

三山岛金矿床深部三维地质模型与资源量估算

邴元敏^{1,2},李顺达²,黄丙湖^{1*}

(1. 中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院; 2. 日照职业技术学院建筑工程系)

摘要:为助力三山岛金矿床深部资源的开发利用,采用多源数据融合法,收集整理相关地质资料,创建综合地质数据库,进行地质-地球物理综合分析,实现了对断裂深部延伸趋势的推测,构建了地表、地球物理、断裂、蚀变带、矿体等5种数字化地质模型,在三维地质模型透明可视化集成的基础上,研究了其分布规律和相互关系,进而创建矿体模型,采用距离幂次反比法估算矿体资源量。研究表明,矿体主要赋存于黄铁绢英岩化碎裂岩中,在走向、倾向上受三山岛断裂控制,主要分布在其下盘,且富集于主断裂由陡变缓的转折处,在F₃断裂上被切割;采用距离幂次反比法估算矿体资源量,矿体1金金属量为145.47 t,并验证了结果的可靠性。

关键词:三山岛金矿床;深部;三维地质模型;资源量;估算;地质-地球物理;距离幂次反比法

中图分类号:TD11 P618.51

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)03-0066-06

doi:10.11792/hj20250312

引言

目前,浅部矿产资源逐渐被开采殆尽,为解决矿产资源危机,深部找矿成为迫在眉睫的地质任务。助力中国矿山勘探走向深处,是研究人员的重要研究方向^[1-2]。三维地质模型及资源量估算可以三维形式将矿体、断裂等地质体展示出来,并突出地质空间分布特征及内部属性,为深部找矿提供支撑^[3-6]。

三维地质模型最早于20世纪90年代提出,后被广泛应用于固体矿产勘探、油田开发和地质工程等领域,通过模拟地质体形态及相互关系,为资源开发及工程管理提供重要帮助^[7]。吴志春等^[8]采用多源数据融合法构建模型,有效提升模型精度;祝嵩等^[9]采用钻孔建模法构建集成模型,但未进行透明可视化设置,浅层模型会对深部模型产生遮挡,模型直观性较差。本文根据已采集的数据类型和三山岛金矿床地质条件,综合地质剖面法及多源数据融合法对地质体进行三维建模,并进行透明可视化集成,进而分析矿体形态、分布并进行资源量估算。

传统资源量估算法适用于钻孔稀疏的情况,而基于三维地质模型的资源量估算在块体品位细节描述上更占优势。为提高资源量估算的可靠性,国内外多名学者基于三维地质模型,将统计学运用到地质分析中,进而科学高效地实现资源量估算^[10-11]。孙远强等^[12]基于三维地质模型,利用距离幂次反比法合理进

行品位插值估算,较传统资源量估算法结果更为准确且效率更高。距离幂次反比法可以在矿体约束发生变化时,只改变参数便得到不同类别的资源量估算结果,无需重新建模,节省时间;该方法基于地质变量各向同性的假设,通过插值快速获取未知点的品位。基于传统资源量估算法核验估算值,可进一步保证估算结果的可靠性^[12-15]。

本文从三山岛金矿床深部找矿出发,采集最大深度达4 006.17 m的地质数据,实现三维地质模型的透明可视化集成,进而利用距离幂次反比法估算资源量,使用传统块段法评估资源量的可靠性,为后续找矿提供了有力支持。

1 矿区地质概况

三山岛金矿床地处山东省东部沿海,胶东半岛西北部,属于华北地层大区,鲁东地层分区。矿区出露地层主要为新生界第四系全新统和更新统。矿区位于环太平洋花岗岩带,岩浆活动强烈,侵入岩大量分布。其中,马连庄序列和栖霞序列是与金矿化关系密切且分布范围最广的主要岩石序列。矿区发育脆性断裂,基本构造格架走向为北东向、北西向(见图1)。北东向三山岛断裂具有连续稳定的主裂面,主要由绢英岩、糜棱岩和碎裂岩组成,规模较大,两端延伸入海,陆地长约12 km,平面展布呈S形,总体走向40°,局部走向70°~80°,倾向南东,倾角45°~75°;北西向

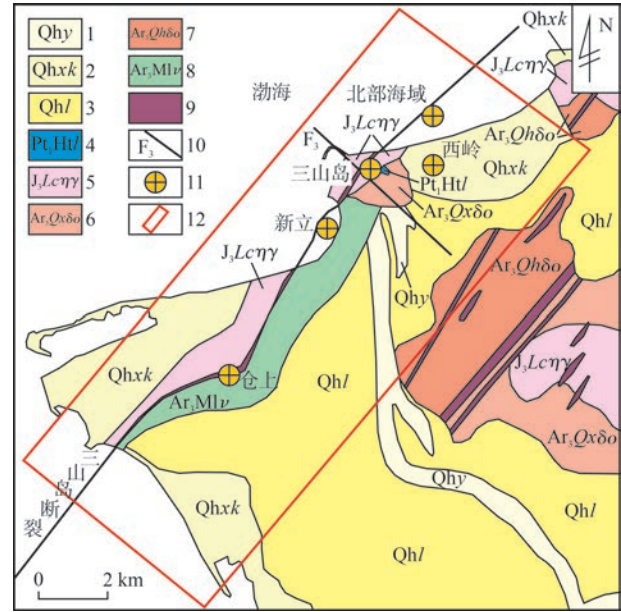
收稿日期:2024-09-20;修回日期:2024-11-12

基金项目:国家自然科学基金项目(41976184)

作者简介:邴元敏(1996—),女,助教,硕士,研究方向为三维地质建模、测绘地理信息等;E-mail:bymin0903@163.com

*通信作者:黄丙湖(1977—),男,副教授,博士,研究方向为三维地理信息系统、移动地理信息系统等;E-mail:huangbhu@163.com

F₃断裂的西北端延伸入海,总体走向为130°,倾向北东,倾角大于80°,局部呈现近直立状态,形成晚于三山岛断裂,并将其切割^[16-21]。



1—第四系沂河组 2—第四系旭口组 3—第四系临沂组
4—古元古界荆山群绿岭庄组 5—玲珑序列崔召单元
6—栖霞序列新庄单元 7—栖霞序列回龙单元
8—马连庄序列栾家寨单元 9—蚀变带 10—断裂及编号
11—矿床 12—研究区

图1 三山岛金矿区地质简图

Fig. 1 Geological sketch of the Sanshandao Gold District

2 三维地质模型

2.1 地质数据库创建

2.1.1 数据预处理

通过钻探方式对三山岛金矿床进行数据采集,共设置84条勘探线,对钻探数据进行筛选、清洗、融合等预处理操作,消除异常值,补充缺失值,得到开孔信息491条、岩性数据6327条、化验数据60605条、测斜数据6209条、视电阻率异常数据61705条。部分岩性数据见表1。

2.1.2 三维地质数据库建立

采用Access2000作为三维地质数据库建设软件。首先,基于Surpac软件建立地质数据库,并依据三山岛金矿床地质特征,设计数据库结构,分别创建孔口表、岩性表、化验表、测斜表、地球物理反演数据表等表格,最终进行地质数据的三维可视化,钻孔三维展示效果见图2。

2.2 地表模型建立

为了清晰展示地表起伏,显示钻孔、断裂、蚀变带、地球物理模型和矿体与地表的空间关系,基于Surpac软件构建数字地表模型(DTM)。DTM由矿区内等高线形成,以收集到的地质图件为原始资料,进行高程属性提取,将等高线数据经过MapGIS和AutoCAD

表1 部分岩性数据

Table 1 Part of lithology data

岩层序号	起始深度/m	终止深度/m	层厚/m	岩芯长度/m	地层代号	蚀变类型代号	岩性代号	岩性名称
1	8.78	39.75	30.97	28.16	Q		Q	第四系
2	39.75	52.55	12.80	12.18	J ₃ L		ηγ	二长花岗岩
3	52.55	67.87	15.52	14.89	J ₃ L	SJH	SJH	黄铁绢英岩化碎裂岩
4	67.87	68.07	0.20	0.20	J ₃ L	F ₁	F ₁	断层泥
5	68.07	128.81	60.74	60.22	J ₃ L	JHSγ	JHSγ	黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩
6	128.81	185.33	56.52	56.32	J ₃ L	JSγ	JSγ	绢英岩化花岗质碎裂岩
7	185.33	209.10	23.77	23.77	J ₃ L	Jγ	Jγ	绢英岩化花岗岩

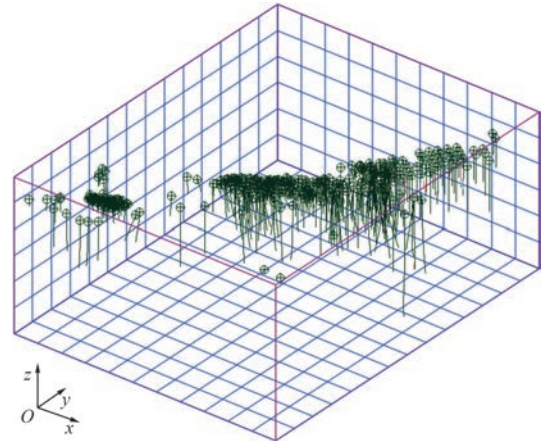


图2 钻孔三维展示效果

Fig. 2 3D display of boreholes

数据转换及冗余处理后,基于DTM结合高程着色,三维地表模型见图3,遥感影像与钻孔的叠加显示见图4。

2.3 地球物理模型建立

为了研究控矿断裂在三山岛金矿床南部向深部延伸变化、基岩分布状况及对深部矿体进行三维定量预测,进行大地电磁测深(MT)数据采集工作,并对MT数据进行二维反演处理,获取各剖面在不同深度的视电阻率属性信息和等值线图,分析不同深度属性信息反映的岩性信息,岩性由浅至深分别为第四系、老地层、三山岛断裂和花岗岩,基于Surpac软件构建不同属性曲面,建立视电阻率属性模型,结果见图5。

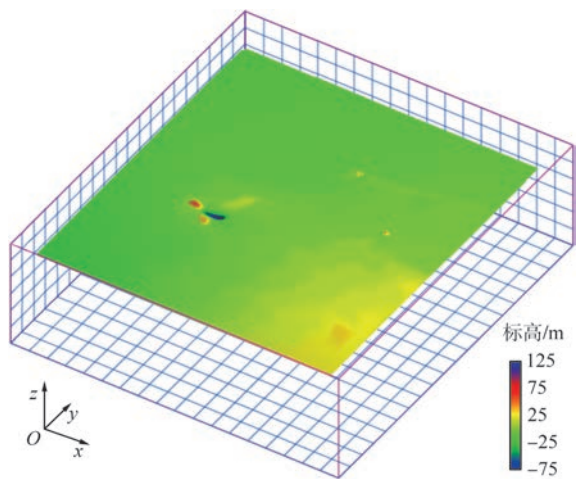


图3 三维地表模型
Fig. 3 3D surface model

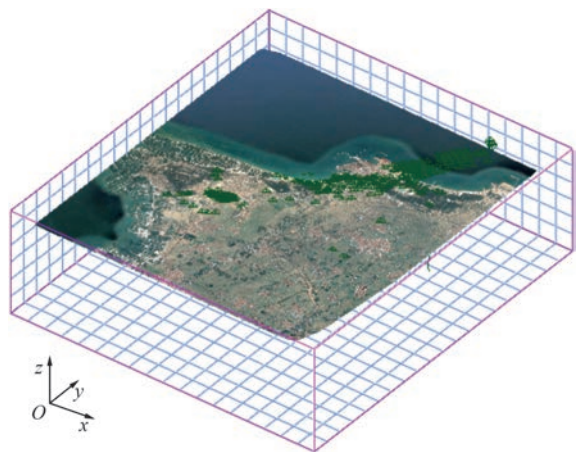


图4 遥感影像与钻孔的叠加显示
Fig. 4 Remote sensing image overlay with boreholes

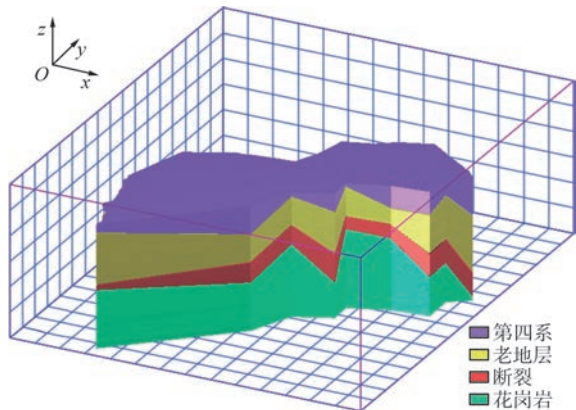


图5 视电阻率属性模型
Fig. 5 Apparent resistivity property model

2.4 断裂模型建立

断裂模型能够反映断裂与矿体的空间位置关系。利用采集的钻孔数据,结合该区域现有断裂走向、倾向、倾角、延伸、落差等地质资料及勘探线剖面,对各钻孔剖面进行断裂线数字化处理;针对无钻孔控制地区断裂具体倾角无从得知的问题,需要搜集相关地质资料,根据视电阻率属性模型,结合钻孔勘探数据,分

析并预测断裂在无钻孔控制地区的走向,综合构建断裂模型,结果见图6。

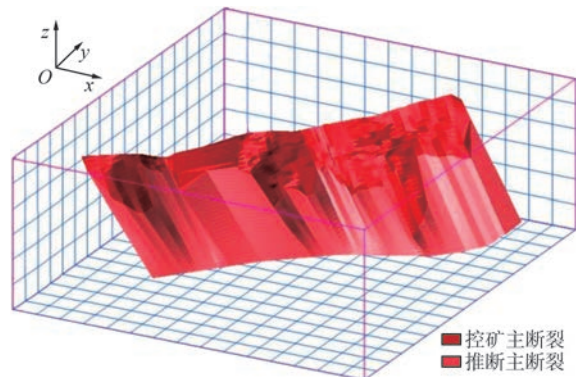


图6 断裂模型
Fig. 6 Fault model

2.5 蚀变带模型建立

蚀变常伴随矿体产生,其分布范围通常比矿床广,是重要的找矿标志。分析矿化蚀变数据,结合断裂模型,建立蚀变带模型,结果见图7。三山岛金矿床主要蚀变类型有黄铁绢英岩化、钾化和硅化,以黄铁绢英岩化碎裂岩为中心,向两侧为黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩、黄铁绢英岩化花岗岩和黄铁绢英岩化变辉长岩,各蚀变带间呈渐变过渡关系,上下盘分带大致对称。

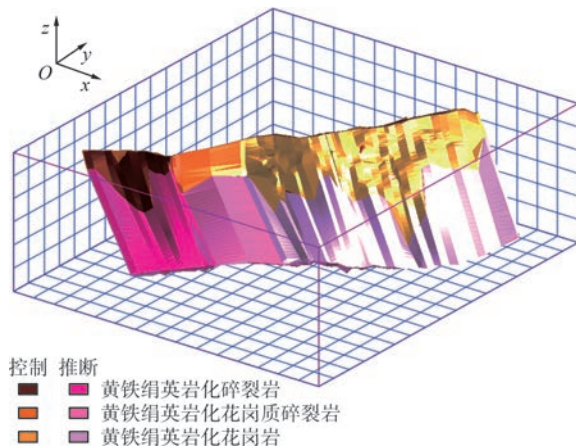


图7 蚀变带模型
Fig. 7 Alteration zone model

2.6 矿体模型建立

鉴于采集的钻探数据比较全面,为了更准确地虚拟现实,采用钻孔数据法建立矿体模型。矿体圈定以勘探线地质剖面图和平面地形图作为参考,研究矿体实际形态和产状分布规律,以边界品位1 g/t、最小可采厚度1 m、夹石剔除厚度2 m进行圈定,遵循矿体圈定原则,依托矿体轮廓线及金品位信息进行地质解译,采用相连段法、控制线法和两段之间法连接实体,验证三角网的有效性,结合断裂模型、蚀变带模型,手动调整不合理矿体边界,建立矿体模型(见图8),共获得19个矿体。

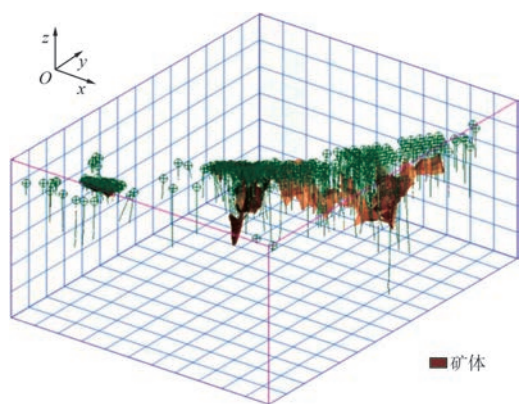


图 8 矿体模型

Fig. 8 Orebody model

2.7 地质体模型集成与分析

地球物理模型是进行断裂推断解释的重要依据。根据大地电磁测深及其二维反演数据所构建的视电阻率属性模型,对于不同岩层信息进行三维模拟,与钻孔控制的断裂模型进行拟合,同时考虑实际地质构造的合理性,综合钻孔信息与地球物理信息,进行地质-地球物理综合分析,完成断裂和基岩分布状况的解释推断。研究表明,三山岛断裂有向深部延伸的趋势,倾角在东北部和西南部存在差异,由南向北倾角变陡(见图9)。

根据不同数据的覆盖范围、精度、深度、格式等,

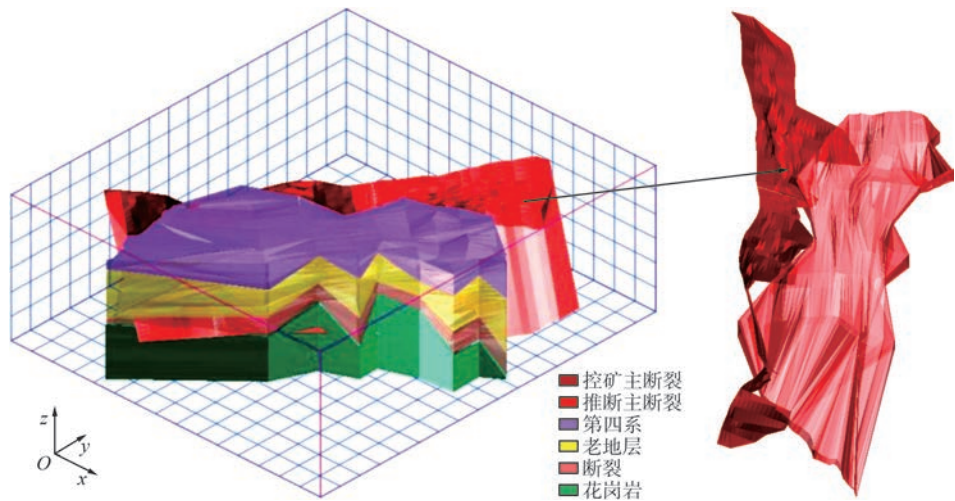


图 9 地球物理与断裂叠置模型

Fig. 9 Model of geophysics and fault overlay

采用不同方法分别创建地表、断裂、蚀变带、地球物理和矿体等模型,归一化数据格式,利用钻孔坐标进行位置

匹配,堆叠衔接各地质体,实现无缝集成,进一步分析各模型间的相互关系,透明集成三维显示,结果见图10。

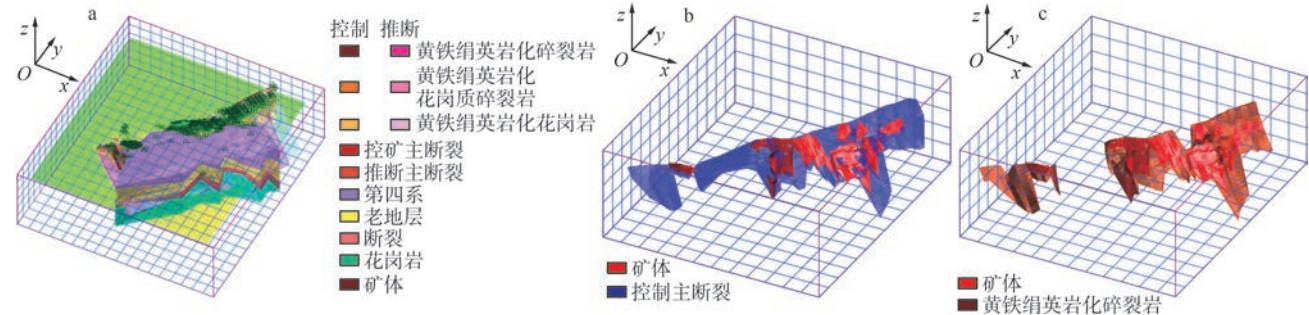


图 10 透明集成三维显示

Fig. 10 Transparent integrated 3D display

断裂对矿体形态有极大影响,为地下成矿物质提供运移路径及聚集空间,是成矿的有利条件。根据三维集成模型,矿体在走向、倾向上受断裂控制,主要分布在断裂下盘,且在断裂由陡变缓的转折区域,矿体厚度增加,产状较稳定,连续性好,在 F_3 断裂处被切割,由南向北倾角变陡,由浅至深倾角变缓。各矿体在空间的分布关系为:走向上平行排列,倾向上为上下盘关系。

蚀变围岩围绕矿体分布,且严格受断裂控制,通

过三维集成模型可以发现,矿区蚀变带分带明显,且矿体均产于蚀变带内,主要赋存于黄铁绢英岩化碎裂岩和黄铁绢英岩化花岗(闪长)质碎裂岩中,且以黄铁绢英岩化碎裂岩为主,蚀变带的连续性随矿化程度的降低而增强。

3 资源量估算

由于矿体模型难以直接反映矿体的内部属性,为了明确矿体内部特征及变化规律,基于矿体块体模型

填充品位数据,构建矿体品位模型,实现对矿体品位、密度和岩矿类型等属性特征的仿真分析。

3.1 样品组合及统计分析

为了确保能够获得参数的无偏估计,同时满足矿块插值的地质统计学要求,并尽可能减少样品的数量,需要将数据库中的样品进行组合。分析样品特征,设定组合样长为1 m,并对探矿工程见矿部位进行样品组合处理。对三山岛金矿床的19个矿体样品数据进行基本统计分析,其中包含多个样品数目较少的

矿体,导致难以找到这些矿体变异函数的变换规律,不适合采用克里格法估值,故使用距离幂次反比法进行资源量估算。

3.2 特高品位处理

为保证后续品位估值的准确性,需对特高品位进行处理。通过对样品品位进行统计分析,矿体1、2不符合正态分布,无法采用截取法进行特高品位处理,因此对样品品位进行对数转换,结果见图11。由图11可知,对数转换后的品位基本服从正态分布。

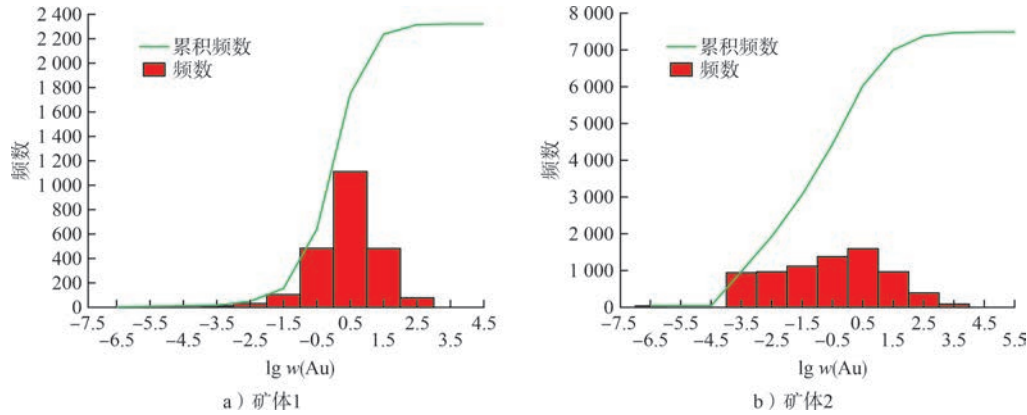


图11 矿体品位对数值分布图

Fig. 11 Distribution of logarithmic value of orebody grade

3.3 矿体资源量仿真分析

矿体模型为品位模型提供支撑,对块体模型进行约束,根据周围地质环境信息,对未知单元品位进行估值,构建品位模型。根据样品品位的具体情况,采用距离幂次反比法推算未知块体品位。

1)以待估值矿块中心为圆心,以最大搜索半径作圆,确定待估矿块受影响范围。

2)计算最大搜索半径内所有样品与待估值矿块中心的欧式距离。

3)估算矿块的品位值。具体计算方法见式(1)、式(2)。

$$T(Z) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i(x,y)^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i(x,y)^2}} \tag{1}$$

$$d_i(x,y) = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \tag{2}$$

式中: $T(Z)$ 为待估值矿块的中心点品位(g/t); Z_i 为已知样品点的品位(g/t); $d_i(x,y)$ 为已知样品点到 $T(Z)$ 的距离。

根据实际勘探网度,为了确保在有效区域内能够搜索到所需数据源,建立搜索椭球模型,将其最大搜索半径设定为300 m。选择以矿体模型为约束进行插值,经过2次估值,完成对矿体块体品位的估值。以矿体1为例,经过品位插值后的结果见图12。通过对

品位进行统计可知,矿体1品位大多集中在3~5 g/t,品位变化范围较大。

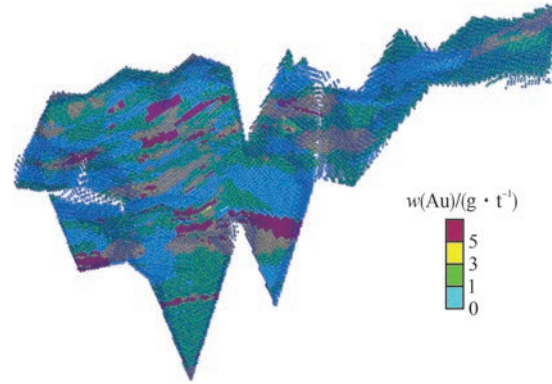


图12 矿体1品位模型

Fig. 12 Model of the grade of Orebody 1

按矿体储量类别,基于距离幂次反比法插值后的矿体品位模型进行资源量估算,以矿体1为例,估算结果见表2。由表2可知:通过距离幂次反比法进行估算,矿体体积为18 238 421 m³,矿石量为5 088.52万t,平均金品位2.86 g/t,金金属量为145.47 t;与地质块段法估算结果进行对比,金金属量少1.93 t,负变1.31%,总体误差小于10%,证明本次估值结果是可靠的。

4 结 论

1)综合视电阻率属性信息与钻孔断裂信息,对深部断裂进行了延伸趋势推断,发现三山岛断裂走向北东,有向深部延伸的趋势。

表 2 矿体 1 资源量估算结果
Table 2 Results of resource estimation of Orebody 1

矿体编号	估算方法	体积/m ³	矿石量/万 t	平均金品位/(g·t ⁻¹)	金金属量/t
矿体 1	地质块段法	17 848 629	4 966.12	2.97	147.4
	距离幂次反比法	18 238 421	5 088.52	2.86	145.47
	结果对比	389 792	122.4	-0.11	-1.93

2)基于各地质体三维集成显示模型,矿体在走向和倾向上受三山岛断裂控制,矿体分布在其下盘,产状较稳定,连续性好,在F₃断裂区域被切割,由南向北倾角变陡,由浅至深倾角变缓。各矿体在走向上平行排列,倾向上为上下盘关系。

3)将矿体模型作为约束条件,构建矿体块体模型,并为其添加属性值,对矿体内待估值矿块进行品位插值,以矿体 1 为例,采用距离幂次反比法估算可得金金属量为 145.47 t,与地质块段法估算结果进行对比,误差小于 10 %,验证了本次资源量估算结果的可靠性。

[参 考 文 献]

[1] 于学峰,杨德平,李大鹏,等. 胶东焦家金矿带 3 000 m 深部成矿特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2019, 35(9): 2 893-2 910.
[2] 赵兴东. 黄金矿山深井开采研究进展与发展趋势[J]. 黄金, 2024, 45(8): 1-18.
[3] 宋贵常,白晓明,赵俊康,等. 基于 Surpac 的矿床模型构建和资源储量估算——以冀北东坪金矿区转枝莲矿段为例[J]. 黄金, 2017, 38(11): 9-13.
[4] 赵忠海,崔晓梦,孙景贵,等. 基于三维地质-地球物理建模的深部成矿预测——以黑河地区永新金矿床为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(2): 498-515.
[5] 鲁锴,刘玲,鲍志东,等. 基于可钻性分析及三维地质建模的钻探有利区优选:以雄安新区雾迷山组为例[J]. 现代地质, 2023, 37(5): 1 398-1 410.
[6] 薛涛,包训栓,朱小弟,等. 多源数据三维地质结构模型约束的属性建模方法:以北京市通州城市副中心为例[J]. 地学前缘, 2023, 30(3): 529-536.
[7] 曹成刚,谭俊,贾玉山,等. 沙丘覆盖区深部三维可视化找矿预测应用:以祁漫塔格那陵郭勒河西多金属矿为例[J/OL]. 吉林大学学报(地球科学版), 1-22 [2024-09-19]. <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.20240139>.

[8] 吴志春,郭福生,林子瑜,等. 三维地质建模中的多源数据融合技术与方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(6): 1 895-1 913.
[9] 祝嵩,肖克炎. 大冶铁矿田铁山矿区三维地质体建模及深部成矿预测[J]. 矿床地质, 2015, 34(4): 814-827.
[10] BAKARR J A, SASAKI K, YAGUBA J, et al. Integrating artificial neural networks and geostatistics for optimum 3D geological block modeling in mineral reserve estimation: A case study[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2016, 26(4): 581-585.
[11] 杨丰铭,杨昌华,汪永华,等. 基于地质统计学法的资源量估算中特高品位鉴别方法[J]. 黄金, 2022, 43(8): 23-26.
[12] 孙远强,范洪海, SIMON S, 等. 纳米比亚 ML121 勘查区地质调查评价与铀矿资源量估算[J]. 中国矿业, 2022, 31(10): 164-171.
[13] NOOR M K. Ore reserve estimation of saprolite nickel using inverse distance method in PIT block 3A Banggai area central Sulawesi[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 979(1): 012047.
[14] 娄渝明,郎兴海,祁婧,等. 西藏雄村斑岩型铜金矿区 II 号矿体资源储量估算方法对比[J]. 有色金属工程, 2018, 8(6): 75-81.
[15] THOMAS B A, ABIODUN I L, RASDAQ A A. Re-examination of Itakpe iron ore deposit for reserve estimation using geostatistics and artificial neural network techniques[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(14): 1 065-1 085.
[16] 贾飞,胡跃亮,王健策,等. 胶东西岭超大型金矿床成矿特征及深部找矿前景[J]. 矿产勘查, 2022, 13(7): 904-915.
[17] 刘晓敏,于森,李金涛,等. 胶东石家金矿床成矿流体特征及矿床成因[J]. 黄金, 2024, 45(9): 74-80.
[18] 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.
[19] 赵立翔,丁正江,张琪彬,等. 胶东地区中生代花岗岩年代学、地球化学特征及与金银多金属成矿的关系[J]. 黄金, 2024, 45(4): 57-64.
[20] 杨斌,席振铎,向胤合,等. 伽玛能谱法在胶东大尹格庄金矿床后窿矿区的找矿应用[J]. 黄金, 2023, 44(7): 19-22.
[21] 王玉,尹召凯,王君伟. 胶西北焦家—仓上地区深部地球物理探测综合应用[J]. 黄金, 2023, 44(7): 55-60.

3D geological model and resource estimation of the deep-seated part of the Sanshandao Gold Deposit

Bing Yuanmin^{1,2}, Li Shunda², Huang Binghu¹

(1. College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum (East China);
2. Department of Architectural Engineering, Rizhao Polytechnic)

Abstract: To support the development and utilization of deep-seated resources in the Sanshandao Gold Deposit, this study employs a multi-source data integration approach. Geological data were collected and organized to establish a comprehensive geological database. Through integrated geological-geophysical analysis, the deep extension trends of faults were inferred. 5 digital geological models were constructed, including surface, geophysical, fault, alteration zone, and orebody models. Based on transparent visualization integration of the 3D geological model, the distribution patterns and interrelationships of these elements were investigated. A model of the orebody was then developed, and the ore resources were estimated using the Distance Power Inverse Weighting method. Results indicate that the ore bodies are primarily hosted in sericitized and silicified cataclasite, controlled by the Sanshandao Fault in strike and dip directions, and mainly distributed in its footwall. Gold enrichment occurs at the transition zone where the main fault steepens to flattens, with truncation observed at the F₃ fault. Using the Distance Power Inverse Weighting method, the estimated gold metal content of Orebody 1 is 145.47 t, and the reliability of the results was verified.

Keywords: Sanshandao Gold Deposit; deep-seated part; 3D geological model; resource; estimation; geological-geophysical; Distance Power Inverse Weighting method