

三维地质建模的应用示范 ——以白音诺尔铅锌矿为例

牛聪聪¹, 张平发², 高兆全², 范春宝², 苏凤波², 李敏², 段志伟²

(1. 中国有色桂林矿产地质研究院有限公司, 广西 桂林 541004;

2. 赤峰中色白音诺尔矿业有限公司, 内蒙古 赤峰 024005)

摘要:以国产DIMINE三维矿业软件为基础,系统收集整理了白音诺尔铅锌矿南矿段1号矿脉群750~800 m中段地质勘探资料,通过建立地质数据库,系统建立矿岩三维模型、数据的分析与处理以及资源储量估算整个流程,对比矿体与围岩模型特点、普通克里格估算方法与应用特点。研究表明:圈定矿体5条,模型显示矿体主要赋存在闪长玢岩与结晶灰岩接触带上,属典型的矽卡岩型矿床,空间展布形态呈囊状、大脉状、透镜状,整体北东走向;依据地质统计学理论,拟合求得理论变异函数应用于普通克里格估值,分别估算控制和探明资源量合计18.66万t,Pb+Zn品位为4.04%;与传统方法相比,普通克里格估算误差均在合理的范围之内,应用效果良好,估算精度高,可为矿山采矿设计提供参考,为实现矿山的数字化提供重要的理论依据。

关键词:三维地质建模;DIMINE;普通克里格法;白音诺尔铅锌矿;数字化

中图分类号:TD178

文献标志码:A

文章编号:1671-4172(2022)03-0108-08

Application of 3D geological modeling ——A case for Baiyinnuoer Pb-Zn deposit

NIU Congcong¹, ZHANG Pingfa², GAO Zhaoquan², FAN Chunbao², SU Fengbo²,

LI Min², DUAN Zhiwei²

(1. China Nonferrous Metals(Guilin)Geology and Mining Co., Ltd., Guilin Guangxi 541004, China;

2. Chifeng NFC Baiyinnuoer Mining Co., Ltd., Chifeng Inner Mongolia 024005, China)

Abstract:Based on the domestic 3D mining software DIMINE, the geological exploration data of the 750~800 m level section of No. 1 vein group in the South ore section of Baiyinnuoer Pb-Zn deposit are systematically collected and sorted. Through the establishment of a geological database, the three-dimensional model of ore and rock, the whole process of data analysis and processing and resource reserve estimation are systematically established, and the characteristics of the ore body and surrounding rock model, ordinary Kriging estimation method, and application characteristics are compared. The results show that five ore bodies are delineated. The model shows that the ore bodies are mainly located in the contact zone between diorite porphyrite and crystalline limestone which is a typical skarn deposit. The spatial distribution shape is saccular, large vein and lens, and the overall NE trend. According to the geostatistical theory, the theoretical variogram obtained by fitting is applied to the ordinary Kriging estimation. The total controlled and proved resources are estimated to be 186 600 tons and the Pb+Zn grade is 4.04%. Compared with traditional methods, ordinary Kriging estimation errors are within a reasonable range, with good application effect and high estimation accuracy. It can provide a reference for mining design and provide an important theoretical basis for realizing mine digitization.

Key words:3D geological modeling; DIMINE; ordinary Kriging method; Baiyinnuoer Pb-Zn deposit; digitization

收稿日期:2021-05-10

基金项目:中色集团科技计划项目(2020KJJH15)

作者简介:牛聪聪(1987—),男,高级工程师,硕士,地质工程专业,主要从事矿床学、数字矿山研究工作。

DIMINE 三维软件功能涵盖地质、勘探、资源储量估算、露天和地下采矿设计等,其操作简便、直观、快捷、精确,对矿山资源、环境有较高的适应性,

尤其是在创建矿山地表、矿体、井巷等三维可视化、信息化模型方面有着突出的表现,以矿山数据库为核心的计算机系统为基础,实现对矿山自动化管理以及后期数据的挖掘^[1-4]。三维软件拥有真实、直观地展现各个地质体之间关系的各种优势,已经在国内外多个矿山中得以应用,中色集团在国外深耕多年,尤其是在非洲南部赞比亚、刚果(金)所收购的大型铜钴矿山,其矿山的开发和运营均已实现数字化,为推进矿山数字化建设,本次研究以中色集团白音诺尔铅锌矿为例,结合矿山实际情况对数字化建模进行示范研究,选择典型矿段进行地质建模,并讨论其建模—数据分析—储量估算全过程应用特点,总结地质建模应用经验与存在的不足,为实现下一步矿山的资源动态管理、采矿数字化打下基础。

1 矿区地质概况

大兴安岭地区是中国东部重要的成矿集中区之

一,最具代表性矿种有铅-锌-铜-钼-锡-银-金^[5-6]。白音诺尔铅锌矿位于大兴安岭中南段黄岗—甘珠尔庙成矿带上,地层是以晚古生代地层为基底,上覆侏罗系-白垩系的陆相火山岩,走向北东,受北东向断裂与褶皱控制,区域构造上位于贺根山断裂与西拉木伦河断裂之间,后被北东向嫩江断裂错断,属于中亚造山带的东段(图1),岩浆岩以大规模的中酸性岩浆侵入为特征,与同时代的陆相火山岩系构成了同源、同时、异相的火山侵入杂岩。

白音诺尔铅锌矿区地层主要为二叠系哲斯组一套浅变质海相砂泥质—碳酸盐岩沉积建造,岩性为结晶灰岩、大理岩、板岩,上覆一套以流纹岩、流纹质凝灰岩、凝灰熔岩为主的侏罗系火山岩,矿区构造以断裂为主,呈北北东向平行排列,控制了矿体的整体展布形态,侵入岩以花岗闪长岩、中性闪长玢岩为主,与成矿关系密切,发育有多条北西向的后期破矿脉岩,岩性为石英斑岩、正长斑岩等(图1)。

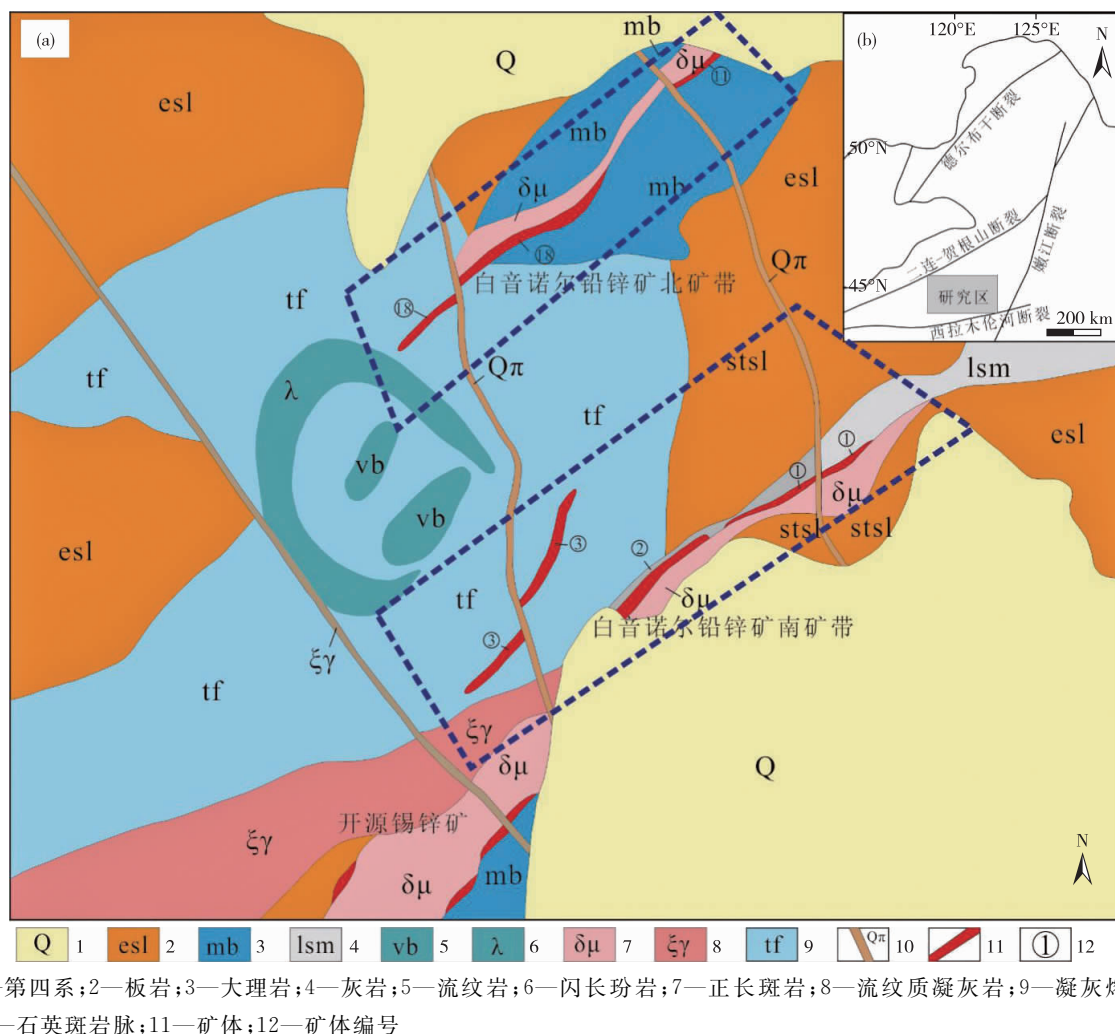


图1 白音诺尔矿区地质简图

Fig. 1 Geological map of Baiyinnuoer mining area

矿区内矿体多,且形态较复杂,厚度、品位及产状变化较大,矿体成群、成带分布规律性较强^[6]。依据矿体分布特点、构造控矿因素特征分为南、北两个矿带。北矿带位于矿区中部山脊北侧,白音诺尔背斜的北西翼,长度1 300 m,宽600 m,矿体多而形态复杂,共圈定工业矿体33条,矿体绝大多数赋存于闪长玢岩与大理岩接触带及其附近的矽卡岩中,顶底板围岩主要为闪长玢岩、板岩、大理岩等;南矿带位于中部山脊的南侧,长1 100 m,宽200~400 m,矿体群较集中,共圈定工业矿体35条,依据矿体赋存规律分为3个矿脉群(编号为1号、2号、3号),1号、2号矿脉群赋矿层位位于闪长玢岩与结晶灰岩的接触带上,具有典型的矽卡岩成矿特点,3号矿脉群赋存于流纹质凝灰岩中,矿体受构造控制,矽卡岩化蚀变较弱,本文所研究的三维地质建模矿体为南矿带1号矿脉群(图1)。

2 数据库的建立及地质建模应用流程

数字矿山建设的目的是建立以矿山数据库为核心的计算机系统,从而实现对矿山资源量的动态管理^[7]。地质建模工作流程如下:1)建立矿山地质数据库;2)提取地质体相关信息,进行地质解译;3)分析不同地质体的三维形态,确定建模方法;4)对不同地质体分别进行建模,建立空间实体模型;5)对样品数据进行分析处理(包括特高品位处理和样品组合);6)建立空的矿块模型,对空块进行品位插值;7)资源储量估算。本次研究选取建立数据库区域为白音诺尔铅锌矿南矿带1号矿脉群750~800 m中段,地质数据库的数据源主要为坑内钻孔数据、地质平面图、剖面图,在Excel中

分别录入钻孔孔口、钻孔测斜、钻孔样品、钻孔岩性数据,本次建模共搜集钻孔458个,测斜数据826个,钻孔样品2 970个,岩性数据4 100个,导入DIMINE软件中校验和修正样品数据,最后合并为地质数据库。

3 三维建模的应用

3.1 实体模型建立

实体模型主要包括矿体和围岩模型,主要是根据不同勘探线剖面勾勒出不同岩性轮廓线、矿体轮廓线为基础,圈连三角网线框模型,最终将不同三角网合并自动生成闭合的实体模型。白音诺尔矿区铅锌矿体形态复杂,条数众多,整体工程勘查类型为Ⅲ类偏复杂型,矿体工程网度为12.5 m(走向)×12.5 m(倾向),依据施工钻孔地质特征依次建立围岩模型和矿体模型(见图2)。

围岩模型:围岩建模的关键在于确定不同岩性之间的界线,矿区地层岩性有结晶灰岩、大理岩、板岩,侵入岩有闪长玢岩、石英斑岩、安山玢岩,蚀变岩有矽卡岩,石英斑岩、安山玢岩为后期穿插小岩脉,形态变化大。在本次围岩建模工作过程中,结晶灰岩、板岩、闪长玢岩面积较大,依据剖面信息圈定了岩性的界线,同时忽视其中细小脉岩的穿插。依次连接构建围岩实体模型图:1)二叠系板岩(esl),位于工作区北部和南部,用黄色显示;2)二叠系灰岩(lsm),位于工作区中西部和东部,用灰白色显示;3)闪长玢岩($\delta\mu$),位于工作区中部和南东部,用粉色显示;4)石英斑岩($q\pi$),位于工作区西部,穿插于闪长玢岩中,用蓝色显示;5)矽卡岩(sk),位于工作区西部,用绿色显示(见图2-a)。

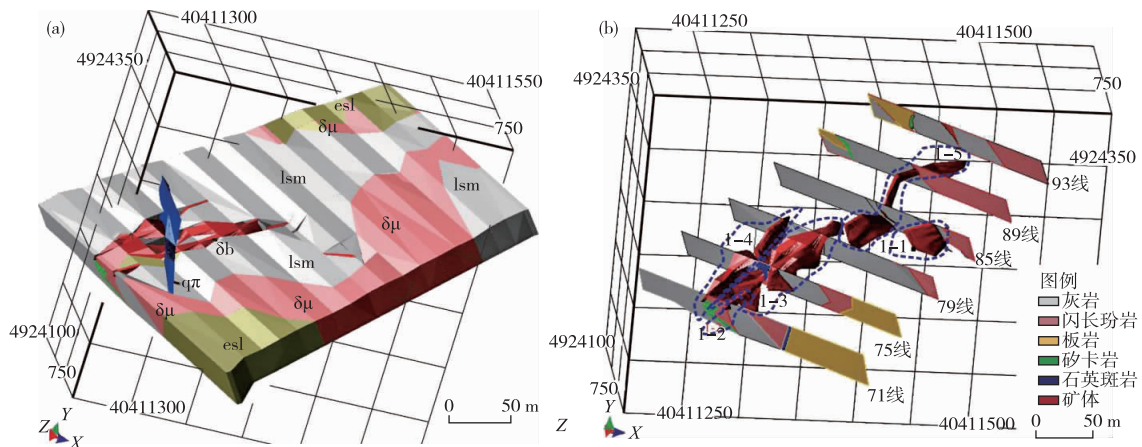


图2 矿体及围岩模型三维视图

Fig. 2 3D view of surrounding rock and orebody model

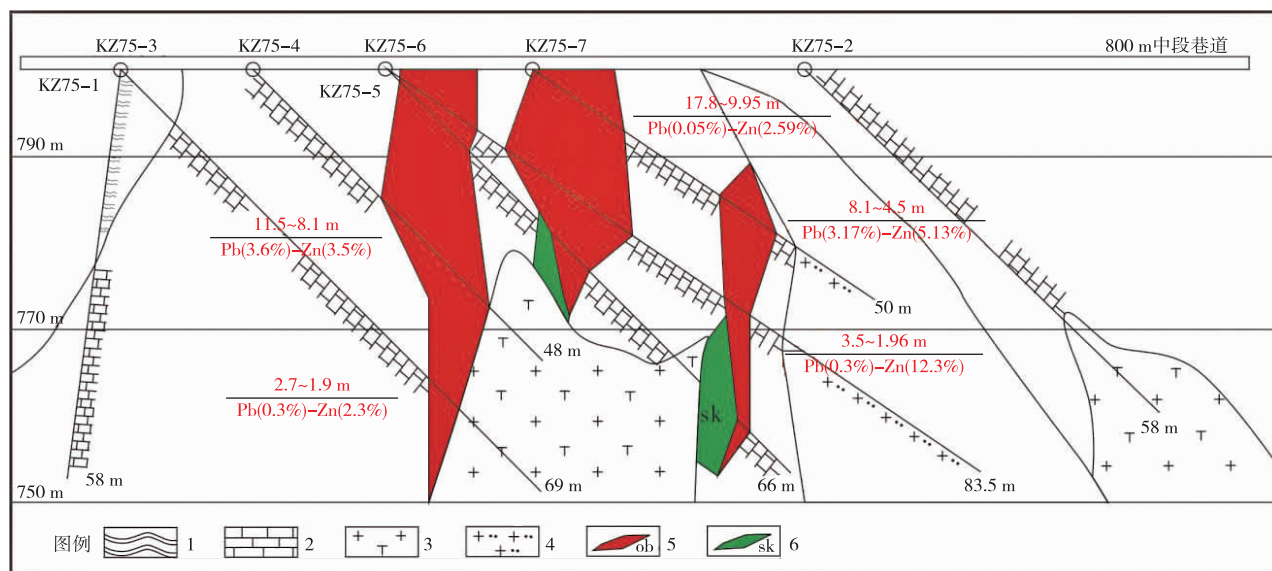
矿体模型:依据地质信息共圈定规模较大矿体5条,编号分别为1-1、1-2、1-3、1-4、1-5(图2-b)。1-1矿体位于79~85勘探线之间,呈囊状、脉状,走向NE,倾向SE,倾角 55° ,走向长45 m,围岩为结晶灰岩;1-2矿体位于71~73勘探线之间,呈透镜状、脉状,走向NE,倾向SE,倾角 80° ,走向长30 m,少量工程控制,位于闪长玢岩和结晶灰岩接触带上;1-3矿体位于69~83勘探线之间,呈大脉状,走向NE,倾向SE,倾角 $67^{\circ}\sim 85^{\circ}$,走向长140 m,矿体在71~73线之间被石英斑岩错断(图3),75~79线矿脉出现先分支后复合,围岩为结晶灰岩;1-4矿体位于69~79勘探线之间,呈大脉状、纺锤体状,整体走向NE,倾向SE,倾角 $67^{\circ}\sim 85^{\circ}$,走向长110 m,矿体在73~75勘探线之间被石英斑岩错断,围岩上盘为结晶灰岩,下盘为闪长玢岩;1-5矿体位于79~91勘探线之间,呈大脉状、整体呈“Z”字状,走向NE,倾向SE,走向长度120 m,倾角 $55^{\circ}\sim 70^{\circ}$,围岩从西至东由结晶灰岩变为闪长玢岩。

3.2 样品数据的分析与处理

样品数据处理的目的是确保运用于估值的参数均为无偏估计值,包括样长组合和特高品位处理,即对地质数据库中的数据进行统计分析处理后得到的

正态分布数据。根据地质统计学原理,组合样是将空间不等长的样品长度和品位量化到一些离散点上,所有的样品数据应落在相同的承载上,即同类参数的地质样品段的长度应该一致。同时由于样品特高品位值将直接影响变量的分布特征,会造成资源量估算错误,因此必须对其进行处理^[8-11]。

统计分析样品样长特点后,选择“样长组合”方法按平均样长(1.5 m)对所有样品进行组合,设定最小组合样长为原始样品长度的75%,即1.15 m;针对白音诺尔铅锌矿床的产出特征及赋存状态,沿用历年勘查资料估算参数,设定品位值高于矿段平均品位6倍的样品为特高品位样品,采用“平均品位替换法”进行处理。处理后结果显示Pb品位大部分位于1%以下,平均值为0.34%,最大值为3.48%,变化系数为1.71;Zn品位大部分位于5%以下,平均值为3.30%,最大值为19.74%,变化系数为1.10,Pb-Zn品位变化散点图显示两种元素无明显线性关系(图4-a),正态分布PP图及品位直方图显示样品品位总体变化不大,呈线性相关,属均匀变化型矿体(图4-b、图4-c);Ag作为伴生矿物,整体品位较低,平均品位为 10×10^{-6} ,综合利用价值不大。



1—板岩; 2—结晶灰岩; 3—闪长玢岩; 4—石英斑岩; 5—矿体; 6—砂卡岩

图3 750~800 m中段73线地质剖面图

Fig. 3 Geological profile of section 73 between 750—800 m level

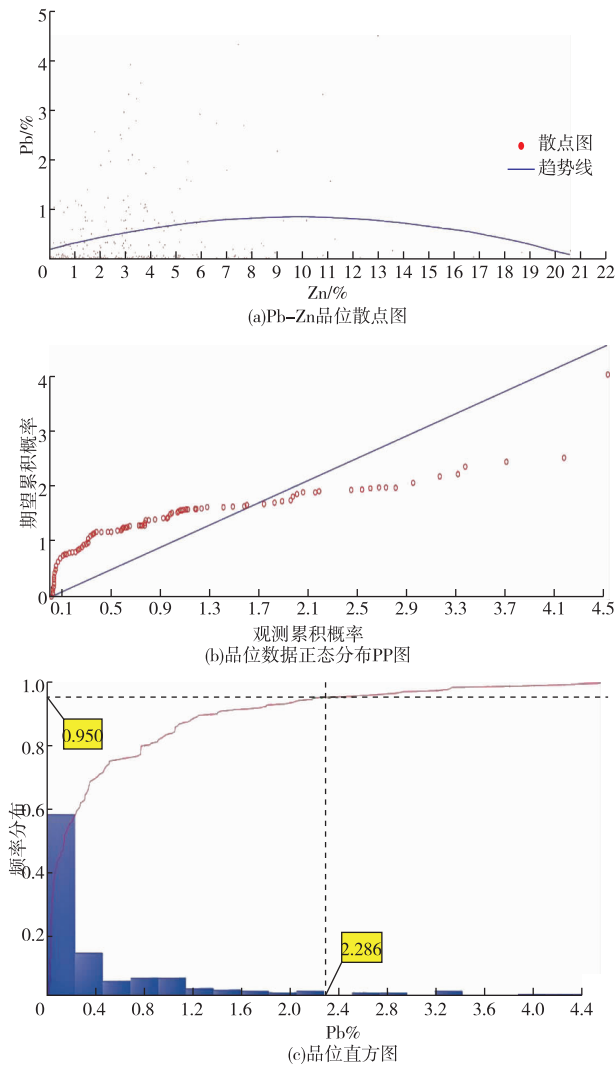


图4 样品品位分析图

Fig. 4 Analysis of sample grade

3.3 资源量估算方法应用对比

3.3.1 估算方法

三维软件中用于资源储量估算的方法有距离幂次反比法、克里格法,均已具备了较为完整的理论体系。其中克里格法又分为简单克里格、普通克里格和对数正态克里格法等,普通克里格法可根据变化的品位均值推估不同距离样品点的数据信息,即拟合出符合品位分布规律的变异函数,样品数据的统计特征服从正态分布,符合大多数矿床品位信息的统计规律,因此,普通克里格法已成为目前矿山应用较广泛的克里格插值方法^[12-13]。本文主要通过普通克里格法进行资源量估算,并将其估算结果和距离幂次反比法、传统块段法估算结果进行对比。

1) 变异函数的确定

在对地质样品分析数据处理的基础上,利用

软件中的统计与分析功能,对实验变异函数进行测算,设置实验变异函数的各项参数(包括方位、倾角、容差角、容差限、滞后距),选择球状模型对变异函数进行拟合,最终确定矿体在三个方向上的变异函数参数。根据本区矿体模型特点,设置主轴实验变异函数的方位角为 45° ,次轴的方位角应该与主轴方位角垂直,次轴的方位角应该设置为 135° ,第三轴方位角自动计算为 50° ,显示出3个方向上的实验变异函数曲线,多次调整滞后距,拟合后得到理论变异函数参数块金值为0.033,基台值为0.329 m,变程为47.745 m(图5),作为后续估值的依据。

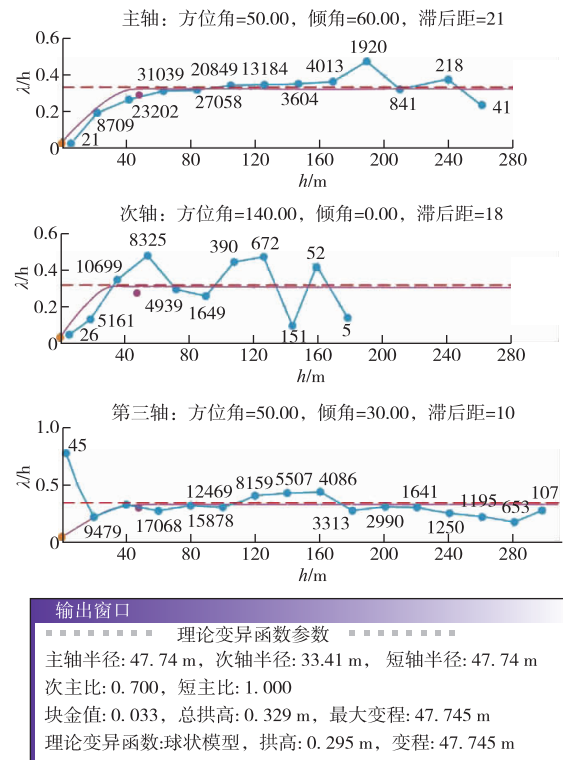


图5 实验变异函数曲线及计算参数

Fig. 5 Experimental variogram curve and calculation parameters

2) 交叉验证

交差验证的实质是比较克里格估值与真实值的偏差,并对其差值进行统计分析,以判断所拟合的变异函数参数是否正确^[12]。

从图6、图7可以看出,组合样实际值与估值几乎重合,Pb、Zn元素误差均值分别为0.001 4、0.045 6,趋近于零,方差估计值接近,误差直方图显示差异均趋近于零(表1),表明变异函数的参数对组合样品估计是无偏差的,可以用于矿区内金属元素Pb、Zn的品位估值。

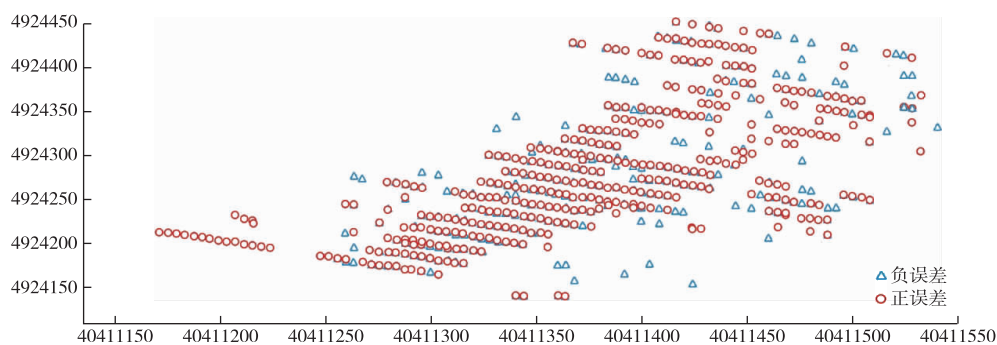


图 6 交叉验证误差图(单位:m)

Fig. 6 Cross validation error diagram(Unit:m)

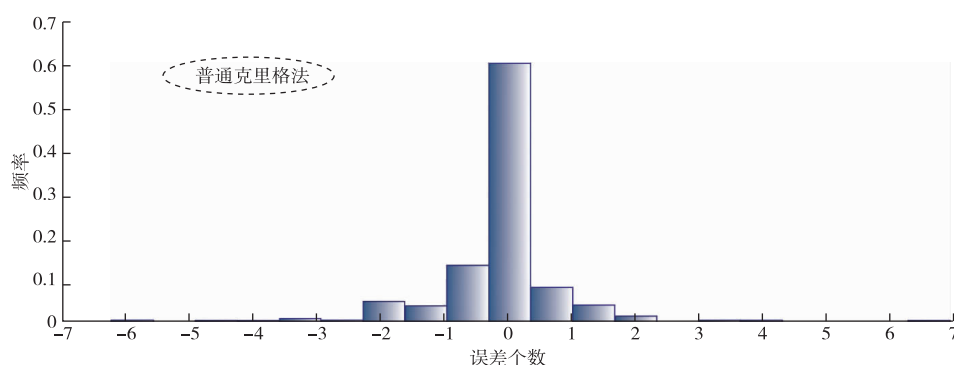


图 7 误差频率统计直方图

Fig. 7 Error frequency histogram of estimation method

表 1 各项异性变异函数参数交叉验证结果

Table 1 Cross validation results of heterosexual variogram parameters

金属元素		Pb	Zn
样品数量/个		2 849	2 888
原始值	均值	0.338 6	1.482 2
	方差	0.334 4	0.005 1
估计值	均值	0.337 2	1.436 6
	方差	0.192 6	0.072 1
误差值	均值	0.001 4	0.045 6
	方差	0.208 5	0.072 3

3.3.2 储量估算

1) 块体模型

建立空块体模型是为了对圈定矿体进行资源储量估算,在确定最小单元块段尺寸时,需要考虑采矿方法、最小采矿单元、矿区的勘探网度以及变异函数的特征等因素,对品位变化较大的矿床,为了能够比较精确地控制及圈定矿体边界,选择相对小的单元块尺寸更有利于零星小矿体的圈定和资源评价^[14-15]。本次建模确定的块体模型单元块尺寸为 2.5 m×2.5 m×1.5 m,可分解的最小单元块尺寸为 1.25 m×1.25 m×0.75 m。

2) 估算结果

在多次调整搜索距离和角度等搜索参数后,将所有 28 857 个块体全部估算完毕,并对单个块体体重、控制级别等参数进行赋值,块体资源量控制级别及品位分布特征如图 8 所示。依据划分出其地质可靠程度,可以很直观地描述矿体内部品位变化趋势及不同品级的分布特征,为矿山基础建设及实现后期的生产动态管理提供科学的理论指导。1-1、1-3、1-4 号矿体为探明主矿体,Pb+Zn 的平均品位在 3.0% 以上,合计资源量 17.30 万 t,占资源量的 92.69%,也是下一步拟做采准工程的厚大矿体;1-2、1-5 号矿体由少量工程控制,控制资源量合计 1.36 万 t(表 2)。

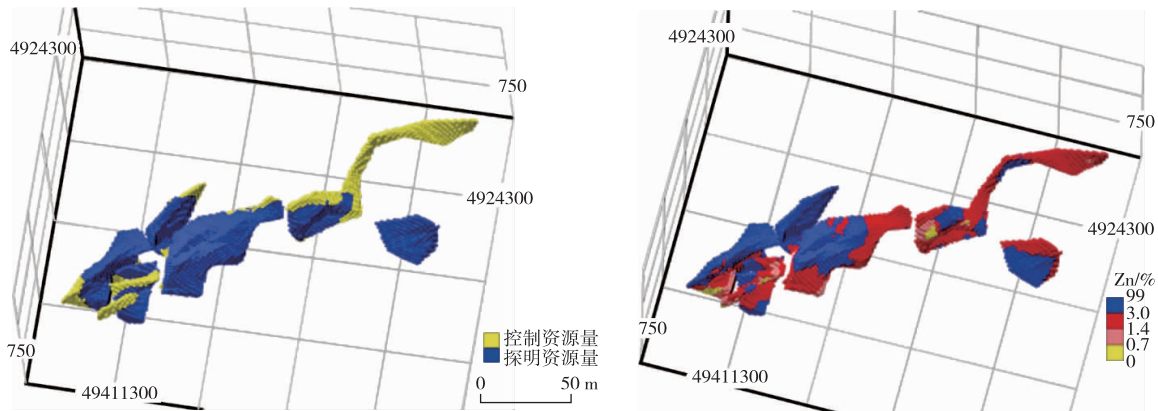


图 8 储量估算级别及 Zn 元素品位分布图
Fig. 8 Reserves estimation level and Zn grade distribution

表 2 白音诺尔南矿段 1 号矿脉群资源量估算表(普通克里格法)

Table 2 Resource reserve estimation table of No. 1 vein group in Baiyinnuoer(ordinary Kriging method)

矿体号	标高/m	体重/(t·m ⁻³)	矿石量/t	Pb/%	Zn/%	Pb+Zn/%	金属量/t
1-1	750~800	3.40	24 648.84	0.59	4.33	4.92	1 212.72
1-2	750~800	3.40	1 039.92	0.12	1.31	1.43	14.87
1-3	750~800	3.40	95 954.38	0.30	2.61	2.90	2 782.68
1-4	750~800	3.40	52 370.63	0.47	4.24	4.71	2 466.66
1-5	750~800	3.40	12 586.64	0.68	2.37	3.05	383.89
合计		3.40	186 600.41	0.44	3.60	4.04	7 538.66

3)对比分析

利用传统储量估算法(地质块段法)、三维软件距离幂次反比法和克里格估值法按照相同的圈连原则对该矿段的资源量分别计算,计算结果对比数据见表 3。与传统估算法的估算结果相比,普通克里格法估算矿石量误差为 0.5%,品位误差为 5.76%,

二者较为接近,较好地反映矿山实际情况,适用性较好;距离幂次反比法估算矿石量误差为 1.63%,品位误差 15.56%,品位估算结果超差较大,说明在估算的过程中普通克里格法变异函数的应用更能精确的对块体进行空间插值。

表 3 资源量估算结果误差对比表
Table 3 Error comparison of estimation results

误差对比	传统块段法	普通克里格	距离幂次反比法
矿石量/t	187 541.80	186 600.41	189 643.00
Pb 品位/%	0.45	0.44	0.48
Zn 品位/%	3.37	3.60	3.68
Pb+Zn 品位/%	3.82	4.04	4.16
矿石量误差统计/%	—	-0.50	1.63
品位误差统计/%	—	5.76	15.56

4 结论

1)本次三维软件应用为根据地质建模流程分别建立了围岩和矿体模型,模型显示矿床类型为典型矽卡岩型(厚大矿体主要赋存于结晶灰岩和闪长玢岩接触带上),共圈定矿体 5 条,空间形态呈囊状、大脉状、透镜状,整体北东走向。

2)克里格估算方法中样品统计分析显示 Pb 品位平均值为 0.34%,Zn 品位平均值为 3.3%,Ag 品

位平均值为 10×10^{-6} ,直方统计图显示属本区矿体均匀变化型,并通过交叉验证方式确定了理论变异函数块金值、基台值和变程运用于资源量估算,块体模型分割单元块尺寸为 2.5 m×2.5 m×1.5 m,可分解的最小单元块尺寸为 1.25 m×1.25 m×0.75 m,估算矿石量 18.66 万 t,Pb+Zn 品位为 4.04%。

3)估算结果显示各种方法相互验证,矿石量误差均在 5%以内,说明三种估算方法都是可靠的。普通克里格方法与传统地质块段法无论是矿石量还

是金属量都非常接近,距离幂次反比法与地质块段法相比,品位估算误差相对较大,说明在估算的过程中变异函数的应用更能精确地对矿体进行估值,同时,相比较于传统方法,节省了大量的估算时间,降低了计算误差率,这也在大部分数字化矿山的实践中得到了证明。

参 考 文 献

- [1] 姜华,秦德先,陈爱兵,等. 国内外矿业软件的研究现状及发展趋势[J]. 矿产与地质, 2005, 19(4): 422-425.
JIANG Hua, QIN Dexian, CHEN Aibing, et al. Status and tendency of mining software development at home and abroad[J]. Mineral Resources and Geology, 2005, 19(4): 422-425.
- [2] 李瑞喜,王功文,张寿庭,等. 地学信息三维量化提取与集成——以河南栾川钼矿区为例[J]. 地质通报, 2014, 33(6): 883-893.
LI Ruixi, WANG Gongwen, ZHANG Shouting, et al. Three dimensional quantitative extraction and integration for geosciences information: A case study of the Luanchuan Mo ore district[J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33(6): 883-893.
- [3] 欧阳菲,罗先熔,王艳忠,等. 数字矿山建设及三维地质建模——以金厂金矿为例[J]. 桂林理工大学学报, 2016, 36(2): 214-222.
OUYANG Fei, LUO Xianrong, WANG Yanzhong, et al. Digital mine construction and 3D geological modeling in Jinchang gold deposit[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2016, 36(2): 214-222.
- [4] 覃鹏,黄学强,方科,等. Micromine 软件在谦比希东南矿体三维建模及资源量估算中的应用[J]. 矿产与地质, 2016, 30(3): 501-504.
QIN Peng, HUANG Xueqiang, FANG Ke, et al. Application of software Micromine in 3D modeling and resource estimation of Chambishi Southeast orebody in Zambia[J]. Mineral Resources and Geology, 2016, 30(3): 501-504.
- [5] 王京彬,王玉往,王莉娟. 大兴安岭南段锡多金属成矿系列[J]. 地质与勘探, 2005, 41(6): 18-23.
WANG Jingbin, WANG Yuwang, WANG Lijuan. Tin-Polymetallic metallogenic series in the southern part of Dahinggan mountains, China[J]. Geology and Prospecting, 2005, 41(6): 18-23.
- [6] 杜青松,鄂阿强,李志华,等. 白音诺尔-双尖子山-浩布高多金属矿集区基本地质特征[J]. 有色金属科学与工程, 2017, 8(2): 63-69.
DU Qingsong, E Aqiang, LI Zhihua, et al. Basic geological features of polymetallic deposit concentration areas in Baiyinnuoer—Shuangjianzishan—Haobugao [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2017, 8(2): 63-69.
- [7] 余臻,李峰,张达兵,等. 基于 DIMINE 的红龙厂铜矿床地质建模与储量计算[J]. 金属矿山, 2015, 44(2): 108-112.
YU Can, LI Feng, ZHANG Dabing, et al. Geological modeling and calculation of the reserves of Honglongchang copper deposit based on DIMINE [J]. Metal Mine, 2015, 44(2): 108-112.
- [8] 李家泉,代碧波,张伟. 基于三维可视化建模技术的矿石品位空间分布研究[J]. 金属矿山, 2007, 36(12): 75-78.
LI Jiaquan, DAI Bibo, ZHANG Wei. Study on spatial distribution of ore grade based on 3D visualization modeling technology[J]. Metal Mine, 2007, 36(12): 75-78.
- [9] 梁景利. 关于传统固体矿产资源储量估算流程及估算参数选择的探讨[J]. 有色金属(矿山部分), 2021, 73(1): 53-61.
LIANG Jingli. Discussion on the traditional solid mineral resource reserves estimation process and the selection of estimation parameters [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2021, 73(1): 53-61.
- [10] 万昌林,朱利平,高祥. 应用地质统计学评估福建某铜矿资源[J]. 金属矿山, 2002, 31(6): 49-52.
WAN Changlin, ZHU Liping, GAO Xiang. Applying geological statistics to evaluate a certain copper ore resource in Fujian[J]. Metal Mine, 2002, 31(6): 49-52.
- [11] 罗周全,刘晓明,吴亚斌,等. 地质统计学在多金属矿床储量计算中的应用研究[J]. 地质与勘探, 2007, 43(3): 83-87.
LUO Zhouquan, LIU Xiaoming, WU Yabin, et al. Application of geostatistics in polymetallic deposit reserves calculation[J]. Geology and Prospecting, 2007, 43(3): 83-87.
- [12] 羊劲松,余臻,冯兴隆,等. 云南普朗铜矿三维地质建模及储量估算[J]. 现代矿业, 2017, 33(5): 48-53.
YANG Jinsong, YU Can, FENG Xinglong, et al. Three-dimensional geological modeling and reserve estimation of Pulang copper deposit in Yunnan province[J]. Modern Mining, 2017, 33(5): 48-53.
- [13] 向中林,王妍,王润怀,等. 基于钻孔数据的矿山三维地质建模及可视化过程研究[J]. 地质与勘探, 2009, 45(1): 75-81.
XIANG Zhonglin, WANG Yan, WANG Runhuai, et al. 3D geological modeling and visualization process of mines based on borehole data [J]. Geology and Prospecting, 2009, 45(1): 75-81.
- [14] 叶思源,吴树仁,何淑军. 三维地质建模的数据融合与误差分析[J]. 桂林理工大学学报, 2010, 30(3): 350-355.
YE Siyuan, WU Shuren, HE Shujun. Data fusion and error analysis of 3D geological modeling [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2010, 30(3): 350-355.
- [15] 刘天娇,王功文. 三维地质建模与克里格法在栾川南泥湖钼矿田中的应用[J]. 矿床地质, 2014, 33(增刊1): 723-724.
LIU Tianjiao, WANG Gongwen. Application of 3D geological modeling and Kriging method in Nihumolybdenum ore field of south Luanchuan [J]. Mineral Deposits, 2014, 33(S1): 723-724.

(编辑:周叶)