

Extraction of Ore-controlling Factors Based on Three-Dimensional Geological Model

—A Case Study of Jinchuan Cu-Ni Deposit II-1 Orebody

Jiawei Zhu^{1,2}, Xiancheng Mao^{1,2*}, Ying Zhao^{1,2}, Hao Deng^{1,2}, Zhankun Liu^{1,2},
Miaomiao Zhang^{1,2}

¹MOE Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Central South University, Changsha Hunan

²School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan
Email: jadezhu.gis@gmail.com, *xcmao@126.com

Received: Dec. 10th, 2015; accepted: Dec. 28th, 2015; published: Dec. 31st, 2015

Copyright © 2015 by authors 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

Abstract

Based on the three-dimension geological model of Jinchuan Cu-Ni sulfide deposit II-1 orebody, combined with geology materials and exploration data, this study uses three-dimensional spatial analysis method quantitatively extracted three ore-controlling factors of Jinchuan Cu-Ni sulfide deposit II-1 orebody. Relative distance between rock's roof and floor and Euclidean distance field of magma channel central line and fault are generated. Analysis shows that there is a certain correlation between Cu and Ni grade of orebodies and ore-controlling factors extracted, thus linear transformation or non-linear transformation can be applied to these ore-controlling factors to construct ore-prospecting factors. It has a significant value to the further three-dimensional prediction of hidden orebodies in Jinchuan Cu-Ni sulfide deposit that the method is appropriate for the whole deposit.

Keywords

Jinchuan Cu-Ni Deposit II-1 Orebody, Three-Dimensional Geological Model, Euclidean Distance Field of Fault, Euclidean Distance Field of Magma Channel Central Line, Relative Distance between Rock's Roof and Floor

基于三维地质模型的控矿因素提取

—以金川铜镍矿床II-1号矿体为例

*通讯作者。

朱佳玮^{1,2}, 毛先成^{1,2*}, 赵莹^{1,2}, 邓浩^{1,2}, 刘占坤^{1,2}, 张苗苗^{1,2}

¹中南大学有色金属成矿预测教育部重点实验室, 湖南 长沙

²中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙

Email: jadezhu.gis@gmail.com, *xcmao@126.com

收稿日期: 2015年12月10日; 录用日期: 2015年12月28日; 发布日期: 2015年12月31日

摘要

本文基于金川铜镍矿床II-1号矿体的三维地质模型, 结合地质资料以及勘探数据, 利用三维空间分析方法对II-1号矿体的控矿因素进行定量提取, 提取了岩浆通道骨架中心线距离场, 断层距离场以及顶底板相对距离三个控矿因素。分析发现II-1号矿体的铜镍品位与提取的三个控矿因素存在较强相关性, 因此可对控矿因素进行线性变换或非线性变换转变成找矿信息指标。此提取方法可应用于整个金川铜镍矿床, 对金川铜镍矿床隐伏矿体三维可视化预测有重要意义。

关键词

金川铜镍矿床, 三维地质模型, 断层距离场, 岩浆通道距离场, 顶底板相对距离

1. 引言

金川铜镍硫化物矿床是世界上目前正在开采的第三大镍矿, 仅次于俄罗斯的 Noril'sk-Talnakh 矿床以及加拿大的 Sudbury 矿床。自 1958 年发现至今, 金川铜镍矿床出矿颇多, 并且仍有找矿前景, 而且近年来, 也未曾发现新的大型硫化镍矿床, 因此对金川铜镍矿床找矿预测意义重大。汤中立等针对金川铜镍硫化物矿床成因特点和岩体富集规律提出了“小岩体成大矿”以及“深部熔离-多期贯入”的成矿模式 [1]。如何利用现有资料与数据, 针对金川的成矿模式选择合适的方法对金川深部地区进行找矿是亟需解决的问题。传统的地质方法不能对找矿靶区进行精确定位, 而随着三维 GIS 技术的日益成熟, 因其直观、可定量等特性, 在成矿预测上具有良好的应用前景。目前关于金川铜镍矿区控矿因素提取的研究多为定性分析 [2] [3], 为实现立体定量预测本文将基于金川铜镍矿区的超基性岩体、矿体、断层等三维地质模型, 利用空间分析技术对控制矿床矿体分布的主要控制因素进行定量提取, 进而寻找矿化指标与控矿因素之间的关联关系。

2. 区域地质和矿床地质

金川铜镍硫化物矿床位于华北板块西南边部的阿拉善地块西南缘的龙首山隆起带内。金川镁铁-超镁铁质侵入体大致以 10° 交角不整合侵入于前长城系白家嘴子组中, 其呈 NWW 向岩墙状直接侵入于片麻岩、大理岩和条带状混合岩中 [4]。后期的 NEE 向扭性断裂将岩体错断, 把矿区自西向东分为 III、I、II、IV 四个矿区 (图 1)。

金川 II 矿区位于断层 F_{16-1} 与 F_{23} 之间, 是金川铜镍矿床资源量最大的矿区。II 矿区岩体长约 3000 m, 除东部隐伏于混合岩下, 其余地段均出露地表。由于张扭性断裂 F_{17} 的作用, 使岩体发生了约 200 m 的水平位错。岩体自西向东逐渐变宽, 最宽可达 530 m。岩体整体走向 $NW50^\circ$, 倾向 SW, 倾角约 $50^\circ \sim 80^\circ$, 西陡东缓。从横剖面上看, 西段岩体呈“凹”字形漏斗状, 东段岩体呈“V”字形漏斗状; 纵剖面上看, 西段岩体向下存在两个分支, 主矿体位于下盘岩枝, 东段岩体呈歪漏斗状, 矿体靠近底板。岩体由多期

岩浆前后侵入形成,存在着明显的岩相分带。含矿部位岩体,以矿体为中心往外二辉橄榄岩($\Sigma 3$)、橄榄辉石岩($\Sigma 4$)。

II-1号矿体为金川矿床最大的矿体,位于II矿区西北侧岩体的下部,全长约1900m,平均厚度约70m。矿体呈透镜状、板状赋存于超基性岩体中,倾向SW,倾角 $25^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 。围岩主要为二辉橄榄岩(占60%),次为大理岩(占15%),再次为橄榄辉石岩及斜长角闪岩。矿体以超基性岩型富矿(Ni品位1%~3%)为主,占矿体的87.49%,富矿体位于超基性岩体中下部,贫矿(Ni品位0.3%~1%)分布于富矿周围,局部也见有富矿体直接与围岩接触。

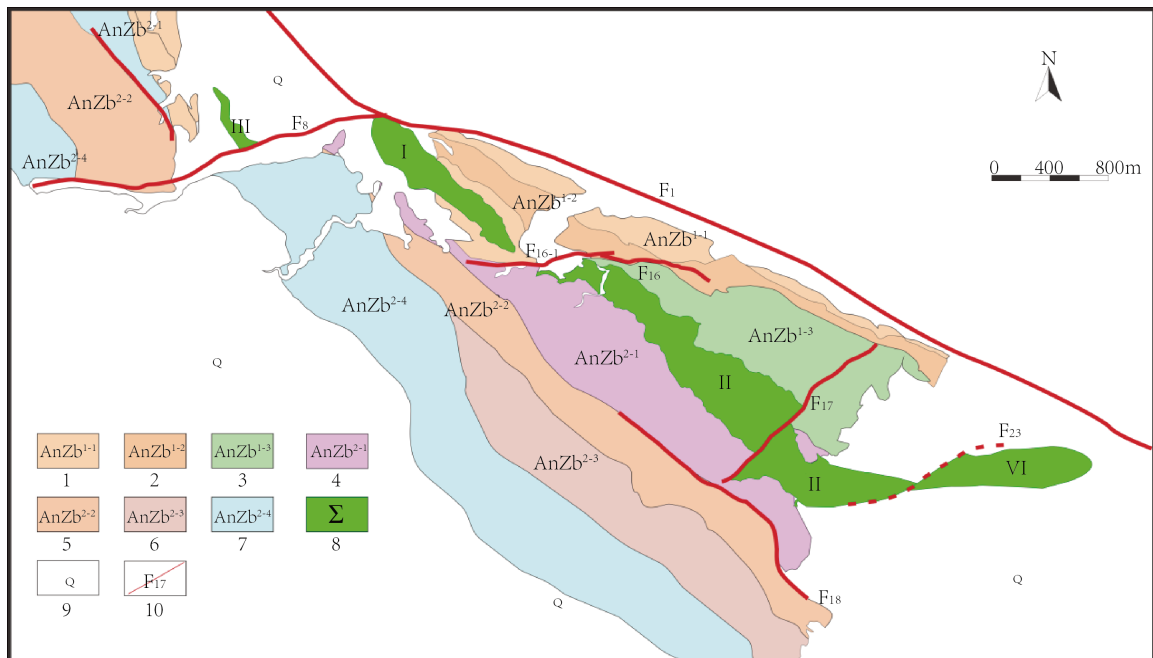
3. 控矿因素提取方法

目前,岩浆通道系统成矿已经被越来越多的学者认可,并用来解释金川铜镍硫化物矿床的成矿模式[5]-[8]。通过岩浆通道成矿的理论,可以找到潜在的成矿有利部位。从宏观地质上讲,金川矿床最主要的控制因素是构造,而岩浆通道本身就是地质空间中的构造薄弱部位[9],那目前认定的岩浆通道很可能是岩体侵位前的构造部位。由于岩体侵位时,岩墙产状较缓,而岩体中存在的硫化物密度较大,在上升过程中受到重力分异的影响,故会向下富集,矿体尤其是富矿多集中在岩体的中下部,因而超基性岩体的三维形态影响着矿体的空间定位。

综上,本文将对岩浆通道距离场、断层距离场以及岩墙顶底板相对距离这三个控矿因素进行定量提取并分析与矿化指标之间的规律。

3.1. 岩浆通道中心线距离场

岩浆通道可分为水平通道和岩墙型通道[10],金川II-1号矿体及围岩呈中心式分布特征,且局部超镁



1, 角砾状混合岩-均值混合岩; 2, 黑云斜长片麻岩; 3, 蛇纹大理岩; 4, 条带-均质混合岩; 5, 绿泥石英片岩; 6, 含榴二云片麻岩; 7, 蛇纹石大理岩中部分叉夹条痕状混合岩; 8, 超基性岩; 9, 第四系; 10, 断层

Figure 1. Geological sketch map of Jinchuan Cu-Ni sulfide deposit (A modified version of Tang Zhongli *et al.* [4])
图 1. 金川铜镍硫化物矿床地质简图(据汤中立等[4]修改)

铁质岩体与围岩多具穿、切层现象。因此,形成 II-1 号矿体的岩浆通道属岩墙型通道。岩浆通道成矿理论认为,成矿的岩浆房是一个开放系统,既接受新岩浆的注入也接受围岩、地层的混染,当岩浆达到饱和时,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[11]。因此,岩墙型通道成矿复杂,不仅受到岩浆本身影响,还与通道产状、形态密切相关。

金川岩体的形成至少经历了 4 期岩浆的侵位,II-1 号矿体与第三期岩浆侵入关系最为密切[4]。一般认为寻找该期岩浆通道入口(或岩浆通道的中心)对成矿预测至关重要[12]。而 I、II 矿区的结合部(II 矿区西北侧)被认为是一岩浆通道入口,而且为 II-1 号矿体提供成矿物质[5] [6] [8] [13]。

在综合地球化学、地质因素以及地质体模型后使用主成分分析法,并结合地质认识构建了岩浆通道的骨架模型。岩浆通道骨架模型是一中空的实体模型,为开展对岩浆通道距离场的提取,首先需要提取岩浆通道骨架模型的中心线并对其体素化(图 2),然后计算矿体单元距离中心线的最小欧式距离值。

本文将点到地质体的距离约定为点到地质体的最小距离,因此矿体距岩浆通道的距离即转换为矿体单元中心点距其最近的岩浆通道中心线单元的距离。在基于体素模型的空间分析中需要大量的距离量算,若使用传统方法遍历空间中所有矿体单元,计算其与所有岩浆通道中心线单元距离并求取距离最小的单元将带来巨大的计算量。因此需要寻求一种能够快速在栅格空间生成距离场的量算方法,相对传统方法可高达 $O(n^6)$ 的时间复杂度,蔺宏伟提出了三维带符号的欧氏距离变换方法(3 Dimensional Signed Euclidean Distance Transform, 3-SEDT)将全局搜索问题转化成一个局部搜索问题从而有效减少计算量[14],其时间复杂度降低为 $O(n^3)$ 。

本文应用 3-SEDT 算法过程如下:

- 1) 计算岩浆通道中心线以及矿体实体的包围盒 B,本研究将包围盒扩大至整个地质空间。
- 2) 将 B 离散为体素,将岩浆通道中心线所在体素设为特征体素,记特征体素组成的集合为 T_1 ,并令其距离向量初值 $f = (0,0,0)$,其他体素则设为非特征体素,记为集合 T_2 ,设 T_2 中所有元素距离向量初值 $f = (u,u,u)$,其中 u 为足够大的数。
- 3) 用 3-SEDT 中 8 个模板对 B 进行扫描,计算出岩浆通道中心线的距离场并对距离向量值更新,对矿体体素与 B 进行求交,提取出 B 中矿体所在体素,对距离向量求模,最终提取出矿体距岩浆通道距离场。

3.2. 断层距离场

断层既是容矿构造同时也是导矿构造,原始为矿浆提供通道空间的断层虽然受到了后期运动的改造,

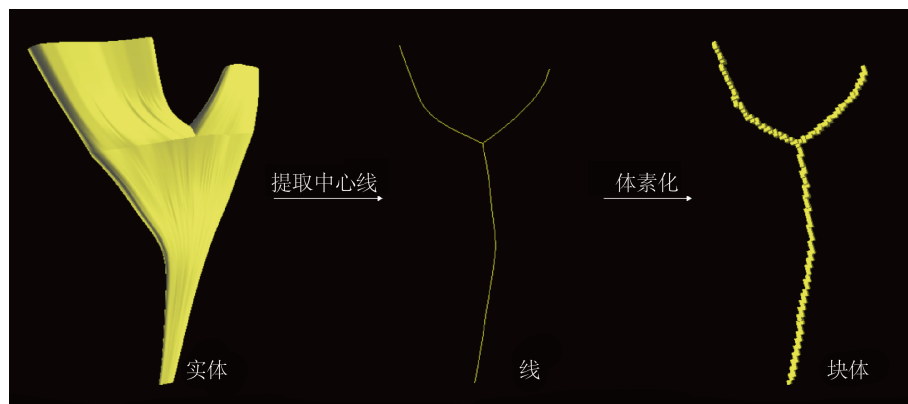


Figure 2. Voxelization process of magma channel central line
图 2. 岩浆通道中心线体素化过程

但是依然对岩浆通道位置具有一定指示作用。金川矿床形成后主要处于挤压环境中，在最大剪应力的方向上，发育了以 F_8 、 F_{16-1} 和 F_{23} 断层为代表的北东向左行平移断层[15]。前提及的岩浆通道与 F_{16-1} 断层最为接近。 F_{16-1} 作为 I、II 矿区的分界线，使两条独立基性-超基性含矿岩墙(岩墙型通道)移动到近似一条直线，该断层的发育或许是对原岩浆通道系统的地质响应，因此，本文尝试将 F_{16-1} 断层距离场作为一控矿因素，试图找出并阐述其与矿体富集规律的关系。

控矿地质因素场与空间中某点到相关联的断层面的距离有关，即控矿地质因素场是到断层面距离的空间分布函数[16]。本文将点到断层面的距离约定为点到断层面的最小距离，即预测空间中某单元(体元)到断层面的最近距离作为控矿地质因素场对单元的影响程度。对 II-1 号矿体求取断层 F_{16-1} 距离场。本文将构造三维断层面，并将其体素化来求取其周围矿体单元的影响度。由于断层面不是线框模型，难以利用普通的实体体素化方法获取其块体模型，本文将使用外表面投影法利用 Z-buffer 算法来获取其块体模型[17]。

记断层所在体素为特征体素，其集合为 T_1 ，距离向量初值 $f = (0, 0, 0)$ ；其他体素为非特征体素，记为 T_2 ，其距离向量初始值 $f = (u, u, u)$ ，其中 u 为足够大的数。然后使用 3-SEDT 法计算出断层距离场，并对每一个非特征体素求取离它最近的特征体素，更新其距离向量值，提取出矿体所在体素集合即可。

计算矿体距离向量的模即可得出矿体离断层的距离值。值得注意的是，断层一般由上盘和下盘之分，断层的上下盘的物理化学性质一般不同；这里为了体现这种不同，约定位于断层面上盘的单元为正距离，位于断层面下盘的单元为负距离(图 3)。

为了判断正负号，可以令 a 为从断层面中心点出发到矿体单元的向量， b 为断层面的法向量，则

$$\cos \alpha = \frac{a \cdot b}{|a||b|} \quad (1)$$

其中 α 为 a 、 b 两向量的夹角， $\cos \alpha \geq 0$ 为正，反之为负。

3.3. 顶底板相对距离

II-1 号矿体所处岩体为一岩墙，岩墙形成初期比现在产状平缓[4]，为一倾斜岩墙。如前所述，晚期矿浆沿倾斜岩墙的沉淀、富集受多因素共同控制，就成矿机理而言，矿浆的沉淀受流速、围岩混染、重力分异等因素影响。根据已有研究，II-1 与 II-2 矿体的母岩浆早期为同一矿浆，并在同一岩浆通道系统中演化，而在岩浆冷凝阶段时，II-1 与 II-2 矿体的母岩浆演化却发生了显著区别[11]，最终 II-1 号矿体以富矿为主体，而 II-2 号矿体则以贫矿为主，岩墙中成矿物质出现分层性特征。因为矿体体元到岩体底板

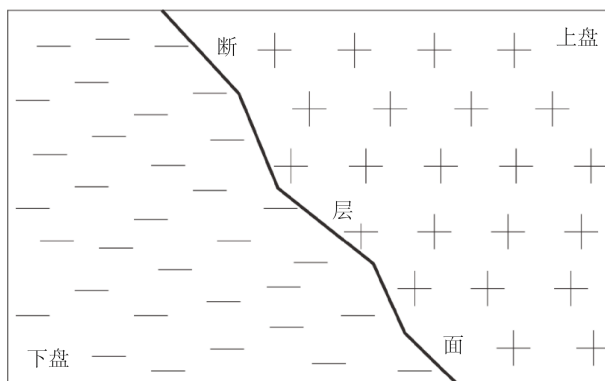


Figure 3. Sign of Euclidean distance field of fault

图 3. 断层距离场正负示意图

的距离并不能完全体现矿体在岩体中的分布位置,分布在厚大岩体底部的矿体单元距底板的距离可能大于分布在厚度较小岩体顶部的矿体单元距底板的距离,所以需要有一个不受岩体厚度影响且能体现矿体单元在岩体中分布位置的因子,因此对每一矿体单元分别求取与岩体顶板和底板在厚度方向上的距离,并求取距离比值。因此,本文选取矿体在岩墙顶底板中的相对距离作为一个因素,从大量的地质数据中探寻 II-1 号矿体的富集规律。

求矿化单元到顶(底)板的距离的实质即寻找该单元质心点到顶(底)板面某一三角形的距离。为求取厚度方向上的距离,首先定义一个三维平面为走向面,其走向、倾向、倾角均与岩体一致,岩体厚度方向即该走向面的法线方向(图 4)。

矿体单元与顶底板相对距离计算方法如下:

1) 首先对每个属于矿体的体元 $v_i(x_i, y_i, z_i)$, 以走向面法线方向 d 为射线方向, 进行射线投射, 构造射线方程:

$$p(t) = v_i + dt \quad (2)$$

2) 以走向面法线方向 d 为射线方向, 进行射线投射, 在顶板上寻找与射线相交的最近点。设顶板面上某一三角形所在的面方程为:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (3)$$

将(2)代入规范化后的(3)式, 可以得到:

$$n^T p(t) + c = 0 \quad (4)$$

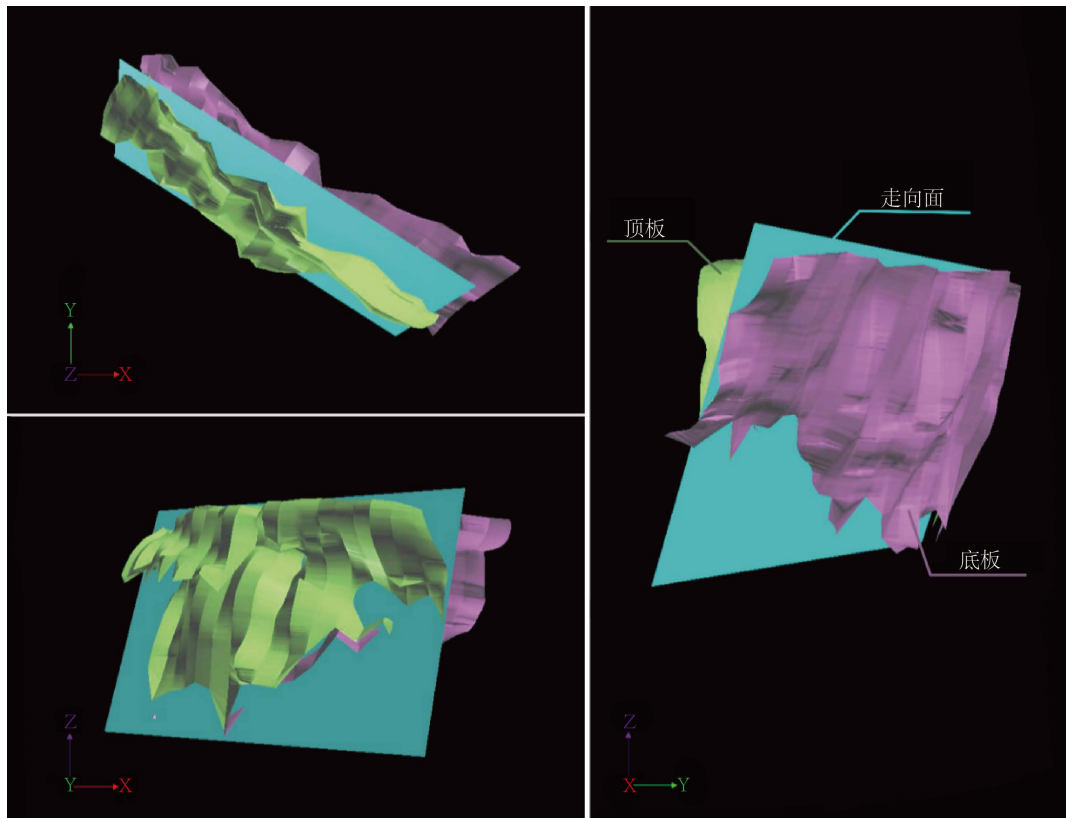


Figure 4. Illustration of rock's roof and floor surface and the striking surface
图 4. 岩体顶底板与走向面示意图

其中 n 为三角形的法向量， c 为正则化后的常数项。对 t 求解：

$$t = -\frac{n^T v_i + c}{n^T d} \quad (5)$$

t 为负值时不相交，为正值时则表明从体元 v_i 出发的射线与该三角形所在平面相交，记交点为 $p_1(x_1, y_1, z_1)$ 。当 p_1 在三角形所在面上时，还需判断点是否在该三角形内。因此先将该三角形从三维平面投影到 XOY, XOZ 或者 YOZ 中一个使其投影面积达到最大的二维平面上。如图 5 所示，设投影三角形 AB 边的向量为 \mathbf{a} ，AC 的向量为 \mathbf{b} ，则有：

$$Ap_1 = ua + vb \quad (6)$$

若满足 $u \in [0,1)$ 且 $v \in [0,1)$ ，则 p_1 在该三角形内。遍历所有顶板面中的三角形，若该射线与多个三角形相交则选取 t 值最小的三角形。在实现中，可以建立格网索引或八叉树索引[18]加速光线投射过程。

3) 然后以走向面法线反方向 $-d$ 为射线方向，进行射线投射，使用同样的方法获取射线与底板的交点 $p_2(x_2, y_2, z_2)$ 。

4) 求矿体单元与顶底板距离(图 6)

$$dist_{top} = \|v_i - p_1\| \quad (7)$$

$$dist_{floor} = \|v_i - p_2\| \quad (8)$$

5) 获取距离比值

$$R = \frac{dist_{top}}{(dist_{top} + dist_{floor})} \quad (9)$$

其中 R 值越大，矿体单元距离底板越近； R 值为 0 时，矿体单元与顶板接触； R 值为 1 时，矿体单元与底板接触。

4. 讨论

对 II-1 号矿体求取岩浆通道骨架距离场、断层距离场以及顶底板相对距离结果后对矿体数据库进行更新，新建字段 dis_MC、dis_Fault、dis_Ratio 分别存储三个控矿因素值。将 II-1 号矿体数据导入 Gocad 后分别以 dis_MC、dis_Fault、dis_Ratio 值进行颜色渲染，如图 7~图 9。

绘制矿体 Cu、Ni 品位与三个控矿因素的直方图如图 10~图 15。

由图 10、图 11 可知 dMC 值范围为(0, 700)，在 0 附近时 Cu、Ni 品位最高，Cu、Ni 品位随着 dMC 值增大而减小，衰减规律非常明显，可以很有力的支撑岩浆通道成矿。在硫化物上侵过程中，早期岩浆形成的矿体处于岩浆通道边缘部位，围岩混染最严重、温度变化最快。而且早期矿浆硫化物浓度相对较

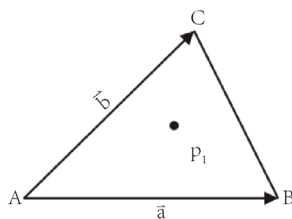


Figure 5. The point is within the triangle
图 5. 点在三角形内

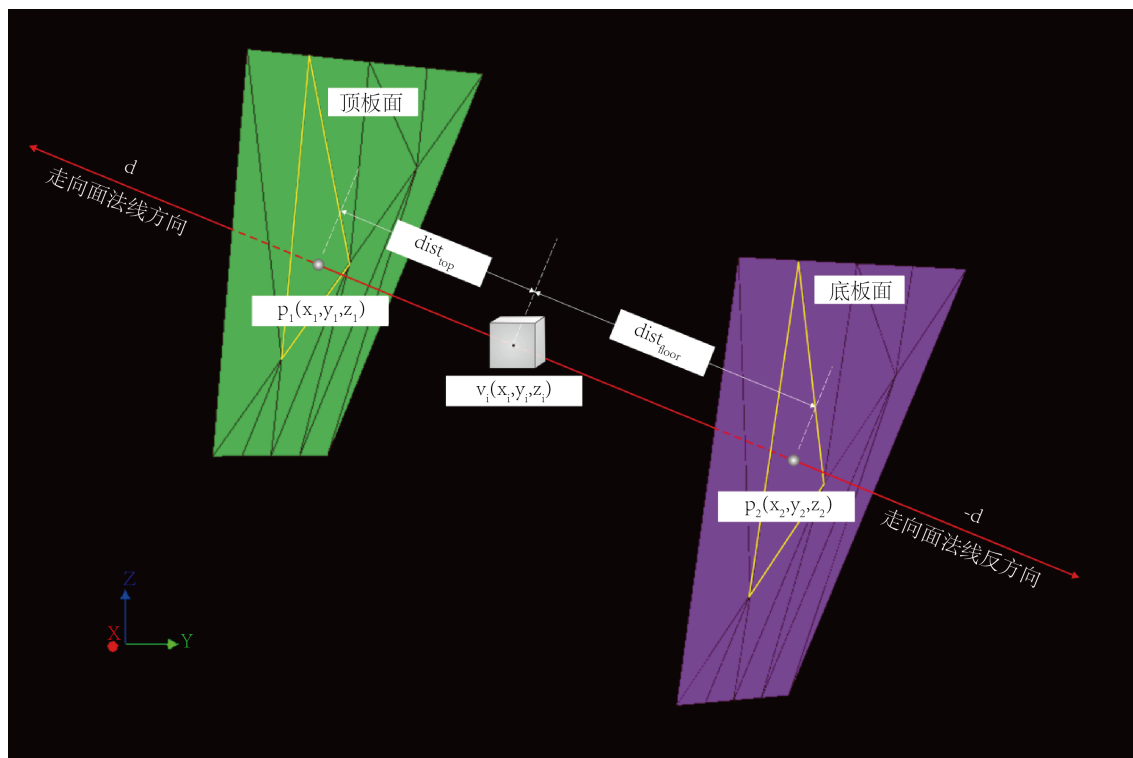


Figure 6. Relative distance of rock's roof and floor

图 6. 顶底板相对距离示意图

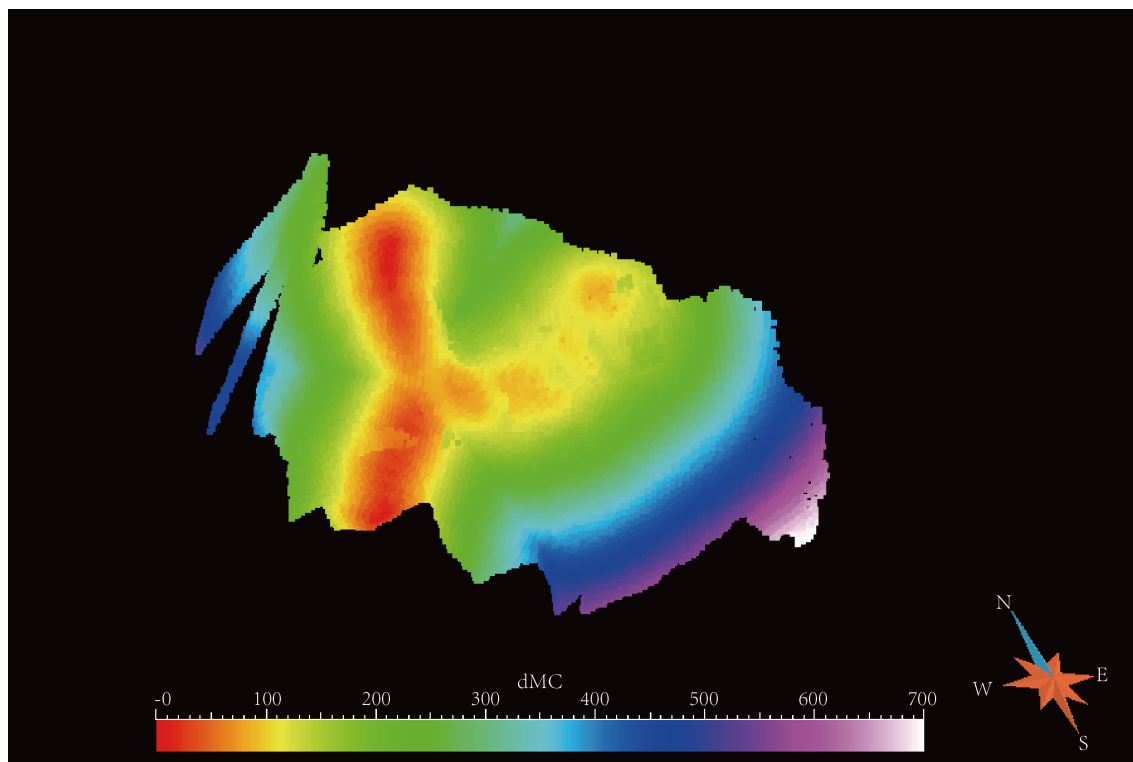


Figure 7. Euclidean distance field of magma channel central line (II-1 orebody)

图 7. II-1 号矿体岩浆通道中心线距离场

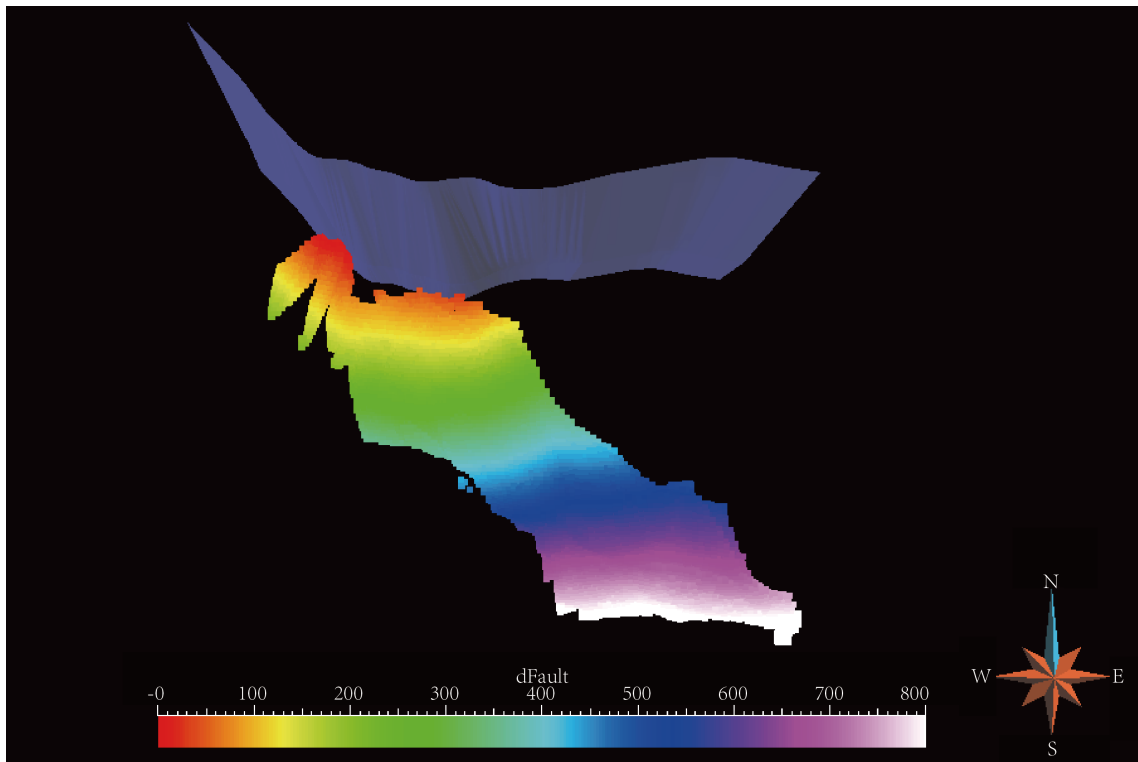


Figure 8. Euclidean distance field of fault F_{16-1} (II-1 orebody)
图 8. F_{16-1} 断层距离场(II-1 号矿体)

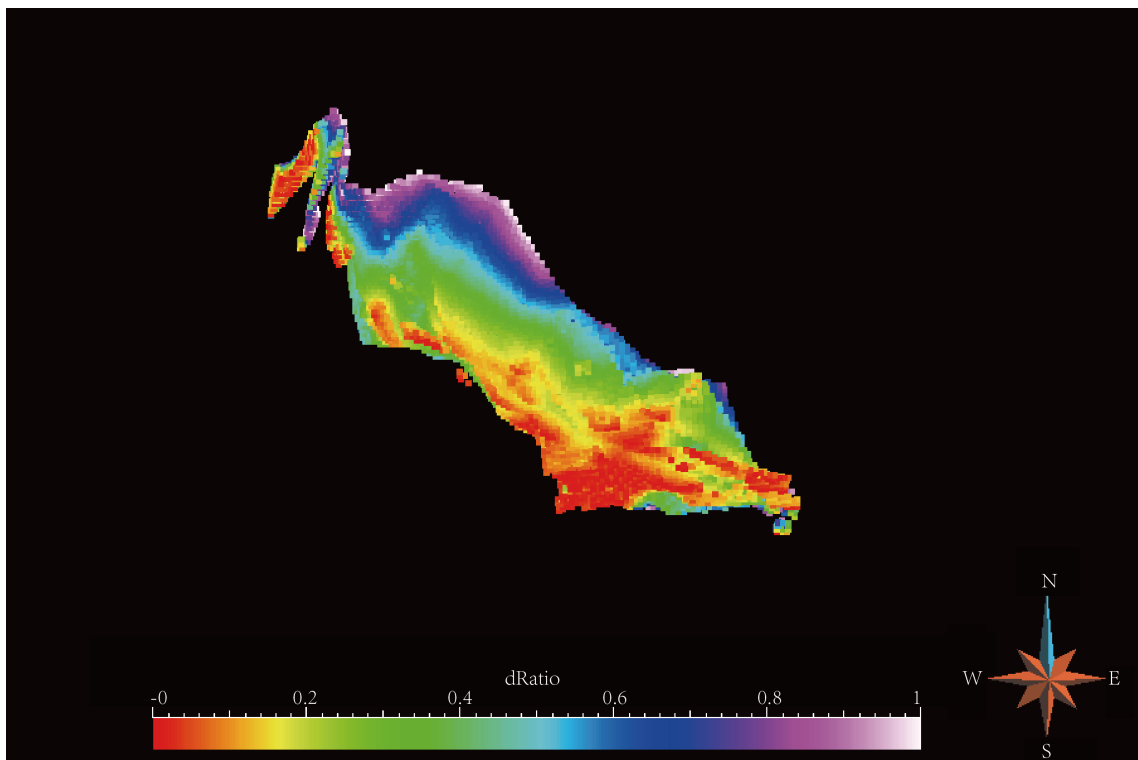


Figure 9. Relative distance of rock's roof and floor (II-1 orebody)
图 9. II-1 号矿体顶底板相对距离

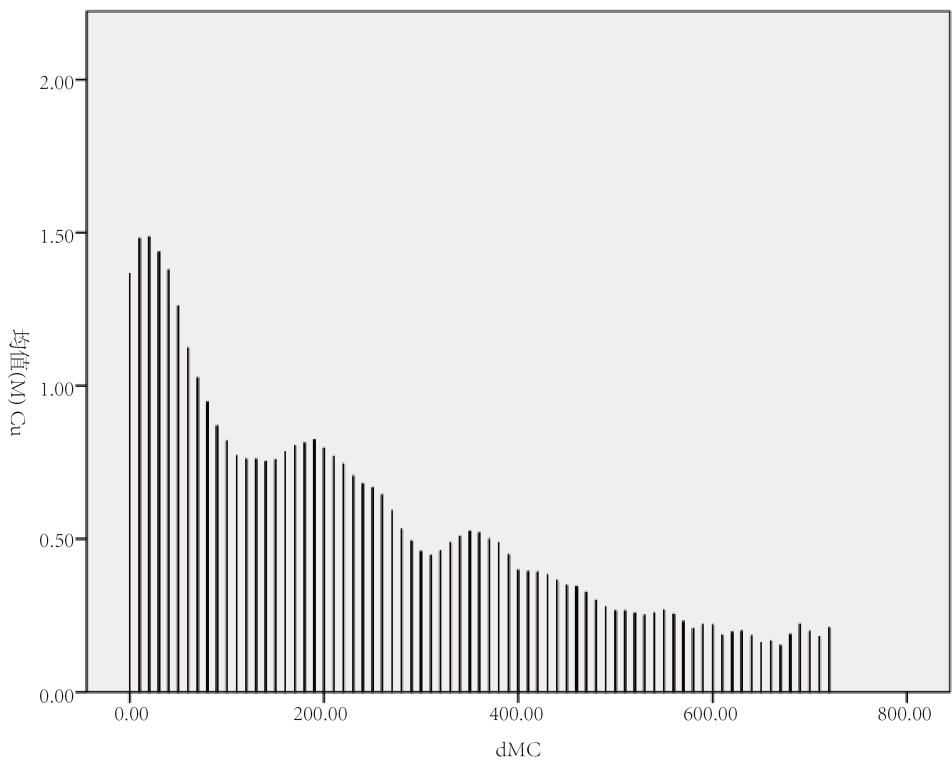


Figure 10. Average Cu Grade histogram with dMC
图 10. Cu 平均品位直方图(dMC)

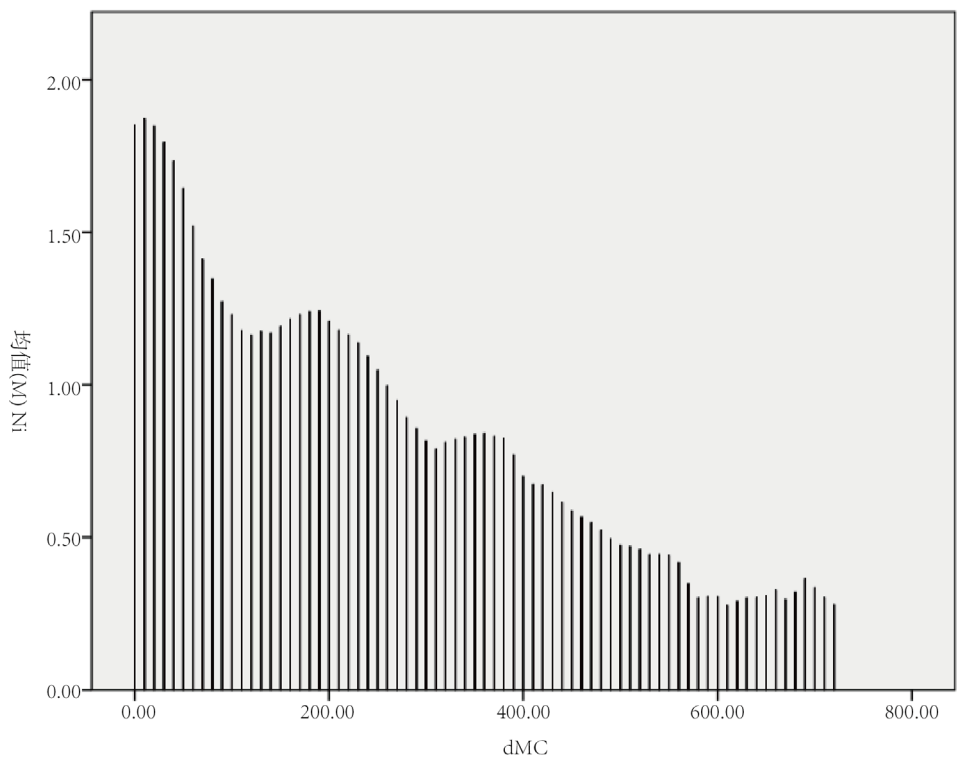


Figure 11. Average Ni Grade histogram with dMC
图 11. Ni 平均品位直方图(dMC)

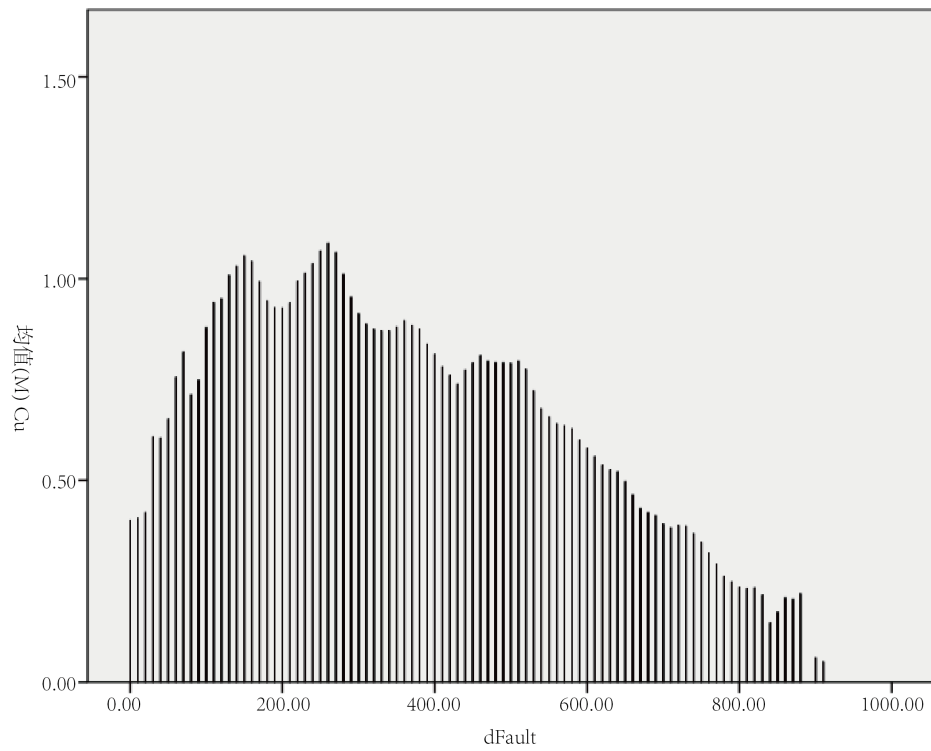


Figure 12. Average Cu Grade histogram with dFault

图 12. Cu 平均品位直方图(dFault)

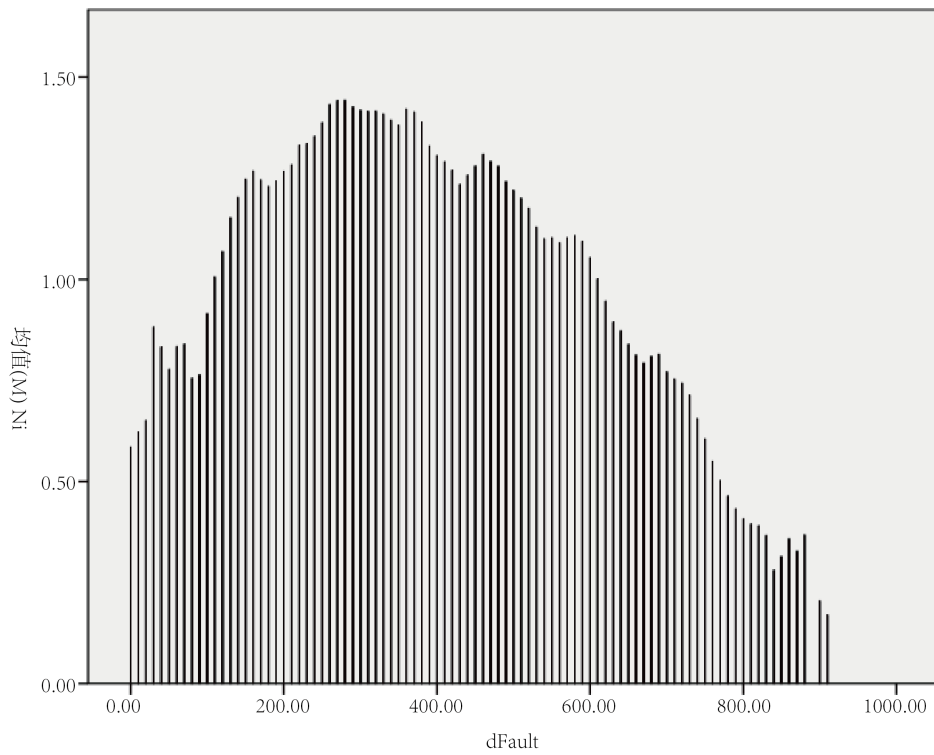


Figure 13. Average Ni Grade histogram with dFault

图 13. Ni 平均品位直方图(dFault)

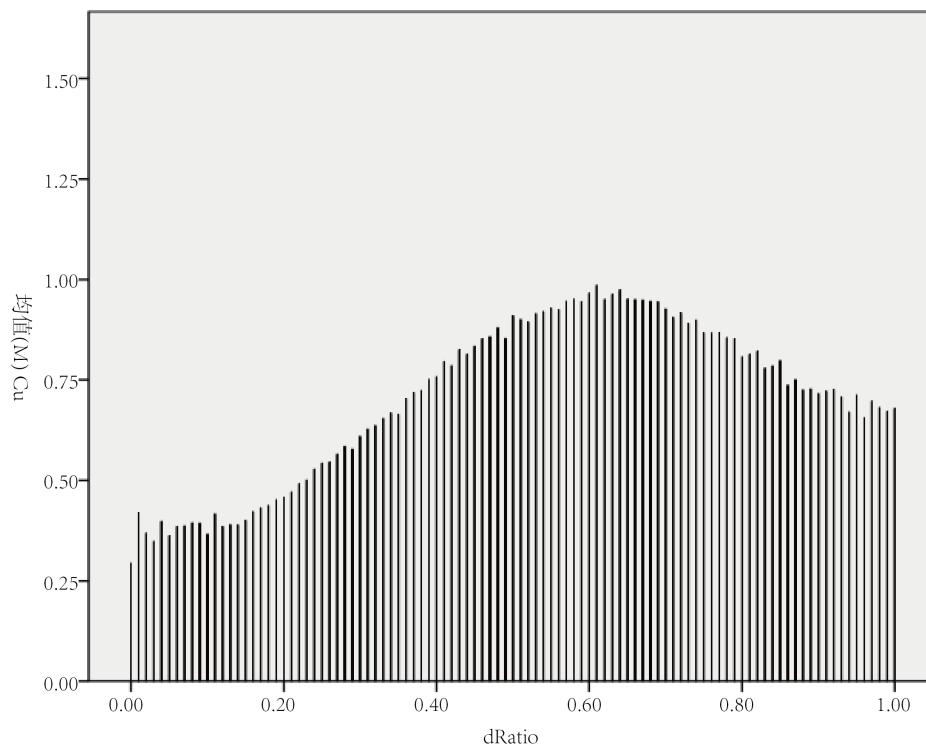


Figure 14. Average Cu Grade histogram with dRatio
图 14. Cu 平均品位直方图(dRatio)

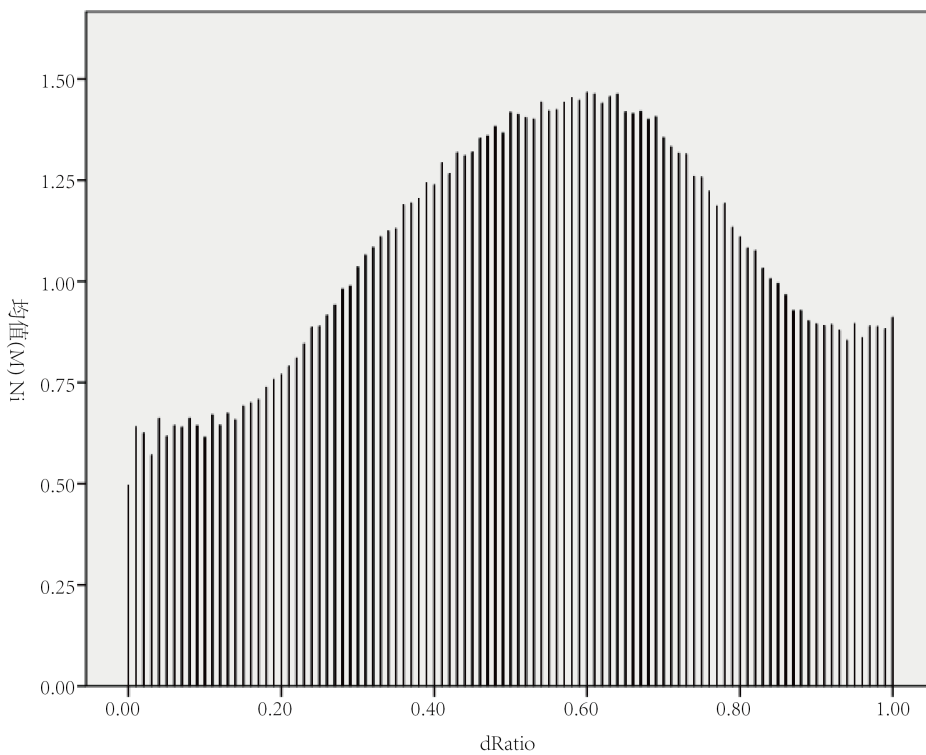


Figure 15. Average Ni Grade histogram with dRatio
图 15. Ni 平均品位直方图(dRatio)

低,因而形成的矿体品位也相对较低($\text{Cu} < 0.5\%$, $\text{Ni} < 0.8\%$)。随后,矿浆不断沿通道中心上侵。由于通道中心,尤其是靠近岩浆通道口附近,温度下降较慢,拥有较好的成矿环境。因此,靠近通道中心的位置,矿体品位最高。但是在 dMC 等于 200 和 380 值附近时,出现了两次峰值。根据已有认识,图中出现多峰最主要的原因,矿体为多期岩浆贯入形成的复式矿体。在后期岩浆上侵过程,早期形成的岩体(可能尚未冷凝结晶)被不断往外挤压使其偏离岩浆通道中心,因此在距岩浆通道一定距离时出现峰值。另外,矿体富集也可能受多因素共同控制,并非仅与岩浆通道有关。

$dFault$ 值范围为 0-900,由于 II-1 号矿体在 F_{16-1} 上盘,故其断层距离场皆为正值。 Cu 、 Ni 品位与断层距离场指标非线性相关, Cu 、 Ni 品位峰值偏左,在 $dFault$ 值为 300 左右时 Cu 、 Ni 品位最高,其位置与岩浆通道中心相重叠,因此此处矿体富集可能为岩浆通道影响,但在(300, 900)范围时,矿体单元距断层层越远, Cu 、 Ni 品位越低,在 900 时达到最低。

$dRatio$ 值范围为 0~1,其值越接近 1 表明矿体单元离岩体底板越近。由图可知,近底板矿体单元 Cu 、 Ni 品位总体大于近顶板矿体单元,在 $dRatio$ 值为 0.6 左右时, Cu 、 Ni 品位最高。由于岩浆通道中心成矿环境最好,硫化物最为富集,结合图 14、图 15 可知,岩浆通道中心在岩墙中部偏下位置($dRatio = 0.6$)。矿浆在通道中侵位和冷凝过程中,一直发生着硫化物固溶体分离作用。硫化物乳珠受重力影响将向下沉淀,因此,矿体富集部位应偏于底板。但由于主成矿期中存在多期岩浆上侵,而富矿岩浆为晚期沿通道中心侵位,所以,矿体富集部位更偏于岩浆通道中心。两种因素的叠加,导致了矿体在岩墙中下部($dRatio = 0.6$)最为富集。

5. 结论

1) 本文在三维地质模型的基础上,使用三维空间分析方法求取了金川铜镍矿床 II-1 号矿体的三个控矿因素,分别为顶底板相对距离、岩浆通道中心线欧式距离场以及其距 F_{16-1} 的断层欧式距离场,利用 Datamine、Gocad 等三维建模软件对数据进行了处理及显示。对矿化指标以及控矿因素进行分析后,发现岩浆通道距离场与矿化指标相关性显著,离岩浆通道越近, Cu 、 Ni 品位越高;顶底板相对距离与 Cu 、 Ni 品位之间的规律也能指示矿体富集于岩体中下部;断层距离场与矿化指标之间规律受岩浆通道影响但仍具较强相关性。可对三个控矿因素和矿化指标进行回归分析找出数学规律,并用于预测,对未来 II-1 号矿体深边部找矿有指示性作用。

2) 鉴于金川铜镍矿床的成矿模式,可以将同样的方法应用于 III-1 号矿体, I-24 号矿体以及 II-2 号矿体定量提取三个控矿因素:构建 III-58 号矿体, I-24 号矿体和 II-2 号矿体的岩浆通道骨架模型并求取岩浆通道距离场;分别求取对应的 F_8 、 F_{16-1} 以及 F_{17} 的断层距离场;根据 III、I、II 矿区超基性岩体形态求取顶底板相对距离。找出控矿因素与矿体富集之间存在规律并验证其有效性后对控矿因素进行转换成找矿信息指标,对整个金川铜镍矿床深边部找矿提供支持。

参考文献 (References)

- [1] 汤中立. 中国岩浆硫化物矿床的主要成矿机制[J]. 地质学报, 1996, 70(3): 237-243.
- [2] 高辉, 曹殿华, 李瑞萍, 等. 金川铜镍矿床成矿模式, 控矿因素分析与找矿[J]. 地质与勘探, 2009(3): 218-228.
- [3] 白智山. 金川镍矿 II 矿区特富矿成矿机理[J]. 采矿技术, 2005, 5(2): 77-79.
- [4] 汤中立, 李文渊. 金川铜镍硫化物矿床模式及地质特征对比[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [5] 宋谢炎, 李士彬, 王玉山, 等. 含矿岩浆通道对于岩浆铜镍硫化物矿床找矿工作的意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2005, 24(4): 293-298.
- [6] 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.

- [7] 苏尚国, 汤中立, 周岱. 金川含矿超镁铁岩侵入体侵位序列[J]. 地学前缘, 2010(2): 118-126.
- [8] 曾认宇, 赖建清, 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(4): 276-282.
- [9] 苏尚国, 汤中立, 罗照华, 等. 岩浆通道成矿系统[J]. 岩石学报, 2014, 30(11): 3120-3130.
- [10] 苏尚国, 汤中立. 岩浆通道成矿系统的理论与实践[J]. 矿床地质, 2010(S1): 885-886.
- [11] 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 Implications for the Origin of the Ni-Cu Ores. *Economic Geology*, **87**, 975-1004. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.87.4.975>
- [12] 曾认宇. 金川铜镍硫化物矿床岩浆通道系统及岩浆演化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [13] 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(12).
- [14] 蔺宏伟, 王国瑾. 三维带符号的欧氏距离变换及其应用[J]. 计算机学报, 2003, 26(12): 1645-1651.
- [15] 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.
- [16] 毛先成. 三维数字矿床与隐伏矿体立体定量预测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.
- [17] 邓浩. 面向隐伏矿体预测的三维地质建模与空间分析若干技术研究[D]. 中南大学, 2008.
- [18] Foley, J.D., Dam, A., Feiner, S.K. and Hughes, J.F. (1995) *Computer Graphics: Principles and Practice*. 2nd Edition, Pearson Education.