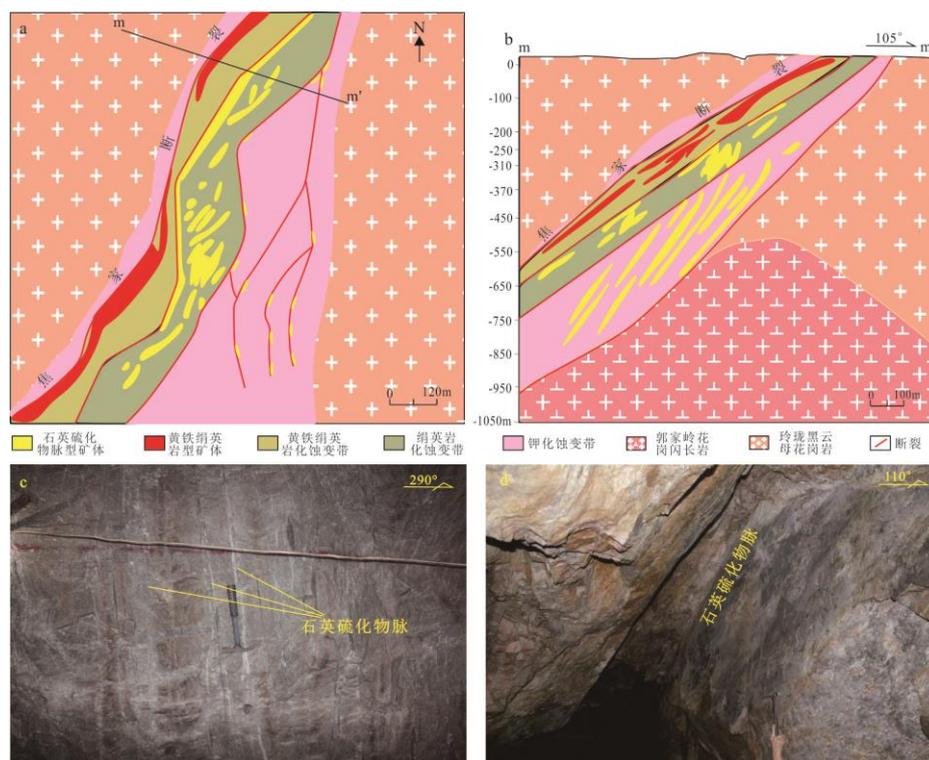


图4 寺庄金矿床构造-蚀变-矿化特征

a. 寺庄金矿床地质图和 b. 寺庄金矿床典型矿体剖面图（据 Wang et al., 2022 改）；c、d. 张性含矿石英硫化物脉

Fig. 4 Structure-alteration-mineralization characteristics of the Sizhuang gold deposit

a. Geologic map of Sizhuang gold deposit and b. Typical cross-section of the ore body in the Sizhuang gold deposit (modified from Wang et al., 2022); c and d. Field view of the extensional ore-bearing quartz sulfide vein

而在寺庄金矿床以北逐渐不太发育，例如在焦家金矿床的破碎带内主要发育一系列北北东向的剪性石英硫化物细脉（图 5a-d），而张性石英脉仅发育在次级含矿断裂的末端，规模较小

(图 5e)；再向北，在新城金矿床内石英脉不太发育(图 6a、b)，仅在远离断裂带的钾化花岗岩内发育少量北北东和北东向的中陡倾角的张性石英脉(图 6c)。此外，寺庄金矿床内热液蚀变最发育，绢英岩化蚀变带最宽可达 200m(图 4a)，而在北端的新城金矿床内，绢英岩化蚀变带最窄时仅有 20m(图 6a)。高的流体通量与近静岩的孔隙流体压力是驱动含矿断裂和张性破裂生长的主要因素(Cox and Ruming, 2004)。因此，寺庄金矿床是高流体通量汇聚区域，孔隙流体压力较大。

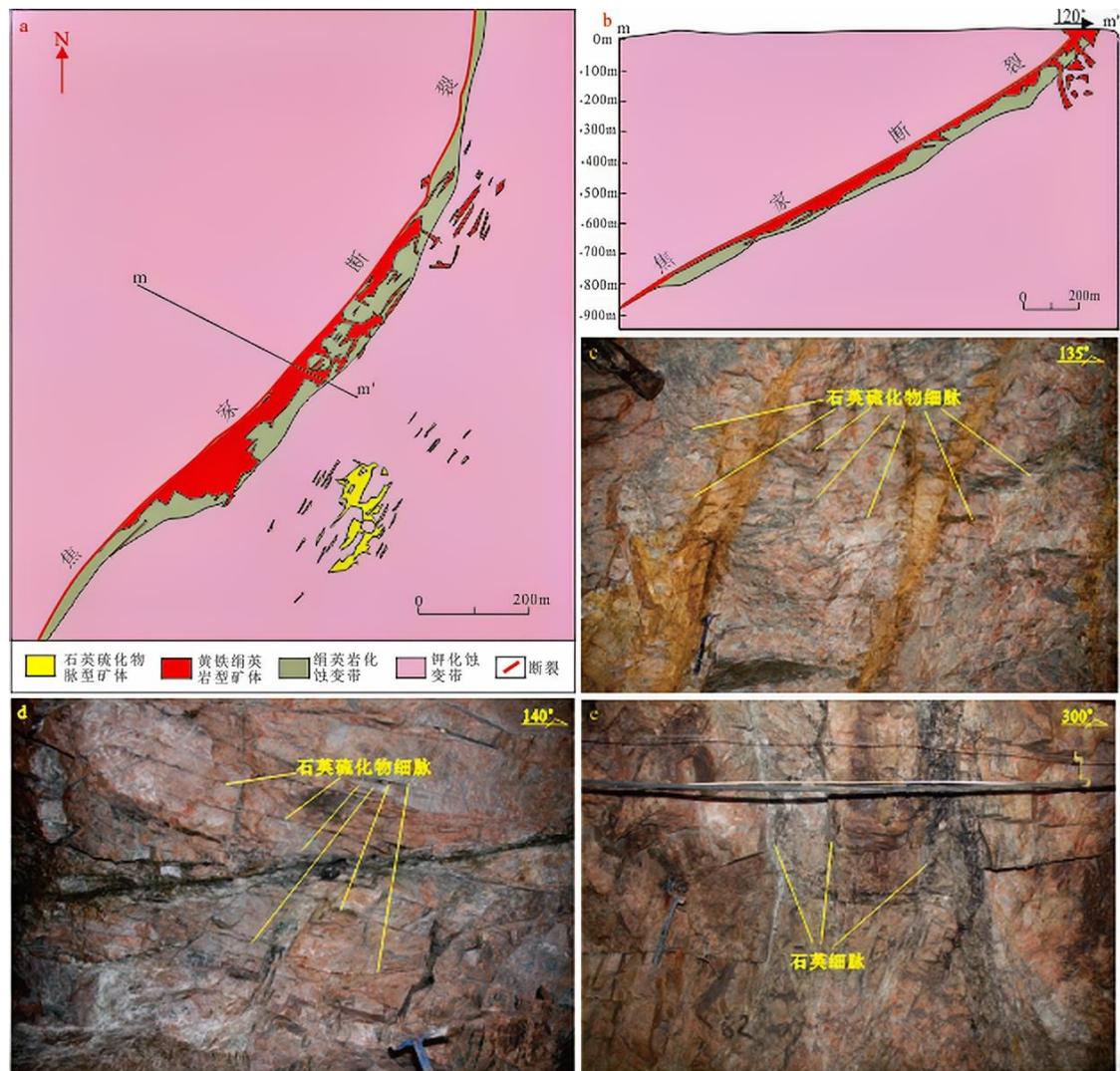


图5 焦家金矿床构造-蚀变-矿化特征

- a. 焦家金矿床地质图；b. 焦家金矿床控矿断裂和矿体的典型剖面图；c、d. 钾化花岗岩内一系列北北东向剪性石英硫化物细脉；  
e. 次级含矿断裂末端发育的张性石英脉

Fig. 5 Structure-alteration-mineralization characteristics of the Jiaojia gold deposit

- a. Geologic map of Jiaojia gold deposit; b. Typical cross-section of the ore body and fault zone in the Jiaojia gold deposit; c and d. Field view of series of NNE-trending shear quartz sulfide thin veins within potassic granite; e. Extensional quartz veins developed at the tip of secondary ore-bearing faults

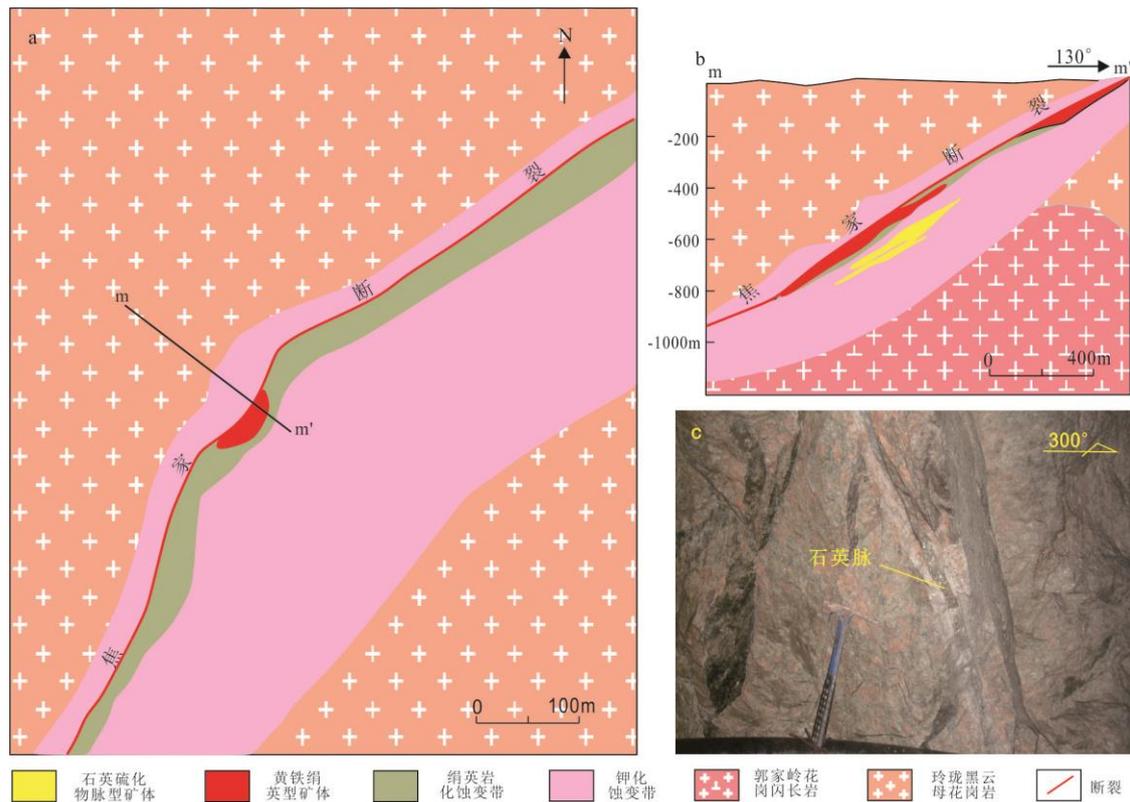


图6 新城金矿床构造-蚀变-矿化特征

a. 新城金矿床地质图和 b. 新城金矿床典型矿体剖面图 (据 Wang et al., 2015 改); c. 陡倾的张性石英脉

Fig. 6 Structure-alteration-mineralization characteristics of the Xincheng gold deposit

a. Geologic map of Xincheng gold deposit and b. Typical cross-section of the ore body in the Xincheng gold deposit (modified from Wang et al., 2015); c. Field view of steeply dipping extensional quartz vein

### 3 断裂再活化过程中的库仑破裂应力及对热液活动的控制

长期活动的断裂控制的热液系统最有可能发育在主震后断裂再活化引起的多次反复发生余震活动的区域内 (Cox and Ruming, 2004); 而余震通常不均匀集中分布在主震破裂周围某些特定区域 (Yeats et al., 1997)。是否能形成大规模的余震断裂主要取决于主震破裂是否保持在特定的位置停止 (即特征地震多次反复的在断裂的几何不规则处如断层弯曲或断层桥处停止)。因此, 如果高位移断裂或剪切带上的主震反复多次的在一个长期存在的阻止破裂传播的障碍 (如断层桥或大的断层弯曲) 处停止, 将最可能形成长期活动的断裂控制的热液系统。

主震破裂会暂时降低发生滑动的断裂段上的平均剪应力值, 同时也会导致同震滑动断裂段周围区域的应力状态发生变化。在主震引起的应力变化导致剪切强度  $\tau_s$  等于施加的剪切应力  $\tau$  的区域, 余震断裂滑动就会发生 (图 7a、b); 不过这些应力变化可使潜在在发生余震断裂活动区域的应力状态更接近或更远岩石破裂 (图 7)。潜在的特定方位的断层面上的剪切应力  $\tau$  与剪切强度  $\tau_s$  差值被称作库仑破裂应力 (CFS), 因此, 可以通过参数 CFS 来衡量由于主震断裂活动导致发生潜在余震破裂的断层面上的应力状态与断层破裂所需应力状态的接近程度。

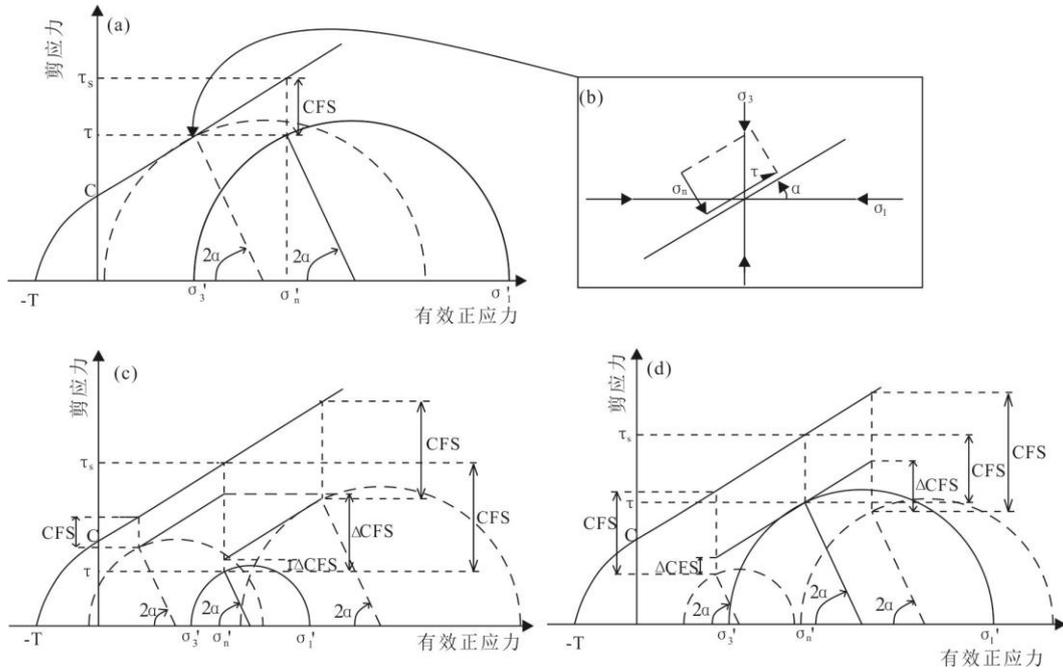


图7 摩尔-库仑破裂图解（据Cox and Ruming, 2004改）

a. 莫尔图，对于给定的有效最大主应力  $\sigma'_1$  和最小主应力  $\sigma'_3$ ，当库仑破裂应力（CFS）即剪应力  $\tau$  与抗剪强度  $\tau_s$  的差值为零时，莫尔圆（图中的实线圆）与破裂包络线相切，此时破裂发生；若库仑破裂应力（CFS）为负（图中虚线圆所示），则破裂不发生；  
 b. 与最大主应力（ $\sigma_1$ ）呈  $\alpha$  角的最优取向破裂面上的剪应力（ $\tau$ ）与正应力（ $\sigma_n$ ），其数值可通过图 a 中的莫尔图推导出；  
 c. 主破裂发生后，库仑破裂应力（CFS）发生正向变化（ $\Delta CFS > 0$ ）的与最大主应力（ $\sigma_1$ ）呈  $\alpha$  角（最优取向）的更接近破裂状态的潜在余震断裂面（图中虚线圆所示）；  
 d. 主破裂发生后，库仑破裂应力（CFS）发生负向变化（ $\Delta CFS < 0$ ）的与最大主应力（ $\sigma_1$ ）呈  $\alpha$  角（最优取向）的远离破裂状态的潜在余震断裂面（图中虚线圆所示）。注：T 为岩石抗拉强度，C 为粘结强度； $\sigma'_1$  和  $\sigma'_3$  分别为有效最大主应力和有效最小主应力， $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  分别为最大主应力和最小主应力。 $\Delta CFS$ （图 c 和图 d）代表库仑破裂应力变化量，是主震后应力状态对应的库仑破裂应力 CFS（虚线圆所示）与主震前应力状态对应的库仑破裂应力 CFS（实线圆所示）的差值

Fig. 7 Mohr-Coulomb failure diagram (modified from Cox and Ruming, 2004)

a. Mohr diagram showing whether failure occurs (solid line circle) or not (dashed line circle), depends on the Coulomb failure stress (CFS), i.e. the difference between the shear stress  $\tau$  and the shear strength  $\tau_s$  for given  $\sigma'_1$  and  $\sigma'_3$ . When the CFS is zero i.e. the Mohr circle touches the failure envelope (solid line circle), the failure occurs; whereas the failure does not occur if the CFS is negative indicated by the dashed line circle; b. Example of the shear stress  $\tau$  and the effective normal  $\sigma'_n$  on an optimally-oriented failure plane inclined at angle  $\alpha$  to  $\sigma_1$ , the values of which can be derived from the Mohr diagram (a); c. Example of positive changes in the Coulomb failure stress ( $\Delta CFS$ ) on a potentially aftershock-hosting fault, as a consequence of mainshock rupture moving the Mohr circle to the left or right, and also changing its diameter, which has moved closer to failure; d. Example of negative changes in the Coulomb failure stress ( $\Delta CFS$ ) on a potentially aftershock-hosting fault, as a consequence of mainshock rupture moving the Mohr circle to the left or right, and also changing its diameter, which has moved further away from failure. Note: T is the rock tensile strength, C is the cohesive strength,  $\sigma'_1$  and  $\sigma'_3$  are the effective maximum and minimum principal stresses, respectively,  $\sigma_1$  and  $\sigma_3$  are the maximum and minimum principal stresses, respectively. The  $\Delta CFS$  in (c) and (d) is the difference between the CFS indicated by the dashed line circle which represents stress state after the main shock and that indicated by the solid line circle which represents stress state before the main shock.

在发震地壳中，最接近断裂力学行为的库仑破裂假设是根据公式  $\tau_s = C + \mu(\sigma_n - P_f)$  来计算潜在破裂面的剪切强度（Jaeger and Cook, 1979）；其中 C 为粘结强度， $\mu$  为摩擦系数， $P_f$  为流体压力， $\sigma_n$  为断裂面上的法向正应力，是根据主应力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  的大小及断裂面与主应力

轴之间夹角的函数关系进行计算, 压应力取正值。因此, CFS 的变化值即 $\Delta CFS = \Delta\tau - \mu(\Delta\sigma_n - \Delta P_f)$ 可以指示潜在的余震断裂面上的应力状态是更接近还是更远离于破裂(图 7c、d)。其中,  $\Delta\tau$  是断裂面上的剪应力变化值,  $\Delta\sigma_n$  是正应力的变化值,  $\Delta P_f$  是孔隙流体压力变化值。假设  $\mu$  和  $C$  保持不变。

简单的弹性-摩擦力学模拟已被成功用于计算大规模、高位移断裂发生后导致的库仑破裂应力变化及其如何影响主震破裂周围的余震分布, 该方法被称作应力转移模拟, 详见 King et al. (1994)。该应力转移模拟假设了一个“未排水”的孔隙流体条件, 即共震应力变化被假设为发生得如此迅速, 以至于没有发生显著的孔隙流体迁移, 流体压力的变化是应力状态的突然变化通过孔弹性效应驱动导致的 (Rice and Cleary, 1976)。对于通常的断裂带流变性, 其假设流体压力的变化与断层法向正应力的变化成正比, 即 $\Delta P_f = B\Delta\sigma_n$ ; 其中  $B$  是斯凯姆普顿系数 (Cocco and Rice, 2002), 是根据经验确定的值, 通常在 0.4 到 0.9 之间 (King et al., 1994; Cocco and Rice, 2002)。相应的,  $\Delta CFS = \Delta\tau - \mu(\Delta\sigma_n - \Delta P_f)$  可以被改写成 $\Delta CFS = \Delta\tau - \mu' \Delta\sigma_n$ , 其中  $\mu' = \mu(1 - B)$ , 被称作视摩擦系数, 通常小于 0.75, 常用值是 0.45 (Cocco and Rice, 2002)。然而, 一些作者建议, 低的  $\mu'$  值可能表明流体压力很高, 也就是  $B$  趋近于 1 (Gross and Burgmann, 1998), 且模型结果只有在  $\mu'$  小于 0.1 时才会显著变化 (King et al., 1994)。

如果主震断裂滑动方向和震级以及主震破裂面的位置和几何学结构都已知, 潜在的各个方向的余震断裂面的  $\Delta CFS$  都可以表示为相对主震断裂的位置的函数, 通过 Coulomb 2.2.1 三维边界元软件进行模拟计算 (King et al., 1994); 其中, 模拟过程中假设地壳具有均一的弹性模量和摩擦系数。模拟计算的静应力变化模式在各个不同深度的平面图上表示为  $\Delta CFS$  分别是正值和负值的瓣状区域 (Cox and Ruming, 2004, 图 3); 其中, 视摩擦系数数值的微小变化对模型中的静应力变化模式影响不大, 但主震滑动量、滑动方向、应力场方向、差应力 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) 以及潜在余震断层的方向的变化则对其会有一定影响。通常, 在库仑破裂应力的变化使断层上的应力状态更接近破裂 (即正  $\Delta CFS$ ) 的区域, 会发生更多的余震活动, 而在主震引起的断层应力变化使应力状态远离破裂 (即负  $\Delta CFS$ ) 的区域, 余震活动会大大减少。

## 4 焦家断裂带应力转移模拟

### 4.1 地质模型设置

前已述及, 由于破裂终止位置是控制同震主断裂导致的静应力变化和余震活动分布的关键因素, 因此利用应力转移模拟进行有效的预测需要识别有利于阻止破裂多次反复终止的障碍构造的位置。基于许多地震破裂终止于断层桥处 (Sibson, 1987), 发育在新城以北的张性断层桥是沿焦家断裂系统多次反复传播的重要的破裂终止位置。因此, 我们利用库仑应力转移模拟来研究破裂终止在该位置的静应力变化, 并确定已知含矿构造的分布是否与模拟的正  $\Delta CFS$  区域匹配, 进而进行下一步的成矿预测。

赋存在焦家断裂带中的金矿床内的含矿断裂段最大长度约为 1km, 这通常是约 3-4.5 级余震形成的破裂 (Wells and Coppersmith, 1994)。这种震级的余震断裂通常是由震级为六级或以上的最大滑动位移约是 1m 的主震所驱动的。因此, 本次模拟探讨了在焦家断裂系统上, 沿着 10km 长的主断裂段发生最大位移约 1 米的主破裂所引起的静应力变化。这相当于震级为 6.0-6.5 的破裂事件 (Wells and Coppersmith, 1994)。

鉴于 Coulomb 2.2.1 模拟软件是用来计算与平面断裂段滑动相关的静应力变化, 因此将焦家断裂系统内约 10km 长的新城-后赵主破裂段根据其几何学特征模拟成 8 个倾角为 40°的

断裂段（从北东到南西分别编号为 1-8）（图 8a），其与新城-后赵段断裂带的迹线非常吻合；其中，破裂段的北东端在新城以北的断层桥处终止，南西端在后赵以南为断裂带的末端。根据前人研究，断裂面上的不同位置具有不同的位移量，其通常从最大位移处向各个方向呈线性递减至零（Walsh and Watterson, 1989），因此，在模拟过程中，邻近断层桥的北东端 2 个断裂段（编号 1-2）和邻近断裂末端的南西端 1 个断裂段（编号 8）的滑动量应为平均最大位移量的平均值，均设为 0.5m，而中间 5 个断裂段（编号 3-7）的滑动量为平均最大位移量，设为 1m。

**Coulomb 2.2.1** 数值模拟是以将地质体简化为符合弹性半空间边界元法的数学模型为基础来计算库仑破裂应力的变化，其模拟区域是以主破裂段为中心，平面上长和宽通常均为所模拟的主破裂段长度的 3 倍，以地表为上边界，深部为弹性半空间无限远边界（Cox and Ruming, 2004; Micklethwaite and Cox, 2004）。鉴于前已述及的焦家金矿田形成于约地壳的 10-13km 深度及主破裂段焦家断裂中-南段（新城-后赵断裂段）长度不超过 10km，本模拟以新城-后赵断裂段为中心，地表即 10km 成矿深度为上边界，平面上长、宽均为 30km，来模拟计算 10-13km 的成矿深度、平面面积为 30km×30km 区域内 CFS 的变化。应力变化是在 200m×200m 的网格上计算的，其中模拟过程中视摩擦系数  $\mu'$  的常用值是 0.45（Cocco and Rice, 2002），其对应于 0.75 的摩擦系数和 0.4 的斯凯姆普顿系数（**B**）。模拟的最大主应力呈北东-南西向，与根据张性脉体的几何学所反演获得的主应力方位（ $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  的方位分别为 212–21°、326–47°和 106–36°；Wang et al., 2022）一致。根据玲珑黑云母花岗岩岩石物性，其泊松比为 0.25±0.02（Xie et al., 2020），本模拟将其设定为 0.25；弹性模量通常为 4.5–5.8×10<sup>4</sup>MPa（Zhang et al., 2022），考虑断裂构造活动的影响，模拟过程中取弹性模量为 5×10<sup>4</sup>MPa。

## 4.2 模拟结果

主震活动期间的弹性应变释放和应力再分布可暂时改变主断裂周围震后主应力的大小和方向，致使余震活动中形成各种最优走向的与主震断裂几何形状和滑动方向不同的断裂；如伴随圣安德烈斯右行主震断裂活动形成了逆冲、正断、左行和右行断裂（Beroza and Zoback, 1993）。因此，本研究分别对焦家主断裂带发生右行走滑主震活动可能导致形成的最优走向的逆、走滑和正断裂进行了模拟，模拟结果详述如下。

图 8b-d 为 10km 成矿深度平面上最优走向的逆、走滑和正断裂的静应力变化模拟结果。该深度大致对应于目前焦家金矿田出露的构造层次。根据成矿期区域主应力方位，该模拟区域中最优的逆余震断裂呈东北东向展布、中陡倾角、倾向南南东或呈北北东向展布、缓倾角、倾向东南东；正余震断裂走向北北东向、陡倾角、倾向西北西或走向北北西向、缓倾角、倾向西南西；走滑余震断裂发生在中等倾角的北东向、北西倾左行断层或陡倾角的北北西、西南西倾向右行断层上。

模拟结果表明，对于最优走向的逆、走滑和正断裂，其最大静应力变化均为 0.5MPa；可是逆断裂具有明显不同于走滑断裂和正断裂的 $\Delta$ CFS 分布模式。其中，在焦家主断裂面下盘，逆断裂的正 $\Delta$ CFS 呈明显的间断性分布，自北东向南西仅在新城、红布、焦家和寺庄有较小范围的分布；而对于走滑和正断裂，其正 $\Delta$ CFS 除了在村东和后赵有局部的间断之外，总体沿着主破裂面呈连续分布。此外，在焦家主断裂面上盘，尽管该三种类型断裂的正 $\Delta$ CFS 自北东向南西沿着主破裂面总体均呈连续性分布，但是逆断裂的正 $\Delta$ CFS 具有明显不规则形态，其以焦家为界，向北东和南西方向上在焦家到红布和焦家到寺庄分别有一个呈近东西向展布长约 5km、宽约 2km 瓣状区域。综上所述，该三种类型断裂的正 $\Delta$ CFS 总体展布与焦家主破裂面走向一致，局部不规则形态主要发生在断层弯曲部位，其对应着 $\Delta$ CFS 最大值或最

小值。

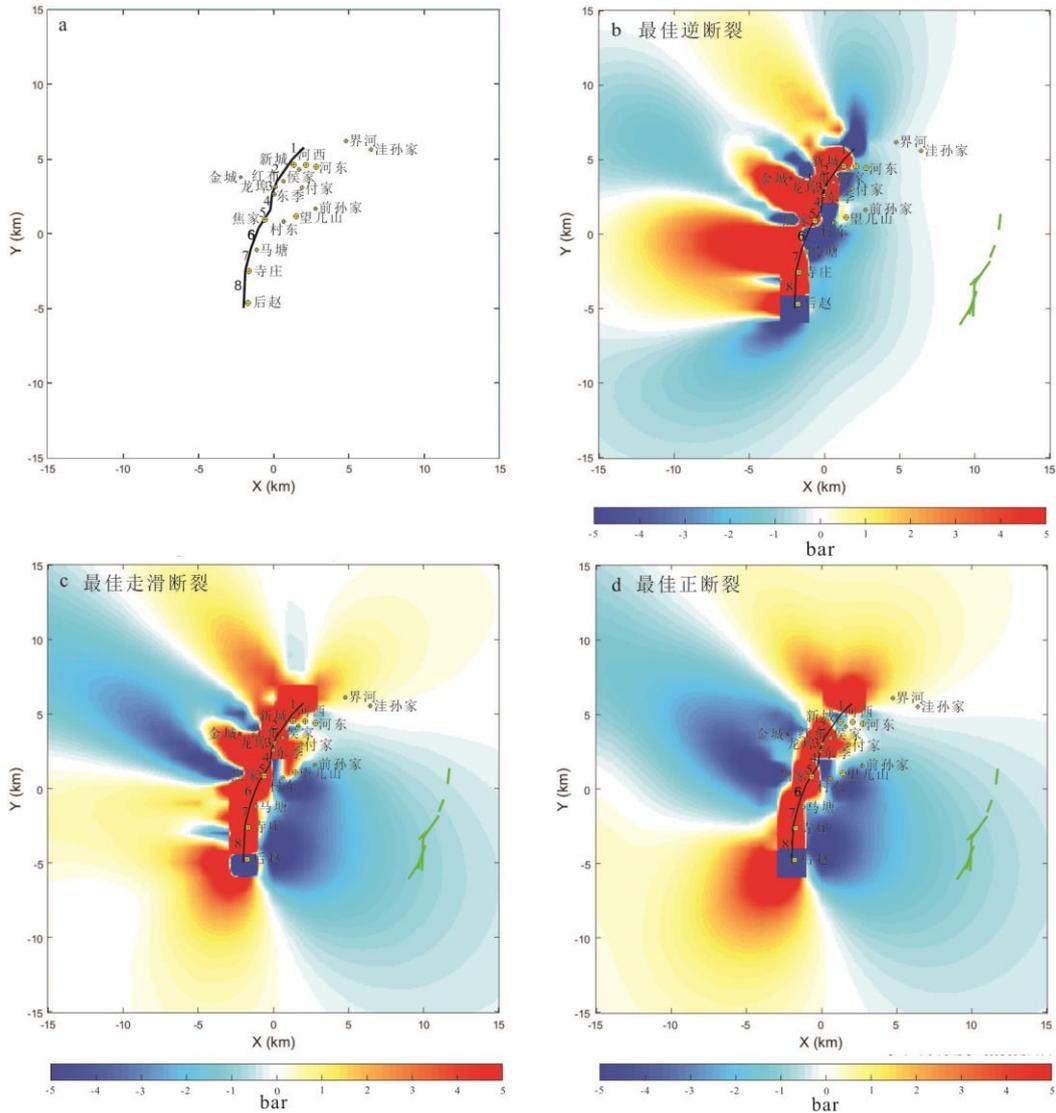


图8 焦家断裂带应力转移模拟图

- a. 焦家断裂带地质模型图，用以说明根据 Coulomb 2.2.1 软件进行三维有限元模拟的地质范围，内显示了模拟的破裂面位置及焦家金矿田内主要金矿床的分布。模拟的焦家断裂带破裂面以黑色线条标示，各个断裂段自北东到南西以编号 1-8 标注，其终止与北东的新城断裂桥。模拟过程中的最大主应力方位为北东-南西向，其主要应力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  的方位分别为  $212^\circ-21^\circ$ 、 $326^\circ-47^\circ$ 、 $106^\circ-36^\circ$ 。矿床形成深度处的差应力为 5MPa，视摩擦系数为 0.45；b. 焦家断裂周围最优取向逆冲断层的库仑破裂应力变化分布图；c. 最优取向走滑断层的库仑破裂应力变化分布图；d. 最优取向正断层的库仑破裂应力变化分布图

Fig. 8 Stress transfer modeling of the Jiaojia fault zone

- a. Geological model map for the Jiaojia fault showing the area covered by 3-D finite element modelling using Coulomb 2.2.1. Position of the modelled rupture surface on the Jiaojia fault zone is indicated, together with the location of some major gold deposits in the Jiaojia goldfield. The modelled rupture surface on the Jiaojia fault has its north-eastern termination at the Xincheng fault bridge and is indicated by the black line. Fault segment numbers (1-8) are indicated. Modelling is performed with an NE-SW maximum principal stress with the  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  and  $\sigma_3$  of  $212-21^\circ$ ,  $326-47^\circ$  and  $106-36^\circ$ , respectively. The stress difference at the depth of deposit formation is set at 5 MPa. Apparent friction is 0.45; b. Distribution of Coulomb failure stress change around the Jiaojia fault system for optimally-oriented thrust faults; c. Distribution of Coulomb failure stress change for optimally-oriented strike-slip faults; d. Distribution of Coulomb failure stress change for optimally-oriented normal faults

从图 9 不同成矿深度平面上最优走向的逆断裂静应力变化模拟结果可以看出，由浅部（10km）到深部（13km）其 $\Delta CFS$  具有相似的形态，不过其空间分布位置总体向焦家主破裂面下盘迁移，与主破裂面走向一致的呈北北东向展布的正 $\Delta CFS$  的宽度范围逐渐增大，其中下盘正 $\Delta CFS$  区域从 11km 成矿深度开始及以深逐渐明显大于上盘。

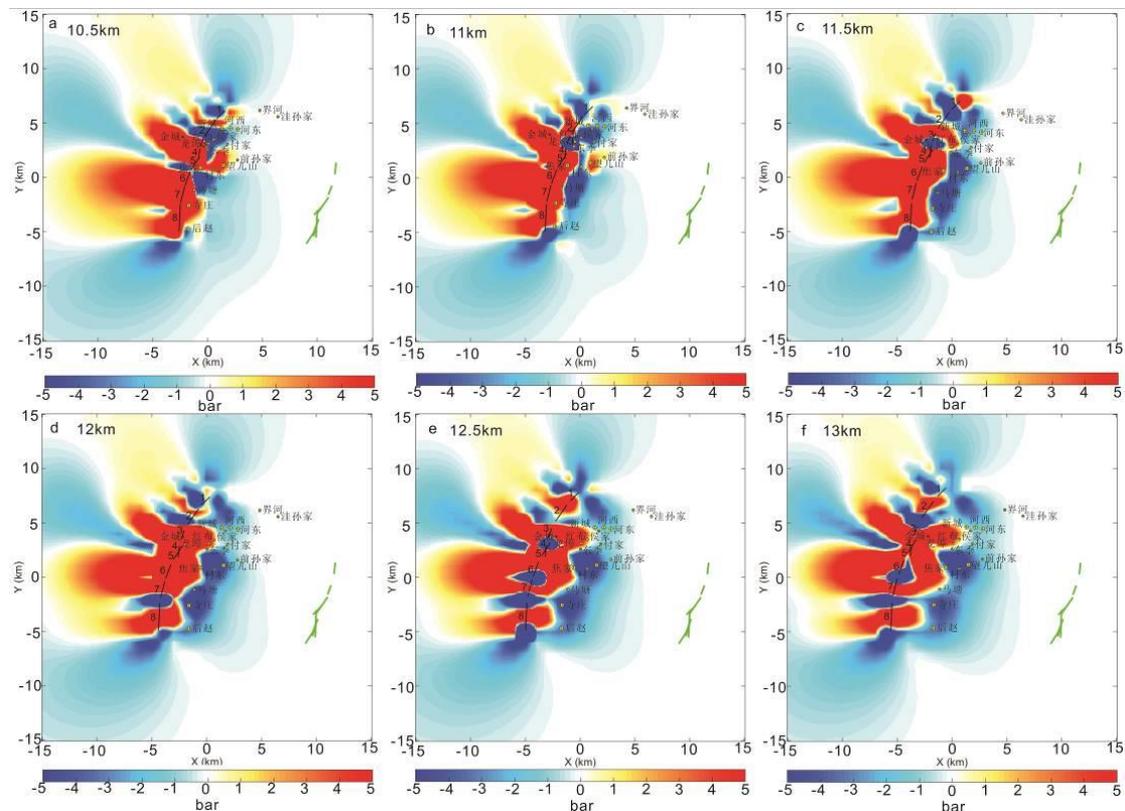


图9 焦家断裂周围不同成矿深度最优取向逆冲断层的库仑破裂应力变化分布图

Fig. 9 Distribution of Coulomb failure stress change at different ore-forming depths around the Jiaojia fault system for optimally-oriented thrust faults

从图 10 和图 11 不同成矿深度平面上最优走向的走滑和正断裂静应力变化模拟结果可以看出，走滑和正断裂的 $\Delta CFS$  由浅部（10km）到深部（13km）亦均具有相似的形态，然而与逆断裂不同的是，其空间分布位置除了总体向焦家主破裂面下盘迁移外，还沿着主破裂面走向向北北东方向迁移，正 $\Delta CFS$  的面积范围在 11km 成矿深度最小，在 11km 以浅及以深具增大的趋势；其中下盘正 $\Delta CFS$  区域从 10.5km 成矿深度开始及以深逐渐明显大于上盘。

值得注意的是，与逆断裂明显不同是，从浅部（10km）到深部（13km），对于走滑和正断裂，在焦家主破裂的末端即后赵以南均存在一个直径为 3-5km 的近似圆形的正 $\Delta CFS$  区域，其在浅部（10km）与后赵以北的正 $\Delta CFS$  区域局部相连，在 11km 及以深与后赵以北的正 $\Delta CFS$  区域完全分离（图 10 和图 11）。此外，后赵以南的正 $\Delta CFS$  面积在 10km 和 11km 成矿深度相对较小，在 11.5-12km 成矿深度明显增大，而在 12.5km 及以深具减小的趋势（图 10 和图 11）。

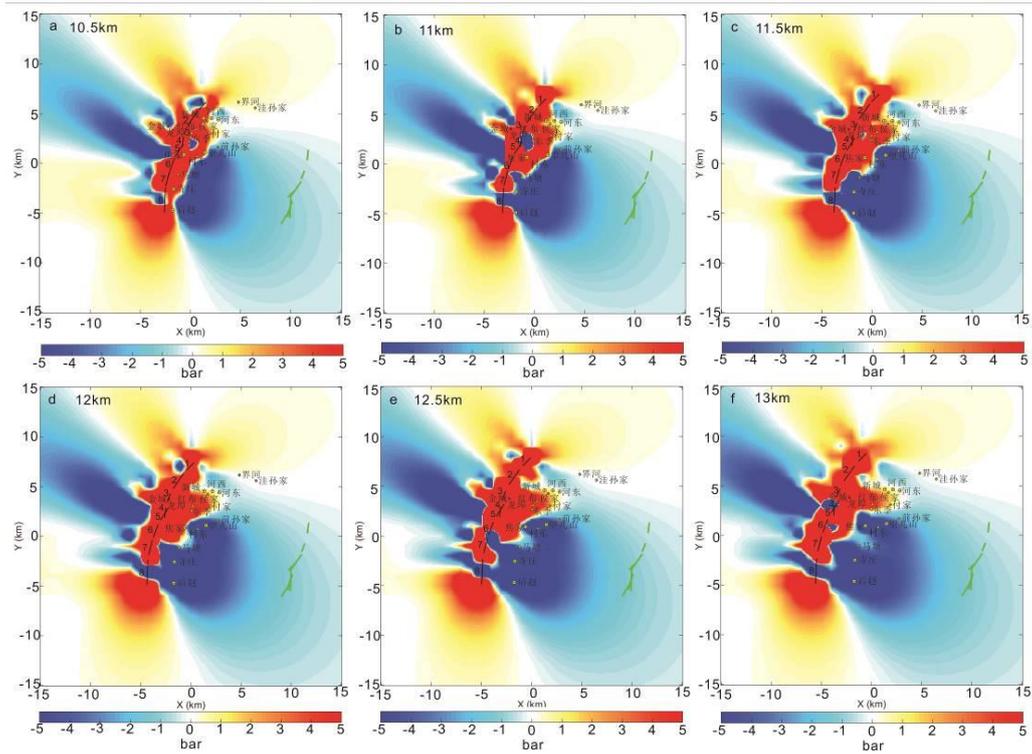


图10 焦家断裂周围不同成矿深度最优取向走滑断层的库仑破裂应力变化分布图

Fig. 10 Distribution of Coulomb failure stress change at different ore-forming depths around the Jiaojia fault system for optimally-oriented strike-slip faults

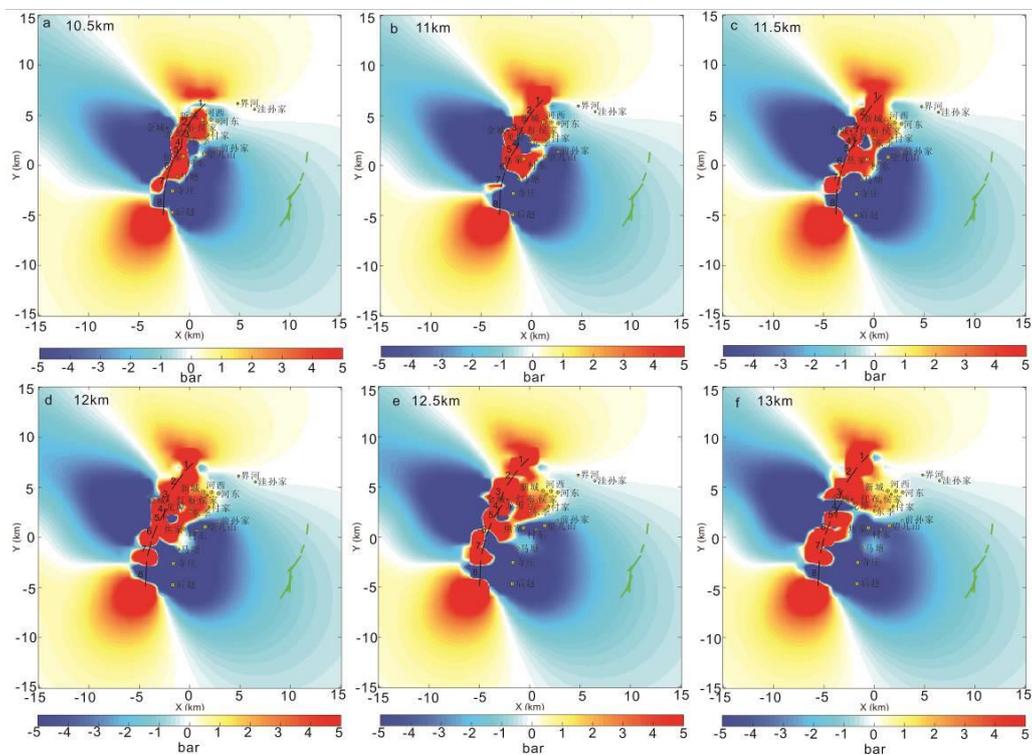


图11 焦家断裂周围不同成矿深度最优取向正断层的库仑破裂应力变化分布图

Fig. 11 Distribution of Coulomb failure stress change at different ore-forming depths around the Jiaojia fault system for optimally-oriented normal faults

## 5 讨论

### 5.1 $\Delta$ CFS 与金矿床的空间分布

前已述及,应力转移模拟是用来计算反复多次在特定位置终止的大规模、高位移断裂发生主震活动后所导致的库仑破裂应力变化,正确识别阻止主震破裂终止的障碍构造如断层弯曲或断层桥的位置,从而建立具有合理的断裂分段的几何学模型,是利用应力转移模拟有效预测余震断裂和金矿床分布的关键(Cox and Ruming, 2004)。已有的应力转移模拟研究表明,模拟过程中所设置的岩石力学参数(泊松比和弹性模量)、视摩擦系数、断裂滑动量、区域主应力方向和差应力大小等参数仅会改变正 $\Delta$ CFS 和负 $\Delta$ CFS 值及正 $\Delta$ CFS 和负 $\Delta$ CFS 分布面积的大小,而断裂几何形态的正确分段与否将会彻底改变 $\Delta$ CFS 的分布模式(Cox and Ruming, 2004)。正 $\Delta$ CFS 通常是余震断裂活动和金矿床形成的最可能区域,断裂带内及其周围已知金矿床的分布是否与应力转移模拟所获得正 $\Delta$ CFS 吻合或者基本吻合可以用来检验断裂几何学模型是否正确(Cox and Ruming, 2004)。

王偲瑞等(2016)对焦家断裂带进行了应力转移模拟,获得的正 $\Delta$ CFS 在断裂两端呈玫瑰花瓣状分布,大面积的负 $\Delta$ CFS 沿焦家主断裂面分布(王偲瑞等, 2016 中图 6a),这与本研究所获得的正 $\Delta$ CFS 沿焦家主断裂面呈带状或串珠状分布(图 8)及断裂带内已知金矿床近等间距分布在中-南段的新城-后赵主断裂段内完全不一致(图 2a)。实际上,王偲瑞等(2016)已经认识到了这一点,其将已探明金金属量>200 吨的特大型新城金矿床与模拟获得的正 $\Delta$ CFS 区域不一致解释为模拟过程中焦家断裂带的具体断裂分段划分出现了问题(王偲瑞等, 2016 中 2502 页)。遗憾的是,由于其将呈玫瑰花瓣状分布在焦家断裂南端主断裂面上盘的正 $\Delta$ CFS 误认为与已知金矿床(如东季、焦家、马塘、寺庄)的空间分布一致而得出“一定程度上应力转移模拟所得到的图像能够与事实相吻合(王偲瑞等, 2016 中 2502 页)”这一错误结论——这些金矿床内的金矿体基本上完全位于焦家主断裂面下盘,王偲瑞等(2016)将不同深度标高的焦家主断面下盘矿体的水平投影误认为发育在断裂面上盘的矿体——一致使其即使认识到分段划分出了问题,但并未从根本上修改几何模型。

在断裂系统中,金矿床通常被视为高流体通量汇聚区域的标志,其流体的大量迁移最可能发生在主断裂活动期间及其之后。在断裂系统尺度上,基于断裂带结构的模型通常将断层桥和断层弯曲识别为主断裂活动期间及其之后渗透率的一级控制因素(Sibson, 2001)。然而,对于焦家断裂带,尽管在新城以北的断层桥内确实发育了一些石英脉和硅化绢英岩化角砾岩带,至今为止却未在其内发现金矿床,仅在断层桥以北的主断裂内赋存有小涝洼、大涝洼金矿化点(图 1b 和图 2a),这与该区域内的 $\Delta$ CFS 呈负值分布(对于最优逆断裂)和弱的正值或零分布(对于最优走滑和正断裂)是一致的(图 8-11)。

如前文所述,目前已发现的金矿床以约 2km 间距主要分布于焦家断裂中-南段长度不超过 10km 的新城-后赵段的焦家金矿田内(图 2a),这与本文所模拟的焦家断裂带 10km 成矿深度的应力转移结果显示的焦家主断裂面下盘的正 $\Delta$ CFS 受断层弯曲部位影响导致其沿着主破裂面呈明显的间断性分布(对于最优逆断裂,间距约 2km)和具明显的膨缩形态(对于最优走滑和正断裂,膨大部分间距约 2km)是一致的;其中已知的金矿床均位于 $\Delta$ CFS 为 0.15-0.5MPa 的分布区域内(图 8-11)。可见,焦家断裂带内的断层弯曲部位是反复多次阻止破裂传播的几何障碍,为焦家主断裂活动期间及其之后渗透率的一级控制因素,从而导致形成了长期活动的断层控制的热液系统。

此外,不同成矿深度平面上最优走向的逆、走滑和正断裂静应力变化模拟结果显示焦家主破裂面下盘的正 $\Delta$ CFS 区域从 10.5km 到 12km 成矿深度逐渐在长度方向上连为一体,这与

已有大量深部钻探揭示的焦家断裂带内矿体东在深部连为一体的事实是一致的（图 2b）。

综上所述，应力转移模拟所获得的焦家断裂带内的正 $\Delta$ CFS 受断裂带内的断层弯曲部位控制，其中 $\Delta$ CFS 为 0.15-0.5MPa 的区域与焦家断裂带内的金矿床具有极大的相关性。

## 5.2 成矿预测及靶区验证

鉴于焦家断裂带内的金矿床与应力转移模拟所获得的正 $\Delta$ CFS 二者的空间分布具有极大的相关性，我们可以根据最大的正 $\Delta$ CFS 区域进行成矿靶区预测。但是需要注意的是，最大的正 $\Delta$ CFS 区域只是潜在的最可能发生余震断裂活动的区域，尤其是对于形成中温脉状金矿床的高流体通量热液系统，余震构造的分布还受到主破裂周围的流体再分配导致的流体压力变化的调节（Cocco and Rice, 2002）。因此，在中温热液金成矿系统中，流体沿滑动的断层段的侵入导致的主震后流体压力变化和主震引起的应力再分布共同控制了余震活动、流体流动及金矿化的群聚性分布（Cox and Ruming, 2004）。

前已述及，焦家断裂带应力转移模拟结果表明，对于最优走向的逆、走滑和正断裂，其最大的正 $\Delta$ CFS 在焦家主断裂面的上盘和下盘均有分布，且在 10km 的成矿深度其在上盘的分布面积大于下盘的，可是目前已有的钻探和坑道工程均揭示焦家断裂带内赋存的矿体主要发育在焦家主断裂下盘，仅在马塘金矿床的北翼和焦家金矿床的南翼及北翼的局部在焦家主断裂上盘有金矿体发育，这与 Cox and Ruming（2004）通过应力转移模拟研究所揭示的主震引起的应力再分布和主震后流体重新分布导致的流体压力变化共同控制了澳大利亚圣艾夫斯金矿集区含矿断裂网络的发育这一现象吻合。

焦家主断裂为一倾角缓至中等（20°-50°）的倾斜断裂，因此类似于其它通常发育不对称应变模式的倾斜断裂带（Berg and Skar, 2005），已有勘探工程揭示蚀变破碎带在焦家主断裂上、下盘单侧或不对称发育（图 3），这与本文应力转移模拟所揭示的最大正 $\Delta$ CFS 沿着焦家主破裂面在其上、下盘呈明显的间断性分布或具明显的膨缩形态是一致的（图 8-11）。由于在中温脉状金成矿系统内，断裂是作为利于成矿流体流动的通道还是阻碍成矿流体流动的屏障取决于其相对于周围岩石渗透率的高低（Sibson, 2001），因此在焦家主断裂面上、下盘均发育最大正 $\Delta$ CFS 的区域，缓倾的焦家断裂相当于一密封的盖子阻碍成矿流体向上盘运移，利于成矿流体在下盘集中从而流体压力增大，导致余震活动、流体流动及金矿化发生；而在正 $\Delta$ CFS 仅分布在焦家主断裂上盘或下盘单侧时，则通常在正 $\Delta$ CFS 区域内发育含矿断裂网络和金矿体。由此，本文认为以后在焦家断裂带已知金矿床内进行勘探时，对于应力转移模拟显示上、下盘均发育最大正 $\Delta$ CFS 的部位，勘探工程集中布置在下盘的正 $\Delta$ CFS 区域内；此外，分布在焦家主断裂上盘或下盘单侧的正 $\Delta$ CFS 区域亦是重要的勘探靶区。

值得注意的是，尽管已有多家单位在焦家断裂带南段后赵至紫罗姬家一带投入大量钻探工程并没有找到工业矿体，但本文在通过详细的地质填图并结合已有的地球物理工作查明焦家断裂带结构且确定后赵至紫罗姬家一带为焦家断裂带末端的基础上，应用应力转移模拟揭示在后赵以南确实独立存在一个直径为 3-5km 的近似圆形的正 $\Delta$ CFS 区域，且在 11.5km 至 12km 的成矿深度其正 $\Delta$ CFS 面积相对较大（图 10 和图 11）。由此，根据前文已述及的焦家断裂带内已知金矿床与 $\Delta$ CFS 为 0.15-0.5MPa 的区域具有极大的相关性并结合前人的研究认为焦家断裂南段的覆盖区深部具有较大的成矿潜力，我们提出本文应力转移模拟揭示的分布在后赵以南的直径为 3-5km 的近似圆形的 $\Delta$ CFS 为 0.15-0.5MPa 的区域为焦家断裂南段第四系广泛覆盖区内的重点勘探方向，其中 11.5km 至 12km 的成矿深度为实施勘探工程的首选地段。根据前文述及的焦家断裂带内现今的 0m 标高相当于 10km 的成矿深度，标高 1500-2000m 的深度为实施勘探工程的首选地段。

为此，我们近两年在上述区域内的标高 1500-2000m 范围先后实施 424ZK2（见主断裂

标高 1538.519m)、504ZK4 (见主断裂标高 1632.25m)、520ZK2 (见主断裂标高 1671.06m)、520ZK1 (见主断裂标高 1671.86m)、408ZK4 (见主断裂标高 1732.619m)、504ZK6 (见主断裂标高 1851.901m)、520ZK3 (见主断裂标高 1872.75m)、520ZK4 (见主断裂标高 2104.98m) 共八个钻孔 (图 12), 其中除钻孔 424ZK2 和 520ZK4 外, 其它六个钻孔均揭露了金矿体, 由赋存在焦家断裂带内的浸染状、网脉状及细脉状黄铁矿化绢英岩组成。

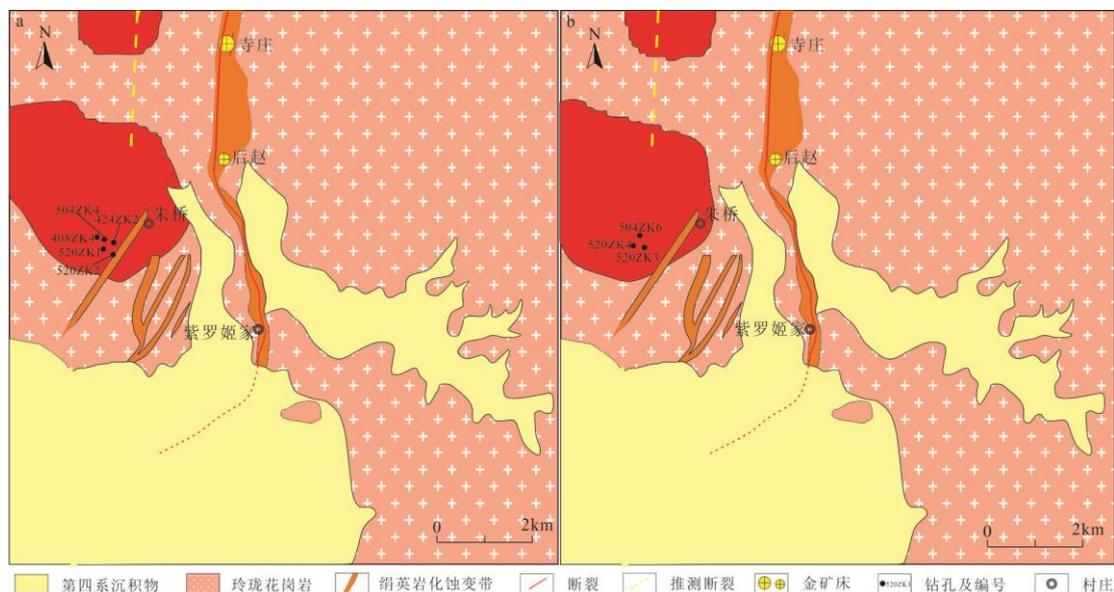


图12 焦家断裂带南段第四系覆盖区深部钻孔位置平面图

a. -1500m 标高钻孔位置。背景图为焦家断裂带南段平面地质图, 红色阴影为图 10c 中分布在后赵以南 11.5km 成矿深度的最大 + $\Delta$ CFS 区域; b. -2000m 标高钻孔位置。背景图为焦家断裂带南段平面地质图, 红色阴影为图 10d 中分布在后赵以南 12km 成矿深度的最大 + $\Delta$ CFS 区域

Fig. 12 Plan map showing the locations of deep boreholes in the Quaternary covered area of the southern segment of the Jiaojia fault zone

a. Locations for the boreholes at the -1500m level. The background is the planar geological map of the southern segment of the Jiaojia fault zone, and the red shaded area represents the largest + $\Delta$ CFS region for the ore-forming depth of 11.5 km to the south of Houzhao as shown in figure 10c; b. Locations for the boreholes at the -2000m level. The background is the planar geological map of the southern segment of the Jiaojia fault zone, and the red shaded area represents the largest + $\Delta$ CFS region for the ore-forming depth of 12 km to the south of Houzhao as shown in figure 10d

### 5.3 找矿应用

前已述及, 对于断裂带控制的金矿床, 传统的构造找矿方法是通过厘定断裂带结构的几何学和运动学, 确定断层桥的位置, 从而认为断层桥本身就是成矿靶区 (Sibson, 1987), 但是其基本上忽略了断层桥周围和其它几何障碍 (断层弯曲和断层末端) 内及周围的区域 (Cox and Ruming, 2004)。实际上, 近年来大量研究表明在主震断裂活动发生期间及其之后不久, 主震断裂和余震构造都是渗透性增强的区域。然而, 持续时间更长的流体流动最可能发生在余震构造。余震断裂活动发生在一个较长的时期内 (对于大于 6 级的主震, 其持续时间通常为几个月到几十年), 可长时间维持一个高渗透性的网络。相比之下, 虽然主震破裂在较广泛的区域内发生了岩石碎裂, 具有高的孔隙度, 但并没有长时间维持住; 且由于压实作用和破碎带产物的愈合作用, 其流体通道发生快速的自愈而迅速封闭 (Tenthorey et al., 2003)。因此, 在主震断裂活动期间发生的破裂通常导致高流体通量在余震构造带内维持较

长的时间,而相反则在主震破裂带内维持的时间较短。由此,在大型断裂系统发生地震变形过程中,最高的流体通量集中在由余震网络的位置所决定的区域,其通常是成矿的有利部位(Micklethwaite and Cox, 2004)

已有研究表明,几何障碍(断层桥、断层弯曲、断层末端)的扩容并不如邻近几何障碍所发育的余震断裂网络那么重要。这些余震断裂网络形成是因为几何障碍是地震破裂停止的区域(Wesnousky, 1988)。因此,大型断裂上发育的挤压收缩型几何障碍与扩容型几何障碍一样,都是可能导致在地壳区域内发生高流体通量的高渗透率带(Cox and Ruming, 2004)。据此,本文应力转移模拟结果所揭示的分布在焦家断裂带南段的断裂末端即后赵以南的直径为3-5km的近似圆形的正 $\Delta$ CFS区域是余震网络集中发生的区域及可持续、长时间的高流体通量汇聚的高渗透带,为成矿的有利部位,并得到了钻探验证。

相对于应力转移模拟,其它用来进行成矿预测的有限元数值模拟方法如“应力填图技术”(Holyland and Ojala, 1997)具有截然不同的理论基础,其通过低应变弹性-摩擦变形模拟揭示地壳中构造应力的空间分布,应力最大的位置是破裂和成矿最可能发生的区域。可是根据格林-库仑破裂准则(Jaeger and Cook, 1979),高应力与岩石破裂并非有直接因果关系。尤其是对于构造控制的脉状金矿床,其通常发育在主震后断裂再活化引起的多次反复发生余震活动的区域内,余震断裂发生与否取决于主震断裂引起的应力变化导致的应力状态是更接近破裂还是远离破裂(Cox and Ruming, 2004)。前已述及,长期活动的断裂控制的热液系统通常受控于断裂带分段结构,主震破裂会导致断裂分段处周围的平均应力发生骤变,致使成矿流体从平均应力升高区重新分配至平均应力降低区,从而形成高流量流体运移、汇聚和金属沉淀的场所。综上所述,本研究对华北克拉通东南缘胶东半岛内赋存在花岗岩中的构造控制的脉状金矿床的矿床成因和矿产勘查都具有特别重要的意义。已有的矿床成因模式都特别强调需要流体沿断裂流动(Deng et al., 2020),但是关于断裂通道的运输系统一直没有进行很好的约束。本研究很好的解释了造成断裂带富矿段和贫矿段之间差异的原因,其无需在矿化强弱不同的地段之间产生物理化学梯度或存在不同的流体(Eisenlohr et al., 1989)。此外,尽管本研究的模拟对象是区域尺度、高位移的大型断裂,但是大型余震活动本身亦可能导致在其破裂带周围触发小型余震,因此,通过对千米级赋矿构造开展应力转移模拟可预测其周围更小尺度的赋矿构造(Cox and Ruming, 2004),据此可见应力转移模拟在矿床尺度的矿体预测中亦具有潜在应用价值。由此提出通过正确厘定断裂带分段结构,查明断裂周围库仑破裂应力变化的空间分布来预测高渗透率区域的分布,从而预测成矿靶区,可以有效的指导构造控制的脉状金矿床的找矿工作。

## 6 结论

(1) 焦家断裂带是一区域尺度、高位移的右行走滑脆-韧性剪切带,由中-北段位于新城以北的张性断层桥、中-南段位于新城-后赵的主断裂段及南段位于后赵以南的断裂末端三部分组成;其中,中-北段的张性断层桥最可能反复地阻止了中-南段主断裂向北东方向的破裂传播。

(2) 新城以北断层桥内的库仑破裂应力变化量( $\Delta$ CFS)呈负值(对于最优逆断裂)和弱的正值或零分布(对于最优走滑和正断裂),新城-后赵段的正 $\Delta$ CFS受断裂带内的断层弯曲部位控制,最大的正 $\Delta$ CFS区域与焦家断裂带内的金矿床具有极大的相关性。

(3) 焦家断裂带内主震活动引起的正 $\Delta$ CFS和主震后流体重新分布导致的流体压力变化共同控制了余震活动、流体流动及金矿床的群聚性分布,分布在断裂末端即后赵以南近圆

形的直径为 3-5km 的 $\Delta$ CFS 为 0.15-0.5MPa 的区域是余震网络集中发生的区域及可持续、长时间高流体通量汇聚的高渗透率带，为有利的成矿部位，并得到了很好的钻探验证。

(4) 在查明区域上高位移、大型断裂的分段结构及多次反复阻止主破裂传播的障碍构造（断层桥、断层弯曲、断层末端）位置的基础上，通过应力转移模拟计算主破裂活动导致的周围库仑破裂应力的变化，预测高渗透率带的分布，从而预测成矿靶区，是在覆盖区勘查构造控制的脉状金矿床的一种有效方法。

**致谢** 在野外工作中得到了山东黄金矿业（莱州）有限公司焦家金矿和山东黄金地质勘查院的领导和地质技术人员的大力支持和帮助，在此表示感谢。

## References

- Balsamo, F., Clemenzi, L., Storti, F., et al., 2019. Tectonic control on vein attributes and deformation intensity in fault damage zones affecting Natih platform carbonates, Jabal Qusaybah, North Oman. *Journal of Structural Geology*, 122: 38-57.
- Berg, S.S., Skar, T., 2005. Controls on Damage Zone Asymmetry of a Normal Fault Zone: Outcrop Analyses of a Segment of the Moab Fault, SE Utah. *Journal of Structural Geology*, 27: 1803-1822.
- Beroza, G.C., Zoback, M.D., 1993. Mechanism Diversity of the Loma Prieta Aftershocks and Mechanisms for Mainshock-aftershock Interaction. *Science*, 259: 210-213.
- Celestino, M.A.L., Miranda, T.S., Mariano, G., et al., 2020. Fault damage zones width: Implications for the tectonic evolution of the northern border of the Araripe Basin, Brazil, NE Brazil. *Journal of Structural Geology*, 138: 104116.
- Choi, J.H., Edwards, P., Ko, K., et al., 2016. Definition and Classification of Fault Damage Zones: A Review and a New Methodological Approach. *Earth-Science Reviews*, 152: 70-87.
- Cocco, M., Rice, J.R., 2002. Pore Pressure and Poroelasticity Effects in Coulomb Stress Analysis of Earthquake Interactions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107: ESE 2-1-ESE 2-17.
- Cox, S.F., Ruming, K., 2004. The St. Ives Mesothermal Gold System, Western Australia-A Case of Golden Aftershocks? *Journal of Structural Geology*, 26: 1109-1125.
- Deng, J., Qiu, K.F., Wang, Q.F., et al., 2020. In Situ Dating of Hydrothermal Monazite and Implications on the Geodynamic Controls of Ore Formation in the Jiaodong Gold Province, Eastern China. *Economic Geology*, 115: 671-685.
- Eisenlohr, B.N., Groves, D.I., Partington, G.A., 1989. Crustal-scale Shear Zones and Their Significance to Archean Gold Mineralization in Western Australia. *Mineralium Deposita*, 24: 1-8.
- Faure, M., Lin, W., Monié, P., et al., 2004. Palaeoproterozoic Arc Magmatism and Collision in Liaodong Peninsula (north-east China). *Terra Nova*, 16: 75-80.
- Gross, S., Bürgmann, R., 1998. Rate and State of Background Stress Estimated from the Aftershocks of the 1989 Loma Prieta, California, Earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103: 4915-4927.
- He, H.Z., Li, T., Chen, J., et al., 2024. Deformation Pattern of the 23 August 1985 Wuqia Mw 6.9 Earthquake Surface Rupture (Xinjiang Province): Control from Inherited Folding-Related Structures. *Earth Science*, 49(2): 511-521 (in Chinese with English abstract).
- Holyland, P.W., Ojala, V.J., 1997. Computer-aided structural targeting in mineral exploration: two- and three-dimensional stress mapping. *Australian Journal of Earth Sciences*, 44, 421-432.
- Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., 1979. Fundamentals of Rock Mechanics (3rd ed). *London: Chapman and Hall*.

- Kerr, R.A., 2012. Is the World Tottering on the Precipice of Peak Gold? *Science*, 335: 1038-1039.
- King, G.C.P., Stein, R.S., Lin, J., 1994. Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84: 935-953.
- Kirkpatrick, J.D., Shipton, Z.K., Evans, J.P., et al., 2008. Strike-slip Fault Terminations at Seismogenic Depths: The Structure and Kinematics of the Glacier Lakes Fault, Sierra Nevada United States. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113: B04304.
- Liu, J.G., Rudnick, R.L., Walker, R.J., et al., 2015. Big Insights from Tiny Peridotites: Evidence for Persistence of Precambrian Lithosphere Beneath the Eastern North China Craton. *Tectonophysics*, 650: 104-112.
- Liu, J.L., Ji, M., Ni, J.L., et al., 2021. Inhomogeneous Thinning of a Cratonic Lithospheric Keel by Tectonic Extension: The Early Cretaceous Jiaodong Peninsula-Liaodong Peninsula Extensional Provinces, Eastern North China Craton. *Geological Society of America Bulletin*, 133: 159-176.
- Lu, H.Z., Archambault, G., Li, Y., et al., 2007. Structural Geochemistry of Gold Mineralization in the Linglong-Jiaojia District, Shandong Province, China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 26: 215-234.
- Mcgrath, G.A., 1995. Damage zone geometry around fault tips. *Journal of Structural Geology*, 17(7): 1011-1024.
- Micklethwaite, S., Cox, S.F., 2004. Fault-segment Rupture, Aftershock-zone Fluid Flow, and Mineralization. *Geology*, 32: 813-816.
- Pachell, M.A., Evans, J.P., 2002. Growth, Linkage, and Termination Processes of a 10-km-long Strike-slip Fault in Jointed Granite: The Gemini Fault Zone, Sierra Nevada, California. *Journal of Structural Geology*, 24: 1903-1924.
- Rice, J.R., Cleary, M.P., 1976. Some Basic Stress Diffusion Solutions for Fluid-saturated Elastic Porous Media with Compressible Constituents. *Reviews of Geophysics*, 14: 227-241.
- Sibson, R.H., 1987. Earthquake Rupturing as a Mineralizing Agent in Hydrothermal Systems. *Geology*, 15: 701-704.
- Sibson, R.H., 2001. Seismogenic Framework for Hydrothermal Transport and Ore Deposition. *Society of Economic Geologists Reviews*, 14: 25-50.
- Song, M.C., Deng, J., Yi, P.H., et al., 2014. The Kiloton Class Jiaojia Gold Deposit in Eastern Shandong Province and Its Genesis. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 88: 801-824.
- Tenthorey, E., Cox, S.F., Todd, H.F., 2003. Evolution of Strength Recovery and Permeability During Fluid-rock Reaction in Experimental Fault Zones. *Earth and Planetary Science Letters*, 206(1-2): 161-172.
- Walsh, J.J., Watterson, J., 1989. Displacement Gradients on Fault Surfaces. *Journal of Structural Geology*, 11(3): 307-316.
- Wang, H.J., Tian, H.J., He, C.Y., et al., 2020. An Analysis of the Effect of Multiple Geophysical Prospecting Methods in the Deep Exploration of the Jiaoxibei (northwest Shandong) Gold Ore Concentration Area. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 44(5): 1053-1058 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S.R., Yang, L.Q., Kong, P.F., 2016. Permeability Structure and Gold Deposits Cluster Mechanism Along the Jiaojia Fault, China: Structure Stress Transfer Modelling. *Acta Petrologica Sinica*, 32(8): 2494-2508 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Chen, X.F., Di, Q.Y., et al., 2025. Deep Mineral Exploration: Opportunities and Challenges in Reflection Seismics. *Earth Science*, 50(11): 4284-4299 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z.L., Tranos, M.D., Wang, X., et al., 2022. <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar Geochronology and Palaeostress Analysis Using Lamprophyre Dikes and Quartz Veins in the Sizhuang Gold Deposit: New Implications for Early Cretaceous Stress Regime in the Jiaodong Peninsula, North China Craton. *Geological Magazine*, 160: 623-644.

- Wang, Z.L., Yang, L.Q., Guo, L.N., et al., 2015. Fluid Immiscibility and Gold Deposition in the Xincheng Deposit, Jiaodong Peninsula, China: A Fluid Inclusion Study. *Ore Geology Reviews*, 65: 701-717.
- Wells, D.L., Coppersmith, K.J., 1994. New Empirical Relationships Among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84: 974-1002.
- Wesnousky, S.G., 1988. Seismological and Structural Evolution of Strike-slip Faults. *Nature*, 335(6188): 340-343.
- Xie, H.P., Li, D.Q., Zhang, L., et al., 2020. Static and dynamic elastic parameters of biotite granite from Jiaodong Peninsula. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53(8): 3457-3470.
- Yeats, R.S., Sieh, K., Allen, C.R., 1997. The Geology of Earthquakes. *New York: Oxford University Press*.
- Zhang, L., Li, H., Wang, Z., et al., 2022. Static and dynamic elastic modulus of Linglong biotite granite under different weathering degrees. *Journal of Structural Geology*, 156: 104456.
- Zhi, Y.B., Guo, R.P., Wang, R.G., et al., 2014. The Application of Integrated Geophysical Methods to the Southward Extension of the Jiaojia Faulted Zone. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 38: 1176-1180 (in Chinese with English abstract).

## 中文参考文献

- 赫洪哲,李涛,陈杰,等,2024.先存构造对 1985 年 8 月 23 日新疆乌恰 Mw6.9 地震地表破裂几何形态和变形样式的制约.地球科学,49(2):511-521.
- 王洪军,田红军,贺春艳,等,2020.多种物探方法在胶西北金矿集中区深部勘探的效果分析.物探与化探,44(5):1053-1058.
- 王偲瑞,杨立强,孔鹏飞,2016.焦家断裂渗透性结构与金矿床群聚机理:构造应力转移模拟.岩石学报,32(8):2494-2508.
- 王赧,陈晓非,底青云,等,2025.深部找矿:金属矿地震技术的机遇与挑战.地球科学,50(11):4284-4299.
- 智云宝,郭瑞朋,王瑞刚,等,2014.综合物探方法在焦家断裂带南延中的应用.物探与化探,38(6):1176-1180.