

三维 GIS 环境下的地质体可视化和特征分析

曾新平^{1,3}, 吴健生², 杨自安^{1,3}, 郑跃鹏¹, 朱谷昌³, 张普斌³

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 北京大学城环系, 北京 100871;

3. 有色金属矿产地质调查中心, 北京 100814)

[摘要] 地质体的三维可视化建模是三维 GIS 研究的一个重要方向, 具有重要的应用价值。三维 GIS 环境下的地质体可视化的两个关键方面是地质体的表面模拟和可视化实现, 文章介绍了地质体三维可视化的基本框架, 以带约束 Deluanay 剖分法为例阐述了地质体表面模拟的原理和方法, 并从取景变换、消隐、光照模型、纹理映射等方面论述了可视化的具体实现方法。最后以西部某铜矿为例, 建立了三维可视化地质体模型(一个地层矿体综合模型和一个矿体三维模型), 阐述了三维可视化建模的基本过程和方法, 并对两个模型进行了地质特征分析。

[关键词] 三维 GIS 地质体 可视化 表面模拟 特征分析

[中图分类号] P628 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2005)01-0072-05

GIS 技术的研究和应用在许多领域取得了飞速的发展, 其主要的原动力来自日益广泛的应用领域对地理信息系统不断提高的要求; 另一方面, 计算机科学的高速发展又为 GIS 提供了先进的工具和手段。随着真三维 GIS 的出现和功能的不断完善, 地质体的三维可视化建模技术也日趋成熟。

所谓三维地质可视化建模, 按照 Simon W Houlding 的观点就是运用计算机技术, 在三维环境下将空间信息管理、地质解译、空间分析和预测、地学统计、实体内容分析以及图形可视化等工具结合起来, 并用于地质分析的技术^[1]。

在地质体三维可视化建模技术产生之前的地质勘探领域, 一方面是人们拥有海量的地表和地下地质信息; 另一方面, 不借助先进的工具地质工作者很难对复杂的地质现象作出逼真的描绘和量化的表达。所以, 人们一直希望能够获得更直观的地下地质体(包括地层、构造、矿体等)的三维形态模型, 以准确地对地下地质体进行解译。此外, 随着勘探工作的不断深入, 全国范围内的地表矿或浅部矿已大致查明, 寻找隐伏矿和深部矿已成为矿产勘查“第二次创业”的主题。显然, 这些矿体的勘探对空间定位和品位分布的准确性要求进一步提高了。而地学三维可视化技术可以将各种勘探手段得来的信息融和

在一起, 以直观的三维图形动态地表达出来, 为处理这些海量的、复杂的、尤其是深部的地质信息提供一种方便的分析工具, 将地质工作者的形象思维和逻辑思维充分地结合起来^[1~7]。

下面以地质体的可视化建模框架为主线, 着重论述了地质体表面模拟的方法以及实现可视化的一般原理和过程, 并以西部某铜矿的地质体三维模型为例, 说明了三维可视化建模的一般方法和应用效果。

1 地质体可视化建模框架

地质体可视化建模是以反映地质体边界及特征的数据(主要是物探结果数据和山地工程数据)为基础数据, 利用计算机技术模拟地质体的表面形态特征和内部结构特征, 动态地进行地质体的空间形态和结构分析。要实现地质体的可视化建模, 一般要经历以下步骤。(1)准备原始数据。数据的来源可以多种多样, 但主要为山地工程数据和物探数据。(2)建立三维数据库。(3)进行表面模拟。(4)进行体充填。真正的地质体应该是一个在三维空间上连续的实体, 所以在建立好表面模型之后还需要进行体充填。这一步对后续的建立品位模型、储量计算、采矿设计等等十分重要。但因为本文研究重点是可

[收稿日期] 2004-03-10; [修订日期] 2004-05-15; [责任编辑] 曲丽莉。

[基金项目] 国家“十五”科技攻关项目课题(编号: 2001BA609A-04)资助。

[作者简介] 曾新平(1977年-), 男, 2002年毕业于中南大学, 获硕士学位, 在读博士生, 现主要从事遥感和 GIS 的研究和应用工作。

可视化表面建模问题, 所以在此不作详细讨论。(5) 实现可视化。地质体三维可视化是计算机真实感图形技术在地质上的应用, 是一种计算机图形生成技术。地质体三维可视化建模及其应用框架总结如下(图 1)。下面主要就地质体的表面模拟和可视化实现作理论上的阐述。

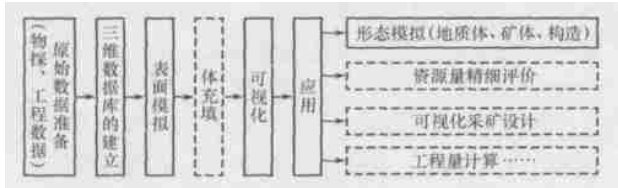


图 1 地质体可视化及其应用框架图
(虚线框表示本文中不作详细讨论部分)

2 地质体表面模拟

地质体是地球发展历史中多次构造运动的产物, 形态有简单也有复杂, 但各种不同形态的地质体有一个共同的特点就是它们都是由地质界面包裹而成, 地质体之间的分界面也就是它们的表面。因此, 要对地质体进行三维表达首先就要对它们的表面进行计算机描述。三维地质体表面模拟的方法有带约束条件的 Deluanay 三角法、泰森三角面法、样条函数、趋势面法、偏微分方程、能量优化法等等。下面以带约束 Deluanay 三角法为例简述地质体表面模拟的原理和方法^[8-10]。

Deluanay 三角剖分是相互邻接且互不重叠的三角形的集合, 每一个三角形的外接圆不包含其他的点。空间的 Deluanay 三角剖分视作空间四面体网格 Delaunay 剖分, 且使之满足球面准则, 即 Deluanay 三角剖分中的任一个四面体元素的外接球中不包含其它网格点。具体数学原理如下:

设给定点集 $\{P_i, i=1, \dots, N\}$ 。对于任一点 P_i 定义一个多边形 V_i , 其中的任一点到 P_i 的距离小于到 $\{P_i\}$ 中其它各点的距离。集合 $\{V_i, i=1, \dots, N\}$, 称为点集 $\{P_i\}$ 的 Dirichlet 棋格, 每一个多边形 V_i 称为 Voronoi 区。Dirichlet 棋格的顶点和边分别称为 Voronoi 顶点和 Voronoi 边, 不难看出每一条 Voronoi 边一定是 $\{P_i\}$ 中某一对点连线的垂直平分线, 称这一对点的连线为该 Voronoi 边的对偶边。于是 Voronoi 边的对偶边的集合形成了点集 $\{P_i\}$ 的一个三角剖分, 这就是该点集的 Delaunay 三角剖分, 如图 2 所示。

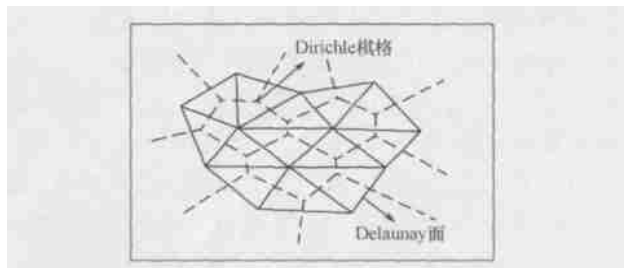


图 2 Dirichlet 棋格与 Delaunay 三角剖分

线上的特征点, 因此地质体的表面模拟是空间带约束条件的 Delaunay 三角剖分。使用该方法还因为它具有如下优点: (1) 可以从不规则分布的离散数据点生成连续三角面来模拟地质体表面; (2) 能用不同层次的分辩率来描叙地质体表面; (3) 当用一个特定的分辩率描叙时, 可以用少量的时间和空间更精确地表示更复杂的表面; (4) 在断裂线、构造线等突变部位能更好地顾及这些特征从而更精确合理地模拟地质体表面形态。

3 地质体可视化

地质体三维可视化是计算机真实感图形技术在地质上的应用, 是一种计算机图形生成技术。它主要包括取景变换、消隐处理、光照模型、和纹理映射几部分^[11-12], 具体见图 3。

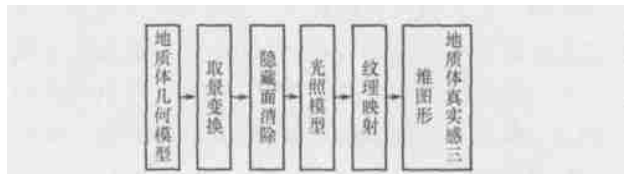


图 3 地质体可视化框图

3.1 取景变换

三维几何对象是在场景坐标系中建立的, 但屏幕上所显示的画面是在给定视点和视线方向条件下, 三维景物在垂直于视线方向的二维成像平面(屏幕)上的投影。将几何对象的三维坐标转换到屏幕上的象素位置, 需要进行一系列的坐标变换, 这些变换统称为取景变换。

3.2 隐藏面消除

为了在计算机屏幕上获得空间物体真实感的图像, 就必须隐藏不可见的线、面和体, 但空间物体投影到屏幕上并不能自动完成这一过程, 所以必须采用相应的算法(即隐藏面消除算法)来完成。

3.3 光照模型

光照模型是根据光学物理的有关定律, 计算景

反映地质体边界面的信息一般是边界线及边界

物表面上任一点投向观察者眼中的光亮度的大小和色彩组成的公式。它主要用于计算物体表面某点处的光强度。从某个点光源照射到物体表面上一点,再反射出来的光,可以分为三个部分:泛光、漫反射光和镜面反射光。

泛光的光强可用公式 $I = K_a I_a$ 表示,其中 K_a 是漫反射常数,与物体表面性质有关。 I_a 是入射的泛光光强,与环境的明暗度有关。漫反射光的光强可用公式 $I = K_d I_l \cos \theta$ 表示,其中 K_d 是漫反射常数,与物体表面性质有关; I_l 是光源的光强; θ 是入射角,即入射光与表面法向量的夹角。镜面反射的光强可以用公式 $I = K_s I_l \cos^n \alpha$ 来表示,其中 K_s 是物体表面镜面反射系数; α 是视线与反射方向的夹角; n 为幂次。

综合上述三种反射光的作用,得到光照模型如下:

$$I = K_a I_a + I_l (K_d \cos \theta + K_s \cos^n \alpha) / (d + k)$$

其中由于物体距透视点的距离对反射光强有影响,所以加入距离参数 d, k 为任一常数。

3.4 纹理映射

纹理映射就是将纹理模式映射到物体表面上。前面讨论了光滑多边形面的绘制,然而大多数物体表面并不光滑,地质体表面尤其如此。因此,为了更真实表达地质体,我们需要在地质体表面添加纹理和图案以准确地模拟,这一过程通常采用纹理映射方法来实现。虽然在地质体三维可视化中纹理的添加最先是表面的表达,但纹理真正最大的用处在于对空间属性的可视化表达。如我们可以将不同的品位数据作为纹理的元素,也可以将不同矿种作为纹理元素。

4 地质体可视化软件实现及其应用

根据上面的表面模拟和可视化实现等原理,基于计算机编程技术,我们可以编制出专用的三维可视化建模软件。整个系统在 IDL+VIP 三维可视化编程环境下,以 IDL、Visual C++ 为基本编程语言,Powerbuilder 为数据库管理工具,采用面向对象的技术。与一般的地质勘查类软件相比,具有以下优点:(1)三维功能更加强大。过该软件所建立的模型可以进行全空间观察、任意角度的旋转和切割、局部和整体的显示、任意比例的放大和缩小等。(2)可视化功能更加强大。生成的图形更接近于真实,可通过多种方式对图形进行增强,纹理映射可以帮助实现多种特殊效果。(3)辅助分析功能更加强大。可

以实现各项基于 GIS 的空间分析功能。

该类软件可用于固体矿产地质勘探的整个过程,并延伸到矿山开发和管理等阶段^[13]。(1)成矿分析、普查阶段。可以在三度空间综合并分析各种成矿预测资料及其异常特征,进行叠加运算和缓冲分析,辅助建立成矿模型;基于各类数据综合的基础上,协助布置普查钻孔,提高钻孔的见矿概率等。(2)勘探阶段。可以建立三维数据库,在三维环境下进行边界圈定和地质解译。(3)经济评价阶段。基于三维数据库和三维地质体模型,建立矿体的品位模型和吨位模型。(4)采矿设计阶段。建立矿山数字模型,并基于该模型实现采矿工程布置、方案优化和进度编制等。(5)生产管理。将矿山生产的多项参数纳入三维可视化的环境中进行集中管理。值得指出的是要完全实现上述功能还需要建立三维实体模型。

5 西部某铜锌矿床地层矿体三维可视化及地质分析

5.1 矿床概况

该铜锌矿床范围内的地层及主体构造线呈近南北向展布,铜锌矿床分布于矿区次级同斜倒转向斜的回转端及两翼,呈近南北向延伸,与构造线一致。在空间上,主矿体总体形态为一倒转的向形,严格受地层及向斜构造的控制。矿区内已探明的矿体共有 6 个,分别为 11、12、13、14、2 和 3 号矿体,其中 11 矿体是矿区的主矿体。该区赋矿地层岩石为中泥盆统的蚀变火山碎屑岩,主要是硅化的石英角斑质凝灰岩、火山—沉积岩、火山碎屑岩、火山熔岩、玄武熔岩、钠长石英斑岩^[14 15]。

5.2 三维可视化建模的前期准备工作

1) 资料收集。主要收集地形数据、山地工程(钻孔、槽探、平硐、沿脉、穿脉)数据、物探数据和化探数据。本次使用的主要是前两者,共计 60 个工程的原始数据。这些是建模的基础数据,其它地质信息在建模过程中也具有辅助作用。

2) 空间数据库的建立。山地工程数据一般可以分解为以下 3 个部分:①总体位置信息,包括起点和总长度;②空间位置变化信息,包括倾向和倾角;③采样信息,包括采样位置、样品代号、分析结果、以及样品长度等。所以,在建立空间数据库之前应对原始数据进行上述分解组合。这三者在数据库中通过样品代号来进行相互关联。具体步骤是:首先建立数据表,其中包含多项记录,且每项纪录又包含多

个信息段; 然后在建好的数据表中添加所有记录; 最后, 通过三维数据库的内在结构实现关联。

5.3 地质体三维表面模型的建立及分析

通过调用空间数据库中的已有数据, 基于表面模拟的软件平台, 以剖面图上的地质界线为约束条件, 地质界线上的特征点为基础资料进行带约束条件的 Delaunay 三角剖分, 对地质体表面进行模拟。具体步骤如下:

(1)将空间数据库中的数据导入到用于表面模拟的软件模块中, 实现山地工程的空间显示, 主要形式为点和线。(2)以剖面或中段为单位, 结合工程上的采样信息和其它辅助地质资料, 对地质体进行圈定, 即进行轮廓线连接。在这里剖面图上的地质界线即约束条件, 地质界线上的特征点为基础资料。(3)通过计算机进行 Delaunay 三角剖分, 形成三角网。(4)对三角网进行可视化处理, 如平滑、取景变换、消隐、光照、和纹理映射等处理, 形成真实感很强的图形。

按上述步骤, 首先对 5 层不同岩性的地层进行了三维可视化建模。图 4 为地层—矿体综合三维显示图。该模型为地质分析提供了全新的手段, 主要体现在: (1)可以全方位显示三维地质体; (2)可以以空间任何一个点(X, Y, Z)作为旋转原点, 以三个坐标轴中的任何一轴作为旋转轴进行空间旋转; (3)也可以整体或局部放大、缩小; (4)可以显示整个矿区的所有地层及矿体, 也可以单独显示某一层岩层或单个矿体。总之, 这样为全面系统地分析地质现象提供了一个有效的环境。

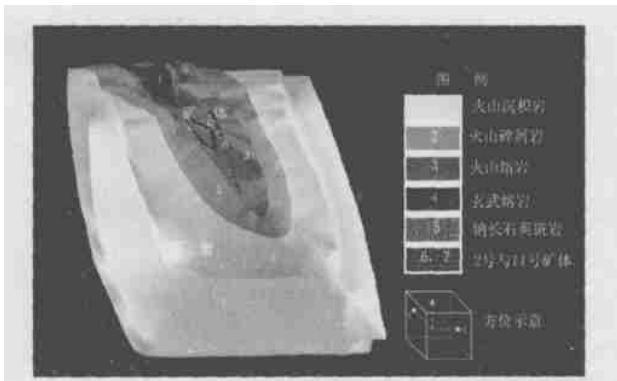


图 4 地层—矿体综合三维可视化模型图

经过对矿区的地质、岩性、构造进行分析, 可以看出, 由于受向斜构造的控制, 地质体在空间的展布呈向形分布, 向斜枢纽向南扬起, 向北倾伏, 由向斜核部到翼部, 岩性依次如图所示。其中钠长石英斑岩主要侵入火山熔岩地层的东翼而且埋藏深度逐渐

增大。东西两翼形态各异, 东翼为倒转, 西翼为正常。由上到下, 地质体形态由复杂到相对简单。1号主矿体主要赋存于火山碎屑岩和强硅化细碧岩中并靠近火山碎屑岩一侧, 矿体呈半隐伏、隐伏状。矿体形态严格地层、向斜构造的控制。褶皱变形后为东翼向西倒转, 西翼正常, 剖面上呈鱼钩状, 深部出现分支现象。

5.4 矿体三维模型建立及分析

同地层矿体综合三维模型的建立方法一样, 对矿体也可以单独建立三维显示图(图 5)。为了增加立体效果, 特把矿区地表地形数字化, 建立地表的 DEM 模型, 同时在三维 GIS 环境下进行地形的三维显示, 然后以地表面作为参照面, 研究矿体的空间形态特征及规律。

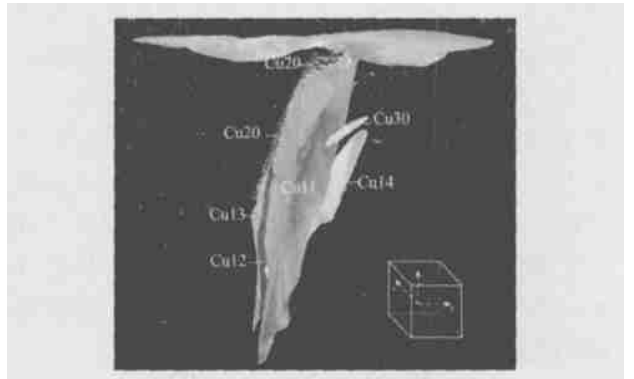


图 5 矿体三维可视化模型图

图 5 是以铜品位 0.3%作为边界品位所圈定的矿体, 该矿区赋存 11、12、13、14、2、3 等六个矿体, 分析矿体三维形态模拟图可以得知, 11 号矿体为主矿体。在空间上, 总体形态为一倒转的向形, 一个东翼向西倒转、向北倾伏的紧闭向斜形态。矿体产状南缓北陡, 向斜枢纽向南扬起, 矿体的倒转翼部分靠近或出露地表, 在南部矿体正常翼也相继出露地表, 有些部位矿体的回转端也完全出露地表。向斜枢纽向北倾伏, 而且倾角较陡, 呈隐伏状, 且隐伏深度逐渐加大。矿体在其回转端部位受强烈的褶皱变形作用致使厚度明显膨大, 形成典型的顶厚褶皱形态。11 号矿体两翼明显不对称, 东翼矿头埋藏相对较浅, 但倾斜延伸较大, 呈稳定的厚层状。矿体的连续性较好, 沿矿体倾斜方向厚度逐渐增大, 变化较有规律。西翼矿头较东翼矿头平均埋深大, 矿体沿倾向、走向延伸不稳定, 变化大, 呈复合分支状, 从北往南, 矿体形态由紧闭向形变为吊钩状, 11 号矿体向斜枢纽在空间上呈复杂曲线, 说明矿体构造受力复杂。在 11 号主矿体的深部, 主矿体两翼形成 12、13、14 三个小

矿体,从空间分布规律及成因分析,这三个小矿体是 11 号矿体在深部的分支脉矿体;2 号矿体产于 11 号矿体东翼且靠近地表,从空间形态、位置及地质构造分析,它受 11 号主矿体的控制;3 号矿体产于 11 号矿体的向斜外轴部,分析发现也受 11 号矿体的控制。

6 结论和认识

真三维 GIS 功能的完善为地质体的三维可视化研究提供了一个全新的工具,它可以将地质信息包括数字、文字、图件等转化成形象化的动态图像;逼真的三维动态显示效果,使不熟悉地质结构和构造复杂性的人对地质空间关系有一个十分直观的认识;强大的可视化功能,可提高对难以想象的复杂地质条件的理解和判别,为地质勘探工作提供验证和解释;强有力的数据统计和空间变化交互式分析工具,使地质分析功能加强,灵活性提高。动态图像提供关于数据的特征和它所属的地质现象的附加信息,把地质体的特性以直观形式呈现在我们面前,以便快速浏览和观察多种数据集、相互关系和趋势,判断地质体空间和属性特征,建立起一个总体的空间分布概念,有助于进一步认识地质体,改变了传统的平面思维方式,从三维空间的角度,完整的对待地质体的展布。

但地下地质体并非一套均匀的表面、剖面或块体,实际上每个地质单元都是具有独特性质的不规则体,而且由于受断层、侵蚀和沉积的影响变得更加不连续,所以我们建立的三维模型在多大程度上能代表实际情况也是一个很重要的问题^[1]。这涉及到地质特征分析的不确定性问题,准确地对这种不确定性进行量化将对三维地质模型和特征分析起重

要作用。随着三维建模技术的不断深入应用和技术水平的不断提高,虚拟的模型将更加接近于实际的情况,模型将对生产实践具有更加重要的指导作用。

[参考文献]

- [1] Simon W Houlding. 3D Geoscience modeling — computer techniques for geological characterization [M]. New York and Heidelberg, Springer-Verlag, 1994.
- [2] Simon W Houlding. Practical geostatistics, modeling and spatial analysis [M]. New York and Heidelberg, Springer-Verlag, 2000.
- [3] Bak P. Mill A Representation in geo-scientific resource management system for the mineral industry [A]. Three dimensional application in geographical information system [C]. 1989, 3 (1): 15-31.
- [4] Raper J F. The 3-dimensional geo-scientific mapping and modeling systems; a conceptual design [M]. London Taylor & Francis, 1989, 11 ~ 19.
- [5] 郭达志, 杜培军, 盛业华. 数字地球与 3 维地理信息系统研究 [J]. 测绘学报, 2000, 29(3): 250 ~ 256.
- [6] 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.
- [7] 芮小平, 余志伟, 许友志. 关于构建矿山三维 GIS 的思考 [J]. 地质与勘探, 2001, 37(4): 63 ~ 67.
- [8] 朱心雄. 自由曲线曲面造型技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [9] 唐泽圣. 三维数据场可视化 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [10] 曹代勇, 李青元, 朱小弟, 等. 地质构造三维可视化模型探讨 [J]. 地质与勘探, 2001, 37(4): 60 ~ 62.
- [11] 徐青. 地形三维可视化技术 [M]. 北京: 测绘出版社, 2000.
- [12] 石教英, 蔡文立. 科学计算可视化算法与系统 [M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [13] 吴健生, 朱谷昌, 曾新平, 等. 三维 GIS 技术在固体矿产勘探和开发中的研究与应用 [J]. 地质与勘探, 2004, 40(1): 68 ~ 72.
- [14] 吴健生, 黄浩, 杨兵等. 新疆阿舍勒铜锌矿床三维矿体模拟及资源评估 [J]. 矿产与地质, 2001, 15(2): 119 ~ 123.
- [15] 王勇毅, 肖克炎, 朱裕生, 等. 初论中国铜矿数字矿床模型 [J]. 地质与勘探, 2003, 39(3): 20 ~ 24.

GEOLOGICAL BODY VISUALIZATION AND CHARACTERIZATION BASED ON 3D GIS

ZENG Xin-ping^{1,3}, WU Jian-sheng², YANG Zi-an^{1,3}, ZHENG Yue-peng¹, ZHU Gu-chang³, ZHANG Pu-bin³

(1. Faculty of Geosciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083;

2. College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871;

3. Geological Investigation Center of Nonferrous Metals, Beijing 100814)

Abstract: As an important part of 3D GIS, 3D visualization modeling for geological body has great research values. Two key aspects of geological modeling are surface modeling and visualization. In this paper, a basic framework of geological modeling of 3D visualization is presented. Theory and procedure of surface modeling for geological body are expounded through an example of conditional Delaunay triangularization, and realization of visualization is discussed based on viewing transformation, blanking, illumination model, and texture mapping. Taking a copper deposit in western China as an example, 3D visualization geological models are established and analyzed after expounding the basic procedure and method of 3D visualization modeling.

Key words: 3D GIS, geological body, visualization, surface modeling, characterization