

# 有色金属三维成矿预测信息系统 设计与关键技术研究

坚润堂<sup>1</sup>, 杨帆<sup>1</sup>, 张俊岭<sup>2</sup>

(1.中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051;  
2.中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640)

**摘要:**利用现代信息技术开展三维成矿预测,是开展深边部有色金属找矿勘查工作的迫切需要。设计有色金属三维成矿预测信息系统的目标、原则、体系结构、数据库和包括地质数据管理、三维地质建模、三维空间分析、三维成矿预测等功能模块,并对轮廓线三维插值建模法、证据权三维成矿预测法、逻辑回归成矿预测法这三种系统关键技术进行研究。系统设计集成了主流三维成矿预测技术方法,可满足多类型、多尺度的有色金属三维成矿预测需求,为后续系统开发及应用提供指南。

**关键词:**成矿预测;三维地质建模;三维空间分析

**DOI:**10.11907/rjdk.172770

**中图分类号:**TP319

**文献标识码:**A

**文章编号:**1672-7800(2018)007-0150-03

## Research on Key Technologies and the Design of Three Dimensional Metallogenic Predicting Information System for Nonferrous Metals

JIAN Run-tang<sup>1</sup>, YANG Fan<sup>1</sup>, ZHANG Jun-ling<sup>2</sup>

(1.Kunming Institute of Exploration and Design, China Nonferrous Industry Company Ltd., Kunming 650051, China;  
2.Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:**To apply modern information technology in three-dimensional mineralization prediction is the urgent need of non-ferrous metal prospecting exploration in deep and marginal areas. In this paper, the objectives, principles, architecture, database and the functional modules including geological data management, 3D geological modeling, three-dimensional spatial analysis and three-dimensional mineralization prediction of non-ferrous metal three-dimensional metallogenic prediction information system are designed. And three key methods of contour three-dimensional interpolation modeling, three-dimensional mineralization prediction and logical regression metallogenic prediction are studied. The system integrates the mainstream three-dimensional metallogenic prediction technology to meet the multi-type and multi-scale non-ferrous metal three-dimensional mineralization prediction demand, which can provide guidance for the follow-up system development and application.

**Key Words:** metallogenic prediction; 3D geological modeling; 3D spatial analysis

## 0 引言

成矿预测是应用基础地质、矿床地质理论和有关技术方法,分析区域(或矿区)成矿条件和找矿信息,推断隐伏矿体的技术<sup>[1]</sup>。随着计算机技术的发展,特别是三维可视

化技术以及三维成矿预测技术的发展,利用三维地质信息技术可对地质体物理化学特性、空间形态及相关关系和抽象概念进行更好的分析和处理,以获取更为可靠、更为深入的地质及勘探信息<sup>[2]</sup>。成矿预测工作和其它地质工作一样逐渐“从传统走向现代、从二维走向三维,从单一走向综合”<sup>[3]</sup>。在三维空间尺度开展成矿预测,具有清晰

收稿日期:2017-11-28

基金项目:云南铜业(集团)有限公司重点科技计划项目(20140101)

作者简介:坚润堂(1975-),男,博士,中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司高级工程师,研究方向为区域构造与成矿;杨帆(1985-),博士,中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司工程师,研究方向为区域地质与成矿学;张俊岭(1979-),男,博士,中国科学院广州地球化学研究所助理研究员,研究方向为三维地质建模与成矿预测。

直观、准确可靠、最能体现地质体的三维本质特征。因此, 研究有色金属三维成矿预测信息系统及其关键技术, 对于推进成矿预测技术方法的发展、提升成矿预测效能具有重要意义。

### 1 系统设计

#### 1.1 设计原则

(1)实用性原则。系统应能满足多源异构数据处理、数据转换与分析, 满足在同一个三维视图空间内显示的需求, 应提供丰富多样的三维空间分析及成矿预测方法, 以适应因矿床类型、研究区域、数据基础等差异性对系统的需求。

(2)稳定性原则。系统应选择市面上成熟的信息技术进行开发, 三维矿产平台和大型空间数据库管理系统应选择主流的、已得到广泛应用的产品, 系统结构应分层清晰、模块耦合性低, 多方面保证系统稳定性。

(3)先进性原则。系统应紧跟三维成矿预测方法发展现状, 集成一些具有探索性、前瞻性的成矿预测方法, 同时在海量数据并行处理、GPU 资源调度、三维快速渲染显示等方面进行优化, 充分保证系统的先进性。

(4)易用性原则。系统用户界面应采用常规 Windows 系统界面风格, 界面布局美观、参数设定得当、操作提示清晰、向导设计合理, 尽量降低用户系统学习和使用成本。

(5)安全性原则。有色金属地质数据是蕴藏着矿产资源的宝贵资源, 系统应充分保证原始数据修改的一致性、预测成果的防篡改性以及系统使用过程记录的详细全面性, 确保系统及数据的使用安全受控。

#### 1.2 结构设计

有色金属三维成矿预测信息系统由于涉及到海量的三维空间数据可视化、处理分析、预测评价工作, 对 CPU 和显卡等计算资源的需求高, 且综合考虑到系统用户大都为单机用户, 因而设计该系统结构为客户端/服务器结构模式, 整个结构分为三层, 分别为数据库层、平台框架层和功能应用层(详见图 1)。其中平台框架层中的三维矿产平台采用 Surpac 软件平台, 并采用 TCL/SCL 脚本引擎, 可直接利用脚本语言对系统功能进行定制和扩展, GIS 平台部分主要负责二维空间数据的显示处理, 数据库访问引擎负责空间和非空间地质数据的存取访问。

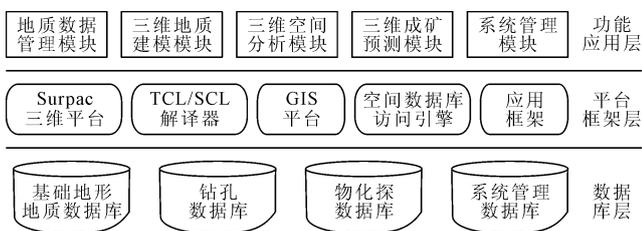


图 1 有色金属三维成矿预测信息系统总体结构

#### 1.3 数据库设计

三维成矿预测数据包括区域地形地质数据、钻孔编录数据、地质剖面数据、重磁电物探数据<sup>[4]</sup>、地质填图数据等, 依据数据类型, 将整个系统数据库分为基础地形地质数据库、钻孔数据库、物化探数据库和系统管理数据库。

(1)基础地形地质数据库主要负责存放包括等高线、交通、水系、居民地、绿地植被以及遥感影像等符合国家基础地理信息标准的大比例地理信息。

(2)钻孔数据库主要存储地质勘查钻探过程中所形成的地质钻孔数据, 包括孔口表、测斜表、岩性分层表、样品测试分析表等数据, 通过这些钻孔数据可获取三维空间地层、构造、岩浆岩、矿体的三维空间分布及相互关系。

(3)物化探数据库主要存储大面积、深部(从地表到几十千米不等)、立体的区域地球物理、地球化学数据, 其中物探数据可包括地震、重力、磁力等数据, 化探数据一般是地质填图中的地球化学数据。通过物探解译、化探分析等工作, 可获取地下地质体的三维空间形态及相互关系, 及其地球物理、化学特征。

(4)系统管理数据库是支撑系统正常运行的基础性数据库, 主要存储组织机构、系统用户、系统权限、系统日志以及系统基本参数(如图形窗口的背景色、系统字体设定等)等信息。

#### 1.4 功能模块设计

面向三维成矿预测目标, 根据综合地质数据在系统中的应用流程, 将整个系统划分成地质数据管理模块、三维地质建模模块、三维空间分析模块、三维成矿预测模块和系统管理模块。

(1)地质数据管理模块。该模块主要实现三维成矿预测地质数据的管理维护, 实现对地质数据的增删、改查、统计以及导入、导出等功能。主要包括基础地形地质管理、钻孔数据管理、物化探数据管理、地质剖面数据管理、遥感数据管理等。

(2)三维地质建模模块。三维地质建模实质上是利用计算机技术实现地质三维特征化、可视化的过程<sup>[5]</sup>, 三维地质模型是三维成矿预测工作的基础。因而三维地质建模模块是系统关键功能模块之一, 其主要包括数字地形模型 DTM 工具(DTM 面管理、剖面创建、断层创建、等值线生成)、三维实体建模(三角网管理、廓线建模法<sup>[6-8]</sup>、趋势面插值建模法<sup>[9-10]</sup>)和三维块体建模(块体管理、属性管理、约束管理、显示管理、剖面创建)三大部分。

(3)三维空间分析模块。该模块是实现三维成矿预测的基础和关键, 用于提炼和构建三维成矿预测信息模型。主要包括三维缓冲分析、三维空间变换、三维叠加分析、三维地质形态分析<sup>[11-12]</sup>、三维插值分析(包括克吕格插值法、距离权重反比插值法、距离幂次反比插值法、最近邻点插值法)功能。

(4)三维成矿预测模块。该模块是定位、定量、定概率获取成矿结果的模块, 也是系统核心功能模块。主要包括知识驱动成矿预测(布尔逻辑法、指数叠加法、模糊逻辑

法)、数据驱动型(信息量法、证据权法、逻辑回归法、神经网络法)和资源储量计算(克吕格方法、垂直断面法)。

(5)系统管理功能模块。该子系统主要实现对组织结构、用户角色、使用日志以及系统基本参数等系统信息的管理维护,以实现对系统功能和数据的安全受控使用,满足用户个性化需求。其主要功能包括:组织机构管理、用户管理、角色管理、权限管理、日志管理、系统参数配置等。

## 2 关键技术

如何高效构建三维地质模型,以及高效提炼成矿作用特征标志,提升所预测靶区的可信度,是本系统所面临的关键技术问题,本节针对系统的3个关键技术问题进行研究。

### 2.1 趋势面插值三维地质建模技术

随着计算机数据处理能力的提升与地质插值等相关算法的发展进步,针对轮廓线三维建模方法的不足,发展出了插值趋势面三维地质建模法,基于插值等势面的隐式H维建模方法又可称之为基于知识的插值方法,其以地质年代序列作为基础,以地质、地球物理推断界线和产状作为几何约束,最终基于插值方法对地质体界面进行计算<sup>[2]</sup>。

该方法能够自动综合地质数据构建三维地质模型,很少需要人工干预,计算过程快,且不受限于地质数据的方向、尺度和方位,可高效综合使用已有的多元异构的地质数据,且更新维护非常方便。通过利用多元数据进行地质及构造约束,该方法可以大幅度减少三维地质构造的不确定性。但同时受制于数据来源、网格尺度和算法本身的约束,无法对某些构造形态非常复杂或是具有高精度要求的地质模型进行构建。

在实际建模工作中,需要根据研究区的地质工作实际及研究需要,将轮廓线三维建模法和插值趋势面三维地质建模法进行有机融合,兼顾两种建模方法的优点,定会成为未来三维地质建模方法的重要研究方向。

### 2.2 证据权法三维成矿预测技术

证据权重法是一种利用确定矿产形成的后验概率圈定研究区有利成矿部位的数学模型。证据权重法是目前找矿预测中应用最为广泛的一种方法<sup>[13]</sup>。其数学原理及计算关键是:前验概率→证据权重→后验概率。

(1)前验概率,即根据已知矿点分布计算各证据因子单位区域内的成矿概率。假设每个矿点所占的单元格面积为 $u$ ,研究区的面积(以单元格为单位):

$$A(T)/u = N(T) \tag{1}$$

式(1)中: $T$ 为研究区; $A(T)$ 为面积; $N(T)$ 为单元格数目。研究区内的矿点数为 $N(D)$ ,则随机选取一个单元格中矿点的概率为 $P(D) = N(D)/N(T)$ ,也被称为先验概率。

(2)证据权重。假设研究区被划分成面积相等的 $T$ 个单元,其中有 $D$ 个单元为有矿单元。对于任意一个证

据因子,其权重定义为:

$$W^+ = \ln[P(B/D)/P(B/D^-)]$$

$$W^- = \ln[P(B^-/D)/P(B^-/D^-)] \tag{2}$$

式(2)中: $W^+$ 和 $W^-$ 分别为证据因子存在区和不存在区的权重值,对于原始数据缺失区域的权重值为0; $B$ 为因子存在区的单元数; $B^-$ 为因子不存在区的单元数。

证据层与矿床(点)的相关程度为:

$$C = W^+ - W^- \tag{3}$$

(3)后验概率。在大量地质、地球物理和地球化学等图层叠加操作的基础上计算得出。因此,其结果综合反映各种控矿因素和矿化信息对矿床的控制和指示意义。

$$O_{\text{后验}} = \exp\{\ln D1 - D + \sum ni = 1W_j^k\} \tag{4}$$

式(4)中: $W_j^k$ 为第 $j$ 个因子的权重。

预测评价结果是一个成矿后验概率图,后验概率值的大小对应着成矿概率的大小,数值越大,表明发现矿床(点)的概率越大。在确定整个预测区内的临界值后,其概率图中后验概率大于临界值的地区,即为找矿远景区。

### 2.3 逻辑回归三维成矿预测技术

虽然证据权重方法是在成矿定量预测评价领域应用最为广泛的方法,但由于其基于贝叶斯理论,并以 $W$ 多种控矿或指示要素条件独立为前提假设,因此多种控矿或指示要素之间不可避免的相关关系可能对后验概率带来一定影响。Logistic回归方法不依赖于条件分布的独立性假设,由于可被看作是一个非线性模型,因此对于多种控矿或指示要素有更强的处理和分析能力<sup>[14]</sup>。方法如下:

$$\pi(d) = \frac{e^{\alpha + \beta_i x_i}}{1 + e^{\alpha + \beta_i x_i}} \tag{5}$$

式(5)中: $\pi(d)$ 为成矿有利程度, $x_i$ 为第 $i$ 种控矿或指示要素, $(i=1,2,\dots,n)$ , $\alpha$ 是一个常数, $\beta$ 为回归因子,可由最大似然估计方法求得。当 $\beta_i = 0$ 时,成矿有利程度 $\pi(d)$ 不随 $x_i$ 出现而变化;当 $\beta_i < 0$ 时,成矿有利程度 $\pi(d)$ 将随着 $x_i$ 出现而降低;而当 $\beta_i > 0$ 时,成矿有利程度 $\pi(d)$ 将随着 $x_i$ 出现而增高。

## 3 结语

本文针对在三维空间内直观高效开展有色金属成矿预测的需要,充分利用现代信息技术,采用主流三维矿产平台Surpac软件,设计了有色金属三维成矿预测信息系统的目标、原则、体系结果、数据库和主要功能模块,并对系统关键技术进行了研究。系统融合了最新的插值轮廓线三维建模方法、三维地质体界面分析方法以及证据权法、逻辑回归法成矿预测方法,其先进性、实用性得到了保障,可为下一步系统开发及应用提供实施指南。

参考文献:

[1] 朱裕生,肖克炎,宋国耀,薛迎喜,龙宝林.成矿预测理论和方法[J].地质论评,2000,46(S1):25-29.

(下转第157页)



图 10 干涉条纹自动计数系统

## 4 结语

本文采用 CMOS 摄像头,运用图像传感技术、图像处理计数、计算机编程,在迈克尔逊干涉仪基础上实现了计算机自动记录干涉条纹移动数目,开发了基于图像处理技术的可视化自动计数系统,为干涉条纹自动计数提供了新的方法。以 COMS 摄像头和计算机硬件为基础,通过实时采集和处理干涉图样得到条纹变化,提高了测量效率,降低了测量误差并且减轻测量人员的劳动强度,可用于现有干涉计数仪器的升级改造。

### 参考文献:

[1] 何勇,王青,朱日宏等.Windows 环境下干涉图像采集和处理[J].红外与激光工程,2003,32(2):203-206.  
 [2] WERMES N. Depleted CMOS pixels for LHC proton-proton experiments[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2016(824):483-486.

[3] MAHAKUD R, PRAKASH O, DIXIT S K, et al. Analysis on the laser beam pointing instability induced fringe shift and contrast dilution from different interferometers used for writing fiber Bragg grating[J]. Optics Communications, 2009(282):2204-2211.  
 [4] SEJZEI A H, JAMZAD M. Evaluation of various digital image processing techniques for detecting critical crescent moon and introducing CMD-A tool for critical crescent moon detection[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2016,127(3):1511-1525.  
 [5] 尤政,李涛.CMOS 图像传感器在空间技术中的应用[J].光学技术,2002,28(1):3-35.  
 [6] 雷玉堂.光电检测技术[M].北京:中国计量出版社,1997  
 [7] T.帕夫利迪斯.计算机图形显示和图像处理的算法[M].北京:科学出版社,1987.  
 [8] JOHAN D, BENOIT P. Rigid image registration by general adaptive neighborhood matching[J]. Pattern Recognition, 2016(55):45-57.  
 [9] 鄢静舟.干涉图特征信息自动采集方法[J].光学技术,2000,26(1):71-75.  
 [10] PEREZ-RODRIGUEZ J, ARRO-PENA A G, GARCIA-PEDRAJAS N. Simultaneous instance and feature selection and weighting using evolutionary computation: proposal and study[J]. Applied Soft Computing, 2015(37):416-443.  
 [11] SUNUPRAPTO H, DANOEDORO P, SU R. Evaluation of pansharpening method: applied to artisanal gold mining monitoring in Gunung Pani forest area[J]. Procedia Environmental Sciences, 2016(33):230-238.  
 [12] WANG W, CHEN C, MICHAEL K NG. An image pixel based variational model for histogram equalization[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2016(34):118-134.

(责任编辑:江艳)

(上接第 152 页)

[2] 李晓晖.隐伏矿体三维成矿定量预测及系统开发[D].合肥:合肥工业大学,2015.  
 [3] 窦克林.我国地质填图迈向“三维”时代[N].中国矿业报,2011-03-24(A03).  
 [4] 祁光,吕庆田,严加永,吴明安,刘彦.先验地质信息约束下的三维重磁反演建模研究——以安徽泥河铁矿为例[J].地球物理学报,2012,55(12):4194-4206.  
 [5] HOULDING S W. 3D geoscience modeling—computer techniques for geological characterization [M]. California: Springer-Verlag, 1994.  
 [6] 黄继先,毛先成,邓浩.一种面向三维地质剖面的形体表面重构算法[J].地理与地理信息科学,2017,33(01):19-22+34.[2017-09-21].  
 [7] 杨洋,潘懋,吴耕宇,孙颖,李魁星.一种新的轮廓线三维地质表面重建方法[J/OL].地球信息科学学报,2015,17(03):253-259.  
 [8] 郭甲腾.基于剖面的三维地质建模与可视化研究[D].沈阳:东北大学,2006.  
 [9] CALCAGNO P, CHILES J P, COURRIOUX G, et al. Geological modelling from field data and geological knowledge: part I. modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2008,171(1-4):147-157.

[10] GUILLEN A, CALCAGNO P, COURRIOUX G, et al. Geological modelling from field data and geological knowledge: part II. modelling validation using gravity and magnetic data inversion[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2008,171(1-4):158-169.  
 [11] 毛先成,唐艳华,邓浩.地质体的三维形态分析方法与应用[J].中南大学学报:自然科学版,2012,43(02):588-595.  
 [12] 毛先成,周邹艳红,陈进等.隐伏矿体三维可视化预测[M].长沙:中南大学出版社,2011.  
 [13] 阎继宁,周可法,王金林等.人工神经网络在成矿预测中的应用[J].计算机工程与应用,2011,47(36):230-233.  
 [14] 黄应才,冯兴隆.平行断面法矿产资源储量估算的计算机实现与应用[J].中国铝业,2012,36(01):26-29.  
 [15] YUAN F, LI X, ZHANG M, et al. Three-dimensional weights of evidence-based prospectivity modeling: a case study of the Baixiangshan mining area, Ningwu Basin, Middle and Lower Yangtze Metallogenic Belt[J]. China Journal of Geochemical Exploration, 2014,145:82-97.  
 [16] 张道军.逻辑回归空间加权技术及其在矿产资源信息综合中的应用[D].武汉:中国地质大学,2015.

(责任编辑:江艳)