

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.04.012

复杂断裂构造条件下城市地质三维建模方法研究

李林,朱立峰*,李政国,李珂,李清

(中国地质调查局西安地质调查中心,陕西西安 710054)

摘要:三维地质建模技术是城市地质应用中的一个前沿课题。三维模型的准确程度对于工程分析、判断和决策影响极大。常规的三维地质建模方法通过大量简化地质条件来降低建模的复杂度,却无法精确描述断层等复杂而特殊的地质现象。笔者以构造条件复杂、断裂发育的沉积盆地为研究对象,对复杂断裂构造条件下城市地质三维建模中的关键技术和建模方法进行了探索性研究,形成了一套以地质构造框架为单元,以岩层出露线和岩层产状作为岩层的形态要素,钻孔数据作为层面的控制要素,形成一套由面成体的“构造镶嵌”地质建模的技术方法流程。关中盆地第四纪三维地质建模实例证明,该方法可以有效地提高复杂断裂条件下三维地质建模的效率与准确性,可为地质条件复杂地区的城市地质调查项目提供借鉴。

关键词:三维地质建模;城市地质;复杂断裂构造;关中盆地

中图分类号:P56;O343.2;N945.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-6248(2022)04-0133-07

Technology Research on the Constructing of Urban Geological 3D Model in Condition of Complex Faults

LI Lin, ZHU Lifeng*, LI Zhengguo, LI Ke, LI Qing

(Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: The 3D geological modeling for the complex geologic bodies is an essential technique of the urban geology. The accuracy of 3D model, for engineering analysis, judgment and decision has great influence. A new method for 3d geological modeling is introduced, which is based on the “structures mosaic” technique. The key technology and modeling process of urban geological 3D modeling on complex fault conditions are discussed. A case study of geological model in Guanzhong basin is presented, which confirmed that, this method can effectively improve the efficiency and accuracy of complex structures condition, and can provide reference for the areas of complex geological conditions in urban geological survey.

Keywords: 3D geological modeling; urban geology; complex geological faults; Guanzhong basin

收稿日期:2021-12-09;修回日期:2022-06-20;网络发表日期:2022-11-15;责任编辑:贾晓丹

基金项目:中国地质调查局项目“关中盆地城市群城市地质调查综合研究”、“西安多要素城市地质调查”(1212011220031、DD20189220)联合资助。

作者简介:李林(1976-),男,高级工程师,主要从事地学空间分析及地学信息化建设工作。E-mail:lilin@mail.cgs.gov.cn.

* 通讯作者:朱立峰(1973-),男,高级工程师,长期从事水工环地质调查与研究工作。E-mail:397871699@qq.com.

由于地质现象的复杂性和多解性,使地质体及其空间关系变得异常复杂,在计算机中表达三维地质现象存在较大难度。国内外学者在三维地质空间数据模型方面做了许多研究,先后提出了几十种三维数据模型,这些模型适用的地质现象、数据来源、拓扑关系、空间分析与应用等条件各不相同,所采用的建模方法及技巧也各不相同。但总体来说,多数模型往往通过大量简化地质条件来降低建模的复杂度,多适用岩层结构单一、地质构造简单的区域,却无法精确描述诸如断层、微构造、透镜体、隔夹层等复杂而特殊的地质现象。而地质条件复杂地区,构造作用不但破坏了地质体的连续性,还改变了地层数据的空间分布格局,最初呈连续分布的层状地质体往往会被纵横交错的构造面切割的支离破碎,从而增加了三维地质建模过程中数据结构、拓扑关系,以及相应算法的复杂程度,至今仍然缺乏成熟的通用建模方案(武强等,2004;杨东来等,2007;魏嘉,2007;潘懋等,2007;孙波等,2015;李青元等,2016)。

近年来,随着三维可视化技术及计算机硬件的发展,三维建模软件不断成熟,针对复杂三维地质空间建模方法和三维地质模型的精细化表达,取得了不少新的进展。例如,把建模单元按照信息种类不同分解为地表模型、地下模型和勘探信息模型(焦养泉等,2006),每类建模单元采用不同的三维数据模型表达,可采用不同的建模数据源和建模方法,以达到精细刻画每类单元的目的,但同时也割裂了不同种类建模单元固有联系。为了克服此类局限,通过追踪交叉剖面中地质界线的空间关系信息及其地质语义信息(屈红刚,2008),将地质界线进行分类提取,再此基础上进行三角剖分形成地质界面,实现了模型的自动化快速构建。但在构造断裂发育地区,具有相同语义信息的地质界线,因其被断裂分割而无法直接进行自动建模。为提高建模精度,基于子面模板库(花卫华,2010),通过将三维地层面构建分解为地层平面分布各子区域来构建,将复杂的大范围区域地质建模简化为若干个小区域的地质体建模。虽然采用比较密集的交叉剖面可提高三维建模的精度,但同时也大大增加了建模的工作量。另外,其建模过程完全割裂了性质相近甚至相同单元的同步处理过程,人为造成了建模过程的复杂化。

笔者以构造条件复杂、断裂较为发育的沉积盆地为研究对象,对复杂断裂构造条件下城市地质三

维建模中的关键技术和建模方法进行了探索性研究,形成了一套“构造镶嵌”模式的三维城市地质建模技术方法流程。实践证明,该方法可以有效地提高复杂地质条件下三维地质建模的效率与准确性。

1 “构造镶嵌”三维地质建模流程

复杂断裂条件下三维地质建模技术的重点在构造的分析、模拟和表达上。首先,应在工作区开展地质构造框架模型研究,以框架模型为基础划分构造单元;在单一构造单元限定的区块内部,将岩层地表出露线和岩层产状作为地层面的形态要素,以钻孔和剖面数据作为层面的控制要素,建立区块地层展布模型;最后以地层面和构造面为边界,由面成体构建研究区三维地质实体模型。具体建模流程见图1。

1.1 数据源选择

断裂构造发育地区,由于构造活动已破坏了区域地层的连续性,不能简单地使用单一数据源进行三维建模,而需要综合使用研究区各类建模数据源,包括地质构造平面图、钻孔、地层顶底板等值线图、剖面图和地球物理解释成果资料等。各个来源的基础数据存在精度不一、尺度不一、参考标准不一、数据格式不一等特点,在进行正式建模之前,必须针对不同建模单元或建模尺度对数据进行分类整理,尽量采用统一的比例尺和相近的数据精度。

在实际建模过程中,不同数据源之间总会存在矛盾和冲突,建模时还需要进行空间数据一致性检查和处理。处理的原则是以高可靠性数据为基准,高精度数据为标杆,解释性数据为依据。

1.2 建模单元划分

首先,开展研究区地质构造条件研究,进行区域构造层序、界面构造形态分析,根据不同深度的地震反射、钻孔勘探等探测成果,结合重磁等地质地球物理资料,确定区内控制性构造的三维空间分布及其特征,据此进行构造区划,以构造区划为基本的建模单元。

单元划分过程,以各个构造单元为三维地质建模的边界条件,将建模区域划分为多个封闭的区域。每一封闭区域即为一个单元格,单元格内部具有相近或相同的地质特征,因而可利用相同的数据源和相同的建模过程,大大提高建模效率。对于不封闭的建模区域,将边界进行延伸,形成封闭网格,按照封闭网格规则进行处理。

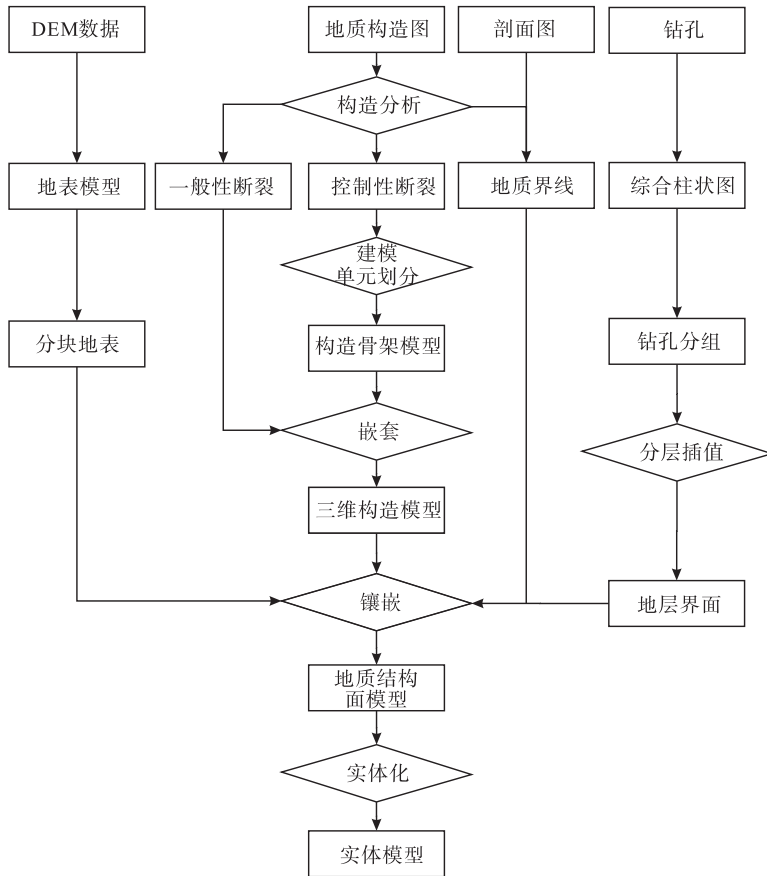


图 1 “构造镶嵌”三维地质建模方法流程图

Fig. 1 Flow diagram of “structures-mosaic” 3D geologic modeling

1.3 构造建模

由于建模单元是在构造分区基础上划分,客观上将研究区断裂构造分为 2 大类,边界断裂和单元内断裂。边界断裂一般是由研究区控制性断裂组成,属于“再造型”断裂,对原有地层系统影响甚大,割裂了原有地层连续性。在三维建模过程中,单独处理,保证主断层完整性、连续性,暂不考虑与地层系统的关联性。

单元内次级断裂属“改造型”断裂,对单元内原有地层系统影响较小,往往无法完全切断原有地层系统的整体性。在控制断裂骨架模型基础上,分析建模单元内地层和断裂构造的空间分布特征,根据断裂构造的发育期次和断层间的主辅错切关系,分级嵌入次级或分支断裂,其建模过程需要考虑与地层建模关联性,往往被主断裂和地层系统相交,无法保证其连续完整。

1.4 地质体建模

地层是最常见的地质实体,是其他地质实体和

地质构造赋存的物质基础。由于地下岩土体空间分布的不连续、不均匀和不确定性,地层之间相互交叉侵蚀,地质实体之间关系错综复杂。地层建模首先需要建立研究区区域地层层序,然后以钻孔、剖面、顶底面等值线等为主要数据来源进行模型构建。地层建模一般采用多层三角网模型,对各个地层进行插值和拟合,然后引入构造模型进行约束,形成三维地层骨架结构。由于建模数据源的不均匀分布,造成同一单元内建立的地层面疏密程度差别较大,因此需要根据建模精度要求进行细分或简化。

追踪地层面外边界形成的地层边界闭合多边形,根据相邻地层面边界,采用轮廓线拼接方法对地层侧面进行缝合处理。对于受断层控制的地层边界,需要按照断裂面形态进行缝合处理。

地质体实质上是三维的密闭空间,因此需要在研究区三维地质层面模型基础上,根据地质体的空间关系,进行三维拓扑分析,搜索每个地质体的边界地质面,并进行闭合处理,形成含有完整外轮廓的复

杂地质体模型,最后将每一地质体附加属性就形成了最终的复杂地质体三维模型。

1.5 模型修正与更新

三维建模过程中数据源的选择处理,构造及地层建模都被限定在单一建模单元内部,待更新地层选用带特征约束的三角剖分法来表达,约束条件即为建模单元边界,因而三维模型能够支持局部更新与细化。边界构造的更新也被限定在相连的建模单元中,无需全域重建。

2 建模方法优势

相对于其他地质三维建模方法,“构造镶嵌”方法具有以下优势。

(1)以构造区划单元作为建模单元,具有明确的地质意义,同一单元因具有相同或相近地质属性能够大大减轻建模工作量。

(2)通过划分建模单元,将区域三维建模工作分而治之,在同一建模单元内部,地质构造条件相对简化,降低了建模难度。

(3)三维建模过程中数据源选择处理,构造及地层建模都被限定在单一建模单元内部,因而三维模型能够支持局部更新与细化。

(4)通过合理的建模单元划分,本方法还能够支持不同精度三维模型无缝融合,实现多精度三维地质模型的平滑过渡。

3 建模实例

3.1 地质背景

关中盆地位于陕西省中部,南依秦岭,北至北山,西起宝鸡,东抵潼关,为三面环山向东倾斜并敞开的“新月形”盆地。加持于强烈上升的秦岭和渭北山地之间,盆地内断裂发育,近东西向、北西向和北东向3组断裂把盆地分割成若干次级地块,组成伸展断陷盆地。前新生界及花岗岩构成了盆地基底并出露于盆地边缘,巨厚的新生界形成了辽阔的关中盆地,最大深度达7 000 m,至今仍处于持续的伸展、沉降与沉积状态中。盆地新生界主要发育古近系、新近系及第四系,古近系、新近系大多数掩埋于平原之下,其上为第四系覆盖,仅在深切沟谷或山地边缘见及,第四系广布全盆地(权新昌,2005;谢振乾,2010)。

关中盆地活动断裂极为发育。近东西向断裂纵贯盆地轴部及边缘,形成早,活动历史长,规模大,为盆地主伸展断裂,控制着盆地的形成与发展;北西向断裂主要发育在盆地西部,形成时间次早,活动历史较长,影响和制约着盆地西部的结构构造及第四纪沉积;北东向断裂主要在盆地中部和东部,形成时间较晚,切割近东西向活断层,对盆地中、东部断块结构和构造地貌起一定控制作用;北北东向断裂主要发育在盆地东部,形成最晚,切割近东西向活断层,对盆地东部的断块结构、构造、地貌起着明显的控制作用。

3.2 模型构建

结合关中盆地构造特点,建模共考虑18条断层,按照控盆断裂和控制单元断裂将关中盆地划分为6大构造单元(穆根胥,2016),依据盆内断裂将单元进一步细分为13个构造小区(图2)。根据现有资料和建模的精度要求,为了提高建模效率、减少存储空间,首先需要对地层进行筛选,即根据工程建设所涉及的地层深度、部位及地层、构造的分布情况,选定建模必须模拟的地层对象。经过综合分析考虑,关中盆地建模的地层模拟对象从浅到深为:第四系中上更新统($Qp_{2-3} - Qh$)、第四系下更新统(Qp_1)、新近系张家坡组(N_2z)、新近系蓝田组-灞河组(N_2bh-l)、新近系冷水沟组-寇家村组(N_1ls-k)、古近系白鹿塬组-红河组($E_2h - E_3b$)(王斌,2013)。

建模平台采用GOCAD软件,在每一建模单元内部,根据建模范围和数据来源情况确定不同的建模精度,从数据库中提取钻孔点位和分层信息生成层面强约束点,从地质剖面中提取有关地层边界线信息,插值计算构造各层面模型,然后根据地层之间的叠覆关系生成地层实体模型,最终以构造边界镶嵌组合成为整体模型(图3)。

3.3 成果与应用

应用“构造镶嵌”方法建立的关中盆地新生界三维地质结构模型见图3。模型直观表达了构造控制下新生代地层的沉积特点。蒲城凸起仅有新近系沉积,新生界厚度一般小于1 000 m。固市凹陷自古近纪以来均有沉积,在固始一带为沉降中心,厚度大于6 000 m,向西北部逐渐变浅。临蓝凸起古近系、新近系均有沉积,在骊山-渭南沟谷有出露,沉积厚度变化较大,厚度浅部500 m,深部2 500 m。西安凹陷古近系、新近系均有沉积,户县-兴平一带为沉积中心,新生界最厚达6 000余m,一般厚达3 000余m。咸渭凸起新近系以来全区分布古近系,地层

厚度由北向南逐渐增厚,新生界厚度小于 3 000 m,最北端厚度仅 100~200 m。宝鸡所在的西部隆起区仅有新近系上新统沉积,厚度总体不大,新生界厚度小于 500 m。

基于三维地质模型,可实现任意位置的地层构造信息查询及显示,可实现各单元的分解和组合,可

突显局部地区的详细地质信息(图 4),还可以不受限制的进行任意方向的剖面切割(图 5)、虚拟钻孔提取、隧道漫游等可视化分析,精细化展现新生代地层在三维空间的沉积序列,揭示地层的横纵向分布、岩性和沉积环境在三维空间上的相变关系,从而深化对关中盆地新生界地质特征的认识。

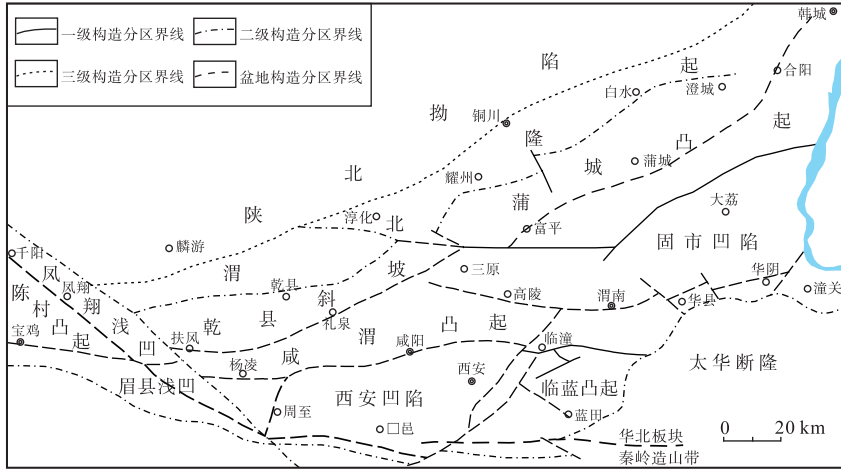


图 2 关中盆地构造分区图(据穆根胥,2016)

Fig. 2 Tectonic units in Guanzhong basin

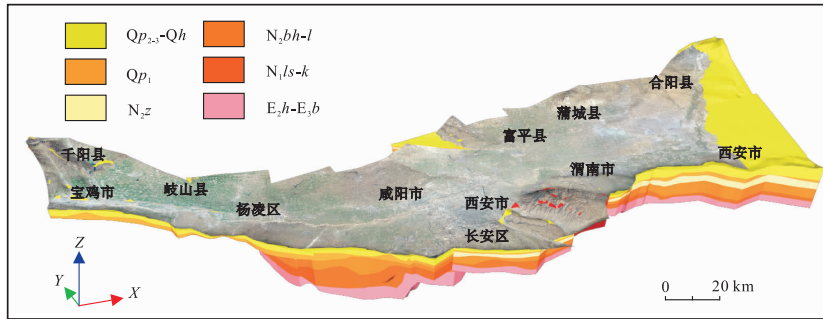


图 3 关中盆地三维地质模型图

Fig. 3 3D geological model of Guanzhong basin

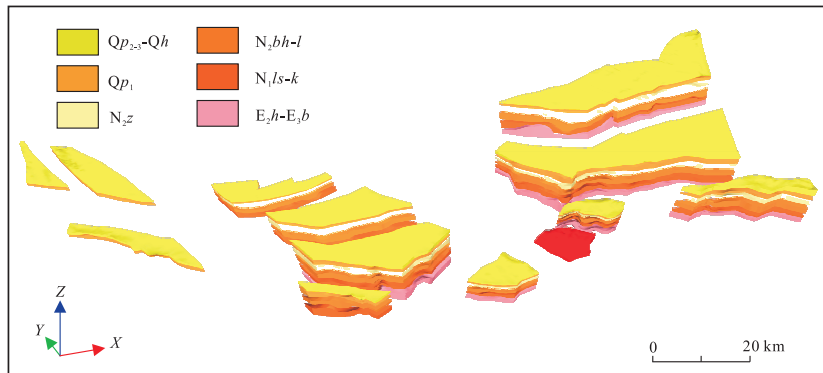


图 4 关中盆地分区地质模型图

Fig. 4 3D geological exploded map of Guanzhong basin

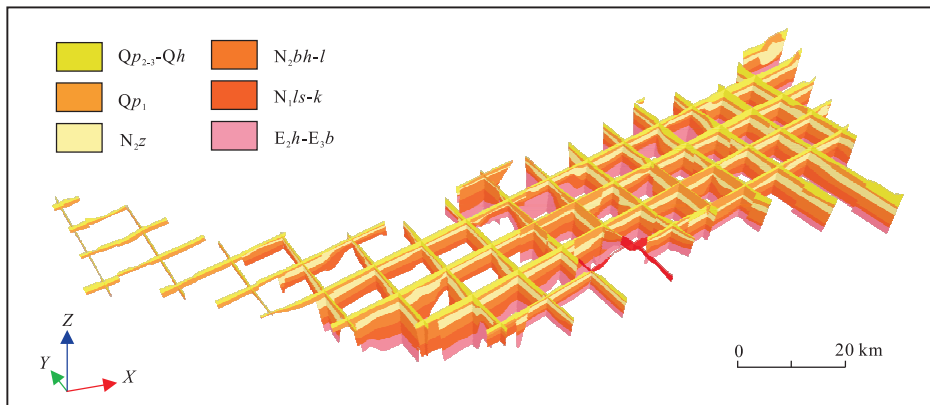


图5 关中盆地三维地质栅栏图

Fig. 5 3D geological fence diagram of Guanzhong basin

4 结论

(1) 本文提出的以构造分区为单元“构造镶嵌”建模方法完整构建了新生界三维地质模型, 该模型精细刻画了各个单元新生代地层在三维空间的沉积序列和相变关系, 深化了对关中盆地新生界地质特征的认识。

(2) 采用的“构造镶嵌”方法将区域三维建模工作分而治之, 通过构造分区划分建模单元, 具有明确的地质意义; 在同一建模单元内部, 因其具有相同或相近地质属性, 建模条件相对简化, 大大降低了建模难度。

(3) 利用“构造镶嵌”方法可以有效地提高复杂断裂构造条件下三维地质建模的效率与准确性, 为地质条件复杂地区的城市地质调查项目提供借鉴。

参考文献(References):

武强, 徐华. 三维地质建模与可视化方法研究[J]. 中国科学(D辑)——地球科学, 2004, 34(1): 54-60.

WU Qiang, XU Hua. Study on 3D geology modeling and visualization method [J]. Science in China (Series D), Earth Sciences, 2004, 34(1): 54-60.

李良平, 胡伏生, 尹立河. 鄂尔多斯盆地白垩系三维地质建模研究[J]. 西北地质, 2007, 40(02): 109-113.

LI Liangping, HU Fusheng, YIN Lihe. Research on 3D geological modeling of cretaceous in ordos basin [J]. Northwestern Geology, 2007, 40(02): 109-113.

马朝阳, 王占昌, 张立海, 等. 新型三维地质建模方法及其在

成都-昌都区域建模的应用[J]. 西北地质, 2022, 55(02): 82-92.

MA Zhaoyang, WANG Zhanchang, ZHANG Lihai, et al. A New 3D Geological Modeling Method and Its Application in Chengdu-Changdu Region Modeling [J]. Northwestern Geology, 2022, 55(02): 82-92.

杨东来, 张永波, 王新春, 等. 地质体三维建模方法与技术指南[M]. 北京: 地质出版社, 2007.

YANG Donglai, ZHANG Yongbo, WANG Xinchun, et al. The geological body and the technology of 3D modeling method guide [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.

焦养泉, 朱培民, 雷新荣, 等. 地学空间信息三维建模与可视化——鄂尔多斯盆地及相关领域的实践[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

JIAO Yangquan, ZHU Peimin, LEI Xinrong, et al. 3D modeling and visualization of geosciences spatial information: Application to the Ordos basin and other fields [M]. Beijing: Science Press, 2006.

魏嘉. 地质建模技术[J]. 勘探地球物理进展, 2007, 30(1): 1-6.

WEI Jia. Review of geologic model building techniques [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2007, 30(1): 1-6.

李青元, 张洛宜, 曹代勇. 三维地质建模的用途、现状、问题、趋势与建议[J]. 地质与勘探, 2016, 52(4): 759-767.

LI Qingyuan, ZHANG Luoyi, CAO Daiyong, et al. Usage, Status, Problems, Trends and Suggestions of 3D Geological Modeling [J]. Geology and Exploration, 2016, 52(4): 759-767.

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.

PAN Mao, FANG Yu, QU Honggang. Discussion on sever-

- al foundational issues in three-dimensional geological modeling[J]. *Geography and Geo-information Science*, 2007, 23(3):1-5.
- 孙波,刘大安.复杂地质界面三维重构与评价方法[J].*岩石力学与工程学报*,2015,34(3):556-564.
- SUN Bo, LIU Da'an. Three-dimensional reconstruction of complex geological interfaces and its evaluation method [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015;34(3):556-564.
- 钟登华,李明超,杨建敏.复杂工程岩体结构三维可视化构造及其应用[J].*岩石力学与工程学报*,2005,24(4):575-580.
- ZHONG Denghua, LI Mingchao, YANG Jianmin. 3D visual construction of complex engineering rock mass structure and it application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2005,24(4):575-580.
- 屈红刚,潘懋,明镜.基于交叉折剖面的高精度三维地质模型快速构建方法研究[J].*北京大学学报*,2008,44(6):915-920.
- QU Honggang, PAN Mao, MING Jing, et al. An Efficient Method for High-Precision 3D Geological Modeling from Intersected Folded Cross-Sections[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2008, 44(6):915-920.
- 花卫华,廖艳云,刘修图,等.基于子面模板库的第四纪三维地质模型快速构建[J].*地球科学(中国地质大学学报)*,2013,38(5):1128-1134.
- HUA Weihua, LIAO Yanyun, LIU Xiuguo, et al. Rapid Construction of Quaternary 3D Geologic Model On Sub-Surface Template Library. *Earth Science(Journal of China University of Geoscience)*. 2013,38(5):1128-1134.
- 权新昌.渭河盆地断裂构造研究[J].*中国煤田地质*,2005,17(3):2-8.
- QUAN Xinchang. Weihe basin faulted structure study[J]. *Coal Geology of China*,2005,17(3):2-8.
- 谢振乾,杨建军,郑宁平,等.论渭河盆地断块运动及地震活动特征[J].*陕西地质*,2010,28(2):59-65.
- XIE Zhenqian, YANG Jianjun, ZHENG Ningping, et al. Characteristic of fault-block movement and seismicity in the Weihe Basin[J]. *Geology of Shaanxi*, 2010, 28(2):59-65.
- 穆根胥,李峰,闫文中,等.关中盆地地热资源赋存规律及开发利用关键技术[M],北京:地质出版社,2016.
- MU Genxu, LI Feng, YAN Wenzhong, et al. The Geothermal Resource Occurrence Rules and Key Technologies for Development and Utilization in the Guanzhong Basin. Beijing:Geological Publishing,2016.
- 王斌,郑洪波,王平,等.渭河盆地新生代地层与沉积演化研究:现状和问题[J].*地球科学进展*,2013,28(10):1126-1135.
- WANG Bin, ZHENG Hongbo, WANG Ping, et al. The Cenozoic strata and depositional evolution of Weihe Basin progresses and problems[J]. *Advances in Earth Science*, 2013,28(10):1126-1135.
- 刘修国,朱良峰,尚建嘎,等.面向城市地质信息平台的三维技术研究[J].*地理信息世界*,2005,3(2):26-30.
- LIU Xiuguo, ZHU Liangfeng, SHANG Jianga, et al. Study of 3D Techniques for Urban Geological Information Platform[J]. *Geomatics*,2005,3(2):26-30.
- 明镜,潘懋,屈红刚,等.北京市新生界三维地质结构模型构建[J].*北京大学学报(自然科学版)*,2009,45(1):111-119
- MING Jing, PAN Mao, QU Honggang, et al. Constructing threedimensional geological structure model of Cenozoic Erathem in Beijing [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*,2009,45(1):111-119.
- 修群业,王军,高兰,等.云南金顶矿床矿体三维模型的建立及其研究意义[J].*矿床地质*,2005,24(5):501-507.
- XIU Yequn, WANG Jun, GAO Lan, et al. Construction of a three-dimensional model for orebodies of Jinding deposit, Yunnan Province and it's significance in geological study[J]. *Mineral Deposits*,2005,24(5):501-507.
- 潘伟,刘大安,郭华锋,等.向家坝水电站 VII 坝址三维地质建模研究[J].*岩土工程学报*,2005,27(11):1317-1322.
- PAN Wei, LIU Da'an, GUO Huafeng, et al. Study on 3D geological modeling in VII dam site of Xiangjiaba Hydropower Station [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(11):1317-1322.
- 朱良峰,吴信才,潘信.三维地层模型误差修正机制及其实现技术[J].*岩土力学*,2006,27(2):268-271
- ZHU Liangfeng, WU Xincan, PAN Xin. Mechanism and implementation of error correction for 3D strata model[J]. *Rock and Soil Mechanics*,2006,27(2):268-271.
- Laurent Aillères. New Gocad® developments in the field of 3-dimensional structural geophysics[J]. *Journal of the Virtual Explorer*, 2000, 1(28):58-64.
- Mallet J L. Discrete smooth interpolation [J]. *Geometric Modeling Computer Aided Design*, 1992, 24(4):177-191.