

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

毛先成 戴塔根 吴湘滨 邹艳红

(中南大学地质与环境工程学院, 湖南 长沙 410083)

提要:危机矿山及老矿山深边部具有巨大的资源潜力,但深部潜在资源的寻找面临着巨大的困难和风险,这是由老矿山具有勘探开发程度高、预测评价及找矿向深部三维空间发展、矿山生产对物化探异常信息产生干扰等固有特点所决定的,因此,采用适合危机矿山找矿特点的预测评价新方法,是老矿山深边部资源评价找矿取得突破的重要因素之一。本文针对危机矿山可接替资源的评价和找矿问题,采用数据驱动和知识驱动相结合的方法,确立了隐伏矿体立体定量预测工作的核心流程即“地质数据集成—成矿信息定量提取—立体定量预测”。论文从场分析的观点出发,提出和建立了岩浆岩、地层岩性、断层和褶皱控矿作用的场模型以及矿化分布场模型,并通过连续模型的离散化实现了对地质控矿作用场模型的求解。采用统计分析和非线性规划方法,分析了地质控矿作用场与矿化指标之间的关联关系,提取出了地质因素控制矿化富集的定位定量参数,并根据这些参数得到了控矿地质因素定量指标集。基于矿化指标与控矿地质因素指标之间的关系,建立了立体定量预测模型,包括矿化数学模型和含矿性估计模型,对大厂矿区深边部区域进行了隐伏矿体的三维定位定量预测,建立了预测结果数据库,绘制了按标高水平的单元预测图,开发了预测结果可视化查询系统。按照预测结果设计施工的深部找矿钻孔在大厂长坡区深部和铜坑深部区发现了新的隐伏矿体,验证了预测模型及预测结果的有效性。

关键词:危机矿山;隐伏矿体;三维地质模型;定位定量预测;矿产资源定量评价

中图分类号:P612 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2009)02-0424-12

1 引言

随着中国经济的高速持续发展,矿产开发的接替资源面临严峻的形势,许多主力矿山资源迅速减少或资源枯竭,新增储量青黄不接,面临关闭,对经济发展和社会稳定造成很大的压力。危机矿山问题已成为矿产资源可持续发展的最突出问题^[1]。

针对危机矿山的可接替资源问题,国家推行了《全国危机矿山可接替资源找矿计划纲要(2004—2010年)》^[2],主要目标是在有资源潜力和市场需求的矿山周边或深部新发现并查明一批储量,延长矿山服务年限,其强调新理论、新技术、新方法找矿的创新体系和坚持深边部及外围找矿的战略方向。

自 20 世纪 70 年代以来, Harris^[3]、Agterberg^[4]、Griffiths^[5]、Singer^[6]、McCammon^[7]、Barry^[8]、Sinclair^[9]等从资源总量评价、远景区评价、评价方法、计算机程序等方面进行了大量的研究和应用工作,矿产资源定量评价的系列理论和方法逐渐形成。其突出成果表现为:20 世纪 70 年代国际地科联 IGCP 98 专题提出的 6 种矿产资源定量预测评价方法^[10],80 年代国际国内广泛进行的统计预测^[10-14]和综合信息预测^[15,16]、美国地质调查局倡导的“三部曲”资源评价法^[17]、中国学者提出的致矿地质异常预测方法^[18-20],以及 90 年代以来的基于 GIS 技术的矿产预测评价方法^[21-27]等。

这些理论和方法主要是针对区域矿产资源远景

预测评价工作发展起来的,尚不能完全适应危机矿山和老矿山可接替资源找矿向深边部三度空间发展的要求,迫切需要建立适应于危机矿山深边部及外围找矿的找矿创新体系与评价新理论、新技术和新方法。

笔者针对危机矿山可接替资源找矿问题,以广西大厂锡多金属矿床为例,多年来积累的地物化基础资料、地质研究成果和找矿工作经验为基础,开展地质矿产数据库、三维成矿信息定量提取和隐伏矿体三维定位定量预测研究,试图研究建立一种适应于危机矿山深边部外围找矿特点的找矿评价新方法,力图初步实现隐伏矿体预测的立体化、定位化、定量化和精细化,为矿区深边部找矿提供精细的定量预测结果和准确的三维靶区定位,降低找矿勘探风险。

广西大厂是全国重要的锡多金属矿产地,但由于多年连续的快速开采,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,运用新技术找矿是扩大找矿成果的一条重要途径。同时,大厂矿田40多年的地质找矿工作,积累了丰富的地质、物化探等基础资料,不仅为大厂矿田矿区深边部的预测评价与找矿工作奠定了良好的基础,也为危机矿山可接替资源找矿评价新方法的研究提供试验研究平台。

2 工作方法

尽管危机矿山及老矿山深边部具有巨大的资源潜力,但必须看到,深部潜在资源的寻找面临着巨大的困难和风险,这是由老矿山具有勘探开发程度高、预测评价及找矿向深部三维空间发展、矿山生产对物化探异常信息产生干扰等固有特点所决定的,因此,采用适合危机矿山找矿特点的预测评价新方法,是老矿山深边部资源评价找矿取得突破的关键因素之一。

针对危机矿山及老矿山深边部资源评价与找矿的固有特点,在湖南香花岭锡矿、湖南清水塘铅锌矿等老矿山的隐伏矿体三维定位定量预测的研究经验^[28-30]和危机矿山深部找矿工作思路与方法^[31]的基础上,结合广西大厂矿区深边部预测和找矿的实际特点和需求,初步总结出了开展隐伏矿体立体定量预测的工作流程(图1)。

从图1可知,危机矿山深边部隐伏矿体立体定

量预测工作的核心流程可概括为“地质数据集成—成矿信息定量提取—立体定量预测”。“地质数据集成”的核心是收集地质勘探等原始资料,进行地质勘探资料数字化,建立综合地质数据库^[32,33],为立体定量预测建模提供数据驱动;“成矿信息定量提取”的核心是控矿地质因素的三维空间定量分析,为立体定量预测建模提供定量指标集;“立体定量预测”的核心是构建控矿地质因素到矿化分布的映射关系,对深边部资源进行预测评价。

该方法属于经验模型(数据驱动)与概念模型(知识驱动)相结合的定量评价方法,它强调预测评价的三维化、定位化、定量化和精细化,以数据驱动的三维、定量、非线性建模为核心技术,追求矿化定位机制内在客观规律的探寻和三维空间中精细的定量预测评价。

3 控矿地质因素定量分析

为进行深边部隐伏矿体预测,有必要掌握矿化分布和控矿地质条件之间的定量关系。通过成矿地质热力学条件分析及成矿物理化学过程的推导,是进行成矿作用理论分析的一种途径,已有许多地质学家做出了大量有益的探索^[34-36]。但由于地质作用及成矿过程的复杂性、成矿期后长期的地质改造和破坏作用、地质历史的久远性,地质学家很难准确地还原地质历史时期成矿过程的各种物理化学参数、边界条件等历史数据,所以,采用连续性的成矿物理化学方程推导的方法难以直接导出可用于隐伏矿体预测的矿化分布的定量模型。

针对隐伏矿体预测建模的迫切需求与成矿物理化学过程建模的现实难度的矛盾,本文提出如下思路:在建立矿体预测模型时,不追求严格的地质历史时期的成矿物理化过程的推演,而是直接从地质条件控矿作用角度出发,寻找可以宏观地描述成矿物理化学作用在地质空间中的综合分布与控矿作用效果。

地质控矿作用在地质空间中分布实际上是地质体在一定地质历史时期对周围地质空间产生的作用或影响,这种作用或影响与地质体本身的分布有关,比较适合用场分析的方法来研究地质控矿作用在空间中的分布。因此,笔者试图以场分析观点出发,用场模型来表达和分析地质控矿作用在地质空间中的分布。在得到地质控矿作用场模型的基础上,通过场模型的离散化,可以用统计分析方法分析地质控矿

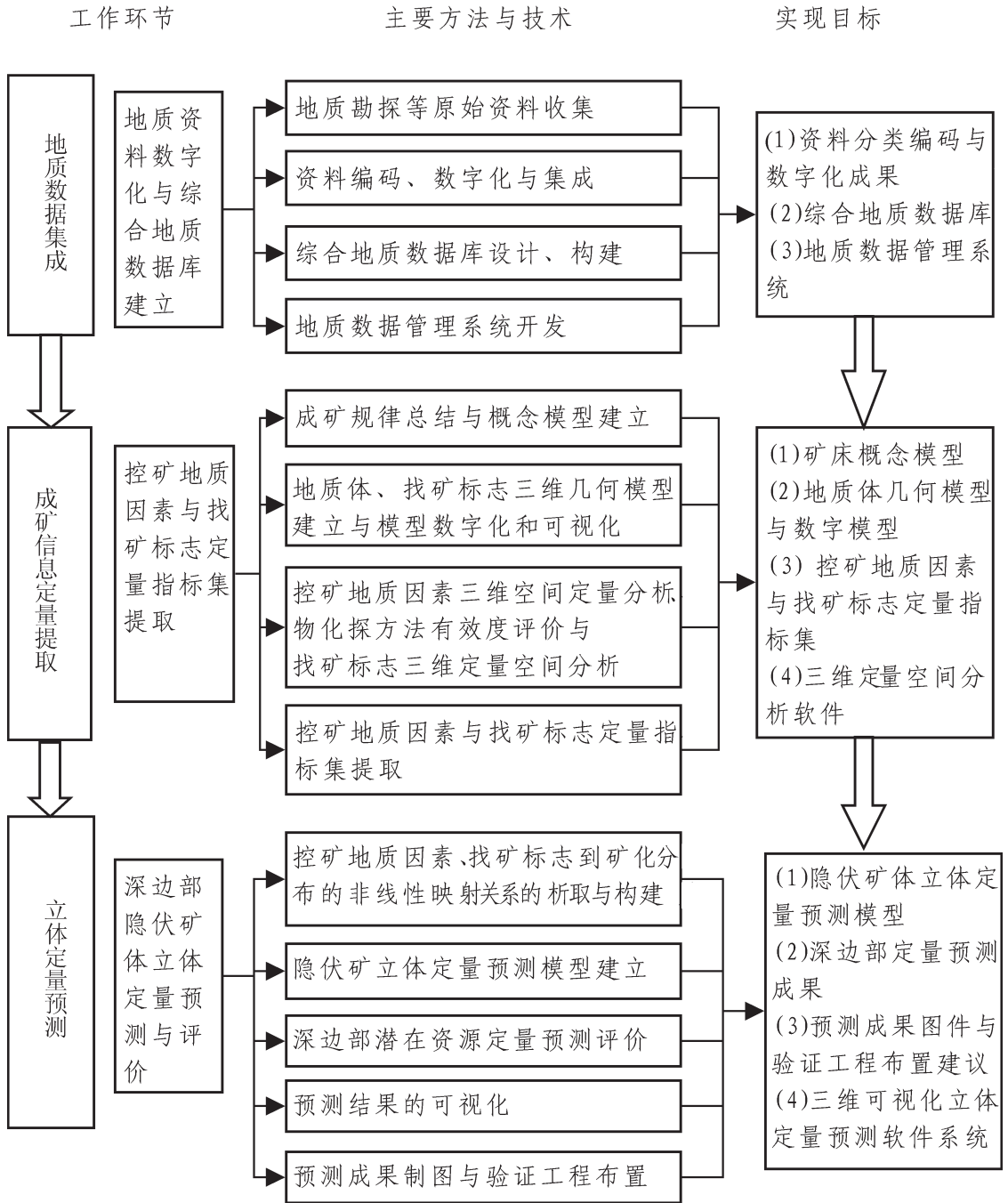


图 1 隐伏矿体立体定量预测工作流程

Fig.1 Flow chart for stereoscopic quantitative prediction of the concealed ore body

作用分布与矿化分布的关联关系，从而揭示出地质条件对矿化分布控制的定量关系。

3.1 地质控矿作用的场模型

根据地质控矿作用的类型不同，地质控矿作用可以有多种场模型，以广西大厂锡多金属矿床为例，主要包括：岩浆岩控矿作用场模型、地层岩性控矿作用场模型、断层控矿作用场模型、褶皱控矿作用场模

型、矿化分布场模型等。

限于篇幅，以下主要就大厂锡多金属矿床的岩浆岩控矿作用的场模型进行描述。

大厂锡多金属矿床是在喷气-沉积(喷流沉积)成矿的基础之上，受后来岩浆热液叠加改造形成的典型的多因复成矿床。因此，岩浆岩的控矿作用主要表现为其上部的地质空间提供成矿作用及叠加改造

所需的能量和动力,这种能量和动力是岩浆在地质历史时期作用于地质空间的综合场,为了使场模型简化,笔者直接用地质空间中的欧式距离场即地质空间中某点到岩体的最近距离及相关度量作为岩浆岩控矿作用的场模型的近似描述。

设地质空间中的某立体单元(Voxel)的中心点坐标为 (x_v, y_v, z_v) ,则可得下述岩浆岩控矿作用的场模型:

①至岩体顶面距离(某点到岩体的最近距离):

$$dG = \min \sqrt{(x-x_v)^2 + (y-y_v)^2 + (z-z_v)^2} \quad (1)$$

$$(x, y, z) \in G: z = f(x, y)$$

式中 $G: z = f(x, y)$ 为岩体顶面的曲面方程。

②岩体顶面一级波幅:

$$r_1 G = R_1(x_{min}, y_{min}) \quad (2)$$

式中 R_1 为岩体顶面的一级波幅方程,采用地质变量分解方法^[32,33]得到的岩体顶面的一次趋势方程;

$(x_{min}, y_{min}, z_{min})$ 为 $\min \sqrt{(x-x_v)^2 + (y-y_v)^2 + (z-z_v)^2}$ 的解。

③ 岩体顶面二级波幅

$$r_2 G = R_2(x_{min}, y_{min}) \quad (3)$$

式中 R_2 为岩体顶面的二级波幅方程, $(x_{min}, y_{min}, z_{min})$ 为 $\min \sqrt{(x-x_v)^2 + (y-y_v)^2 + (z-z_v)^2}$ 的解。

3.2 地质控矿作用的定量分析

上述地质控矿作用场模型的求解实际上是一个非线性规划问题,当描述岩体顶面的曲面方程为高

次方程时,直接求解会变得很困难,即使采用牛顿迭代法等数值解法也可能产生不收敛问题,故笔者采用连续模型离散化的求解思路:

(1)对岩浆岩体进行离散化(体素化),后得到表达岩浆岩体的三维栅格模型;

(2)求某立体单元中心点 (x_v, y_v, z_v) 至岩体的所有体元(Voxel)的欧式距离 dg_i ,岩体栅格模型中含有 n 个体元,则可求得 n 个距离 dg_1, dg_2, \dots, dg_n ;

(3)找出上述 n 个距离中的最小值 $\min(dg_1, dg_2, \dots, dg_n)$,即为立体单元中心点 (x_v, y_v, z_v) 至岩体的最近距离 dG 。

显然,由此求得的最近距离是上述场模型的近似解,但容易用计算机算法实现。

对研究区地质空间中的所有立体单元均可求得岩体的最近距离,同时,也可根据勘探工程中的取样化验数据获得每个立体单元的样品平均品位等矿化指标 SN, ZN, CU, PB, SB 。

用单元的矿化指标 SN 与单元到岩体的最近距离作为一对变量,可以绘制反映二者之间关系的散点图(图 2)。

从图 2 可知,矿化指标 SN, ZN, CU, PB, SB 与岩浆岩距离控矿变量 dG 具有关联关系,但这种关联关系不是线性的而是非线性的。为求解这种非线性关系,以及为了进行内、外矿化带的准确定位,构造非线性模型:

$$SN = \beta_0 + \beta_1 |dG - di| + \varepsilon$$

$$ZN = \beta_0 + \beta_1 |dG - di| + \varepsilon$$

$$CU = \beta_0 + \beta_1 |dG - di| + \varepsilon$$

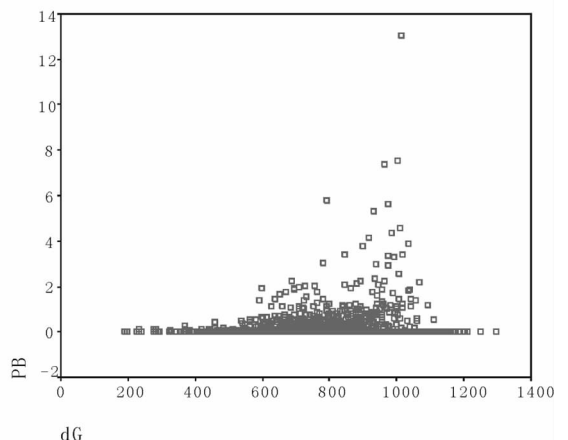
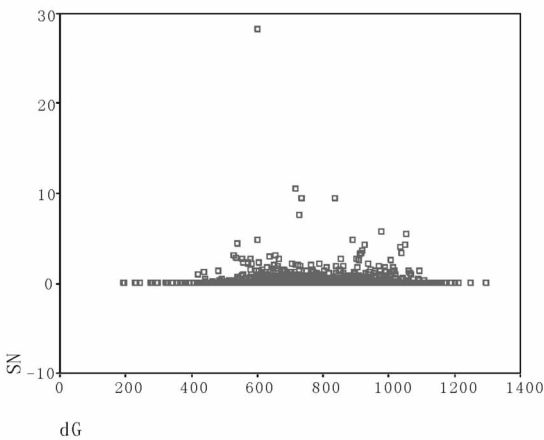


图 2 $dG-SN$ 和 $dG-PB$ 散点图
Fig.2 Scattering patterns of $dG-SN$ and $dG-PB$

$$PB = \beta_0 + \beta_1 |dG - do| + \varepsilon$$

$$SB = \beta_0 + \beta_1 |dG - do| + \varepsilon \quad (4)$$

式中 β_0, β_1, di, do 为待求的未知参数, ε 为数学期望为零的随机变量。

用牛顿迭代法求解上述非线性回归方程, 得到指标 SN, ZN, CU 对应方程的各参数 di 的值, 各参数 di 的值相近, 近似处理为 $di=650.0$; 指标 PB, SB 对应方程的各参数 do 的值相近, 近似处理为 $do=900.0$ 。即内、外矿化带中心面离岩体顶面最近点的距离分别为 650 m、900 m。

3.3 控矿地质因素指标提取

根据上述非线性模型可知, 指标 SN, ZN, CU 和 PB, SB 应分别与 $|dG-650.0|$ 和 $|dG-900.0|$ 呈负线性相关。构造岩浆岩对内、外矿化带分布控制的变量 idG 和 odG 为:

$$idG = |dG - 650.0|$$

$$odG = |dG - 900.0| \quad (5)$$

计算矿化指标 SN, ZN, CU 和 PB, SB 分别与变量 idG 和 odG 的空间互相关系数, 并对线性回归模型进行 F 检验, 结果如表 1。

从表 1 可知, 变量 idG 和 odG 分别与矿化指标

SN, ZN, CU 和 PB 具有显著的线性相关性 (odG 与 SB 的相关性不显著), 即 idG, odG 对矿化空间分布具有显著的贡献或显著的控制作用, 可作为一种指标对地质因素对成矿有利度进行度量, 故将 idG 和 odG 作为岩浆岩距离控矿因素指标。同时, idG 比 odG 与矿化变量有更高和更显著的相关性, 表明岩浆岩对近距离矿化具有更强的控制作用。

类似地, 可以构造出岩体顶面波幅控矿因素指标 wr_1G 和 r_2G , 其与矿化指标之间的关联关系如表 2 所示。

同样地, 对于地层岩性控矿作用, 构造出了地层岩性控矿因素指标 $c_{01}R, c_{02}R, c_{03}R, c_{05}R, c_{06}R, c_{07}R, c_{08}R, c_{09}R$ (表 3); 对于断层控矿作用, 构造出了断层控矿因素指标 $dF1$ (表 4); 对于褶皱控矿作用, 构造出了褶皱控矿因素指标 swr_1R, swr_2R (表 5)。

4 隐伏矿体立体定量预测

根据上述控矿地质因素定量分析结果可知, 矿化指标与控矿地质因素指标之间存在着一定的关联关系, 并可采用合适的模型来描述这种关系, 所以, 根据分布在地质空间中的地质控矿作用分布, 可以

表 1 矿化指标 SN, ZN, PB, SB, CU 与岩体距离因素 idG, odG 的相关系数及回归效果

Table 1 Correlation coefficient and regression effectiveness of mineralization indexes Sn, Zn, Pb, Sb, Cu with intrusive distance factors idG, odG

	相关系数 R	$F(1, 1606)$	$F_{0.05}(1, 1606)$	回归效果
$SN = b_0 + b_1 idG + \varepsilon$	-0.1105468475	19.86910491	3.847255542	显著
$ZN = b_0 + b_1 idG + \varepsilon$	-0.1697280023	47.6373136	3.847255542	显著
$CU = b_0 + b_1 idG + \varepsilon$	-0.2043988012	70.02231841	3.847255542	显著
$PB = b_0 + b_1 odG + \varepsilon$	-0.09509686392	14.65626479	3.847255542	显著
$SB = b_0 + b_1 odG + \varepsilon$	-0.01706997119	0.4680989662	3.847255542	不显著

表 2 矿化指标 SN, ZN, PB, SB, CU 与岩体波幅因素 wr_1G, r_2G 的相关系数及回归效果

Table 2 Correlation coefficient and regression effectiveness of mineralization indexes

Sn, Zn, Pb, Sb, Cu with intrusive surface amplitude factors wr_1G, r_2G

	相关系数 R	$F(1, 1606)$	$F_{0.05}(1, 1606)$	回归效果
$SN = b_0 + b_1 wr_1G + \varepsilon$	-0.1314133487	28.22214741	3.847255542	显著
$ZN = b_0 + b_1 wr_1G + \varepsilon$	-0.2492730893	106.4037574	3.847255542	显著
$PB = b_0 + b_1 wr_1G + \varepsilon$	-0.1481925414	36.06135763	3.847255542	显著
$SB = b_0 + b_1 wr_1G + \varepsilon$	-0.1230059374	24.67283106	3.847255542	显著
$CU = b_0 + b_1 wr_1G + \varepsilon$	-0.2465552089	103.9467589	3.847255542	显著
$SN = b_0 + b_1 r_2G + \varepsilon$	0.07570294672	9.256934343	3.847255542	显著
$ZN = b_0 + b_1 r_2G + \varepsilon$	0.1432011489	33.62304316	3.847255542	显著
$PB = b_0 + b_1 r_2G + \varepsilon$	0.09749342934	15.41146533	3.847255542	显著
$SB = b_0 + b_1 r_2G + \varepsilon$	0.06616058429	7.060726372	3.847255542	显著
$CU = b_0 + b_1 r_2G + \varepsilon$	0.1197786137	23.37652868	3.847255542	显著

表 3 矿化指标 SN 、 ZN 、 PB 、 SB 、 CU 与地层岩性因素 $c_{01}R$ 、 \dots 、 $c_{09}R$ 的复相关系数与回归效果

Table 3 Correlation coefficient and regression effectiveness of mineralization indexes Sn , Zn , Pb , Sb , Cu with stratigraphic lithologic factors $c_{01}R \dots c_{09}R$

	复相关系数 R	$F(8, 1599)$	$F_{0.05}(8, 1599)$	回归效果
$SN = f(c_iR) + \varepsilon$	0.19696992206750369	8.067579489	1.944183613	显著
$ZN = f(c_iR) + \varepsilon$	0.33126716588739508	24.63754288	1.944183613	显著
$PB = f(c_iR) + \varepsilon$	0.18810898331698542	7.332018184	1.944183613	显著
$SB = f(c_iR) + \varepsilon$	0.15923625277206821	5.199917379	1.944183613	显著
$CU = f(c_iR) + \varepsilon$	0.32749787013272907	24.01308397	1.944183613	显著

注:表中 $f(c_iR)$ 代表 $\beta_0 + \beta_1 c_{01}R + \beta_2 c_{02}R + \beta_3 c_{03}R + \beta_4 c_{04}R + \beta_5 c_{05}R + \beta_6 c_{06}R + \beta_7 c_{07}R + \beta_8 c_{08}R + \beta_9 c_{09}R$ 。

表 4 矿化指标 SN 、 ZN 、 PB 、 SB 、 CU 与断层因素 $dF1$ 的相关系数及回归效果检验

Table 4 Correlation coefficient and regression effectiveness of mineralization indexes Sn , Zn , Pb , Sb , Cu with fault factor $dF1$

	相关系数 R	$F(1, 1606)$	$F_{0.05}(1, 1606)$	回归效果
$SN = b_0 + b_1 dF1 + \varepsilon$	-0.1820125177	55.02744163	3.847255542	显著
$ZN = b_0 + b_1 dF1 + \varepsilon$	-0.3080212570	168.3446672	3.847255542	显著
$PB = b_0 + b_1 dF1 + \varepsilon$	-0.1838201049	56.16424901	3.847255542	显著
$SB = b_0 + b_1 dF1 + \varepsilon$	-0.1525405408	38.2596473	3.847255542	显著
$CU = b_0 + b_1 dF1 + \varepsilon$	-0.3273108046	192.6988588	3.847255542	显著

表 5 矿化指标 SN 、 ZN 、 PB 、 SB 、 CU 与褶皱 swr_1R 、 swr_2R 的相关系数及回归效果检验
Table 5 Correlation coefficient and regression effectiveness of mineralization indexes Sn , Zn , Pb , Sb , Cu with fold factors swr_1R , swr_2R

	相关系数 R	$F(1, 1606)$	$F_{0.05}(1, 1606)$	回归效果
$SN = b_0 + b_1 swr_1R + \varepsilon$	-0.1100846616	19.70127668	3.847255542	显著
$ZN = b_0 + b_1 swr_1R + \varepsilon$	-0.2516298354	108.5619001	3.847255542	显著
$PB = b_0 + b_1 swr_1R + \varepsilon$	-0.1032297658	17.29849298	3.847255542	显著
$SB = b_0 + b_1 swr_1R + \varepsilon$	-0.06621858404	7.073165932	3.847255542	显著
$CU = b_0 + b_1 swr_1R + \varepsilon$	-0.2159279028	78.54151075	3.847255542	显著
$SN = b_0 + b_1 swr_2R + \varepsilon$	-0.09064109018	13.30388859	3.847255542	显著
$ZN = b_0 + b_1 swr_2R + \varepsilon$	-0.1670934611	46.12777887	3.847255542	显著
$PB = b_0 + b_1 swr_2R + \varepsilon$	-0.06713675421	7.271569551	3.847255542	显著
$SB = b_0 + b_1 swr_2R + \varepsilon$	-0.06958938097	7.815193699	3.847255542	显著
$CU = b_0 + b_1 swr_2R + \varepsilon$	-0.1645405315	44.69010124	3.847255542	显著
$SN = b_0 + b_1 swgR + \varepsilon$	-0.07821531751	9.885398514	3.847255542	显著
$ZN = b_0 + b_1 swgR + \varepsilon$	-0.1667201425	45.91600629	3.847255542	显著
$PB = b_0 + b_1 swgR + \varepsilon$	-0.1024833689	17.0466002	3.847255542	显著
$SB = b_0 + b_1 swgR + \varepsilon$	-0.07336794465	8.691651517	3.847255542	显著
$CU = b_0 + b_1 swgR + \varepsilon$	-0.1330767437	28.95408814	3.847255542	显著

推断出矿化分布,从而可以对分布在矿床地质空间范围内的隐伏矿体进行预测评价。

4.1 预测模型

矿化分布实际上是矿化指标在三维地质空间上

的分布,描述这些指标的变量称为矿化变量。矿化变量包括:(1) SN :单元锡含量;(2) ZN :单元锌含量;(3) PB :单元铅含量;(4) SB :单元铋含量;(5) CU :单元铜含量。

地质控矿因素指标描述了地质因素的成矿有利度,反映了地质控矿作用在三维地质空间上的分布,故称为控矿变量。控矿变量包括:(1) $dF1$:断层 F1 的控矿因素指标;(2) idG :内矿化带的岩浆岩距离控矿因素指标;(3) odG :外矿化带的岩浆岩距离控矿因素指标;(4) r_1G :岩浆岩的一级波幅控矿因素指标;(5) r_2G :岩浆岩的二级波幅控矿因素指标;(6) $c_{01}R$ 、 $c_{02}R$ 、 $c_{03}R$ 、 $c_{05}R$ 、 $c_{06}R$ 、 $c_{07}R$ 、 $c_{08}R$ 、 $c_{09}R$:地层岩性控矿因素指标;(7) swr_1R :褶曲一级波幅控矿因素指标;(8) swr_2R :褶曲二级波幅控矿因素指标;(9) wgR :褶曲梯度控矿因素指标。

矿化指标与控矿因素指标之间的关联关系在数学上可以表达为控矿变量空间到矿化变量空间的映射,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,故可以将这种映射看作为泛函。该泛函关系可以通过多元回归、因子计量、判别分析等方法来实现函数化表达。这种地质控矿作用到矿化分布的函数化表达模型 $MV=f(GV)$,称为矿化数学模型。

由前述控矿地质因素定量分析知,提取出的控矿地质因素指标与矿化指标具有显著的线性相关性,所以泛函模型 $MV=f(GV)$ 可以实例化为普通的多元线性函数模型:

$$MV_k = B_{k0} + \sum_{j=1}^p B_{kj} GV_j + \varepsilon \quad (k=1, \dots, m) \quad (6)$$

该模型考虑了成矿作用的随机因素,其中 MV_k 为 MV 中的矿化变量 (SN , ZN , PB , SB , CU), GV_j 为 GV 中的控矿变量 ($dF1$, idG , odG , wr_1G , r_2G , $c_{01}R$, $c_{02}R$, $c_{03}R$, $c_{05}R$, $c_{06}R$, $c_{07}R$, $c_{08}R$, $c_{09}R$, swr_1R , swr_2R , wgR), B_{k0} , B_{k1} , ..., B_{kp} 为线性函数的待求参数, ε 为期望值为零的随机变量。参数 B_{k0} , B_{k1} , ..., B_{kp} 可通过对 GV 和 MV 在地质空间控制区域中离散化单元的量化数据进行多元线性回归分析获得。

表 6 为用回归分析方法建立矿化泛函模型的计算结果。表中所示统计检验(F 检验)表明,矿化变量 (SN , ZN , PB , SB , CU)与控矿变量 ($dF1$, idG , odG , wr_1G , r_2G , $c_{01}R$, $c_{02}R$, $c_{03}R$, $c_{05}R$, $c_{06}R$, $c_{07}R$, $c_{08}R$, $c_{09}R$, swr_1R , swr_2R , wgR)之间的线性函数关系显著。

矿化数学模型定量地揭示了地质控矿变量空间与矿化变量空间之间的关联关系,可以用来对研究区内所有的立体单元的矿化指标 SN , ZN , PB , SB ,

CU 进行估值预测。

同时,为了对立体单元的含矿性进行估计,定义单元含矿性指标 $Iore$ 为:

$Iore=1$, 当 $OSN \geq 0.30$ 或 $OZN \geq 0.30$

$Iore=0$, 其他 (7)

式中, OSN 为落入单元且达到边界品位要求的所有样品的锡含量的按样长加权平均值, OZN 为落入单元且达到边界品位要求的样品的锌含量的按样长加权平均值; $Iore=1$ 的单元称为含矿单元, $Iore=0$ 的单元称为不含矿单元。

单元含矿性指标 $Iore$ 相当于矿化指标值的概率化,故与矿化指标一样,对地质控矿作用变量具有函数依赖性,因而也在控矿作用变量与含矿性指标之间也存在类似的泛函模型。由于 $Iore$ 表示的是概率值,故采用逻辑斯蒂(Logistic)回归模型作为单元含矿性估计模型:

$$Iore_i = \frac{\exp(B_{i0} + \sum_{j=1}^p B_{ij} GV_j)}{1 + \exp(B_{i0} + \sum_{j=1}^p B_{ij} GV_j)} \quad (8)$$

式中 i 为立体单元编号, $Iore_i$ 为立体单元 i 的含矿性指标的估计值, GV_j 为立体单元 i 的第 j 个控矿作用指标的估计值, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7, \beta_8, \beta_9, \beta_{10}, \beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{14}, \beta_{15}$ 为逻辑斯蒂回归模型参数的极大似然估计量,分别代表常量和控矿变量 $dF1$, idG , wr_1G , r_2G , $c_{01}R$, $c_{02}R$, $c_{03}R$, $c_{05}R$, $c_{06}R$, $c_{07}R$, $c_{08}R$, $c_{09}R$, swr_1R , swr_2R , wgR 对应的参数。参数采用牛顿迭代法求解,得到的值分别为: -8.4937915 , -0.16908470 , -0.00446109 , 0.00777505 , 0.03696031 , 4.7609418 , 7.7563791 , 8.5224590 , 8.3604180 , 8.3765625 , 8.5180503 , 9.2299978 , 8.4270120 , -0.26744715 , -0.06917703 , 0.9032896 。该模型的复相关系数为 0.6188699378706 ,经统计检验,回归效果显著。

4.2 预测结果

上述控矿地质因素定量分析和预测模型建立是在三维地质空间上进行的,所以,可以对地下三维空间中任意立体单元中(已知单元及预测单元)的矿化进行定位、定量预测,从而达到对矿区深边部隐伏矿体进行定位、定量预测的目标。

根据上述预测模型(矿化数学模型和单元含矿性估计模型)对未知区符合边界条件的单元的矿化

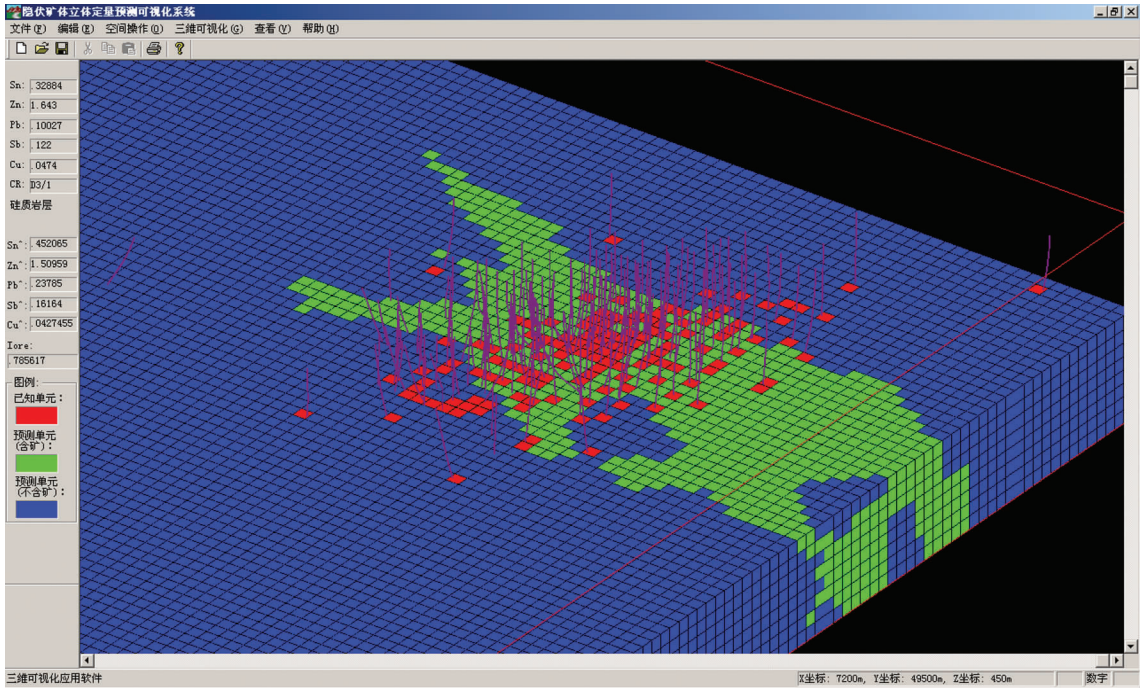


图3 预测结果的三维可视化查询

Fig.3 3D visualized software system for displaying and querying prediction results

幅,称为隐伏矿体立体定量预测单元矿化指标预测图,简称单元预测图。

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,开发了隐伏矿体立体定量预测可视化查询系统,具有三维地质离散空间绘制显示、钻孔绘制显示、预测结果查询等功能(图3)。

4.3 工程验证

根据上述预测结果,广西壮族自治区二一五地质队对预测矿化指标值最有利的地段(长坡区深部和铜坑深部区)进行了深部找矿工程(坑内钻)施工。在长坡区深部探获了大量的锡多金属矿体,锡、锌、铋金属资源量分别都达到中型矿床规模;在铜坑深部92号矿体之下发现了125号锡多金属矿体;2007年下半年,又在铜坑深部区施工了三个坑内钻,其中两个见层状矽卡岩型锌铜矿体,见矿孔相距400m,见矿厚度分别为4.25m和8.2m,锌品位分别为5.59%和6.54%,目前尚未控制住矿体边界。

5 结语

笔者针对危机矿山可接替资源找矿问题,以广西大厂锡多金属矿床为例,初步建立了一种适应于

危机矿山深边部外围找矿特点的隐伏矿体立体定量预测方法,进行了地质矿产数据库建立、三维成矿信息定量提取和隐伏矿体三维定位定量预测研究,为大厂矿区深边部隐伏矿体的找矿工作提供了满足立体化、定位化、定量化和精细化要求的预测结果,以较低的成本实现了大厂矿区深边部找矿的新突破。

笔者的研究和应用实践表明,隐伏矿体立体定量预测把矿山历年积累的地质、勘探和生产方面的地质资料及以这些地质数据为内涵的综合地质数据库作为预测评价的数据前提,可充分挖掘和提取隐含在综合地质资料与数据中的成矿信息,保证建立的预测模型是客观的、定量的和三维的,较好地解决了危机矿山深边部找矿面临的直接指示信息少干扰大、向三维空间发展、资料挖掘不充分等固有问题,适应危机矿山及老矿山深边部找矿的新需要,是老矿山深边部找矿取得突破的有效方法。

参考文献(References):

- [1] 赵鹏大,张寿庭,陈建平.危机矿山可接替资源预测评价若干问题探讨[J].成都理工大学学报(自然科学版),2004,31(2):111-117.

- Zhao Pengda, Zhang Shouting, Chen Jianping. Discussion on prediction and appraisal of replaceable resources of crisis mine [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2004, 31 (2):111-117 (in Chinese with English abstract).
- [2] 国土资源部. 全国危机矿山可接替资源找矿计划纲要(2004-2010年)[EB/OL]. 国土资源部网站 <http://www.mlr.gov.cn>. 2004. Ministry of Land and Resources PRC. Prospecting program for replaceable resources of crisis mines in China (2004-2010) [EB/OL]. <http://www.mlr.gov.cn>. 2004 (in Chinese).
- [3] Harris D P, Freyman A J, Barry G S. Methodology employed to estimate potential mineral supply of the Canadian Northwest [J]. Dep Energy, Can, Mines Resour, Miner Resour Div, Miner Inform Bull. 1970, 105:1-56.
- [4] Agterberg F P, Kelly A M. Geomathematical methods for use in prospecting [J]. Canadian Mining Journal. 1971, 92 (5): 61-72.
- [5] Griffiths J C, Menzie D W, Labovitz M L. Exploration for and Evaluation of Natural Resources [C]//American Society of Mechanical Engineers (ed.). AAPG Res Symp, Probab Methods in Oil Explor, Notes. Stanford:American Society of Mechanical Engineers, 1975:21-25.
- [6] Singer D A. RESIN, a FORTRAN IV program for determining the area of influence of samples or drill holes in resource target search[J]. Computers & Geosciences. 1976, 2 (2):249-60.
- [7] McCammon R. B. An interactive computer graphics approach for dissecting a mixture of normal distributions [J]. Computer Graphics. 1976, 10 (2):8-12.
- [8] Barry G S, Freyman A J. Mineral endowment of the Canadian Northwest: A subjective probability assessment [J]. Canadian Mining and Metallurgical Bulletin. 1970, 63 (701): 1031-1042.
- [9] Sinclair A J, Woodsworth G I. Multiple regression as a method of estimating exploration potential in an area near Terrace, British Columbia [J]. Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists. 1970, 65:998-1003
- [10] 赵鹏大, 胡旺亮, 李紫金. 矿床统计预测(第二版)[M]. 北京:地质出版社, 1994:1-314.
Zhao Pengda, Hu Wangliang, Li Zijin. Statistical Predication of Mineral Deposits (2nd Edition) [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1994:1-314 (in Chinese).
- [11] Agterberg F P. Geomathematics: Mathematical Background and Geoscience Applications [M]. Amsterdam, New York:Elsevier Scientific Pub. Co., 1974:1-596.
- [12] Zhao P D. Theories, principles, and methods for statistical prediction of mineral deposits [J]. Journal of Mathematical Geology, 1992, (6): 589-595.
- [13] 康斯坦丁诺夫 P M. 评价金属矿床的逻辑信息方法[M]. 纪忠元译. 北京:地质出版社, 1982:1-65.
Константинов P M. Logic Information Method for Appraising Mineral Deposits [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1982: 1-65 (in Chinese).
- [14] Bridges N J, Hanley J T, McCammon R. B. PREPRO:A computer program for encoding regional exploration data for use in characteristic analysis [J]. Computers & Geosciences, 1985, 11 (5): 513-519.
- [15] 王世称, 成秋明. 金矿综合信息找矿模型[J]. 长春地质学院学报, 1989, 19(3):311-316.
Wang Shicheng, Chen Qiuming. The integrated information exploring model of gold deposits[J]. Journal of Changchun College of Geology, 1989, 19 (3):311-316 (in Chinese with English abstract).
- [16] 王世称. 大型、超大型金矿床密集区综合信息预测[M]. 北京:地质出版社, 2001:1-163.
Wang Shicheng. Comprehensive Information Predication of Large and Superlarge Gold Deposit [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2001:1-163(in Chinese).
- [17] Singer D A. Basic concepts in three-part quantitative assessments of undiscovered mineral resources [J]. Nonrenewable Resources, 1993, 2 (2):69-81.
- [18] 赵鹏大, 池顺都. 初论地质异常[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1991, 16(3):241-248.
Zhao Pengda, Chi Shundu. A preliminary view on geology anomaly [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 1991, 16 (3):241-248 (in Chinese with English abstract).
- [19] 赵鹏大, 孟宪国. 地质异常与矿产预测[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1993, 18(1):39-47
Zhao Pengda, Meng Xianguo. Geologic anomaly theory and mineral resource prognosis [J]. Earth Science -Journal of China University of Geosciences, 1993, 18 (1):39-47 (in Chinese with English abstract).
- [20] 廖崇高, 杨武年, 徐凌, 等. 成矿预测中遥感与地质异常的综合分析——以兰坪盆地为例[J]. 中国地质, 2002, 29(4):416-420.
Liao Chonggao, Yang Wunian, Xu Lin, et al. Integrated analysis of remote sensing and geological anomalies in ore deposit prediction: A case study of he Lanping basin[J]. Geology in China, 2002, 29(4): 416-420 (in Chinese with English abstract).
- [21] Bonham-Carter G F, Agterberg F P, Wright D F. Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential [J]. Geological Survey of Canada Paper, 1990, 89 (9):171-183.
- [22] Knox-Robinson C M, Wyborn L A I. Towards a holistic exploration strategy: using geographic information systems (GIS) as a tool to enhance exploration [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 1997, 44 (4):453-463.
- [23] Asadi H H, Hale M. A predictive GIS model for mapping potential gold and base metal mineralization in Takab area, Iran [J]. Computers & Geosciences, 2001, 27 (8):901-912.
- [24] 肖克炎, 朱裕生, 宋国耀. 矿产资源 GIS 定量评价 [J]. 中国地质, 2000, 27(7):29-32.
Xiao Keyan, Zhu Yusheng, Song Guoyao. GIS quantitative assessments of mineral resources [J]. Geology in China, 2000, 27

- (7):29-32 (in Chinese with English abstract).
- [25] 韩坤英, 丁孝忠, 范本贤, 等. 基于 GIS 的区域地质编图方法[J]. 中国地质, 2005, 32 (4):713-717.
Han Kunying, Ding Xiaozhong, Fan Benxian, et al. Methods of regional geological map production based on GIS [J]. *Geology in China*, 2005,32(4): 713-717 (in Chinese with English abstract).
- [26] 许惠平, 覃如府, 叶娜, 等. 中国岩石圈三维结构数据库总库管理系统[J]. 中国地质, 2006, 33(4):928-935.
Xu Huiping, Qin Rufu, Ye Na, et al. Management system of the 3D lithospheric structure database of China [J]. *Geology in China*, 2006, 33(4):928-935(in Chinese with English abstract).
- [27] 杨向荣, 张晓帆, 孙宝生. 基于勘查地球化学数据分析的大型矿集区预测模型讨论[J]. 中国地质, 2006, 33(3):682-688.
Yang Xiangrong, Zhang Xiaofan, Sun Baosheng. Prediction model of large ore deposit clusters based on an exploration-geochemical data analysis—A discussion [J]. *Geology in China*, 2006, 33 (3): 682-688 (in Chinese with English abstract).
- [28] 毛先成, 陈国琰. 香花岭锡矿田隐伏矿床的立体定量预测[J]. 桂林冶金地质学院学报. 1988,8(1):15-22.
Mao Xiancheng, Chen Guoguang. Stereo-quantitative predication of a hidden tin ore deposit in the Xianghualing orefield [J]. *Journal of Guilin College of Geology*. 1988, 8(1):15-22 (in Chinese with English abstract).
- [29] 毛先成, 陈国琰. 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.
Mao Xiancheng, Chen Guoguang. The Xianghualing Sn-deposit: its mathematical model and three-dimensional quantitative prognostication [J]. *Geology and Prospecting*. 1988, 24(10):25-31 (in Chinese with English abstract).
- [30] 毛先成, 宋宏邦. 湖南清水塘铅锌矿床三维数学模型与深部盲矿体的立体定量预测[C]//彭省临, 戴塔根, 编. 地洼学说研究与应用. 长沙:中南工业大学出版社, 1992:105-110.
Mao Xiancheng, Song Hongbang. Three-dimensional mathematical model of the Qinshuitang Pb-Zn deposit and stereo-quantitative predication of blind ore bodies occurred in depth and margin of the deposit [C]//Peng Shenglin, Dai Tagen (ed.). *Research and Application of Diwa Theory*. Changsha: Central South University of Technology Press, 1992:105-110 (in Chinese).
- [31] 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 Tianzhu, Xue Jianling. Geological study in search of metallic ore deposits at depth[J]. *Geology in China*, 2007, 34(5): 855-869 (in Chinese with English abstract).
- [32] 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.
Mao Xiancheng, Dai Tagen, Zou Yanhong, et al. Research and system development of geological mineral database of the Dachang orefield [J]. *Geology and Prospecting*, 2003, 39 (5):72-76 (in Chinese with English abstract).
- [33] 邹艳红, 毛先成. 地测数据库的建立与应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2004, 35(3):463-467.
Zou Yanhong, Mao Xiancheng. Establishment and application of geological survey database [J]. *J. Cent. South Univ. (Science and Technology)*, 2004, 35 (3):463-467 (in Chinese with English abstract).
- [34] 於崇文. 成矿作用动力学—理论体系和方法论 [J]. 地学前缘, 1994, 1(3/4):53-73.
Yu Chongwen. Dynamics of ore-forming process—systematics and methodology [J]. *Earth Science Frontiers*, 1994, 1(3/4):53-73 (in Chinese with English abstract).
- [35] 岑况, 於崇文. 铜陵地区硫化物矿床成矿过程的热传导和物质输运动力学[J]. 地球化学, 2001, 30(6):533-539.
Cen Kuang, Yu Chongwen. Mass and energy transport in ore forming processes of sulfide deposits in Tongling district [J]. *Geochimica*, 2001, 30 (6): 533-539(in Chinese with English abstract).
- [36] 刘石年, 段嘉瑞, 毛先成. 地质综合场[M]. 长沙:中南工业大学出版社, 1997:1-219.
Liu Shinian, Duan Jiarui, Mao Xiancheng. *On Geological General Field* [M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1997:1-219 (in Chinese with English abstract).

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

MAO Xian-cheng, DAI Ta-gen, WU Xiang-bin, ZOU Yan-hong

(School of Geoscience and Environment Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: Crisis mines and old mines possess great mineral resource potentials in their deep and marginal parts, but the search for resources in the depth is frequently confronted with enormous difficulties and risks. Old mines have usually experienced high degrees of exploration and exploitation, resource prognosis and prospecting goals have to be transferred to the three-dimensional space in the depth, and geophysical and geochemical anomaly information is strongly interfered by mining activities. Therefore, the adoption of new prognostic and appraisal methods for crisis mine prospecting seems to be an important means for making breakthrough in the appraisal and prospecting work in the deep and marginal parts of old mines. Aimed at solving the problems of evaluating and prospecting for replaceable resources in crisis mines, this paper established a core workflow for the stereoscopic quantitative prediction of concealed ore bodies, i.e., the flow chart of "geological data integration→quantitative mineralization information extraction→three-dimensional quantitative prediction", by using a data-driven and knowledge-driven combination method. From the viewpoint of the field analysis, the ore-controlling field models of magmatites, faults, strata, lithology and folds and the mineralization distribution filed model were constructed, with their solutions reached by transferring continuous models into discrete models. By means of statistical analysis and nonlinear programming, the correlation between geological ore-controlling fields and mineralization indexes was analyzed, and then the quantitative location parameters which describe the control of geological factors over mineralization were extracted. Thus the quantitative index set of geological ore-controlling factors was obtained. The stereoscopic quantitative prediction models composed of mineralization mathematical models and ore potential estimation models were built on the basis of the relationship between the mineralization indexes and the geological ore-controlling factor indexes. With the prediction models, the three-dimensional localization and quantitative prediction of concealed ore bodies were carried out in the deep and marginal parts of the Dachang mine, and the prediction database was created, based on which the unit prediction maps were drawn according to elevation levels. A three-dimensional visualization software system for displaying and querying the prediction results was developed. Deep prospecting drill holes were designed and put in practice following the prediction results and new ore bodies were thus found in the depth of the Changpo section and the Tongkeng section within the Dachang mine, which shows that the prediction models and results are effective.

Key words: crisis mine; concealed ore body; 3D geological model; location and quantitative prediction; quantitative appraisal of mineral resources

About the first author: MAO Xian-cheng, male, born in 1963, doctor, professor, mainly engages in quantitative appraisal of mineral resources; E-mail: xcmao@126.com.