

## GOCAD 三维可视化在深部地质调查中的应用

赵文菊<sup>1</sup>, 王 营<sup>2</sup>, 滕寿仁<sup>1</sup>, 周俊鹏<sup>1</sup>

1. 辽宁省地质矿产调查院, 辽宁 沈阳 110031 2. 辽宁省核工业地质局, 辽宁 沈阳 110031

**摘 要** 通过介绍三维地质建模的意义以及应用 GOCAD 软件进行三维建模的原理和方法,以本溪地区深部地质调查为例,对本溪地区的地层、构造、岩体进行分析并建立三维模型。每个地质三维模型都能更好地反映地质体在三维空间的分布形态,同时也可以根据研究目标不同,建立所需的目标地质体的三维形态。深部地质三维模型的建立除了依靠地表信息外,还要靠钻孔、地球物理等先进的技术手段的约束来不断修正、完善模型,共同建立一个符合地质规律、能真正反映客观地质现象的三维模型,为以后地质技术人员认识地质现象提高效率。

**关键词** GOCAD; 深部地质; 三维建模; 本溪地区

DOI:10.13686/j.cnki.dzyzy.2015.04.016

## APPLICATION OF GOCAD THREE-DIMENSIONAL VISUALIZATION IN DEEP GEOLOGICAL SURVEY

ZHAO Wen-ju<sup>1</sup>, WANG Ying<sup>2</sup>, TENG Shou-ren<sup>1</sup>, ZHOU Jun-peng<sup>1</sup>

1. Liaoning Institute of Geological and Mineral Survey, Shenyang 110031, China; 2. Liaoning Bureau of Nuclear Geology, Shenyang 110031, China

**Abstract** : By introducing the 3D geological modeling with principle and method of application of GOCAD software, taking deep geological survey in Benxi region for example, the authors analyze the stratum, structure and rock mass and establish 3D models. Each geological 3D model can reflect the distribution pattern of geological bodies in 3D space better, meanwhile the 3D shape of required target geological body can be established according to different research objects. Deep geology 3D modeling relies not only on surface information, but also the technical constraint of drilling and geophysical data to improve the model, which would conform to geological regularity and truly reflect geological phenomena, and could help geologists recognize geological occurrence and improve work efficiency in the future.

**Key words** : GOCAD; deep geology; 3D modeling; Benxi region

### 0 前言

随着信息化时代的不断发展,计算机技术在地质领域的应用越来越广泛,人们认识地质规律、发掘地质现象也逐渐从平面、剖面上的二维形式向三维空间转变。因此,三维地质建模及可视化在行业中开始渐渐涌现,最早提出三维地质建模和可视化概念的是加拿大 Simon W. Houlding (1993)。所谓三维地质建模(3D Geosciences Modeling),是指采用适当的数据结构在计算机中建立能反映地质构造的形态和各要素之

间关系以及地质体物理、化学属性空间分布等地质特征的数学模型。随着计算机软硬件技术的飞速发展,三维地质建模技术备受关注,并得到了广泛的研究和应用。

三维地质建模及可视化在澳大利亚、加拿大、美国等国家早已开始投入到实际应用中。而我国三维地质建模也随着 2012 年国家“深部地质调查与三维地质填图”试点项目的启动进入了快速发展时期。要进一步开展矿产资源评价和地下空间管理,就必须查明地下空

收稿日期 2014-09-20, 修回日期 2015-03-28. 编辑 张哲.

基金项目:中国地质调查局“本溪-临江地区深部地质调查”项目(1212011220246).

作者简介:赵文菊(1986—),女,硕士学位,从事地质矿产勘查及三维可视化研究工作,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区宁山中路 42 号羽丰大厦, E-mail://lnddyzgb@126.com

间的基本结构特征,增强对地质结构的认识.建立地下三维地质可视化模型,不但方便了地质人员进行专业领域知识的讨论、传播和发展,而且还能将专业领域复杂的、抽象的或专业性过强的成果及结论用简洁的、直观的、易于被广泛接受的方法和形式表现出来,建立逼真的空间立体地质模型<sup>[1]</sup>.这样可以更高效地描述各种地质信息(如某一区域地层厚度),直观有效地表达各种地质现象间的拓扑关系(如地层接触关系等),从而大大加快专业技术人员对地质现象的认识,提高工作效率,充分利用地质资料的宝贵价值.本文依托本溪-临江深部地质调查项目,对本溪地区深部地质体进行分块分析、讨论,逐渐建立各个地质体的三维模型,进而为建立本溪地区整体深部地质结构模型奠定基础,为后续地质人员了解该区域的地质结构提供三维展示.

## 1 GOCAD 软件简介

GOCAD(Geological Object Computer Aided Design)地质建模软件由法国 Nancy 大学研发.自 1989 年开始,历经 10 年发展,GOCAD 软件正式发行,该软件具备强大的三维模型构建和分析功能,能够直接导入各种专业软件数据,实现交叉学科团队统一协作,并且提供了非常全面的三维空间分析支持,从数据结构、工作模式到功能设置都实现了真三维化.通过系统提供的虚拟现实接口,甚至能实现生成虚拟地质构造环境,增强使用者对数据的操作和控制能力,从而提高研究人员对地质构造的认识水平.GOCAD 不仅支持空间对象的几何建模,还提高了属性建模的工具,使用者能够建立地质体或地下空间的地球物理、地球化学和地下流体等方面的专业模型.

DSI(Discrete Smooth Interpolation)空间插值法是 GOCAD 软件使用的计算方法.其他插值方法不能满足三维空间插值的需要,对断裂等空间不连续现象支持不足.而 DSI 方法类似于解微分方程的有限元方法,用一系列具有空间实体几何和物理特性、相互连接的空间坐标点来模拟地质体,已知节点的空间信息和属性信息被转化为线形约束,引入到模型生成的全过程.此外,GOCAD 还具备良好的软硬件平台兼容性,可稳定运行于 32 位或 64 位操作系统,在 Windows NT、UNIX 和 Linux 环境中具有类似的拥护界面和相同的数据结构,使工作能够在 PC 或高端图形工作站等各种平台顺利进行.完善的地质统计分析功能使 GOCAD 提供了多种地质统计分析模块,如空间数据

分析、克里格估计、序贯高斯模拟等.这些保证了 GOCAD 软件运行的稳定性与可靠性<sup>[2-3]</sup>.

## 2 GOCAD 在深部地质调查中建模流程与方法

深部地质调查是在二维地表填图的基础上,利用二维平面图和剖面图等表达方式,分析关键地质要素地层、构造、岩体等在三维空间的展布形态,结合钻孔资料、地质剖面、地球物理资料,应用 GOCAD 软件平台实现三维可视化,建立可靠的三维地质模型,充分揭示地下地质情况.建模方法的选择极为关键.

### 2.1 地表三维建立

二维填图过程中使用的等高线是建立地表三维的基础,应用 MapGIS 软件将等高线的高程数据属性导出,编辑形成文本文件(.txt),将文件导入 GOCAD 软件中形成点文件,再对点文件加以优化及边界约束,最终由点创建面,生成地表形态的 DEM.为了使三维地表与平面地质图相统一,还可以将平面地质图或者遥感影像叠加在 DEM 上(图 1、2),形成平面地质图与三维地质图地表一致性.

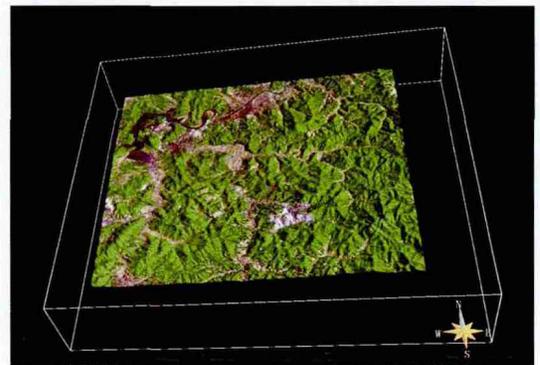


图 1 DEM 叠加遥感影像

Fig. 1 Superimposition of remote sensing image and DEM

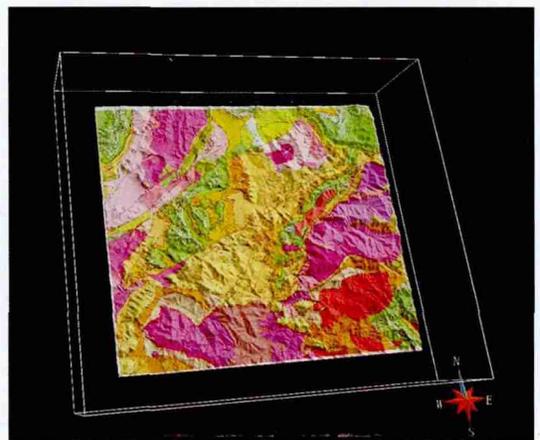


图 2 DEM 叠加地质图

Fig. 2 Superimposition of geologic map and DEM

### 2.2 断裂及地层建立

断裂与地层的建立主要依托剖面图，首先要根据地质复杂程度及需求确定剖面间距及剖切方向，采用地质下推方法对地下地质结构进行反演，勾绘出地层形态与断裂走向；再将二维剖面转换为三维剖面导入到 GOCAD 中，确定好剖面的位置，最后将相邻剖面所有相同地质界线连接成地层界面，将相同的断层线连接成断层面。

### 2.3 岩体建立

利用 GOCAD 建立岩体的方法是：首先，在 MapGIS 中将岩体边界线转出成为一条封闭曲线，并将 z 值统一赋予固定值（如 500 m）导入到 GOCAD 中；其次，依据产状绘制一定深度下该岩体边界线，也形成一条封闭的曲线对象，利用“Create form several curves”将两条封闭曲线连接成一个封闭的曲面，最后，依据岩体与地

层、断层、地表面的切割关系，并将多余的部分切割、删除处理，即可形成三维岩体对象模型<sup>[4]</sup>。岩体顶部采用地表 DEM 覆盖的方法，这样既可以避免因为直接封闭形成一个水平岩体顶面，不符合地表起伏形态，又可以避免岩体封顶与地表面重叠。

## 3 GOCAD 三维建模成果

### 3.1 断裂

本次成果展示以本溪为例，该区大地构造位于塔里木-华北板块内的华北陆块北缘东段，胶辽隆起带的太子河-浑江拗陷、辽阳-本溪凹褶断束上。地质构造经历了从太古宙至新生代复杂的构造演化史，不同演化阶段，形成了不同的构造形迹及构造组合样式，反映出不同的动力学机制和运动学特征（图 3）。从图 3 中可以看出全区断裂构造极其发育，以北东-北北东向

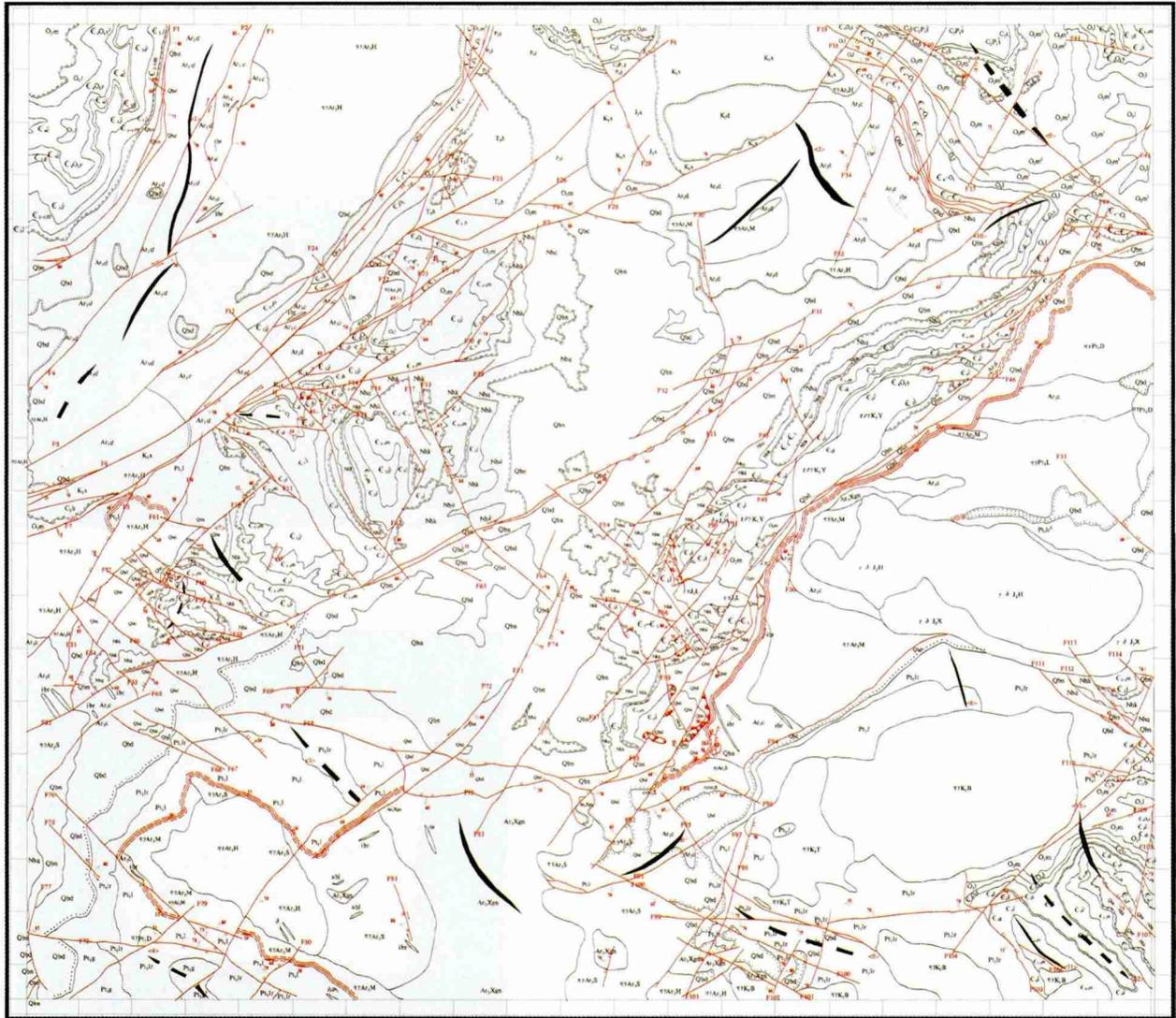


图 3 研究区构造纲要图

Fig. 3 Tectonic outline map of the study area

构造发育为主,断裂倾角陡立,规模较大,长达几十千米,宽达几十米。带内局部褶皱,地层倒转,断层两侧地层依次左行平移。该断裂带具有多期活动特点,既控制了中生代盆地的形成、沉积、发展、演化,又切割了中生界地层。其中主要的控矿构造包括寒岭-偏岭断裂、弓长岭-大台沟-思山岭断裂、庙沟-连家沟断裂,断裂走向 40~55°,具压扭性左行走滑性质,对全区的构造格局具有重要的控制作用。断裂切割全区的地层及岩体,建立全区断裂模型是深部地质建模的基础(图 4),它可作为以后分块建模的基础,从直观上反映断裂的空间展布形态、主断裂与次级断裂关系等。



图 4 全区构造三维模型

Fig. 4 3D structural model of the whole region

### 3.2 褶皱

#### (1) 棒槌砬子向斜

位于研究区东南部胡把什岩体、石碑岭岩体北侧的棒槌砬子-陈家堡子一带,呈北西向展布,出露面积较大,长约 4.2 km,宽 1 km 左右。褶皱核部为里尔峪岩组,两翼地层为浪子山岩组。褶皱倾向南西,南东端扬

起。褶皱南东端受到北东向断裂构造控制,褶皱类型为开阔褶皱。依据地层分布特征及盖层之下的岩体延伸情况建立三维模型(见图 5)。根据地质出露情况并结合周边钻探资料推断,浪子山岩组下部地层为新太古代侵入岩,北部被逆断层切断。

#### (2) 郭家堡子复式褶皱

位于研究区的东南角,东南部大部分出露的均是岩体,只有在东南角出露比较齐全的中生代至古生代地层。该复式褶皱由一个向斜和两个背斜组成,走向均为北西向,向斜核部地层发育齐全,形态完好,两侧背斜附近受断裂控制,翼部略有错动,但整体影响不大。根据地层的新老关系及褶皱形态建立局部三维模型(见图 6)。该处盖层发育齐全,厚度较大,从模型中可以看出最底部的钓鱼台岩组基本达到了地下 2 km 深处,据此可以推断岩体或者太古代基底界面应该在 2 km 以下。

### 3.3 岩体

岩体是深部地质调查中一个重要组成部分,侵入岩反映了不同时期的岩浆活动。岩浆喷发对早期形成的地层有破坏改造的作用,查明岩体之间的侵入关系并建立三维模型,可直观展示侵入岩空间分布情况。侵入岩模型建立以后,就可以结合断裂组建分区块,形成模型分区,为下一步地层模型建立提供框架基础。

### 3.4 地层

本溪地区地层分布广泛,从古生界到新生界都有分布,地层年代最新的分布在本溪市周围,出露小岭组地层。中生代地层沿寒岭-偏岭一带出露较多,且受分支构造的控制发生了地层的倒转、错动。基于深部地质调查对地层建立三维模型,这样不仅可以反映整个区域地层的分布状况,还可以借助地层的空间分布情况

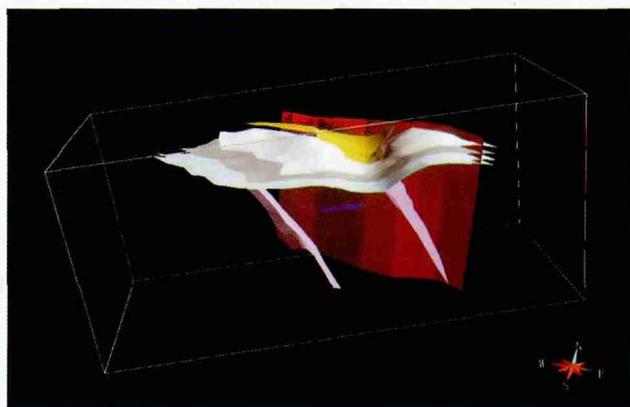
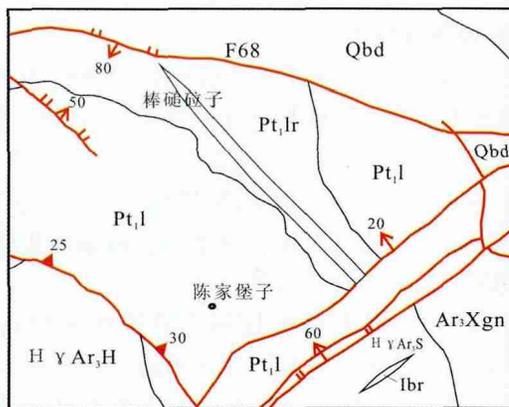


图 5 棒槌砬子向斜三维构造特征

Fig. 5 3D structural features of Bangchuilazi syncline

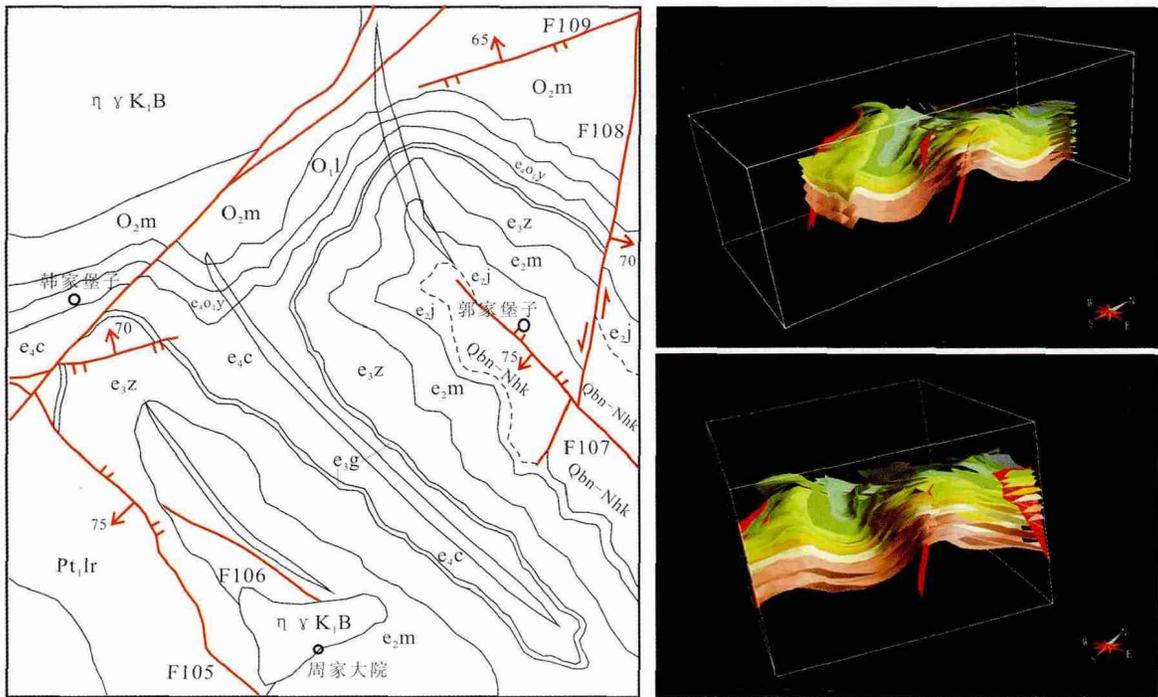


图6 郭家堡子复式褶皱三维模型

Fig. 6 3D model of Guojiazuzi complex fold

来直观了解构造的性质. 图6所示为地层与构造相结合建立的三维模型, 从地层的分布可以明显看出构造的性质.

#### 4 GOCAD 三维可视化在深部地质调查中的优势

现今, 国内外各种可以建立三维可视化的软件层出不穷, 有的是专门针对矿区或者水文地质、工程地质等领域而研发的, 所以各自软件都有独特的擅长方面. 深部地质调查所面临的问题是要研究地下断裂的分布、延伸形态、地层的接触关系、岩体的侵入先后顺序以及对地层的破坏改造情况, 重点调查的目标地质体(如含铁建造、太古宙结晶基底)起伏形态等等, 并对这些研究的不同要素建立地下一定深度的三维地质模型. 这些要素相互影响、相互制约, 这对软件的计算方法有很高的要求, 普通的计算方式不能满足多种要素接触部位关系的处理, 建立起的模型生硬、刻板, 不能很好地反映地质体的接触形态, 这不利于后来技术人员正确认识地质现象. 而GOCAD软件采用的是DSI空间插值法, 是应用一系列具有空间实体几何和物理特性、相互连接的空间坐标点来模拟地质体, 将已知节点的空间信息和属性转化为线形约束, 这样更精细地处理了接触关系. GOCAD在模型展示过程中可以沿任意角度、任意方向对模型进行剖切, 这样可以使技术

人员全方位无差别观看地下结构.

此外, 深部三维地质模型只靠地下的下延处理还远不能满足研究精度的要求, 因此, 还要结合钻孔资料、地球物理资料的约束和校准. 通过实际应用已经验证了GOCAD对钻孔资料和地球物理资料的容纳分析也是比较理想的, 可以同时将地球物理反映出的形态与建立好的模型进行对比, 同步进行模型的修改、校正.

#### 5 几点认识

(1)GOCAD作为三维建模的一个成熟软件, 在选好建模技术方法与流程情况下是比较理想的应用软件, 可操作性较强.

(2)深部地质调查所要解决的问题是建立起地下各种地质要素之间的相互切割关系, 并同地球物理资料、钻孔资料结合才能更好地约束、修正模型. 通过实践证明, GOCAD软件可以实现地球物理、钻孔、初始模型的同步对比与校正, 对于解决深部地质调查三维建模的问题是非常可行的.

(3)GOCAD软件的使用需要操作人员熟悉区域地质特征, 采用计算机方法实现地质人员对区域地质认识的过程, 展现构造、岩体、地层、目标地质体在三维空间的分布规律, 进而为查明其他地质问题提供支撑.

(下转第346页 / Continued on Page 346)

- 质出版社, 1996: 16—46.
- [21] 陈光远, 黎美华, 汪雪芳, 等. 弓长岭铁矿成因矿物学专辑[J]. 矿物岩石, 1984(2): 1—254.
- [22] 关广岳. 论变质作用在鞍山式铁矿床富矿形成上的意义[J]. 地质学报, 1961(1): 65—76.
- [23] 周世泰. 鞍山-本溪地区条带状铁矿地质[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 220—266.
- [24] 李绍柄. 我国铁矿床的一种新类型——弓长岭式含石墨的富磁铁矿床及其成因[J]. 地球化学, 1979(2): 170—177.
- [25] 李曙光, 支霞臣, 陈江峰, 等. 鞍山前寒武纪条带状含铁建造中石墨的成因[J]. 地球化学, 1983(2): 162—169.
- [26] 关广岳. 论变质作用在鞍山式铁矿床富矿形成上的意义[C]// 王可南, 等编. 中国铁矿综论. 北京: 冶金工业出版社, 1992: 183—192.
- [27] 付海涛, 刘陆山, 冷文芳, 等. 鞍山-本溪南部隐伏花岗岩体地质特征[J]. 地质找矿论丛, 2013, 28(2): 176—180.
- [28] 付海涛. 鞍本地区富铁矿分布规律与成因初探[C]// 孟宪来, 等编. 中国地质学会 2013 学术年会论文摘要汇编(上册). 北京: 中国地质学会, 2013: 319—323.

(上接第 382 页 / *Continued from Page 382*)

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 董亮, 胡卸文, 汪雪瑞. GOCAD 在某桥基边坡三维地质建模中的应用研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2009, 20(1): 60—65.
- [3] 董梅, 慎乃齐, 胡辉, 等. 基于 GOCAD 的三维地质模型构建方法[J]. 桂林工学院学报, 2008, 28(2): 188—192.
- [4] 张伟, 薛林福, 彭冲, 等. 基于剖面三维地质建模方法及在本溪地区应用[J]. 地质与资源, 2013, 22(5): 403—408.