

胶西北金矿集区红布金矿床三维地质模型 与成矿过程数值模拟研究

张庆^{1,2}, 彭永明², 赵显勇², 于文浩²

(1. 山东科技大学地球科学与工程学院; 2. 山东黄金矿业股份有限公司新城金矿)

摘要:胶西北金矿集区作为中国最重要的金矿集区之一,其金资源不仅集中且成矿过程复杂。红布金矿床为胶西北金矿集区内的典型金矿床。近年来,随着生产开采,浅部矿体逐渐枯竭,亟须通过成矿理论创新和勘查技术进步来延长矿山服务年限。通过融合多源地质数据,采用隐式建模方法,建立红布金矿床三维地质模型。基于该三维模型,通过概念建模、数值建模、模拟设计等,对成矿过程进行了数值模拟,结果表明,红布金矿床西北部外围深边部存在一定成矿潜力,单期成矿作用持续时间不超过2 500 a,可为成矿时间尺度提供约束。该成果可有效降低勘探成本,明确下一步找矿勘探方向,可为同类矿床寻找接替资源提供借鉴。

关键词:三维地质模型;红布金矿床;隐式建模;成矿过程;数值模拟;找矿勘探;找矿靶区

中图分类号:TD11 P618.51

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)08-0086-06

doi:10.11792/hj20250816

引言

矿床三维模型是“数字矿山”的基石,同时也是矿床的数字化呈现,其为可视化研究、三维成矿预测及成矿过程数值模拟等提供了有力保障^[1-3]。目前,已有多家矿山企业建立了矿床三维模型,实现了矿山数字化管理,显著降低了生产成本,提高了经济效益。众多找矿实践表明,基于三维地质模型进行三维成矿预测研究能够有效辅助已开发矿床深边部及外围的找矿勘探工作。

目前,三维地质建模方法可分为2类:显式建模方法和隐式建模方法。其中,显式建模方法在矿业工程、巷道设计等领域应用广泛,该方法具有较强的可控性,主要依赖人工手动操作,在工业设计中表现出明显优势;而隐式建模方法则主要用于地质体建模和地下三维空间可视化,迭代速度快,能够有效融合多源地质数据,在地质勘探和地质学理论研究方面具有显著优势。

随着计算科学的快速发展,数学地质学理论与方法也取得了显著进展,被广泛应用于矿床学研究,如成矿预测^[4-5]、大数据与机器学习^[6]、成矿过程数值模拟^[7]等。与其他方法不同,数值模拟方法主要用于对地质过程进行定量化和可视化研究。矿床的形成过程通常可以分解为多个物理或化学过程,通过模拟这些过程,以定量的形式刻画成矿流体迁移、矿化形成、

岩石性质变化等关键环节,从而为解决矿床学中的热点问题提供答案。

红布金矿床为胶西北金矿集区内的典型金矿床。近年来,随着生产开采,浅部矿体逐渐枯竭,加之地质构造复杂,隐伏矿体找矿难度日益增大,矿山保有储量严重不足,亟须通过成矿理论创新和勘查技术进步来延长矿山服务年限。本文结合隐式建模方法,采用Geomodeller软件,融合多源地质数据,建立红布金矿床精细三维地质模型。基于该模型,对成矿过程进行了数值模拟研究,初步确定了潜在找矿靶区,这对后期实现资源接替、提高开采效率具有重要意义。

1 地质背景

胶东半岛地处华北克拉通东缘,郯庐断裂带东侧,大别—苏鲁超高压变质带西侧^[8-9]。该区域可划分为胶北地体和苏鲁地体,二者以北东向展布的五莲—烟台断裂为构造边界^[10]。其中,胶北地体以前寒武纪基底岩石为主体,主要包括胶北隆起和胶莱盆地2个部分;苏鲁地体则以超高压变质岩块为典型特征,主要为威海隆起(见图1)。该区作为燕山运动期突发性成矿作用的代表性区域,构成了中国金矿资源空间分布的核心密集区。胶西北金矿集区位于胶北隆起,是中国最重要的金矿集区之一,其黄金资源不仅集中且成矿过程复杂。

收稿日期:2025-02-15; 修回日期:2025-04-12

基金项目:国家科技重大专项项目(2024ZD1001906);国家自然科学基金青年基金项目(42202327)

作者简介:张庆(1987—),男,高级工程师,硕士研究生,从事矿山地质、矿山岩石力学等研究工作;E-mail:zhangq@sd-gold.com

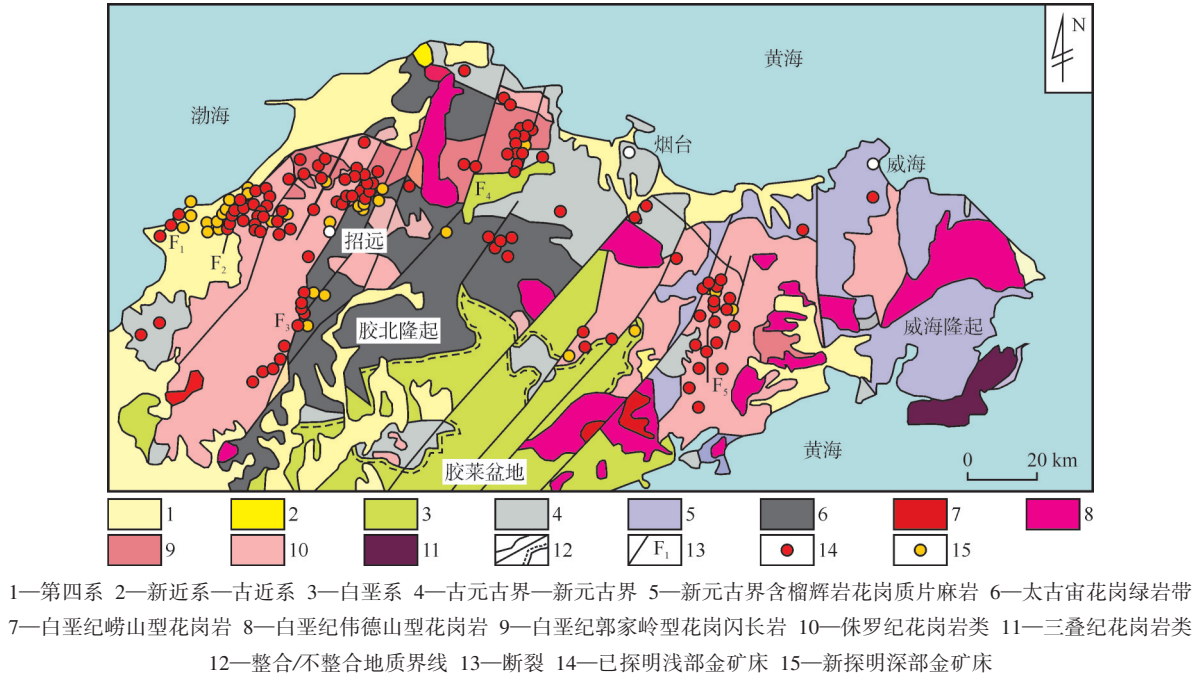


图1 胶东半岛区域地质及金矿床分布图

Fig. 1 Regional geology and distribution of gold deposits in the Jiaodong Peninsula

红布金矿床地处新城金矿床的红布矿段,是焦家金矿田内独具特色的一类金矿床(见图2)。与典型的构造蚀变岩型金矿床不同,其矿体主要赋存于断裂两侧的花岗质岩系中,受高密度节理裂隙系统控制,形成以细脉状、网脉状结构为主的矿化^[11-15]。含矿围岩组合以玲珑花岗岩和郭家岭花岗闪长岩为主体。成矿构造系统受控于三大构造:河西断裂、焦家断裂及侯家断裂。断裂内发育多类构造岩,自主裂面向两侧呈现近似对称的带状分布,典型代表有糜棱岩、碎裂岩和碎裂状构造岩,主导了焦家、新城等大型金矿床的成矿格局。矿区内工业矿体主要为河西带Ⅱ号矿体,其储量占比达矿区总储量的90%以上,空间定位受河西断裂主裂面下盘控制,形态呈现脉状-透镜状复合样式。

2 三维地质建模

当前,三维地质建模软件种类繁多,但建模方法主要可分为2类,即显式建模方法与隐式建模方法。由于红布金矿床原始数据类型丰富,为较好融合多元地质信息,提高建模效率,利用Geomodeler软件,采用隐式建模方法,在融合地质图件、钻孔数据、遥感数据等多源地质数据的基础上建立了红布金矿床三维地质模型(见图3)。该地质模型主要包含第四系、黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩、二长花岗岩、辉长岩、黄铁绢英岩质碎裂岩及总三维模型。该三维地质模型能够很好展示三维地质构造、各岩体空间位置及互相的接触关系,进而为成矿过程数值模拟、找矿勘探等研

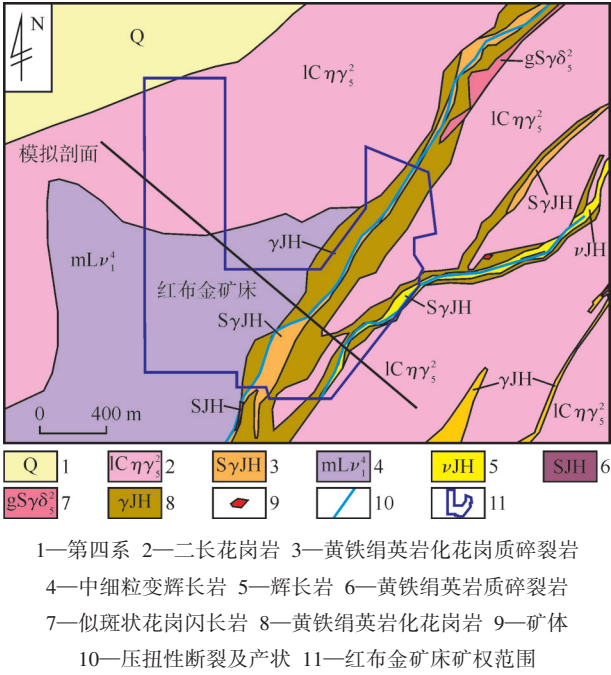


图2 红布金矿区地质简图^[16]

Fig. 2 Geological sketch map of the Hongbu Gold Deposit

究提供有利信息。

3 成矿过程数值模拟

常规数值模拟研究可以分为3个步骤,即概念建模、数值建模、模拟设计。前人研究表明,数值模拟可以在矿产勘查中有效发挥作用^[9-10]。第一步是概念建模,分解矿床的形成过程,确定参与形成矿床的物理、化学过程,为数值模拟建立目标矿床的二维或三维简化模型。第二步是数值建模,基于一系列控制方

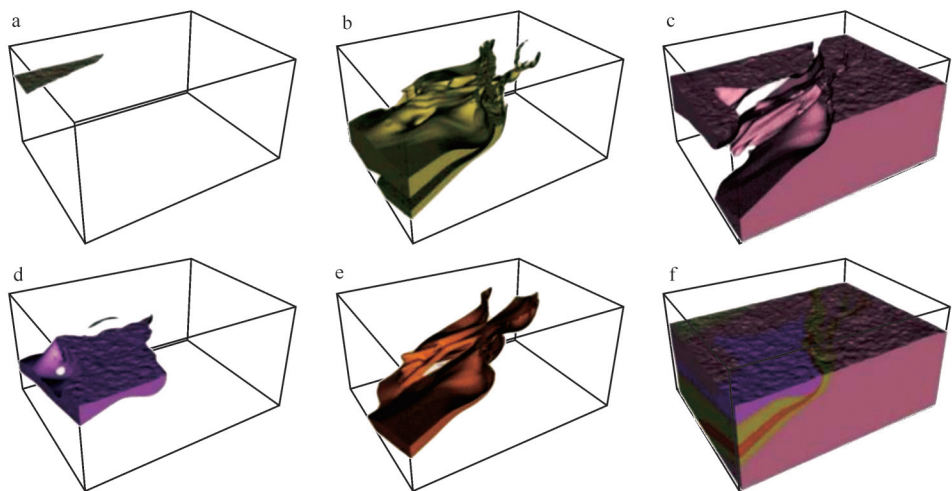


图3 红布金矿床三维地质模型

Fig. 3 3D geological model of the Hongbu Gold Deposit

程来表达这些物理、化学过程(本文主要涉及热传导、化学反应、流体迁移)。第三步是模拟设计,确定相关参数,综合分析模拟结果,得出结论。

3.1 概念建模

前人研究表明,玲珑花岗岩于155.0~155.8 Ma形成,导致大规模的钾长石蚀变^[13]。郭家岭花岗闪长岩在125~130 Ma侵位后,分化的岩浆热液沿区域断裂运移,引起强烈的水岩反应,形成黄铁矿-绢云母蚀变带。此后,成矿流体继续沿断裂运移,在黄铁矿-绢云母蚀变带沉淀成矿,形成大规模金矿化(形成年龄为120 Ma±5 Ma)。胶西北金矿集区现有地表上覆剥蚀单元厚度约为5 000 m^[14-15]。红布金矿床中的金主要以不可见金的形式存在于黄铁矿晶隙或包裹在黄铁矿中,黄铁矿与金具有空间相关性。因此,对红布金矿床三维地质模型进行剖切,生成1条贯穿主要地质体的剖面(见图2、图4)用于数值模拟,并建立黄铁矿捕获金的数值模型,基于此定量描述金的富集沉淀过程。

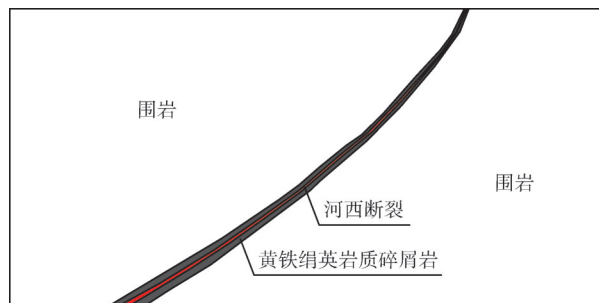


图4 用于模拟的简化剖面(仅保留围岩、黄铁绢英岩质碎屑岩、河西断裂)

Fig. 4 Simplified profile used for modeling (only including surrounding rock, pyrite-sericitic cataclasite, and the Hexi fault)

3.2 数值建模

红布金矿床的形成受到一系列物理、化学过程控制,本文主要讨论热传导、流体迁移、化学反应等过程^[16-18]。

3.2.1 热传导

热过程是与岩浆-热液相关成因矿床的关键控制因素之一,主要以热传导的形式发挥作用。地表温度固定为标准大气压下的室温(20℃),模型初始温度计算方法见式(1)。

$$T = T_0 - zG_T \quad (1)$$

式中: T 为模型初始温度(℃); T_0 为地表温度(℃); z 为三维模型的深度(m); G_T 为地温梯度(℃/m)。

模型上边界增加了5 000 m厚的上覆剥蚀单元,用以恢复成矿时期的地质环境。此外,下列方程用来描述模型内部的能量交换与温度变化:

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

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

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

式中: ρ 为材料密度(kg/m³); C_p 为材料比热容(J/(kg·K)); $(\rho C_p)_{\text{eff}}$ 为有效体积热(J); t 为时间(a); ρ_f 为流体密度(kg/m³); $C_{p,f}$ 为流体比热容(J/(kg·K)); u 为流体速度(m/s); ∇T 为温度变化量(℃); q 为热传导通量(W/m²); Q 为热源(J); θ_s 、 ε_p 为不同材料孔隙度; ρ_s 为地层密度(kg/m³); $C_{p,s}$ 为地层比热容(J/(kg·K)); k_{eff} 为有效热通量(W/m²); k_s 为地质体导热率(W/(m·K)); k_f 为流体导热率(W/(m·K)); k_{disp} 为热耗散率(W/(m·K))。

3.2.2 流体迁移

基于描述模型空间内初始压力及流体行为,渗透率和孔隙度的动态变化可以用改进的Kozeny-Carman

方程^[19]进行描述。相关计算方法见式(5)~(8)。

$$P = P_0 - zG_p \tag{5}$$

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

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

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

式中: P 为压力(Pa); P_0 为地表压力(Pa); G_p 为地压梯度(Pa/m); ε 为孔隙度; q_f 为多孔介质中流体通量(m^3/s); Q_m 为质量(kg); k 为岩石渗透率(m^2); μ 为热液黏度($\text{Pa}\cdot\text{s}$); g 为重力常数,取 9.8 m/s^2 ; k_0 为岩石初始渗透率(m^2); ε_0 为岩石初始孔隙度。

3.2.3 化学反应(金矿化的形成)

红布金矿床中金矿的形成过程与黄铁矿密切相关。因此,金矿化的形成过程可以用式(9)~(11)进行描述。



$$R_i = \sum_j v_{ij} r_j \tag{10}$$

$$r_j = k_j^f \prod_{i \in \text{react}} c_i^{-v_{ij}} \tag{11}$$

式中: Au_{nano} 为存在于黄铁矿晶体间隙或被其包裹的金; R_i 为全局反应速率(mol/s); v_{ij} 为化学计量系数; r_j 为化学反应速率(mol/s); k_j^f 为正反应速率常数; i 为化学计量个数; c_i 为反应物浓度(mol/m^3)。

3.3 模拟设计

前人研究表明,胶西北金矿集区金成矿的化学反应温度为 $225\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$,集中于 $240\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 315\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[20-21]。因此,模型的初始温度设置为 $410\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。模型中 FeS_2 和 Au 的初始浓度均设置为 0.2 mol/m^3 。模型的计算时长设置为 $10\text{ }000\text{ a}$,时间步长设置为 5 a ,整个模型设置为瞬态。本文数值模拟应用的红布金矿床相关岩石物性参数见表1。

表1 红布金矿床相关岩石物性参数

Table 1 Physical parameters of rocks related to the Hongbu Gold Deposit

岩石类型	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热容/[$\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$]	孔隙度	渗透率/ $\times 10^{-13}\text{m}^2$	导热率/[$\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$]
围岩	2 550	770	0.22	35	3.1
黄铁绢英岩质碎裂岩	2 700	820	0.18	30	2.8

3.4 模拟结果

3.4.1 金矿化空间分布

随着模型温度降低,剖面中逐渐开始形成金矿化,金矿化主要沿黄铁绢英岩质碎裂岩形成(见图5),但并未扩散到围岩中,表明金矿化与黄铁绢英岩质碎裂岩在空间上强相关。这与红布金矿床实际的金矿化空间分布机制吻合。本文中的反应

物浓度为估计值,因此,生成物(金矿化)浓度用“富集程度”来形容更为贴切,其数值本身并无实际意义,但其相对大小与高值区空间分布可用来表达模型中金矿化的富集程度。金矿化的高值区从模型顶部延伸至 $-1\text{ }100\text{ m}$,揭示了在红布金矿床西北部外围深边部存在一定成矿潜力,为后期找矿勘探提供了有利信息。

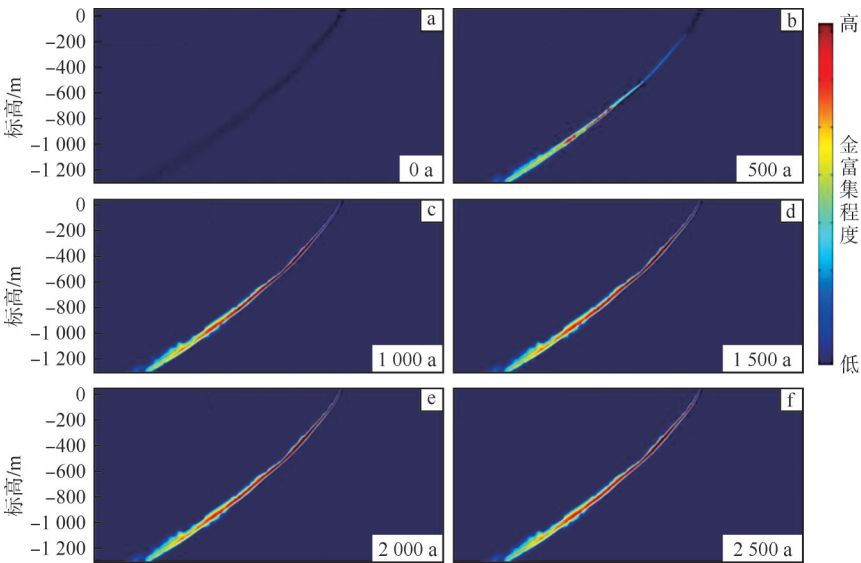


图5 金矿化形成过程数值模拟结果

Fig. 5 Numerical simulation results of gold mineralization

3.4.2 成矿时间尺度

通过对比不同时间的金矿化空间分布结果,可以发现金矿化空间分布在2 000~2 500 a的变化十分微弱,区域内的生成物富集程度并未进一步增加。由此可以推断,单次降温过程中能够支撑成矿化学反应顺利进行的温度(240 °C~315 °C)仅能维持2 500 a。虽然这一结果仅仅是单一成矿期次的持续时间,但即便是发生了多期成矿活动,总的成矿活动仍非常迅速,成矿时间尺度在万年至十万年。该结果与近年来的高精度地质年代学研究结果一致,远远小于常规定年研究的百万年尺度。

综上所述,通过建立红布金矿床三维地质模型及对成矿过程进行数值模拟,初步确定了深边部找矿靶区,这不仅有利于降勘探成本,明确下一步找矿勘探方向,还对实现资源接替、提高开采效率具有重要意义。

4 结 论

1)建立了红布金矿床三维地质模型,该模型能够直观、有效展现地质体三维结构,形成地质体的直接认识,从而为后期成矿预测、数值模拟研究提供模型基础,进而推动深部与外围找矿勘探工作。

2)通过成矿过程进行数值模拟,认为红布金矿床西北部外围深边部存在一定成矿潜力,为后期找矿勘探提供了有利信息。

3)红布金矿床单期成矿作用持续时间不超过2 500 a,该结果能够为成矿时间尺度提供约束。

【参 考 文 献】

- [1] 陈建平,吕鹏,吴文,等.基于三维可视化技术的隐伏矿体预测[J].地学前缘,2007,14(5):54-62.
- [2] 毛先成,唐艳华,赖健清,等.凤凰山矿田成矿地质体三维结构与控矿地质因素分析[J].地质学报,2011,85(9):1 507-1 518.
- [3] 肖克炎,李楠,孙莉,等.基于三维信息技术大比例尺三维立体矿产预测方法及途径[J].地质学刊,2012,36(3):229-236.
- [4] MAO X C,ZHANG W,LIU Z K,et al.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, 2020,10(3):233.
- [5] XIAO K Y,XIANG J,FAN M J,et al.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,2021,32(2):348-357.
- [6] ZUO R,XU Y.Graph deep learning model for mapping mineral prospectivity[J].Mathematical Geosciences, 2023,55:1-21.
- [7] LIU L,ZHAO Y,ZHAO C.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,2010,106(1/2/3):146-155.
- [8] 仲米山,罗银花,刘冰,等.华北克拉通东部新房金矿床成矿规律与三维成矿预测[J].黄金,2023,44(7):48-54.
- [9] 张振,于超,吴志栋,等.胶东玲珑金矿床成矿地质特征及矿床成因[J].黄金,2024,45(7):74-79.
- [10] 牛兴国,许志河,孙丰月,等.胶东招平断裂南段山后金矿区深部地球物理特征及找矿效果[J].黄金,2022,43(6):12-16.
- [11] 李欣航,白令安,胡乔帆,等.桂西北金牙金矿床成矿流体性质与成矿机制[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(3):840-852.
- [12] 石强,李晨,周煜欣,等.华北克拉通北缘孔兹岩带两期深熔石榴花岗岩地球化学特征及其地质意义[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(4):1 090-1 116.
- [13] 许志河,丁正江,朱成,等.胶东招远—平度断裂地球物理异常特征及其控矿条件研究[J].地质与勘探,2024,60(4):776-784.
- [14] 孙之夫,冯涛,胡跃亮,等.胶东西岭金矿床地质特征与金的赋存状态[J].地质与勘探,2022,58(1):24-36.
- [15] 龙天祥,路永严,李文辉,等.云南金平地区Au、Cu、Pb、Zn、Ag成矿元素时空分布特征及找矿预测[J].地质与勘探,2024,60(2):222-235.
- [16] 谢先岗,李晓晖,袁峰,等.融合成矿过程数值模拟信息的三维成矿预测方法研究:以安徽宣城茶亭地区为例[J].矿物岩石地球化学通报,2024,43(2):446-458.
- [17] 安文通,陈建平,朱鹏飞.基于成矿过程数值模拟的隐伏矿双向预测研究[J].地学前缘,2021,28(3):97-111.
- [18] 邹艳红,张武桥,毛先成,等.胶东焦家金矿床成矿过程热液蚀变化学反应数值模拟[J].大地构造与成矿学,2023,47(5):1 158-1 172.
- [19] 刘江涛,廖东良,葛新民.基于Kozeny-Carman方程的水相相对渗透率计算方法[J].科学技术与工程,2012,20(29):7 500-7 504.
- [20] MCCUAIG T G,KERRICH R.P-T-t deformation fluid characteristics of lode gold deposits: Evidence from alteration systematics[J].Ore Geology Reviews,12(6):381-453.
- [21] 陆丽娜,范宏瑞,胡芳芳,等.胶西北新城金矿成矿流体与矿床成因[J].矿床地质,2011,30(3):522-532.

3D geological modeling and numerical simulation of the ore-forming process in the Hongbu Gold Deposit, Northwest Jiaodong gold province

Zhang Qing^{1,2}, Peng Yongming², Zhao Xianyong², Yu Wenhao²

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology;

2. Xincheng Gold Mine, Shandong Gold Mining Co., Ltd.)

Abstract: As one of the most important gold provinces in China, the Northwest Jiaodong gold province is characterized by highly concentrated gold resources and complex metallogenic processes. The Hongbu Gold Deposit is a typical representative within this area. In recent years, with continuous mining activities, shallow orebodies have gradually become depleted, creating an urgent need to extend the mine's service life through innovations in metallogenic theory and advancements in exploration technology. By integrating multi-source geological data and applying implicit modeling techniques, a 3D geological model of the Hongbu Gold Deposit was established. Based on this model, the ore-forming process was numerically simulated through conceptual modeling, numerical modeling, and simulation design. The results suggest that the deep part and peripherals in the northwest of the Hongbu Gold Deposit show certain metallogenic potential. The duration of a single mineralization event does not exceed 2 500 a, which provides constraints on the metallogenic timescale. This research can effectively reduce exploration costs, clarify future exploration directions, and offer guidance for identifying substitute resources in similar deposits.

Keywords: 3D geological model; Hongbu Gold Deposit; implicit modeling; ore-forming process; numerical simulation; mineral exploration; exploration target area

(上接第 85 页)

Study on spatial distribution patterns of mineralization based on 3D modeling using Leapfrog software —A case study of the Sanguikou sulfur–zinc polymetallic deposit in Urad Rear Banner, Inner Mongolia

Liu Hao¹, Zhang Qianhui^{2,3}, Liu Guangyong¹, Peng Linkang³, Liu Wenhao³, Sun Huashan³

(1. Zijin Mining Co., Ltd., Urad Rear Banner; 2. Zhejiang Geological Prospecting Institute of CCGMB;

3. School of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan))

Abstract: Leapfrog software was used to construct a 3D geological model of No. 9 orebody in the Sanguikou sulfur–zinc polymetallic deposit. Grade interpolation of major ore-forming elements within the orebody was performed, and the results were interpreted in conjunction with geological characteristics and field investigations. The spatial distribution patterns of mineralization were analyzed from 3 aspects: orebody morphology, distribution of ore-forming elements, and characteristic element ratios. The results show that No. 9 orebody is generally tabular in shape, but exhibits significant serrated undulations on the northeastern side. The morphology and thickness variation of the orebody are controlled by an asymmetric syncline structure, while enrichment of lead and zinc is locally governed by secondary anticline–syncline folding. The northeastern part of the deposit is characterized by high $w(\text{Zn})/w(\text{Pb})$ ratios and sulfur enrichment. Combined with tunnel observations indicating strong hydrothermal alteration of dolomitic marble host rocks in this area, it is inferred that although lead–zinc mineralization weakens overall toward the northeast, it does not pinch out rapidly and may still extend a certain distance.

Keywords: Leapfrog software; 3D orebody modeling; mineralization; distribution pattern; prospecting direction; Sanguikou