技术·方法

广西大厂矿田铜坑深部隐伏矿体立体定量预测建模与可视化研究

邹艳红,戴塔根,毛先成
(中南大学地学与环境工程学院,长沙 410083)

[摘 要]广西大厂矿田长坡—铜坑矿区矿床形成与分布的主要控制因素有地层岩性、岩浆岩体和断层、褶皱构造。结合大厂矿田多年来积累的地质资料信息,提取了钻孔、坑道采样化验数据与地质体的几何取点等矿床隐伏矿体预测专题数据,建立了各种地质体几何模型;以此为基础进行控矿地质条件的定量分析,以立体单元形式对地质空间进行分割抽样,提取了立体单元控矿作用定量化指标;通过一种有效的矿床三维数学模型建立方法,对矿床地下三维空间中隐伏矿体进行了定位、定量预测和结果验证,并开发了预测结果的三维可视化动态查询系统。

[关键词]隐伏矿体 地质体几何模型 立体单元 矿床三维数学模型 三维可视化
[中图分类号]P618.41 [文献标识码]A [文章编号]0495-5331(2008)02-0062-05

广西大厂锡多金属矿田,被誉称为“中国的第二锡都”,它位于桂西北云贵高原南缘,跨越南丹、河池两县,整个矿田总面积 168km^2,是我国著名的丹池成矿带的主体矿田,包括大型、超大型矿床 7处,中型矿床 3处,小型矿床及矿点多处,其中规模最大的 3个矿体分别是铜坑 91号、92号层状矿体和龙头山(高峰)100号矿体。大厂矿田经历了四十多年的地质找矿工作,但由于开采速度快,矿产资源日渐枯竭的问题越来越突出,进行大厂矿区深部和边部隐伏矿体探测,对已有资料再次开发,运用新技术找矿是扩大找矿成果的一条重要途径。

随着信息技术的发展,数字找矿已成为成矿预测的主要趋势,数字找矿要求更广泛地应用定量方法和信息技术[1],对于区域成矿预测的分析研究,需要将传统矿床地质从定性(部分定量)研究到全面定量化分析研究,建立定量化的预测分析模型。目前,传统的中小比例尺二维空间预测正在向大比例尺三维空间预测转变,危机矿山深边部和外围隐伏矿床的三维立体预测评价越来越受到重视,三维空间中的定位定量预测研究也已经和正在展开[2-8]。为解决大厂矿田资源日渐枯竭的问题,必须充分利用多年来地质矿产工作积累起来的大量地质资料,在资料的数字化基础上,开展隐伏矿体预测的尝试性研究,力争实现隐伏矿体的定质、定位和定量预测,提出一些预测靶区和靶位,为矿山生产找矿提供科学依据,以提高找矿勘探精度,降低找矿勘探风险和成本。

1 矿床隐伏矿体预测专题数据

矿床的形成与各种地质作用有关,这些作用控制着矿床的形成与分布规律。隐伏矿体立体定量预测首先须按照成矿规律和成矿模式,进行矿体地质特征分析,包括它的地层、构造、岩体和已知矿体的组成、分布、空间位置等,真正提取控制和反映矿化空间分布的地质体、控矿因素和找矿标志的量化指标。

大厂矿带中最有代表性的矿床是长坡—铜坑矿区,位于南丹县城 166°,地理经度为 107°34′00″~107°34′30″,地理纬度为 24°50′00″~24°50′30″。通过对该矿区地质条件和矿化特征进行分析,控制矿床形成与分布的主要因素有地层岩性、岩浆岩体和断层、褶皱构造。根据大厂矿田多年来的图件、文字资料中的信息,矿床隐伏矿体预测专题数据按照数据来源的不同可以分为:钻孔编录数据、坑道编录数

[收稿日期]2007-01-30;[修订日期]2007-03-26。
[基金项目]国家自然科学基金项目(编号:40571122)和国家“十一五”支撑计划项目(编号:2006BAB01B07)及湖南省自然科学基金(编号:07JJ6071)资助。
[第一作者简介]邹艳红(1971年—),女,2005年毕业于中南大学,获博士学位,副教授,现主要从事地学数据建模与应用开发及 GIS等方面的研究工作。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

据、坑道试料总帐、钻孔试料总帐、勘探线剖面图、花岗岩顶板等值线图。预测专题数据是以这些原始图形和样品化验数据为源数据,通过空间变换计算和数据集成与融合技术而产生的。事实上,样品化验数据主要来自钻孔和坑道的采样数据,要实现三维预测空间的定位与定量预测,首先必须通过坑道编录数据、钻孔测斜数据、钻孔与坑道试料总账数据的各种计算和转换,实现钻孔和坑道采样化验数据的空间化。

结合矿床已有资料和预测的需求,建立的隐伏矿体预测专题数据库由以下几个部分组成:钻孔编录数据点位表、坑道试料总帐点位表、地层分界数据表、断层点位数据表、岩体点位数据表、矿体采样数据表,以关系表的形式保存在 Access数据库中。

1) 钻孔编录数据点位表

用于存储带岩层分层点坐标的钻孔编录数据,关系模式为:钻孔编录数据点位表 [孔号,勘探线号,分层点 X,分层点 Y,分层点 Z,岩 (矿)石分层孔深,岩石地层单位名称,矿体厚度,岩浆岩期次,岩(矿)石名称,蚀变,岩石结构构造,矿体类型,矿物共生组合,矿体厚度 (最大),构造类型及性质,备注]。

2) 坑道试料总帐点位表

用于存储带采样点坐标的长坡区中段单工程试料总帐数据,关系模式为:坑道试料总帐点位表 [中段号,工程名称,采样编号,采样点 X,采样点 Y,采样点 Z,原始样重 (KG),化验编号,地质摘要, Sn(%), Zn(%), Pb(%), Sb(%), Cu(%), S(%), As(%),备注]。

3) 岩体点位数据表

用于存储各岩体取点的坐标,关系模式为:岩体点位数据表 (顺序号,勘探线号,线号,岩性编号, X坐标, Y坐标, Z坐标)。

4) 地层分界数据表

用于存储各地层分界点的坐标,关系模式为:地层分界数据表 (顺序号,地层分界单位, X坐标, Y坐标, Z坐标)。

5) 断层点位数据表

用于存储各断层取点的坐标,关系模式为:断层点位数据表 (顺序号,断层名称, X坐标, Y坐标, Z坐标)。

6) 矿体采样数据表

用于存储各矿体采样点的坐标和矿体的化验品位,关系模式为:矿体采样数据表 (顺序号,样品编号, X坐标, Y坐标, Z坐标, Sn品位, Zn品位, Pb品位)。

2　矿床深部隐伏矿体立体定量预测建模

隐伏矿体立体定量预测是以控矿地质条件定性分析和矿体预测专题数据库为基础,建立地质体几何模型,进行控矿地质条件的定量分析,提取研究区立体单元控矿作用定量化指标;采用一定的三维空间外推方法,或称三维定量预测建模方法,建立矿床数学模型,从而对研究范围内地质空间中的任意立体单元的矿化值 (品位)进行预测。

2.1　立体单元的划分与定位

为建立预测模型,需按一定精度对研究区进行抽样。一般采用三维栅格的方法对地质空间进行分割抽样,分割后得到的各个栅格称为立体单元。研究区域立体单元的划分与定位是地质体和控矿作用数字化的前提,是利用统计分析等手段进行控矿地质作用定量分析、建立矿床数学模型的基础。

考虑到地质空间 G是地质体产出和地质作用发生的三维空间,矿化空间 M 是成矿作用发生的空间,为地质空间的子集。而立体单元控矿作用指标的外推估值必须符合已知区的控矿地质条件和控矿规律,将研究区域矿化空间定义为地质空间内以岩浆岩顶面为底、第四系 (Q)底界面为顶面的区域范围。考虑到 Q底界面控制点的缺乏,以地形面作为矿化空间的替代顶面。地质空间 G定义为:

$$G=\{(x,y,z)\mid X_{\min}\leq x\leq X_{\max},\ Y_{\min}\leq y\leq Y_{\max},\ Z_{\min}\leq z\leq Z_{\max}\}$$

其中 $X_{\min}=4500.0-50.0/2$,

$X_{\max}=8500.0+50.0/2$;

$Y_{\min}=44000.0-50.0/2$,

$Y_{\max}=51000.0+50.0/2$;

$Z_{\min}=-800.0-50.0/2$,

$Z_{\max}=900.0+50.0/2$。

矿化空间 M 定义为:

$$M=\{(x,y,z)\mid z_s(x,y)\leq z\leq z_g(x,y),\ (x,y,z)\in G\}$$

其中 $z=z_s(x,y)$为地形面的曲面方程, $z=z_g(x,y)$为岩浆岩顶面的曲面方程。

综合考虑预测比例尺、矿床勘探程度等因素,将研究区域立体单元的尺寸选择为 $50\times50\times50m^3$。立体单元中心点坐标计算 (单元定位)公式为:

$$x_v=x_0+ix\cdot dx$$

$$y_v=y_0+jy\cdot dy$$

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$z_v = z_0 + kz \cdot dz$$

式中 $x_0 = X_{min} + dx/2$, $y_0 = Y_{min} + dy/2$, $z_0 = Z_{min} + dz/2$; $0 \leq ix \leq 80$, $0 \leq jy \leq 140$, $0 \leq kz \leq 34$。

2.2 地质体的几何模型与控矿作用数字化

地质体几何模型是定量描述地质体几何形态和空间分布的数学模型,它是控矿地质条件定量分析和地质控矿作用定量化的基础。根据矿床控矿地质条件定性分析,文章选用趋势-剩余分析等系列方法来建立地质体几何模型,包括断层几何模型、地层岩性几何模型、褶皱几何模型、岩浆岩体几何模型,以立体单元的中心点作为抽样点,设其中心点坐标为 (x_v, y_v, z_v),对地质体与空间作用分布按立体单元进行量化取值与编码。利用统计分析、空间解析几何、最优化等方法,定量地分析矿化分布与地质体及地质体控矿作用之间的关联关系,建立地质体控矿作用的定量化指标。

1) 断层几何模型与控矿作用定量分析

断层几何模型实际上是基于断层面数据表的断层面几何模型,在数学上表现为空间曲面方程。

$F_n: z = f_n(x, y)$ $I = 0, 1, 2, 3, \cdots, n$ n代表断层条数,采用 F检验表明方程回归的显著程度。

断层控矿作用主要表现为对周围地质空间的场作用,本研究近似地用地质空间中某点到断层面的最近距离代替断层的空间作用场。则断层空间作用在立体单元的量化取值为:

$$dF = \min \sqrt{(x - x_v)^2 + (y - y_v)^2 + (z - z_v)^2}$$

根据断层空间作用量化指标 dF与矿化空间分布量化指标 Sn、Zn、Pb、Sb、Cu之间的关系,经数学建模检验,构造断层 F_1 的控矿作用指标 $dF_1 = \sqrt{|d_1 F_1 - 307.1|}$。

2) 地层岩性几何模型与控矿作用定量分析

地层岩性在三维地质空间中的分布可由编码为 $c01R$、$c02R$、$c03R$、$c04R$、…、cnR 的 n个岩性段的空间分布域来表达。首先对地层的岩性段进行数字化编码,然后通过地层的岩性分段界面多项式方程定量地描述地层岩性段的空间分布,两个空间位置上相邻的岩性段之间的分界面称为岩性界面。地层岩性段的空间分布可表示为:

$$D_{Li}: l_{i-1}(x, y) < z < l_i(x, y)$$
$$I = 0, 1, 2, 3, \cdots, n$$

n代表岩性界面个数, li代表岩性界面方程。同样采用 F检验表明方程回归的显著程度。

编码为 ciR的空间分布域定义为:

$$D_{ciR} = \{ (x, y, z) \mid z_b(x, y) \leq z \leq z_t(x, y) \}$$
$$(i = 01, 02, \cdots, n)$$

其中, $z_b(x, y)$为 ciR的下界面方程, $z_t(x, y)$ 为 ciR的上界面方程, G为地质空间。

地层岩性分布在立体单元的控矿作用量化取值为:

$ciR = 1$ 若 $(x_v, y_v, z_v) \in D ciR$

$ciR = 0$ 若 $(x_v, y_v, z_v) \notin D ciR$

经数学建模检验,地层岩性空间分布指标 $c01R$、$c02R$、$c03R$、$c05R$、$c06R$、$c07R$、$c08R$、$c09R$ 与矿化指具有显著的线性相关性,即地层岩性空间分布对矿化空间分布具有显著的贡献或显著的控制作用,故将这些指标作为地层岩性控矿作用的量化指标。

3) 褶皱几何模型与控矿作用定量分析

褶皱的几何形态可以通过岩性界面的波状起伏来描述,以岩层界面数据表为直接原始数据。褶曲面的趋势平面方程由褶曲面的一次多项式趋势方程表达,记为:

$$Z = Z_1(X, Y)$$

一级波幅方程用褶曲面的剔除一次趋势 $Z_1(X, Y)$后的低次多项式趋势方程(一般为三次)来表达,记为: $R = R_1(X, Y)$,其空间作用的数字化表示为:

$rt_1 R = R_1(x_v, y_v)$ 若 $ciR = 1$, $i = 01, 02, \cdots, n$

否则 $rt_1 R = 0$

式中 R_1 为 ciR上界面的一级波幅方程。

二级波幅方程用褶曲面的剔除一次趋势 $Z_1(X, Y)$和一级波幅 $R_1(X, Y)$后的高次多项式方程来表达(一般为五次): $R = R_2(X, Y)$ 一级波幅方程用褶曲面的剔除一次趋势 $Z_1(X, Y)$后的低次多项式趋势方程(一般为三次)来表达,记为: $R = R_1(X, Y)$,其空间作用的数字化表示为:

$rt_2 R = R_2(x_v, y_v)$ $ciR = 1$, $i = 01, 02, \cdots, n$

否则 $rt_2 R = 0$

褶曲面的梯度方程为: $G = grad(Z_1(X, Y) + R_1(X, Y))$,其空间作用的数字化表示为:

$$gtR = grad(Z_1(x_v, y_v) + R_1(x_v, y_v))$$
$$ciR = 1, \quad i = 01, 02, \cdots, n$$

否则 $gtR = 0$

在实际计算褶曲中某点的波幅 R和梯度 G时,应取该点所在褶曲的上下曲面对应点的波幅和梯度的平均值,即:

$$R = (R_t + R_b)/2$$
$$G = (G_t + G_b)/2$$

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中 R_t, R_b 分别代表褶曲的上曲面的波幅和下曲面的波幅, G_t, G_b 分别代表褶曲的上曲面的梯度和下曲面的梯度。

经数学建模检验,构造褶曲一级波幅的控矿作用指标 $swr_1R = (\sqrt{|rt_1R|} + \sqrt{|rt_1R|})/2$,二级波幅的控矿作用指标 $swr_2R = (\sqrt{|rt_2R|} + \sqrt{|rt_2R|})/2$,褶曲梯度的控矿作用指标 $wgR = (|gtR - 0.2| + |gbR - 0.2|)/2$。

4)岩浆岩体几何模型与控矿作用定量分析

岩浆岩体在其活动时期,对周围地质空间的作用取决于其顶面边界。所以,岩浆岩体几何模型实际上是岩体顶面的几何模型,以研究预测空间中岩体顶面专题数据表为直接原始数据。岩浆岩体几何模型描述为:

$G: z = f(x, y)$为岩体顶面的曲面方程。

$r_1G = R_1(x, y)$ 为岩体顶面的一级波幅方程。

$r_2G = R_2(x, y)$ 为岩体顶面的二级波幅方程。

直接用地质空间中某点至岩体顶面的最近距离、最近点岩体顶面起伏作为岩浆岩空间作用综合场的近似描述。岩体外部至岩体顶面的距离为正距离,岩体内部至岩体顶面的距离为负距离。岩浆岩空间作用在立体单元的量化取值为:

$$dG = \min \sqrt{(x - x_v)^2 + (y - y_v)^2 + (z - z_v)^2}$$
$$(x, y, z) \in G: z = f(x, y)$$

根据上述距离控矿作用及与矿化指标的相关关系,经数学建模检验,构造岩浆岩的对内、外矿化带的控矿作用指标 $idG = |dG - 650.0|$和 $odG = |dG - 900.0|$及 $wr_1G = |r_1G - (-482.0)|$和 r_2G。

2.3　立体定量预测模型

经前述控矿因素的定量化和量化指标的筛选,共选择了立体单元的 16个控矿指标变量,以矿化空间分布数字化后得到的 SN(单元锡含量)、ZN(单元锌含量)、PB(单元铅含量)、SB(单元锑含量)、CU(单元铜含量)作为矿化分布指标变量,通过空间解析几何、统计分析等方法建立了矿化变量空间到控矿变量空间的矿化泛函模型作为矿化指标的预测模型:

$$\widehat{MV_i} = B_{0MV} + \sum_{j=1}^{15} B_{MV}\, GV_{ij}$$

式中 i为立体单元编号, $\widehat{MV_i}$为立体单元 i的有用组分 Sn、Zn、Pb、Sb、Cu含量的估计值(预测值), GV_{ij}为立体单元 i的第 j个控矿作用指标的值。参数 B_{0MV}, B_{MV},可通过对 GV_{ij}和 MV_i在地质空间控制区域中立体单元的量化数据进行多元线性回归分析获得。

2.4　预测结果验证

根据上述预测模型与预测结果,广西壮族自治区二一五地质队在铜坑 22线至 34线地段范围的 305米中段巷道内和 355米中段巷道内共设计布置并施工了 4个深部找矿坑内钻,其中 3个钻孔在铜坑深部的 170米标高至 280米标高之间发现了厚度较大、平均品位达到工业指标要求的矿体。

按预测结果布置深部找矿工程在铜坑深部发现隐伏矿体,以及将预测结果与新发现的隐伏矿体的实际形态、产状、品位进行对比,均表明了预测模型与上述预测结果的正确性和可靠性。

3　预测成果的可视化显示与查询

3.1　预测结果的二维可视化

为了将存放在隐伏矿体立体定量预测专题数据库中的真三维预测结果表示在可供地质人员阅读的平面图中,须将真三维预测结果绘制成二维平面图。二维平面化的方法是:将立体单元按照其尺寸大小(50米)沿垂直方向进行分层划分,形成一系列的每 50米标高水平的单元层,这样就实现了真三维预测结果的二维化。二维化的成果包括利用 AutoCAD软件的 VBA二次开发功能绘制的每 50米标高隐伏矿体立体定量预测单元矿化指标预测图以及用 Surfer软件绘制的单元矿化指标预测等值线图和单元矿化指标预测值立体图。图 1所示为研究区域 500米标高单元矿化指标(Sn)预测等值线图。

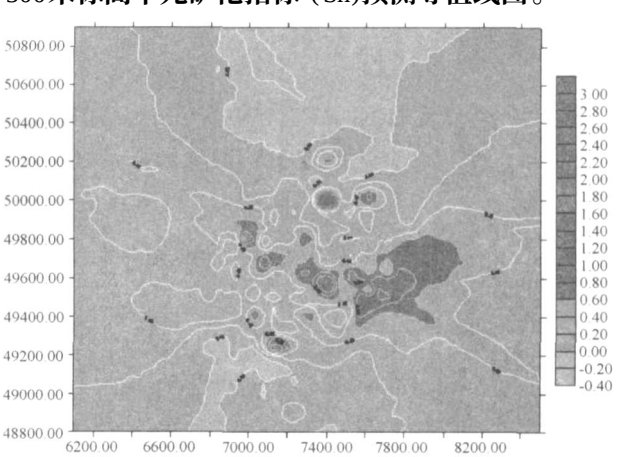


图 1　500米标高单元矿化指标(Sn)预测等值线图

3.2　预测结果的三维可视化查询

为便于地质人员对上述预测结果进行三维可视化显示和查询,用 VC++结合 OpenGL编程和预测

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

结果数据库开发了三维可视化预测查询系统 (图 2),实现了钻孔绘制显示、预测结果动态查询等功能。通过鼠标或键盘可选择不同标高立体单元层进行显示,用鼠标点击任一立体单元查看信息,屏幕上将高亮度显示该立方块,状态栏中将显示该立体单元中心坐标,左边信息栏中将显示其所在的地层信息与单元矿化指标信息。如果是已知区域,已知信息与预测信息将进行对比显示。

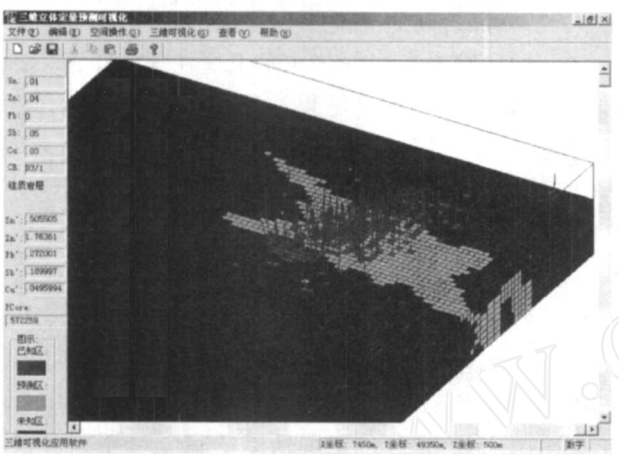


图 2 三维立体定量可视化预测查询

4 结论

1) 基于矿床成矿规律和地质特征分析,以原始资料数据为基础,通过数据分类、变换和计算,建立矿床预测专题数据库是开展隐伏矿体立体定量预测的前提;

2) 在地质体几何建模基础上,提取研究区域断层、地层岩性、褶皱、岩浆岩体的立体单元控矿作用量化指标,是隐伏矿体立体定量预测建模的基础;

3) 预测结果的三维可视化可以在真三维环境下实现不同水平标高矿化信息的定位、定量查询与显示。

致谢:感谢广西壮族自治区 215地质队在课题完成中的协作以及课题组全体同志。

[参考文献]

[1] 赵鹏大. 三联式资源定量预测与评价 —数字找矿理论与实践探讨 [J]. 地球科学 ——中国地质大学学报, 2002, 27(5): 482 - 489.

[2] 毛先成,陈国珑. 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): 15 - 22.

[3] 宋宏邦,毛先成. 清水塘多因复成铅锌矿床地质特征及深边部盲矿体立体定量预测 [J]. 矿产与地质, 1993, 7(3): 190 - 193.

[4] 胡惠民. 大比例尺成矿预测方法 [M]. 北京:地质出版社, 1995, 1 - 175.

[5] 周宏坤,丁宗强,雷祖志,等. 金属矿床大比例尺定量预测 [M]. 北京:地质出版社, 1993, 1 - 226.

[6] 杨学善. 老矿区深部立体定量预测方法研究 —以东川矿区为例 [J]. 昆明理工大学学报. 1999, 24(1): 129 - 136.

[7] 杨言辰,李绪俊,马志红. 生产矿山隐伏矿体定位预测 [J]. 大地构造与成矿学. 2003, 27(1): 83 - 90.

[8] 申 维,骆社周. 新疆阿尔泰地区大型、超大型金矿床的定量预测研究 [J]. 科技导报, 2006, 24(212): 53 - 55.

[9] 毛先成,戴塔根,邹艳红,等. 广西大厂矿田地质矿产数据库的研究与系统开发 [J]. 地质与勘探, 2003, 39(5): 72 - 76.

[10] 邹艳红,毛先成. 地测数据库的建立与应用. 中南大学学报(自然科学版) [J], 2004, 35(3): 463 - 467.

[11] 许跃初,刘 雨,孔树林. 广西大厂矿田矿床地质条件与成矿模式研究 [J]. 矿业快报, 2007, (453): 74 - 83.

THREE - DIMENSIONAL GRID QUATTITATIVE PROGNOSIS MODELING AND VISUALIZATION FOR CONCEALED ORE BODIES IN DEPTHS OF TONGKENG, DACHANG MINING AREA

ZOU Yan - hong, Dai Ta - gen, MAO Xian - cheng

(School of Geosciences and Environment Engineering, Central South University, Changsha 410083*)*

Abstract: Main ore - controlling factors in the Tongkeng deposit of Dachang mine include rock formations of strata, magmatic rocks, faults and folds. Based on geological data accumulated since the deposit was discovered, special data for concealed ore prognosis, such as drills, sap and point sampling of geological bodies, is abstracted. Thus, geometrical models of geological bodies are established and ore - controlling factors are modeled quantitatively by three - dimensional grid. Three - dimensional model of the deposit is established and tested. The prognosis results for three - dimensional localization and quantity are checked. Furthermore, a three - dimensional visualization dynamic - query system for the prognosis results is developed.

Key words: concealed ore, geometrical model, three - dimensional grid, three - dimensional model, three - dimensional visualization

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net