

数字矿床模型及其应用

——以新疆阿勒泰地区可可托海3号伟晶岩脉 稀有金属隐伏矿预测为例

陈建平, 陈 勇, 朱鹏飞, 王丽梅, 尚北川, 赵 洁

CHEN Jian-ping, CHEN Yong, ZHU Peng-fei,

WANG Li-mei, SHANG Bei-chuan, ZHAO Jie

中国地质大学(北京)国土资源与高新技术研究中心/北京市国土资源信息开发研究重点实验室, 北京 100083

Institute of High and New Techniques applied to Land Resources, China University of Geosciences/

Land Resources Information Development and Research Key Laboratory of Beijing, Beijing 100083, China

摘要:通过构建数字矿床模型,实现了对可可托海3号伟晶岩脉稀有金属矿开发现状及潜在经济价值的评估。数字矿床模型分为2个部分:地质体三维模型和钻孔三维品位模型,前者以地质剖面、地表模型、开采线等数据为基础,以Micromine软件为平台,利用三维可视化技术实现、再现了矿床的空间形态和内部结构,后者以钻孔测试数据为基础,利用地质统计学方法,对模型区范围内的成矿元素品位进行了三维插值,展示了成矿元素异常在空间上的分布。2种模型相互结合,对矿山开采现状进行了评估,对剩余矿体的位置进行了限定。最后,结合数字矿床模型,利用一种“等腰三角形”方法对矿床潜在资源量进行了估算。研究结果显示,虽然矿床“钟形体”部位已开采殆尽,但在钟形体南侧缓倾斜部位还存在较大规模具有经济价值的矿体,氧化铍潜在资源量在822.69~1992.41t之间。

关键词:新疆可可托海3号脉;三维;数字矿床模型

中图分类号:P628; P618.6

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2011)05-0630-12

Chen J P, Chen Y, Zhu P F, Wang L M, Shang B C, Zhao J. Digital ore deposit model and its application: a case study of the prognosis of the Koktokay No.3 pegmatite dike concealed rare metal deposit in Altay area of Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(5):630-641

Abstract: Through the building of a digital ore deposit model, the authors evaluated the present exploration situation and potential economic value of the rare metal mine in Koktokay No.3 vein of Xinjiang. The digital ore deposit model consists of two parts, namely 3D model of geological bodies and 3D grade model of borehole data. The former part, based on geological profiles, terrain model and prospecting lines, vividly represents the spatial pattern and inner structure of the ore deposit by using the software Micromine and the 3D visualization technique. The latter one, based on drilling test data, shows the spatial distribution of anomalous metallogenetic elements after 3D interpolation of elemental grades in the model scope by using geological statistic method. With the combination of the two models, the authors assessed present exploitation status of the mine and delineated the remnant ore bodies. The “Isosceles Triangle” method is proposed in this paper for estimating the potential ore resources. Studies shows that, although the “bell-shaped” ore bodies have been fully exploited, there still exist exploitable large-size ore bodies with high economic value in the gently-inclined southern part of the “bell-shaped body”, and the potential resources of beryllium oxides are approximately between 822.69 and 1992.41t.

Key words: No.3 vein in Koktokay area of Xinjiang; 3D model; digital ore deposit

收稿日期:2011-02-25;修订日期:2011-03-23

资助项目:全国危机矿山接替资源勘查项目《新疆富蕴县可可托海矿山资源预测与评价》(编号:200665102)

作者简介:陈建平(1959-),男,教授,博士生导师,从事矿产资源定量评价研究。E-mail:3s@cugb.edu.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

在危机矿山历年的勘探和开发过程中,积累了大量甚至海量的与地质矿产相关的勘探和生产基础数据与资料,这些数据与资料是进一步开展矿山评估和二轮找矿工作的基础。过去,地质数据主要以纸质地质图或剖面的形式出现,如今,地理信息系统(GIS)和三维建模技术的出现,为地质数据的存储、查询、分析和立体显示带来了巨大的方便,使以数字三维模型进行矿床评估、预测研究成为可能。近年来,这一领域引起了越来越多学者的关注,涌现了一系列优秀的成果。纵观这些数字三维模型,大体可以分为 2 类:①固体模型,就是地质资料、剖面图、2.5 维地震资料,通过连接地质体表面轮廓线实现三维地质体的构建^[1-3]。这类研究以三维建模技术和流程为重点,提出了大量切实可行的技术方案,对理解地质体的三维形态及其展布具有较大的帮助,但研究往往滞留于此,已建立起的三维模型潜力没有得到充分利用。②地质统计模型,此类方法主要是对离散类数据进行地质统计学插值^[4-6],三维插值随机把采样数据变成体数据,即可视化计算,从而实现一个三维体。但需要注意的是,这不是一个物理实体,与现实世界的真实实体没有关联。此类方法能方便地进行数据分析、统计和储量计算,但没有三维直观概念,对地质体结构分析不足。怎么有机地结合 2 类模型的优势,更好地服务于矿产预测和开发,是个很有意义的课题。本文以危机矿山“新疆可可托海 3 号伟晶岩脉”为实例,利用 GIS 和三维建模技术,通过建立矿床地质体三维实体模型和钻孔地质统计模型,使两者有机结合,对 3 号脉开发现状和潜在资源量进行全面评价,从而为矿山的后续开发提供参考。

1 数字矿床模型概述

数字矿床的建立是本文研究的基础。所谓数字矿床就是数字化的矿床,可以理解为矿床的信息模型,即一个以地理坐标为依据的、数字化的、三维显示的、虚拟的矿床。数字矿床模型是以深入了解研究区域地质背景为基础,根据地质图、剖面图、钻孔数据等资料,利用三维建模软件建立起的三维可视化矿床模型。数字矿床可以直观地显示出研究区的地质体的形态及其空间位置,其核心思想可以说是用数字化的手段整体地解决矿床及其空间位置相关信息的表达与知识管理。

数字矿床的建立以三维 GIS 技术的发展为依

托,运用现代空间信息理论来研究地层及其环境的信息处理、数据组织、空间建模与数字表达,并运用可视化技术对地层等地质信息进行真三维再现和可视化交互。最初,它能实现的功能包括恢复地表以下地质体的结构、形态和空间展布,使研究者能够动态地观察其内部的细节,了解目标对象与周围地质环境之间的关系等。近 10 年来,随着计算机三维技术的迅速发展,基于三维数字矿床的成矿预测逐步成为研究的热点,如邓明国^[7]建立了个旧矿区芦塘坝 10 号矿群的矿床模型,并将其用于矿体储量计算和矿区生产动态管理;张新宇^[8]应用地学三维空间可视化储量计算辅助分析系统(GSSI)在阿舍勒铜锌矿床和西岔金矿的勘探过程中,进行地学空间可视化储量计算,并为阿舍勒铜锌矿和西岔金矿的经济评价、采矿设计和生产管理提供辅助分析;陈建平等^[9-10]利用 Micromine 软件建立了个旧东区典型勘查区的数字矿床模型,并用三维插值方法对矿床的储量进行了估算。三维数字矿床模型已经发展为找矿定量分析的强有力的支撑。

数字矿床不仅为研究者提供地下矿体的三维形态,更为重要的是,可以通过矿床的三维模型开展隐伏矿体的三维预测,根据对研究区成矿规律的分析确定成矿条件有利组合的三维定位,进而对预测矿体进行资源量估算和富矿体的圈定。本文研究中首先应用相关的地质资料建立起 3 号脉的三维数字模型,对研究区成矿规律进行分析总结,最终实现了找矿靶区圈定和资源量估算。

2 研究区地质背景

可可托海 3 号伟晶岩脉是阿勒泰地区众多花岗伟晶岩中分异程度最好的岩脉,在大地构造位置上处于西伯利亚板块阿尔泰陆缘活动带,哈萨克斯坦和西伯利亚板块的缝合线附近,侵位于阿尔泰加里东—海西褶皱带的轴部富蕴地背斜褶皱带内的片麻状黑云母花岗岩顶部凹陷的斜长角闪岩内^[11]。可可托海含矿伟晶岩脉产于片岩、花岗岩及角闪岩、斜长角闪岩类之中,3 号伟晶岩脉形态复杂,总体形态呈钟状,上部是陡倾斜的岩钟部分,下部是缓倾斜的岩钟环带(图 1)。3 号脉结构带因矿体形态而异,岩钟部分可划出 9 个带,缓倾斜部分可分出 7 个带。①岩钟部分:岩钟部分是 3 号脉结构构造最完整的地段,由外向内为 文象及准文象结构中粗粒伟晶岩

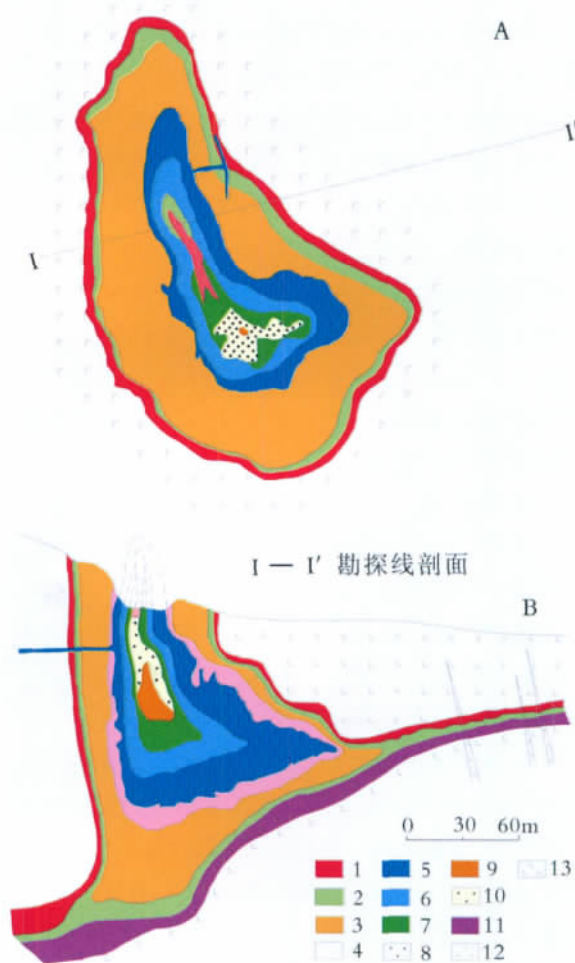


图1 可可托海3号伟晶岩脉地质示意图^[4]

Fig. 1 Geological sketch map of the Koktokay

No.3 pegmatite dike

- 1—文象准文象伟晶岩带;2—糖晶状钠长石带;3—块体微斜长石带;4—白云母—石英带;5—叶钠长石—锂辉石带;6—石英—锂辉石带;7—白云母—薄片钠长石带;8—锂云母—钠长石带;9—核部块体微斜长石带;10—核部块体石英带;11—中—粗粒伟晶岩带;12—二云母花岗岩脉;13—变辉长岩

带; 细粒钠长石带; 块体微斜长石带; 石英—白云母带; 叶钠长石—锂辉石带; 石英—锂辉石带; 白云母—薄片钠长石带; 锂云母—薄片钠长石带和 块状石英带(核)。上述各带,除第1带呈透镜体之外,其它各带都基本连续,为环带状构造。②缓倾斜部分:缓倾斜部分有7个结构带,其中外部3个带连续,内部4个带是断续的。连续的结构带(由上盘到下盘): 文象准文象结构中粗粒伟晶岩带; 细粒钠长石带; 细粒伟晶岩带不连续的结

构带(出现在矿脉膨胀地段); 块状微斜长石带; 石英—白云母带; 叶钠长石—石英—锂辉石带和 锂云母—薄片钠长石带。岩钟部分的典型地质结构构造反映了3号矿脉伟晶岩作用演化的全过程。

3号矿脉规模巨大、交代强烈、结晶分异完善、矿化特征明显,是世界级的大型稀有金属花岗伟晶岩矿脉。已发现矿物76种,具有工业意义的矿物有绿柱石、锂辉石、铯榴石、铌铁矿—钽铁矿簇、细晶石族等。稀有金属矿产品主要为铍、锂、铌和钽,由富矿“共生—结构体”构成矿带,有的含有1种稀有金属,有的含有2种或2种以上稀有金属,其中铍经济价值最大。但由于矿山经多年的开采,大部分探明的可采资源量已采尽,矿山于1999年闭坑。

3 建模数据和地质体建模、钻孔建模

3.1 建模数据

3号脉勘探历史悠久,勘探资料丰富,本次共收集了22条地质剖面、48个钻孔、1163个钻孔化验数据、中段图、工程布置图、1:1万地质图、地形图等资料。地质剖面基本并行,呈菱形展布。钻孔模型由3个文件组成,分别为钻孔孔口三维坐标文件、钻孔侧斜文件和化验数据文件。所收集的数据为纸质形式,首先要对这些数据进行预处理,主要包括在MapGIS 6.7平台上对剖面图、中段图进行矢量化和几何配准,并以DXF格式存储。对钻孔数据进行核对,录入Access 2000数据库。对地形图等高线在ArcGIS 9.0平台上进行矢量化,生成地表模型(DTM)。

3.2 地质体建模

依据剖面图和钻孔的分布范围,首先把模型区限制在 $X: 85447.73 \sim 86229.47\text{m}$ 、 $Y: 29180.85 \sim 29748.50\text{m}$ 、 $Z: 1230 \sim 841\text{m}$ 的矩形区范围之内,把DXF格式的工程布置图、中段图和剖面图导入Micromine平台中(同时假定剖面图精度高于中段图)。矿山常用的勘探线地质剖面图实际是将空间中距勘探剖面一定距离范围内(法线方向)的岩性、地层、钻孔等信息投影在勘探剖面上而形成的。在勘探线剖面图中,岩体、地层等对象只保留了二维空间信息(只含有 X 或 Y 方向之一和高度信息),勘探剖面的实际位置在勘探工程部署图中反映(水平投影在勘探工程部署图中)。利用剖面建模,首先要将剖面(二维剖面投影)恢复到三维空间中,剖面水平投影与中段图或工作部署图一致,剖面上的水平高度与三维

空间中的实际高度一致,该操作涉及一系列的剖面旋转、平移和配准工作。完成剖面的三维空间校正后,就可以将相邻剖面中同一岩体或地层依据形态大小、延伸方向和规律进行线框连接,对尖灭岩体或所夹透镜体要进行适当处理,以反映岩体和地层在地下的实际三维分布。本次建模使用的软件所支持的区实际是一种特殊的线文件,其提供的线如果起止点为同一点,即认为是闭合的区(可以填充颜色和岩性花纹符号),它目前不具备 GIS 所支持的拓扑关系功能,具有公共边的相邻区不能共用一条线作为边界线。这就在一定程度上增加了建模时建立岩体和地层线框模型的工作量。相邻剖面之间采用离散插值算法(DSI)^[13]进行光滑处理,DSI 算法能在考虑约束条件下使插值出的表面粗糙度降到最低,同时尽可能使边界接近真实。最后,导入 DTM 数据,与工程部署图联合形成地表模型。

3.3 钻孔建模

把建模范围分割成 20m×20m×20m 的单元块,次分块规格为 10m×10m×10m。把钻孔数据库导入 Micromine 数据库中,利用钻孔井口坐标、侧斜、深度等参数生成线实体,并对线体相应块段赋予钻孔化验数据。钻孔三维模型的主要目的是储量计算,储量计算的关键一步是对未知区域的品位进

行估计,传统的资源量估算方法一般不重视品位在整个矿区或矿体内的变异性,地质统计学理论的出现使利用地质理论进行全局和局部分析成为可能^[13-17]。资源量估算过程中特别高的品位应该引起怀疑,高奇异值的出现会强烈影响数据统计参数的变化,如平均值、方差和协方差,同时严重影响试验变异函数的性状;特异值影响其周围的矿块品位,从而可能高估矿石量和金属量;在克里格法估计过程中还可能会产生奇异的样品权系数,如负的权系数^[18]。于是,怎样识别和处理特异值向来是矿产资源量估算的热点问题。本文对可可托海 3 号伟晶岩脉内样品的 BeO 含量进行了对数正态累积频率分析(图 2),确定 3 号脉 BeO 特高样品值为 1.46%,取样中有高于该值的样品进行截断处理。

地质统计学提供了多种克里格方法用来对未知区域的品位进行估计。样品的分布决定着插值方法。图 3 分别对 3 号脉 BeO 品位的原始采样长度、2m 样长组合、20m 样长组合和文象、准文象中粗粒伟晶岩带内样品 BeO 品位(3 号脉主要成矿带之一)的数据进行了统计分析。从图 3 可以看出,3 号脉内样品中 BeO 品位总体接近对数正态分布,不同样长组合后的分布形态变化较小。侯景儒等^[19]根据矿床中有益组分的分布特征选择不同的地质统计学

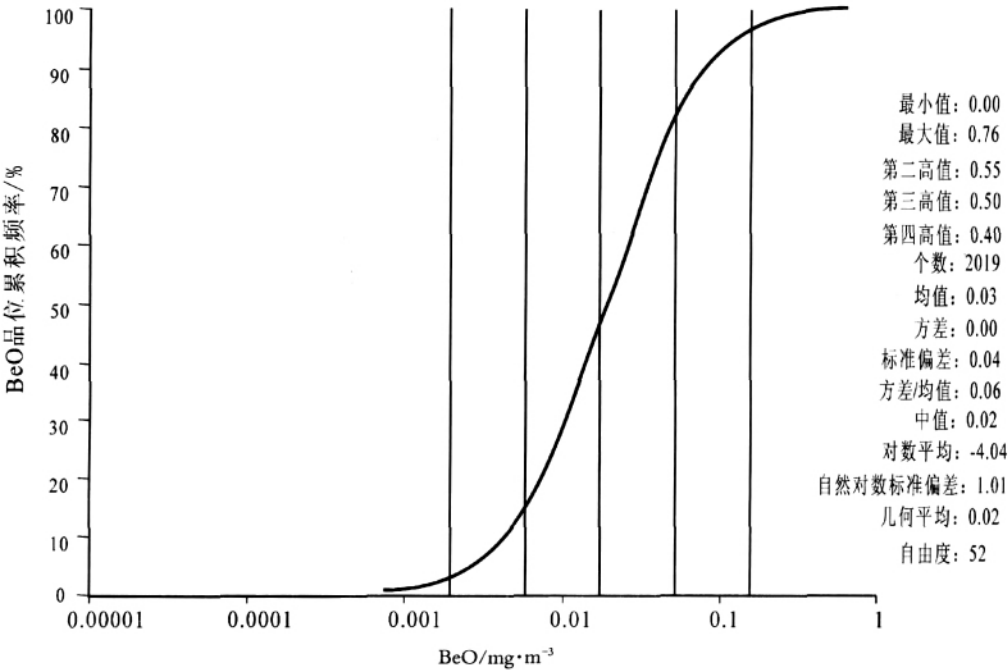


图 2 可可托海 3 号脉 BeO 样品品位累积频率

Fig. 2 Cumulative frequency of BeO sample grade of dyke No.3

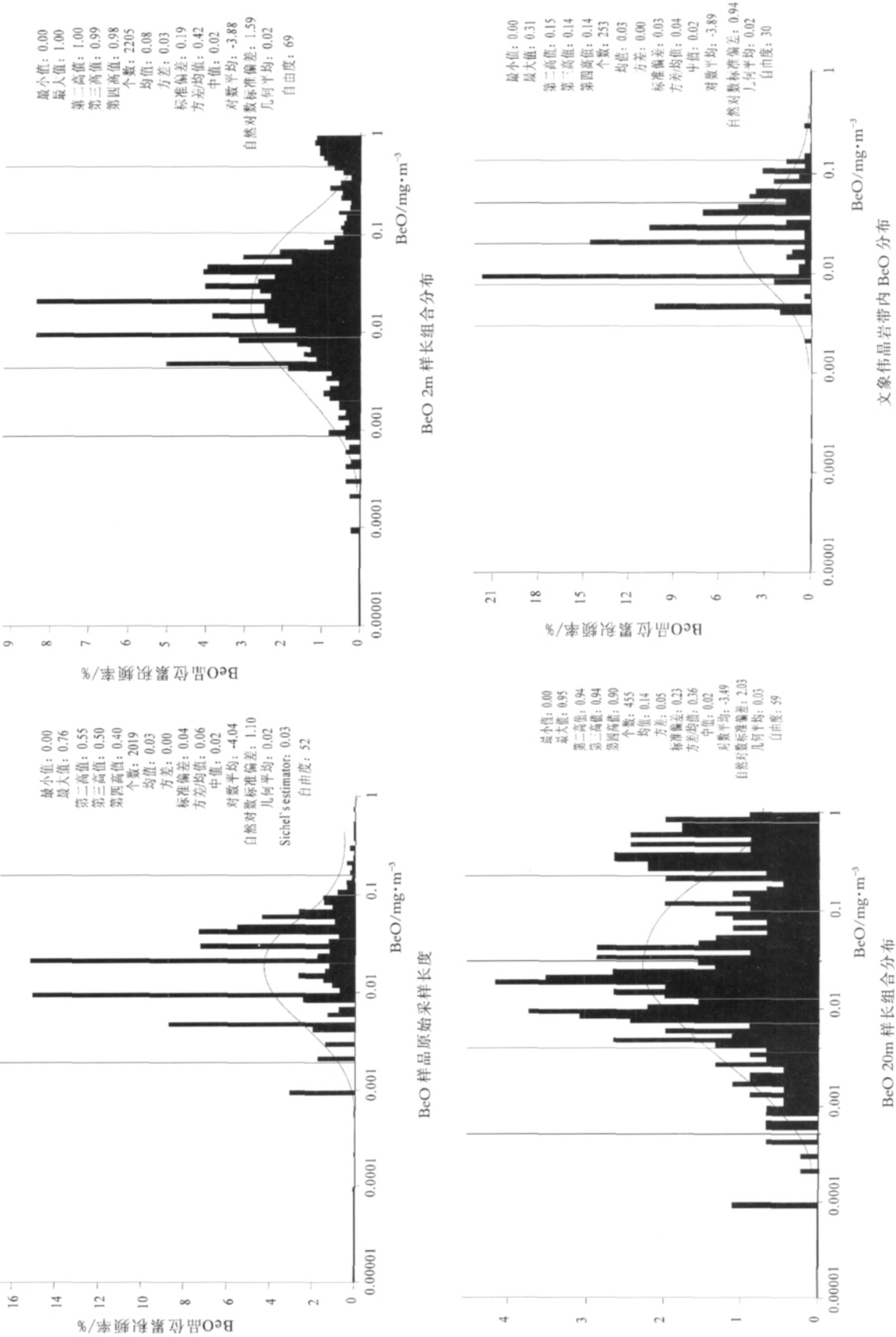


图 3 BeO 样品品位分布
Fig. 3 Grade distribution of BeO samples

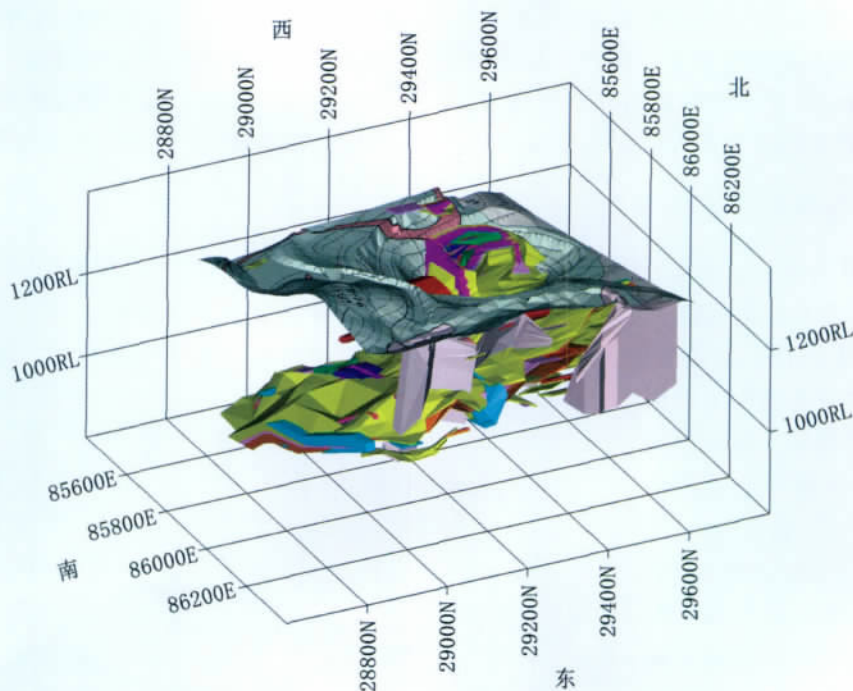


图 4 3 号脉矿体共生结构带三维实体模型

Fig. 4 3D entity model of mineralogical-structural zones of dyke No.3

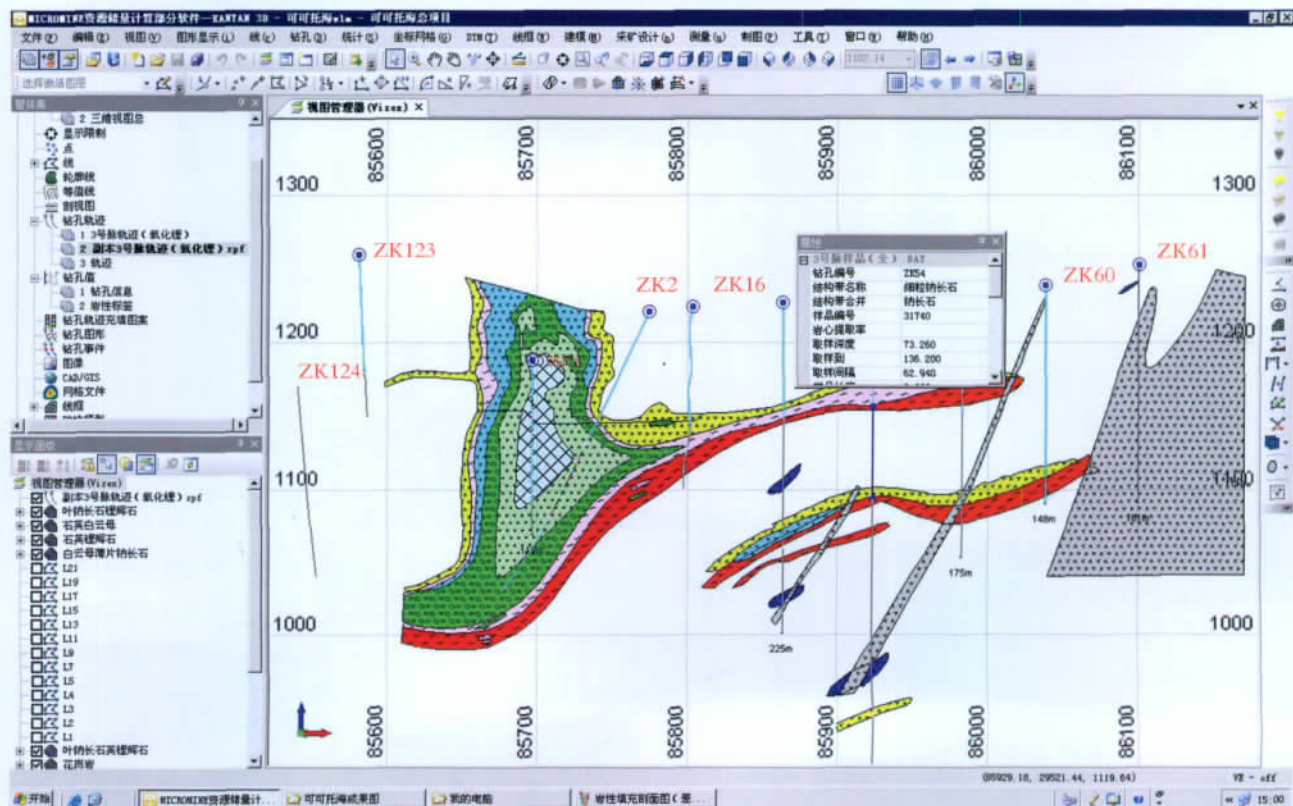


图 5 3号脉矿体共生结构带三维剖面

Fig. 5 3D sections of mineralogical-structural zones of dyke No.3

方法,当有用组分服从正态分布时,可以用简单克里格法、普通克里格法和泛克里格法,本文采用简单克里格法对模型区范围内的单元体进行插值,插值搜索半径为 40m,保证了资源量的外推不超过工程间距的 1/2,符合工程勘查矿体圈定的相关原则。

4 可可托海 3 号脉数字矿床模型

图 4 为 3 号脉地表和 9 个共生结构带三维实体模型,该三维形态图真实地反映了 3 号脉矿床特征中描述的空间形态特征, 总体轮廓与图 1 基本一致,核部的岩钟和南部的缓倾斜清晰可辨,每个结构带都有精确的坐标位置, 在地表平面图上呈椭圆形,走向 NW335°,长约 250m ,宽约 150m ,倾向 NE ,上盘倾角 40~60°,下盘倾角 80~90°,自上而下有逐渐膨大的趋势。 缓倾斜见于地下 200~500m 处, 走向 NW310°,倾向 SW,沿走向长 2160m,沿倾向延伸 1660m ,厚 20~60m ,平均 40m ,倾角 10~25°。此外,除了在三维视角下直接观察各建模实体的空间形态和分布特征,还可以通过设定特殊的显示方式,显示与传统使用的地质剖面图相对应的三维剖切图。从三维模型可以看出,3 号脉钟形体与缓倾斜部位较为连续的结构带包括文象—准文象中粗粒伟晶岩带、细粒钠长石带、细粒伟晶岩带、石英白云母带和块体微斜长石带,不连续的带包括白云母薄片钠长石带、叶钠长石—锂辉石带、石英—锂辉石带和块体石英核带。图 5 是 3 号脉矿体共生结构带三维剖面,显示了剖面附近的钻孔和部分围岩。分带内部岩性花纹已填充,可以根据研究观察的需要,切出任一角度视角下的三维矿体剖面,并即时查询剖面内所有对象的属性信息,如钻孔中取样、化验结果和岩体分带内岩性特征等属性信息,同时实现了三维空间下的空间数

据查询管理功能。钻孔模型真实地展示了钻孔的分布和形态,并与岩心化验数据相关联,可以动态地查询其坐标和成矿元素化验值。图 6 是利用 DEM 和采掘线形成的当前地表模型。图 7 是 BeO 品位三维空间插值模型,图中立方块不同颜色显示 BeO 品位值的高低。

5 应用

5.1 矿山开发现状评估

根据 BeO 异常和地质体三维模型,可以清楚地

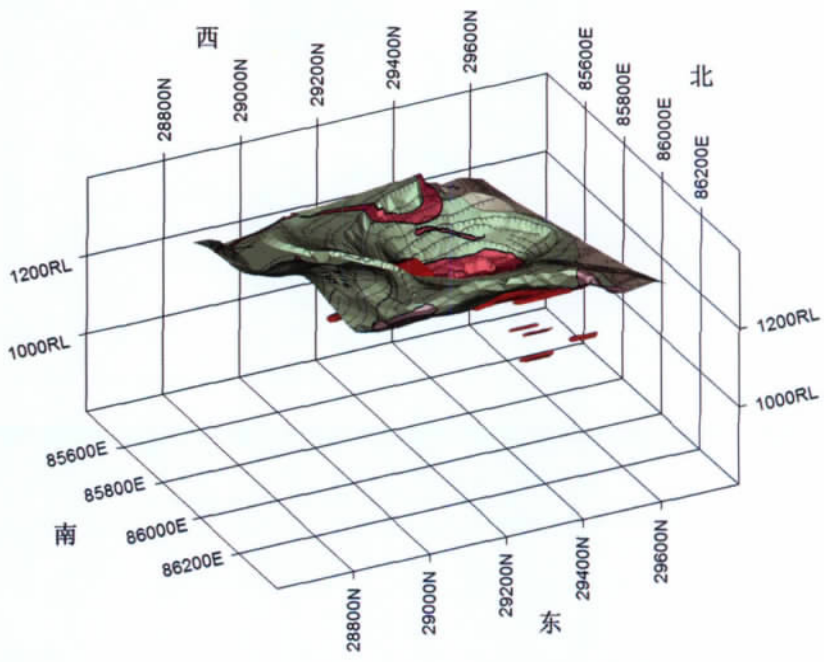


图 6 3 号脉采掘坑地表模型
Fig. 6 Terrain model of mining pit of dyke No.3

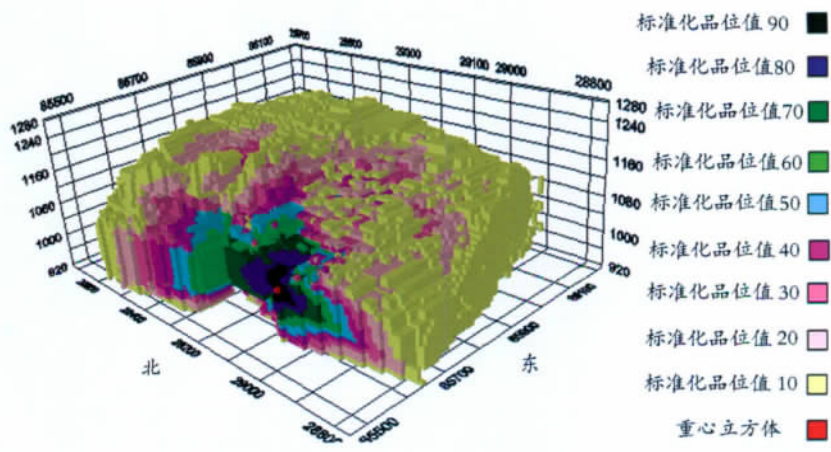


图 7 BeO 品位三维插值模型
Fig. 7 3D interpolation model of BeO grade

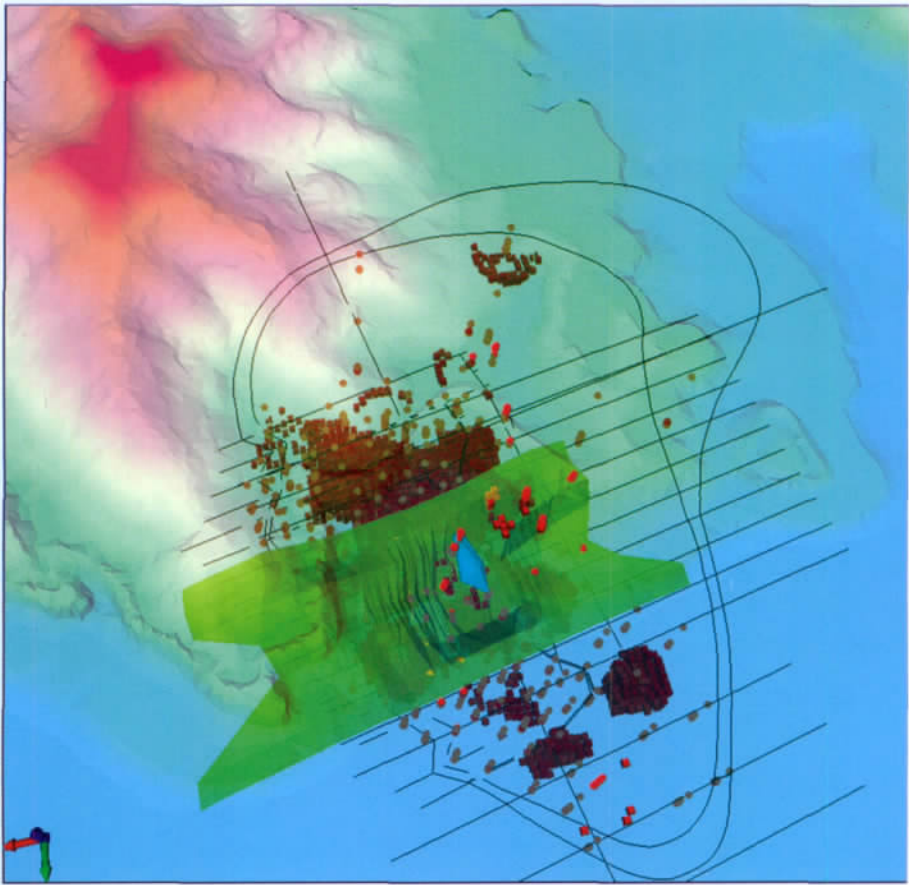


图 8 3 号脉闭坑时的开采现状

Fig. 8 The current status of exploitation of the closed dyke No.3 mine

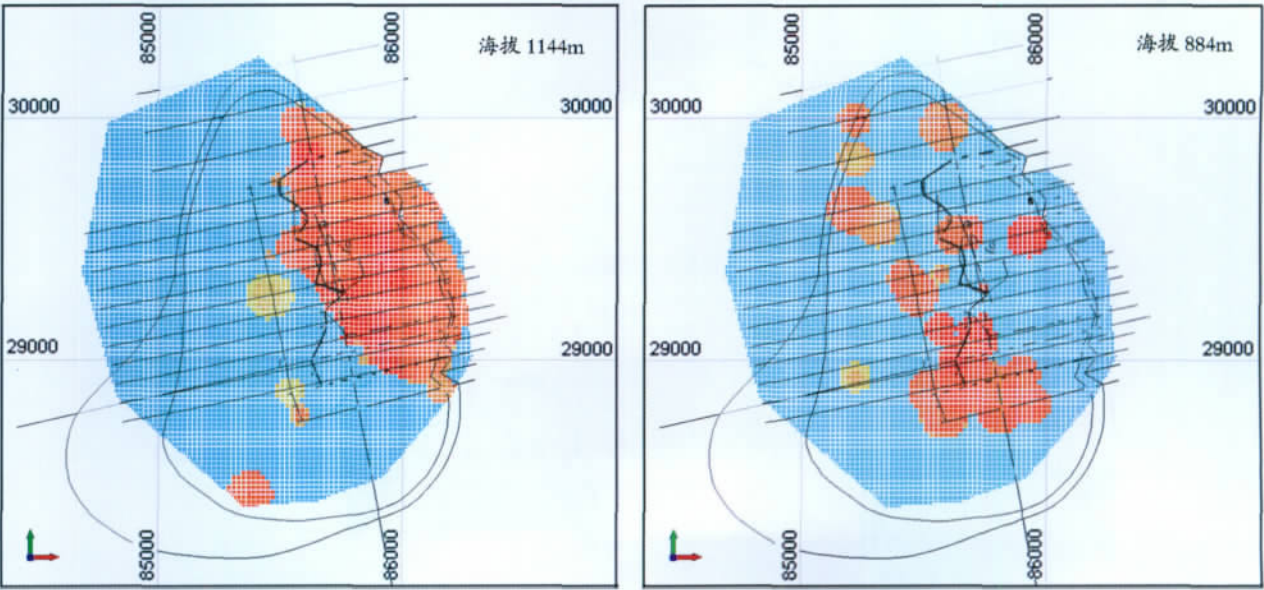


图 9 3 号脉各水平面 BeO 异常分布变化(俯视,正上方为北)

Fig. 9 The distribution change of BeO anomalous on every horizontal plane of dyke No.3

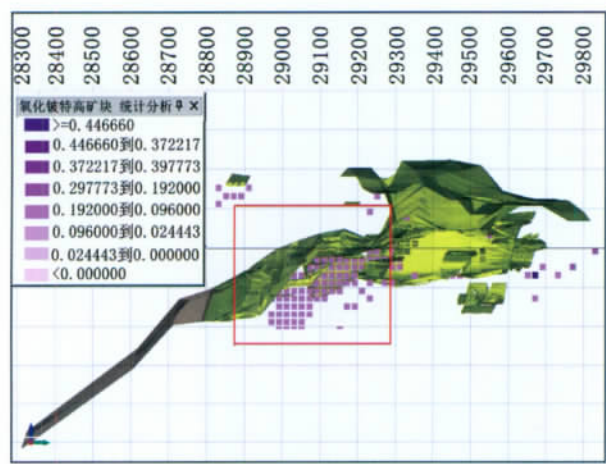


图 10 3 号脉缓倾斜部位的局部隆起下部元素异常富集情况
(紫色为高于氧化铍工业品位的立方块,左侧为南)

Fig. 10 The situation of element anomaly enrichment in the bottom of uplift on part of low-angle dip position of dyke No.3

注:上边的数值为公里网(m),色标的数值是 BeO 品位,单位为 mg/m³

观察研究区的潜在资源量分布和勘探开发情况。图 8 为 3 号脉开采现状图,图中东西向绿色半透明曲面为 1988 年矿区开采的露天界面,蓝色椭球体为 3 号脉岩钟部位的石英核。从图 8 可以看出石英核基本都在 1988 年开采界面之下,说明岩钟部位的矿体都已经基本采出。BeO 三维空间异常分布图从三维角度显示了元素异常的空间分布,将研究对象按垂直于观察角度切割成具有一定距离间隔的平行剖面,切片结果显示 3 号脉在由海拔 1284m 平面向下的过程中,BeO 异常主体分布在中心区域,当深度变化为海拔 1144m 时,中部不变,南部开始出现 BeO 异常(图 9),此后随深度加深,南部异常逐渐变大,到海拔 844m 时,异常主要集中于南部区域。图 10 显示了高于工业品位的 BeO 异常的分布,显示南侧缓倾斜局部隆起(中间红框内)下仍然存在一个较大规模的 BeO 异常。通过对图 10 中主要成矿岩体文象—准文象中粗粒伟晶岩的空间形态的

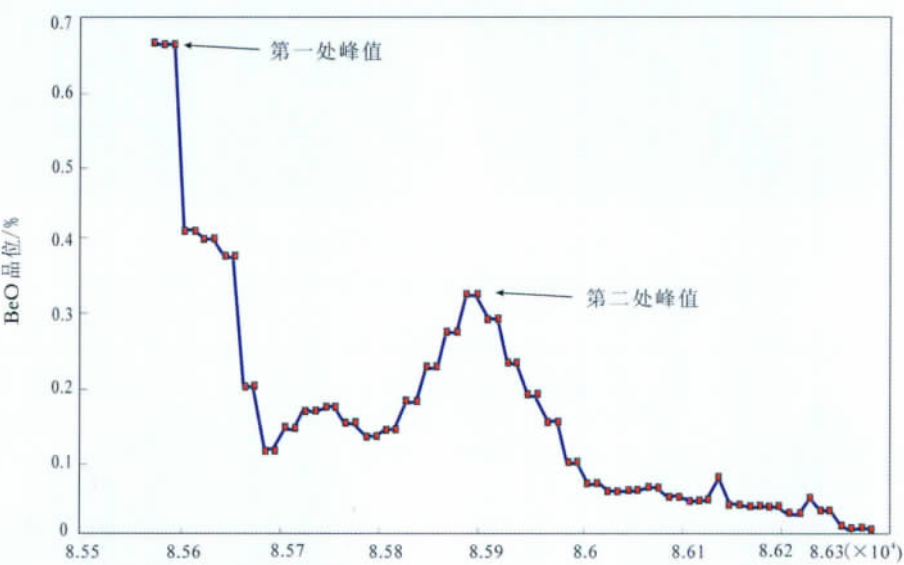


图 11 缓倾斜部位 BeO 品位沿东西走向的分布(右方为东,横坐标为公里网(m))

Fig. 11 The distribution map along east-west strike of the BeO grade in the low-angle dip position

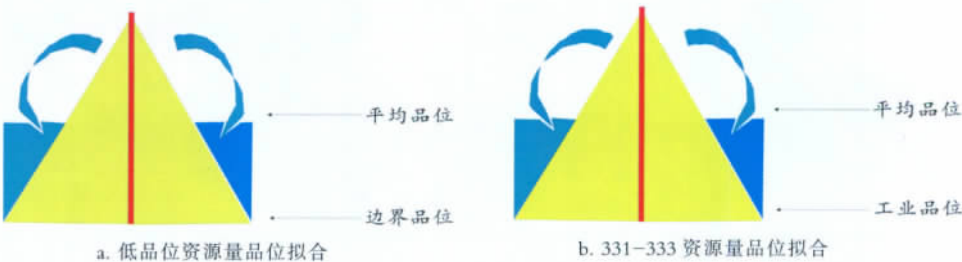


图 12 矿石品位估算拟合示意图

Fig. 12 The fitting sketch map of estimated ore grade

比较分析,认为该 BeO 异常体是一个与岩体局部构造符合较好的氧化铍隐伏矿体的反映。

利用 MATLAB 软件对该异常体东西走向上的品位分布进行统计分析,根据每个立方体单元块的 East 坐标值从小到大依次排列出对应氧化铍的品位值,分析品位值的波动情况,绘出氧化铍的品位分布图(图 11)。图 11 中出现了 2 个峰值,对应的品位峰值为 0.667%和 0.326%,远高于工业品位,进一步证明该异常体是个富矿带。

5.2 潜在资源量计算

潜在资源量估算的具体原理可描述为:首先把矿体划分成无数个大小相同的块,每个块都有代表其空间位置的三维坐标,此模型即为空块模型,然

表 1 夹石率统计

Table 1 Statistics of dunn bass rate

	L/m	S/m	J/%
3 号脉	670.262	1174.792	57.05

后根据模型中已知的采样点品位,进行空间插值,从而使每个块都具有一个品位值,设定阈值,高于阈值的单元体则视为矿体,从而对矿体进行储量估算。资源量的计算公式如下:

$$C=\rho\times v\times g\times(1-J)$$

(1)

式中,C 为某模型区内 BeO 或 Li₂O 的资源量;v 为单个单元块的体积,ρ 为模型区内岩石的平均体重;

表 2 已采掘的 BeO 各结构带资源量计算结果

Table 2 Resources calculation of various structure zones for excavated BeO

结构带名称	品位划分/%	体重/t·m ⁻³	资源量下限/t	资源量上限/t
文象-准文象 中粗粒伟晶岩	≥0.04	2.65	84.80	98.53
	≥0.096		305.28	739.03
细粒伟晶岩	≥0.04	2.65	0.00	0.00
	≥0.096		0.00	0.00
石英-白云母带	≥0.04	2.64	160.51	188.84
	≥0.096		364.95	834.48
块体微斜长石带	≥0.04	2.69	43.04	54.41
	≥0.096		61.98	306.03
细粒钠长石带	≥0.04	2.69	43.04	64.17
	≥0.096		144.61	365.41
石英锂辉石带	≥0.04	2.64	126.72	171.02
	≥0.096		40.55	42.82
白云母薄片 钠长石带	≥0.04	2.64	8.45	9.14
	≥0.096		0.00	0.00
块体石英带	≥0.04	2.65	16.96	20.99
	≥0.096		0.00	0.00
叶钠长石- 锂辉石带	≥0.04	2.85	173.28	235.12
	≥0.096		175.10	315.96
总 计	≥0.04 且<0.096		656.80	842.22
	≥0.096		1092.48	2603.73
	合计 (≥0.04)		1749.28	3445.94
闭坑报告	≥0.04		3146.39	

g 为模型区内不同的品位值; J 为夹石率(表 1)。

在资源储量的估算过程中, 由于所预测的单元块(单元块规格行 \times 列 \times 层为 20m \times 20m \times 20m, 次分块的规格为 10m \times 10m \times 10m)里包含的不一定全是矿体, 一般会含有夹石, 于是引入夹石率的概念, 把含矿区内小于边界品位的钻孔样品总长度与含矿区内钻孔样品的总长度的比值称作夹石率。把含矿区内小于边界品位的钻孔样品总长度记为 L , 含矿区内所有钻孔样品的总长度记为 S , 因此, 夹石率 J 的计算公式为: $J=L/S$ (表 1)。

由于储量计算的结果是个确定的值, 而这个值与实际值之间会有一定的误差, 由此提出了用“等腰三角形”方法对潜在资源量的上下限进行限定。上文图 3 表明, BeO 的品位分布无论是在原始采样长度或者是不同样长的组合情况下, 还是在不同的结构带内均大概符合对数正态分布。这种特征表明, 本矿区无论是矿体的空间分布, 还是矿石的品位特征都具有相对稳定的规律。由于矿石品位分布大概服从正态分布, 用等腰三角形拟合样品品位的正态分布, 对于低品位资源量来说, 等腰三角形边长的中点可视为低品位区间内矿石的平均品位, 底边可视为矿石的边界品位, 如图 12-a 所示; 对于高品位资源量来说, 等腰三角形边长的中点可视为大于工业品位以上区间内的矿石平均品位, 底边可视为矿石的工业品位, 如图 12-b 所示。由面积全等法则, 可得图中蓝色部分的面积与等腰三角形中线以上黄色部分的面积相同。以此可以推导出, 根据平均品位估算出的资源量接近实际资源量的上限, 根据边界品位估算出的资源量接近实际资源量的下限。

为了验证这种估算方法的准确性, 在三维模型的基础上, 以此计算方法对闭坑前已开采的资源量进行了计算, 结果见表 2。

已采氧化铍的总量在 1794.5572~3568t 之间, 而实际已采资源量氧化铍为 3146.39t, 实际开采量介于资源量上限和下限之间, 且更接近于最高值, 说明矿坑内的资源已被最大程度地采出, 上面的估算结果具有较高的可信度。因此, 用这种方法来估算未开采的资源量也具有较高的准确性。

对缓倾斜部分富矿带的资源量估算结果见表 3。由表 3 可以看出, 未开采的氧化铍资源量主要集中在文象—准文象中粗粒伟晶岩、细粒伟晶岩、石英—白云母、块体微斜长石和细粒钠长石带

表 3 未采掘的 BeO 各结构带资源量计算结果
Table 3 Resources calculation of various structure zones for not excavated BeO

结构带名称	品位划分/%	体重/t·m ⁻³	资源量下限/t	资源量上限/t
文象-准文象中粗粒伟晶岩带	≥0.096	2.65	148.77	410.88
细粒伟晶岩带	≥0.096	2.65	148.77	328.97
石英-白云母带	≥0.096	2.64	113.34	333.45
块体微斜长石带	≥0.096	2.69	44.42	121.97
细粒钠长石带	≥0.096	2.69	310.92	706.92
石英-锂辉石带	≥0.096	2.64	0.00	0.00
白云母薄片钠长石带	≥0.096	2.64	0.00	0.00
块体石英带	≥0.096	2.65	0.00	0.00
叶钠长石-锂辉石带	≥0.096	2.85	56.47	90.22
资源量合计	≥0.096		822.69	1992.41

中, 其中以细粒钠长石带中最多。通过估算, 得到缓倾斜富矿带中氧化铍资源量在 822.69~1992.41t 之间。

6 结 论

本文以建立危机矿山数字矿床模型的手段开展了对可可托海 3 号脉矿山开发现状和潜在资源量的评估研究。数字矿床模型主要分为地表模型、地质体三维实体模型和钻孔三维插值模型。DTM 和工程施工坡面是建立地表模型的基础, 三维实体模型主要依托地质剖面、地表模型、工程部署图等资料在 Micromine 软件平台上实现, 钻孔三维插值模型主要是依据测试数据的空间分布来选择合适的插值方法完成的。几何模型和品位模型构成了数字矿床模型的主体。模型直观地展示了矿脉结构带的分布和结构, 以及矿山闭坑时的开采状态和潜在资源的空间分布。无论是地质体三维实体模型, 还是钻孔元素异常模型, 均表明在矿床南侧的缓倾斜部位存在一个规模较大的富矿体。利用“等腰三角形”方法估算出了富矿体资源量的上下限, 氧化铍资源量在 822.69~1992.41t 之间, 仍具有较高的后续开发价值。

利用此方法计算了矿山已开采的资源量,并与实际开采量进行对比,证明了该方法良好的可信性。

本文的研究实例体现了数字矿床模型的优势,不但在矿山评估中具有较大的参考价值,而且能够在后续的开采施工中提供有力的指导,是一项比较有前景的技术。

致谢:赵鹏大院士始终关注着本项目的进展,并在项目进行过程中多次提出宝贵的建议,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- [1]陈爱兵,秦德先,张学书,等.基于 MICROMINE 矿床三维立体模型的应用[J].地质与勘探,2004,40(5):77-80.
- [2]Christian L V, Michel C, Guillaume L, et al. 3D modeling of uranium-bearing solution-collapse breccias in Proterozoic sandstones (Athabasca basin, Canada)-Metallogenic interpretations[J]. Computers & Geosciences,2009,35:92-107.
- [3]Andrea T, Enroco G, Marco M. Three-dimensional reconstruction of the Carrara Syncline (Apuan Alps, Italy): An approach to reconstruct and control a geological model using only field survey data[J]. Computers & Geosciences,2009,35:33-48.
- [4]Marinoni O. Improving geological models using a combined ordinary-indicator kriging approach[J]. Engineering Geology, 2003, 69: 37-45.
- [5]Regli C, Rosenthaler L, Huggenberger P.Gepssav:a simulation tool for subsurface applications[J]. Computers & Geosciences, 2004, 30: 221-238.
- [6]Yao L Q, Pan M, Cheng Q M. 3D Property Modeling of VoidRatio by Cokriging[J]. Journal of China University of Geosciences, 2008, 19(4):410-415.
- [7]邓明国.个旧矿区芦塘坝 10 号矿群矿床模型研究[D].昆明:昆明理工大学硕士学位论文,2005.
- [8]张新宇.地学空间三维可视化储量计算辅助分析系统关键技术的研究[D].长春:吉林大学博士学位论文,2006.
- [9]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.
- [10]陈建平,尚北川,吕鹏,等.云南个旧矿区某隐伏矿床大比例尺三维预测[J].地质科学,2009,44(1):324-337.
- [11]张辉.岩浆-热液过渡阶段体系中不相容元素地球化学行为及其机制——以新疆阿尔泰 3 号伟晶岩脉研究为例[D].北京:中国科学院博士学位论文,2001.
- [12]邹天人,张相宸,贾富义,等.论阿尔泰 3 号伟晶岩脉的成因[J].矿床地质,1986,5(4):34-48.
- [13]Mallet J L.Discrete modeling for natural objects[J]. Mathematical Geology, 1997,29(2): 199-219.
- [14]Journel A G, Huijbregts C J. Mining Geostatistics[M]. New York: Academic Press, 1978: 1-600.
- [15]Arma D D. Geostatistics with Applications in Earth Sciences [M]. New Delhi:Capital Publishing Company, 2002:1-170 .
- [16]余先川,侯景儒,姚力,等.时空域非参数和多元信息的地质统计学研究[J],自然科学进展,2003,13(11):1217-1220.
- [17]邓明国,李文昌,秦德龙,等.克立格方法在个旧矿区芦塘坝 10-9 号矿体储量计算中的应用[J].地质与勘探, 2006,42(6):67-70.
- [18]孙玉健.地质统计学在固体矿产资源评价中的若干问题研究[D].北京:中国地质大学(北京) 博士学位论文,2008:17-18.
- [19]侯景儒,黄竞先.地质统计学及其在矿产储量计算中的应用[M].北京:地质出版社,1982:1-193.