

# 地质体3维模型的研究进展

段福州<sup>1),2)</sup> 官辉力<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(三维信息获取与应用教育部重点实验室,北京 100037) <sup>2)</sup>(首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100037)

**摘要** 地质体3维模型是地学工作者研究的重点和热点,在地质工程、地质灾害预警与防治、矿山管理等方面得到了广泛的应用。地质体3维模型研究涉及构模方法、数据模型、数据结构等多方面的内容。本文在对国内外地质体3维模型领域的研究成果进行对比研究的基础上,综合阐述了地质体3维模型相关研究领域的研究进展,对相关的构模方法、数据结构、实际应用进行了分类对比分析,提出了地质体3维模型应遵循的原则。对地质体3维模型的研究现状进行了综合分析,并就构模方法、数据结构、空间分析等方面进行了深入的阐述。在综合研究前人成果的基础上,提出了多层TIN和TEN的3维地质体模型,并对该方法的可用性做了实验。

**关键词** 地质体 3维模型 3维数据结构

中图分类号: P208 TP311.133.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2007)08-1435-06

## Research Progress in the 3D Geological Model

DUAN Fu-zhou<sup>1),2)</sup>, GONG Hui-li<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application, MOST, Beijing 100037)

<sup>2)</sup>(College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100037)

**Abstract** 3D Geological Model is the key and focus for learning, geological engineering, early warning and prevention of geological disasters, mine management, and other aspects that have been widely applied. 3D Geological Model involves modeling methods, data model, data structure and other aspects. Based on the comparative study on the research results of three-dimensional geological model in the domestic, it expounds the research progress in the three-dimensional model of geological field. The related modeling methods, data structure and practical application are comparative analyzed and classified, according to the three-dimensional geological model of the principles. The comprehensive analysis of three-dimensional geological model progress is given in the article, and modeling methods, data structure, spatial analysis has done an in-depth analysis expounded. Based on a comprehensive study on the previous results, a multi-TIN and TEN mixed 3D geological model was proposed and an experiment was carried out to prove the availability of this method.

**Keywords** geological volume, 3D model, 3D data structure

## 1 引言

国家基础信息设施的建设随着国家信息化战略的实施呈现日新月异的发展,从信息设施建设技术手段到基础数据涉及的领域和范围都有了较大的发展。基础地质信息在国家基础信息设施中的地位越来越重要,主要有几方面的因素:一是地下信息包括

地下矿产、水文、工程等在国家信息化建设中的作用愈发重要;二是地质灾害发生的范围和频率越来越大,已经影响到我国部分地区的经济发展和生活安全,如就长江三角洲地区来说,地面沉降区内累计沉降已超200mm,面积近10000km<sup>2</sup>,由此引发的经济损失是巨大的,据统计,发展中国家每年由地质环境恶化和地质灾害所造成的经济损失,达到国民生产总值的5%以上,而在我国灾害及其所导致的环境

基金项目:国家自然科学基金项目(40571125);国家“973”项目(G19990346-06)

收稿日期:2007-03-28;改回日期:2007-04-28

第一作者简介:段福州(1979-),男,2004年毕业于首都师范大学地理信息系统专业攻读博士学位。主要研究3维地质模型和3维信息获取。E-mail: duanfuzhou@263.net

问题中,由地质灾害造成的损失据估计约占整个灾害损失的 35%;三是各级部门、科研机构和高等院校开展的相关科研课题和工程建设越来越多。北京、上海等城市已相继启动了 3 维城市地质调查的相关项目。所以各种地下数据逐步丰富,地下信息利用愈发频繁。但地下信息的表达、发布和利用程度却赶不上信息增长的速度。改变传统 2 维的、专业的地下信息表达和利用形式,通过直观、3 维的地下信息表达、发布和利用手段提高地下信息的利用范围与深度迫在眉睫。因此,地质 3 维模型的研究工作具有十分重要的理论和实践意义。地质体 3 维模型研究涉及到 3 维数据模型、构模方法、数据结构等多方面的内容,地质体 3 维模型的研究也在这些方面取得了诸多进展。

## 2 地质体 3 维模型

地质对象相比地理对象、建筑对象而言,具有平面分布与 Z 值变化连续、内部信息不完全(或者称地质对象是灰色的)、数据采集代价大等特点。地质体 3 维模型尽管可以从地理对象、建筑对象的 3 维模型得到有益的借鉴,但是地质体 3 维模型必须考虑到地质对象的自身特点,具有有别与二者的特性。地理 3 维模型和 3 维建筑模型着重表达地理对象、建筑对象表面空间特征,属于典型的 3 维地理信息系统的地理 3 维模型。基于地质体 3 维模型,地下信息的管理、量算、分析、查询、可视化等功能可以较为简单地实现,所以地质体 3 维模型应该综合考虑以下方面的内容:

(1) 地质体数据的几何描述、逻辑表达与分析模型不仅应该能够描述地质对象的几何形状、几何位置,同时也能够描述地质对象的空间分布、空间关系,同时能够方便地进行空间量算和空间处理。

(2) 模型表达的精度 地质体 3 维模型必须能够满足应用表达和分析的精度,这对于模型的可用性是至关重要的。模型数据量随精度提高而增大的速度是评价模型适用程度的一个重要指标。

(3) 3 维表达的难易程度 地质体 3 维数据模型 3 维表达包括表达的速度、表达的效果、LOD 表达的难易程度 3 方面的内容。

(4) 模型构模方法的难易程度 由于地质对象的数据采集代价巨大,因此,简单的模型构建方法将极大地提高模型的实用性。这里简单包括两层意

思,一是能够进行全自动或者人工操作较少的半自动构建 3 维模型;二是模型构建时能够应用较多的各种已有数据。

(5) 模型空间查询与属性查询的难易程度 地质体 3 维模型不仅具有空间属性还具有语义属性,能够对地质体各个组成部分的属性进行关联。

(6) 模型的开放程度 地质对象具有地理对象和建筑对象所没有的灰色特性,因此,地质体模型是一个逐步完善与白化的 3 维模型。地质体 3 维模型逐步白化的可编辑性能和向其他地质体 3 维模型转换的效率是地质体 3 维模型实用性的另一个重要指标。

地质体 3 维模型可分为表面模型和实体模型两大类。Fisher 等人提出了基于 NURBS 曲面的表面模型<sup>[1]</sup>,并利用该模型对地质对象进行 3 维建模,这种模型能够较好地刻画矿体的表面变化特征。同时,其他表面模型如基于 TIN、规则格网等的 3 维表面模型也得到了研究和应用。表面模型通常能够较好地模拟地质体的边界,但不能表达地质体的内部属性,而且不规则体的表面缝合十分复杂。实体模型是 20 世纪 90 年代发展起来的一种新的 3 维模型,其典型代表为 3 维体元(长方体、四面体、棱柱等)模型。Bak 等人利用规则体元来划分地质体,采用八叉树规则体元模型对矿山地质体进行 3 维建模<sup>[2]</sup>;Pilouk 等人采用四面体模型来进行地质体 3 维建模,李等人又对四面体模型的数据结构、建模方法进一步研究<sup>[3]</sup>。实体模型以任意形态的 3 维体元来划分地质体,体元不仅表示一个形体,而且也表示封闭的体积以及形体中的地质属性特征。其缺点是实体之间、体元之间以及体元几何要素之间拓扑关系复杂并且难于表达,同时空间查询和分析功能较弱、操作繁琐。

地质体 3 维模型的各项研究在我国 20 世纪 90 年代成为了地质领域的研究焦点。吴等人考虑到国内矿山数据采集的特点,相继提出了三棱柱(TPV)模型、基于偏斜地质钻孔的类三棱柱(ATP)模型、广义三棱柱(GTP)模型等地质体 3 维模型<sup>[4-6]</sup>。这些模型结构和建模方法在一些矿山 GIS 中得到了应用。这类 3 维构模方法总体上来说都是 2D GIS 建模方法在 3 维空间的自然拓展,因此也就自然具有 2 维地理信息模型的一些优缺点。ATP、GTP、TEN 等 3 维实体模型具有刻画复杂地质体信息的能力,但是数据结构和拓扑关系复杂、3 维表达繁琐、数据量

较大,特别是在成层性较好的区域以及研究对象具有成层特性的领域(如地下水)这些缺点表现得更为突出。这些模型在表达矿山信息、矿体结构等方面具有较好的效果,在表达水文地质结构、大区域地质信息方面具有明显的弱点。TEN模型在表达复杂地质信息方面具有优势而八叉树规则体元模型对于表达变化不剧烈、分布较为连续的地质信息比较适合,龚等人结合两种模型的优点,提出了八叉树规则体元模型和TEN的混合模型,采用八叉树规则体元模表达总体地质分布而采用TEN表达复杂的地质构造等细部信息<sup>[7-10]</sup>。这种混合模型尽管结合了两者的优点,但是仍然没有考虑到地质体成层的特性,不能解决数据量巨大、空间表达困难等难题。TIN能够较好地表达连续分布的地质层面,而且划分算法比较成熟;同时TEN能够表达复杂的地质构造。所以采用了一种TEN与多层TIN的混合模型。这种混合模型能够较好地刻画淹没、断层等复杂地质构造,同时能够很好地解决TEN划分困难的问题。采用苏锡常地区的钻孔数据以及其他地质构造数据构建苏锡常地区3维地质体模型,进行地下水、地面沉降3维模拟,取得了较好的结果。多层TIN和TEN的混合模型具有拓扑关系简单、构模方便、较好的可编辑性,同时3维表达和3维查询也较为容易等特点。

地质体3维模型具有4个层次:第一层次是3维可视化层次,在计算机环境下,对地学数据和地学对象进行3维可视化,以方便和增强对地学数据、地学现象和地学过程的理解与认识;第二层次是3维查询,不仅能进行3维可视化,还能进行3维空间查询与简单的3维度量,如欧氏距离、方位、表面面积、体积的可视量算等;第三层次是3维分析,不仅要能进行3维可视化、3维查询与简单的3维度量,还要能进行地学统计计算与拓扑分析;第4层次(即工程应用),不仅要满足前3个层次,还要能在所建模型上进行工程设计,能与有限元模型相耦合进行数值模拟计算,以及能进行模型更新<sup>[11]</sup>。总的说来由于模型存在一些诸如拓扑结构缺乏、3维数据结构不完善以及3维空间分析本身定义的不统一、不完善等原因,基于3维模型的3DGIS中最重要的一些功能,如空间查询、空间分析等功能相当缺乏。地质体3维模型目前主要用于3维表达和一些专业领域的简单计算和分析。造成这种现状的几个主要原因是:

(1)大量的3维图形库和软件开发包的出现。目前进行3维可视化开发的图形库主要有OpenGL、VTK、Direct3D等,正是这些具有强大功能的3维图形开发库和软件包的应用使得3维可视化表达进入了实用阶段。

(2)3维操作手段单一,输出介质大都是2维平面。当前3维操作手段比较单一,主要还是鼠标、键盘等,尽管也有一些3维控制台等操作设备的出现,但总的来说目前操作设备实现真3维操作还存在很多困难,这也大大制约了3维模型的空间分析、工程应用等功能的发展。

(3)3维数据结构、3维构模、3维拓扑关系等理论不完善和2维数据结构、空间拓扑的广泛应用也在一定程度上制约了3维地理信息系统的发展以及地质体3维模型和建模方法的发展。

(4)3维数据采集的高代价以及大量2维数据的存在实际上也影响了3维模型的发展。

地质体3维模型的4个层次不是绝对的递进关系,在地质体3维可视化的基础上,不能因为由于存在3维操作手段单一和3维数据结构不严密、3维拓扑学不完善等原因放弃了3维查询、3维空间分析、工程应用等。在3维可视化模型的基础上,借鉴2维GIS的查询和分析手段,可以在特定的环境和要求下进行第二、三、四层次上的应用。在目前3维分析内容和要求都没有明确的情况下,生硬地照搬2DGIS的拓扑结构、空间分析的定义、内容与应用,过分强调3维拓扑结构、3维空间分析是不合理的。对3维空间分析的定义和内容进行论述。Robert等人给空间分析的定义是“基于地理对象的空间布局的地理数据分析技术”<sup>[17]</sup>;郭等人给空间分析做的定义为“基于地理对象的位置和形态特征的空间数据分析技术,其目的在于提取和传输空间信息”<sup>[12]</sup>,这些定义着眼点显然都在地理对象上,其提到的3维空间分析是对 $x, y$ 平面的第3维变量的分析,其内容主要有趋势面分析、表面积计算和坡度分析等等,这个定义的数据基础是2维数据,不是真3维空间分析。考虑到研究对象和基本数据,3维空间分析可以定义为基于空间对象(包括地理对象和地质对象)的位置、形态特征和空间关系的空间数据分析技术,其数据基础为空间对象的3维数据。3维空间分析的主要内容有缓冲区分析、体积计算、网络分析、变形分析等等。在开发苏锡常地区地面沉降和地下水3维虚拟系统采用了TEN和多层TIN混

合 3 维模型,这种单位模型将比较成熟的 TIN 模型和日前研究比较多的体元模型 TEN 混合使用,具有典型层状分布的地区采用了多层 TIN 模型,具有非典型层状分布的地区采用了 TEN 模型。通过 TIN 和 TEN 独有的三角形单元将两种模型连在一起。

### 3 地质体 3 维数据结构与拓扑关系

地质体 3 维模型的研究内容包括数据模型、构模方法和数据结构,一个好的数据模型如果没有好的数据结构作为其核心支撑,模型的效用与效率将会受到很大的影响。数据结构是数据模型的表示,是在数据模型的基础上对数据模型的细化。很多时候这两者很容易混为一谈。在同一地质体 3 维模型下不同的数据结构和编码方案往往极大地影响模型使用效率。尽管地质对象与地理对象有诸多不同之处,但是地质对象的 3 维数据结构与地理对象的 3 维数据结构却有很多相同或者相似的地方。这主要由于地理对象 3 维特性并不明显或者说地理对象更多的是 2.5 维的,地理对象的 3 维数据结构更像是为地质对象量身打造的。

3 维数据结构最初的研究是集中在栅格或者说体元方面。自 Hunter 提出八叉树数据模型以来,八叉树数据结构就一直是规则体元模型最常用的数据结构。Bak 等人就利用八叉树数据结构进行地质体 3 维模型的数据组织与存储<sup>[2]</sup>。鉴于八叉树数据结构的局限性,Molenaar 等人提出了 3 维 FDS 数据结构<sup>[13]</sup>,扩充 2 维矢量数据结构,将点、线、面要素扩展到体。体由面组成,面由线构成,线元素通过矢量坐标表达。3 维 FDS 数据结构除了表达各种元素的空间位置以外,还表达它们之间的拓扑关系。Tempf 对 3 维 FDS 的拓扑关系进行了改进,集成了属性和纹理数据,Zlatanova 在 3 维 FDS 模型的基础上对 FDS 模型进行了简化,提出了 SSM 模型,充分考虑了几何对象的拓扑关系。自 20 世纪 90 年代以来,我国学者在八叉树结构、3 维矢量数据结构、面向对象的 3 维数据结构、混合数据结构等几个方面取得了一些进展,夏等人提出 3 维空间数据结构——多面体编码方案<sup>[14]</sup>,李等人讨论了单一体划分下的 3 维矢量结构 GIS 概念模型和拓扑关系<sup>[15]</sup>。基于点、边、环、面、体的 3 维矢量数据结构,矢量与栅格集成的面向对象的 3 维空间数据结构<sup>[16-18]</sup>等数据结构类型也取得了一些扩展和改进。这些数据结构主要

从体元的编码方法、拓扑关系的表达、属性数据的关联以及对对象化数据结构等几个方面对 3 维数据结构进行改善或改进。

3 维数据结构分类方法同样在 2 维数据结构分类方法的扩展,分为 3 维栅格数据结构和 3 维矢量数据结构。3 维数据结构与数据模型的发展与 2 维数据结构和数据模型的发展一脉相承,都存在两种描叙方式,即通过描叙对象的边界和描叙对象有限精度的小单元来确定对象。在考虑到这两种数据结构和数据模型的优缺点后,这两种数据结构和模型优点的混合数据结构模型得到了进一步的研究。对比矢量和栅格数据结构,混合数据结构可以根据需要截长补短,以更好地支持地质体 3 维模型。李等人提出了一种八叉树和四面体相结合的混合数据结构<sup>[15]</sup>。在混合结构中,八叉树作整体描述,四面体网格作局部描述。混合数据结构增加了数据结构的灵活性,在许多场合对提高表示精度,减少数据量十分有益。同时单一的八叉树结构或四面体网格网可以看成是混合结构的两个特例。混合数据结构还有很多种组成方法,具体而言可以因研究对象性质的改变而采用合适的混合方法<sup>[8]</sup>。混合数据结构尽管在很多学者看来有着天然的优势,但混合数据结构和模型仍然存在数据结构更为复杂,空间计算与分析更难开展的缺点。与现在 2 维 GIS 相似,尽管矢栅一体化的数据结构也有大量的研究成果,但其应用却不多见,大量存在的是两种数据结构并存,互为补充的应用模式。3 维数据结构与数据模型的发展也会朝着这个方向发展。采用的多层 TIN 与 TEN 混合模型中的数据结构包含点(point),线(Segment),三角形(Triangle),四面体(tetrahedron)等要素,数据结构中显式地表达了点-线,线-三角形,点-三角形,点-四面体,三角形-四面体 5 类拓扑关系,其他如点-点、线-线、线-三角形、线-四面体、三角形-三角形、四面体-四面体等 5 种拓扑关系可以从表达的 5 种显式中组合计算得到。结合成熟的 TIN 和 TEN 属性数据关联和空间查询方法,面向对象的 TIN 与 TEN 模型中的数据结构具有较好的拓扑表达、属性关联和空间查询性能。

### 4 地质体 3 维模型的国内应用

由于地质体 3 维模型及相关的数据结构和其他相关理论与技术在国外研究开展较早,已经有了一

些商业化的软件,这些软件在油田渗透率分布的研究、地下含水层中污染情况的监测、地球大气中臭氧浓度和海洋中盐度与温度的分布研究、矿山管理及灾害预警与防治等方面都有了应用。在我国,由于地质体3维模型及相关的数据结构和其他相关理论与技术研究起步较晚,商业化程度不高,国外的商用软件由于代价高、不符合中国特点等原因得到的应用也不多,比较普遍的是在一些工程和研究课题中自主开发。陈等人研制了“边坡工程地质信息的3维可视化”系统<sup>[19]</sup>;柴等人结合水电工程研制了岩体结构3维模型软件<sup>[20]</sup>;王等人进行了基于3维拓扑格网结构的GIS地层模型研究<sup>[21]</sup>等。这些具有代表性的项目和软件系统的研制为地质体3维模型在地质工程、地质灾害、地下水管理等领域的应用积累了大量的理论基础和技术经验,将更好地促进地质体3维模型的深入研究和国内相应商业软件的研制。

为了满足不同专业领域的要求,上述系统采用的3维模型与数据结构各有特点而各不相同,主要是根据专业需要和研究对象的特点采取不同的地质体3维模型。国内目前有关地质体3维模型的研究还停留在特定的专业领域的应用上,所开发的系统和软件目的是应用在特定领域内的特定工作上。无论是从地质体3维模型结构、数据组织方式和建模策略与方法,还是软件的功能与稳定性都不具有通用性。因此地质体3维模型及其相关理论与方法要从更高、更通用的层次进行研究。

## 5 结 论

地质体3维模型研究在中外诸多学者的共同努力下取得了很多成果,地质体3维模型的3维可视化技术已经趋于成熟,而且也有了成功的应用实例,尽管目前3维拓扑学、3维数据结构等关键理论技术还不完善,但工程地质挖方的计算、煤矿巷道的洪水灾害仿真等方面还是出现了很多具体应用。地质体3维模型在构模方法、数据模型、数据结构、拓朴理论、3维数据管理方法、操作介质与手段等诸多方面在近几年并没有取得突破性的进展,没有产生具有广泛通用性的地质体3维模型和数据结构。这些方面在相关科学的配合下,各种模型与数据结构的深入研究后必将取得突破,将在地质工程、地质灾害预警与防治、矿山管理、用地规划、辅助决策等

多方面得到更深入和广泛的应用。

## 参考文献 (References)

- 1 Fisher T R, Wales R Q. Three-dimensional Solid Modeling of Geo-objects Using Non-uniform Rational B-Splines (NURBS) [M]. Dordrecht, Holland: Kluwer Academic Publishers, 1992: 85 ~ 105.
- 2 Bak P, Mill A. Three dimensional representation in a geoscientific resource management system for minerals industry [A]. Three Dimensional Application in Geographic Information Systems [M]. London, Britain: Taylor & Francis, 1989: 155 ~ 182.
- 3 Li Qing-yuan. 3D Vector Data Structure and GIS Topu-relation Research [D]. Beijing: China Mine University, 1995. [李青元. 三维矢量结构 GIS 拓朴关系研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 1995.]
- 4 Wu Li-xin, Chen Xue-xi, Shi Wen-zhong. GTP-based integral real—3D spatial modeling for subsurface engineering and its surrounding geology bodies [J]. Geography and Geo-Information Science, 2003, 19(6): 1 ~ 6. [吴立新, 程学习, 史文中. 基于GTP的地下工程与围岩一体化与真三维空间构模 [J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(6): 1 ~ 6.]
- 5 Wu Li-xin, Zhang Rui-xin. 3D geography simulation and virtual mine system [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2002, 31(1): 28 ~ 33. [吴立新, 张瑞新. 三维地学模拟与虚拟矿山系统 [J]. 测绘学报, 2002, 31(1): 28 ~ 33.]
- 6 Chen Pen-geng, Gong Jian-ya, Shi Wen-zhong. Geological object modeling based on quasi tri-prism volume and its application [J]. Editorial Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(7): 602 ~ 607. [程朋根, 龚健雅, 史文中. 基于似三棱柱体的地质体三维建模与应用研究 [J]. 武汉大学学报, 2004, 29(7): 602 ~ 607.]
- 7 Li R. Data structure and application issues in 3D geographic information system [J]. CGSM Journal, 1992, (8): 103 ~ 105.
- 8 Gong Jian-ya, Xia Zong-guo. An integrated data model in three dimensional GIS [J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and University, 1997, 22(1): 8 ~ 15. [龚健雅, 夏宗国. 矢量与栅格集成的三维数据模型 [J]. 武汉测绘科技大学学报, 1997, 22(1): 8 ~ 15.]
- 9 Molenaar M. A topology for 3D vector maps [J]. ITC Journal, 1992, 21(1): 25 ~ 33.
- 10 Gong J Y, Chen P G, Wang Y D. Three-dimensional modelling and application in geological exploration engineering [J]. Computers & Geosciences, 2004, 30(4): 391 ~ 404.
- 11 Wu Li-xin, Shi Wen-zhong. On three dimensional geosciences spatial modeling [J]. Geography and Geo-Information Science, 2005, 21(1): 1 ~ 4. [吴立新, 史文中. 论三维地学空间构模 [J]. 地理与地理信息科学, 2005, 21(1): 1 ~ 4.]
- 12 Guo Ren-zhong. Spatial Analysis [M]. Wuhan: Wuhan Technical Mapping and Surveying University Press, 2000: 2 ~ 7. [郭仁忠. 空间分析 [M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 2000: 2 ~ 7.]
- 13 Molenaar M. A formal data structure for three-dimensional vector

- maps[A]. In: Proceedings of the Fourth International Symposium on Spatial Data Handling[C], Amsterdam, 1990: 770 ~ 781.
- 14 Xia Yan. 3D Vector Geological Model and Visualization System[D]. Beijing: China Mine University Doctor Paper, 1997. [夏炎. 三维矢量结构地质模型及其微机可视化图形显示系统研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 1997.]
- 15 Li De-ren, Li Qing-quan. On a type 3D GIS mixed data structure[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1997, 26(2): 130 ~ 132. [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): 130 ~ 132.]
- 16 Hou En-ke, Wu Li-xin. An object-oriented three-dimensional topological data model based on component for geology modeling[J]. Editorial Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002, 27(5): 465 ~ 471. [侯恩科, 吴立新. 面向地质建模的三维体元拓扑结构数据模型研究[J]. 武汉大学学报, 2002, 27(5): 465 ~ 471.]
- 17 Ma Zhi-min, Chen Hao. Research on the linear octree data structure in three dimensional geographic information systems[J]. Journal of Xian Engineer University, 1999, 21(Sup): 55 ~ 60. [马智民, 陈浩. 三维 GIS 的线性八叉树数据结构研究[J]. 西安工程学院学报, 1999, 21(增): 55 ~ 60.]
- 18 Mao Shan-jun, Ma Hong-bin. Method studying of digital elevation model of creating complicated geological entity automatically[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1999, 28(1): 57 ~ 61. [毛善军, 马洪兵. 自动构建复杂地质体数字高程模型的方法研究[J]. 测绘学报, 1999, 28(1): 57 ~ 61.]
- 19 Chen Chang-yan, Zhang Ju-ming. 3D visualization of geoinformation in slope engineering and its application to the permanent shiplock slope in the three gorges project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(4): 1 ~ 6. [陈昌彦, 张菊明. 边坡工程地质信息的三维可视化及其在三峡船闸边坡工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 1 ~ 6.]
- 20 Cai He-jun, Huang Di-long. Studies on 3D spreading model of rock mass structure[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1999, 26(4): 16 ~ 17. [柴贺军, 黄地龙. 地质结构面三维扩展模型研究[J]. 水文地质工程, 1999, 26(4): 16 ~ 17.]
- 21 Wang Xiao-hai. GIS stratum model research based on 3D topological grid structure[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics the Chinese Academy of Science Doctor Paper, 1999. [王笑海. 基于三维拓扑格网结构的 GIS 地层模型研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1999.]