

# 西藏雄村 I 号矿体三维地质建模与深部可视化应用

黄超<sup>1</sup>, 郎兴海<sup>1\*</sup>, 姜渝明<sup>1</sup>, 邓煜霖<sup>1</sup>, 王旭辉<sup>1</sup>, 张赫<sup>1</sup>, 李亮<sup>1</sup>, 李宸<sup>1</sup>, 曾方侶<sup>1</sup>, 何青<sup>1</sup>, 张忠<sup>2</sup>, 姜楷<sup>2</sup>

HUANG Chao<sup>1</sup>, LANG Xinghai<sup>1\*</sup>, LOU Yuming<sup>1</sup>, DENG Yulin<sup>1</sup>, WANG Xuhui<sup>1</sup>, ZHANG He<sup>1</sup>, LI Liang<sup>1</sup>, LI Chen<sup>1</sup>, ZENG Fanglyu<sup>1</sup>, HE Qing<sup>1</sup>, ZHANG Zhong<sup>2</sup>, JIANG Kai<sup>2</sup>

1. 成都理工大学地球科学学院/自然资源部构造矿成藏重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 西藏天圆矿业资源开发有限公司, 西藏 日喀则 857000

1. College of Earth Science, Chengdu University of Technology, MNR Key Laboratory of Tectonic Controls on Mineralization and Hydrocarbon Accumulation, Chengdu 610059, Sichuan, China;

2. Tibet Tianyuan Minerals Exploration Ltd., Shigatse 857000, Tibet, China

**摘要:**21 世纪以来随着地球科学的发展,深部三维建模技术逐渐进入地学领域,数学地质与计算机科学的结合为地学领域开辟了新的认知空间,也给地球科学工作者带来了新的挑战与机遇。通过三维建模 SURPAC 软件对西藏雄村铜-金矿床 I 号矿体 162 个钻孔数据预处理、分析及矿体解译,针对雄村 I 号矿体深部数字化资源/储量估算及深部成矿元素分布问题,采用地质统计学法对 I 号矿体钻井数据进行矿体模型、实体模型建立及数字化自动资源/储量估算,以深部实体模型二维切片模型为指导,探讨了深部成矿元素的空间分布形态及相互关系。研究表明,采用距离幂次反比法进行资源/储量估算,结果均大于 96%,有效揭示了区内资源/储量定量评估。在矿体模型、实体模型的指导下,以深部二维精细化切片模型展布了矿体深部三维空间成矿元素分布特征及相互关系,有效减少了雄村 I 号矿体深部成矿单一信息多解性问题,为西藏雄村斑岩型铜-金矿床 I 号矿体深部精确定量找矿提供了参考依据。

**关键词:**三维建模;SURPAC 软件;可视化;模型切片;西藏雄村

**中图分类号:**P628;P618.51;P618.41 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)05-0753-11

Huang C, Lang X H, Lou Y M, Deng Y L, Wang X H, Zhang H, Li L, Li C, Zeng F L, He Q, Zhang Z, Jiang K. 3D geological modeling and deep visualization application of Xiongkun No. I orebody, Tibet. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(5): 753-763

**Abstract:** With the development of Earth Science since the 21st century, the age of 3D has gradually come into the geosciences. The combination of mathematical geology and computer science has opened up a new cognitive space for the field of geoscience, and also brought new challenges and opportunities to geoscientists. Through 3D modeling and SURPAC software, 162 borehole data of No. I

收稿日期:2020-03-19;修订日期:2021-03-23

**资助项目:**国家重点研发计划课题《雄村矿集区深部资源潜力评价及靶区优选示范》(编号:2018YFC0604105)、国家自然科学基金项目《西藏雄村斑岩型 Cu-Au 矿集区 I 号矿体富 CH<sub>4</sub> 成矿流体演化过程研究》(批准号:41502079)、《西藏雄村矿集区洞嘎金矿床成矿机制研究》(批准号:4197020864)、四川省杰出青年科技人才项目《基于“矿物地球化学”的深地资源勘查找矿技术研究与示范》(编号:20JCQN0139)、深地资源成矿作用与矿产预测重点实验室开放基金项目《西藏雄村铜金矿原生晕特征及深部找矿预测》(编号:ZS1911)和成都理工大学珠峰科学研究计划《西藏中部特提斯演化与成矿》(编号:2020ZF11407)

**作者简介:**黄超(1994-),男,在读硕士生,地质工程专业,从事三维地质建模与应用研究。E-mail:pkuhzx718@gmail.com

\* **通信作者:**郎兴海(1982-),男,博士,教授,从事矿床学、矿产普查与勘探的教学和研究。E-mail:langxinghai@126.com

orebody of the Xiongcu Cu-Au deposit in Tibet were preprocessed and analyzed to interpret the orebody. According to the deep digital resource/reserve estimation of No. I orebody and the distribution of deep ore-forming elements in Xiongcu, the solid model and digital automatic resource/reserve estimation system were established by the method of geological statistics based on the drilling data. Based on the two-dimensional slice model of deep solid model, the spatial distribution and interrelationship of deep ore-forming elements were discussed. Research shows that the results of resource/reserve estimation by means of the inverse power of distance method are all greater than 96%, and effectively reveal the quantitative assessment of resources/reserves in the region. Under the guidance of ore body model and entity model and using the deep 2D fine slicing technology, the distribution characteristics and interrelationship of mineralization elements in the deep 3D space of the ore body are clearly displayed. That effectively reduces the ambiguity of single information of deep orebody and provides a reference basis for accurate deep prospecting.

**Key words:** 3D geological modeling; SURPAC software; visualization; model slicing; Xiongcu; Tibet

西藏雄村I号矿体是冈底斯成矿带雄村斑岩型铜-金矿区的主要矿体之一<sup>[1-5]</sup>。近年来,随着该地区研究的深入和勘查程度加深,地表露头与浅部矿体逐渐减少,找矿工作重点逐步从浅层矿体向深部矿体及隐伏矿体转移,在找矿勘查中成矿规律与深部找矿也越发重要<sup>[6-8]</sup>,数字化矿产资源/储量定量预测与评价成为国内外地球科学研究的前沿重大课题。目前,已有学者对西藏雄村I号矿体矿床地质特征、地质年代学、岩石地球化学、成矿流体特征、成矿物质来源等进行研究,并建立了一套有效的斑岩型铜-金矿床勘查找矿方法<sup>[9-10]</sup>。但该研究区关于矿体的深部建模工作、数字化资源/储量估算及深部成矿元素分布特征的研究较少,因此深部成矿综合研究程度薄弱,尤其是三维空间成矿综合研究。

以往中国多采用传统几何法对矿体进行资源/储量估算,随着计算机建模与三维可视化技术的发展,研究人员逐渐从基础地质研究转向三维深部地质空间研究,并应用数学地质与空间分析结合构造演化的方法对矿床进行了多角度、多方位的定性研究<sup>[11-12]</sup>。相比之下,传统几何法在资源/储量估算时并未考虑样品间的空间权重及品位变化的结构特性,而采用计算机建模及地质统计学法进行数字化半自动资源/储量估算,更全面地考虑到了矿体在深部空间的结构特性变化<sup>[13]</sup>。因此,有研究者认为,采用机器建模及地质统计学法进行资源/储量估算更科学、合理、高效,可以通过变异函数的结构分析确定元素品位在空间的变异性,使深部空间样品组合的品位值、验证方法更严谨、精确<sup>[14-16]</sup>。

## 1 研究区地质特征

西藏雄村斑岩型铜金矿区位于西藏冈底斯成矿带<sup>[17-25]</sup>,长约400 km,宽约50 km。带内已发现

多个大型-超大型铜矿床,如驱龙、甲玛、冲江、厅宫、白容等矿床,这些矿床均与斑岩体密切相关。雄村矿床处于拉萨地体南缘冈底斯火山岩浆弧的中段(图1-a)。I号矿体成矿时代<sup>[26-31]</sup>为161.5 Ma(辉钼矿 Re-Os 年龄),成因上与中侏罗世石英闪长斑岩密切相关<sup>[32]</sup>。矿区主要出露的地层为下—中侏罗统雄村组火山—沉积岩,岩性组合为凝灰岩、火山角砾/集块岩、砂岩、粉砂岩,以及少量砾岩、灰岩等。出露的岩浆岩为早侏罗世石英闪长斑岩、早—中侏罗世石英闪长斑岩、中侏罗世石英闪长斑岩、中侏罗世辉绿岩脉、始新世黑云母花岗闪长岩及石英闪长岩(图1-b、c)。矿区构造较发育,主要为东西向、北西—南东向、北东—南西向的断层构造,以及南部的褶皱构造。其中I号矿体位于矿区东南侧,平面上呈椭圆形,北西—南东向展布,整个矿体走向方向长约1212 m,沿倾向方向延伸约650 m。矿体形态、产状主要受含矿斑岩体(中侏罗世石英闪长斑岩)及其含矿围岩(雄村组凝灰岩)控制。矿体在东西向剖面上呈似层状、厚板状,倾向北东,倾角30°~55°。蚀变类型主要为钾硅酸盐化、黄铁绢英岩化、青磐岩化。其中,与成矿作用相关的蚀变主要为钾硅酸盐化,主要金属矿物为黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿及少量方铅矿、闪锌矿、辉钼矿等,非金属矿物主要为石英、黑云母、红柱石、绢云母等。

## 2 数据分析与处理

### 2.1 数据获取与分析

维克托·迈尔-舍恩伯格指出,世界的本源是数据的集成<sup>[33-37]</sup>。深部矿体建模对原始资料数据的获取是必不可少的条件之一,对雄村I号矿体钻井数据收集、数字化建设也是建立综合数据库的关

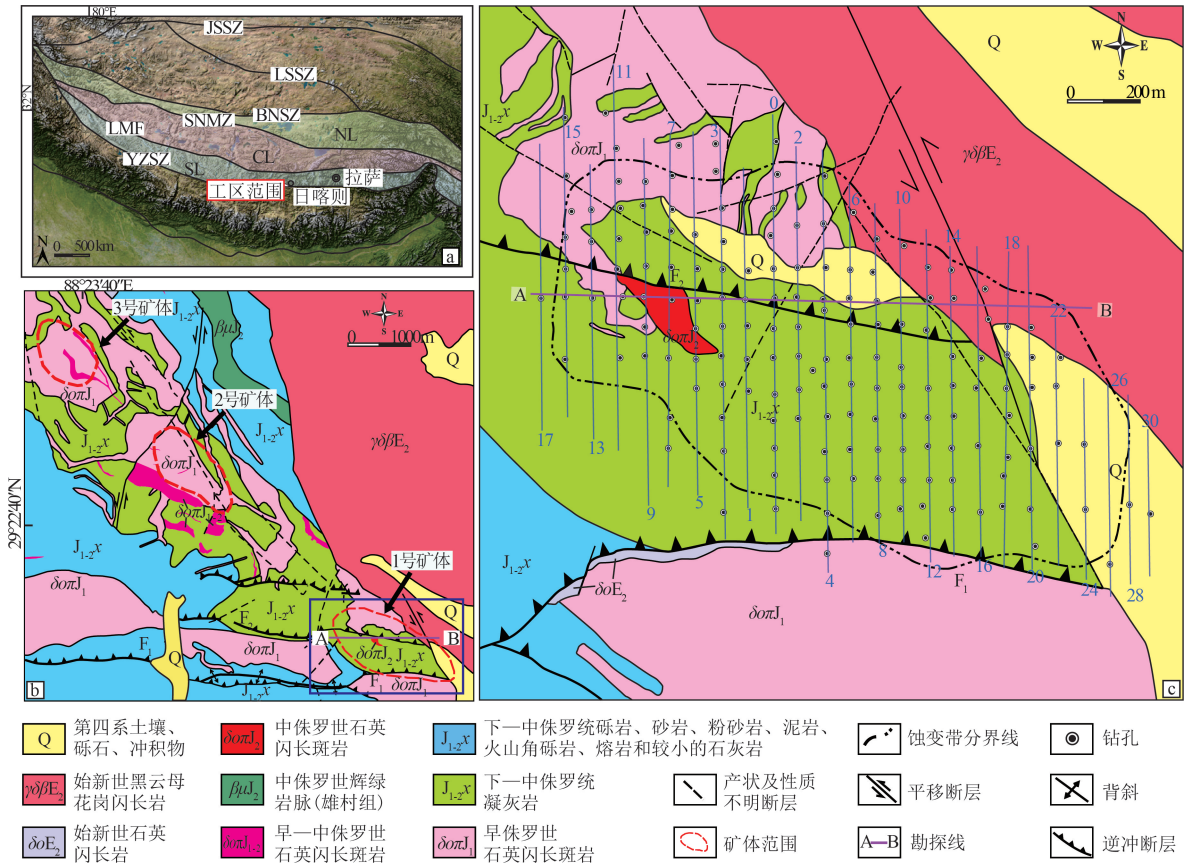


图 1 研究区大地构造位置图(a)<sup>[20]</sup>、地质图(b)<sup>[21]</sup>及西藏雄村 I 号矿体地质图(c)

Fig. 1 Geotectonic location(a), geological map of the study area(b) and geological map of No. I orebody in Xiongcu, Tibet(c)  
BNSZ—班公湖—怒江缝合带;SNMZ—狮泉河—纳木错杂岩带;LMF—洛巴堆—米拉山断裂带;YZSZ—雅鲁藏布江缝合带;  
LSSZ—龙木错—双湖缝合带;JSSZ—金沙江缝合带;NL—北拉萨地体;CL—中拉萨地体;SL—南拉萨地体

键。在数据库建立之初,要明确基于地质三维建模软件 SURPAC 的数据库结构、数据的储存方式、数据的分类及数据源需求。在地质建模前要确保数据的可靠性和完整性,因此要对数据进行有效性筛选。通常人们采用传统方法对数据进行有效性筛选,筛选结果存在相对差异,而国外有学者用地质统计学方法使其研究空间变得更具有随机性和结构性,在地质采矿领域被广泛认可。本文采用的地质数据三维建模 SURPAC 软件很好地三维地质建模功能及地质统计学分析相结合,简化了日常工作中对数据整理和校验的复杂性,使其结果更可靠、操作更简便并提高了工作效率。

本文在前人研究的基础上对雄村 I 号矿体的钻孔纸质数据、电子数据进行归档,并从不同时期、不同阶段勘查报告实时更新数据的完整性。在数

据收集初期,逐步将数据按照 SURPAC 软件的数据结构(表 1)归档输入。在数据的归档过程中,由于部分原始数据不能满足数字地质三维建模 SURPAC 软件的数据结构要求,将其钻井数据进行数字化处理。

2.2 数据预处理

为使数据结构达到 SURPAC 软件的数据结构要求,先将数据以该软件的数据结构进行标准化,并进行数据分类。在该软件的数据结构下对钻孔数据分别制表,建立符合该软件数据结构要求的孔口表(Collar)、测斜表(Survey)、化验表(Sample)及岩性表(Geology)(表 2)。对于孔口数据,由于钻井工程施工跨度大,前人在收集数据资料的过程中会出现数据精度不一致、钻孔编号重复、坐标系不同等问题,因此要对数据进行精准筛查,以保证后期模型

表 1 SURPAC 数据库数据结构  
Table 1 Structure of SURPAC database data

| 孔口表数据结构(部分数据) |     |          |          |      |      |        |            |
|---------------|-----|----------|----------|------|------|--------|------------|
| 条目            | 类型  | 是否<br>空值 | 字段<br>长度 | 小数位  | 下限   | 上限     | 真实值/<br>虚拟 |
| 孔号            | 字符型 | N        | 10       | Null | Null | Null   | 真实值        |
| 北坐标           | 实数  | Y        | 10       | 2    | -99  | 99     | 真实值        |
| 东坐标           | 实数  | Y        | 10       | 2    | -99  | 99     | 真实值        |
| 自             | 实数  | Y        | 10       | 2    | -99  | 99     | 真实值        |
| 至             | 实数  | Y        | 10       | 2    | -99  | 99     | 真实值        |
| 测斜表数据结构(部分数据) |     |          |          |      |      |        |            |
| 条目            | 类型  | 是否<br>空值 | 字段<br>长度 | 小数位  | 下限   | 上限     | 真实值/<br>虚拟 |
| 孔号            | 字符型 | N        | 10       | Null | Null | Null   | 真实值        |
| 方位角           | 实数  | Y        | 10       | 2    | -999 | 999    | 真实值        |
| 倾角            | 实数  | Y        | 10       | 2    | -999 | 999    | 真实值        |
| 化验表数据结构(部分数据) |     |          |          |      |      |        |            |
| 条目            | 类型  | 是否<br>空值 | 字段<br>长度 | 小数位  | 下限   | 上限     | 真实值/<br>虚拟 |
| 孔号            | 字符型 | N        | 10       | Null | Null | Null   | 真实值        |
| 自             | 实数  | Y        | 10       | 2    | -99  | 99     | 真实值        |
| 至             | 实数  | Y        | 10       | 2    | -99  | 99     | 真实值        |
| au            | 实数  | Y        | 10       | 2    | -99  | 99     | 真实值        |
| ag            | 实数  | Y        | 10       | 2    | -99  | 99     | 真实值        |
| cu            | 实数  | Y        | 10       | 2    | -99  | 99     | 真实值        |
| 岩性表数据结构(部分数据) |     |          |          |      |      |        |            |
| 条目            | 类型  | 是否<br>空值 | 字段<br>长度 | 小数位  | 下限   | 上限     | 真实值/<br>虚拟 |
| Hold_id       | 字符型 | N        | 10       | Null | Null | Null   | 真实值        |
| Lithology     | 字符型 | N        | 20       | Null | Null | Null   | 真实值        |
| Sample_id     | 实数型 | Y        | 10       | 2    | 0    | 999999 | 真实值        |

建立。岩性数据要确保数据无缺失,并与岩性取样长度一致。测斜数据要保证测斜深度不能大于钻孔深度。化验数据要排序后,进行筛查是否有空值,并进行特高品位处理。

3 地质三维建模可视化

地质数据三维可视化的主体是实体模型的建立。本文对西藏雄村 I 号矿体的钻井数据在 SURPAC 软件中进行了三维显示,对勘探线钻孔建立矿体实体模型。在矿体实体模型建立过程中,钻

表 2 SURPAC 数据库信息  
Table 2 SURPAC database information

| 孔口坐标 Collar(部分数据)  |         |          |          |       |       | 测斜数据   |     |
|--------------------|---------|----------|----------|-------|-------|--------|-----|
| 孔号                 | 北坐标     | 东坐标      | 高程       | 孔深/m  | 勘探线号  | Survey |     |
| ZK5001             | 3250373 | 638661.1 | 4202.959 | 390.3 | N1    | 孔号     | 孔深  |
| ZK5002             | 3250374 | 638712.3 | 4182.1   | 330.1 | N3    | ZK5001 | 0   |
| ZK5003             | 3250322 | 638711.8 | 4181.66  | 273.7 | N5    | ZK5002 | 0   |
| 岩性数据 Geology(部分数据) |         |          |          |       |       |        |     |
| 孔号                 | 样品编号    | 自        | 至        | 长度    | 岩性    | 方位角    | 倾角  |
| ZK5001             | 195001  | 0        | 2        | 2     | OB1   | 0      | -90 |
| ZK5002             | 196001  | 0        | 3        | 3     | OB1   | 0      | -90 |
| ZK5003             | 197001  | 0        | 2.5      | 2.5   | OB1   | 0      | -90 |
| 化验数据 Sample(部分数据)  |         |          |          |       |       |        |     |
| 孔号                 | 样品编号    | 自        | 至        | 长度/m  | Au    | Cu     | Ag  |
| ZK5001             | 195001  | 0        | 2        | 2     | 0.41  | 0.137  | 4.6 |
| ZK5002             | 196001  | 0        | 3        | 3     | 0.032 | 0.0272 | 0.3 |
| ZK5003             | 197001  | 0        | 2.5      | 2.5   | 0.168 | 0.0159 | 0.7 |

注:OB1 表示岩性代码

井数据及化学分析样品数据的准确性是保证实体模型准确的关键<sup>[38-40]</sup>。因此对 162 个钻井数据(21249 件化学分析样品)进行了有效性约束,将前期预处理的 162 个钻井信息及 21249 件化学分析样品数据,以图形化的形式显示在地质三维可视化建模软件 SURPAC 中,并根据钻孔数据生成的钻孔模型进行剖面解译、矿体边界解译、块体模型(DTM)生成。在实体模型建立过程中,在 SURPAC 数据库中对其块体模型属性赋值,并进行空间插值<sup>[41-43]</sup>,利用该软件的数理统计功能,提取矿带内样品、进行特高品位处理等。

3.1 三维实体模型构建

三维实体模型的建立是后期对深部地质体的可视化展现,既能揭示矿体中元素在空间的展布形式,也能体现矿体与岩体在三维空间的几何分布状态<sup>[44-45]</sup>。针对西藏雄村 I 号矿体的三维矿体建模,在处理后的地质勘查数据基础上,本次主要建立了研究区的地表地形模型(图 2-a)、地形地质图模型(图 2-b)、I 号矿体混合矿模型(图 2-c)、I 号矿体硫化矿模型(图 2-d)及 I 号矿体夹石模型(图 2-e)。

在 Google Earth 中获取研究区 10 m 等高线数据并间隔 5 m 进行插值加密,导入 SURPAC 数据库中,并利用该软件 DTM 生成工具自动生成地表模

型(图 2-a), 叠加研究区赋高程数据 1:1000 比例尺地形地质图, 生成地表实体模型(图 2-b)。在地表实体模型中明显可见研究区各个地质单元的高低起伏状态及勘探线钻孔布置情况。混合矿和硫

化矿的建立, 将以导入在 SURPAC 数据库中的钻孔数据显示, 通过对地形中勘探线切面, 对各个勘探线剖面按其化验分析数据进行圈矿解译, 以地质实际情况和勘查结果进行各个剖面矿体圈定, 建立混

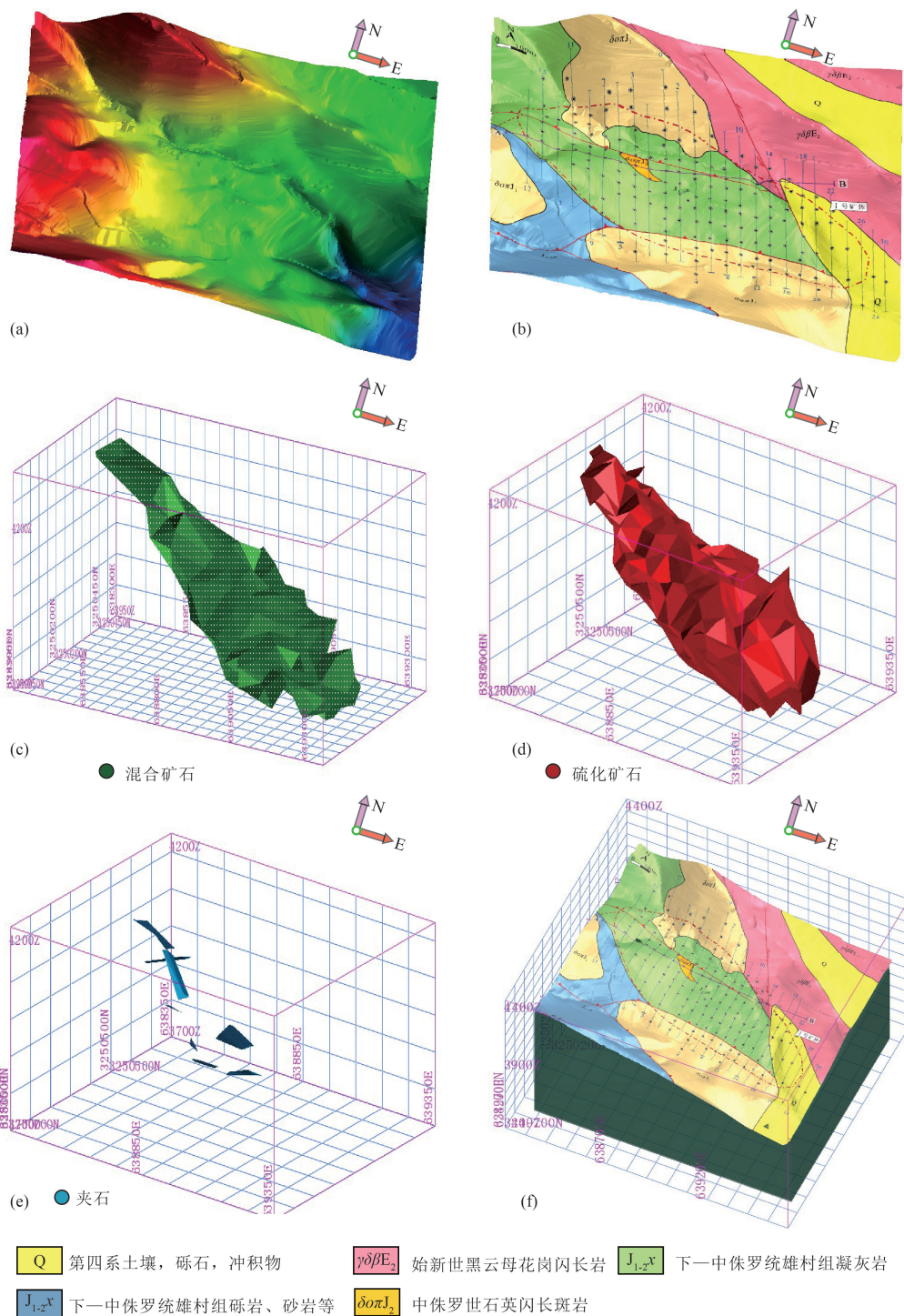


图 2 西藏雄村 I 号矿体三维实体模型

Fig. 2 3D model of No. I orebody in Xiongcu, Tibet

a—地表实体模型; b—地质图模型; c—混合矿模型; d—硫化矿模型; e—夹石模型; f—地质模型

合矿体解译模型(图 2-c)、硫化矿体解译模型(图 2-d)及夹石解译模型(图 2-e),其后进行地表实体模型、混合矿模型、硫化矿模型、综合地质体模型建立(图 2-f)。

### 3.2 三维搜索椭球体建立

本次建模研究中,采用距离幂次反比法幂次为 2 的插值法对西藏雄村 I 号矿体混合矿体和硫化矿体进行资源/储量估算,在距离幂次反比法插值之前建立搜索椭球体模型(图 3),且三维椭球体模型产状与矿体模型产状基本一致。其中,西藏雄村 I 号矿体混合矿体方位角为  $113^\circ$ 、倾伏角为  $15^\circ$ 、倾角为  $0^\circ$ 、方位角因子为 1、倾角因子为 0.525、厚度因子为 0.04;西藏雄村 I 号矿体硫化矿体方位角为  $113^\circ$ 、倾伏角为  $20^\circ$ 、倾角为  $30^\circ$ 、方位角因子为 1、倾角因子为 0.5294、厚度因子为 0.264。由于西藏雄村 I 号矿体呈透镜状、厚层状、筒状产出,采用距离幂次反比法可较准确地进行模块品位插值,距离幂次反比法常以变程为搜索半径搜索椭球体划分资源/储量级别<sup>[46-47]</sup>。本次分别使用变程 100、200、400 为椭球体搜索半径进行资源/储量类别划分,在变程范围内,待估模块单元与其变程范围周围已知数据样品半径距离越小,其相关性越大,待估模块单元估算结果准确度越大。

## 4 资源/储量估算及矿体精细化切片

### 4.1 统计学法资源/储量估算

本次西藏雄村 I 号矿体建模采用地质统计学

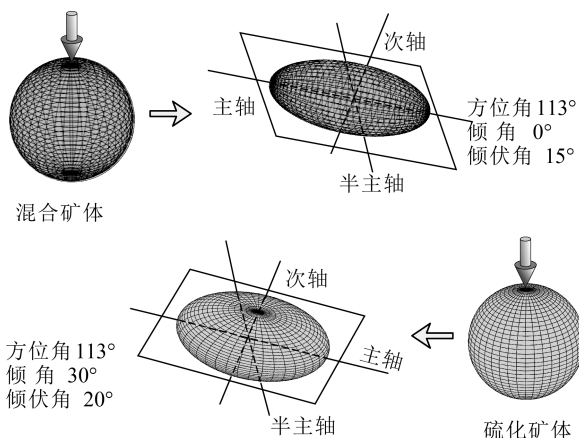


图 3 距离幂次反比法椭球体模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ellipsoid model based on inverse distance power method

中的距离幂次反比法进行资源/储量估算,距离幂次反比法是将矿体划分为若干个小块地质单元块<sup>[48-51]</sup>,用已知样本数据多变量插值,未知样本数据用已知样本数据坐标加权平均计算,通过钻孔岩石化学分析样品中已知的品位信息进行估值。西藏雄村 I 号矿体为斑岩型铜金矿体,矿体结构形态较简单,从地质三维实体模型可看出,为近 EW 走向的巨厚透镜状矿体;化学样品分析数据显示该矿矿化较均匀,Cu 品位变化系数小于 100%。运用地质统计学估算资源/储量时<sup>[52-57]</sup>,为消除因原始取样长度不一对建立椭球体搜索的影响,需重新对其取样长度插值并提取矿带内样品进行统计。样长统计分布图(图 4-a)显示,西藏雄村 I 号矿体钻孔取样长度主要集中在 2 m 左右,故对其样品采用 2 m 样长进行组合,若取样长度小于 2 m,按照样品的最小有效值 75% 进行处理。通过样品组合,西藏雄村 I 号矿体共得到组合样品 12149 个,其中混合矿体组合样品 1293 个,硫化矿体组合样品 10856 个。

从该软件数据统计库得出,本次 Cu 品位样品统计样本数量共 12458 个,未进行品位插值,Cu 品位样本最小值为 0,最大值为 16.82,平均值为 0.45,中值为 0.40,方差为 0.11,标准差为 0.33,变化系数 74%。本次研究采用地质统计学方法对 Cu 品位样本进行插值,基于平均值+1.96 倍的标准差进行特高品位处理并截取数据。计算结果表明,其与 SURPAC 数据统计报告结果基本一致。该数据库样本数据统计显示,Cu 品位样本最小值为 0,最大值为 3.64,平均值为 0.446,中值为 0.39,方差为 0.087,标准差为 0.29,变化系数 67%,特高品位处理 97.5 分位数值为 1.095,交叉验证表明该品位插值合理。SURPAC 基础数据统计窗口得出的组合样长 Cu 品位统计分布图(图 4-b)显示,Cu 品位基本符合正态分布,数据处理及矿体模型合理。

本次研究将已建立的矿体模型(图 2-c、d、f)按统一地质单元块规格建立立方体块体模型,为确保矿体模型全部包含在块体模型内部,并更好地进行块体模型赋值。块体模型坐标范围最小值小于矿体地质体模型坐标范围最小值,块体模型坐标范围最大值大于矿体地质体模型坐标范围最大值,用户块尺寸规格为  $10\text{ m} \times 10\text{ m} \times 2\text{ m}$ ,次级分块尺寸规格为  $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 1\text{ m}$ 。将设置好的块体模型在 SURPAC 软件显示界面显示,并对已建立的混合矿

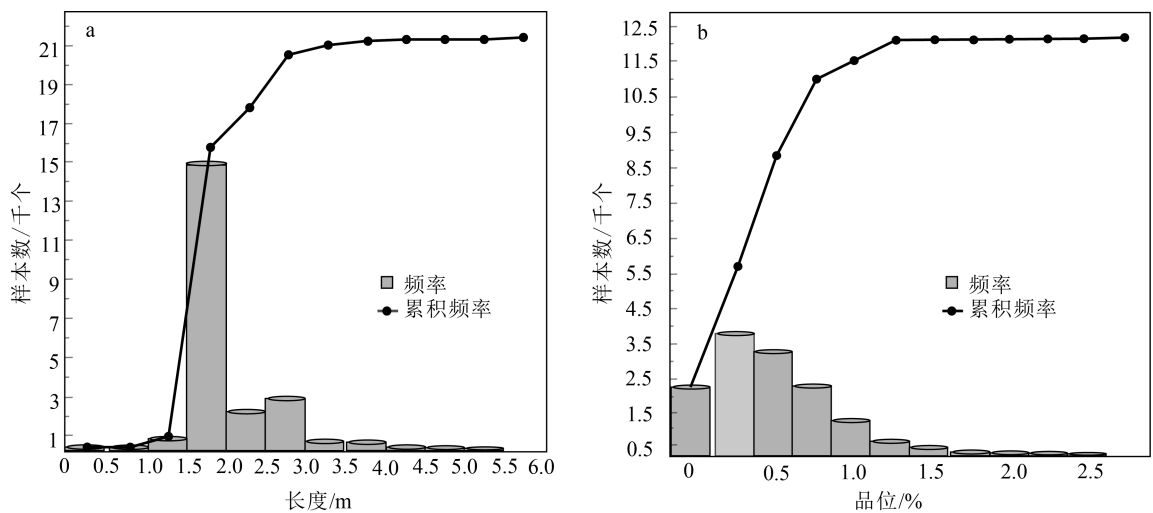


图 4 西藏雄村 I 号矿体样长统计分布图(a)和 Cu 品位统计分布图(b)

Fig. 4 Statistical distribution of sample length(a)and distribution of Cu grade(b) of No. I orebody in Xiongkun, Tibet

体及硫化矿体模型进行块体约束,约束后生成资源/储量报告。结果显示, I 号矿体混合矿体及硫化矿体 Cu 矿石量及金属量采用传统地质法与距离幂次反比法均在误差范围内,其估算结果(表 3)基本准确,达到预期估算效果。

4.2 三维矿体模型精细化切片

本次研究在建立地质体实体模型(图 5)的基础上,对西藏雄村 I 号矿体勘探线 A-B 剖面 16 个钻孔(包括 ZK6178、ZK6136、ZK6131、ZK6143、ZK5060 等)的硫化矿与混合矿进行了剖面切片,从建立的地质实体模型侧视图可以清楚地看出混合矿和硫化矿的深部展布和分布特征,混合矿体呈东西向,薄层透镜状展布,并位于硫化矿体之上。基于研究区的三维地质模型与深部矿体品位插值,切片分析模型成果。本文从切片分析模型(图 6-a)中,分析研究了 Cu 空间分布特征及插值后的 Cu 元素品位

空间分布特征。从硫化矿块体三维切片 Cu 品位空间分布位置可知,Cu 元素低值区主要分布在矿体的西北方向,Cu 品位 0.1%~0.2%主要集中在矿体的西南侧及东北侧边部地带,Cu 品位 0.2%~0.4%主要集中在矿体的西南侧及东北侧,Cu 品位 0.4%~0.6%主要集中在矿体的中部高值区两侧,而 Cu 品位大于 0.6%的高值区位于矿体的中心。经硫化矿块体三维切片 Cu 品位空间分布位置与地质 A-B 剖面(图 6-b)对比分析,Cu 品位 0.1%~0.2%主要赋存于中侏罗世石英闪长斑岩中,Cu 品位 0.2%~0.4%赋存于下—中侏罗统雄村组凝灰岩中,Cu 品

表 3 西藏雄村 I 号矿体资源/储量估算结果

Table 3 Resources/Reserves estimation result of No. I orebody in Xiongkun, Tibet

| 矿石类型     | 储量/t   | 传统地质断面法   | 距离幂次反比法   |
|----------|--------|-----------|-----------|
| I 号矿体混合矿 | Cu 矿石量 | 22140183  | 21495324  |
|          | Cu 金属量 | 123977    | 167635    |
| I 号矿体硫化矿 | Cu 矿石量 | 177519081 | 183957596 |
|          | Cu 金属量 | 923575    | 938019    |

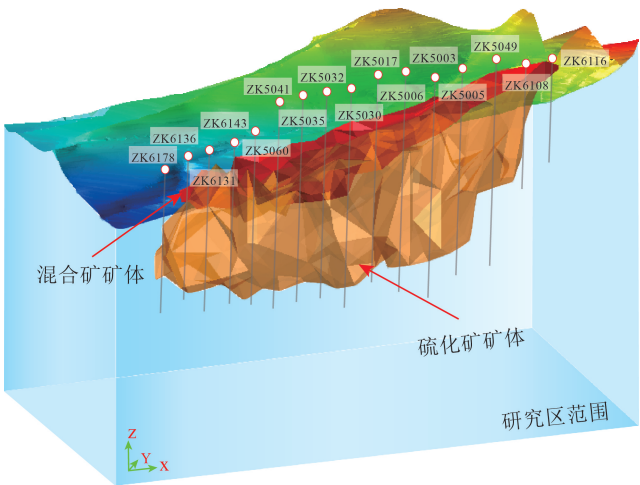


图 5 西藏雄村 I 号矿体部分实体模型图

Fig. 5 Solid modeling of No. I orebody in Xiongkun, Tibet

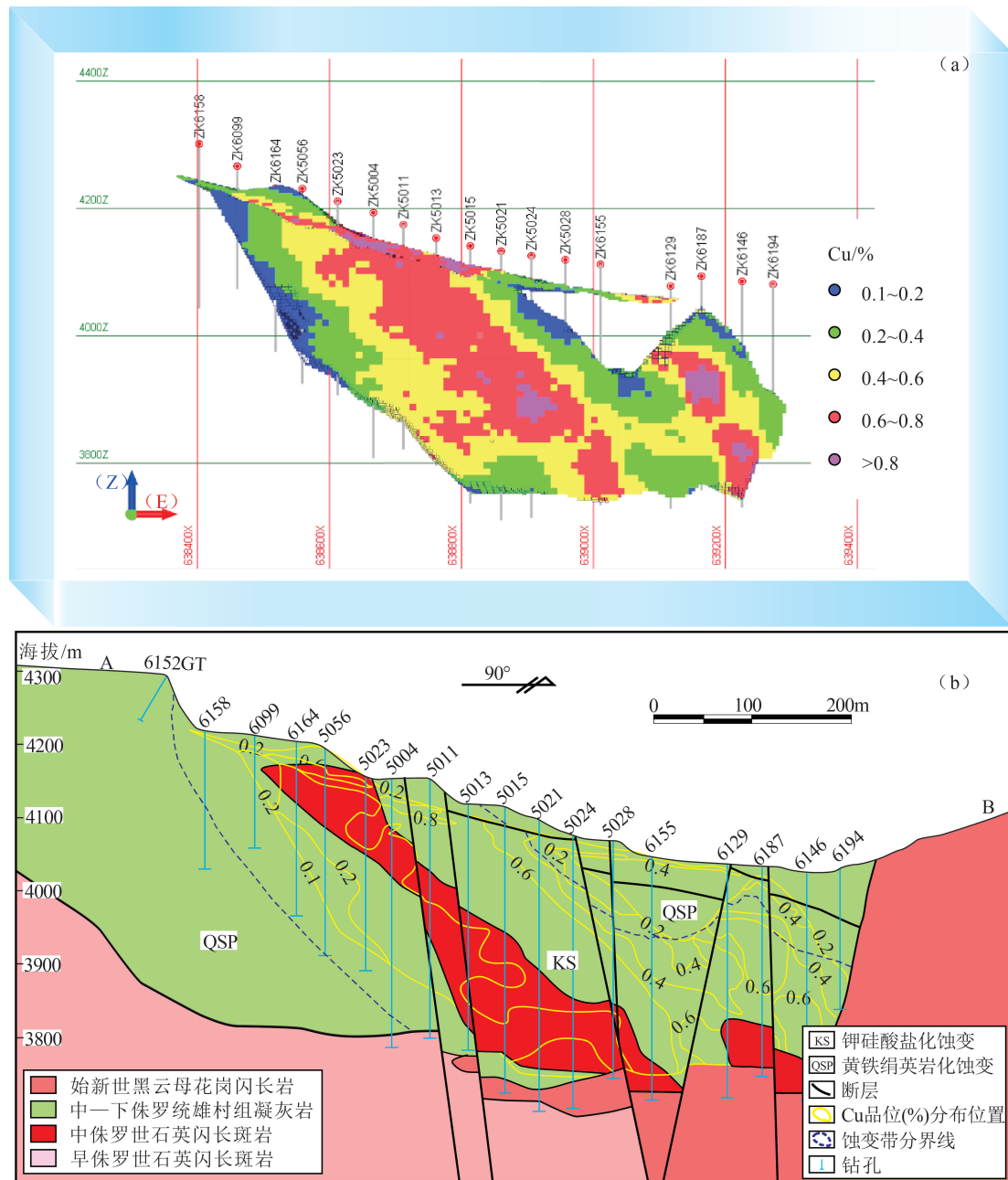


图6 西藏雄村I号矿体三维Cu品位空间分布位置(a)与A-B剖面图(b)<sup>[56]</sup>

Fig. 6 Spatial distribution of Cu element grade(a) and cross section of A-B in the transverse section of the sulfide orebody(b) of No. I orebody in Xiongcu, Tibet

位 0.4%~0.6% 赋存于中侏罗世石英闪长斑岩中,而 Cu 品位高值区也位于中侏罗世石英闪长斑岩。地质三维空间切片进一步验证了西藏雄村 I 号矿体 Cu 品位的变化与成矿斑岩体(中侏罗世石英闪长斑岩)相关。众所周知,斑岩型矿床具有明显的蚀变分带特征,从 A-B 剖面的蚀变特征、雄村斑岩型

矿体与 Cu 品位三维元素切片(图 6)可以看出,西藏雄村 I 号矿体在三维空间与蚀变分带部分具有相关性。

经三维空间硫化矿及混合矿南北方向二维切片发现(图 7),高品位 Cu 元素分布位置主要位于混合矿及硫化矿顶部,局部从 Cu 品位高值中心带向

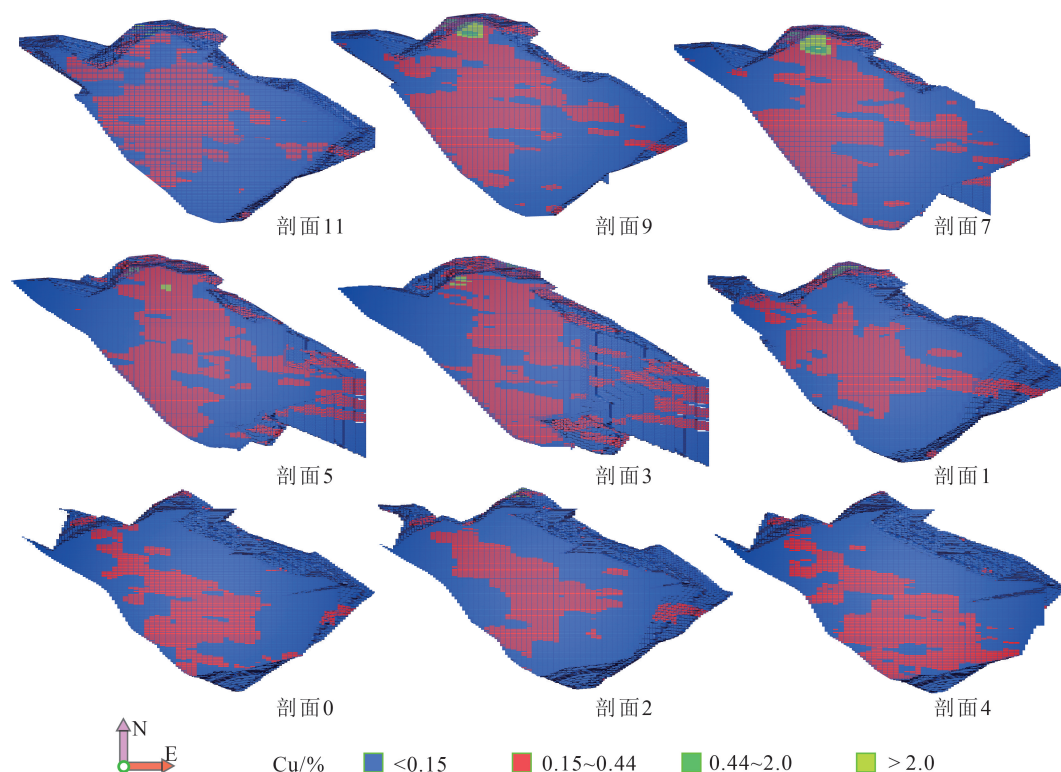


图7 西藏雄村 I 号矿体二维切片 Cu 品位空间分布位置(剖面位置见图1 勘探线剖面位置)

Fig. 7 Spatial distribution of Cu grade in the transverse section of 2D model of No. I orebody, Tibet

边部带增大(剖面9-剖面7)。Cu品位在0.15%~0.44%段存在2段分异趋势(剖面11):一段在混合矿北西方向呈带状分布,另一段在硫化矿中呈似菱形分布,从硫化矿中心位置向南东方向展布。综合系列剖面切片研究发现,2段间可能存在成矿后断层影响,在硫化矿二维剖面切片中见硫化矿呈2段分异趋势。由剖面5-剖面4可见,Cu品位0.15%~0.44%段分布范围由硫化矿北西方向向南西方向运移,在剖面3处产生分异,分为东部上段与西部下段,在剖面1处Cu品位0.15%~0.44%段分布范围减小,因此推测在三维空间中剖面3的东部与剖面1的西部可能存在隐伏矿体。在剖面0处Cu品位0.15%~0.44%段分布范围向西南方向增大,在剖面2处硫化矿北部分布范围减小,在剖面4处Cu品位0.15%~0.44%段分布范围逐步向南西方向增大。因此,经综合南北向系列剖面切面研究发现,在三维空间硫化矿的南西方向可能存在深部矿体未被发现。

## 5 结论

(1)通过对西藏雄村 I 号矿体混合矿、硫化矿

及块体模型的建立,用地质统计学中的距离幂次反比法对混合矿、硫化矿块体模型进行了数字化自动资源/储量估算,其结果与传统几何法基本一致,矿石量及金属量误差均在标准误差范围内。采用距离幂次反比法解译了样品品位在深部三维空间的变化性及相关性,使计算结果更精准、可靠。

(2)中侏罗世石英闪长斑岩为 I 号矿体的成矿斑岩,成矿元素深部空间品位变化的分带特征与成矿斑岩相关。二维切片模型显示分带特征明显, I 号矿体成矿元素品位局部富集,成矿元素品位高值区主要集中在矿体北侧至中部方向,部分向矿体东侧近东西展布;二维切片预测结果显示,硫化矿中心底部位置可能存在隐伏矿体,钻孔 ZK6155、ZK6146 深部具有良好的成矿潜力。

**致谢:**衷心感谢项目组成员对本文给予的无私帮助,感谢两位审稿专家对本文的审阅及提出的建设性修改意见。

## 参考文献

- [1] Lang X H, Deng Y L, Wang X H, et al. Geochronology and geochemistry of volcanic rocks of the Bima Formation, southern Lhasa

- subterranean, Tibet: Implications for early Neo-Tethyan subduction[J]. Gondwana Research, 2020, 80: 335-349.
- [2] 郎兴海, 唐菊兴, 谢富伟, 等. 西藏雄村矿区地面磁测异常特征及其对找矿方向的指示[J]. 地质与勘探, 2014, 50(3): 411-418.
- [3] 郎兴海. 西藏雄村斑岩型铜金矿集区成矿作用与成矿预测[D]. 成都理工大学博士学位论文, 2012.
- [4] 谢富伟, 唐菊兴, 郎兴海, 等. 西藏雄村矿区 I 号矿体斑岩含矿性研究——来自热液蚀变矿物和副矿物的证据[J]. 岩石矿物学杂志, 2015, 34(1): 51-64.
- [5] 郎兴海, 陈毓川, 唐菊兴, 等. 西藏谢通门县雄村斑岩型铜金矿集区 I 号矿体的岩石地球化学特征: 对成矿构造背景的约束[J]. 地质与勘探, 2010, 46(5): 887-898.
- [6] 唐菊兴, 黄勇, 李志军, 等. 西藏谢通门县雄村铜金矿床元素地球化学特征[J]. 矿床地质, 2009, (1): 18-31.
- [7] 丁枫, 郎兴海, 胡正华, 等. 西藏雄村铜金矿 I 号矿体赋矿凝灰岩成因探讨: 来自岩石地球化学、Sr-Nd-Pb 同位素地球化学特征的证据[J]. 地球学报, 2012, 33(4): 546-558.
- [8] 郎兴海, 唐菊兴, 陈毓川, 等. 西藏谢通门县雄村斑岩型铜金矿集区 II 号矿体中辉钼矿 Re-Os 年代学及地质意义[J]. 矿物岩石, 2010, (4): 55-61.
- [9] Ord A, Hobbs B E, Zhao C. Fundamentals of Computational Geoscience[M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009, 122(3): 1-257.
- [10] 赵鹏大, 陈建平, 张寿庭. “三联式”成矿预测新进展[J]. 地学前缘, 2003, 10(2): 455-463.
- [11] 陈建平, 于萍萍, 史蕊, 等. 区域隐伏矿体三维定量预测评价方法研究[J]. 地学前缘, 2014, 21(5): 211-220.
- [12] 陈建平, 王功文, 侯昌波, 等. 基于 GIS 技术的西南三江北段矿产资源定量预测与评价[J]. 矿床地质, 2005, 24(1): 15-24.
- [13] Hill R I. Starting plumes and continental break-up[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1991, 104(2/4): 1-416.
- [14] 陈建平, 陈勇, 曾敏, 等. 基于数字矿床模型的新疆可可托海 3 号脉三维定位定量研究[J]. 地质通报, 2008, 27(4): 124-131.
- [15] 唐攀, 唐菊兴, 林彬等. 传统几何法与地质统计学法在矿产资源储量估算中的对比分析[J]. 地质科技情报, 2016, 35(1): 156-160.
- [16] Tang J X, Song Y, Wang Q, et al. Geological characteristics and exploration model of the Tiegelongnan Cu(Au-Ag) deposit: the first ten million tons metal resources of a porphyry-epithermal deposit in Tibet[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2016, 37(6): 663-690.
- [17] Tang J X, Lang X H, Xie F W, et al. Geological characteristics and genesis of the Jurassic No. I porphyry Cu-Au deposit in the Xionggun district, Gangdese porphyry copper belt, Tibet[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 70(4): 438-456.
- [18] Lang X H, Tang J X, Li Z J, et al. U-Pb and Re-Os geochronological evidence for the Jurassic porphyry metallogenic event of the Xionggun district in the Gangdese porphyry copper belt, southern Tibet, PRC[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 79(2): 608-622.
- [19] Lang X H, Tang J X, Li Z J, et al., Geological characteristics of the No. I deposit in the Xionggun district, southern Gangdese belt, Tibet[J]. Advances in Earth and Environmental Sciences, 2013, 189: 229-235.
- [20] 黄勇, 唐菊兴, 张丽, 等. 西藏雄村斑岩铜金矿集区火山-岩浆岩锆石 Hf 同位素组成[J]. 地质学报, 2014, 88(8): 1528-1538.
- [21] Lang X H, Tang J X, Xie F W, et al. CH<sub>4</sub>-Rich Fluid of the No. I Porphyry Copper-Gold Deposit in the Xionggun District, Gangdese Porphyry Copper Belt, Tibet, PRC[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(S2): 547-548.
- [22] Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y, et al. The Lhasa terrane: record of a microcontinent and its histories of drift and growth[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2011, 301(1/2): 241-255.
- [23] Lang X H, Tang J X, Xie F W, et al. Geological Characteristics and Exploration Potential of the NO. III Deposit in the Xionggun District, Tibet, China[J]. Advanced Materials Research, 2014, 868: 217-223.
- [24] Lang X H, Tang J X, Li Z J, et al. Geological characteristics and exploration potential of the No. II deposit in the Xionggun district, South Gangdese belt, Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87: 709-712.
- [25] 郎兴海, 邓煜霖, 王旭辉, 等. 西藏雄村矿区 III 号矿体硫、铅同位素特征及成矿物质来源[J]. 地质科技情报, 2018, 37(4): 7-15.
- [26] 郎兴海, 郭文铂, 王旭辉, 等. 西藏雄村矿集区含矿斑岩成因及构造意义: 来自年代学及地球化学的约束[J]. 岩石学报, 2019, 35(7): 2105-2123.
- [27] 郎兴海, 唐菊兴, 李志军, 等. 西藏谢通门县雄村斑岩型铜金矿集区 I 号矿体的蚀变与矿化特征[J]. 矿床地质, 2011, 30(2): 327-338.
- [28] 尹青, 郎兴海, 唐菊兴, 等. 西藏雄村矿区 II 号矿体硫、铅同位素地球化学特征[J]. 矿床地质, 2015, 34(5): 1016-1029.
- [29] 黄勇, 丁俊, 唐菊兴, 等. 西藏雄村铜金矿床 I 号矿体成矿构造背景与成矿物质来源探讨[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2011, 30(2): 361-373.
- [30] Lang X H, Tang J X, Yin Q, et al. Geochemistry and genesis of Eocene Lamprophyres in the Xionggun porphyry copper-gold district, southern margin of the Lhasa terrane, Tibet, China[J]. Geochemical Journal, 2017, 51(2): 123-142.
- [31] Xie F W, Tang J X, Chen Y C, et al. Apatite and zircon geochemistry of Jurassic porphyries in the Xionggun district, southern Gangdese porphyry copper belt: Implications for petrogenesis and mineralization[J]. Ore Geology Reviews, 2018, 96: 98-114.
- [32] 王旭辉, 郎兴海, 邓煜霖, 等. 西藏冈底斯南缘汤白斑状花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及地质意义[J]. 高校地质学报, 2018, 24(1): 41-55.
- [33] 郎兴海, 崔志伟, 王旭辉, 等. 西藏谢通门县雄村矿集区综合信息找矿模型及靶区预测[J]. 地球学报, 2017, 38(5): 790-802.
- [34] 郎兴海, 唐菊兴, 李志军, 等. 化探在西藏雄村矿区 II、III 号矿体发现中的作用[J]. 物探与化探, 2014, 38(4): 667-672.
- [35] 郎兴海, 唐菊兴, 李志军, 等. 西藏雄村斑岩型铜金矿集区 I 号矿体的硫、铅同位素特征及其对成矿物质来源的指示[J]. 地球学报, 2012, 33(4): 459-470.
- [36] 李志军, 黄勇, 唐菊兴, 等. 西藏雄村铜金矿集区 I 号矿体磁黄铁矿矿物特征及指示意义[J]. 矿物学报, 2012, 32(2): 205-210.
- [37] Wang X H, Lang X H, Tang J X, et al. Early-Middle Jurassic (182-170 Ma) Ruocuo adakitic porphyries, southern margin of the Lhasa terrane, Tibet: Implications for geodynamic setting and porphyry Cu-Au mineralization[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 173: 336-351.

- [38] 邓煜霖, 郎兴海, 杨宗耀, 等. 西藏拉孜县彭措林石英闪长斑岩的年代学及地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2018, 37(5): 953-966.
- [39] 维克托·迈尔-舍恩伯格, 肯尼思·库克耶. 大数据时代[M]. 杭州: 浙江人民出版社, 2013: 1-78.
- [40] 陈建平, 李婧, 崔宁, 等. 大数据背景下地质云的构建与应用[J]. 地质通报, 2015, 34(7): 1260-1265.
- [41] Rehman Ghori S G. Spatial estimation of global solar radiation using geostatistics[J]. Renewable Energy, 2000, 21(3): 583-605.
- [42] Luo Z Q, Liu X M, Su J H, et al. Deposit 3D modeling and application[J]. Journal of Central South University of Technology, 2007, 2(14): 225-229.
- [43] 罗周全, 鹿浩, 刘晓明, 等. 矿山三维实体建模[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2007, 21(4): 12-18.
- [44] 赵鹏大, 池顺都. 初论地质异常[J]. 地球科学, 1991, 16(3): 241-248.
- [45] 赵鹏大. 矿产勘查理论与方法[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2006: 1-452.
- [46] 赵军芳. 基于矿山地质三维建模及深部矿产预测[D]. 成都理工大学博士学位论文, 2014.
- [47] 张德会, 周圣华, 万天丰等. 矿床形成深度与深部成矿预测[J]. 地质通报, 2007, 26(12): 1509-1518.
- [48] 翟裕生, 王建平, 邓军等. 成矿系统时空演化及其找矿意义[J]. 现代地质, 2008, 22(2): 144-150.
- [49] Han J, Kamber M, Pei J. Data Mining: Concepts and Techniques[M]. Burlington: Morgan Kaufmann, 2012.
- [50] Fayyad U M. Advances in Knowledge Discovery and Data Mining[J]. Menlo Park CA: AAAI/MIT Press, 1996: 1-231.
- [51] 王登红, 刘新星, 刘丽君. 地质大数据的特点及其在成矿规律、成矿系列研究中的应用[J]. 矿床地质, 2015, 34(6): 1143-1154.
- [52] 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): 79-85.
- [53] 于萍萍, 陈建平, 王勤. 西藏铁格隆南铜(金)矿床三维模型分析与深部预测[J]. 岩石学报, 2018, 35(3): 897-912.
- [54] 陈念, 毛景文, 范成龙等. 秘鲁 DonJavier 斑岩型铜钼矿床矿化蚀变特征及矿床三维勘查模型[J]. 矿床地质, 2017, 36(3): 705-718.
- [55] 唐菊兴, 宋扬, 王勤, 等. 西藏铁格隆南铜(金银)矿床地质特征及勘查模型——西藏首例千万吨级斑岩-浅成低温热液型矿床[J]. 地球学报, 2016, 37(6): 663-690.
- [56] 薛建玲, 庞振山, 程志中, 等. 深部找矿基本问题及方法[J]. 地质通报, 2020, 39(8): 1125-1136.
- [57] 蒲万峰, 李鸿睿, 袁臻, 等. 甘肃省玛曲县大水金矿“三位一体”找矿预测地质模型[J]. 地质通报, 2020, 39(8): 1163-1172.