

红透山铜矿外围隐伏矿体三维定量预测

张宝一^{1,2}, 吴湘滨^{1,2}, 王丽芳^{1,2}, 刘文玉^{1,2}, 杜方^{1,2}

- (1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

摘要: 介绍红透山铜矿外围隐伏矿体三维定量预测的技术组合和方法体系。首先, 借助三维可视化仿真环境, 实现红透山铜矿的地表面、矿体、断层、地层实体模型的三维可视化。其次, 将成矿信息场、地层形态场、断裂影响场、地球物理场等多元地质空间数据在统一的三维空间数据场构架下有效集成, 实现了三维空间信息的综合研究和地质多专业的有机结合。其次, 基于三维地质空间相关场分析, 为三维定量预测提取定量指标集和建立预测模型。最后, 使用三维定量预测模型对红透山矿外围的矿化位置与分布规律进行预测和评价, 圈定找矿靶区。三维地质建模与可视化及三维地质空间相关场等技术的使用, 为进行红透山矿外围隐伏矿体在三维空间中的分布及形态的定量预测提供支撑。

关键词: 红透山铜矿; 危机矿山; 外围; 隐伏矿体; 三维定量预测

中图分类号: P612

文献标志码: A

3D quantitative prediction of concealed ore-body in surrounding areas of Hongtoushan copper deposit

ZHANG Bao-yi^{1,2}, WU Xiang-bin^{1,2}, WANG Li-fang^{1,2}, LIU Wen-yu^{1,2}, DU Fang^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The systematic techniques and methods of concealed ore-body 3D quantitative prediction in the surrounding areas of Hongtoushan copper deposit of Liaoning province were introduced. Firstly, the 3D geological entity model of Hongtoushan copper deposit, including the terrain surface, ore-body, strata, and fault surface, was built in the 3D visualization circumstance. Secondly, through the integration of fields of mineralization information, strata's morphology, fault influence and geophysical attributes in the framework of 3D geological space, the comprehensive analysis of multiple disciplinary of geosciences was achieved. Thirdly, based on 3D geological correlation field analysis, a set of geological ore-controlling quantitative factors and the 3D quantitative prediction model were proposed. Finally, the 3D location and distribution of concealed ore-body in the surrounding areas of Hongtoushan copper deposit were predicted to delineate the target regions. The technology of 3D geological modeling, visualization, correlation field supports the 3D quantitative prediction of concealed ore-body.

Key words: Hongtoushan copper deposit; crisis mine; surrounding areas; concealed ore-body; 3D quantitative prediction

抚顺红透山铜矿是目前中国东北地区最大的铜矿基地, 自1958年开采至今, 期间有树基沟、向阳坑和

红心坑3个坑口相继闭坑, 目前仅有红坑口在正常生产。红坑口已开采21个中段, 开拓深度达1337m,

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2008BAB34B02); 湖南省自然科学基金资助项目(09JJ6063); 中南大学自由探索计划资助项目(201012200069)

收稿日期: 2011-12-01; 修订日期: 2012-01-04

通信作者: 吴湘滨, 教授, 博士; 电话: 18007318003; E-mail: wuxb@mail.csu.edu.cn

开采深度达 1 257 m, 为国内开采深度最大的金属矿山之一。长期大规模开采、找矿工作滞后等导致红透山铜矿资源保有程度严重不足、新增储量青黄不接、资源迅速减少乃至濒临枯竭, 是典型的“危机矿山”。

国内外的矿产资源勘查与开发经验表明,“危机矿山”的外围仍然是发现新矿床、扩大资源储量的重要目标区, 还有十分可观的资源潜力可挖^[1]。2004年, 国务院、国土资源部联合启动了“全国危机矿山可接替资源找矿计划”, 按照“理论指导、技术优先、探边摸底、拓展外围”的原则, 优选出了一批资源潜力较好的大中型矿山, 开展矿区深部及外围找矿工作, 红透山铜矿就是“全国危机矿山接替资源找矿计划”首批试点项目之一。2008年, 国家“十一五”科技支撑计划项目“深采有色金属矿山资源增储与高效利用关键技术研究”在红透山铜矿批准实施, 据推测外围的小西堡、黄泥坑地区成矿条件优越, 具有巨大的铜源潜力, 亟需通过多学科、多技术、多方法联合攻关以获得资源潜力。

现代成矿理论的发展为危机矿山外围隐伏矿体的定量预测奠定了基础, 如陈国达^[2]提出的“多因复成矿床”的成矿学理论; 赵鹏大等^[3]提出的“综合地质异常致矿”的理论和方法; 程裕淇^[4]、陈毓川等^[5]、翟裕生^[6]提出的“成矿系列”理论; 翟裕生^[7]提出的“成矿系统”理论; 以“相似类比”原理为基础, 对矿床找矿标志准则及矿床形成成因机制进行总结的“矿床成矿模式”^[8]; 通过建立与矿床模型相匹配的矿产勘查模型来开展矿体预测的“找矿模型”^[9]等, 均提高隐伏矿体定量预测的效果和效益。红透山矿在“全国危机矿山可接替资源找矿计划”实施以来, 井下施工巷道累计 9 728 m, 水平钻深度累计 6 100 m, 大钻深度累计达 6 350 m; 物探方面, 在红透山矿区黄泥坑、小西堡—西北天地区, 开展了大功率电法 GDP-32 II 可控源音频大地电磁法测量(CSAMT), 在找矿有意义的 CSAMT 异常地段进行了 EM67 型瞬变电磁法(TEM)测量、激电中梯(IP)和高精度磁法(ΔT)等综合方法剖面测量; 化探方面开展了黄泥坑—小西堡—西北天 1:10 000 土壤测量等。加上红透山矿历年积累的地质、物化探、遥感、矿产、储量及开采等数据, 总的数量十分庞大。本文作者基于现代成矿理论和矿产勘查新技术, 综合运用各种数量化方法、信息集成技术、3D GIS 与可视化技术和空间统计分析工具, 对红透山铜矿的大量勘探数据进行了有效集成, 探讨综合信息化、定量化和可视化的危机矿山外围隐伏矿体三维定量预测方法。

1 成矿地质特征

抚顺—清原地区是我国典型的太古宙花岗—绿岩地体分布区, 绿岩层含矿岩系主要产于钠质花岗岩隆起底辟侵位的向斜褶皱带中, 具有铜、锌、金、银、铁等多种矿产^[10]。绿岩地层自下而上分为石棚子组、红透山组和南天门组, 王松山等^[11]应用 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年技术测定清原绿岩地层的形成时代可能在 30 亿年或稍早一些, 属太古代。红透山式铜矿集中产在红透山组上部斜长角闪岩段的“薄层互层带”(黑云斜长片麻岩和角闪斜长片麻岩互层)内, 宏观上具有明显的“层控性”特点。

红透山铜矿是受变质改造的海底火山喷气型火山沉积块状硫化物铜锌矿床, 简称为“红透山式”铜矿床。万渝生等^[12-13]研究表明, 清原地区太古宙基底主要由新太古宙岛弧系统火山物质组成, 太古宙基底表壳岩系变质原岩主体为拉斑玄武岩、安山岩、英安岩及相应火山碎屑沉积岩, 形成于板块汇聚的岛弧环境。频繁的基性火山活动提供的成矿物质来源和适宜的火山间歇沉积环境是红透山式铜锌矿床形成的两个主要条件。块状硫化物矿床赋存在火山沉积建造中绿岩带上部火山岩和沉积岩界面上, 区域变质后形成含多矿物集合体的矿化硅线黑云片岩和黑云(金云母)斜长片麻岩。

花岗绿岩地体经历了多期区域变质变形、岩浆侵入及混合岩化作用^[14-15]。在区域变质变形过程中矿质产生了局部重熔和富集, 使本为层状或透镜状的硫化物矿体产生了差异性的流变, 即“变质物理重就位”, 形成了厚薄不一形态复杂多变的硫化物矿体^[16]。尤其是在叠加褶皱造成的地层转弯部位, 易于使原生矿体变形就位和发生成矿组份的局部迁移^[10]。顾连兴等^[17-18]研究表明, 矿石不仅在进变质过程和变质峰期中发生过强烈的机械再活化和重结晶, 而且韧性剪切及流体叠加可能促进了退变质塑性变形、二次退火、化学再活化, 形成的矿石糜棱岩比块状硫化物矿石明显富集铜、金、银等元素^[19]。

2 三维地质建模及可视化

红透山铜矿在历年的勘探和开发过程中积累了海量的地质勘探、物化探、遥感调查、储量计算、开采

掘进等基础数据。多年积累的珍贵数据宝藏客观地记录了三维地质空间中矿产资源的定位与分布规律,地质资料的再开发是进一步开展外围找矿工作和扩大资源储量的重要手段。危机矿山的研究、勘探和开发程度较高,地表和浅部易于发现的矿产资源已基本被开发完毕,预测评价对象应以深部和外围隐伏矿体为主,必须开展地学多专业的有效集成和三维空间信息的综合研究^[20-21]。论文基于三维地质建模及可视化技术建立了红透山矿及外围的三维地质实体模型和多参数的三维地质空间场模型,对红透山矿历年所积累的大量多专业地学数据进行了有效的集成,为开展三维空间信息的综合研究提供了基础。

三维地质建模是指采用适当的数据结构在计算机中建立起能反映地质构造的形态和各要素之间关系以及地质体物理、化学属性空间分布等地质特征的数学模型^[22]。三维地质模型可分为实体模型和场模型^[23]:前者将三维地质空间表示为离散的点、线、面及体四类几何实体的组合,侧重于表达地质构造的形态和各要素之间关系,也称为矢量模型;后者则将三维地学空间剖分为规则或不规则的体元构成的连续场,侧重于表达三维地质空间内物理和化学属性参数的空间分布特征,也称为体元模型。三维地质空间既可以用实体模型表示,也可以用场模型表示,两者之间也可以互相转换,采用何种模型要由实际需求来决定^[24]。由于实际问题的复杂性,本文作者将这两种模型组合使用,即实体模型用于三维可视化显示,场模型用于空间运算和空间分析。

2.1 三维地质实体建模

使用 SURPAC 数字化矿业软件建立了红透山矿及外围的三维实体模型,该软件整合了三维实体和连续场的建模工具,可实现地表面、地质体(包括地层、断层、矿体等)及勘探工程等三维建模及可视化,如图 1 所示。

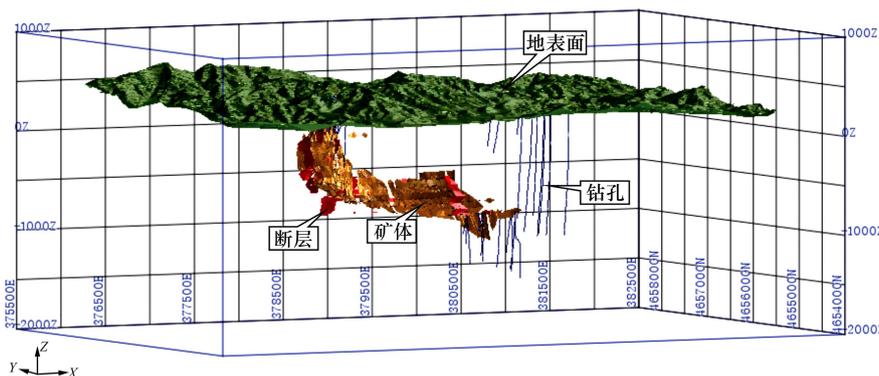


图 1 三维地质实体模型

Fig. 1 3D geological entity model

1) 地表面模型,由等高线数据使用 Delaunay 三角化算法建立地表面 TIN 模型;

2) 勘探工程模型,收集了包括大钻、穿脉、水平钻等勘探工程的 3 190 个样品测试数据,并将勘探工程编录数据(包括开孔、测斜及采样)导入 SURPAC 数据库中;

3) 矿体模型,由平面地质图、中段平面地质图、储量计算地质剖面图上所揭露出的已知矿体轮廓,使用二维轮廓线重构三维表面算法建立矿体表面模型;

4) 断层模型,由平面地质图、中段平面地质图上所揭露出的断层线,使用二维轮廓线重构三维表面算法建立断层表面模型;

5) 地层模型,由平面地质图、中段平面地质图上所揭露出的地层轮廓,使用二维轮廓线重构三维表面算法建立各地层表面(包括红透山组的黑云片麻岩类、角闪片麻岩类以及侵入岩类)模型,如图 2 所示。

2.2 三维地质空间场建模

实体模型是以 TIN 面表示的空间闭合实体,仅用于三维可视化显示;在进行矿化分布、地质控矿指标表达时则需要使用体元模型,要建立充满这个三维地质空间的连续场。三维地质空间场是从红透山矿收集到的地质、物化探、勘探数据所覆盖的空间范围,垂向上限为地表面,下限为-1 500 m 标高,在统一的三维可视化仿真环境中对多源地学数据进行有效的集成。综合考虑预测精度、勘探程度和矿体形态,将三维地质空间分割为连续场,体元采用 10 m×10 m×10 m 的立方体,每个体元可以用其中心点坐标 $P(x, y, z)$ 来表达。建立的三维地质空间场主要包括矿化信息场、地层形态场、断裂影响场和地球物理场,它们是开展矿化分布与地质控矿指标之间的三维定量空间分析的基础。

1) 矿化信息场

利用勘探工程的采样数据对矿体内每个体元铜

Cu、锌 Zn、硫 S、金 Au、银 Ag 5 种元素的品位进行估值，采用的估值方法为地质统计学方法和距离反比平方法，距离采样点较远而无法估值体元的品位值用负数-999 表示，图 3 所示为红透山矿铜 Cu 品位模型。

2) 地层形态场

矿化程度与红透山组的黑云片麻岩类和角闪片麻岩类的空间分布、厚度和形态呈现某种相关关系，其中黑云片麻岩类更是赋矿地层。侵入岩类为区域变质变形提供了热源，使矿质产生了局部重熔和富集，其空间分布也与矿化存在相关性。为了分析地层与矿化空间位置之间的关系，用一个三元组数值变量 $\{Length, Azimuth, Dip\}$ 来表达地层形态场模型。对于三维地质空间内任一立方体体元 $P(x, y, z)$ ，在地层界面上所有点中有一点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 距离点 P 最近。则 $Length$ 定义为点 P 到 P_0 的距离，约定当点 P 位于地层内部时取负值，点 P 位于地层外部时取正值，点 P 位于地层界面上距离为 0；方位角 $Azimuth$ 定义为向量 PP_0 在水面上的投影与正北方向的夹角， $0 \leq Azimuth < 2\pi$ ；倾角 Dip 定义为向量 PP_0 与水平面夹角，并规定向上为正，

向下为负， $-\pi/2 \leq Dip \leq \pi/2$ 。

由地层形态场后两个分量 $\{Azimuth, Dip\}$ 确定的向量 PP_0 的方位，可以按照纬向 Y 分南 S 和北 N ，经向 X 分东 E 和西 W ，垂向 Z 分上 U 和下 D ，向量为一个点时则表示为 O ，由三轴向方向组合将方位划分为 27 类，如：DES 表示向量指向南东、向下倾，ES 表示向量近水平指向南东。图 4 所示为黑云片麻岩类地层内部形态场的方位分类结果。

3) 断裂影响场

断裂与成矿物质活化、运移、沉淀、富集过程有着密切的关系，断裂所导致的成矿构造有利部位更是决定了矿化空间定位形态特征。断裂影响场也是用一个三元组变量 $\{Length, Azimuth, Dip\}$ 来表达。对于三维地质空间内任一立方体体元 $P(x, y, z)$ ，在断层面上的所有点中有一点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 距离点 P 最近。则 $Length$ 定义为点 P 到 P_0 的距离，当点 P 位于断层面上时距离为 0；方位角 $Azimuth$ 、倾角 Dip 的定义及方位分类方法与地层形态场类似，如图 5 所示。

4) 地球物理场

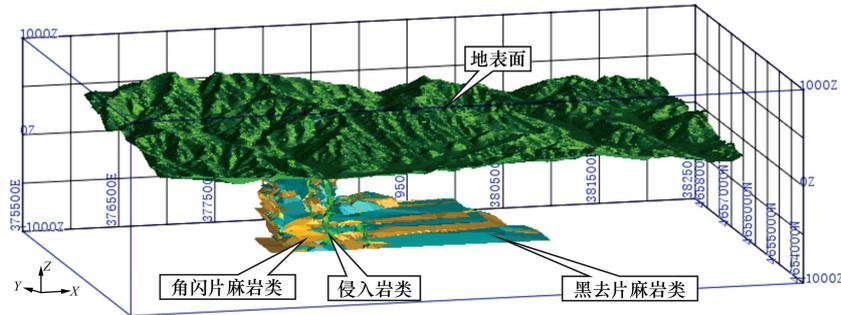
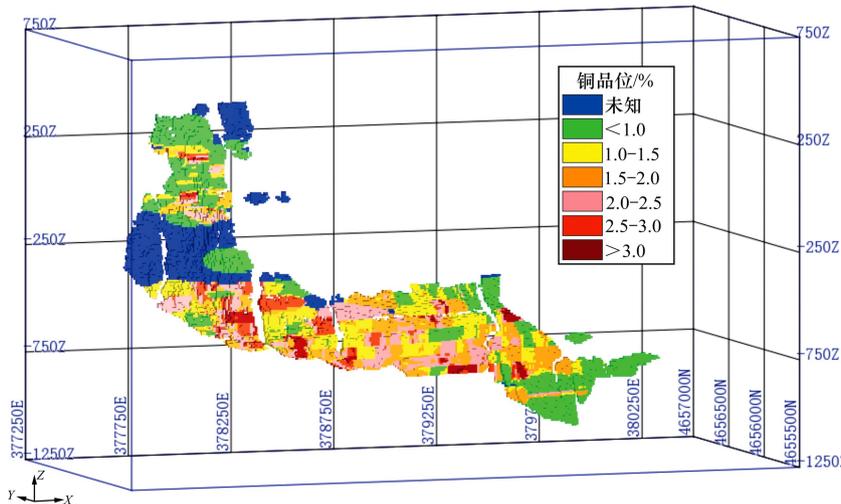


图 2 地层实体模型
Fig. 2 Strata entity model



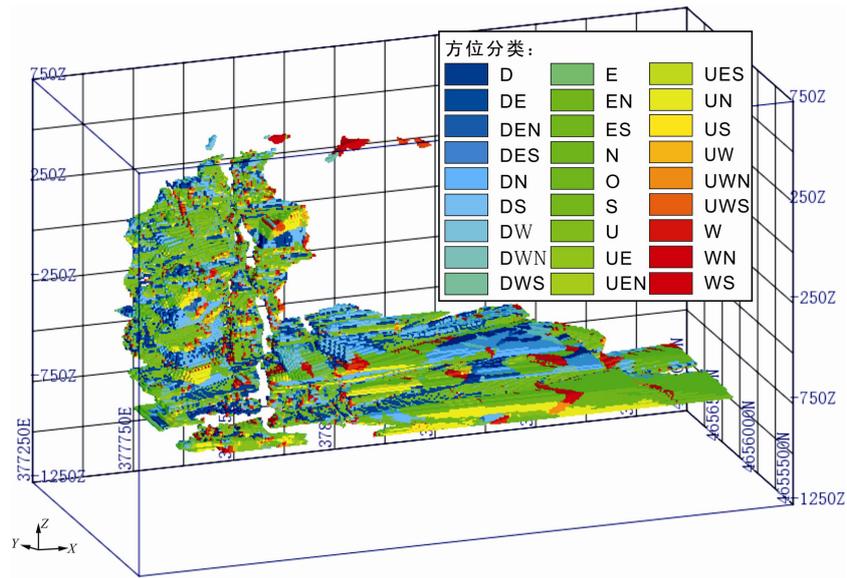


图 4 黑云片麻岩类地层内部形态场

Fig. 4 Inner shape field model of gneissic rocks involving biotite

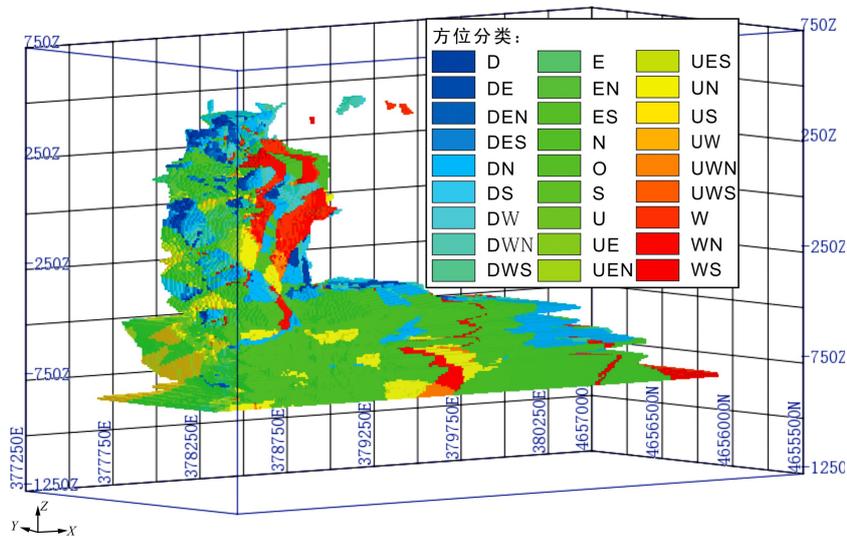


图 5 断裂影响场

Fig. 5 Faults' effecting field model

矿体与围岩存在明显的电性差异, 矿体具有明显的“低阻高极化率”特征, 围岩具有“高阻低极化率”特征。由可控源音频大地电磁法(CSAMT)剖面、瞬变电磁法(TEM)剖面, 使用地质统计学方法或距离反比加权方法插值得到视电阻率三维连续场模型, 图 6 所示为 CSAMT 视电阻率三维场模型。

3 三维定量预测

通过三维地质空间场相关分析, 提取用于矿化分布预测的定量地质控矿要素指标集, 并建立控矿要素

与矿化分布间泛函关系的三维预测模型, 开展红透山矿外围的矿化三维定量预测与评价。

3.1 地质相关场分析

矿体形成是不同地质过程相互作用和相互影响的结果, 连续场不但反映各地质变量的空间异质性, 同时也便于考虑它们在空间上与矿体形成的相互作用。判断在三维地质空间中两个或多个地质现象是否相关, 如判断矿化与地层、断层、电阻率、地磁场等控矿地质因素是否相关, 是成矿预测首要解决的问题。三维地质空间相关场就是分布在同一个三维地质空间区域内的不同地质要素之间的关联关系, 它用于分析

地质要素在区域分布上的相关程度。由于红坑口资料翔实,地层、断层、矿体空间位置等也都比较清晰,作为已知区,通过统计分析建立预测模型;而黄泥坑和小西堡等外围地区作为未知区,预测隐伏矿体、圈定靶区。

1) 地质变量筛选,通过一元线性回归分析,判断矿化与地质变量的相关关系。也可以根据经验及统计对地质变量进行必要的数值变换,再与矿化进行回归分析。只有回归分析检验通过的地质变量(或转换后的地质变量)才能作为地质控矿要素指标,做到“凡非必要,无需杂陈”。通过对 Cu、Zn、S、Au、Ag 品位与地质变量的回归分析,得到地质控矿指标包括:①黑云片麻岩类地层形态场 BN_Shape,包括距离与方位;②角闪片麻岩类地层形态场 HN_Shape;③侵入岩类地层形态场 XP_Shape;④断裂影响场 F;⑤可控源音频大地电磁法视电阻率场 CSAMT;⑥瞬变电磁法视电阻率场 TEM。

2) 预测模型建立,采用多元线性回归分析方法,确定矿化与地、物、化综合信息的相关关系,以建立隐伏矿体的三维定量预测模型,建立的模型用于预测矿山外围各体元的 Cu、Zn、S、Au、Ag 品位。这个过程是转化“数据”为“信息”和“知识”,在理论、观测、统计周期性循环上升链条中是不可或缺的。

3.2 隐伏矿体预测

三维定量预测模型,即矿化指标与控矿指标的相关关系,在数学上可以表达为控矿指标空间到矿化指

标空间的映射,而矿化变量空间中的每个矿化变量均属于某个有界的实数域,故可以将这种映射作为泛函,其函数化表达模型为

$$MV=f(GV) \quad (1)$$

式中: MV 为矿化变量空间; GV 为控矿变量空间。该泛函关系可以通过多元回归统计方法来实现函数化表达如下:

$$M(x, y, z) = M_0 + \sum_{i=1}^n W_i \cdot G_i(x, y, z) + \varepsilon \quad (2)$$

其中: $M(x, y, z)$ 为体元 $P(x, y, z)$ 的成矿元素品位; $G_i(x, y, z)$ 为第 i 个地质变量在体元 $P(x, y, z)$ 的取值, $i=1, 2, \dots, n$; W_i 为地质变量 G_i 对矿化贡献的权值, M_0 为常数项,通过多元线性回归分析来确定; ε 为误差项。

三维定量预测模型是根据已知区数据建立的,假设矿山外围的未知区与已知区的控矿地质条件和控矿规律的相似,就可由该模型对未知区的体元的成矿元素平均品位进行预测。预测得到体元平均品位 M , 由体元体积 $V(1\ 000\ \text{m}^3)$ 和矿体密度 D (约为 $3.60\ \text{t/m}^3$) 就可计算铜、锌、硫、金、银 5 种元素的矿石量和金属量。矿石量 Q 计算公式为

$$Q=VD \quad (3)$$

金属量 P 计算公式为

$$P=QM \quad (4)$$

在预测得到体元的 Cu、Zn、S、Au、Ag 平均品位及金属量的基础上,圈定了黄泥坑、小西堡找矿靶区的三维空间位置,如图 7 所示。

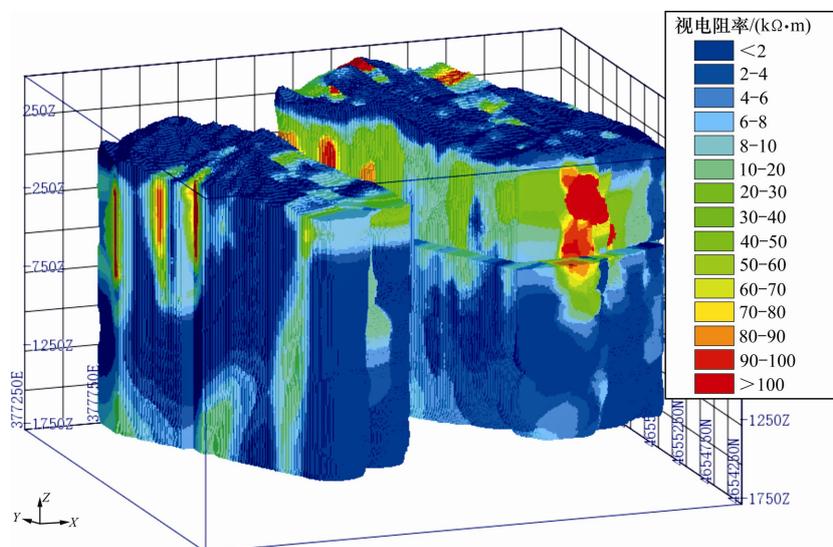


图 6 可控源音频大地电磁法 CSAMT 视电阻率场

Fig. 6 CSAMT field model of apparent resistivity

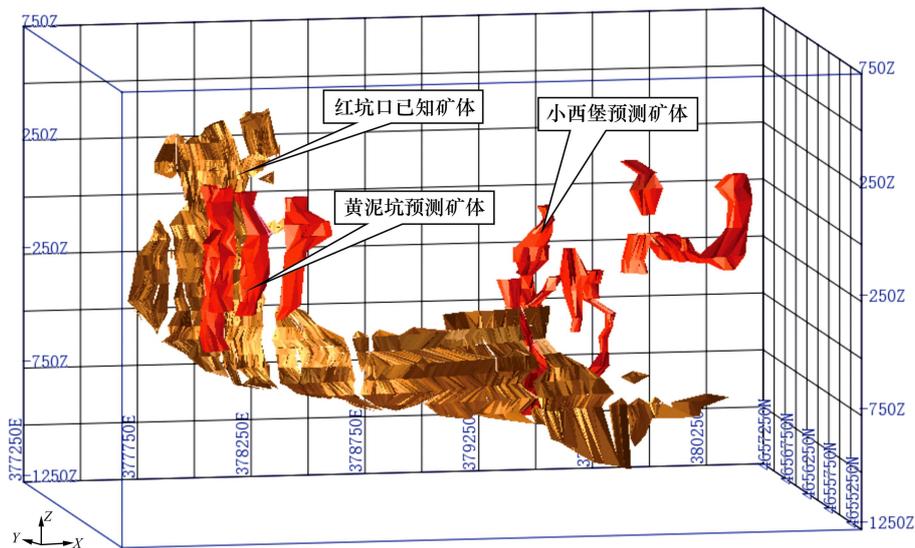


图 7 三维找矿靶区

Fig. 7 Entity model of 3D mining target regions

主要分为:

1) 黄泥坑找矿靶区, 位于黄泥坑北部、红坑口以南区域, 垂向标高范围为 $-467\sim 253$ m。区内有地表竣工见矿钻孔 1 个, 矿体伴有物探的 CASMT、激电异常以及化探的 Cu、Zn、Ag、Hg 异常。预测 Cu 平均品位约 0.9%、Zn 平均品位约为 0.1%、伴生 Au 平均品位 0.1×10^{-6} 、伴生 Ag 平均品位 9.0×10^{-6} ; 预测 Cu 的金属量 25 万 t。

2) 小西堡找矿靶区, 位于小西堡西北, 垂向标高范围为 $-947\sim -47$ m。矿体伴有物探的 CSAMT、高极化率异常, 以及化探的 Ag、Hg 异常。预测 Cu 平均品位约 0.9%、Zn 平均品位约为 0.7%、伴生 Au 平均品位为 0.2×10^{-6} 、伴生 Ag 平均品位为 23.8×10^{-6} ; 预测 Cu 金属量 32 万 t, 预测 Zn 金属量 24 万 t。

4 结论

1) 构建了包含地表面、勘探工程、矿体、断层和地层的红透山铜矿三维地质实体模型。

2) 建立了矿化信息场、地层形态场、断裂影响场和地球物理场等三维地质空间场模型。

3) 通过地质相关场分析, 获得了用于三维定量预测的地质控矿指标集和预测模型。

4) 应用三维定量预测模型对红透山矿外围隐伏矿体进行预测, 圈定了找矿靶区。

致谢:

红透山矿业有限公司石长岩副总经理、辽宁有色地质局 101 队地勘院杨铁军副院长在资料收集、坑道调查工作中给予了细致周密的安排和热情协助, 在此一并致谢!

REFERENCES

- [1] 毛先成, 戴塔根, 吴湘滨, 邹艳红. 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.
MAO Xian-cheng, DAI Ta-gen, WU Xiang-bin, ZOU Yan-hong. The stereoscopic quantitative prediction of concealed ore bodies in the deep and marginal parts of crisis mines: A case study of the Dachang tin polymetallic ore deposit in Guangxi [J]. Geology in China, 2009, 36(2): 424-435.
- [2] 陈国达. 关于多因复成矿床的一些问题[J]. 大地构造与成矿学, 2000, 24(3): 199-201.
CHEN Guo-da. Problems on polygenetic compound deposit [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2000, 24(3): 199-201.
- [3] 赵鹏大, 王京贵, 饶明辉, 李浩昌. 中国地质异常[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1995, 20(2): 117-127.
ZHAO Peng-da, WANG Jing-gui, RAO Ming-hui, LI Hao-chang. Geologic anomaly of China [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 1995, 20(2): 117-127.
- [4] 程裕淇. 程裕淇文选[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 1278-1304.
CHENG Yu-qi. Selected works of Cheng Yuqi [M]. Beijing:

- Geological Publishing House, 2005: 1278–1304.
- [5] 陈毓川, 裴荣富, 宋天锐. 中国矿床成矿系列初论[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 1–3.
CHEN Yu-chuan, PEI Rong-fu, SONG Tian-rui. A preliminary view on minerogenetic series of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 1–3.
- [6] 翟裕生, 姚书振, 崔彬. 成矿系列研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996: 1–9.
ZHAI Yu-sheng, YAO Shu-zhen, CUI Bin. Research on metallogenic series [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996: 1–9.
- [7] 翟裕生. 成矿系统及其演化——初步实践到理论思考[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2000, 25(4): 333–339.
ZHAI Yu-sheng. Metallogenic system and its evolution: From preliminary practice to theoretical consideration [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2000, 25(4): 333–339.
- [8] 肖克炎, 程松林, 娄德波, 孙莉. 区域矿产定量评价的矿床综合信息评价模型[J]. 地质通报, 2010, 29(10): 1430–1444.
XIAO Ke-yan, CHENG Song-lin, LOU De-bo, SUN Li. Integrated information evaluation model for regional mineral resources quantitative assessment [J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(10): 1430–1444.
- [9] 彭省临, 邵拥军. 隐伏矿体定位预测研究现状及发展趋势[J]. 大地构造与成矿学, 2001, 25(3): 329–334.
PENG Sheng-lin, SHAO Yong-jun. Present research situation and trends of prognosis for concealed orebody [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2001, 25(3): 329–334.
- [10] 王守伦, 高元龙, 孙福来, 张殿学. 抚顺—清原地区鞍山群块状硫化物矿床的区域地质特征[J]. 地质找矿论丛, 1986, 1(1): 1–19.
WANG Shou-lun, GAO Yuan-long, SUN Fu-lai, ZHANG Dian-xue. Regional geological characteristics of massive sulphide deposits of Anshan group in Fushun—Qingyuan area, Liaoning province [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 1986, 1(1): 1–19.
- [11] 王松山, 胡世玲, 翟明国, 桑海清, 裘冀. 应用 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年技术研究清原花岗岩—绿岩地体的形成时代[J]. 岩石学报, 1987, 4(4): 55–62.
WANG Song-shan, HU Shi-ling, ZHAI Ming-guo, SANG Hai-qing, QIU Ji. An application of the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating technique to the formation time of Qingyuan granite-greenstone terrain in NE China [J]. Acta Petrological Sinica, 1987, 4(4): 55–62.
- [12] 万渝生, 宋彪, 杨淳, 刘敦一. 辽宁抚顺—清原地区太古宙岩石 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 地质学报, 2005, 79(1): 78–87.
WAN Yu-sheng, SONG Biao, YANG Chun, LIU Dun-yi. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of Archaean rocks from the Fushun—Qingyuan area, Liaoning province and its geological significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(1): 78–87.
- [13] 万渝生, 宋彪, 耿元生, 刘敦一. 辽北抚顺—清原地区太古宙基底地球化学组成特征及其地质意义[J]. 地质论评, 2005, 51(2): 128–137.
WAN Yu-sheng, SONG Biao, GENG Yuan-sheng, LIU Dun-yi. Geochemical characteristics of Archaean basement in the Fushun—Qingyuan Area, northern Liaoning province and its geological significance [J]. Geological Review, 2005, 51(2): 128–137.
- [14] 翟明国, 杨瑞英, 卢文江, 邵静波. 清原太古代花岗岩—绿岩地体的常量和微量元素地球化学证据[J]. 地质论评, 1984, 30(6): 523–535.
ZHAI Ming-guo, YANG Rui-ying, LU Wen-jiang, SHAO Jing-bo. Major and trace element geochemistry of the Archaean Qingyuan granite-greenstone terrane [J]. Geological Review, 1984, 30(6): 523–535.
- [15] 杨振升, 俞保祥. 辽宁北部红透山地区太古宙绿岩带的多期变形[J]. 长春地质学院学报, 1984, 14(1): 20–35.
YANG Zhen-sheng, YU Bao-xiang. Poy-deformation of the Archaean greenstone belt in the Hongtoushan area, northern Liaoning province [J]. Journal of Changchun Geology Institute, 1984, 14(1): 20–35.
- [16] 于凤金. 红透山式矿床成矿模式与找矿模型研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2006: 10–17.
YU Feng-jin. The study of metallogenic model and prospecting pattern of Hongtoushan-type deposit [D]. Shenyang: Northeastern University, 2006: 10–17.
- [17] 顾连兴, 肖新建, 倪培, 吴昌志. 辽宁红透山块状硫化物矿床中沉积磁黄铁矿的变质和流体作用[J]. 地质论评, 2001, 47(2): 188–192.
GU Lian-xing, XIAO Jian-xin, NI Pei, WU Chang-zhi. Metamorphism of sedimentary pyrrhotite and fluid effect in the Hongtoushan massive sulphide deposit, Liaoning province [J]. Geological Review, 2001, 47(2): 188–192.
- [18] 顾连兴, 汤晓茜, 郑远川, 吴昌志, 田泽满, 陆建军, 肖新建, 倪培. 辽宁红透山铜锌块状硫化物矿床的变质变形和成矿组分再活化[J]. 岩石学报, 2004, 20(4): 923–934.
GU Lian-xing, TANG Xiao-qian, ZHENG Yuan-chuan, WU Chang-zhi, TIAN Ze-man, LU Jian-jun, XIAO Xin-jian, NI Pei. Deformation, metamorphism and ore-component remobilization of the Archaean massive sulphide deposit at Hongtoushan, Liaoning province [J]. Acta Petrological Sinica, 2004, 20(4): 923–934.
- [19] GU L, ZHENG Y, TANG X, ZAW K, DELLA-PASQUE F, WU C, TIAN Z, LU J, NI P, LI X, YANG F, WANG X. Copper, gold and silver enrichment in ore mylonites within massive sulphide

- orebodies at Hongtoushan VHMS deposit, N.E. China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 30(1): 1-29.
- [20] MAO X, ZOU Y, LU X, WU X, DAI T. Quantitative analysis of geological ore-controlling factors and stereoscopic quantitative prediction of concealed ore bodies [J]. *J Cent South Univ Technol*, 2009, 16(6): 987-993.
- [21] 叶天竺, 薛建玲. 金属矿床深部找矿中的地质研究[J]. *中国地质*, 2007, 34(5): 855-869.
- YE Tian-zhu, XUE Jian-ling. Geological study in search of metallic ore deposits at depth [J]. *Geology in China*, 2007, 34(5): 855-869.
- [22] 张宝一, 尚建嘎, 吴鸿敏, 刘修国, 吴信才. 三维地质建模及可视化技术在固体矿产储量估算中的应用[J]. *地质与勘探*, 2007, 43(2): 76-81.
- ZHANG Bao-yi, SHANG Jian-ga, WU Hong-min, LIU Xiu-guo, WU Xin-cai. Application of 3D geological modeling and visualization in solid mineral resource estimation [J]. *Geology and Prospecting*, 2007, 43(2): 76-81.
- [23] 张宝一. 基于剖面的多约束三维地质建模技术研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2007: 8-17.
- ZHANG Bao-yi. Study on the techniques of 3D geological modeling under multiple constraints based on cross-sections [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2007: 8-17.
- [24] 潘 懋, 方 裕, 屈红刚. 三维地质建模若干基本问题探讨[J]. *地理与地理信息科学*, 2007, 23(3): 1-5.
- PAN Mao, FANG Yu, QU Hong-gang. Discussion on several foundational issues in three-dimensional geological modeling [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2007, 23(3): 1-5.

(编辑 李艳红)