

## 三维地质建模及应用实例

张宝一<sup>1</sup>, 吴湘滨<sup>1</sup>, 王丽芳<sup>1</sup>, 刘修国<sup>2</sup>, 吴信才<sup>2</sup>

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

2. 中国地质大学(武汉)信息工程学院, 武汉 430074)

**摘要:** 文章介绍了实体模型、场模型和混合模型三类空间数据模型及其相应的三维地质构模方法, 列举了三维地质构模在矿产资源评价、城市地质、地下水资源评价方面的 3 个应用实例。在矿产资源评价中的应用是实体模型与场模型的集成, 三维显示与检索采用实体模型, 资源量估算和矿化分布预测采用场模型; 在城市地质中的工程地质层状地质体建模采用多层 DEM 构模法, 介绍了基于三维地层模型的剖切等应用分析; 地下水资源评价中含水层组的三维建模采用剖面构模法, 以水文地质剖面为建模数据源, 辅以钻孔、含水层组底界埋深等值线、地表高程等值线等作为约束条件。

**关键词:** 三维地质建模; 实体模型; 场模型; 应用实例

**中图分类号:** O23;P628 **文献标识码:** A

### 0 引言

随着“数字矿山”“数字油田”“数字城市”等概念的日趋成熟, 二维空间信息表达方式的局限性愈来愈明显, 众多地学研究领域都迫切需要从真三维空间角度来分析和解决问题, 从而将三维地质建模研究推向了前所未有的战略高度。所谓三维地质建模, 是指运用现代空间信息理论和技术, 在计算机中建立能反映地质空间内部结构与各要素之间的关系及其物理、化学属性的空间分布等地质特征的数学模型, 对地质空间及相关的人类工程活动进行真三维再现和分析的科学与技术<sup>[1]</sup>。

Houlding 最早详细地阐述了实现地下三维可视化技术的一些基本方法, 涵盖了空间数据库的建立、三角网的生成方法、三角网面模型的构建方法、地质边界的圈定和连接、储量计算方法、采矿设计等诸多地下三维可视化技术的核心理论, Lynx 软件系

统就是基于该理论体系实现的<sup>[1]</sup>。Mallet 基于一系列互联的曲面提出一种新的地质目标计算机辅助设计方法, 以适应地质、地球物理和油藏工程中三维实体与属性建模的需要, 该方法体系是 GoCAD 软件系统的主要技术支撑<sup>[2]</sup>。吴立新等将三维地质建模的应用分为三维可视化、三维查询、三维分析、工程应用 4 个目标层次, 城市、矿山与岩土工程领域信息化的快速发展促进了高层次 3D 地学空间建模与应用系统的研发<sup>[3]</sup>。潘懋等概括了“多源数据-多方法集成-多层次干预”的三维地学模拟“三多”建模思路<sup>[4]</sup>。三维地质建模的迅速兴起正逐渐改变着传统的地质工作方式, 不同期次、来源、类型的数据得以在统一的平台下进行整合, 从而使经年积累的地质资料得到充分有效的开发和利用。在可以预见的未来, 地质资料电子成果将不再以报告、图表等方式提交, 取而代之的将是三维数据集(其中包括三维地质模型和相关原始数据等); 三维地质建模也为后续的三维可视化的数值分析提供数据和技术支撑, 可以在构造模拟、工程勘察、矿产开发、油气藏勘探和地

收稿日期: 2013-09-13; 改回日期: 2013-01-09; 责任编辑: 赵庆

基金项目: 国家自然科学基金(编号:41102204)和中南大学自由探索计划(编号:201012200069)资助。

作者简介: 张宝一(1979-), 男, 讲师, 博士, 2007 年毕业于中国地质大学(武汉), 主要研究方向为三维地质建模、地理信息系统应用工程。E-mail: csuzby@gmail.com

通信作者: 吴湘滨(1962-), 男, 博士, 教授。E-mail: wuxb@csu.edu.cn

下水模拟等领域开展更深入的研究。三维地质建模将是不同专业、期次、来源、类型的数据在统一的环境下进行集成、建设多源地学数据仓库的有效途径<sup>[5]</sup>。

## 1 三维空间数据模型

三维地质建模所研究对象的特殊性对三维空间数据模型提出了更高的要求,不仅要表达地学对象本身及其之间的拓扑关系,而且还要能够存储和管理地学对象的属性信息。三维空间数据模型按照其组织形式可分为基于实体(要素)的模型、场模型和混合数据模型 3 类。

### 1.1 实体(要素)模型

实体(要素)的模型将三维地质空间表示为点、线、面、体 4 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的关系。由于地质界面之间以及地质体与地质界面之间的关系错综复杂,设计合理的拓扑数据结构以表达地质体各构造元素之间的拓扑关系是十分必要的。三维实体模型按照其拓扑关系表达方式,可分为多层 DEM 模型、边界表示模型、线框模型、断面模型等几种。

(1)多层 DEM 模型:适合在地质领域描述层状分布的岩(土)层,该模型以若干 DEM 分别模拟各个地质分界面,再进行缝合处理以达到对层状地质体建模<sup>[6]</sup>。

(2)边界表示(B-rep)模型:通过构造地质体的外表面来表达三维地质体,将空间对象分解为 7 类基本元素的组合,即域(region)、壳(shell)、体(volume)、面(face)、环(loop)、边(edge)、点(vertex),各类元素由几何数据、类型标识码以及其他类元素的关系组成<sup>[7-8]</sup>。

(3)线框(wire frame)模型:建立实体棱边起点至终点坐标的线段表,形成一系列空间多边形,然后把些多边形面拼接起来构成一个多边形网格作为三维实体的外形线。

(4)断面(section)模型:通过一系列平面图或剖面图来描述地质体的空间形态,记录地质信息,适合在地质领域描述特定剖面上的矿床或构造形态。

### 1.2 场模型

场模型是将三维地学空间剖分为规则或不规则体元构成的连续场,侧重于表达三维地质空间内物理、化学属性的空间分布特征。规则体元一般用于

地球物理场和地球化学场建模,如三维栅格结构和八叉树模型是一种无采样约束的面向场物质(如重力场、电磁场、矿体品位)的连续空间的标准分割方法;不规则体元是一种可用于描述有采样约束的地质地层界面、地质构造的面向实体的三维数据模型,如四面体格网和三棱柱模型可以精确描述地质体的表面形态,并可以像实体模型一样具备拓扑关系。

(1)三维栅格(3D raster)结构:以一组规则尺寸的三维栅格来剖分所要模拟的空间,并建立与属性的实时关联,它是二维栅格在三维中的拓展。

(2)八叉树(octree)模型:用层次式的三维空间子区域来代替大小相等、规则排列的三维栅格,实质上是对三维栅格结构的压缩改进,它是二维四叉树在三维空间中的扩展。

(3)四面体格网(TEN)模型:其实质是 2D TIN 结构的 3D 扩展,基本思路是用三维 Delaunay 四面体化算法将三维空间中无重复的散乱点集剖分构成四面体格网。

(4)三棱柱(TP)模型:以三棱柱体作为基本体元,三棱柱体包含的几何元素有点、三角形边、三角形面、四边形面,针对地质体尖灭、错断等复杂地质体建模,三棱柱体元又演变为类三棱柱(ATP)<sup>[9]</sup>、似三棱柱体(QTPV)<sup>[10]</sup>及广义三棱柱(GTP)<sup>[11-12]</sup>等形式。

### 1.3 混合数据模型

从实际应用效果来看,场模型适合于空间运算与空间分析,但难以精确表达地质体边界且数据量大;实体模型数据量小,便于数据显示与空间查询,但不能表达地质体内属性变化,且难以组织有效的空间分析。由于三维形态和拓扑的复杂性,很难用统一的数据模型对多变的三维空间信息进行完整有效的描述,采用混合数据模型不失为一种可行的方法,一个好的混合模型应该既具备边界模型结构简洁、精确的优点,又拥有体元模型简单、通用的长处。史文中提出了不规则三角网(TIN)和八叉树的混合数据模型<sup>[13-14]</sup>;李德仁和李清泉提出了适用于海洋、地质领域的基于八叉树和四面体的混合模型<sup>[15-16]</sup>;熊伟等提出了基于 TIN 的不规则五面体模型<sup>[17]</sup>;程朋根等提出适合地质勘探领域的基于多层 DEM 与似三棱柱体元的混合三维数据模型<sup>[6]</sup>。

目前,三维地质建模既没有统一的标准数据模型,也没有形成能为大多数人所接受的理论与模式,因而针对具体的地质数据特征、地质体形态和应用目的,可能会选择截然不同的数据模型。

## 2 三维地质建模方法

### 2.1 三维地质实体建模方法

基于实体的三维地质建模方法,以物体边界为基础定义和描述几何形体,以构成地质空间各要素(地质面/地质体)之间的拓扑关系作为约束条件,通过拼接、切割、指定等方式达到构建整个地质空间的目的,并给出完整和显式界面描述。常见的基于实体的三维地质建模方法有:

(1)多层 DEM 构模法:首先按 DEM 的方法表达每个岩(土)层界面;然后根据岩(土)层的类别对地质空间进行交叉划分处理,形成三维地层模型的骨架结构;再将多层 DEM 表面两两缝合成三维地质模型<sup>[18-19]</sup>。以钻孔采样点为主要数据源的三维地质实体建模一般采用多层 DEM 法,但该方法难以处理非连续型地质体(区域内存在断层情况)、地质界面为多值曲面(褶皱型地质体)、地层存在分支或倒转等复杂的地质情况<sup>[20]</sup>。

(2)边界表示构模法:用多个面(可以是断层面、地层面、边界面或其他地质界面)围成的封闭空间来表达地质体,而不是仅仅用顶、底、侧面,其基本思路是:首先将三维地质空间按某种规则(如断层格局、褶皱分段)划分成不同的子空间;然后将各个子空间按一定的规则(如地层年代、岩性)分解成若干独立的地质体,每个地质体又由地质界面、断层面与空间边界面围成;这些地质体集成在一起就得到了一个完整的三维地质模型<sup>[2,20-22]</sup>。

(3)线框构模法:在人机交互干预下,把地质界面上的点用线段连接起来,形成一系列空间多边形,再把这些多边形面拼接起来形成一个空间多边形网格(即线框模型)来模拟地质边界<sup>[23-26]</sup>。

(4)断面构模法:将剖面图(或断面图)作为主要的数据源,剖面图勾勒出的是剖面与地质体的交线,表现为长短不一的轮廓线(开放或闭合),通过在一组平面图或剖面图上的二维轮廓线之间建立对应关系,并将对应的轮廓线拼接起来表示地下地质界面<sup>[27-31]</sup>。

### 2.2 三维地质场建模方法

基于场的三维地质构模方法将三维地质空间抽象为三维体元的集合。常见的基于场的三维地质构模方法有:

(1)八叉树构模法:将三维地质空间逐级细分成

8 个卦限,均质卦限采用较大的体元,非均质卦限则继续细分到均质体元为止<sup>[32-33]</sup>。该方法由勘探网度调节体元的大小,具有可调节的分辨率,可对空间进行逐次分解,用合适精度来表示地质实体。

(2)四面体构模法:是二维 Delaunay 三角剖分算法在三维中的推广,即依据空间中的三维散乱数据点,利用三维 Delaunay 法则把空间剖分成一系列邻接但不重叠的不规则四面体,该方法能够表达不规则边界的复杂地质体的几何形态,并可以通过四面体间的邻接关系反映空间实体间的拓扑关系<sup>[22,34-35]</sup>。

(3)三棱柱构模法:用上下对应三角形和竖直方向的 3 条棱构成的三棱柱体元对三维空间进行剖分,三棱柱体元形态拓展后 3 条棱边可以不平行、顶底面也可以不平行、棱边长度可以为零等<sup>[11,36-38]</sup>。

### 2.3 实体模型与场模型的相互转换

场模型可以表达矿石品位、温度、孔隙度、煤层、油藏等地质属性,是在三维空间中连续变化的场;实体模型是以 TIN 等网格表面围成的空间闭合实体。由于三维地质建模中实际问题的复杂性,实体模型和场模型往往需要互相转化<sup>[39]</sup>。场模型的构建需要依赖实体建模得到的地质体封闭表面(将表面封闭的地质体转换为三维体元的集合),因为场的某些属性值在地质体内是渐变的,而在地质体边界位置却发生突变;对场的属性值按照某种规则进行分类,可以得到各类别的分界面,抑或提取某一属性的等值面,其结果就是由三维分界面组成的地质实体。

由实体模型转化为场模型,就是将目标的点、线、面、体等要素用规则或不规则体元的有序集合表示。将实体模型转换为由立方体或长方体体元构成的三维栅格结构,这一过程可看作是对空间多面体的三维栅格化,关键是要区分多面体内和体外的点的属性值,即判断任意一点与多面体的位置关系,通常采用基于交点个数法或向量运算法进行判别<sup>[30]</sup>。由多层 DEM 法构建的实体模型,地层面由钻孔数据插值拟合而成,其上下对应的不同层之间则是由规则网格分解而成的三角网,因此,上下对应三角形和竖直方向的 3 条棱即构成了三棱柱体元,对于棱边有一或两条长度为零、三棱柱的侧面不是平面、棱柱顶底面也不平行等情况可作为特殊三棱柱体元<sup>[1,10-12,40]</sup>。以实体模型中的点、边、面和体为约束的 Delaunay 四面体剖分可以将实体模型转换为场模型,但仅限于空间实体内部结构的划分,难于表达三维面状实体及线状实体<sup>[41-42]</sup>。

### 3 三维地质建模应用实例

随着现代地质勘察与勘探技术的发展以及 GIS 空间数据库的信息积累,越来越多的三维地质建模软件系统在为推动相关行业的发展发挥着作用。

#### 3.1 矿产资源评价中的应用

三维地质建模软件系统在矿产资源领域的应用由来已久,比较有代表性的有 Surpac, Micromine, Vulcan, Lynx, Gemcom, Datamine, MVS, Mine-Sight 等<sup>[9,25,43]</sup>。利用地质体三维可视化技术以直观的方式展示地下三维空间的极其不规则的地质构造、矿体、勘探工程(槽探、井探、坑探、钻探)、巷道等实体,能够帮助地质工作者有效地处理矿山勘查和开采中获取的大量野外测量和样品分析数据,从而更好地指导矿业开发,减少矿山开发的风险<sup>[30,44]</sup>。三维地质建模在辽宁红透山铜矿外围及深部部隐伏矿体成矿预测中的应用<sup>[45-46]</sup>,其基本思路为:

(1)构建实体模型。二维轮廓线重构三维表面技术是由剖面(断面)上的地质体截面形态来构建三维地质实体模型的主要算法。将勘探区的所有勘探线剖面(或中段地质平面图)映射到三维空间,按照地质体的趋势,利用轮廓线重构面技术在相邻勘探线(或中段)之间用三角网连接三维地质体表面,就构成了地质体的实体模型。图 1 为红透山铜矿从中段平面图上提取的矿体轮廓线及建立的三维矿体模型。

(2)构建场模型。实体模型是以 TIN 面表示的空间封闭实体的集合,一般用于三维可视化显示;在进行矿化分布、地质控矿因素表达时则通常使用三维场模型,即将整个三维地质空间剖分为连续场,实

现在统一的三维可视化仿真环境中对地质、物化探、勘探数据等多源地学数据进行有效的集成<sup>[46]</sup>。图 2 为红透山矿体中 Cu,Zn,S,Au,Ag 元素品位的三维场模型。

(3)估算资源量。由于计算体积方法的不同和划分计算单元方法的差异,形成了各种不同的资源量估算方法,常用的有地质块段法和断面法(包括垂直剖面法和水平断面法)等。在矿体三维实体模型建立后,可以根据地质人员的指令来交互式地划分块段,块段体积和资源量可以根据实体模型计算得到。若建立了矿体的三维场模型后,也可以根据地质统计学的理论与方法进行矿体的品位估计和资源量估算。在资源量估算的基础上,还可以对任意块段和矿区资源量进行分类管理和品位吨位曲线统计。

(4)矿化分布预测。连续场模型不但反映各地质要素的空间异质性,同时也便于在三维空间中分析其分布及异常特征,通过对这些场进行叠加运算、缓冲区分析等可以考量其在空间上与矿体形成的关系。判断在三维地质空间中 2 个或多个地质现象是否相关是成矿预测首要解决的问题,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。找出分布在同一个三维地质空间内的不同地质要素之间的关联程度,就可建立控矿要素与矿化分布间泛函关系的定量预测模型,开展矿化分布的预测。

#### 3.2 城市地质中的应用

为保障城市的可持续发展,协调区域发展与地质环境间的关系,对区域地下空间信息(特别是地下地质信息)进行全面详细的调查与研究,预测城市发展引起的地质环境变化,就要将区域地下空间信息化建设纳入“数字城市”系统工程的框架之中。

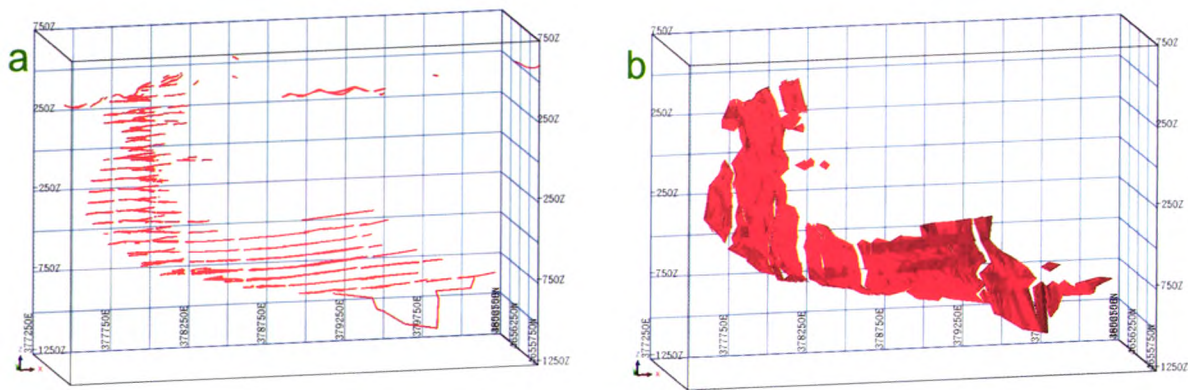


图 1 辽宁红透山铜矿三维矿体轮廓线(a)及实体模型(b)

Fig. 1 3D ore-bodies contours(a) and entity model(b) of Hongtoushan copper mine, Liaoning



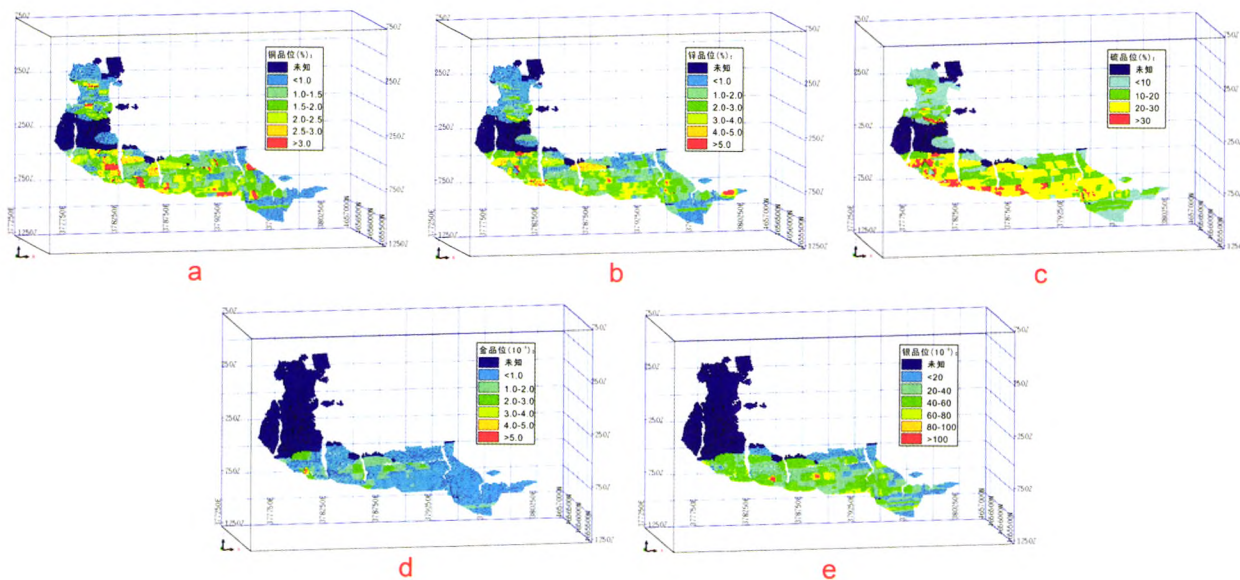


图 2 红透山矿体 Cu,Zn,S,Au,Ag 元素品位场模型  
Fig. 2 Copper, zinc, sulfur, gold, and silver grade field models  
of ore-body in Hongtoushan copper mine

a. Cu 品位模型; b. Zn 品位模型; c. S 品位模型; d. Au 品位模型; e. Ag 品位模型

2004 年以来,我国先后启动了环渤海、长江三角洲、珠江三角洲等三大都市圈中心城市的多参数立体地质调查工作,即围绕制约城市可持续发展的资源、环境等综合因素,在城市行政区综合考虑各种地质因素,采用地质、测绘、遥感、物探、化探、钻探、监测、测试和计算机等现代综合方法和手段,以已有地质资料为基础,开展多学科、多目标、多用途的综合城市三维地质调查,为三维地质建模技术的发展提供了机遇和挑战<sup>[8,47-48]</sup>。三维地质建模技术通过对城市地质体在地下空间的相对位置、形态、物化特征等三维可视化表达,应用于城市岩土工程的勘察、设计、施工的全过程,有助于制订出符合地质现象分布变化规律的工程设计与施工方案。以“上海市三维可视化城市地学信息咨询与服务系统”的设计与开发为例<sup>[28,49-50]</sup>,三维地质建模在城市地质中的典型应用包括:

(1)工程地质三维建模。工程(水文)地质三维建模的研究对象多呈层状或似层状,即岩(土)层的界面多为单值曲面,故宜采用多层 DEM 构模法来建立三维地质实体模型,建模的数据源包括钻孔、剖面图、等值线数据。建模的基本思路为:利用各钻孔、剖面或其他能揭示岩层分界点、岩体工程特性分界点、岩体构造的实测数据,按照 DEM 的方法对各个层面进行插值和拟合运算,并在同一坐标系中表示出来,每一岩层就能形成相对应的 DEM;再

将多层 DEM 表面模型边界两两缝合形成空间中严格按照地层属性为要素划分的三维岩(土)层模型。图 3 为上海市临港新城的工程地质层三维模型。

(2)三维模型可视化交互分析。在三维环境下可以对地质实体模型进行缩放、平移、剥离、叠加、拾取、纹理、透明及飞行模拟、虚拟漫游、属性查询等操作,从不同角度和方位观察模型。也可对三维地质模型进行任意切割分析,利用平面斜切、水平剖切、折线垂直剖切、组合剖切等操作模拟立体栅状图、模拟基坑开挖效果,如图 4 所示。

(3)虚拟钻探分析。虚拟钻探是指在三维地质

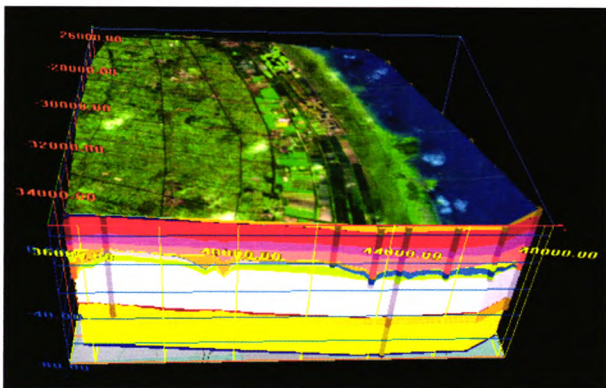


图 3 上海市临港新城工程地质层三维模型  
Fig. 3 3D model of engineering geological layers  
in Lingang New City, Shanghai



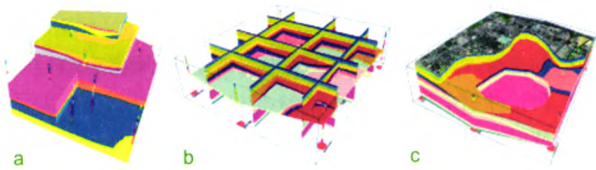


图 4 三维地质模型的剖切  
Fig. 4 Cutting of 3D geological model  
a. 组合剖切; b. 立体栅状图; c. 基坑开挖

模型建立后,由给定待钻探位置坐标及钻探深度后,分析钻孔遇到的地层属性及结构状况,并结合周围已知钻孔资料,获取像钻探一样得到“岩心结构”。

3.3 地下水资源评价中的应用

地下水资源信息表达不仅是量上的概念,更重要的是其在空间上的分布,进行地下水资源的计算,需要表达与之相关联<sup>[51]</sup>。运用三维地质建模与可视化技术,可直观地表达地下水水文地质层的结构及其内部物理、化学属性(即地下水的赋存环境),地下水水位、水质等的时空分布及地下水流场的运动变化规律,地下水降落漏斗的形成与发展过程以及地下水污染物的运移规律,从而辅助决策地下水资源的开采<sup>[52-56]</sup>。GMS, Visual Mod-Flow, Visual Groundwater, PHREEQC, HST-3D, TNT-mips 等地下水三维模拟软件已在国内外地下水资源评价领域中广泛使用。以华北平原含水层组三维模型的构建为例<sup>[28]</sup>,其建模步骤如下:

(1)水文地质剖面处理。为构建华北平原含水层组三维模型,共搜集了水文钻孔 1 620 个,依照钻孔信息绘制了华北平原水文地质剖面图 31 幅(图 5)。为反映含水层组宏观上的地质概况,以含水层岩性为基础,以水文地质条件为依据,结合中层咸水的分布和地下水开发利用状况,对水文地质剖面数据进行概化,将埋深 400 m 以上的含水层划分为 4 个含水层组:Ⅰ含水层组,基本以第四系上更新统底界面为下限;Ⅱ含水层组,基本以第四系中更新统底界面为下限,主要对应于第四系中更新统地层;Ⅲ含水层组,基本以第四系下更新统底界面为下限,主要对应于第四系下更新统地层;Ⅳ含水层组,属于新近系明化镇组上段地层。

(2)水文地质剖面处理。以水文地质剖面数据为主,以水文地质钻孔数据、含水层组底界埋深等值线数据、地表高程等值线数据等作为约束条件,建立了华北平原含水层组三维模型(图 6)。模型构

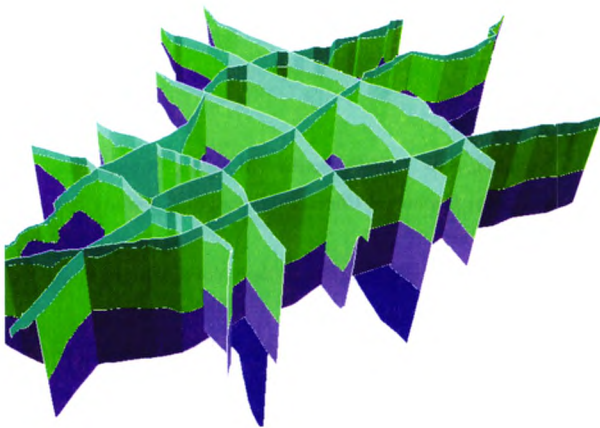


图 5 华北平原水文地质剖面(局部)  
Fig. 5 Local hydrogeological cross-sections  
of North China Plain

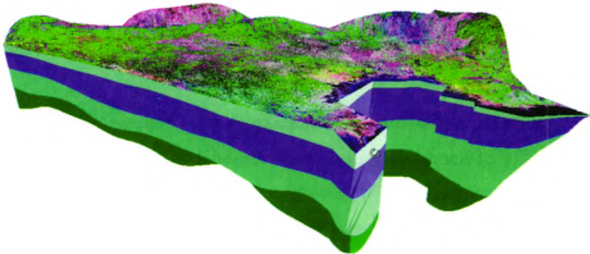


图 6 华北平原含水层组三维模型  
Fig. 6 3D model of aquifers in North China Plain

建之后可采用四面体等体元模型对其进行剖分,用于复杂地下水场问题的有限元分析。

4 结语

由于地质体本身的不规则性(表现出自然形和任意形)、采样有限性(大多数是稀疏的、随机的、不充足的)、地质重构的特殊性(地质界面必须精确通过采样点,与机械设计中的自由曲线曲面造型技术有本质区别)、应用目的差异性的特点,还未能成为大多数人所接受的三维地质建模模式,因此三维地质建模仍将是 3D GIS、地球科学、三维计算机图形学等各相关领域研究的热点和难点。

致谢:红透山矿业有限公司、上海市地调院及地科院水文地质环境地质研究所在资料收集及论文研究中给予了大力支持,教育部 GIS 软件及其应用工程中心与中南大学共建“MAPGIS 实验室”为

本研究工作提供了 MAPGIS 软件,在此一并表示感谢。

### 参考文献:

- [1] Houling S W. 3D Geoscience Modeling: Computer Techniques for Geological Characterization[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1994.
- [2] Mallet J L. Geomodeling[M]. New York: Oxford University Press, 2002.
- [3] 吴立新,车德福,郭甲腾. 面向地上下无缝集成建模的新一代三维地理信息系统[J]. 测绘工程, 2006, 15(5): 1-6.
- [4] 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.
- [5] Zhang B Y, Wu X B, Wang L F, et al. The preliminary research of feature-based 3D geological modeling[C]// 2010 2nd Conference on Environmental Science and Information Application Technology (ESIAT'2010). Wuhan, China. 2010: 321-325.
- [6] 程朋根. 地矿三维空间数据模型及相关算法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [7] Sakalis T, Shen G, Patrikalakis N M. Representational validity of boundary representation models[J]. Computer-Aided Design, 2000, 32: 719-726.
- [8] 刘修国. 城市地质信息平台三维关键技术研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2004.
- [9] 吴立新,张瑞新,戚宜欣,等. 3 维地学模拟与虚拟矿山系统[J]. 测绘学报, 2002, 31(1): 28-33.
- [10] Gong J, Cheng P, Wang Y. Three-dimensional modeling and application in geological exploration engineering[J]. Computers & Geosciences, 2004, 30(4): 391-404.
- [11] Wu L X. Topological relations embodied in a generalized tri-prism (GTP) model for a 3D geoscience modeling system[J]. Computers and Geosciences, 2004, 30(4): 405-418.
- [12] 吴立新,陈学习,史文中. 基于 GTP 的地下工程与围岩一体化真三维空间构模[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(6): 1-6.
- [13] Shi W. A Hybrid Model for 3D GIS[J]. Geoinformatics, 1996(1): 400-409.
- [14] Shi W. Development of a hybrid model for 3D GIS[J]. Geospatial Information Science, 2000, 3(2): 6-12.
- [15] 李德仁,李清泉. 一种三维 GIS 混合数据结构研究[J]. 测绘学报, 1997, 26(2): 128-133.
- [16] 李清泉. 基于混合结构的三维 GIS 数据模型与空间分析研究[D]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1998.
- [17] 熊伟,毛善君,马嵩乃,等. 面向地质应用的三维数据模型研究[J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30(6): 11-15.
- [18] Lemon A M, Jones N L. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections[J]. Computers and Geosciences, 2003, 29(5): 547-555.
- [19] Kaufmann O, Martin T. 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines[J]. Computers and Geosciences, 2008, 34(3): 278-90.
- [20] 何满潮,刘斌,徐能雄. 工程岩体三维可视化构模系统的开发[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(1): 38-43.
- [21] Wu Q, Xu H. An approach to computer modeling and visualization of geological faults in 3D[J]. Computers and Geosciences, 2003, 29(4): 503-509.
- [22] Wu Q, Xu H, Zou X K. An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration[J]. Computers and Geosciences, 2005, 31(1): 35-43.
- [23] 刘修国,陈国良,侯卫生,等. 基于线框架模型的三维复杂地质体建模方法[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2006, 31(5): 668-672.
- [24] Perrin M, Zhu B, Rainaud J F, et al. Knowledge-driven applications for geological modeling[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2005, 47(1/2): 89-104.
- [25] 王李管,曾庆田,贾明涛,等. 复杂地质构造矿床三维可视化实体建模技术[J]. 金属矿山, 2006(12): 46-49.
- [26] Roberto V, Chiaruttini C. Modeling and Reasoning Techniques in Geologic Interpretation[J]. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 1999, 29(5): 460-473.
- [27] Xu C, Dowd P A. Optimal construction and visualisation of geological structures[J]. Computers and Geosciences, 2003, 29(6): 761-73.
- [28] 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.
- [29] 潘懋,陈学工,薛胜,等. 三维复杂实体表面生成方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2003(13): 7-8.
- [30] 张宝一,尚建嘎,吴鸿敏,等. 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.
- [31] 吴立新,史文中,Gold C. 3D GIS 与 3D GMS 中的空间构模技术[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(1): 5-11.
- [32] 李清泉,李德仁. 三维空间数据模型集成的概念框架研究[J]. 测绘学报, 1998, 27(4): 325-330.
- [33] Vigar A, Mall V, New B, et al. 3D geological modelling of the Campbell Mine, Ontario, Canada[C]// Dominy S. 5th International Mining Geology Conference. Parkville Victoria; Australasian Inst Mining & Metallurgy. 2003: 181-186.
- [34] 武强,关文革,贾丽萍,等. 面向矿区复杂地质体的四面体生成算法[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(5): 617-620.
- [35] Xue Y, Sun M, Ma A. On the reconstruction of three-dimensional complex geological objects using Delaunay triangulation[J]. Future Generation Computer Systems, 2004, 20(7): 1227-1234.
- [36] 吴立新,陈学习,车德福,等. 一种基于 GTP 的地下真 3D 集成表达的实体模型[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2007, 32(4): 331-335.
- [37] 曹代勇,王占刚. 三维地质模型可视化中直接三维交互的实现[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(4): 384-387.
- [38] 毛善君. 灰色地理信息系统: 动态修正地质空间数据的理论

- 和技术[J]. 北京大学学报:自然科学版,2002,38(4):556 - 562.
- [39] 李青元,林宗坚,李成明. 真三维 GIS 技术研究的现状与发展[J]. 测绘科学,2000,25(2):47 - 51.
- [40] 白世伟,贺怀建,王纯祥. 三维地层信息系统和岩土工程信息化[J]. 华中科技大学学报:城市科学版,2002, 19(1):9 - 12.
- [41] Tertois A L. Preserving Geological Information during Real-Time Editing of Faults in Tetrahedral Models[J]// Int. Assoc. for Mathematical Geology XIth International Congress. Liège, Belgium. 2006:S14 - 24.
- [42] Shikhare D, Gopalsamy S, Reddy T S, et al. Zeus: surface modeling, surface grid generation, tetrahedral volume discretization[J]. Computers & Graphics, 1999, 23:59 - 72.
- [43] Zhou Y, Lin G, Gong F X, et al. Application of 3D visual techniques in Daliuta coal mine[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2006, 16(1): 77 - 81.
- [44] 尚建嘎,刘修国,张宝一. 层次风格固体矿产储量估算软件体系结构设计[J]. 计算机应用研究,2007,24(8): 255 - 257, 261.
- [45] 刘文玉,吴湘滨,张宝一,等. 红透山矿区三维地质建模与可视化研究[J]. 科技导报,2011,29(11):48 - 51.
- [46] 张宝一,吴湘滨,王丽芳,等. 红透山铜矿外围隐伏矿体三维定量预测[J]. 中国有色金属学报,2012,22(3): 863 - 871.
- [47] 吴冲龙,牛瑞卿,刘刚,等. 城市地质信息系统建设的目标与解决方案[J]. 地质科技情报,2003,22(3):67 - 72.
- [48] Zhu L F, Wu X C, Yin K I, et al. Study of Management and Service System of Urban 3D Geological Data Supported by 3D GIS[J]. 华中科技大学学报:城市科学版,2003,20(4):40 - 46.
- [49] Hou W S, Liu X G, Wu X C, et al. Development of urban geological information data center: a case study in Shanghai [C]// Wang J, Xia J H, Chen C. Near-Surface Geophysics and Human Activity. Beijing: Science Press Beijing. 2008: 556 - 559.
- [50] Hou W S, Liu X G, Wu X C, et al. Development of Urban Geology information System Based on MapGIS[C] // 2009 Third International Symposium on Intelligent Information Technology Application. Los Alamitos. 2009:714 - 717.
- [51] 张永波,张雪松,张礼中. 地下水资源信息化管理的可视化技术应用[J]. 地理学与国土研究,2002,18(6):87 - 89.
- [52] Tiren S A, Askling P, Wanstedt S. Geologic site characterization for deep nuclear waste disposal in fractured rock based on 3D data visualization[J]. Engineering Geology, 1999, 52 (3/4): 319 - 346.
- [53] 武强,徐华. 地下水模拟的可视化设计环境[J]. 计算机工程,2003,29(6):69 - 70.
- [54] Gudbjerg J T, Heron T, Sonnenborg O, et al. Three-dimensional numerical modeling of steam override observed at a full-scale remediation of an unconfined aquifer[J]. Ground Water Monitoring and Remediation, 2005, 25 (3): 116 - 127.
- [55] Robins N S, Rutter H K, Dumbleton S, et al. The role of 3D visualisation as an analytical tool preparatory to numerical modelling[J]. Journal of Hydrology, 2005, 301(1/4): 287 - 295.
- [56] Lelliott M R, Bridge D M, Kessler H, et al. The application of 3D geological modelling to aquifer recharge assessments in an urban environment[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2006, 39(3): 293 - 302.

## Three-dimensional geological modeling and the application cases

ZHANG Baoyi<sup>1</sup>, WU Xiangbin<sup>1</sup>, WANG Lifang<sup>1</sup>, LIU Xiuguo<sup>2</sup>, WU Xincai<sup>2</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals,

School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** This paper introduces three type spatial data models (the feature model, field model and hybrid model) and their modeling methods. Three application cases are listed: (1) mineral resources evaluation mode; (2) city geological model; (3) underground water evaluation model. In mineral resources evaluation mode the entity model and field model was integrated, three-dimensional entity model was used to display and retrieval, field model was used in reserve estimation and mineralization distribution prediction. In city geological model DEM modeling method was used to stratified geological bodies in engineering geology. In underground water evaluation model hydrogeological sections are the main data source and hydrogeological borehole data, contour lines of aquifer group bottom depths the constraints.


**Key Words:** 3D geological modeling; entity model; field model; application cases



### 三维地质建模及应用实例

作者：[张宝一](#)，[吴湘滨](#)，[王丽芳](#)，[刘修国](#)，[吴信才](#)，[ZHANG Baoyi](#)，[WU Xiangbin](#)，[WANG Lifang](#)，[LIU Xiuguo](#)，[WU Xincai](#)

作者单位：[张宝一, 吴湘滨, 王丽芳, ZHANG Baoyi, WU Xiangbin, WANG Lifang\(中南大学有色金属成矿预测教育部重点实验室, 地球科学与信息物理学院, 长沙410083\)](#)，[刘修国, 吴信才, LIU Xiuguo, WU Xincai\(中国地质大学\(武汉\)信息工程学院, 武汉, 430074\)](#)

刊名：[地质找矿论丛](#)

英文刊名：[Contributions to Geology and Mineral Resources Research](#)

年，卷(期)：2013, 28(3)

本文链接：[http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_dzzklc201303003.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_dzzklc201303003.aspx)