

# 基于 GIS 的三维矿体形态模拟与矿产资源评价

朱大明<sup>1,2</sup>, 蒲荣昆<sup>3</sup>, 李伟<sup>3</sup>, 刘妙龙<sup>1</sup>, 程效军<sup>1</sup>, 秦德先<sup>2</sup>

(1. 同济大学 测量与国土信息工程系, 上海 200092; 2. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;  
3. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 以 GIS 为平台, 对大量与矿区相关的信息进行采集、处理、分类、存贮、分析和管理工作; 集成地质、地球物理、地球化学、遥感等多源地学空间信息, 建立空间数学模型, 从而进行综合成矿分析及矿产资源评价; 而基于 GIS 的三维地下矿体形态模拟是进行矿产资源定位、定量预测的关键。GIS 为地学信息的综合分析及矿产资源评价开辟了广阔的前景。

**关键词:** 地理信息系统 (GIS); 矿体形态; 成矿预测

**中图分类号:** P208 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007 - 855X (2005) 03 - 0001 - 05

## 3D Ore Deposit Simulation and Mineral Resources Assessment Based on GIS

ZHU Da-ming<sup>1,2</sup>, PU Rong-kun<sup>3</sup>, LI Wei<sup>3</sup>, LIU Miao-long<sup>1</sup>, CHENG Xiao-jun<sup>1</sup>, QIN De-xian<sup>2</sup>

(1. Department of Surveying and Geo - Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 3. Faculty of Civil and Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** Massive mine information is gathered, treated, classified, stored, analyzed and managed in GIS. With the use of information data of geology, geophysics, geochemistry and remote sensing, a spatial model is set up to carry out integrative mineral analysis and resources assessment. This GIS - based 3D ore - deposit model is the key to the mineral resource quantitative prediction. GIS has opened up vast prospects for integrative processing of geosciences data and prognosis of ore resources.

**Key words:** Geography Information System (GIS); ore - deposit; ore - forming prediction

## 0 引言

地理信息系统 (GIS) 作为对地球空间数据进行采集、存储、检索、建模、分析和表示的计算机系统, 不仅可以管理以数字、文字为主的属性信息, 而且可以管理以图形图像为主的空间信息。它通过各种空间分析方法对各种不同的空间信息进行综合分析解释, 确认空间实体之间的相互关系, 分析在一定区域内发生的各种现象和过程。在矿产资源评价领域, 不管是进行区域成矿系统的研究, 还是确定矿床的有利靶区, GIS 不仅提供了在计算机辅助下对多源地学信息 (地形、地质、地球物理、地球化学、遥感信息等) 进行集成管理的能力、灵活的查询检索能力, 而且可在经验与模型的指导下, 通过各种空间分析方法对与成矿有关的各种空间信息进行综合分析解释, 确定成矿的有利地区。

矿产资源预测与评价的发展是与矿业勘查过程密不可分的。早期的矿产预测, 主要是根据地质条件进行。20 世纪 70 年代以来, 随着科学找矿的兴起以及航空、遥感 (RS)、地球物理、地球化学等找矿技术的广泛、成熟地应用, 矿产资源预测进入了一个全新阶段。近几年来, 矿产资源预测进入了一个信息更加综合、

**收稿日期:** 2005 - 01 - 10 **基金项目:** 云南省自然科学基金项目 (项目编号: 2000D0005Q、2004D0007Q); 云南省教育厅科学研究基金项目 (项目编号: 03Y195A); 省院省校合作项目 (项目编号: 2000YK - 05)。

**第一作者简介:** 朱大明 (1970 ~), 男, 博士后, 副教授。主要研究方向: 测绘、“3S”数字城市、矿业经济。

技术快速更新的新时期,主要表现在有机地将当代成矿理论与现代高新综合勘查技术结合起来,将传统的定量数值科学方法与地理信息系统(GIS)图形图像信息可视化技术结合起来。

## 1 基于GIS的矿产资源评价的优势

矿产资源评价涉及的所有信息几乎都直接或间接地与空间位置有关,属于地理信息的范畴。离开空间位置谈地质体、构造、岩性、采样、样品分析、物化探异常,谈矿产资源评价就没有意义。矿产资源评价的过程就是信息的搜集、整理、处理、成矿信息的提取、综合分析、成矿区带或找矿靶区的确定以及成果表示的过程。作为空间信息管理系统的GIS,其应用可贯穿于矿产资源评价的整个过程,表现出传统方法不可比拟的优越性。

1) 将搜集到的各种图形信息(图件)、文字描述信息、数字数据,通过合理、有效的空间数据库进行管理,可大大提高矿产资源评价的效率。空间数据库建立起来以后,可实现灵活的图形信息与属性的双向查询检索,即可从图形检索各种属性,也可根据地质体的各种专题属性检索相应的图形,还可以根据多种属性进行组合条件检索。如可在地质图空间数据库中根据地层、岩性、构造等属性检索出相应的地质体,还可从表示地质现象的点(矿床、钻孔、采样点等)、线(断层、线性构造、河流等)以及面(地层、岩体、异常区等)检索它们的属性;有利于提高研究的深度。数据库的建立与灵活的检索功能是提高矿产资源评价效率的最根本的保证。

2) GIS提供的空间分析(叠加、包含、相邻关系、缓冲区、地形分析)及空间信息计算(面积、周长、距离等)等功能,实现了传统方法难以进行的对各种地质体的多种空间关系的定量分析,这种空间分析对于研究地质现象之间的制约关系与相互作用,进而提取与矿床或矿化有关的地质标志和信息较为有效。

GIS的叠加功能可形象地理解为计算机化的透图台,是资源评价用得最多的空间分析功能。不同图形信息的叠置既可用于地质成矿信息的提取,也可用于多种成矿信息的综合分析。当然,这种透图台的功能比传统透图台的功能要强大得多。传统资源评价综合分析的最简单方法是使用透图台对多种评价图件进行直接叠置。这种方法一次最多能操作3张图件,而且由于叠置的结果很难形成中间结果保存、利用,因此也很难对更多的图件进行操作。所有GIS软件提供的空间叠加分析功能,可非常容易地实现图形叠置,而且由于叠加分析的中间结果可根据用户的需要进行保存,因此原则上可实现无限制的叠置,可方便地对更多的因素或条件进行研究,减少盲目性。计算机化的透图台的优越性还表现在对多种信息不是简单的叠加,还可通过综合分析的方法反映信息之间的关系。

缓冲区分析是通过计算在点、线、面实体周围自动形成满足一定距离要求的区域,通常用于确定影响范围,是资源评价应用比较多的另一个空间分析功能。如对已知矿床与控矿构造(断层或褶皱轴)的空间距离进行统计分析可确定最佳控矿距离,再用该距离对控矿构造进行缓冲区分析即可分析两侧不同宽度范围的矿化点分布规律,从而判断矿床与断层、褶皱轴的相关关系及构造控矿最大影响域或确定矿化有效区带。

此外,数字化的地形分析功能可自动提取地表梯度信息,计算坡度、坡向、划分汇水盆地水系和河流网,这种地形表面分析对研究地球化学元素在地表各介质环境中的聚集、扩散和迁移有特别的功效。

3) GIS为物化探和遥感数据的空间可视化创造了条件,使评价更直观。人们可将物化探异常投影到数字地形之上来直观地表达各种异常与地形的变化关系(Grunsky&smee, 1999),再比如,通过GIS矢量模型结合地质图与地球化学样品的空间分布,可对地球化学数据进行正规化处理,这样可以消除不同岩性对地球化学背景数据的影响。

4) 空间分析方法使成矿信息的综合更加合理。根据地质模型及各种数据处理方法,分别从地质、地球物理、地球化学、遥感等类信息中提取成矿信息后,如何综合分析这些成矿信息,形成最终的尽可能接近实际的评价结果,是矿产资源评价中需要解决的十分关键的问题。目前常用的布尔逻辑、证据权法、代数方法、模糊逻辑、神经网络都是综合定量的空间关系生成单幅评价图的方法。这些方法虽然都有各自的局限性,但却反映了多种成矿信息之间的关系。随着空间分析方法研究的不断深入,资源评价综合分析的精度

会越来越高, 评价结果也会越来越接近实际。

5) 基于 GIS 所建的数字数据库可反复使用。数据库一旦建立, 其中的数字数据即作为一种资源存储在计算机内。当在同一地区进行深入的研究, 或进行其他涉及库中信息的研究时, 即可应用数据库的管理功能, 检索出所需的信息。反复利用数字数据, 实现数据共享是数字数据库的基本特点。这种数据共享可提高应用的效率并降低成本。

综上所述, GIS 技术所提供的多源地学信息的管理能力、灵活的查询检索能力、空间分析方法以及计算机辅助制图的能力不仅大大提高了矿产资源评价的效率, 而且有利于发挥地学专家的主观能动性。实际上, 应用 GIS 进行矿产资源评价不仅可以加深对可用地质数据的理解, 而且可加深对地质模型本身的理解。专家们可在交互式地对多源地学信息进行对比、综合及分析中获得新的启发或认识, 完善与总结规律。这也是传统的工作方式很难或无法实现的, 是基于 GIS 矿产资源评价方法的最大优点。据有经验的地质专家估计, 采用传统手工方式, 编制一套评价图件需几个月甚至半年的时间, 因此, 即使有了新的想法, 常常因时间或经费等原因而无法实现。

## 2 地下矿体的三维数据结构分析

三维 GIS 与二维 GIS 不同, 空间实体坐标  $(X, Y, Z)$  表示在一种数据结构中, 而不是把垂直方向的第三维信息简单抽象成一个单一属性值来处理。三维 GIS 描述的是真三维现象, 比二维 GIS 要复杂得多, 这不仅仅是增加一个第三维坐标的问题, 而且涉及到三维图形显示、三维拓扑建立与维护等复杂操作。三维 GIS 的研究对象可以归纳为四类, 即点、线、面、体, 其中的线不仅包括二维 GIS 中的平面曲线, 还包括三维中特有的空间曲线, 面不仅包括二维平面, 还有三维中的空间曲面, 而体则是三维中特有的研究对象。尤其是不规则矿体, 不仅要研究其复杂的内部组织结构, 还要研究体之间的相互空间关系。矿体在几何结构、内部特性等方面都具有不规则性、不确定性、非均匀性, 矿山开采则具有典型的三维、动态特征, 整个矿山实体就是一个三维、动态、复杂的开放系统。

根据三维数据结构的几何特征可以将数据结构分为两大类: 一类是基于面表示的数据结构, 如格网结构 (grids)、形状结构 (shape)、面片结构 (facets) 和边界 (BR) 表示等; 另一类是基于体表示的数据结构, 如三维栅格结构 (arrays)、八叉树结构 (octree)、结构实体几何法 (GSG) 和不规则四面体结构 (TEN) 等。

1) 格网结构是 DEM (数字高程模型) 中常用的一种数据结构, 地形表面被分成规则的  $M$  行  $\times N$  列格网, 每个格网点有一个高程值相对应, 其基本元素是一个点, 主要用于 DEM 中等高线的 2.5 维表示, 但不能表示多重值 (如陡崖) 的表面; 形状结构通过对象表面点的斜率来描述, 基本元素是表面上各单元所对应的法线向量, 主要用于表面的三维重建。

2) 面片结构是用不同形状的面片近似表示一个对象的表面, 不规则三角形网 (TN) 是最常用的一种面片, 把高程值结合到每个三角形的顶点便形成 2.5 维表示, 可用于复杂地形表示; 边界表示是将空间对象分为点、线、面、体四类元素的组合, 每一类元素由几何数据分类标志以及与其他类元素的拓扑关系来描述, 适用于规则物体表示。

3) 三维栅格结构是一个紧密排列充满三维空间的阵列, 其元素值是 0 或 1, 这种结构无数据压缩; 针状结构是对三维栅格结构的改进, 在每个  $(X, Y)$  位置, 对其对应的  $Z$  方向进行游程编码, 以压缩数据量。

4) 八叉树结构根结点表示一个包含整个目标的立方体, 如果目标充满整个立方体, 则不再分割; 反之, 要分成 8 个大小相同的立方体, 对于每一个这样的立方体, 如果目标充满或与目标无关, 则不再分割, 否则继续将其分成 8 个更小的立方体, 按此规则一直分割到不再需要分割或达到规定的层次为止。在八叉树结构中常用的编码方法是线性八叉数编码 (LO), 在此编码中只存储实叶结点的地址码和属性值, 常用的地址码是 Morton 码, 其中隐含了叶结点的位置和大小。

5) 四面体格网 (TEN) 是将目标空间用紧密排列但不重叠的不规则四面体形成的格网来表示, 其实质是 2DTN 结构的 3D 扩展。在概念上首先将 2DVoronoi 格网扩展到 3D, 形成 3DVoronoi 多面体, 然后将 TN 结构扩展到 3D 形成四面体格网。四面体格网由点、线、面和体 4 类基本元素组合而成。整个格网的几何变

换可以变为每个四面体变换后的组合,这一特性便于许多复杂的空间数据分析.同时四面体格网既具有体结构的优点,如快速几何变换、快速显示,又可以看成一种特殊的边界表示,具有一些边界表示的特点,如拓扑关系的快速处理.在实际应用中,一个关键问题是四面体格网的自动生成.目前研究较多的是栅格算法,基本思想是:将 3D 空间用 3D 栅格表示,空间点可以通过矢量用距离变换生成 3D Voronoi 多面体,再由 3D Voronoi 多面体转换到四面体格网.

6) 混合数据结构.从以上讨论不难发现,对于八叉树结构随着分辨率的提高将成倍增加数据量,而且八叉树结构始终是一种近似表示,但八叉树结构具有结构简单、操作方便等显著优点;而四面体格网能够保存原始观测数据,具有精确表示较为复杂的空间拓扑关系的能力,但结构比八叉树复杂,在某些场合数据量较大.许多学者对八叉树和体元进行了大量的研究,希望能解决地质矿体、地下水分布等问题.后来人们发现与基于栅格的 GIS 无法解决一切问题的情况类似,基于体元或八叉树结构,也无法解决三维现象的所有问题.对于一个开采的矿山,除了矿体之外,还有许多矿井设施,有通风管道,有运输线路、有开采井道等等.用体元来表达精度是远远不够的,而且用体元表达还无法进行各种巷道之间的拓扑关系分析,所以最近人们开始了三维矢量数据模型的研究.最终结果可能是设计一种体元与三维矢量并存的系统,这样就产生了混合数据结构.

根据矿山实体与应用特性及其对 GIS 的潜在要求,可以构造出不同情况下实用的三维数据结构.但从矿山实体的复杂性、应用目标的多元性、空间对象的多尺度性来看,混合数据结构将是三维 GIS 最有效的选择.当前 GIS 发展的方向是多维、动态、集成、智能化,建立三维 GIS 应从矿山特性与应用实际出发,从三维乃至时空四维方面来研究问题,建立满足矿山应用要求的各种空间分析模型.

### 3 基于 GIS 的三维矿体形态模拟与成矿预测

某矿区 X 号矿群矿床类型主要为接触带矽卡岩硫化物型,这类矿床与花岗岩体产出的形态关系密切,矿体主要产于花岗岩体突起的顶部及其次级凹陷内. X 号矿群主要矿体的产出规律为:(1)接触面陡缓起伏交替部位及呈盆状、槽状凹陷部位的矿体;(2)产于岩脉、岩枝与主体花岗岩体交截部位的矿体;(3)产于岩舌、岩枝伸出形成三面花岗岩体包围的凹兜部位的矿体;(4)产于断裂与花岗岩体交截部位,亦称断裂扎根部位的矿体.

根据由收集的揭露花岗岩体的 433 个钻孔,应用 GIS 建立了花岗岩体的数学模型,绘制出了花岗岩体顶板等深线图(见图 1)及立体模型(见图 2、图 3).

从图中可以看出,花岗岩体南高北低,形成了一条向北东方向延伸的脊状突起,其上有 5 个小岩株突起,形成 4 个凹兜,5 个尖部;在 X 号矿群的北东方向,即芦塘坝断裂与炸药库断裂的交截部位,花岗岩体呈舌状突起.根据 X 号矿群主要矿体的产出规律,我们推测 X 号矿群的北东方向为 X 号矿体群外围最有利成矿和找矿空间,存在多个规模不等的矿体.需要说明的是, X 号矿群的北西侧也存在着花岗岩有利成矿部位,但由于工程控制程度差,所以暂不作为找矿的首选方向.

通过工程验证,证实了多个矿体的存在;新增 Sn、Cu 金属量约 5.0 万 t

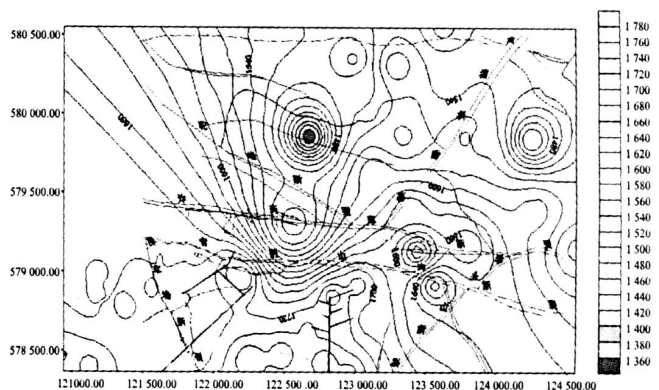


图1 花岗岩体等深线图  
Fig.1 Depth contours model of granite mass

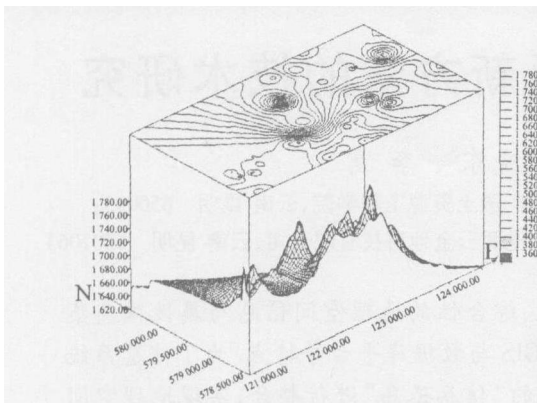


图2 花岗岩体立体模型A  
Fig.2 Contours 3D model A of granite mass

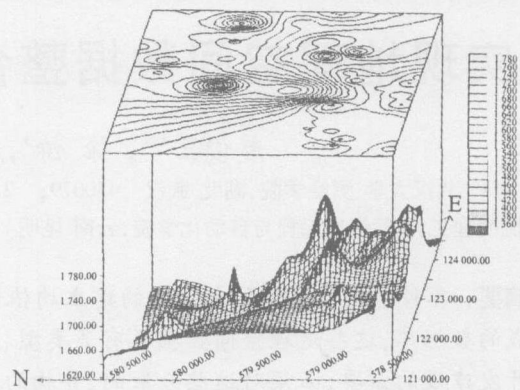


图3 花岗岩体立体模型B  
Fig.3 Contours 3D model B of granite mass

#### 4 结论

GIS应用于成矿预测,可以客观合理地分析多源地学信息,大大提高了工作效率,为地质勘查及矿山生产提供了科学依据。GIS空间分析方法使成矿信息的综合更加合理。根据地质模型及各种数据处理方法,分别从地质、地球物理、地球化学、控矿岩体等类信息中提取成矿信息后,如何综合分析这些成矿信息,形成最终的尽可能接近实际的评价结果,是矿产资源评价中需要解决的十分关键的问题。

基于GIS的三维矿体的形态模拟方法,为地下矿体的准确定位提供了科学、可视化的手段,对矿产资源的定量预测也极为重要。依据矿体的空间形态所进行的探矿工程设计,可避免探采工程盲目性,减少矿产资源、探采工程的浪费和环境污染。

#### 参考文献:

- [1] Lesley Wyborn. Using GIS for Mineral Potential Evaluation in Areas with Few Known Mineral Occurrences[C]. Second National Forum on GIS in the Geosciences, 1995
- [2] Jones C B, Kinder D B. Database Design for a Multi Scale Spatial Information Systems[J]. Int J Geographical Information Systems, 1996, 10(8): 901 ~ 920.
- [3] WU Chong-long. Computer Technology and Informatization of Geology - Mine Tasks[J]. Geology Frontier, 1998, 5(1, 2): 343 ~ 353.
- [4] Knox - Robinson. Towards a holistic exploration Strategy: Using Geographic Information Systems as a tool to enhance exploration[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 1997.
- [5] 邬伦, 刘瑜, 等. 地理信息系统—原理、方法和应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [6] 朱大明, 高建国, 秦德先. 数字地球与地质矿产资源开发利用 [J]. 地矿测绘, 2001, 62(1): 37 ~ 40.
- [7] 肖克炎. 矿产资源 GIS调查评价现状 [J]. 矿产资源评价理论与方法技术, 2001, (4): 159 ~ 167.
- [8] 姜作勤. 地理信息系统在矿产资源评价中的应用现状 [A]. 当代矿产资源勘察评价的理论与方法 [C]. 北京: 地震出版社, 1999. 397 ~ 406.
- [9] 朱大明, 秦德先, 方源敏. 基于GIS的数字矿区与矿产资源预测方法研究 [J]. 地矿测绘, 2003, 73(4): 5 ~ 7.