

doi:10.3799/dqkx.2013.112

基于子面模板库的第四纪三维地质模型快速构建

花卫华¹, 廖艳云¹, 刘修国¹, 郑坤¹, 马绍忠¹, 潘声勇², 阚鹏²

1. 中国地质大学信息工程学院, 湖北武汉 430074

2. 地理信息系统软件及其应用教育部工程研究中心, 湖北武汉 430074

摘要: 为了实现第四纪地质三维地质模型的快速半自动构建, 利用地表地形图、第四系分区图、钻孔、剖面等第四系相关数据源, 按照第四系具有的严格自上而下的标准层序, 依次计算每一地层的地质分区。将所有地质分区图在一张平面图上进行叠加分析, 得到平面分区求交后的碎小多边形集合即地层二维子面模板库。从二维子面模板库中提取各个地层所包含的子面, 并利用钻孔、剖面上相应地层的高程样本数据插值得到地层的三维顶面和底面模型, 进行拓扑处理建立三维地质模型。该方法完全参照第四纪三维地质填图工作的基本流程, 引入二维子面模板库的概念, 通过将三维地质面构建分解为地层平面分布各子区域构建和地层子面高程计算两个部分, 将三维建模过程中大量计算工作转化到二维平面中完成, 在保证三维地质模型精度的前提下, 大大提高了建模的效率。

关键词: 地层; 地质面; 子面模板; 地层分区; 三维地质模型。

中图分类号: P56

文章编号: 1000-2383(2013)05-1128-07

收稿日期: 2013-01-15

Rapid Construction of Quaternary 3D Geologic Model on Sub-Surface Template Library

HUA Wei-hua¹, LIAO Yan-yun¹, LIU Xiu-guo¹, ZHENG Kun¹,
MA Shao-zhong¹, PAN Sheng-yong², KAN Peng²

1. Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Engineer Research Center for GIS Software & Application of Ministry of Education, Wuhan 430074, China

Abstract: The construction of stratum layer surfaces is the key to stratum modeling. Utilizing the related data resources of quaternary geology, such as surface topographic maps, quaternary geological maps, drilling, sections, and in exact top-down layer order of the quaternary geology, this paper calculates all stratum subareas in turn. Firstly, the overlay analysis of all stratum area charts in a plane map generates the fragmentary polygons set after plane partition intersection, which is called stratum 2D sub-surface template library. Then, the 3D top and bottom stratum models are gained by collecting sub-surfaces from every stratum, using the elevation sample data interpolation of the relevant stratum of drills and sections, which in turn leads to the establishment of then it can 3D geologic body model by topology handler. This method follows the basic flow of the quaternary geological 3D mapping by using the concept of 2D sub-surface template library, transferring the huge computing load from 3D modeling into 2D section by dividing the 3D stratigraphic surface construction into two sections of subarea construction of each stratigraphic surface and stratigraphic sub-surface elevation computing, which enhances the modeling efficiency while 3D stratigraphic modeling precision is guaranteed.

Key words: stratigraphy; stratum layer surface; sub-surface template; stratum areas; 3D geologic models.

由于地质问题比较复杂, 仅凭二维地质图与文字描述难以反映地质对象的空间形态, 因此“从传统

走向现代、从单一走向综合, 从二维走向三维”已经成为国内外基础地质调查工作的发展趋势, 而地质

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(No.41002115); 中央高校基本科研业务费专项(No.CUGL120270); 长江三角洲重点地区三维地质填图(No.1212011220250)。

作者简介: 花卫华(1977-), 男, 讲师, 博士, 主要从事三维地质建模与分析、地质数据模型、辅助地质成图等地质信息化方面的方法和应用研究工作。E-mail: huaweihua@cug.edu.cn

探测技术与计算机三维模拟的不断发展使得实现三维地质结构的可视化成为可能(王宝军等,2008;陈国良等,2011;王鑫等,2011;徐能熊等,2011).欧美发达国家于20世纪90年代中期先后开始了三维地质建模的研究,并将其列入了地质填图计划.中国虽然在二维地质填图方面取得了很多成果,但三维地质填图工作刚刚起步(明镜,2011).在“十二五”期间,中国在三维城市地质调查基础上,从经济区、成矿带、含油气盆地和地壳4个尺度制定了三维地质填图工作的总体目标.第四系三维地质填图的主要目标是为了查明松散层的组成和空间展布特征,建立第四系多重地层划分对比方案和第四系三维地质结构框架.本文主要讨论第四系三维地质结构模型构建问题.

三维地质建模的关键在于三维复杂地质界面的模拟.经过几十年的研究发展,地质曲面模拟的模拟方法已有很多种,并不断发展成熟.Yfantis利用分形方法模拟地质界面(Yfantis,1988;李明超等,2011);Fisher等借助NURBS模拟地质界面,建立了三维实体模型(Fisher and Wales,1990;钟登华和李明超,2005);Mallet(1992)提出了离散光滑插值方法,模拟复杂地质界面与实体;De Kemp(1999)利用三维贝塞尔曲面,实现复杂地质构造的可视化;白世伟等利用DEM模拟地层界面,实现了三维地层可视化(白世伟等,2002;王纯祥等,2003;苏幸等,2008);武强和徐华(2004)实现了含多值曲面褶皱岩体的模拟;徐能雄等(2011)在离散光滑插值技术的基础上,实现了非连续地层界面整体重构.第四系三维地质结构建模需要解决层状地质体的表达、透镜体与夹层的构建、相变问题、岩性层分布无规律等问题.虽然可以通过上述地质面模拟方法进行人工干预,但也只能处理某一类地质情况,且不利于提高三维地质建模的效率(李爱勤等,2011;徐能熊等,2011).

为了解决上述问题,在保证三维地质模型精度的前提下提高建模的效率,并在三维地质填图工作中进行推广,本文充分借鉴“主TIN”模板构建层状地质体的思想,结合第四系特点,在充分利用钻孔、剖面数据的基础上,通过加入地层分区图这一水平方向的约束条件,提出基于子面模板库的第四系三维地质模型快速构建方法,快速构建第四系的三维地质结构模型(朱良峰等,2006;徐能雄等,2006;刘修国等,2006;刘振平等,2009).

1 主要建模思路

1.1 第四系三维地质建模的基本要求

按照“先按时代再区分岩性”的原则,将第四系的地层分为统、组、段和岩性4个级别.段前面几个级别的地层都有一定的标准层序,按照自上而下地层由新到老的顺序出现.因此,可以先构建出段这一级的地质模型,然后通过在这一个地层内部构建岩性地层,从而实现第四系三维地质模型的细分.构建第四系三维地质模型需要满足以下要求:(1)出露地层与地表地形、平面地质图要完全吻合.平面地质图是地质专家根据掌握的地形数据、钻孔、剖面 and 地球物理解释结果等地质资料绘制而成的二维图件,已知信息相对比较多,是人眼能够直接观察到的部分.第四系一般具有上下的标准层序,建立第一层模型之后,剥离该层,剩下的地层使用相同的构建,因此可采用自上而下逐层剥离的方法进行处理.(2)地层的缺失要符合地层的沉积、侵蚀规律.地层尖灭的原因有很多,在构建地层面时,利用钻孔、剖面等,可以获取地层面所依赖的样本点数据,进而通过插值得到地层面模型.地层面的网格点进行高程插值时,要充分考虑地层在这一地区的沉积环境和侵蚀规律,合理推断地层在水平方向上的分布特征和边界.(3)基岩面要约束到第四系三维地质模型构建中.不同地区,第四系的地层特点也不一样.基岩面有可能穿入第四系,也可能出露到地表.因此,在确定地层模型的水平分区时,应充分考虑基岩面的约束作用.

1.2 第四系三维地质建模思路

基于“主TIN”模板的传统三维地层面模拟思想(图1):首先根据建模范围确定二维的“主TIN”三角网网格模板;根据钻孔、剖面等数据插值计算每一个地层面的高程信息,中间需要通过上顶或下拉处理地层面插值过程中出现的相交冲突问题,保证每一个地层的三角形曲面顶点的 (x,y) 与“主TIN”模板完全一致,仅仅是高程不一致;最后加上周围的侧面模型,进行地层面的拓扑处理,建立三维地质块体模型.“主TIN”建模方法的优点是方法简单、建模自动化程度高;缺点也很明显,因为要通过任意两个地层面之间的相交关系判断处理来更新“主TIN”模板顶点、建模效率低下,且地质面的数据冗余较大.另外由于缺乏地层水平方向的分布区域限制,模型精度与实际往往差别较大.

基于子面模板库的第四系三维地质建模思路(图2):借鉴“主TIN”建模方法的简单、自动化等优

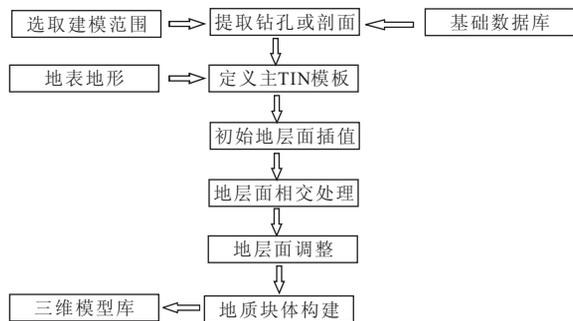


图 1 基于“主 TIN”模板的三维地质模型自动构建流程

Fig.1 The procedures of 3D geological modelling based on the primary TIN template

点,参照第四系三维地质填图工作的基本流程,利用地表地形图、第四纪地质图、钻孔、剖面等第四系相关数据源,按照第四系具有的严格自上而下的标准层序,依次引入并计算出每一地层的平面分区图,约束地层在水平方向上的分布范围,将所有地层分区图在平面上进行叠加分析,得到平面多边形集合即地层二维子面模板库.每一个地层面在水平方向上的投影都是由二维子面模板库的子集构成,通过搜索地层分区范围附近的地层高程样本数据,经过插值得到地层的三维底面模型,并根据标准地层层序中地层之间的上下接触关系,对与当前地层接触的地层面进行相交处理,解决在曲面高程点插值过程中出现的交叉冲突问题.最后通过拓扑重新建立第四系三维地质体模型.

该方法引入二维子面模板库的概念,通过将三维地层面构建分解为地层平面分为各子区域构建和地层子面高程计算两个部分,将三维建模过程中大量计算工作转化到二维平面空间中完成.采用自上而下、逐级逐层的方式构建各个第四系的地层面模型,在保证三维地质模型精度的前提下,大大提高了建模的效率.结合第四系的特点分析,通过本建模方法可得出以下基本推论:(1)第 1 个地层的平面分区图,直接取自地质图上最上面地层的分区图;(2)最后一层的底面完整无缺;(3)地表分区图的外边界与建模范围一致;(4)每个地层分区,由地表地层分区和隐伏地层分区两部分组成.

本建模方法有以下特点:(1)直接约束地表地质图数据,最终模型与肉眼可观察的地表地形、地貌完全吻合,可信度高.(2)可由计算机自动生成地层分区,也可由地质专家提供地层分区图,并通过交互编辑将专家经验融入进来,充分反映地层在平面的分布规律,使得模型更符合实际情况.(3)引入子面模板库

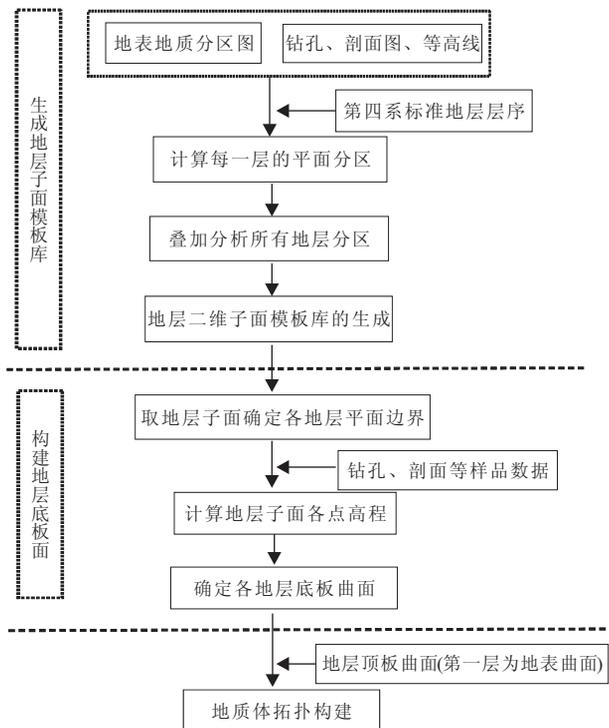


图 2 基于子面模板库的第四系三维地质建模流程

Fig.2 A 3D Quaternary geological modeling process based on sub-surface template library

的思想,与“主 TIN”建模算法相比,避免了由于曲面求交产生的繁琐计算及数据冗余问题,从而可支持海量钻孔、剖面数据约束的地质面模型快速构建.

2 建模过程及关键技术

根据第四系的三维地层建模的特点和思路来看,整个建模过程主要包括以下几个环节:(1)整体地层层序的确定;(2)各地层平面分区图的绘制;(3)地层子面模板库的构建;(4)地层面的各子面高程插值;(5)地质体拓扑重建.

2.1 整体地层层序的确定

根据地层沉积的规律,自上而下地层按照沉积年代由新到老;在每一个地层内部,按照地层的统、组、段、岩性的顺序,对每一个地层进行级别细分(表 1).统、组、段这几级的地层有严格的层序,可以通过地层对比完成剖面绘制和地层面快速构建,而岩性地层的顺序是随机的,构建岩性地层的地质体比较复杂,需要通过处理尖灭、透镜体等来进行地质体构建.

2.2 各地层平面分区图的绘制

在建模区域的多边形范围内,找出揭露当前地

表1 某地区第四系标准地层层序表部分内容

Table 1 The table of standard stratum of the Quaternary stratigraphy

统	组	段	岩性
全新统	长乐组	Q ₄ ^{al-pl}	粘土、粉质粘土、砂质粘土 粉土 粉砂、细砂 中砂、粗砂、砾砂
		Q ₄ ^m	淤泥 中砂、粗砂、砾砂
	东山组	Q ₄ ^{mc}	粘土、粉质粘土 砂质粘土
	上更新统	龙海组	Q ₃ ^{lf}
Q ₃ ^{mc}			淤泥质粘土
Q ₃ ^{al-pl}			粘土、粉质粘土、砂质粘土 中砂、粗砂、砾砂 碎(卵)石

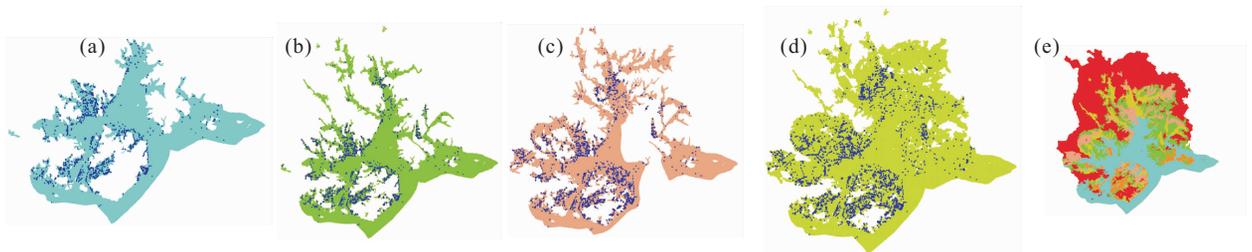


图3 根据地层分区叠加生成的地层子面模板库

Fig.3 The sub-surface stratum template library generated by stratigraphic superposition partition

a.地层1的分区;b.地层2的分区;c.地层3的分区;d.地层n的分区;e.地层分区叠加后的结果

层的所有样本数据,包括钻孔、剖面、地层等值线等。根据样本数据反映的平面坐标位置,考虑每个样本点上地层的厚度数据,自动圈定地层覆盖的边界。由于有限的样本点所能反映的地层空间信息也是有限的,因此可由地质专家参考其他信息包括地球物理解释信息、野外地质调查信息等,对地层分区图进行修编,以更准确地反应地层水平分布规律。

地层分区图的边界要与三维地质建模区域的边界一致。本文采用的是基于规则网格的分区追踪算法,具体步骤为:首先根据出现该地层的样本点和地层已知缺失区(如河流、湖泊和基岩裸露区等),在建模区范围内,按照一定的网度,进行规则网格剖分。网格点的属性值只有两种可能(出露或缺失),通过考虑地层厚度等信息,利用插值算法计算每一个网格点的属性。然后利用基于规则网格的等值线提取算法,提取地层分布区。在此基础上,需要利用已知缺失区对提取的地层分布区进行裁剪处理,并将破碎的小区进行删除或合并,辅以适度的区边界编辑,得到最终合理的地层分区图(图3)。

2.3 子面模板库的构建

各个地层的分区图绘制完成之后,将这些地层分区在平面上进行叠加分析,原有地层分区经过求交之后,产生一系列碎小的多边形(图4)。由于最终的多边形列表是所有的地层区域求交之后得到的结果,因此,每一个地层的分区都可以用最终结果的子集来表示。这个结果是由一系列子面构成的,以此为模板,可以描述所有地层的分区,故将其称之为子面模板库。

为了进行后续的地层面三维插值和地质体拓扑重建,子面模板库里要记录以下几大信息:(1)多边形列表,即子面模板库的所有多边形边界信息,可以表达所有的地层分区信息。(2)地层包括的子面列表:描述地层的子面信息。(3)多边形中新增的顶点和边所属的地层。

2.4 地层子面高程插值

确定地层的子面和去除冗余信息之后,需要对子面列表中的所有顶点进行高程插值,才能得到三维子面。高程插值需要确定两方面的信息:(1)待插

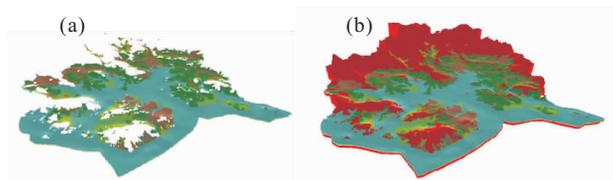


图 4 基于地层子面模板库构建的三维地质模型

Fig. 4 A three-dimensional geological model based on the stratigraphic sub-surface template library

值的样本点搜索范围,搜索范围不能简单的采用统一的范围,应该考虑待插值点所属子面的形态、样本点分布形态、样本点高程差异等情况。(2)带插值点的插值算法.当样本点比较密集时,采用 B 样条插值法效果较好,相反,多采用距离反比加权法或克里格法.由于采用的是自上而下的建模顺序,在插值时注意插值点的高程不能高于上覆地层的底板对应点的高程.

2.5 地质体构建

每个地层的子面确定并通过高程插值后,在水平方向上各个子面的公共边界严格保持拓扑一致;在垂直方向上,高程插值时也充分考虑了高程冲突问题,从而避免了子面相交的问题.因此,通过地层子面的三维拓扑重建,即可自动构建地层的各个子地质体的三维块体模型.

3 建模中的问题与处理方法

在第四系三维地质模型构建中,统、组、段这几级的三维模型构建都遵循自上而下的标准层序,基本可以实现自动构建的目标,而段内的岩性地层模型构建较为复杂,岩性没有规律,从上而下出现的顺序是随机的.一般通过人工交互指定岩性地层透镜体的大小、厚度、方向或岩性地层的尖灭位置等信息后建立夹层、透镜体等模型,反映岩性地层的岩性变化和沉积环境变化规律.

在建模过程中,需要处理的问题主要有:(1)建模数据源的一致性处理问题:钻孔数据、剖面数据、地形数据等可能存在自身或相互不一致的情况,比如钻孔孔口标高与地形不一致、剖面在交叉钻孔的位置地层不一致等.建模前,必须先处理这些问题,才能进行地层分区图的提取。(2)地质子面点高程插值时高程冲突问题:按照从上到下的顺序对地层子面高程插值,由于样本点高程值差异程度的未知性,可能出现当前地层上某些点的高程值高于上覆

地层的底板高程,与事实不符.可通过预先对插值点的高程进行范围约束来解决该问题。(3)插值点的搜索范围选择问题:插值点的搜索范围取决于样本点的个数、高程值差异程度、分布位置、样本点的地层厚度以及插值点所属子面的平面区域范围等特征.首先根据待插值点确定一个缺省的搜索范围,然后根据各个范围内的样本点地层厚度、属性值动态调整搜索范围的边界,把影响因素小的样本点排除.搜索范围的合理与否直接决定了插值后的地层曲面与实际的接近程度。(4)地质子面的无效点去除问题:由于子面模板库是所有地层分区两两相交得到的结果,因此,最初得到的地层子面一般包含许多冗余点信息.可以通过新增点和边所属的地层信息,消除其中的冗余信息,提高后续构建地层模型的效率。(5)标准层序中对透镜体的表达问题:在统、组、段这些级别的整体地层中,自上而下有一定的层序.如果遇到 A-B-A 这样的夹层的情况,可用将其转化为 A-B-A1 的方式对钻孔分层数据进行处理,将 A1 这个地层与 A 采用同样的参数进行表达.地层模型建完后,将 A 和 A1 地层设法合并即可。(6)分区边界点过多的问题:地层分区图编制时,为了保证边界的精度,可能会将分区边界绘的比较光滑,分区边界上的节点过多.为了去除冗余节点,并保证建模的精度和效率,可对分区边界上的点进行处理.处理时,不能简单地对每一个分区多边形进行点抽稀,而应该首先计算出子面模板库中形成多边形的所有弧段列表,然后对这些弧段进行统一抽稀处理,这样既提高了效率,又保证了不同分区在公共边界处的空间和拓扑一致性.

4 结论与建议

基于子面模板库的第四系三维地质模型构建方法,利用第四系具有标准层序的基本特点,充分借鉴“主 TIN”模板的层状地质体统一自动建模思想,利用地层分区图解决地层模型构建在水平方向上的范围不容易准确确定的问题,在深度上,通过合理计算插值点的搜索范围和选择适当的插值方法,得到较精确的地层曲面形态.该方法使用统一的子面模板库,解决了确定“主 TIN”模板时,进行上下地层面两两三维求交的效率低下和冗余点的爆炸式增长问题,并将复杂的三维问题转化为平面计算问题,在保证建模精度的同时,提高了模型构建的效率和自动化程度.本文采用厦门某地的数据进行了第四系三

维地质建模实验,从实验结果看,建模精度较高,速度快,构建的模型能够反映第四系的基本地质特征,也能解决新增钻孔数据后的模型快速更新问题。

后期将在构建地层子面模板库的过程中引入断层数据,将第四系三维地质结构建模扩展到基岩区的三维地质结构建模,支持含断层、褶皱、复杂透镜体等特殊地质结构特征的地层模型构建。同时在地层曲面点高程的自适应插值方法、岩性地层模型的快速精细构建、岩性地层相变的反映等方面进行更深入的研究,增强建模算法对复杂模型构建的支持度。

References

- Bai, S. W., He, H. J., Wang, C. X., 2002. 3-Dimension Strata Information System and Information of Geotechnical Engineering. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (City Science Edition)*, 19(1): 23—26(in Chinese with English abstract).
- Chen, G. L., Zhang, Y. H., Sheng, Q., et al., 2011. Research of 3D Modeling and Visualization for Highway Slopes Based on GIS. *Rock and Soil Mechanics*, 32(11): 3393—3398(in Chinese with English abstract).
- De Kemp, E. A., 1999. Visualization of Complex Geological Structures Using 3D Bezier Construction Tools. *Computers and Geosciences*, 25(5): 581—597.
- Fisher, T. R., Wales, R. Q., 1990. 3D Solid Modeling of Sandstone Reservoirs Using NURBS. *Geobyte*, 5(1): 39—41.
- Li, A. Q., He, Z. W., Deng, Y., 2011. Three-Dimensional Dynamic Modeling of Stratified Geology Solid Based on Sections. *Journal of Image and Graphics*, 16(9): 1702—1707(in Chinese with English abstract).
- Li, M. C., Liao, Z. J., Liu, F., et al., 2011. 3D Interpolation-Approximation Fitting Construction Method for Complex Geological Surfaces. *Engineering Sciences*, 13(12): 103—107(in Chinese with English abstract).
- Liu, X. G., Chen, G. L., Hou, W. S., et al., 2006. 3D Complex Geological Entity Modeling Method Based on Line-Frame Model. *Earth Science—Journal of China University of Geoscience*, 31(5): 668—672(in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. P., He, H. J., Li, Q., et al., 2009. Study of the Technology of 3D Modeling and Visualization System Based on Python. *Rock and Soil Mechanics*, 30(10): 3037—3042(in Chinese with English abstract).
- Mallet, J. L., 1992. *Geomodeling*. Oxford University Press, New York, 624—625.
- Ming, J., 2011. A Study on Three-Dimensional Geological Modeling. *Geography and Geo-Information Science*, 27(4): 14—18, 56(in Chinese with English abstract).
- Su, X., Huang, L. P., Lin, X. C., et al., 2008. 3D Geological Bodies Based on Tetrahedron Mesh and Its Generation Algorithm. *Coal Geology & Exploration*, 36(1): 5—8(in Chinese with English abstract).
- Wang, B. J., Shi, B., Song, Z., 2008. 3D Geological Modeling Method Based on GIS and Virtual Reality Modeling. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27(S2): 3563—3569(in Chinese with English abstract).
- Wang, C. X., Bai, S. W., He, H. J., 2003. Study on Geological Modeling in 3D Strata Visualization. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 22(10): 1722—1726(in Chinese with English abstract).
- Wang, X., Meng, X. B., Wang, X. Y., et al., 2011. The Research Geometric Surface Modeling for Complicated Geological Body. *Petroleum Geophysics*, 9(3): 10—16(in Chinese with English abstract).
- Wu, Q., Xu, H., 2004. Three-Dimensional Geological Modeling and Visualization Method. *Science in China (Ser. D)*, 34(1): 54—60(in Chinese with English abstract).
- Xu, N. X., Duan, Q. W., Mei, G., et al., 2011. Three-Dimensional Geological Modeling Method and Program Implementation. Geology Publishing House, Beijing, 1—3(in Chinese).
- Xu, N. X., Wu, X., Wang, X. G., et al., 2006. Approach to Automatic Hexahedron Mesh Generation for Rock-Mass with Complex Structure Based on 3D Geological Modeling. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 28(8): 957—961(in Chinese with English abstract).
- Yfantis, E. A., 1988. Simulation of Geological Surfaces Using Fractals. *Mathematical Geology*, 20(6): 667—672. doi: 10.1007/BF00890583
- Zhong, D. H., Li, M. C., 2005. *Water Conservancy and Hydro-power Engineering Geological 3d Modeling and Analysis*. China Water Power Press, Beijing, 168—169(in Chinese).
- Zhu, L. F., Pan, X., Wu, X. C., 2006. Design and Development of 3D Geological Modeling and Visualization System. *Rock and Soil Mechanics*, 27(5): 828—832(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白世伟, 贺怀建, 王纯祥, 2002. 三维地层信息系统和岩土工程信息化. *华中科技大学学报(城市科学版)*, 19(1): 23—26.
- 陈国良, 张勇慧, 盛谦, 等, 2011. 基于地理信息系统的公路边坡三维建模及可视化研究. *岩土力学*, 32(11):

- 3393—3398.
- 李爱勤,何珍文,邓轶,2011.城市地质中基于剖面的 3 维层状地质体动态建模.中国图象图形学报,16(9):1702—1707.
- 李明超,缪正建,刘菲,等,2011.复杂地质曲面三维插值——逼近拟合构造方法.中国工程科学,13(12):103—107.
- 刘修国,陈国良,候卫生,等,2006.基于线框架模型的三维复杂地质体建模方法.地球科学——中国地质大学学报,31(5):668—672.
- 刘振平,贺怀建,李强,等,2009.基于 Python 的三维建模可视化系统的研究.岩土力学,30(10):3037—3042.
- 明镜,2011.三维地质建模技术研究.地理与地理信息科学,27(4):14—18,56.
- 苏幸,黄临平,林孝成,等,2008.基于四面体格网的三维地质体建模算法.煤田地质与勘探,36(1):5—8.
- 王宝军,施斌,宋震,2008.基于 GIS 与虚拟现实的三维地质建模方法.岩石力学与工程学报,27(S2):3563—3569.
- 王纯祥,白世伟,贺怀建,2003.三维地层可视化中地质建模研究.岩石力学与工程学报,22(10):1722—1726.
- 王鑫,孟祥宾,王修银,等,2011.复杂地质体几何表面建模方法研究.油气地球物理,9(3):10—16.
- 武强,徐华,2004.三维地质建模与可视化方法研究.中国科学(D 辑),34(1):54—60.
- 徐能熊,段庆伟,梅钢,等,2011.三维地质建模方法及程序实现.北京:地质出版社,1—3.
- 徐能雄,武雄,汪小刚,等,2006.基于三维地质建模的复杂构造岩体六面体网格剖分方法.岩土工程学报,28(8):957—961.
- 钟登华,李明超,2005.水利水电工程地质三维建模与分析.北京:中国水利水电出版社,168—169.
- 朱良峰,潘信,吴信才,2006.三维地质建模及可视化系统的设计与开发.岩土力学,27(5):828—832.