

胶西北蚀变岩型金矿床成矿过程三维数值模拟 研究与找矿勘查启示

胡训宇^{1*}, Jowitt Simon², 王坤³, 刘光贤⁴, 丘旸¹, 鞠玮³,
陈玉华³, 李跃⁵

1. 福州大学紫金地质与矿业学院, 福州 350100;

2. Ralph J. Roberts Center for Research in Economic Geology, Nevada Bureau of Mines and Geology, University of
Nevada Reno, Reno NV 89557-0178, USA;

3. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏徐州 221116;

4. 东华理工大学地球科学学院, 南昌 330013;

5. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009

[摘要] 蚀变岩型金矿床在世界范围内分布广泛,具有重要的经济与工业价值。胶东半岛是世界上第三大金矿集区,已探明金储量超 5 300 t。区内绝大多数金矿床分布在胶西北(莱州—招远)、栖霞—蓬莱—福山、牟平—乳山 3 大矿区。焦家断裂带是胶西北地区主要的控矿构造之一,沿线分布着焦家、新城、红布等大量金矿床。为了定量揭示该区域内蚀变岩型金矿床的成矿机制和过程,为深部找矿勘探提供有利信息,建立了焦家断裂新城—红布段的三维地质模型,并基于该模型对蚀变岩型金矿床的成矿过程进行了多物理场(热、流、化、质)耦合三维数值模拟研究。结果表明,降温过程与断裂构造本身是控制金矿化形成的主要因素,焦家断裂及其次级断裂的交汇处与金矿化具有强空间相关性,该处的成矿潜力显著高于断裂带的其他区域,未来找矿勘探可聚焦这些成矿有利区域;此外,整个模型空间内金成矿过程持续了约 8 000 年,尽管这可能只是众多成矿期次之一,但它仍然表明岩浆热液成矿过程可能十分迅速。当前,成矿过程数值模拟研究仍然存在模型简化、古环境恢复等一系列问题,未来数学地球科学与分析测试技术手段的发展将为成矿过程研究与矿床学问题提供更精细、准确、定量的解答。

[关键词] COMSOL Multiphysics 数值模拟;三维地质模型;多场耦合;蚀变岩型金矿床;焦家断裂

[分类号] P612

[文献标志码] A

收稿日期: 2024-10-11; **改回日期:** 2024-11-25。 **责任编辑:** 魏 巍。

基金项目: 国家自然科学基金(42202327, 4212099, 42230802, 41820104007)。

***通信作者:** 胡训宇(1992—),男,副教授,研究方向:成矿作用过程数值模拟与成矿规律, E-mail: xunyu.hu@fzu.edu.cn。

引用格式: 胡训宇, Jowitt Simon, 王坤, 等, 2025. 胶西北蚀变岩型金矿床成矿过程三维数值模拟研究与找矿勘查启示 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 52(5): 1005—1019.

Hu X Y, Jowitt S, Wang K, et al., 2025. Three-dimensional numerical simulations of the ore-forming processes of the orogenic gold deposits within the northwest Jiaodong District, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 52(5): 1005—1019.

Three-dimensional numerical simulations of the ore-forming processes of the orogenic gold deposits within the northwest Jiaodong District, China

HU Xunyu^{1*}, JOWITT Simon², WANG Kun³, LIU Guangxian⁴, QIU Ye¹, JU Wei³, CHEN Yuhua³, LI Yue⁵

1. *Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350100, China;*

2. *Ralph J. Roberts Center for Research in Economic Geology, Nevada Bureau of Mines and Geology, University of Nevada Reno, Reno NV 89557-0178, USA;*

3. *School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;*

4. *School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;*

5. *School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China*

Abstract: Orogenic gold deposits are one of the world's most important sources of gold, and they are widely distributed both in terms of geological time and geographic location. The eastern Shandong Peninsula of China is the third largest gold mining camp in the world, with known gold reserves of more than 5 300 tons. The majority of the gold deposits in this region are located within three main ore fields: northwestern Jiaodong (Laizhou-Zhaoyuan), Qixia-Penglai-Fushan, and Muping-Rushan. Jiaojia fault is one of the most significant ore-controlling structures within the northwestern Jiaodong ore field, controlling the location and formation of Jiaojia, Xincheng, Hongbu, and numerous other gold deposits. This study investigates the role of this fault in the formation of these deposits using a three-dimensional geological model. The model is then employed to undertake multi-field, coupled (heat conduction, fluid migration, chemical reactions, and material migration), numerical simulations, focusing on identifying key mineralizing processes and factors involved in deposit formation. The results indicate that temperature reduction and fault structures are the main factors controlling mineralization within Jiaojia fault. The modeling also provides insights into the relationship between Jiaojia fault and its secondary faults, and Au mineralization within this region, with mineralizing potential greater at depth within the fault systems and at intersections between the main Jiaojia fault and its secondary faults; future mineral exploration could focus on these areas. In addition, the duration of the ore-forming processes lasted for about 8 000 years, indicating that the formation of a magmatic, hydrothermal deposit can be quite rapid, although this 8 000 year period may only be one of many metallogenic phases. Future research should focus on mathematical modeling of the mineralization processes and geological analysis of this region, building on the research presented. Such studies should provide more detailed and quantitative information on the key processes involved in the formation of world-class gold deposits, such as those found within the eastern Shandong Province of China.

Key words: COMSOL multi-physics numerical simulation; three-dimensional geological model; multi-field deposits; orogenic Au deposit; Jiaojia fault

蚀变岩型金矿床分布于世界各地,具有重要的经济和工业价值。蚀变岩型矿床中的金通常赋存于矿石矿物中,如晶体间隙金、裂隙金和包体金(Deng et al., 2015a; Meier et al., 2015)。胶东半岛是世界上最大的金矿集区之一,已探明金储量超过 5 300 t(李杰等, 2022)。近几十年来,胶东半岛发现了大量金矿床,如著名的焦家、三山岛、新城、玲珑矿床(Fan et al., 2003; Li et al., 2008; Yang et al., 2016)。区内绝大多数金矿床都分布

在胶西北(莱州—招远)、栖霞—蓬莱—福山以及牟平—乳山矿田(李杰等, 2022; 图 1)。区内大规模的金矿化引起了学界的研究兴趣,在岩石成因(Wang et al., 2014a, 2014b)、构造(郭涛和吕古贤, 2007; 李瑞红等, 2014)、成矿流体(Fan et al., 2003)、同位素地球化学(Yan et al., 2014; 李杰等, 2022)等方面积累了大量研究成果。这些基础研究成果为该研究区进行成矿过程数值模拟研究积累了大量有用的数据参考,使建立对应的

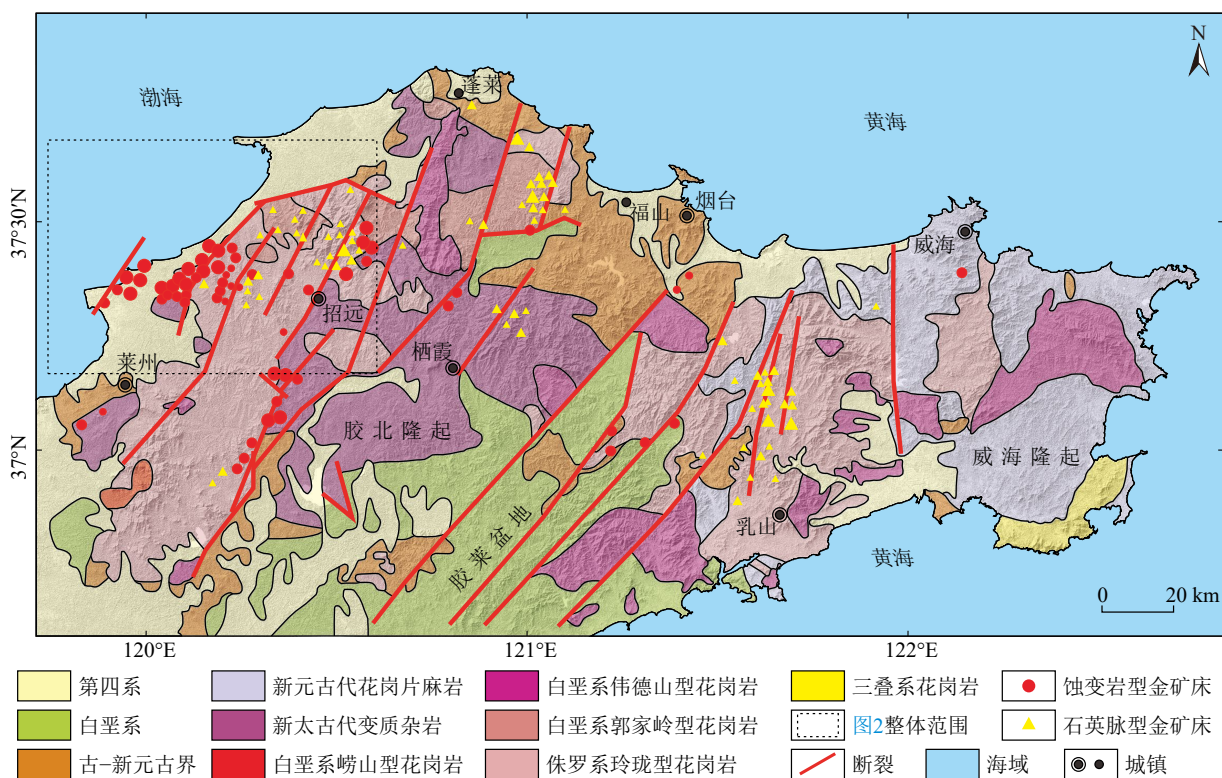


图 1 胶东半岛区域地质图(据李杰等, 2022)
Fig. 1 Map showing the geology of the east Shandong Peninsula

成矿数值模拟模型成为可能(Hobbs et al., 2000, 2007; Murphy et al., 2008; Lai et al., 2021; Yao and Mungall, 2022; Xiong et al., 2023)。

随着计算机技术与软硬件的发展, 数学地球科学发展迅猛(成秋明, 2021), 其理论与方法逐渐被应用于矿产勘查研究, 如三维地质建模(William et al., 2005; Maarten et al., 2012; Mao et al., 2019)、三维成矿预测(Carranza and Laborde, 2015; Li et al., 2015; Porwal and Carranza, 2015; Sun et al., 2019, 2020; Deng, 2020)、大数据与机器学习(Rodriguez-Galinano et al., 2015; Ghezlbash et al., 2019; Qin et al., 2021; Zuo et al., 2021)、成矿作用过程数值模拟(Oliver et al., 2006; Zhao et al., 2009, 2018, 2022; Liu et al., 2010; Yao and Mungall, 2022; Hu et al., 2023a, 2023b; Xiao et al., 2023, 2024; 陈伟林和肖凡, 2023)。区别于其他方法, 数值模拟方法更侧重于过程描述, 这意味着该方法能够被用来对地质作用过程进行全定量分析并对这些过程进行可视化研究(Weis et al., 2012)。矿床的数值模拟模型可以基于成矿相关的一个或多个主要过程建立, 包括传热、变形、化学反应、流体迁移和溶质运移。模拟结果通常包含反映成矿

的关键信息, 通过对这些信息进行单独/联合分析, 能够限制成矿持续时间(Zou et al., 2017; Zhao et al., 2018; Lai et al., 2021; Hu et al., 2023b)、探索矿床成因(Lai et al., 2021; Yao and Mungall, 2022; Hu et al., 2022, 2023a)、辅助圈定深部找矿靶区(Liu et al., 2010; Zou et al., 2017; Xiao et al., 2021; Hu et al., 2024)等。迄今为止积累的丰富成果也证明, 数值模拟方法能够有效解决一些矿床地质难题。

焦家断裂沿北东-北北东向跨越整个胶西北地区, 沿断裂分布了焦家、新城、红布等多个大中型金矿床, 其中绝大多数均具有显著的蚀变岩型金矿床特征(Deng et al., 2008; 李杰等, 2022; 图 1)。前人在多个方面进行了系统研究, 如岩石成因(Wang et al., 2014a, 2014b)、断裂构造与控矿机制(郭涛和吕古贤, 2007; 李瑞红等, 2014)、成矿流体演化与矿床成因(Fan et al., 2003; Lu et al., 2011; Wang et al., 2014a)、同位素地球化学(张潮等, 2016), 为数值建模工作提供了有力的数据支持。本研究建立焦家断裂及周边地区的三维地质模型, 并使用 COMSOL Multiphysics 软件对焦家断裂进行成矿过程数值模拟研究, 以实现以下研究目标: (1) 模拟研究区内金矿化的形成及其随

时间的空间分布,揭示主要控矿因素;(2)根据模拟结果为深部找矿勘探提供信息。

1 区域地质概况

胶西北地区位于胶北隆起的北部(图 1),胶北隆起变质基底由太古宙胶东群英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩(TTG)、古元古代金山群和新元古代蓬莱群变质沉积岩组成(Zhai and Santosh, 2011; Deng et al., 2011, 2015a, 2015b; 张潮等, 2016)。区内出露主要为晚侏罗世-白垩纪岩浆岩,包括中细粒变质辉长岩、花岗闪长斑岩、中粒二长花岗岩、黄铁矿绢云母花岗岩和黄铁矿绢云母碎裂岩(图 2)。全区以一组北东-北北东向断裂为主,即三山岛断裂、焦家断裂和招平断裂(宋明春等, 2012)。

2 矿床地质特征

焦家断裂沿线分布着大小十数个金矿床,其中以蚀变岩型金矿床为主,另有部分石英脉型金矿床。本文研究范围为焦家断裂新城-红布段,其中,新城、红布均为村庄地名,也被用作当地所发现的金矿床名(图 3; 宋明春等, 2012)。

新城金矿床是焦家断裂沿线最大的金矿床之一,矿床内的主断层面沿花岗岩体分布,矿化期断层活动正常(张潮等, 2016)。该地区的花岗岩体主要由胶东群变质基底的部分熔融形成,侵位年龄为 132~123 Ma。新城矿床发育浅色长英质脉岩,通常宽约 5~20 cm,并侵入花岗岩体(刘跃等, 2014; 李杰等, 2022)。长英质脉岩为伟晶岩结构和块状结构,主要矿物为钾长石(体积分数 50%~60%)和石英(体积分数 40%~50%),矿物颗粒较大。长英质脉岩主要被石英-黄铁矿脉切割,表明它们的形成应先于黄铁矿矿化(张潮等, 2016)。

红布金矿床与新城金矿床距离较近(图 3)。金矿化主要发育在次级河西断裂两侧黄铁矿绢云母碎裂岩内的细脉和网状脉中。含矿围岩主要为玲珑型花岗岩和郭家岭型花岗闪长岩。玲珑花岗岩为原地/半原地交代花岗岩,主要由胶东群变质基底部分熔融形成(张连昌等, 2002)。郭家岭花岗岩是一种分布广泛的侵入岩,为金矿化的形成提供了热源,在金的富集过程中发挥了重要作用。区内郭家岭型花岗闪长岩呈北东向分布,出露面积约 500 km²。矿体主要赋存于河

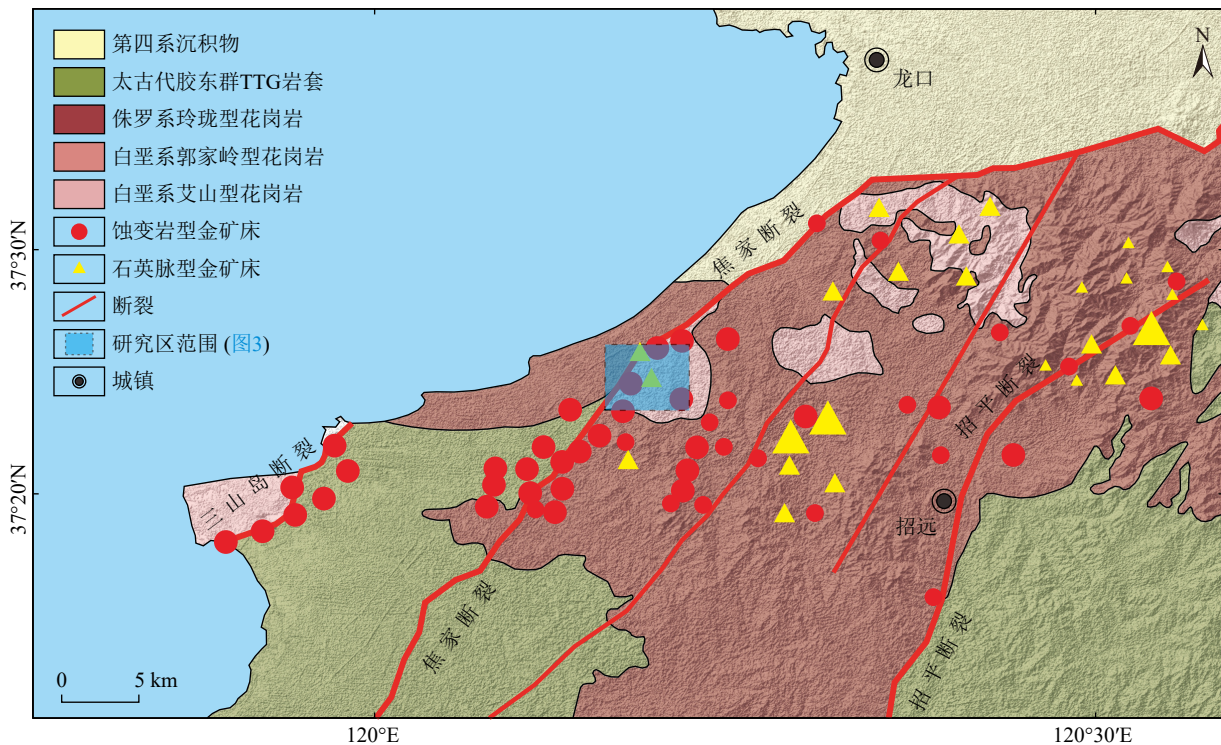


图 2 胶西北(莱州—招远)地区区域地质图(据李杰等, 2022)

Fig. 2 Map showing the geology of the northwest Jiaodong (Laizhou-Zhaoyuan) district

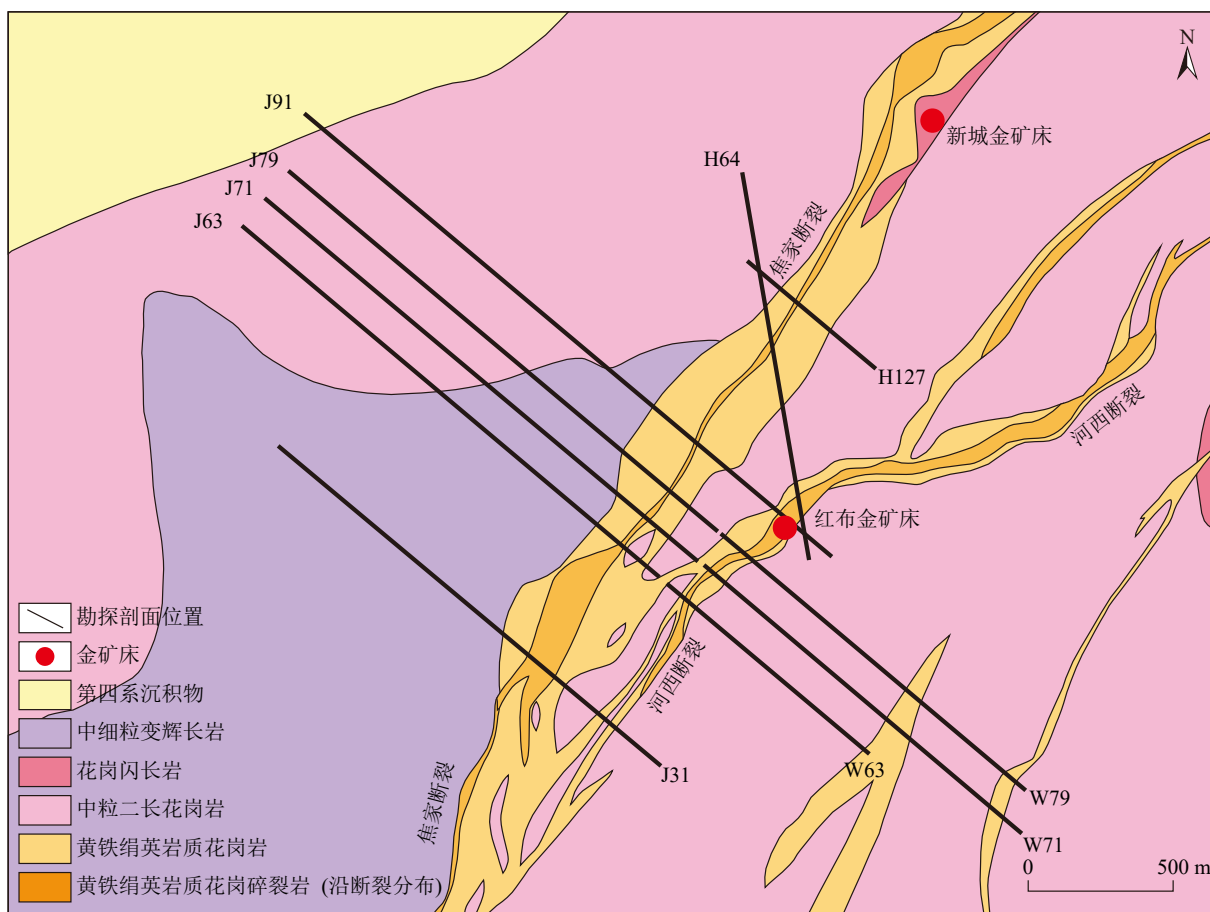


图 3 焦家断裂新城—红布段地质简图(据 Hu et al., 2024)

Fig. 3 Map showing the geology of Jiaojia fault (Xincheng-Hongbu area)

西断裂主断裂面的下盘。红布矿床内有各类蚀变,包括黄铁矿-绢云母化、钾化、硅化、绿泥石化和碳酸盐化。矿石主要有斑片状、浸染状、脉状、细脉状和网状脉状结构(李厚民等, 2003; Hu et al., 2024)。

3 成矿过程数值模拟方法

3.1 焦家断裂新城—红布段三维地质建模

系统收集了焦家断裂新城—红布段的地质资料,包含 1 幅基岩地质图、10 条勘探剖面(图 3)、金矿资源储量报告等数据,构建了该区域蚀变岩型金矿床的成矿概念模型(图 4),基于隐式建模方法建立了该区域的三维地质模型,模型长 4 000 m,宽 3 000 m,高 1 300 m,还原了研究区地质体形态结构(图 5)。同时,在三维地质模型上增加上覆剥蚀地层并进行简化与模型剖分,用于数值建模和计算分析(图 6)。简化模型将原三维地质模型分为了断裂、非断裂、上覆地层 3 个部分:第一部分为断裂部分,主要为焦家断裂新

城—红布段,其空间位置与三维模型中黄铁绢英岩质花岗岩碎裂岩一致(图 6-B),除主断裂外,该断裂面上反映了其次级断裂(图 5-E),在后续成矿模拟研究中具有重要作用;第二部分为非断裂部分,主要为第四系、辉长岩、二长花岗岩及围岩地层;第三部分为上覆剥蚀地层部分,厚度为 5 000 m(图 6-C; Liu et al., 2017)。随后,提取三维地质模型各地层接触面的三维面数据,通过 COMSOL Multiphysics 软件内置的参数化曲面功能在软件中重新创建三维地质模型,并按地层与岩体的侵蚀关系进行切割与模型剖分,剖分后的模型有 98 448 个四面体和 17 812 个顶点(上覆剥蚀地层的四面体与顶点数未计算在内)。

3.2 成矿过程三维数值模拟

岩浆热液成矿系统涉及各种物理化学过程及其耦合关系,其中传热、岩石变形、化学反应、流体迁移和溶质运移最为重要。各过程都可以用相应的数学方程来描述。下文列出了本研究中使用的公式及符号解释。

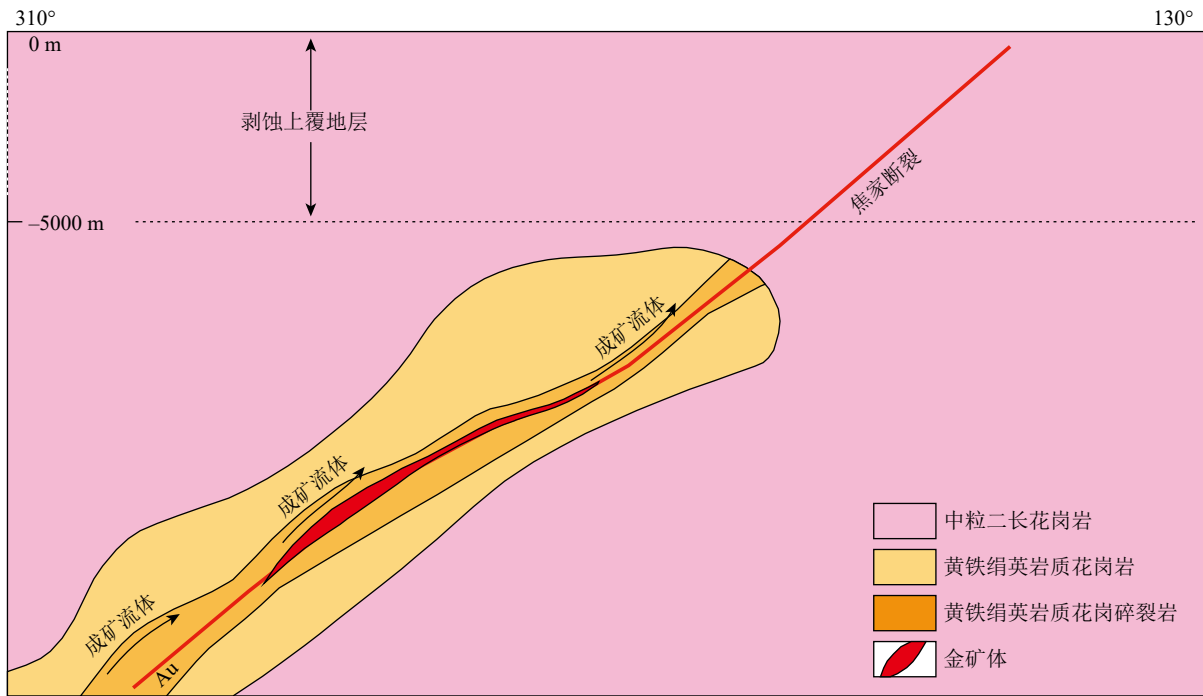


图 4 焦家断裂新城—红布段成矿概念模型(示意图)
 Fig. 4 Conceptual model of ore formation within Jiaojia fault (Xincheng-Hongbu area)

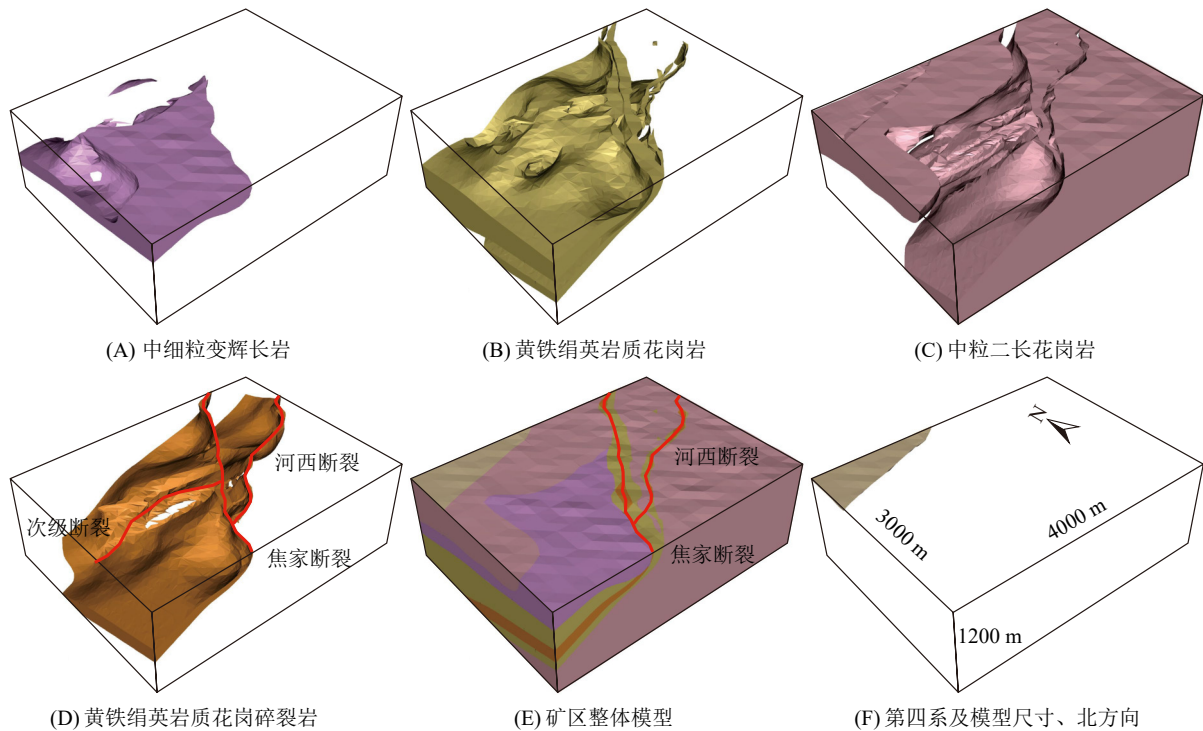


图 5 焦家断裂新城—红布段三维地质模型
 Fig. 5 Three-dimensional model of Jiaojia fault (Xincheng-Hongbu area)

(1) 传热与降温过程

热传递是一个非常重要的过程,它驱动岩浆活动并控制成矿化学反应的进行。根据模型深度、地温梯度和地表温度,使用以下方程为

整个模型赋值初始温度(公式 1; Bickle, 1978; Anderson, 1989):

$$T = T_0 - z \cdot G_T \quad (1)$$

其中, T 是模型中温度的空间分布值, T_0 是

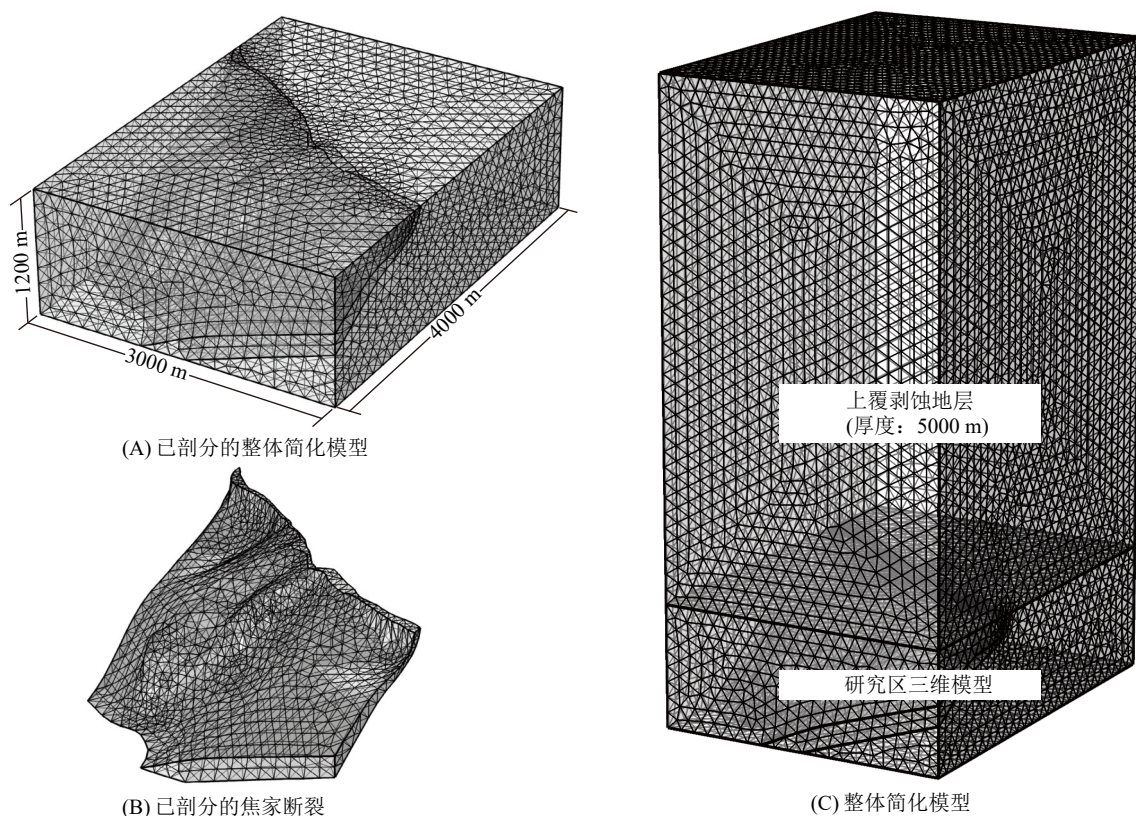


图 6 焦家断裂新城—红布段三维地质模型剖分结果

Fig. 6 Subdivision of the three-dimensional model of Jiaojia fault (Xincheng-Hongbu area)

模型顶部的温度(即地表温度), 设置为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (压力为标准大气压, 101.325 kPa), G_T 为地温梯度 ($2.6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$; Lister, 1963), z 为模型深度(模型顶部高度设置为 0 m), 除此之外, 模型中的能量交换与温度变化用以下方程计算(公式 2~4)

$$(\rho C_p)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f C_{p,f} u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q \quad (2)$$

$$(\rho C_p)_{\text{eff}} = \theta_s \rho_s C_{p,s} + \varepsilon_p \rho_f C_{p,f} \quad (3)$$

$$k_{\text{eff}} = \theta_s k_s + \varepsilon_p k_f + k_{\text{disp}} \quad (4)$$

$$\text{其中 } k_s = \frac{k_b}{\theta_s}, \rho_s = \frac{\rho_b}{\theta_s}, C_{p,s} = \frac{C_{p,b}}{\theta_s}, q = -k_{\text{eff}} \nabla T$$

式中: t 是时间; u 是流体速度矢量场; ρ 是地质体密度; C_p 是比热容; $(\rho C_p)_{\text{eff}}$ 是有效恒压热容; ρ_f 为流体密度(下标 f 表示 fluid, 即流体); $C_{p,f}$ 为流体热容; q 是热传导通量矢量; Q 为全局热源; θ_s 与 ε_p 均表示物质孔隙度(下标 s 表示固体, p 表示孔隙空间); ρ_s 为地质体密度; $C_{p,s}$ 是地质体比热容; k_{eff} 为有效热传导率; k_s 为地质体导热率; k_f 为流体导热率; k_{disp} 为环境导热率。

(2) 流体迁移

多孔介质中的流体迁移主要受到静岩压力

驱动。基于深度能够计算模型中的压力(公式 5)。达西定律能用来描述成矿过程中的热液行为(公式 6, 7; Horton, 1964; Whitaker, 1986)。岩石孔隙度与渗透率的动态变化可以用改进的 Kozeny-Carman 方式描述(公式 8; Carman, 1937; Ives and Pienvichitr, 1965; Hommel et al., 2018)。相关控制方程如下:

$$P = P_0 - z \cdot G_p \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho q_f) = Q_m \quad (6)$$

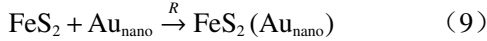
$$q_f = -\frac{k}{\mu} (\nabla P + \rho_f g) \quad (7)$$

$$k = k_0 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^8 \quad (8)$$

式中: ∇ 是向量微分算子; P 是压力; P_0 是模型顶部(地表)压力; G_p 是岩石压力梯度; q_f 是多孔介质中单位长度的体积流速; Q_m 是质量源; k 为岩石渗透率; μ 是流体黏度; g 为重力常数(取值为 9.8 m/s^2); ρ_f 为流体密度; k_0 为初始岩石渗透率; ε 为因变量孔隙度; ε_0 为初始岩石孔隙度。

(3) 金矿化化学反应过程

新城—红布地区矿床中的金主要以纳米金、银金矿、钾钨铅矿和天然金的形式存在于黄铁矿的晶隙中或包裹在黄铁矿中。因此,简化含金黄铁矿的形成过程来表达该地区金矿化的形成过程,表达式如下:



式中: R 是化学反应速率; Au_{nano} 代表成矿热液中的金元素。质量作用定律可以用来计算反应物与生成物减少/增加的化学反应速率(公式 10, 11; Miroslav, 2012):

$$R_i = \sum_i v_{ij} r_i \quad (10)$$

$$r_i = k_i^f \prod_{i \text{ react}} c_i^{-v_{ij}} \quad (11)$$

式中: R_i 是全局化学反应速率; v_{ij} 为各反应物/生成物的计量系数; r_i 为物质 i 的反应速率; k_i^f 是正反应速率常数; j 是正反应次数; c_i 是流体中物质 i 的浓度。

(4) 物质扩散

物质扩散是在小空间尺度上影响矿化空间分布的重要过程之一。下列方程主要用来模拟模型空间中的物质扩散(据 COMSOL 官方网站案例库“多孔材料的有效扩散系数”, Application ID: 978):

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_i \nabla c_i) + v \cdot \nabla c_i = R_i \quad (12)$$

$$N_i = -D_i \nabla c_i + v c_i \quad (13)$$

式中: c_i 是反应物/生成物 i 的物质浓度; ∇ 是向量微分算子; D_i 是物质 i 的扩散系数; R_i 是对应的物质 i 的化学反应速率; v 为成矿流体速度, N_i 是这一过程中沉淀的物质 i 的物质的量。

(5) 计算设置

近几十年来,焦家断裂及周边金矿床一直是矿床学界的研究热点。前人研究为成矿模拟积累了大量有用数据和理论基础。在本研究中,主成矿期包裹体的均一化温度为 240~315 °C, 整个

成矿期的温度范围为 225~400 °C (McCuaig and Kerrich, 1998; Lu et al., 2011)。岩体初始温度被设置为 410 °C, 略高于成矿温度区间的最高温度, 这意味着降温过程包含整个黄铁矿成矿与金成矿的温度区间。模型的初始温度和压力根据深度和温度梯度/压力梯度计算(胡宝群等, 2003)。根据热液中元素浓度的估计值和质量作用定律的限制, 将反应物(FeS₂, Au)的初始浓度设置为 0.2 mol/m³。最近研究表明, 热液系统内成矿的单一期次可以短至数万年甚至数千年(Li et al., 2023), 因此, 将数值模拟过程设置为持续 10 000 年, 时间步长为 10 年, 并生成瞬态结果。建模计算使用以下岩石物性参数(表 1)。

4 结果

为了更好地观测数值模拟结果, 上覆剥蚀地层在所有结果图件中被隐藏(图 7)。除此之外, 结果展示与分析主要集中在焦家断裂, 在大部分结果图件中隐藏了次要地质单元。

4.1 模型中的温度变化

前文已述, 410~170 °C 是主要的成矿温度区间, 因此, 对整个模型的降温过程进行分析, 各相邻图件之间时间差为 2 000 年(图 7)。此外, 对金沉淀成矿的主要温度区间(315~240 °C)进行突出显示, 模型体积即代表了该温度区间范围的时空变化过程(图 7-B1~B7)。在最初的 2 000 年间, 整个模型空间内的温度快速降低, 在之后的 8 000 年间, 降温过程变得极其缓慢。315~240 °C 是主要的成矿温度区间, 其空间变化范围能够被用来指示成矿有利区间(图 7-B1~B7)。

4.2 金矿化的形成过程

金矿化主要在焦家断裂内部和与围岩地层的接触带形成(图 8)。由于受到降温过程控制, 金矿化的形成仅持续了 8 000 年。在 8 000 年之后, 金矿化的时空分布特征不再发生变化。结果表明, 金矿化主要在焦家断裂内部以及围岩接触带形成, 其空间分布受焦家断裂的形态直接控

表 1 本研究使用的岩石物性参数(据 Hu et al., 2024)

Table 1 Rock properties/parameters used in this study

岩石类型	密度/(kg·m ⁻³)	比热容/[J·(kg·K) ⁻¹]	孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻¹³ m ²)	导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]
围岩	2 550	770	22	35	3.1
断裂	2 200	820	18	30	2.8

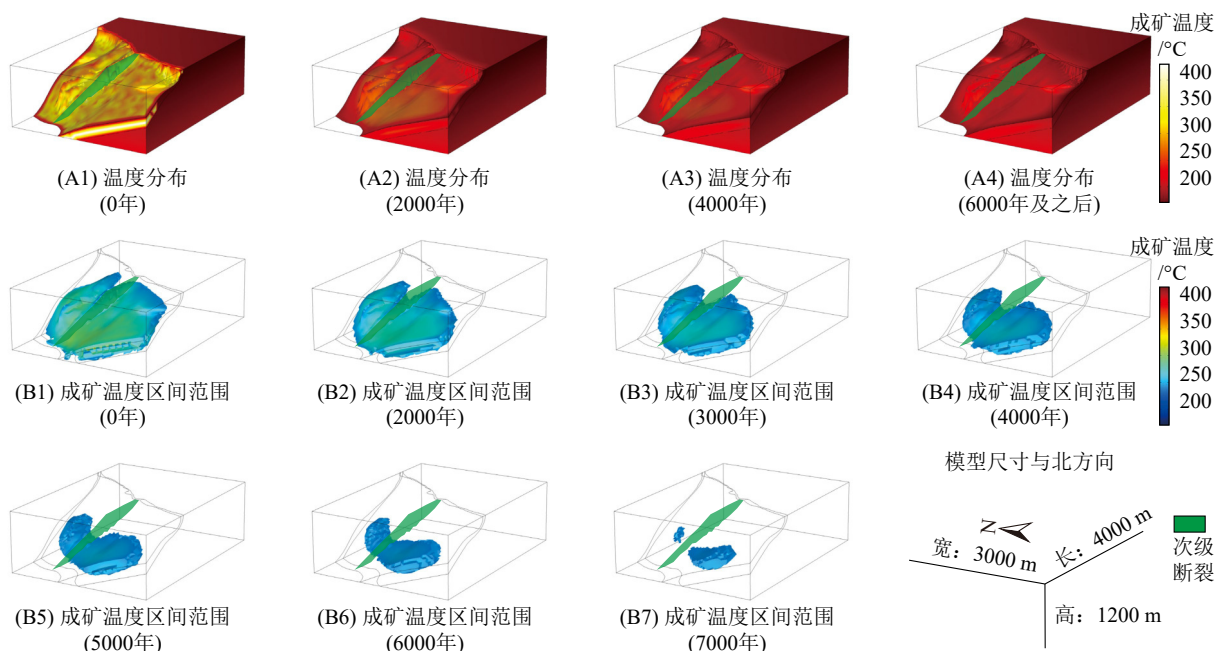


图 7 降温模拟结果

Fig. 7 Diagrams showing the results of temperature reduction

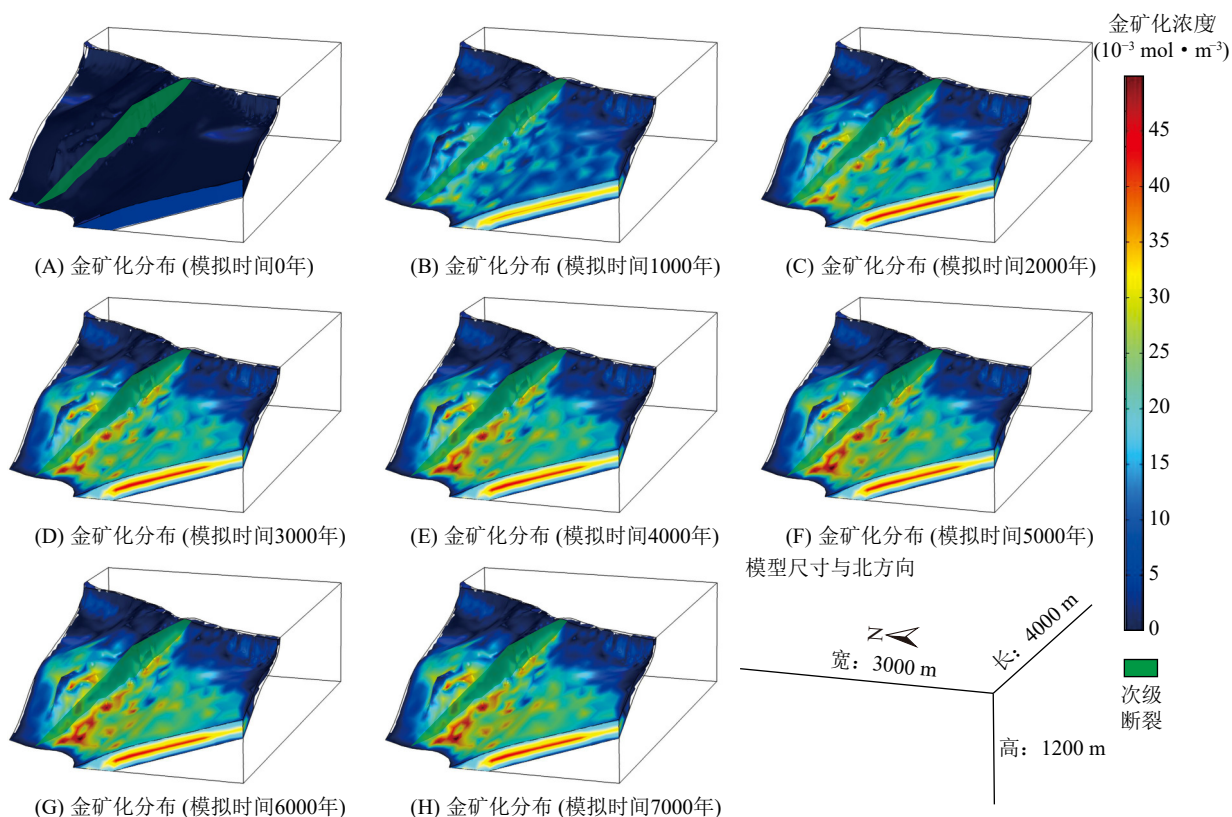


图 8 金矿化形成过程模拟结果

Fig. 8 Au mineralization

制。除此之外, 金矿化也集中出现在焦家断裂与其次级断裂的交汇处, 且矿化发育程度随着深度的增加而增加(图 8-H)。因此, 未来的找矿勘探

工作可重点围绕着这一位置进行。

模拟计算结束后, 分别按照阈值从 0.005~0.045 mol/m^3 展示金矿化的空间分布特征(图 9)。

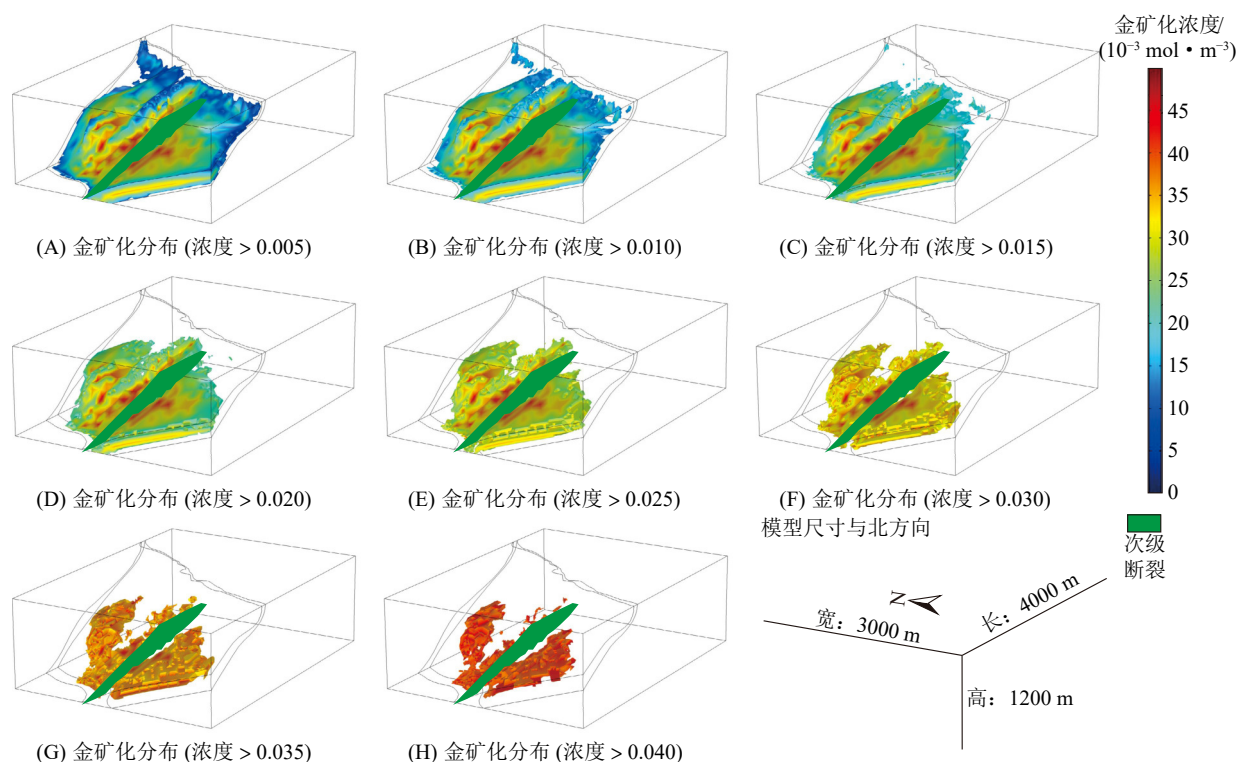


图 9 金矿化时空分布模拟结果
Fig. 9 Spatiotemporal distribution of Au mineralization

由于反应物的浓度均为估计值, 计算所得的金矿化浓度实际意义较小, 但其相对值的大小和空间变化及其分布特征仍能够揭示可能存在的成矿潜力区。从结果来看, 金矿化主要存在于焦家断裂与次级断裂的交汇处, 以及交汇处两侧(图 9-G, H)。通过将现有勘探线上的已知矿体空间位置投影到数值模拟结果图上, 可见模拟结果中焦家断裂上的金矿化高值区(金矿化浓度 $> 0.035 \text{ mol/m}^3$)与 J31, J63, J71, J79, J91 号勘探线上的已知金矿体(同样位于焦家断裂上)的空间位置能够较好地吻合(图 10), 这说明本文模拟结果能够很好地反映已知矿体的空间位置, 同时其他未被勘探线覆盖的金矿化高值区域则能够作为成矿潜力区, 为后续找矿勘探提供有用信息。此外, 焦家断裂深部的金矿化比浅部更发育, 这意味着后续找矿勘探工作需要向已探明区域的深部进行。

5 讨论

本研究建立了焦家断裂新城—红布段三维地质模型, 并对其金成矿过程进行了数值模拟研究。研究结果表明, 相较于浅部, 金矿化在深部较为发育, 焦家断裂的形态是主要的控矿因素,

断裂与断裂的交汇处(J63 线所在位置)具有一定的成矿潜力(图 10)。上述结果证明, 数值模拟的确是一种有效的矿床学研究方法。前人研究显示, 不同类型的矿床有其独特的成矿指示参数(Liu et al., 2010; Li et al., 2019; Xiao et al., 2021; Hu et al., 2023a; Xiong et al., 2023)。例如, 体积应变增量(VSI)是矽卡岩矿床形成数值模拟的有效指标, 原因是该指标可用于反映岩石孔隙空间随着石榴石的形成而产生的变化, 而石榴石是矽卡岩矿床中最常见的脉石矿物之一(Meinert et al., 1997)。然而, 这可能无法直接应用于其他类型的岩浆热液矿床的研究, 如斑岩、MVT、蚀变岩型矿床等。在斑岩矿床中, 矿化主要集中在白云母/绢云母化接触带的位置, 而不是石榴石的位置, 岩石物理性质变化可能与矽卡岩矿床的情况不同, 甚至完全相反。因此, 建立合理的概念模型是成矿过程数值模拟中最重要的一步, 而这一工作应该建立在详细的基础地质研究的基础上。这也意味着成矿过程数值模拟研究不同于成矿预测研究, 几乎不可能建立通用的方法、模型或评价标准。然而, 本文所述的工作流程(成矿概念模型—数学建模—模型计算)仍然可以为后续的成矿

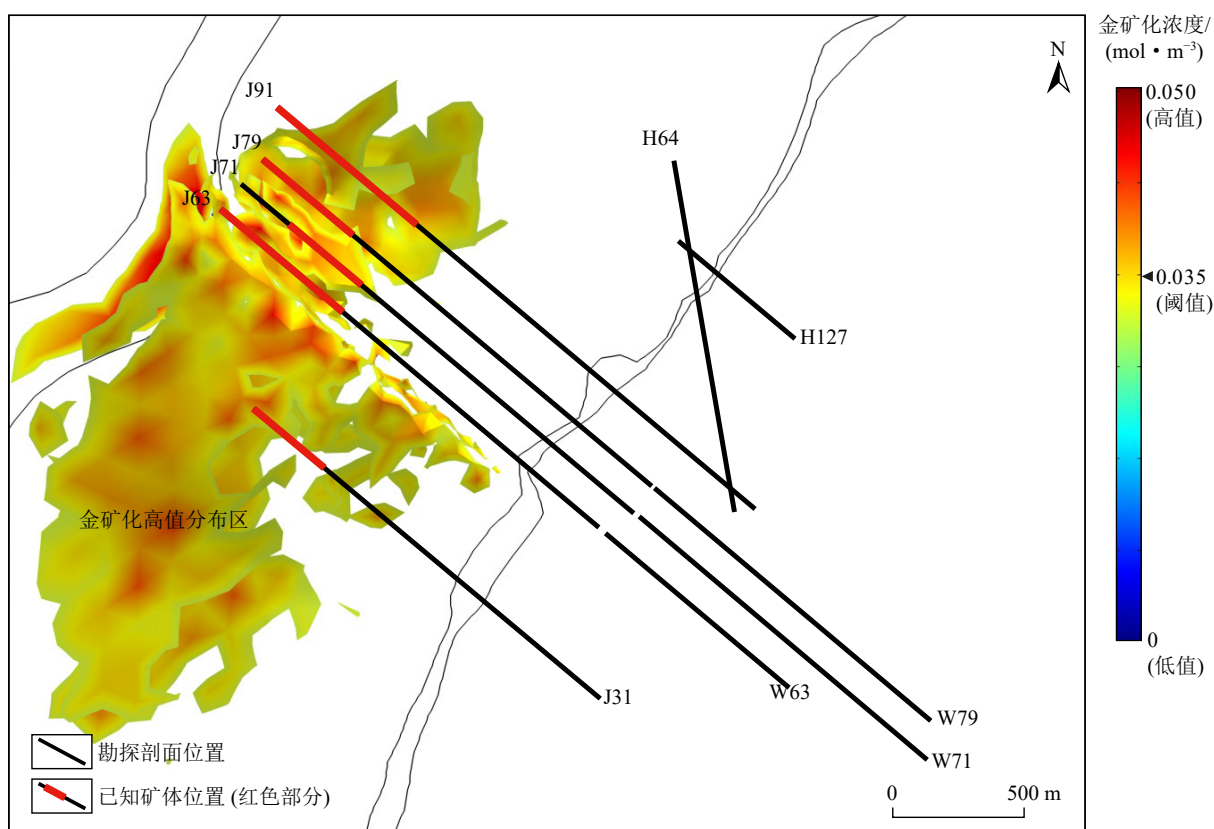


图 10 焦家断裂带金矿化高值区 ($> 0.035 \text{ mol/m}^3$) 投影与勘探线上已圈定矿体范围对比图

Fig. 10 Locations of known ore bodies within the section lines, and simulated Au mineralization within Jiaojia fault

数值模拟研究提供思路和启示。

模拟结果表明, 焦家及其次级断裂控制着区内金矿化的时空分布, 深部矿化主要分布在焦家断裂及其与次级断裂的交汇处(图 9)。断裂交汇处一直是岩浆热液活动频繁的位置, 十分有利于元素的异常富集和大规模矿化的形成。然而, 这只是成矿的充分条件。本文研究结果显示, 焦家断裂面的凹凸表面对金矿化的形成同样有很大影响, 这是由模型内的温度变化引起的, 凹凸不平的表面的降温过程会出现强不均一性(Hu et al., 2023a, 2023b), 而温度是岩浆热液矿床成矿的关键控制因素之一。未来研究如能建立具有更多细节特征的三维模型, 将能够通过降温过程筛选出更适合成矿的局部位置, 为找矿勘探提供有利信息。

成矿持续时间是矿床学研究的热点之一(Sillitoe and Mortensen, 2010; Li et al., 2023)。成矿过程曾被认为需要经历相当长一段时期(My 级别)。然而, 最近的高精度地质年代学研究表明, 这一过程可能比我们想象的要快得多, 可能只需要数万年甚至数千年, 这意味着成矿过程只是

“一瞬间”(Li et al., 2023)。本研究中金矿化的形成持续了大约 8 000 年, 尽管这可能只是众多成矿期次之一, 但它仍然表明岩浆热液成矿过程可能比我们认为的要快得多。

然而, 本研究中也存在一些未能解决的问题。在成矿模拟研究中, 三维地质模型的确优于平面模型(Hu et al., 2022, 2023a, 2024), 但它仍然不够详细, 无法表达小空间尺度上的控矿构造, 引起这一问题的关键点是模型重构与模型剖分(图 6)。焦家断裂三维地质模型在构建之初, 包含了各种精细的地质构造, 但模型在格式转换与重构时损失了大量细节, 在剖分过程中又进一步损失细节。精细剖分的网格模型也许能够解决这一问题, 但随之而来的是大量细碎三角形所带来的计算负荷与不收敛问题。在未来, 数值模拟理论、方法和计算机软硬件的发展将逐步解决这一问题并推动成矿模拟研究进一步发展。

6 结论

本研究对焦家断裂新城—红布段金矿化的

形成过程进行了 COMSOL Multiphysics 三维数值模拟研究,得到了以下结论。

a. 焦家及其次级断裂控制着该地区金矿化的时空分布,断裂深部及其与次级断裂的交汇处具有较大的成矿潜力,未来找矿勘探可聚焦这些成矿有利区域。

b. 整个模型空间内金成矿过程持续了约 8 000 年。尽管这可能只是众多成矿期次中的一个,但它仍然表明与岩浆热液相关的成矿过程可能十分迅速。

c. 本文建立的工作流程(建立成矿概念模型—数学建模—模型计算)可以为后续的成矿数值模拟研究提供思路和启示。

d. 当前,成矿过程数值模拟研究仍然存在模型简化、古环境恢复等一系列问题,未来数学地球科学与分析测试技术手段的发展将为成矿过程研究与矿床学问题提供更精细、准确、量化的解答。

利益冲突声明: 本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

致谢: 感谢山东黄金集团新城金矿、红布金矿提供基础地质数据,以及两位匿名审稿专家对文章初稿提出的宝贵意见,在此致以诚挚的谢意!

[参 考 文 献]

- 陈伟林,肖凡,2023. 成矿动力学数值计算模拟研究进展:理论、方法与技术[J]. 地质科技通报,42(3): 234—249.
- Chen W L, Xiao F, 2023. Advances in numerical modeling of metallogenic dynamics: a review of theories, methods and technologies[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 42(3): 234—249. (in Chinese)
- 成秋明,2021. 什么是数学地球科学及其前沿领域?[J]. 地学前缘,28(3): 6—25.
- Cheng Q M, 2021. What are mathematical geosciences and its frontiers?[J]. Earth Science Frontiers, 28(3): 6—25. (in Chinese)
- 郭涛,吕古贤,2007. 胶东西北部金成矿带控矿构造系统分析[J]. 地质力学学报,13(2): 119—130.
- Guo T, Lü G X, 2007. System analysis of ore-controlling structure in the northwestern Jiaodong gold metallogenic belt[J]. Journal of Geomechanics, 13(2): 119—130. (in Chinese)
- 胡宝群,王方正,孙占学,等,2003. 岩石圈中的地压梯度[J]. 地学前缘,10(3): 129—133.
- Hu B Q, Wang F Z, Sun Z X, et al., 2003. The pressure gradient in the lithosphere[J]. Earth Science Frontiers, 10(3): 129—133. (in Chinese)
- 李厚民,沈远超,毛景文,等,2003. 石英、黄铁矿及其包裹体的稀土元素特征——以胶东焦家式金矿为例[J]. 岩石学报,19(2): 267—274.
- Li H M, Shen Y C, Mao J W, et al., 2003. REE features of quartz and pyrite and their fluid inclusions: an example of Jiaojia-type gold deposits, northwestern Jiaodong peninsula[J]. Acta Petrologica Sinica, 19(2): 267—274. (in Chinese)
- 李杰,安梦莹,宋明春,等,2022. 胶东金矿硫同位素组成特征及其来源[J]. 地质通报,41(6): 993—1009.
- Li J, An M Y, Song M C, et al., 2022. Sulfur isotopic composition and its source of Jiaodong gold deposit[J]. Geological Bulletin of China, 41(6): 993—1009. (in Chinese)
- 李瑞红,刘育,李海林,等,2014. 胶东新城金矿床控矿构造变形环境:显微构造和 EBSD 组构约束[J]. 岩石学报,30(9): 2546—2558.
- Li R H, Liu Y, Li H L, et al., 2014. Ore-controlling structure deformation environment of Xincheng gold deposit, Jiaodong: microstructure and EBSD fabrics analysis constrain[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(9): 2546—2558. (in Chinese)
- 刘跃,邓军,王中亮,等,2014. 胶西北新城金矿床二长花岗岩岩石地球化学、锆石 U-Pb 年龄及 Lu-Hf 同位素组成[J]. 岩石学报,30(9): 2559—2573.
- Liu Y, Deng J, Wang Z L, et al., 2014. Zircon U-Pb age, Lu-Hf isotopes and petro geochemistry of the monzogranites from Xincheng gold deposit, northwestern Jiaodong Peninsula, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(9): 2559—2573. (in Chinese)
- 宋明春,伊丕厚,徐军祥,等,2012. 胶西北金矿阶梯式成矿模式[J]. 中国科学:地球科学,42(7): 992—1000.
- Song M C, Yi P H, Xu J X, et al., 2012. A step metallogenetic model for gold deposits in the northwestern Shandong Peninsula, China[J]. Science China Earth Sciences, 55: 940—948.
- 张潮,黄涛,刘向东,等,2016. 胶西北新城金矿床热液蚀变作用[J]. 岩石学报,32(8): 2433—2450.
- Zhang C, Huang T, Liu X D, et al., 2016. Hydrothermal alteration of the Xincheng gold deposit, northwestern Jiaodong, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 32(8): 2433—2450. (in Chinese)
- 张连昌,曾庆栋,沈远超,等,2002. 胶西北红布金矿地质特征及构造解析[J]. 地质与勘探,38(3): 18—22.
- Zhang L C, Zeng Q D, Shen Y C, et al., 2002. Geological features and structure analysis on Hongbu gold deposit, northwestern

- Jiaodong[J]. *Geology and Exploration*, 38(3): 18—22. (in Chinese)
- Anderson D L, 1989. *Theory of the Earth*[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Bickle M J, 1978. Heat loss from the Earth: a constraint on Archean tectonics from the relation between geothermal gradients and the rate of plate production[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 40(3): 301—315.
- Carman P C, 1937. Fluid flow through granular beds[J]. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 15: 150—166.
- Carranza E J M, Laborte A G, 2015. Random forest predictive modeling of mineral prospectivity with small number of prospects and data with missing values in Abra (Philippines) [J]. *Computer & Geosciences*, 74: 60—70.
- Deng H, 2020. 3D mineral prospectivity modeling for the low-sulfidation epithermal gold deposit: a case study of the Axi gold deposit, western Tianshan, NW China[J]. *Minerals*, 10: 233.
- Deng J, Liu X F, Wang Q F, et al., 2015a. Origin of the Jiaodong-type Xinli gold deposit, Jiaodong Peninsula, China: constraints from fluid inclusion and C-D-O-S-Sr isotope compositions[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 674—686.
- Deng J, Wang C M, Bagas L, et al., 2015b. Cretaceous-Cenozoic tectonic history of the Jiaojia Fault and gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China: constraints from zircon U-Pb, illite K-Ar, and apatite fission track thermochronometry[J]. *Mineralium Deposita*, 50(8): 987—1006.
- Deng J, Wang Q F, Yang L Q, et al., 2008. The structure of ore-controlling strain and stress fields in the Shangzhuang gold deposit in Shandong Province, China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 82(4): 769—780.
- Deng J, Wang Q F, Wan L Q, et al., 2011. A multifractal analysis of mineralization characteristics of the Dayingezhuang disseminated-veinlet gold deposit in the Jiaodong gold province of China[J]. *Ore Geology Reviews*, 40(1): 54—64.
- Fan H R, Zhai M G, Xie Y H, et al., 2003. Ore-forming fluids associated with granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong gold province, China[J]. *Mineralium Deposita*, 38: 739—750.
- Ghezelbash R, Maghsoudi A, Carranza E J M, 2019. Performance evaluation of RBF- and SVM-based machine learning algorithms for predictive mineral prospectivity modeling: integration of S-A multifractal model and mineralization controls[J]. *Earth Science Informatics*, 12: 277—293.
- Hobbs B E, Regenauer-Lieb K, Ord A, 2007. Thermodynamics of folding in the middle to lower crust[J]. *Geology*, 35(2): 175—178.
- Hobbs B E, Zhang Y H, Ord A, 2000. Application of coupled deformation, fluid flow, thermal and chemical modeling to predictive mineral exploration[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 69: 505—509.
- Hommel J, Coltman E, Class H, 2018. Porosity-permeability relations for evolving pore space: a review with a focus on (bio-) geochemically altered porous media[J]. *Transport in Porous Media*, 124(2): 589—629.
- Horton G W, 1964. Darcy's law[J]. *American Journal of Physics*, 32(7): 569.
- Hu X Y, Chen R Y, Liu G X, et al., 2024. Numerical simulation-based targeting of the Au mineralization within the Hongbu altered rock type gold deposit, eastern Shandong Peninsula, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 265: 107557.
- Hu X Y, Chen Y H, Liu G X, et al., 2022. Numerical modeling of formation of the Maoping Pb-Zn deposit within the Sichuan-Yunnan-Guizhou Metallogenic Province, southwestern China: implications for the spatial distribution of concealed Pb mineralization and its controlling factors[J]. *Ore Geology Reviews*, 140: 104573.
- Hu X Y, Liu G X, Chen Y H, et al., 2023a. Combination model-based numerical simulation of the mineralizing processes within iron oxide-apatite systems[J]. *Ore Geology Reviews*, 156: 105394.
- Hu X Y, Liu G X, Chen Y H, et al., 2023b. Numerical simulation of ore formation within skarn-type Pb-Zn deposits: implications for mineral exploration and the duration of ore-forming processes[J]. *Ore Geology Reviews*, 163: 105768.
- Ives K J, Pienvichitr V, 1965. Kinetics of the filtration of dilute suspensions[J]. *Chemical Engineering Science*, 20(11): 965—973.
- Lai F, Zou S, Xu D R, 2021. Silver complexation in chlorine- and sulfur-rich hydrothermal fluids: insight from ab initio molecular dynamics simulations[J]. *Chemical Geology*, 589: 120684.
- Li Q L, Chen F, Yang J H, et al., 2008. Single grain pyrite Rb-Sr dating of the Linglong gold deposit, eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 34(3): 263—270.
- Li X H, Yuan F, Zhang M M, et al., 2015. Three-dimensional mineral prospectivity modeling for targeting of concealed mineralization within the Zhonggu iron orefield, Ningwu Basin, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 71: 633—654.
- Li X H, Yuan F, Zhang M M, et al., 2019. 3D computational simulation-based mineral prospectivity modeling for exploration for concealed Fe-Cu skarn-type mineralization within the Yueshan orefield, Anqing district, Anhui Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 105: 1—17.

- Li Y, Pan J, Wu L, et al., 2023. Transient tin mineralization from cooling of magmatic fluids in a long-lived system[J]. *Geology*, 51(3): 305–309.
- Lister C R B, 1963. Geothermal gradient measurement using a deep sea corer[J]. *Geophysical Journal International*, 7(5): 571–583.
- Liu L M, Zhao Y L, Zhao C B, 2010. Coupled geodynamics in the formation of Cu skarn deposit in Tongling-Anqing district, China; computational modeling and implications for exploration[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 106: 146–155.
- Liu X, Fan H R, Evans N J, et al., 2017. Exhumation history of the Sanshandao Au deposit, Jiaodong: constraints from structural analysis and (U-Th)/He thermochronology[J]. *Scientific Reports*, 7(1): 7787–7798.
- Lu L, Fan H R, Hu F F, et al., 2011. Ore-forming fluids and genesis of Xincheng altered rock gold deposit in northwestern Jiaodong Peninsula[J]. *Mineral Deposits*, 30(3): 522–532.
- Maarten H, Thomas C, Carsten L, et al., 2012. Quantitative mineralogy from infrared spectroscopic data. II. three-dimensional mineralogical characterization of the Rocklea Channel iron deposit, western Australia[J]. *Economic Geology*, 107(2): 229–249.
- Mao X C, Ren J, Liu Z K, et al., 2019. Three-dimensional prospectivity modeling of the Jiaojia-type gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China: a case study of the Dayingezhuang deposit[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 203: 27–44.
- McCuaig T G, Kerrich R, 1998. P-T-t deformation fluid characteristics of lode gold deposits: evidence from alteration systematics[J]. *Ore Geology Reviews*, 12(6): 381–453.
- Meier S, Bauer J F, Philipp S L, 2015. Fault zone characteristics, fracture systems and permeability implications of Middle Triassic muschelkalk in southwest Germany[J]. *Journal of Structural Geology*, 70: 170–189.
- Meinert L D, Hefton K K, Mayes D, et al., 1997. Geology, zonation, and fluid evolution of the big gossan Cu-Au skarn deposit, Ertsberg district, Irian Jaya[J]. *Economic Geology*, 92(5): 509–534.
- Miroslav G, 2012. Fluctuations in extended mass-action-law dynamics[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 241(10): 976–986.
- Murphy F C, Ord A, Hobbs B E, et al., 2008. Targeting stratiform Zn-Pb-Ag massive sulfide deposits in Ireland through numerical modeling of coupled deformation, thermal transport, and fluid flow[J]. *Economic Geology*, 103(7): 1437–1458.
- Oliver N H S, McLellan J G, Hobbs B E, et al., 2006. Numerical models of extensional deformation, heat transfer, and fluid flows across basement-cover interfaces during basin-related mineralization[J]. *Economic Geology*, 101(1): 1–31.
- Porwal A, Carranza E J M, 2015. Introduction to the special issue: GIS-based mineral potential modelling and geological data analyses for mineral exploration[J]. *Ore Geology Reviews*, 71: 477–483.
- Qin Y Z, Liu L M, Wu W C, 2021. Machine learning-based 3D modeling of mineral prospectivity mapping in the Anqing orefield, eastern China[J]. *Natural Resources Research*, 30: 3099–3120.
- Rodriguez-Galiano V, Sanchez-Castillo M, Chica-Olmo M, et al., 2015. Machine learning predictive models for mineral prospectivity: an evaluation of neural networks, random forest, regression trees and support vector machines[J]. *Ore Geology Reviews*, 71: 804–818.
- Sillitoe R H, Mortensen J K, 2010. Longevity of porphyry copper formation at Quellaveco, Peru[J]. *Economic Geology*, 105(6): 1157–1162.
- Sun T, Chen F, Zhong L X, et al., 2019. GIS-based mineral prospectivity mapping using machine learning methods: a case study from Tongling ore district, eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 109: 26–49.
- Sun T, Li H, Wu K X, et al., 2020. Data-driven predictive modelling of mineral prospectivity using machine learning and deep learning methods: a case study from southern Jiangxi Province, China[J]. *Minerals*, 10: 102.
- Wang Z L, Yang L Q, Deng J, et al., 2014a. Petrogenesis and tectonic setting of gold hosting high Ba-Sr granitoids in the Xincheng gold deposit, northwest Jiaodong Peninsula, East China: mineralogy, geochemistry, zircon U-Pb and Lu-Hf isotopes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 95: 274–299.
- Wang Z L, Yang L Q, Guo L N, et al., 2014b. Fluid immiscibility and gold deposition in the Xincheng deposit, Jiaodong Peninsula, China: a fluid inclusion study[J]. *Ore Geology Reviews*, 63: 701–717.
- Weis P, Driesner T, Heinrich C A, 2012. Porphyry-copper ore shells form at stable pressure-temperature fronts within dynamic fluid plumes[J]. *Science*, 338(6114): 1613–1616.
- Whitaker S, 1986. Flow in porous media: a theoretical derivation of Darcy's law[J]. *Transport in Porous Media*, 1(1): 3–25.
- William E S, Stephen W B, Nicholas J A, 2005. Structural setting and shape analysis of nickel sulfide shoots at the Kambalda Dome, western Australia: implications for deformation and remobilization[J]. *Economic Geology*, 100(7): 1441–1455.
- Xiao F, Chen X Y, Cheng Q M, 2024. Combining numerical modeling and machine learning to predict mineral prospectivity: a case study from the Fankou Pb-Zn deposit, southern

- China[J]. *Applied Geochemistry*, 160: 105857.
- Xiao F, Wang K Q, Cheng Q M, 2023. Porphyry magma cooling and crystallization control of mineralization: insights from the dynamic numerical simulation[J]. *Ore Geology Reviews*, 166: 105956.
- Xiao K Y, Xiang J, Fan M J, et al., 2021. 3D mineral prospectivity mapping based on deep metallogenic prediction theory: a case study of the Lala copper mine, Sichuan, China[J]. *Journal of Earth Science*, 32(2): 348—357.
- Xiong Y H, Zuo R G, Miller S A, 2023. The behavior of hydrothermal mineralization with spatial variations of fluid pressure[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128: e2022JB025255.
- Yan Y, Zhang N, Li S R, et al., 2014. Mineral chemistry and isotope geochemistry of pyrite from the Heilangou gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China[J]. *Geoscience Frontiers*, 2014, 5(2): 205—213.
- Yang L Q, Deng J, Wang Z L, et al., 2016. Relationships between gold and pyrite at the Xincheng gold deposit, Jiaodong Peninsula, China; implications for gold source and deposition in a brittle epizonal environment[J]. *Economic Geology*, 111: 105—126.
- Yao Z S, Mungall J E, 2022. Magnetite layer formation in the Bushveld Complex of South Africa[J]. *Nature Communications*, 13(1): 1—11.
- Zhai M G, Santosh M, 2011. The early Precambrian odyssey of the North China Craton: a synoptic overview[J]. *Gondwana Research*, 20(1): 6—25.
- Zhao C B, Hobbs B E, Ord A, 2009. *Fundamentals of computational geoscience: numerical methods and algorithms*[M]. Berlin: Springer.
- Zhao C B, Hobbs B E, Ord A, 2018. Modeling of mountain topography effects on hydrothermal Pb-Zn mineralization patterns: generic model approach[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 199: 400—410.
- Zhao C B, Hobbs B E, Ord A, 2022. Investigating porosity structure effects on hydrothermal mineralization patterns within permeable horizontal layers of fluid-saturated rocks: Semi-analytical approach through generic models[J]. *Ore Geology Reviews*, 150: 105116.
- Zou Y H, Liu Y, Dai T G, et al., 2017. Finite difference modeling of metallogenic processes in the Hutouya Pb-Zn deposit, Qinghai, China; implications for hydrothermal mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 91: 463—376.
- Zuo R G, Kreuzer O P, Wang J, et al., 2021. Uncertainties in GIS-based mineral prospectivity mapping: key types, potential impacts and possible solutions[J]. *Natural Resources Research*, 30: 3059—3079.