

文章编号: 1674-9057(2013)04-0610-06

doi:10.3969/j.issn.1674-9057.2013.04.006

基于地质三维模拟的攀枝花铁矿块体模型储量估算

陈三明¹, 何玉州^{1a,2}, 罗文敏^{1a}, 高 阳^{1a}, 曹艳超^{1a}, 杨 贤^{1a}, 邓友志^{1a}

(1. 桂林理工大学 a. 广西矿冶与环境科学实验中心; b. 广西隐伏矿床勘查重点实验室; c. 广西空间信息与测绘重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 河南省有色金属地质矿产局 第三地质大队, 郑州 450016)

摘 要: 攀枝花铁矿属于基性岩浆侵入晚期分异型矿床, 其地质环境极其复杂。采用 3DMine 矿业软件作为平台, 对攀枝花尖山矿区地质勘探资料进行全面整理并建库, 针对矿区深部铁矿体具有韵律性、顺岩层、单斜产出等特点, 改变传统矿体圈定方法, 从新的角度探索并建立了尖山矿区的地表模型、构造模型、矿体模型、矿带模型、地质工程模型等, 实现了地质体的三维可视化。基于矿体的块体模型、依据采样点的品位信息空间分布形态而采用改进的克里格估算方法, 对矿区铁矿储量的估算更为合理。

关键词: 3DMine; 块体模型; 克里格方法; 储量估算; 攀枝花铁矿

中图分类号: P624.7

文献标志码: A

三维地质建模用于储量估算的方法主要有两种: 克里格法和距离幂次反比法。文献 [1-7] 从不同矿种、不同地质类型等研究了这些估算方法并进行了改进, 在矿山生产、地质成矿分析^[8]、找矿预测等方面^[9-13]也取得了良好的效果, 说明成功的三维地质建模对揭示矿区的成矿规律、深部预测找矿及储量估算等方面有着重要的作用。

本次研究的对象位于四川攀枝花的尖山矿区, 矿体呈似层状, 单斜产于基性杂岩体中, 岩体边部矿层较薄, 矿体整体呈条带韵律性变化。虽然厚度变化较大, 但矿层连续且产出较稳定。在本地区还未曾结合三维模拟技术进行储量计算和分析预测的研究。研究区地质环境复杂多变, 断裂等地质构造密集, 运用三维模拟技术对理解地质体之间的内部空间关系极为重要。通过比较, 国产软件 3DMine 能够很好地发挥对连续矿体建立实体模型及对定向矿体建立块体模型并估值的优势, 达到较为精确的三维模型效果和储量估算。

1 矿区地质概况

攀枝花地区铁矿床处于康滇地轴中段西缘的安宁河深断裂带(图1), 在川南滇北构造带上, 含钒钛磁铁矿的层状基性-超基性杂岩体群, 构成了一个南北向的钒钛磁铁矿成矿带。含矿岩体群的分布, 仅限于康滇地轴隆起带上, 严格受南北向断裂带控制。隆起带轴部的古裂谷带控制着铁矿带的分布^[14]。

2 矿区三维地质综合模型的建立

2.1 地质模型的构建流程

3DMine 矿业工程软件可建立地质数据库、地质体模型、巷道模型等, 并根据野外获取的样品信息对矿块模型进行估值并计算储量。收集归类整理区内已有的野外地质调查资料, 将中段地质平面图、勘探线剖面图等二维数据导入到 3DMine 矿业工程软件中, 经过空间坐标转换, 将多源地质

收稿日期: 2013-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372339); 广西隐伏矿床勘查重点实验室系统性研究课题(11-031-20-3); 广西空间信息与测绘重点实验室主任基金项目(桂科能1103108-18)

作者简介: 陈三明(1968—), 博士, 高级实验师, 研究方向: 资源环境遥感与地学信息工程, Sanming_Chen@glut.edu.cn。

引文格式: 陈三明, 何玉州, 罗文敏, 等. 基于地质三维模拟的攀枝花铁矿块体模型储量估算[J]. 桂林理工大学学报, 2013, 33(4): 610-615.

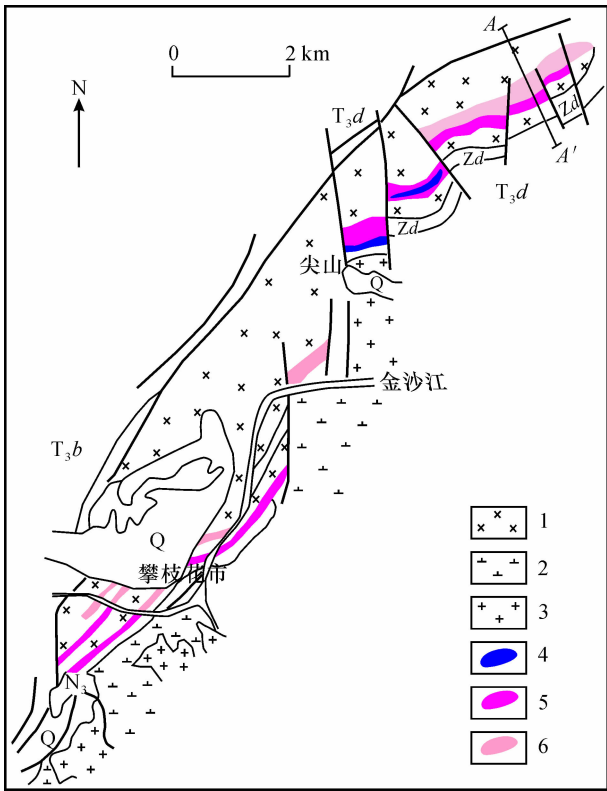


图 1 攀枝花钒钛磁铁矿床地质简图
Fig. 1 Geological sketch map of Panzhihua vanadium-titanium magnetite deposit

1—层状辉长岩；2—闪长岩；3—花岗岩；4—致密状矿体；5—稠密浸染状矿体；6—稀疏浸染状矿体；Zd—震旦系灯影组；T₃b—三叠系丙南组；T₃d—三叠系大弄组；N₃—新近系上新统；Q—冲积层

数据统一至相同的维度空间中，利用软件提供的不规则三角网（TIN）构建工具，连接不连续的、离散的数据，最终构建三维地质实体模型。其建模的工作流程如图 2。构建的模型不仅能够辅助对靶区进行成矿预测辅助分析，同时它也是基于旋转块体模型的克里格储量估值的数据基础。

2.2 地质模型的构建

2.2.1 地质数据库的建立 采样信息是地质工程中所获得的最直接、有效的地质信息，对圈定矿体、储量计算和成矿预测有着重要的作用。由于采样时的样长不完全相等，如果不经处理，每段样品记录在参与估算过程中则不能取得相等的权重值，最终无法统一在克里格的抽象估值模型中加以应用。因此需要对不等长样品进行重新组合，归一化至等样长的组合样品。

三维地质平台通过数据库将采样点可视化，并按照圈矿指标等约束条件归一不等长样品信息至等样长信息。然后，计算机才能将组合后的样品

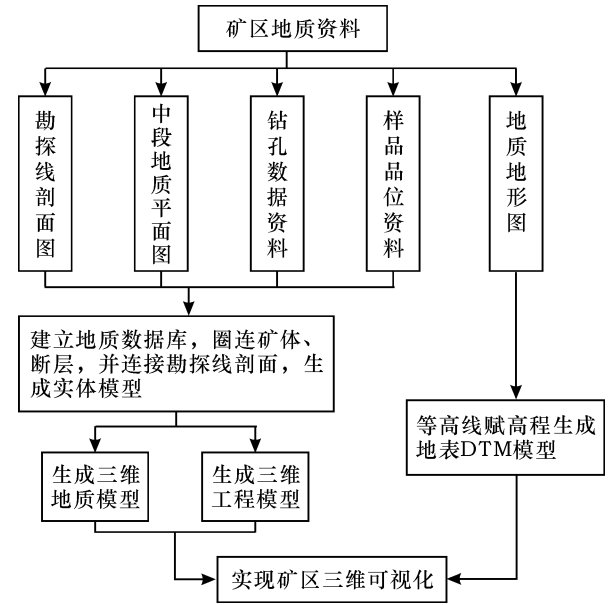


图 2 建模工作流程图
Fig. 2 Flow chart of the modeling work

信息通过适当的估值方法赋给块体模型。同时地质数据的可靠性和完善性也能直接或间接关系到矿山的规划生产等方面。本次研究获取了 52 个钻孔或坑探的 3 202 个样品信息。经整理后存于 Excel 表格中的描述钻孔轨迹、岩石性质及元素含量的源数据导入 3DMine 系统数据库中，分别创建定位表、测斜表、化验表、岩性表等属性表格。数据表结构如表 1，通过 3DMine 系统可视化钻孔的属性信息，形成钻孔三维模型，对从钻孔三维模型获得的样品点进行约束插值获取组合样品点，这些组合样品点是储量估算的基础数据。

表 1 地质数据库表结构
Table 1 Table structure of geological database

表名	字段
定位表	编号、X 坐标、Y 坐标、Z 标高、钻孔最大深度
测斜表	编号、测斜深度、倾角、方位角
化验表	编号、样品编号、样品起始深度（自）、样品结束深度（至）、品位
岩性表	编号、样品起始深度（自）、样品结束深度（至）、岩性

2.2.2 构造模型的建立 通过区内剖面图、中段图、构造简图等资料中对断裂的描绘提取构造线，从而连接成面，进而构造成体，并根据历年的研究资料加以修改和完善，准确地还原出断裂构造的实际形态。在尖山矿区内主要发育有 F320、

F317、F316、F312、F311、F310、F309'、F309、F305、F304、F303、F213、F212 等 13 条主要的控矿断裂,图 3 为尖山矿区断裂构造实体模型。据断层模型判断,F318 断层是本区发育最早的断层。其余断层多呈南北走向,这些南北走向断层将早期的 F318 断层由西向东切割成数段。两端的 F212 断层和 F320 断层是尖山矿区和周边矿区的天然分界。

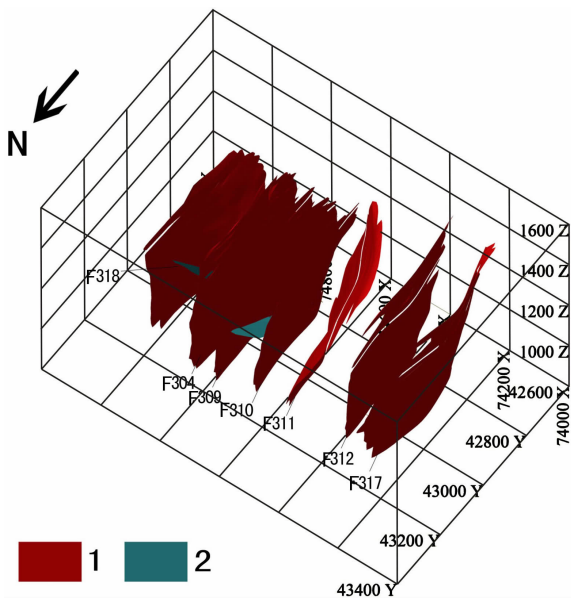


图 3 尖山矿区断裂构造实体模型
Fig. 3 Solid model of Jianshan faulted structure
1—南北走向断层; 2—东西走向断层

2.2.3 矿体模型的建立 攀枝花辉长岩体为一盆状侵入体,大致整合地侵入震旦系灯影组白云质灰岩中。已知岩体自上而下主要由辉长岩带、底部含矿带和边缘相带组成,底部含矿层为主含矿带。矿体顺辉长岩体单斜产出,呈似层状。将断层和矿体叠加(图 4、图 5),可以发现在辉长岩体中的似层状单斜含矿侵入体受 E-W 和 S-N 两组断裂改造。从断裂规模上看,S-N 走向断裂规模较大且集中,说明当时该区域构造活动强烈,对矿体改造程度深,E-W 走向断裂规模小,且只在局部产生。从活动期次来看,E-W 走向断裂受 S-N 走向断裂控制,说明 E-W 走向断裂发生过之后,该区域又有一期强烈的构造活动,这与区域地质环境中岩体群分布严格受南北向断裂带控制是一致的。综合分析断层和矿体的空间产出关系,S-N 走向断裂和 E-W 走向断裂均为成矿后断裂,对矿体的富集并不产生直接的影响。

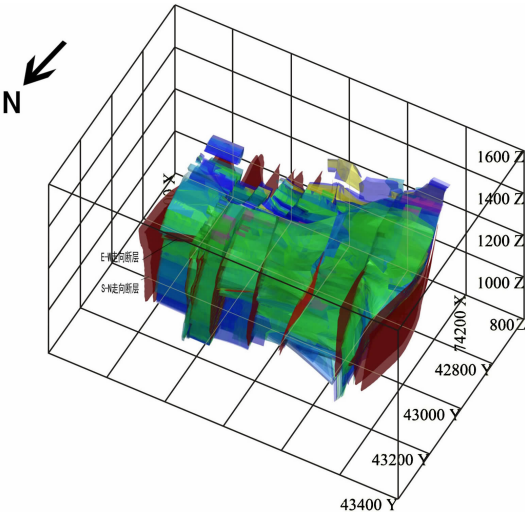


图 4 尖山矿区断层-矿体实体模型
Fig. 4 Jianshan fault-ore body model

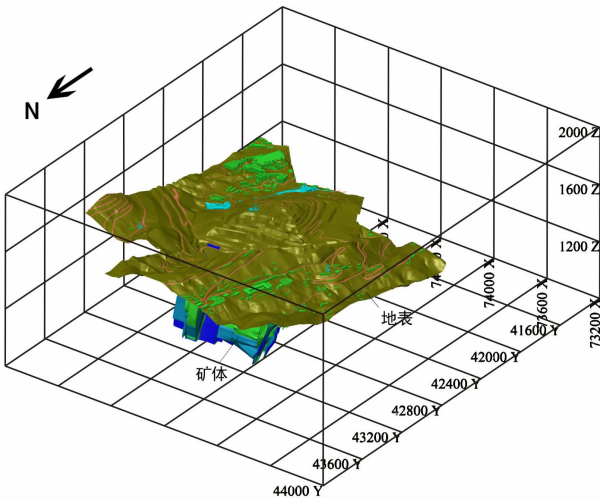


图 5 尖山矿区地表-矿体实体模型
Fig. 5 Jianshan earth surface-ore body model

尖山矿区矿体按 TFe 品位由高到低分为 Fe1、Fe2、Fe3、Fe4 四个级别,可以发现整块铁矿体由内向外品位逐渐降低,单种品位矿体由下至上呈似层状单斜产出,不同品位矿体之间呈韵律叠层状产出(图 4)。从 13 个水平中段提取矿体轮廓线并连接形成矿体的实体模型,将断层模型和矿体模型叠加,可以直观地判断矿体与断层之间的产出关系、矿体在空间中的生长和分异。还可以对实体模型任意切割剖面,有助于揭示成矿规律,给勘查设计提供参考。

2.2.4 矿带模型的建立 建立矿带模型有利于对矿体品位进行分块精细化定量研究,矿体在水平上呈定向韵律性分布,建立矿带模型对研究矿体产出形态及所蕴含的产出规律、地球物理化学环

境的判断等提供重要的参考。攀枝花矿区的矿体顺层、单斜产出，产状比较陡，不同品级的矿体之间、边部矿体与围岩之间虽呈过渡关系，但界限较为明显，用矿带作为矿体研究单元划分依据，模型如图 6。

2.2.5 坑道模型的建立 坑道是获取矿体附近采样数据、采掘深部矿层最重要的地质工程。本次获得的坑道数据包含采样数据和测量数据，其中测量数据是工程建模的原始数据^[15]。构建井巷实体模型，需要测得坑道腰线或中心线，但这些线只确定了坑道的整体延伸形态，要确定坑道的整体形态，还需要坑道断面廓线。图 7、图 8 是利用从尖山矿区中段平面图提取的井巷腰线构建的地下工程实体模型。

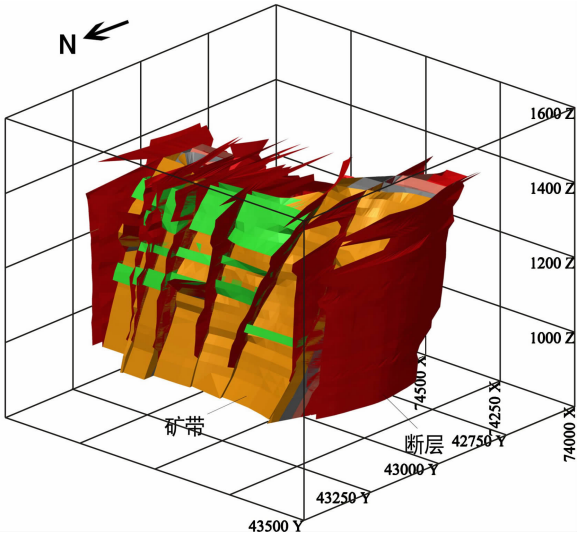


图 6 尖山矿区矿带 - 断层实体模型图
Fig. 6 Jianshan ore belt-fault model

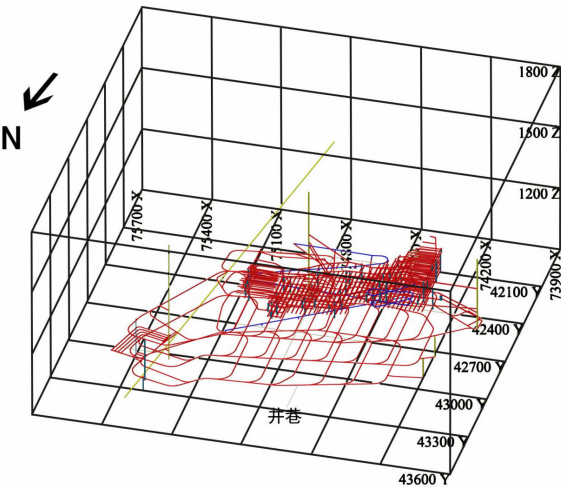


图 7 尖山矿区井巷实体模型
Fig. 7 Jianshan well lane model

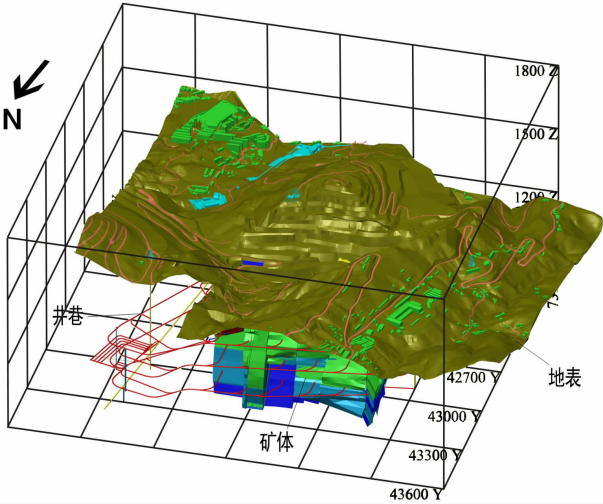


图 8 尖山矿区井巷 - 矿体 - 地表实体模型
Fig. 8 Jianshan well lane-ore body-earth surface model

3 铁矿储量的克里格估值模型及计算过程

结合矿区矿体分布形态、样品点的分布形态以及区域变量的结构信息，拟采用克里格模型作为储量估值的方法。在本次研究中对每个样品值分别赋给一定的权重系数，最后加权平均对待估块体进行品级估算，从而达到线性、无偏和最小估计方差的估算。

设 $Z(u)$ 是二阶平稳的,对于任一待估算块体 V ,其真值 Z_v 的估计值是估计邻域内 n 个信息值的线性组合,其估计值一般表达式为

$$Z^*(u) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} Z(u_{\alpha}), \quad (1)$$

式中: $Z^*(u)$ 为某样品点估算值; $Z(u_{\alpha})$ 参与估算的实际样品点值; λ_{α} 为 α 样品值参与估值计算的权重值.求出各个加权系数 $\lambda_{\alpha} (\lambda = 1, 2, \dots, n)$,使得 $Z^*(u)$ 是 Z_v 的无偏估计量且估计方差最小。

样品信息具有空间属性,因此还要确定样品信息在空间中各个方向上的变化参数,包括变程值和基台值,它们分别描述了样品信息在空间各方向上的相关性范围和品位值在空间上总变异程度。

确定基台值,首先需要对空间样品信息在一个贴合样品分布趋势的最佳主平面上进行半变异函数计算,它考虑了区域空间变量的随机性和结构性:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2,$$

(2)

式中： $\gamma^*(h)$ 为半变异函数； $Z(x_i)$ 为 x_i 处的样品值； $Z(x_i + h)$ 为 $x_i + h$ 处的样品值； $N(h)$ 是距离步距为 h 的样品数据对的数目。

然后需要用理论的变异函数模型拟合得到实际变异函数，克里格估值法提供了球状模型、指数模型以及高斯模型等，这里根据形态模拟选择球状模型。

$$\begin{cases} 0, & h = 0; \\ C_0 + C\left(\frac{3}{2} \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{a^3}\right), & 0 < h \leq a; \\ C_0 + C, & h > a. \end{cases} \quad (3)$$

式中： C_0 为块金值； $C_0 + C$ 为总基台值； C 为拱高； a 为变程。

结合勘探网密度、矿体及采样点空间形态等因素，对比不同块体尺寸的估值效果，本次研究中采用的最大块体尺寸为 10 m × 10 m × 10 m，搜索椭球体搜索半径为 200 m。最终利用 3DMine 平台给出的地质统计模块拟合得到的最佳变异函数的步距是 45 m，基台值是 49.60，变程是 54.61，利用系统提供的估值模块得到矿体的品位估值（图 9）。然后基于块体模型获得储量报告，求得 TFe 的平均品位为 32.36%，铁矿石量估算为 1.06 亿 t。

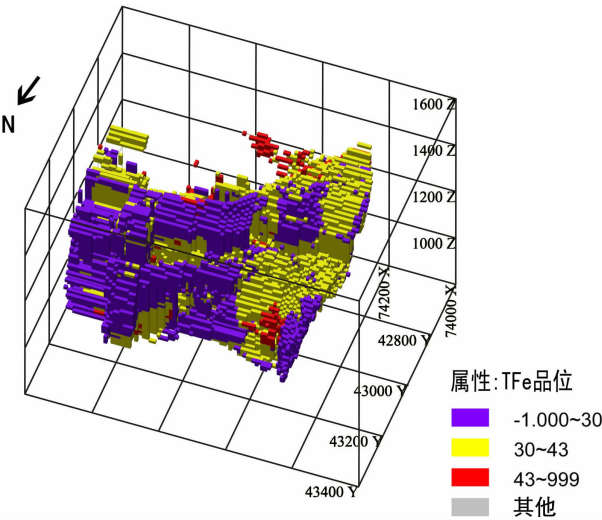


图9 采用克里格估值法的块体品位分布模型

Fig. 9 Block grade distribution model
by Kriging valuation method

4 结论与讨论

对攀枝花尖山铁矿床的地形、地貌、矿体、构造进行实体三维模拟，并运用地质统计学的方法，构建了适合尖山矿区储量计算的克里格估算模型，取得以下认识：

（1）运用三维地学模拟技术进行储量评价，不但可以真实模拟矿体空间形态和展布特征，具有直观、精确、高效的特点，同时也能描述矿化强弱的空间变化规律。通过三维模拟的方法，还可以展现矿体与围岩、矿体与构造、矿体与物化探异常的关系以及伴生元素在矿体中的分布规律。

（2）在储量估算中巧妙地设置变异函数，拟合特殊地质体在空间不同方向上、不同尺度下的变异规律对结果的精度非常重要。块体模型是利用小立方体块微分的方法去极限地按拟合逼近真实的矿体，将块体模型与变异函数有机地结合起来，能对矿区数量庞大且关系结构复杂的地质数据进行综合快速的处理，从而获得储量估算的结果。

然而，模型只是对地质体的简单抽象，真实的模型具有分形特征，这需要地质统计学、三维计算机图形学等基础学科的理论对矿体的边界条件进行约束后，才能更为准确地体现其完整性。矿区的局部地质环境复杂，且成矿、富集以及贫化的过程是多重因素经过长期、多期重复叠加作用后形成的结果，所以实际矿体要比建立的矿体模型更为复杂。因此，针对特定矿区的三维地质精确建模研究有待于更深入地探索。

参考文献：

[1] 朱青凌, 罗周全, 刘晓明, 等. 块体模型储量估算原理的应用研究 [J]. 矿冶工程, 2012, 32 (6): 9-13.

[2] 吴健飞, 叶义成, 王其虎, 等. 某多层复杂矿床开采优化的三维地质建模 [J]. 金属矿山, 2012 (9): 124-128.

[3] 陈东越, 陈建平, 陈三明, 等. 辽东白云金矿地质体三维模型的构建与储量估算 [J]. 桂林理工大学学报, 2013, 33 (1): 14-20.

[4] 金毅, 郑德顺, 潘懋, 等. 各向异性矿化特征的分析与模拟及其在储量估算中的应用 [J]. 地质学报, 2011, 85 (9): 1519-1527.

[5] 赵战锋, 周坤, 王玲. 三维地质建模中设定矿块尺寸探讨 [J]. 有色金属 (矿山部分), 2012 (4): 83-86.

[6] 刘亚静, 李梅, 姚纪明. 三维普通克立格插值建立非层状矿体块段模型的研究[J]. 金属矿山, 2008(7): 92-99.

[7] 王斌, 李发本. 一种基于块体模型和克里格法的矿体储量计算 [J]. 现代矿业, 2011 (8): 62-65.

[8] 赵玉国, 王旭, 张广立, 等. 块体模型算量方法在宝日希勒露天矿中的应用[J]. 露天采矿技术, 2012(6): 11-12.

[9] 张思科, 倪晋宇, 高万里, 等. 三维地质建模技术方法研究——以东昆仑造山带为例 [J]. 地质力学学报, 2009 (2): 201-208.

[10] 刘文玉, 吴湘滨, 张宝一, 等. 红透山矿区三维地质建模与可视化研究 [J]. 科技导报, 2011, 29 (11): 48-51.

[11] Agliardi F, Crosta G B. High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40 (4): 455-471.

[12] Zlatanova S, Rahman A A, Pilouk M. Trends in 3D GIS development [J]. Journal of Geospatial Engineering, 2002, 4 (2): 71-80.

[13] Wu Q, Xu H, Zou X. An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration [J]. Computers & Geosciences, 2005, 31 (1): 35-43.

[14] 李文臣. 攀枝花钒钛磁铁矿矿床地质及其成因 [J]. 地质与勘探, 1992 (10): 18-21.

[15] 阳正熙, 高德政, 严冰. 矿产资源勘查学 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 151-152.

Block Model and Reserves Estimation of Panzhihua Iron Deposit
Based on 3D Geological Modeling

CHEN San-ming¹, HE Yu-zhou^{1a,2}, LUO Wen-min^{1a}, GAO Yang^{1a},
CAO Yan-chao^{1a}, YANG Xian^{1a}, DENG You-zhi^{1a}

(1. a. Guangxi Scientific Experiment Center of Mining, Metallurgy and Environment; b. Guangxi Key Laboratory of Concealed Deposits Exploration; c. Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Mapping, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. No. 3 Geological Team, Henan Bureau of Nonferrous Metals Geological and Mineral Resources, Zhengzhou 450016, China)

Abstract: Panzhihua iron deposit belongs to the intrusive magmatic ore deposits in late differentiation, and the geological environment is extremely complex. By 3DMine mining engineering software Panzhihua Jianshan mining area geological exploration database is constructed. For deep mining iron ore body with rhythm, smooth rock, monoclinic output characteristics, the traditional ore delineation method is changed from a new perspective, in exploring and establishing the Jianshan mining area surface model, structure model, ore body model, ore belt model, geological model, by 3D visualization of mining area. The estimation method is established based on the block model of ore sampling points. The improved Kriging for grade information of mining area is more reasonable.

Key words: 3DMine; block model; Kriging; variation function; Panzhihua iron mine