

基于 Leapfrog 软件三维建模的矿化空间分布规律研究

——以内蒙古乌拉特后旗三贵口硫锌多金属矿床为例

刘 昊¹, 张倩惠^{2,3}, 刘光永¹, 彭林康³, 刘文浩³, 孙华山^{3*}

(1. 乌拉特后旗紫金矿业有限公司; 2. 中化地质矿山总局浙江地质勘查院; 3. 中国地质大学(武汉)资源学院)

摘要:采用 Leapfrog 软件对三贵口硫锌多金属矿床 9 号矿体进行三维建模, 并对主要成矿元素品位数据在矿体范围内进行了插值分析, 结合矿区地质特征和野外调查进行解译, 从矿体形态、成矿元素分布和元素特征比值等 3 个方面对矿化空间分布规律进行分析。结果显示: 9 号矿体形态总体呈板状, 但北东侧呈锯齿状波动显著, 矿体形态及厚度变化受不对称向斜构造控制, 铅锌矿化富集局部受次级背斜、向斜褶曲控制。矿区北东侧存在 $w(\text{Zn})/w(\text{Pb})$ 值高、硫矿化富集的特征, 结合坑道调查所见赋矿围岩白云石大理岩热液蚀变明显, 认为矿区北东侧虽然铅锌矿化总体减弱, 但不会快速尖灭, 仍有一定的延伸距离。

关键词: Leapfrog 软件; 三维矿体建模; 矿化; 分布规律; 找矿方向; 三贵口

中图分类号: TD15 P618.43

文献标志码: A

文章编号: 1001-1277(2025)08-0081-05

doi: 10.11792/hj20250815

引言

矿化空间分布规律是成矿元素在地下三维空间内有序富集的表现, 反映了矿体在空间中的产出形态及展布特征^[1-2]。矿化空间分布规律的研究对矿产勘探至关重要, 通过对矿区系统采样, 分析成矿元素在三维空间的分布特征, 可以更好地指导下一步找矿^[3]。传统找矿工作中, 利用剖面图或平面图来研究矿化分布, 通过分析不同高程或不同勘探线剖面的矿化空间规律, 并绘制联合勘探线剖面图和叠合中段平面图对比分析, 总结矿化空间分布规律^[4-5]。随着三维建模技术的广泛应用, 利用矿体三维建模研究矿化分布及变化规律已成为当前发展趋势, 例如: 黄超等^[6]通过 Surpac 三维建模软件对西藏雄村 I 号矿体的钻孔数据进行处理, 建立数据库, 并以此构建矿体模型和实体模型, 研究深部成矿元素空间分布形态; 李敏等^[7]基于 Micromine 软件对深部地层、矿体等进行了三维地质建模, 实现了深部地质体的三维可视化、透明化。

但是, 目前大多数建模软件采用的是显式建模方法, 用手工绘图的方法定义剖面, 并在剖面上绘制岩性、断裂和矿脉。以人机交互方式建立的地质模型,

虽然更符合人们对矿体形态及产状的预期认识, 但构建方式既费时又不灵活, 当数据增多时, 很难更新模型^[8]。Leapfrog 软件采用隐式建模方法, 通过使用数学工具从数据中推导出模型, 减少了费时的人力干预工作, 很容易与最新数据保持同步, 在增添新的钻孔数据后, 原模型可自动修改并快速集成, 无须花费数周或更长时间手动修改模型, 便于实时更新数据及模型。本文采用 Leapfrog 软件, 以三贵口硫锌多金属矿床为研究对象, 通过收集矿区地质资料, 构建矿体与块体三维模型, 研究矿化空间分布规律, 明确找矿方向。

1 矿区及矿床地质特征

三贵口硫锌多金属矿床在大地构造上位于华北地台北缘, 内蒙古地轴西段狼山复背斜南翼, 处于北部 F_3 和南部 F_1 区域性北东向断裂之间, 其间褶皱与断裂均有发育, 从南到北褶皱依次为东升庙倒转背斜、那云山向斜、那云山背斜、红帽山向斜、三贵口倒转背斜、杨树湾向斜等。矿区主要出露地层为中元古界渣尔泰山群、中生界白垩系地层和新生界地层, 缺失古生界地层(见图 1)。其中, 渣尔泰山群阿古鲁沟组为主要的赋矿地层, 出露在南矿段中部, 北矿段小面积

收稿日期: 2025-03-27; 修回日期: 2025-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172087); 紫金集团矿山综合找矿预测专项项目(20230260006)

作者简介: 刘 昊(1987—), 男, 工程师, 从事矿山地质工作; E-mail: 369389224@qq.com

*通信作者: 孙华山(1969—), 男, 教授, 博士, 从事矿产勘查评价教学与科研工作; E-mail: sunhsh@cug.edu.cn

出露,总体以碎屑沉积变质岩为主,夹少量碳酸盐岩和含矿建造,未见底,顶界被白垩系李三沟组角度不整合覆盖。岩浆活动以侵入为主,在F₅断裂以北,地表出露

大面积印支期花岗岩,地层中也可见到一些中酸性岩脉。矿区尚未发现与成矿时代一致、较大规模的岩浆岩,所见的只是一些顺层或沿裂隙侵入的小岩脉^[9-11]。

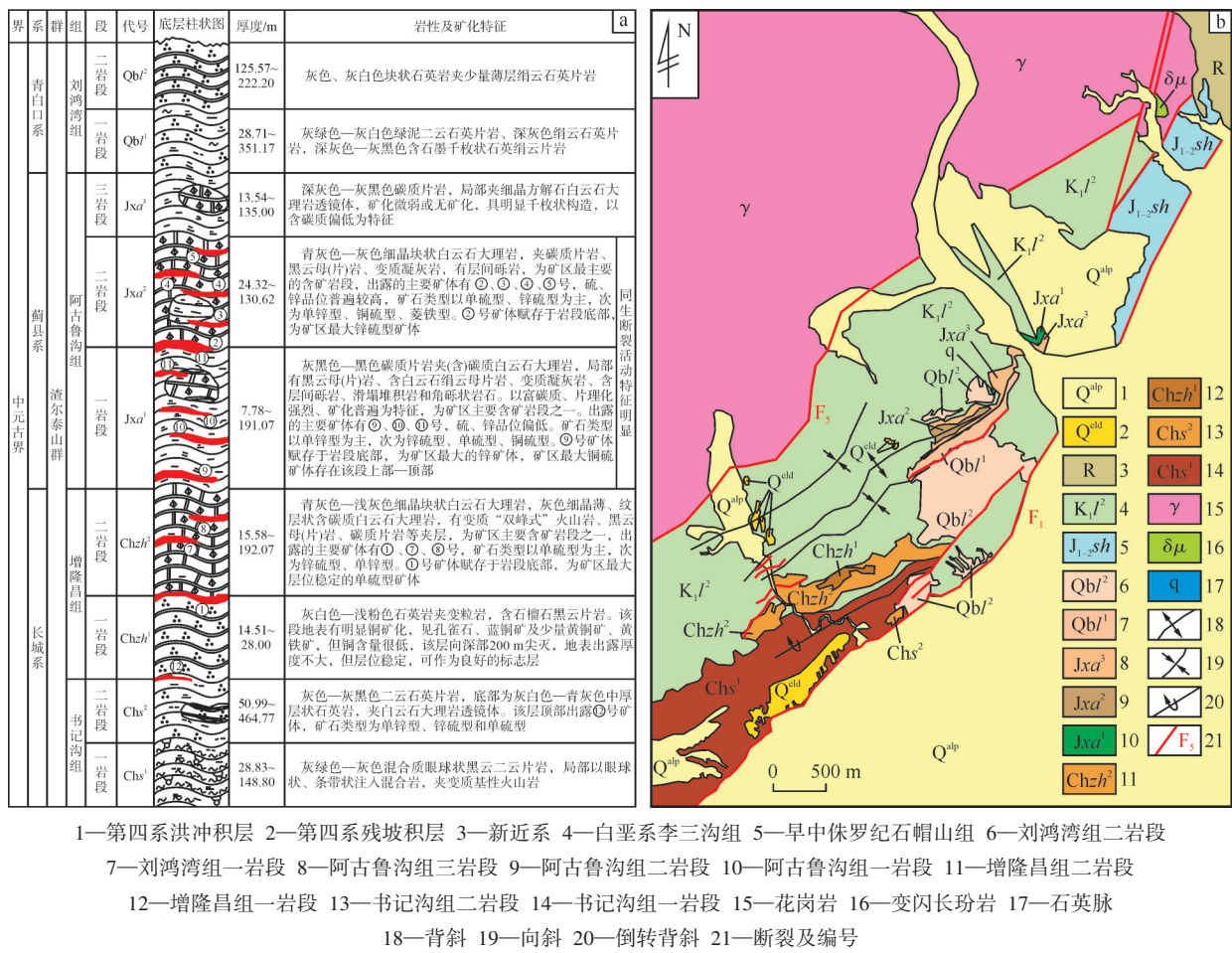


图1 三贵口硫锌多金属矿区综合地层柱状图(a)及矿区地质图(b)

Fig. 1 Comprehensive stratigraphic column (a) and geological map (b) of the Sanguikou Pb-Zn polymetallic district

三贵口硫锌多金属矿床为东升庙特大型硫锌多金属矿床的东延部分,矿体产于增隆昌组二岩段(Chzh²)、阿古鲁沟组一岩段(Jxa¹)和二岩段(Jxa²)中,呈北东向展布,矿体埋藏较深,基本为原生矿,矿体均受地层控制,随地层同步褶曲,呈层状、似层状、透镜状产出,以多层叠加为带状,具有分支复合的特征^[12]。矿区发育多层矿体,其中,9号矿体为主矿体,其次为9-3号、10-1号、3-1号、3-2号、1号和2号矿体,其他矿体规模较小。

区内矿石自然类型以碳质片岩型和含碳质白云石大理岩型为主,组成矿石的矿物为原生矿物,主要金属矿物有黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿,其次为方铅矿、黄铜矿、磁铁矿、菱铁矿等。脉石矿物以白云石、石英、绢(白)云母类矿物为主,其次为碳质矿物,方解石、重晶石、磷灰石、透闪石等较少^[12]。矿石构造主要包括条带状构造、纹层状构造、块状构造、浸染状构造、脉状构造、角砾状构造等。矿石结构主要包括自形一半自形粒状结构、他形粒状结构、充填结构、交代

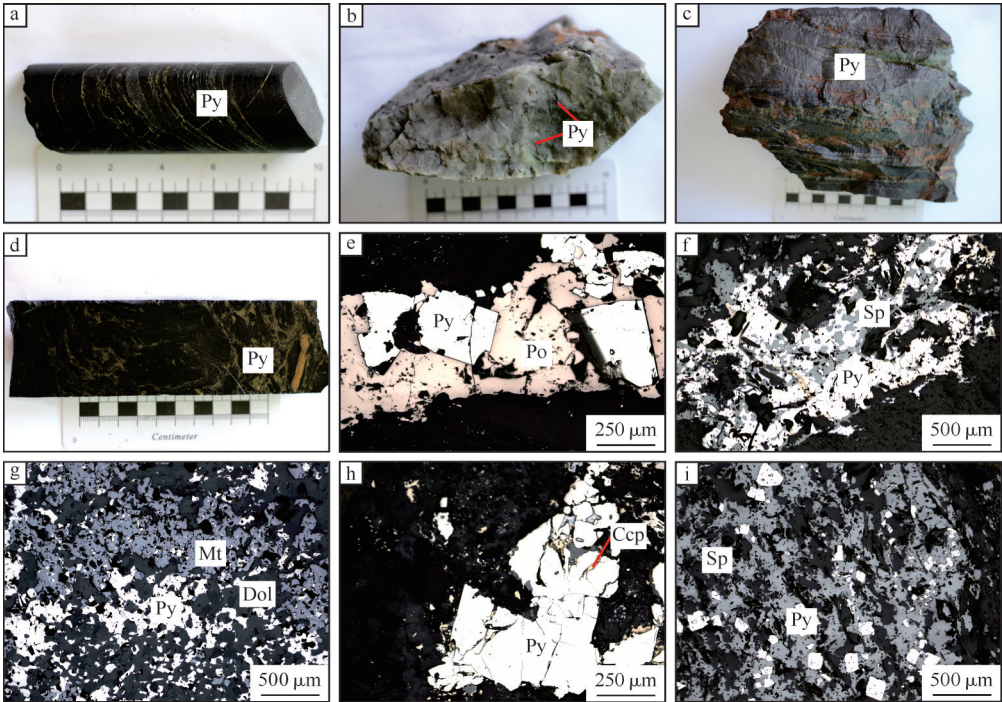
结构等(见图2)。

2 三维地质建模

本次采用Leapfrog软件构建矿区的三维地质模型,利用隐式建模方法,以一种从径向基函数(RBF)发展而来的数学算法FastRBF为基础,通过建立隐式函数描述已知控制点数据的空间特征,利用函数计算推测未知点的空间信息,实现对离散不全面原始采样点数据的空间插值,依据特定三维曲面算法自动构建可视化三维模型。

在深入了解矿区地质背景的基础上,利用Leapfrog软件,以钻孔数据为基础,结合勘探线剖面图,构建矿体模型,在矿体模型的基础上建立块体模型(见图3),分析矿化空间定位规律,用于指导矿区的成矿预测工作。

矿体模型的构建以钻孔数据为基础,并结合勘探线剖面图中矿体界线圈定矿体。本文以9号矿体模



a—碳质片岩型矿石,纹层状构造 b—含碳质白云石大理岩型矿石,浸染状构造 c—碳质片岩型矿石,脉状构造 d—碳质片岩型矿石,角砾状构造 e—自形一半自形粒状黄铁矿 f—闪锌矿沿边缘及裂隙充填交代黄铁矿 g—黄铁矿和磁铁矿充填于白云石大理岩颗粒间隙中 h—黄铜矿交代黄铁矿 i—闪锌矿交代黄铁矿 Py—黄铁矿 Po—磁黄铁矿 Sp—闪锌矿 Mt—磁铁矿 Ccp—黄铜矿 Dol—白云石

图2 矿石宏微观特征

Fig. 2 Macroscopic and microscopic characteristics of the ore

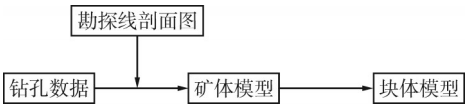


图3 三维建模技术流程

Fig. 3 Technical workflow of 3D modeling

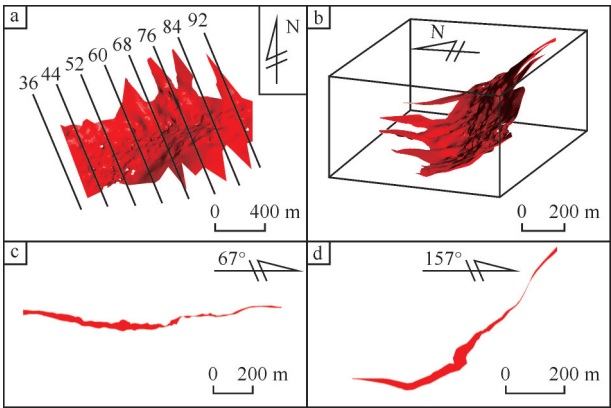
型为例,参照DZ/T 0214—2020《矿产地质勘查规范铜、铅、锌、银、镍、钼》,圈定锌矿体指标为:边界品位 $\geq 0.5\%$,最低工业品位 $\geq 1.6\%$;最低可采厚度 $\geq 2\text{ m}$,夹石剔除厚度 $\geq 4\text{ m}$ ^[13]。圈定矿体边界的有限外推和无限外推均按照勘探工程间距的二分之一即 50 m 尖推。矿区内勘探线间距为 100 m ,且矿体为层状,为保证矿体的连续性,本文建立的块体模型中设定的块体尺寸为 $10\text{ m}\times 10\text{ m}\times 5\text{ m}$ 。

3 矿化空间分布规律

3.1 矿体形态

9号矿体三维空间分布图见图4。由图4可知:9号矿体分布于40勘探线—96勘探线,其中,南西侧40勘探线—60勘探线矿体形态稳定,呈平板状延伸至东升庙矿区,向东北60勘探线—96勘探线矿体形态呈锯齿状变化剧烈,96勘探线以东矿体沿走向具有收缩趋势。目前,9号矿体走向控制延长约 $1\,400\text{ m}$,倾向延伸 $500\sim 800\text{ m}$,垂直延伸约 700 m 。整体上,矿体呈不对称向斜形态,南东翼长,北西翼短,

南东翼矿体产状陡,北西翼矿体产状平缓,呈“铲”状形态,南东翼浅部矿体强烈伸展减薄,甚至拉断;沿向斜走向和倾向发育多个次级褶曲,尤其在向斜转折端附近次级褶曲更发育,导致矿体厚度显著增大且呈明显的波状起伏。



a—三维空间俯视图 b—空间分布图 c—沿矿体走向的垂直切面图 d—沿矿体倾向的垂直切面图

图4 9号矿体三维空间分布图

Fig. 4 3D spatial distribution of No. 9 orebody

3.2 成矿元素分布

距离幂次反比法(IDW)是一种与空间距离有关的插值方法,假设插值的空间点属性值在一定空间范围内具有相关性,这种相关性可以定量表示^[14]。在估计待估点的值时,按照距离越近权重值越大的原则,

以待估值块中心为球心,设置搜索半径,绘制搜索椭球体,计算落入椭球体内的每一个样品与待估值块中心的距离。利用已知点与待估值点之间的距离取幂次后的倒数为权重系数进行加权平均,从而估算出块体模型中各单元体的加权品位^[15-16]。

本文采用距离幂次反比法对9号矿体内部的铅、锌、硫品位进行估值^[17],搜索椭球体主轴搜索半径从最小工程间距即100 m开始,进行初次搜索,检查所需估值区域是否全部被估值,如果已全部估值,则块体品位插值已完成;如果有块体未被估值,则放大搜索半径再次搜索,重复之前的步骤,直至全部被估值。搜索椭球体的轴向方位根据各矿体在空间中的产状设置^[16,18]。

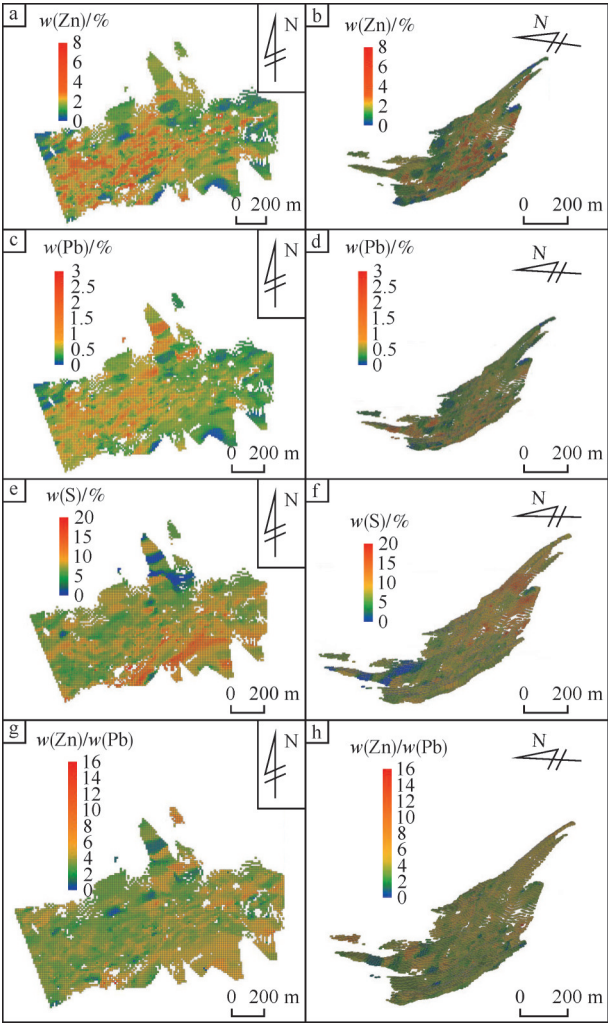
成矿元素空间分布图见图5。由图5可知:9号矿体锌、铅高值区与相对低值区相间分布,呈北东向条带状相间分布。结合矿体形态特征,判断锌、铅高值区大致与次级背斜、向斜褶曲位置对应(见图4-b、图5-b)。总体上,中间—南西一侧锌、铅矿化强于北东一侧(见图5-a、c)。硫矿化与锌、铅矿化相似,同样呈北东向分布,高值区与低值区相间(见图5-e),但与锌、铅矿化富集不同,硫矿化富集区主要出现在中间—北东侧,尤其是北东一侧浅部富集更明显(见图5-e、f)。

此外,Zn和Pb在自然界最常见的化合价均为+2价,都有很强的亲硫性,易与硫离子结合形成硫化物^[19]。由于方铅矿(PbS)析出时的温度低于闪锌矿(ZnS),热液成因的矿床中,方铅矿多的位置反映当时的热液温度低, $w(\text{Zn})/w(\text{Pb})$ 值小;同理,闪锌矿多的位置热液温度相对高, $w(\text{Zn})/w(\text{Pb})$ 值变大。热液运移时温度逐渐降低, $w(\text{Zn})/w(\text{Pb})$ 值降低,因此 $w(\text{Zn})/w(\text{Pb})$ 值的变化可指示成矿热液的运移方向^[19-21]。

9号矿体的 $w(\text{Zn})/w(\text{Pb})$ 值北东高于南西(见图5-g、h),指示热液可能自北东向南西运移。同时,矿体的坑道地质调查表明,在北东端广泛发育断裂蚀变带,导致矿体周围的大理岩强烈褪色蚀变(见图6-a),以及矿体内部网脉状矿化增强(见图6-b)。综上所述,认为9号矿体北东端发育的断裂为热液活动提供了通道,使得此处的热液活动发育并向南西运移,伴随着围岩蚀变现象。

4 找矿方向

通过三维地质建模,对矿体形态及成矿元素变化



a—锌品位分布图(三维空间俯视图) b—锌品位三维空间分布图
c—铅品位分布图(三维空间俯视图) d—铅品位三维空间分布图
e—硫品位分布图(三维空间俯视图) f—硫品位三维空间分布图
g— $w(\text{Zn})/w(\text{Pb})$ 值分布图(三维空间俯视图)
h— $w(\text{Zn})/w(\text{Pb})$ 值三维空间分布图

图5 成矿元素空间分布图

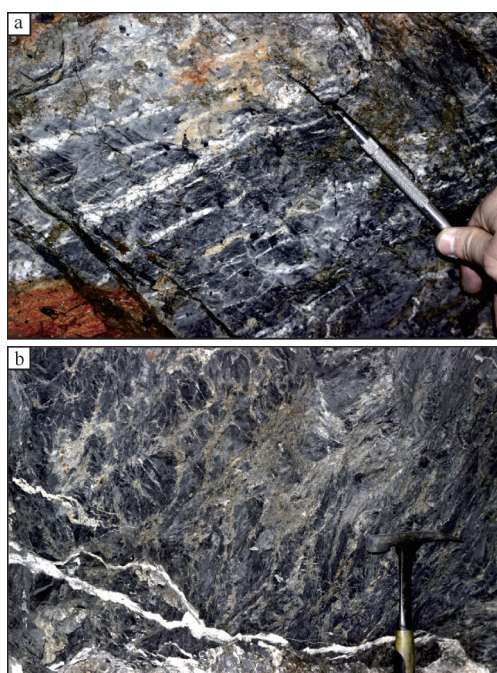
Fig. 5 Spatial distribution of ore-forming elements

特征进行分析,结合野外地质调查,认为三贵口硫锌多金属矿床9号矿体在北东侧仍然具有找矿潜力,主要判断依据如下:

1)已有坑探成果证实,矿区北东侧主要赋矿层位渣尔泰山群阿古鲁沟组一、二岩段,虽然总体厚度减薄,但岩性组合仍然为成矿有利的石墨片岩与含石墨的白云质大理岩(见图6)。

2)已有坑探成果证实,矿区北东侧9号矿体底板附近依然发育与本矿床形成密切相关的同生断层角砾,角砾之间被网脉状金属硫化物胶结(见图6-b),指示矿区北东侧仍然存在同生断裂,并伴有成矿热液活动。

3)9号矿体沿北东向形态变化很大,矿体边界呈锯齿状(见图4),同时伴有锌、铅局部矿化富集(见



a—含石墨白云质大理岩褪色蚀变现象 b—石墨片岩中广泛发育网脉状金属硫化物胶结的同生断层角砾

图6 9号矿体北东端矿化蚀变特征

Fig. 6 Mineralization and alteration characteristics at the NE end of No. 9 orebody

图5-a~d),矿体三维模型揭示了矿体形态及局部矿化富集受不对称褶皱控制,褶皱转折端对锌、铅矿化富集有控制作用(见图4),表明9号矿体北东侧可能存在受层内褶皱控制的富矿地段。

4)虽然矿区北东侧锌、铅矿化总体没有南西侧好,但 $w(\text{Zn})/w(\text{Pb})$ 值高(见图5-g,h),揭示矿区北东侧可能是相对高温成矿热液的活动中心,成矿热液向两侧可能会有一定的延伸。

5)赋矿的含石墨白云质大理岩及石墨片岩热液蚀变及矿化明显(见图6),并且硫化矿在北东侧局部富集(见图5-e,f),揭示矿区北东侧仍然存在较强成矿热液活动。

综上所述,矿区北东侧仍然具有较好的成矿条件及矿化显示,9号矿体向北东侧不会很快尖灭,仍会有一定的延伸。

5 结 语

采用Leapfrog软件三维建模,在矿区数据量增大时具有很好的优势,随着数据不断更新,Leapfrog软件可以按照已有规则自动更新模型,为成矿预测提供实时的模型参考。本文利用三维技术,从矿体形态、成矿元素分布和元素特征比值等3个方面对矿化空间

分布规律进行分析,认为9号矿体北东侧及矿区深部仍有一定的找矿潜力。该方法可为同类矿床找矿提供借鉴。

[参 考 文 献]

- [1] 魏民,赵鹏大.试论矿化空间分布的有序性规律及矿体定位预测[J].地球科学,1995,20(2):144-148.
- [2] BRUCE E H, ALISON O, THOMAS B. The spatial distributions of mineralisation[J]. Journal of Structural Geology, 2022, 156: 104529.
- [3] 王博雄,吕九辉,孙加.3DMine三维矿业软件在矿山地质中的应用[J].黄金,2024,45(1):30-33.
- [4] 刘星,陈友春.墨江金矿的矿化空间分布规律[J].云南地质,1992,11(1):58-62.
- [5] 李鹏.青海省锡铁山铅锌矿成矿控制因素矿化富集规律及找矿潜力评价[D].武汉:中国地质大学(武汉),2019.
- [6] 黄超,郎兴海,姜渝明,等.西藏雄村I号矿体三维地质建模与深部可视化应用[J].地质通报,2021,40(5):753-763.
- [7] 李敏,张子实,赵忠海,等.黑龙江省下嘎来奥伊河铅锌多金属矿床三维地质建模及深部找矿预测[J].黄金,2023,44(7):37-47.
- [8] 刘羽.金川铜镍矿床I矿区地质体三维建模与矿化空间分析[D].长沙:中南大学,2014.
- [9] 詹静一.内蒙古东升庙铅锌多金属硫铁矿床地质特征及成因探讨[J].西部资源,2017(6):12-19,23.
- [10] 龙露珍.内蒙古东升庙铅锌矿床地质特征及成因分析[D].长沙:中南大学,2009.
- [11] 高兆富.内蒙古东升庙矿床S-Pb-Fe-Zn同位素空间演化及其对矿床成因的指示[D].北京:中国地质大学(北京),2017.
- [12] 刘帅.内蒙古东升庙多金属硫铁矿床成矿地质特征与成因[D].长春:吉林大学,2019.
- [13] 中华人民共和国自然资源部.矿产地质勘查规范 铜、铅、锌、银、镍、钼:DZ/T 0214—2020[S].北京:地质出版社,2020.
- [14] 邵元敏,李顺达,黄丙湖.三山岛金矿床深部三维地质模型与资源量估算[J].黄金,2025,46(3):66-71.
- [15] 陈伟康,高帮飞,张书琛,等.距离幂次反比法(IDW)资源储量估算流程改进及应用[J].中国矿业,2022,31(4):181-188.
- [16] 景永波,杜菊民,陈春生,等.基于3DMine的断面法与距离幂次反比法对比[J].地质学刊,2021,45(3):271-276.
- [17] 尚琼.安徽省沙溪铜金矿床凤台山矿段三维建模及成矿元素空间分析[D].合肥:合肥工业大学,2014.
- [18] 谢徽,高帮飞,陈兴海,等.基于距离幂次反比(IDW)法进行资源量估算的应用研究[J].矿产勘查,2023,14(9):1693-1704.
- [19] 杨策婷,贾福聚,郑国龙,等.云南白牛厂银多金属矿床成矿元素组合与空间矿化规律研究[J].地质科学,2024,59(1):138-147.
- [20] 曾招阳.滇西金顶铅锌矿床北厂矿段的控矿条件[D].昆明:昆明理工大学,2021.
- [21] 蔡报元,张彦伟,郑伟,等.江西众埠街铅锌多金属矿床成矿热液运移方向及其找矿方向探讨[J].矿产与地质,2022,36(5):942-948.

(下转第91页)

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