

# Three-Dimensional Visualization Prediction of the Jinchuan Cu-Ni Sulfide Deposit, Gansu Province

Qinghua Shang<sup>1,2</sup>, Xiancheng Mao<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, Central South University, Changsha Hunan

<sup>2</sup>School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan  
Email: shangqinghua94@126.com

Received: Feb. 22<sup>nd</sup>, 2019; accepted: Mar. 8<sup>th</sup>, 2019; published: Mar. 15<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

With the progress of potential mineral resources exploration in the Jinchuan mine area to the deep and margin parts, the three-dimensional metallogenic prediction method has gradually become an important method of breakthrough in ore-exploration work with its quantitative, multi-dimensional and visual advantages. Based on the previous research, this paper applies the three-dimensional visualization prediction method and technical framework of concealed ore body to the deep prediction of Jinchuan Cu-Ni sulfide deposit, summarizes the conceptual model of Jinchuan ore body's location, and constructs a three-dimensional geological body model. The ore-forming information extraction method is used to obtain the ore-controlling factor, and thus a three-dimensional prediction model is established based on multiple linear regression method. The research shows that the prediction results obtained by this paper are consistent with the geological research conclusions, which can provide quantitative guidance for deep prospecting work.

## Keywords

Concealed Ore Body, 3D Visualization Prediction, Gansu Jinchuan, Cu-Ni Sulfide Deposit

---

# 甘肃金川铜镍硫化物矿床三维可视化预测

商清华<sup>1,2</sup>, 毛先成<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南 长沙

<sup>2</sup>中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙

Email: shangqinghua94@126.com

收稿日期: 2019年2月22日; 录用日期: 2019年3月8日; 发布日期: 2019年3月15日

## 摘要

随着金川矿区潜在矿产资源勘探工作向深边部进展, 三维成矿预测方法以其定量化、多维化、可视化优势逐渐成为找矿工作突破的重要手段。本文基于以往研究积累, 将形成的隐伏矿体三维可视化预测方法与技术框架应用于金川铜镍硫化物矿床深部找矿预测中, 总结了金川矿体定位概念模型, 构建了三维地质体模型, 通过成矿信息提取方法得到控矿因素指标, 从而基于多元线性回归方法建立了三维预测模型。研究表明, 该实例取得的预测结果与地质研究结论符合, 可为其深部找矿工作提供定量化指导。

## 关键词

隐伏矿体, 三维可视化预测, 甘肃金川, 铜镍硫化物矿床

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

矿产资源作为现代经济和社会发展的不可再生资源, 在生产生活中扮演着重要的角色, 其需求量与日俱增。然而随着便于开采的露头矿、地表矿的逐渐减少, 大多大型矿山潜在矿产资源勘探工作向深边部进展。为了降低找矿难度与风险, 矿产资源定量评价方法应运而生, 并逐步发展、成熟。但随着找矿工作的深入, 对传统矿产资源定量评价方法提出了新的挑战, 二维矿产资源定量预测与评价已逐渐不能满足多尺度、多维度的实际应用需求, 而以其为基础的三维成矿预测方法, 结合了三维建模、空间分析和非线性预测方法, 以其定量化、多维化、可视化优势逐渐成为找矿工作突破的重要手段[1]-[9]。

研究区金川铜镍硫化物矿床发现于 1958 年, 是世界上目前正在开采的第三大镍矿, 也是我国镍、铜、钴、铂族元素等的重要矿产地。然而随着浅部资源开采殆尽, 矿山急需在现有采矿空间及深部第二找矿空间取得突破。为此, 本文在以往研究[6] [10]积累的基础上, 将形成的隐伏矿体三维可视化预测方法与技术框架应用于金川铜镍硫化物矿床深部找矿预测中, 为金川矿区深部找矿工作提供指导。

## 2. 矿区地质概况

金川铜镍硫化物矿床位于华北板块西南边部阿拉善地块西南缘的龙首山隆起带内[11], 区内褶皱、断层发育, 岩浆活动强烈。矿区地层主要由前震旦系白家嘴子组(AnZb)和第四系(Q)组成, 变质程度深, 以区域变质为主。金川基性-超基性侵入体处于龙首山隆起带内, 大致以 $10^\circ$ 交角不整合侵入于白家嘴子组中, 岩体直接与片麻岩、大理岩、条带状混合岩接触, 呈北西西向似墙状、透镜状分布, 上陡下缓, 岩体沿倾斜方向有明显的膨缩变化和波状起伏。岩体长 6500 m, 宽 20~527 m, 出露面积仅约 1.4 km<sup>2</sup> [11]。

金川矿区断裂构造对含矿岩体及各种脉岩的分布起着控制作用[12] [13]。其中, 北东东向扭性断层断层 F<sub>8</sub>、F<sub>16-1</sub>、F<sub>23</sub> 将含矿岩体自西向东分为 III、I、II、IV 四个相对独立的矿区, 如图 1 所示。矿区矿石主要由磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿为主, 磁黄铁矿为最主要的金属硫化物矿物, 呈他行-半自形, 镍黄铁矿与其紧密共生。镍和铜为主要开采组分, 镍主要以构成单独含镍化合物的形式赋存在镍黄铁矿中, 而铜大多呈铜的硫化物赋存在黄铜矿和方黄铜矿中[11]。

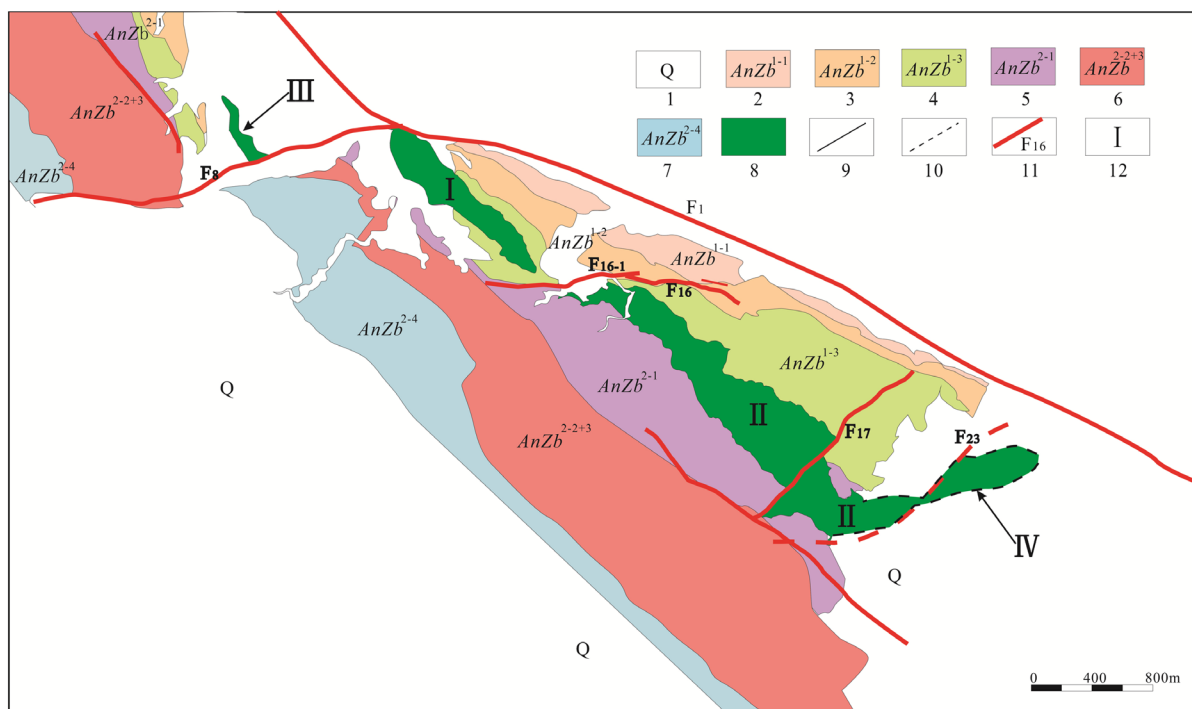


Figure 1. Geological map of Jinchuan mining area (revised from: Zeng Yuyu *et al.*, 2016 [14])

图 1. 金川矿区地质简图(改自: 曾认宇等, 2016 [14])

### 3. 三维可视化预测的实现

隐伏矿体三维可视化预测是将以野外地质调查为主的知识驱动和以矿山勘探数据为主的数据驱动相结合, 基于三维地质建模方法和三维空间分析方法而形成的方法和技术框架[15]。其实现的关键步骤主要为: 1) 在地质数据集成和成矿模式研究的基础上, 生成矿体定位概念模型; 2) 采用三维建模技术进行连续地质体(含矿化体)的三维建模与离散化; 3) 采用地质体形态分析、地质场模拟等技术进行成矿信息三维定量提取, 建立控矿地质因素场模型, 从而分析控矿地质因素和矿化分布之间的关联关系; 4) 建立反映控矿变量到矿化变量映射关系的立体定量预测模型, 对预测区三维空间中的矿化分布进行定位定量预测, 采用三维可视化模型表达预测成果。

#### 3.1. 矿体定位概念模型的建立

矿体定位概念模型是将定性的地质成矿规律、模式研究转化为定量分析的关键步骤, 是三维成矿信息的提取与分析的重要依据。其形成主要依据矿床的成矿模式和成矿规律, 分析成矿有利地质条件和矿化富集规律, 从而形成包含控矿因素及分析方法、表达模型在内的矿体定位概念模型。

本研究根据金川铜镍硫化物矿床矿体的空间分布特征和成矿地质模式的分析与归纳, 总结出如下的成矿相关地质体, 由此构建的矿体定位概念模型如表 1 所示:

1) 岩浆主要运移通道: 目前, 广为接受的金川矿床成矿模式为岩浆通道系统成矿[16] [17]。该理论认为岩浆来源于深部地幔及围岩、地层混染, 当岩浆达到硫过饱和时, 发生硫化物的熔离作用, 硫化物乳珠就地或沿通道随岩浆移动到适当地方沉降形成矿体[18] [19] [20], 因此岩浆主要运移通道是理想的成矿空间。

2) 岩墙顶底板: 含矿岩浆在演化过程中, 随着硫化物逐渐饱和而熔离出金属硫化物。由于硫化物密度大, 其受重力作用而向下迁移, 因此金属硫化物富集于靠近岩体底板的位置。此外, 岩墙底板形态表

现出了围岩原始的形态或早期断裂面形态, 反映了岩浆侵位时岩浆的流动规律。当围岩形态或断裂面出现了明显的起伏时, 岩浆流速受到影响, 比重较大的硫化物更易沉淀, 造成成矿原始的局部富集, 一般认为下凹的底板形态有利于矿体富集。

3) 控矿断层: 断层为金川矿床最主要的控矿改矿构造。成矿时, 富含成矿物质的岩浆沿着  $F_1$  断裂系统侵入的, 并在其次生的雁列式断裂中成矿, 因此成矿断层为成矿提供了容矿和岩浆运移的空间[13]。

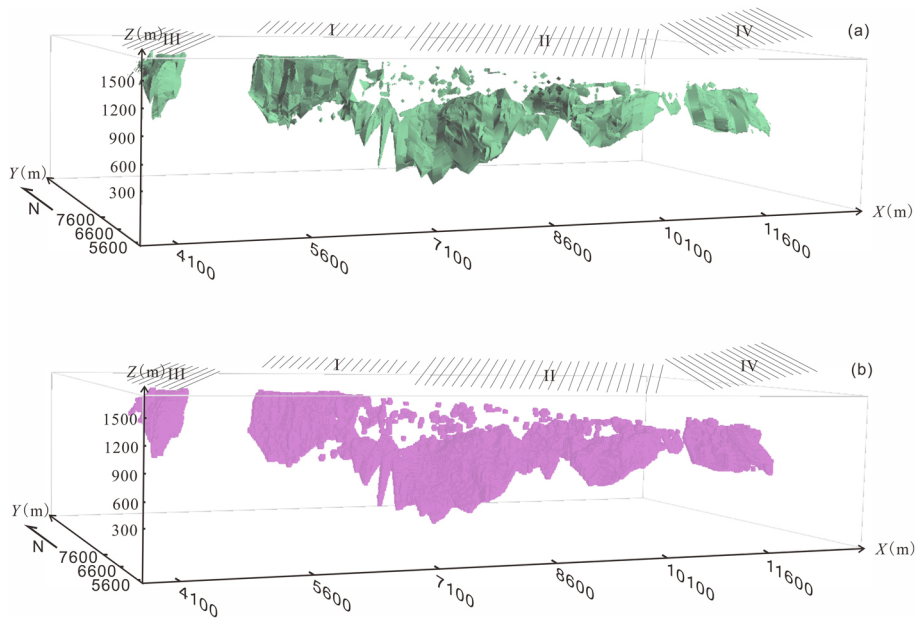
**Table 1.** Conceptual model of orebody location prediction in Jinchuan deposit  
**表 1.** 金川矿床矿体定位预测概念模型

地质体	成矿信息	分析方法与表达模型	指标
矿体分布	矿化分布	克里格法, 块体模型	$Cu, Ni, CuMet, NiMet, IOre$
岩浆通道骨架	岩浆主要运移通道控矿因素	距离场分析, 块体模型	$dMC$
	顶底板相对距离因素	相对距离分析, 块体模型	$dRatio$
岩体	底板形态因素	形态分析, 块体模型	$dTrend$
	断层控矿因素	距离场分析, 块体模型	$dFault$

### 3.2. 地质体三维建模

地质体三维建模是利用三维建模软件通过人机交互方式对成矿相关地质体进行三维定量表达。对于大型矿山, 由于其研究程度较高, 且勘探工程数据丰富, 因此采用钻孔勘探工程及剖面进行三维地质体建模能够精确表达地质体三维形态及内部属性[21]。

本研究对金川 I、II、III、IV 矿区进行了地质体三维建模, 构建了矿体、岩体、围岩、岩浆通道三维线框、块体模型。线框模型的建立主要使用 GOCAD 软件通过 TIN 模型来表达地质体三维形态, 结果如图 2(a) 所示; 块体模型的建立主要通过三维体元模型来表达地质体的内部属性, 本研究采用  $10 * 10 * 10$  m 单元块体对成矿空间进行划分, 这种尺度既能表达大型矿山的真实属性又符合数据计算要求, 模型如图 2(b) 所示。



**Figure 2.** Three-dimensional wireframe model (a) and block model of geological body in Jinchuan mining area (b)  
**图 2.** 金川矿区地质体三维线框模型(a)和块体模型(b)

### 3.3. 成矿信息提取

成矿信息提取就是依据矿体定位概念模型, 基于地质体三维模型, 采用三维空间分析方法定量提取控矿因素指标, 是隐伏矿体三维可视化预测方法的关键步骤。本研究采用三维形态分析[22][23]、距离场分析[24]、相对距离分析等方法, 提取了底板趋势面距离场( $dTrend$ )、岩浆通道中心线距离场( $dMC$ )、断层层面距离场因素( $dFault$ )、顶底板相对距离因素( $dRatio$ )作为金川矿区的控矿因素。

#### 3.3.1. 底板趋势面距离场( $dTrend$ )

为了量化底板凹凸形态, 本研究基于底板面 TIN 模型, 利用趋势-起伏分析方法[22][23]计算趋势面, 通过求取底板面与趋势面之间的欧氏距离以指示凹凸及其强烈程度。通过对金川各矿区底板 TIN 模型进行计算得到的底板趋势面距离场因素( $dTrend$ ), 可以通过正负号表示凹凸形态, 通过数值大小表示表面起伏强烈程度。该因素可视化效果如图 3 所示。

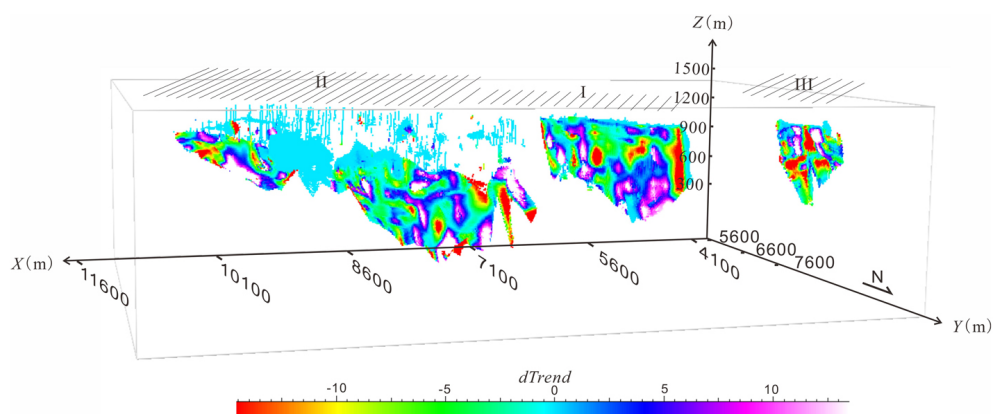


Figure 3. 3D visualization of the bottom surface trend surface distance field ( $dTrend$ )

图 3. 底板趋势面距离场( $dTrend$ )三维可视化效果图

#### 3.3.2. 岩浆通道中心线距离场( $dMC$ )

本研究通过岩浆通道重建技术建立了岩浆通道模型, 并提取了岩浆通道模型中心线表示岩浆主要运移通道。通过距离场分析[24]计算矿体单元与岩浆通道中心线体素单元之间的欧氏距离来表示岩浆通道的成矿影响程度, 得到岩浆通道中心线距离场因素( $dMC$ ), 数值越小表示空间距离越近, 其关联性越大。该因素可视化效果如图 4 所示。

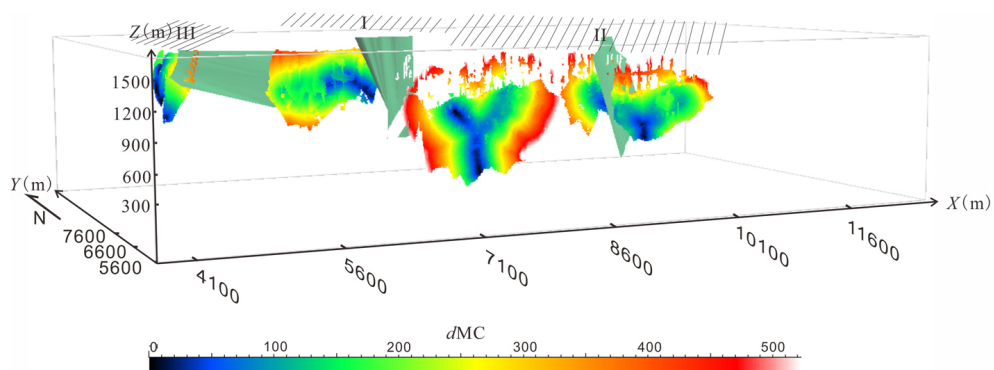


Figure 4. 3D visualization of the distance field ( $dMC$ ) of the magma channel

图 4. 岩浆通道中心线距离场( $dMC$ )三维可视化效果图



### 3.3.3. 断层面距离场因素( $dFault$ )

根据矿体定位概念模型, 断层是控矿改矿的重要构造。本研究通过距离场分析, 基于断裂面 TIN 模型, 计算断层三角面片到矿体单元的欧氏距离来表示断层成矿影响程度, 得到断层面距离场因素( $dFault$ )。该因素可视化效果如图 5 所示。该因素数学表达[25]为:

$$d_G = \min \left[ (x - x_v)^2 + (y - y_v)^2 + (z - z_v)^2 \right]^{1/2}, \quad (x, y, z) \in G : z = f(x, y)$$

式中,  $(x_v, y_v, z_v)$  为矿体块体单元中心点坐标,  $G : z = f(x, y)$  控矿地质体表面。

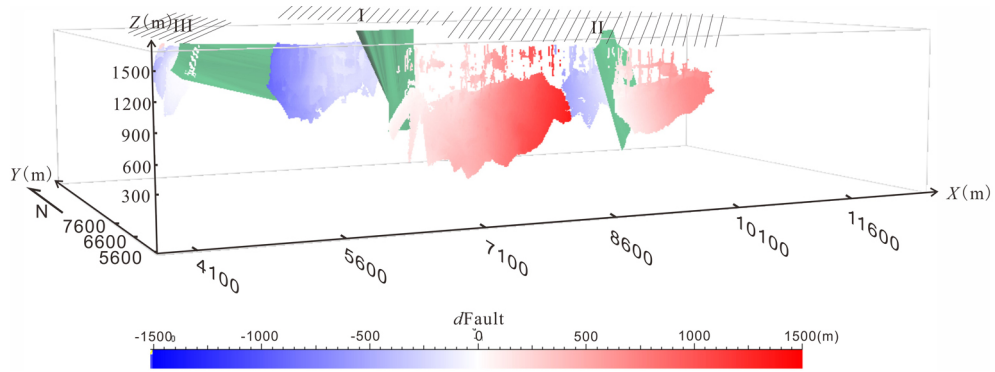


Figure 5. 3D visualization of the fault plane distance field factor ( $dFault$ )  
图 5. 断层面距离场因素( $dFault$ )三维可视化效果图

### 3.3.4. 顶底板相对距离因素( $dRatio$ )

顶底板相对距离因素( $dRatio$ )采用相对距离分析, 基于岩体顶底板 TIN 模型, 通过建立与岩体走向、倾向、倾角均一致的走向面, 并将其法线方向作为计算距离方向, 构建矿体单元距顶底板距离的比值指标作为衡量该单元在顶底板间的相对位置。该指标取值范围为[0,1], 取值为 0 时, 矿体单元与顶板接触; 为 1 时, 矿体单元与底板接触。该因素可视化效果如图 6 所示。

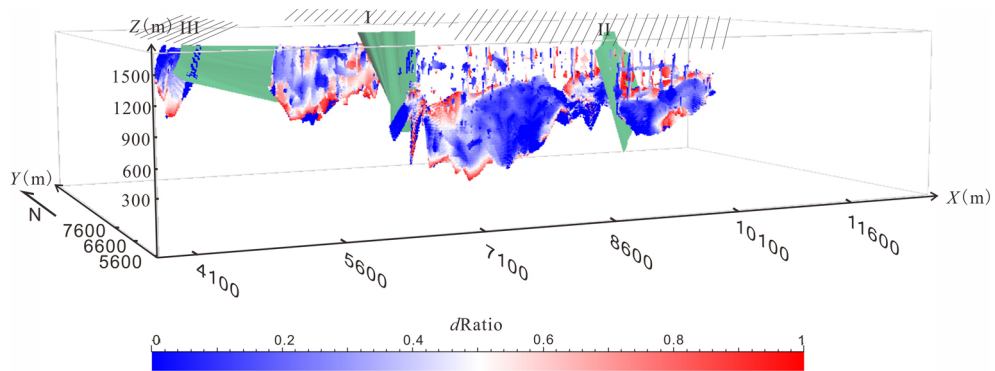


Figure 6. 3D visualization of the relative distance factor ( $dRatio$ ) of the top and bottom plates  
图 6. 顶底板相对距离因素( $dRatio$ )三维可视化效果图

## 3.4. 三维预测模型的建立

三维预测模型的建立就是采用矿化泛函模型定量化表达已知区块体金属品位、金属量与成矿信息指标之间的关联关系, 并将其应用于预测区单元进行金属品位、金属量估计。本研究采用多元线性回归模型来实现其函数化表达。由于矿化指标与成矿信息指标之间呈现非线性关系, 因此需采用非线性变换对

成矿信息指标进行处理[21]。金川矿区预测结果如图7所示。

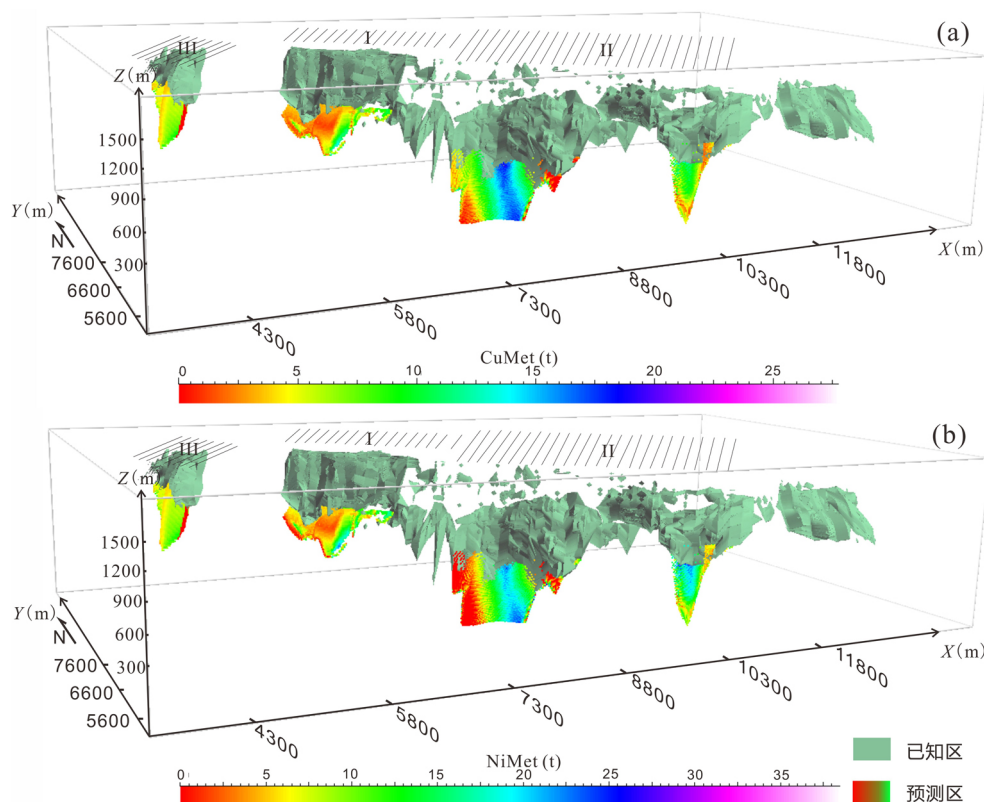


Figure 7. Prediction results of copper metal (a) and nickel metal (b) in Jinchuan mining area

图7. 金川矿区预测结果铜金属量(a)、镍金属量(b)效果图

#### 4. 结论

1) 采用隐伏矿体三维可视化预测方法, 结合金川铜镍硫化物矿床的成矿模式及规律, 总结了金川矿体定位概念模型, 构建了金川地质体三维模型, 采用三维空间分析方法提取了成矿信息指标, 从而采用预测模型对预测区块体的品位、金属量进行了估计。

2) 该实例取得的预测结果与地质研究结论符合。研究表明, 隐伏矿体三维预测方法适用于铜镍硫化物矿床深部预测, 可为其深部找矿工作提供定量化指导。

#### 参考文献

- [1] Zhao, P. (1992) Theories, Principles, and Methods for the Statistical Prediction of Mineral Deposits. *Mathematical Geology*, **24**, 589-595. <https://doi.org/10.1007/BF00894226>
- [2] 肖克炎. 大比例尺综合信息成矿预测的研究问题及途径[J]. 黄金地质科技, 1993(4): 34-39.
- [3] Caumon, G., Ortiz, J.M. and Rabeau, O. (2006) A Comparative Study of Three Data-Driven Mineral Potential Mapping Techniques. *International Association for Mathematical Geology 11th International Congress*, Université de Liège, Belgium, 3-8 September 2006, S13-05.
- [4] Fallara, F., Legault, M. and Rabeau, O. (2006) 3D Integrated Geological Modeling in the Abitibi Sub Province (Quebec, Canada): Techniques and Applications. *Exploration and Mining Geology*, **15**, 27-43.
- [5] Martin, L., Perron, G. and Masson, M. (2007) Discovery from 3D Visualization and Quantitative Modelling. *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration*, Toronto, 2007, 543-550.
- [6] 毛先成. 三维数字矿床与隐伏矿体立体定量预测研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2006: 1-100.

- [7] 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.
- [8] Wang, G., Zhang, S., Yan, C., Song, Y., Sun, Y., Li, D. and Xu, F. (2011) Mineral Potential Targeting and Resource Assessment Based on 3D Geological Modeling in Luanchuan Region, China. *Computers & Geosciences*, **37**, 1976-1988.
- [9] 袁峰, 李晓晖, 张明明, 等. 隐伏矿体三维综合信息成矿预测方法[J]. 地质学报, 2014, 88(4): 630-643.
- [10] 毛先成, 陈国珖. 香花岭锡矿床数学模型及立体定量预测初探[J]. 地质与勘探, 1988, 24(10): 25-31.
- [11] 汤中立, 李文渊. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [12] 高亚林, 汤中立, 宋谢炎, 等. 金川铜镍矿床隐伏富铜矿体成因研究及其深部找矿意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(12): 3379-3395.
- [13] 曾认宇, 赖健清, 毛先成, 等. 金川铜镍矿床中断裂系统的形成演化及对矿体的控制[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(9): 2574-2583.
- [14] 曾认宇, 赖健清, 毛先成, 等. 金川铜镍硫化物矿床铂族元素地球化学差异及其演化意义[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(1): 149-163.
- [15] 毛先成, 戴塔根, 吴湘滨, 等. 危机矿山深边部隐伏矿体立体定量预测研究 - 以广西大厂锡多金属矿床为例[J]. 中国地质, 2009, 36(2): 424-435.
- [16] 田毓龙, 包国忠, 汤中立, 等. 金川铜镍硫化物矿床岩浆通道型矿体地质地球化学特征[J]. 地质学报, 2009, 83(10): 1515-1525.
- [17] 曾认宇, 赖健清, 毛先成. 金川铜镍硫化物矿床岩浆通道系统的成矿模式[J]. 矿产与地质, 2013, 27(4): 276-282.
- [18] Naldrett, A.J., Lightfoot, P.C., Fedorenko, V., *et al.* (1992) Geology and Geochemistry of Intrusions and Flood Basalts of the Noril'sk Region, USSR, with Implication for the Origin of the Ni-Cu-PGE Ores. *Economic Geology*, **87**, 975-1004. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.87.4.975>
- [19] Naldrett, A.J., Fedorenko, V.A., Lightfoot, P.C., *et al.* (1995) Ni-Cu-PGE Deposits of Noril'sk Region, Siberia: Their Formation in Conduits for Flood Basalt Volcanism. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy Section B: Applied Earth Science*, **104**, B18-B36.
- [20] Naldrett, A.J. (1999) World-Class Ni-Cu-PGE Deposits: Key Factors in Their Genesis. *Minerium Deposita*, **34**, 227-240. <https://doi.org/10.1007/s001260050200>
- [21] 毛先成, 张苗苗, 邓浩, 等. 矿区深部隐伏矿体三维可视化预测方法[J]. 地质学刊, 2016, 40(3): 363-371.
- [22] Mao, X.C., Zhang, B., Deng, H., *et al.* (2016) Three-Dimensional Morphological Analysis Method for Geologic Bodies and Its Parallel Implementation. *Computers & Geosciences*, **96**, 11-22. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.07.004>
- [23] Mao, X.C., Zhao, Y., Deng, H., *et al.* (2018) Quantitative Analysis of Intrusive Body Morphology and Its Relationship with Skarn Mineralization—A Case Study of Fenghuangshan Copper Deposit, Tongling, Anhui, China. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **28**, 151-162. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(18\)64648-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(18)64648-5)
- [24] 毛先成, 周尚国, 张宝一, 等. 基于场模型的成矿信息提取方法研究 - 以桂西 - 滇东南锰矿为例[J]. 地质与勘探, 2009, 45(6).
- [25] Mao, X.C., Hu, Y., Zhou, S.G., *et al.* (2011) Field Analysis of Metallogenic Information and Its Application. *Journal of Central South University of Technology*, **18**, 196-207. <https://doi.org/10.1007/s11771-011-0680-z>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [ag@hanspub.org](mailto:ag@hanspub.org)