



数字地质填图隐式三维建模方法探索

——以1:2.5万抚州市山碭幅为例

马粉玲^{1,2)}, 吴志春¹⁾, 姜叔明³⁾, 李宏达^{1,4)}, 郭福生¹⁾, 李华亮¹⁾,
刘平华⁵⁾, 李斌¹⁾, 金文龙¹⁾

- 1) 东华理工大学地球科学学院, 南昌, 330013; 2) 陕西地矿第三地质队有限公司, 陕西宝鸡, 721300;
3) 浙江省浙南综合工程勘察测绘院有限公司, 杭州, 310000;
4) 山东黄金地质矿产勘查有限公司, 山东莱州, 261400; 5) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037

内容提要:数字地质填图三维模型是区域地质调查成果(地质图)的一种新型表达方式,与平面地质图相比较,具有更好的可读性。针对当前主流的显式建模方法存在建模效率低、人工干预度高以及模型更新困难等局限性问题,笔者等利用江西省1:2.5万山碭幅数字地质填图数据,基于 Leapfrog Geo 软件平台开展了数字地质填图隐式三维建模方法探索:应用快速径向基函数(FastRBF)快速构建断层面、第四系底界面、地层界面等地质界面;按照地质体的新老关系,利用地质界面依次切割填充建模区域的空白三维体元模型,并将切割出的地质体三维体元模型赋予属性;将全部地质体的三维体元模型进行组合,生成山碭幅数字地质填图三维模型。同时,针对复杂地质模型构建困难的问题,提出了分块建模方法;针对稀疏产状数据无法直接构建第四系底界面的问题,提出了显—隐交互式建模方法。该建模方法实现了山碭幅数字地质填图三维模型的高精度快速构建,展现出良好的应用前景。

关键词:数字地质填图三维建模;隐式三维建模;快速径向基函数(FastRBF);山碭幅

自1815年英国地质学家 William Smith 手工绘制第一幅地质图以来,区域地质调查成果的表达经历了纸质地质图、数字化地质图、基于GIS的数字化地质图空间数据库、数字地质填图三维模型4个发展阶段(吴志春等,2019)。为了实现区域地质调查的野外数据采集、数据处理、地质成图、成果图件管理等全流程数字化,2001年中国地质调查局发展研究中心创新地提出了数字地质填图技术(李超岭,2003;于庆文等,2003),并在全国范围内广泛推广和应用。2012~2015年中国地质调查局在全国设立了13个三维地质填图试点项目,东华理工大学郭福生等(2017,2018,2020)承担了上述试点项目之一,并在相山1:5万三维区域地质调查的基础上创建了数字地质填图三维建模方法。该方法是指在三维地质建模软件中,以地质填图路线和实测剖面作为建

模数据源,直接构建三维地质模型(郭福生等,2018;Wu Zhichun et al., 2019;吴志春等,2022)。

国内外学者对数字地质填图显式三维建模方法已开展大量研究。王国灿等(2015)、郁军建等(2015)、张攀等(2015)将地质填图路线和实测地质剖面制作的地质填图路线剖面作为建模数据源,运用地质剖面轮廓线重构方法构建三维地质模型。吴志春等(2015a, 2015b, 2020a, 2020b)、郭福生等(2018)、Wu Zhichun 等(2019)基于地质填图路线剖面数据,利用点间界线和产状创建分段地质界面,再通过约束—插值技术对同一地质界面的多个分段地质界面进行拟合,构建更大范围的地质界面,最后将这些界面进行缝合,生成三维地质面模型。针对基于地表地质数据的交切断层建模难的问题,赵义来等(2018,2023)提出了构建初始断层面—求取断后

注:本文为国家自然科学基金项目“数字地质填图路线建模中复杂地质体的快速构建——以1:50000陀上幅三维地质模型为例”(编号:41802247)、“脉型铀矿床多源信息融合三维建模关键技术与控矿构造研究——以江西相山火山盆地邹家山和居隆庵矿床为例”(编号:42472130)、江西省自然科学基金项目“显—隐交互式数字地质填图三维建模技术研究”(编号:20242BAB25183)、江西省技术创新引导类计划“江西相山铀矿田三维地质—成矿模型构建与深部找矿突破”(编号:20212AEI91008)、云南省地球系统科学重点实验室开放课题“基于区域地质调查数据的快速三维地质建模技术方法研究——以滇西剑川盆地为例”(编号:ESS2021005)的成果。

收稿日期:2025-02-24;改回日期:2025-04-29;网络首发:2025-05-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2025.05.055

作者简介:马粉玲,女,1999年生,硕士研究生,地质资源与地质工程专业;Email: m2420202253@163.com。通讯作者:吴志春,男,1986年生,副教授,主要从事遥感地质解译、三维地质建模研究;Email: 563970964@qq.com。

约束条件—交切处理—约束插值的建模技术路线进行建模,显著提升了交切断层的建模精度。产状数据的数量和精度决定了构建的三维地质模型的精度 (Zhao Yabo et al. , 2021; Nibourel et al. , 2023; Lyu Mingming et al. , 2023), 针对产状数据较少时构建的模型精度偏低问题, 栗云峰等 (2017) 提出了地质界线特征点加密算法, 提高地质填图路线剖面的绘制精度。在地质填图路线中, 也可以根据点间界线和产状数据进行人机交互操作绘制出地表地质界线, 并通过数据插值处理获取地质界线中不同位置

的产状数据, 以此来丰富建模数据 (Dekemp, 1998, 2003; Calcagno et al. , 2008; Hillier et al. , 2013)。

在显式三维地质建模过程中, 需要进行大量人机交互操作, 建模过程较繁琐, 效率较低, 且模型的修改和更新困难 (吴志春等, 2015a; 郁军建等, 2015; 赵义来等, 2018, 2023; 李章林等, 2020)。为此, 部分学者开始探索数字地质填图隐式三维地质建模方法, 李超岭等 (2016) 提出了一种浅地表地质体和深部地质体协同建模的技术, 以试图实现自动化、智能化三维建模。李丰丹等 (2015a, 2015b) 提出了地质

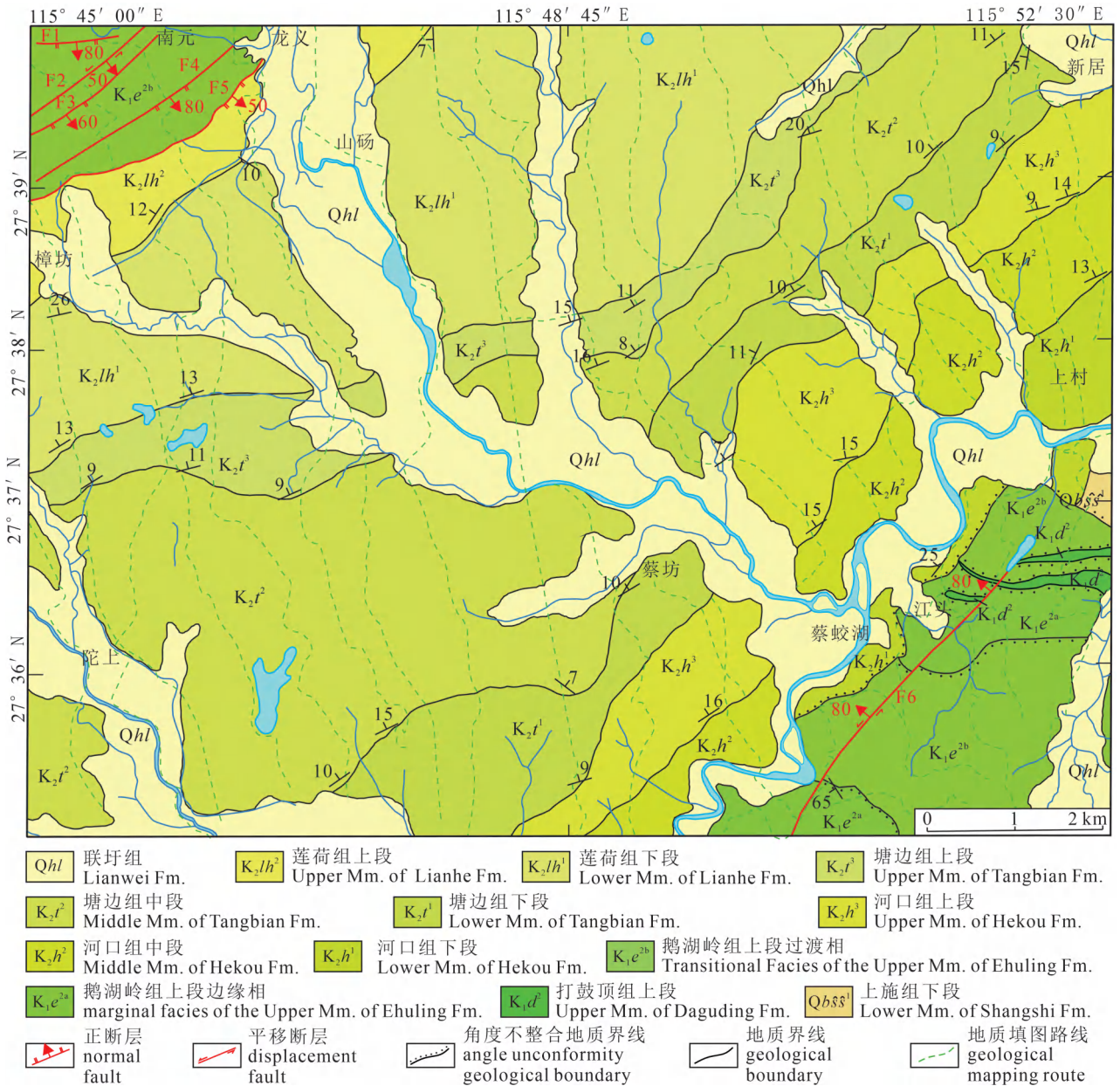


图 1 1 : 2.5 万江西省抚州市乐安县与崇仁县交界处山场幅地质略图

Fig. 1 1 : 25000 geological sketch map of Shandang Sheet in the junction of Le'an County and Chongren County, Fuzhou City, Jiangxi Province

填图 PRB 双重三维构模技术,实现了三维断层模型的快速构建。周文辉等(2016)提出了一种利用二维平面地质图及地质填图路线剖面图协同高效三维地质建模的方法;郭甲腾等(2018,2020,2021)运用区域地质调查数据,基于 Hermite 径向基函数(Hermite radial basis function,HRBF)实现了地质界面的快速构建。Braga 等(2019)运用钻孔、地质图、地表产状等数据,基于快速径向基函数(Fast radial basis function, FastRBF)实现了三维地质模型的快速构建。

相较于显式三维地质建模,隐式三维地质建模具有建模速度快、操作简单等优点,并且支持模型快速更新。隐式三维地质建模的关键在于选择合适的插值函数。当前,运用径向基函数(Radial basic function, RBF)进行数据插值构建三维曲面已成为隐式三维建模研究的焦点。Franke(1982)首次将径

向基函数用于稀疏数据的插值和复杂三维曲面的重构。为了提高径向基函数方法的求解速度,Rokhlin(1985)提出了快速多级法(Fast multipole method, FMM)。随后,Beatson 和 Newsam(1992)将 FMM 与 RBF 相结合,成功应用于高维散点数据的处理,使得在普通计算机上开展大数据计算和模拟成为可能。随后,在此基础上不断拓展 RBF 的求解方法和应用领域,取得了显著的研究进展。Wu Zongmin(1992)提出了径向基函数的 Hermite 型(HRBF)插值方法。Wendland(1995)和 Wu Zongmin(1995)先后构造了不同形式的紧支撑径向基函数,Carr 等(2001,2003)提出应用 FMM 来加速径向基函数在图像插值重构中的应用,即快速径向基函数(FastRBF)插值方法。

显式三维地质建模是通过数据插值、轮廓线重构等方法构建地质界面,建模过程人机交互频繁,复

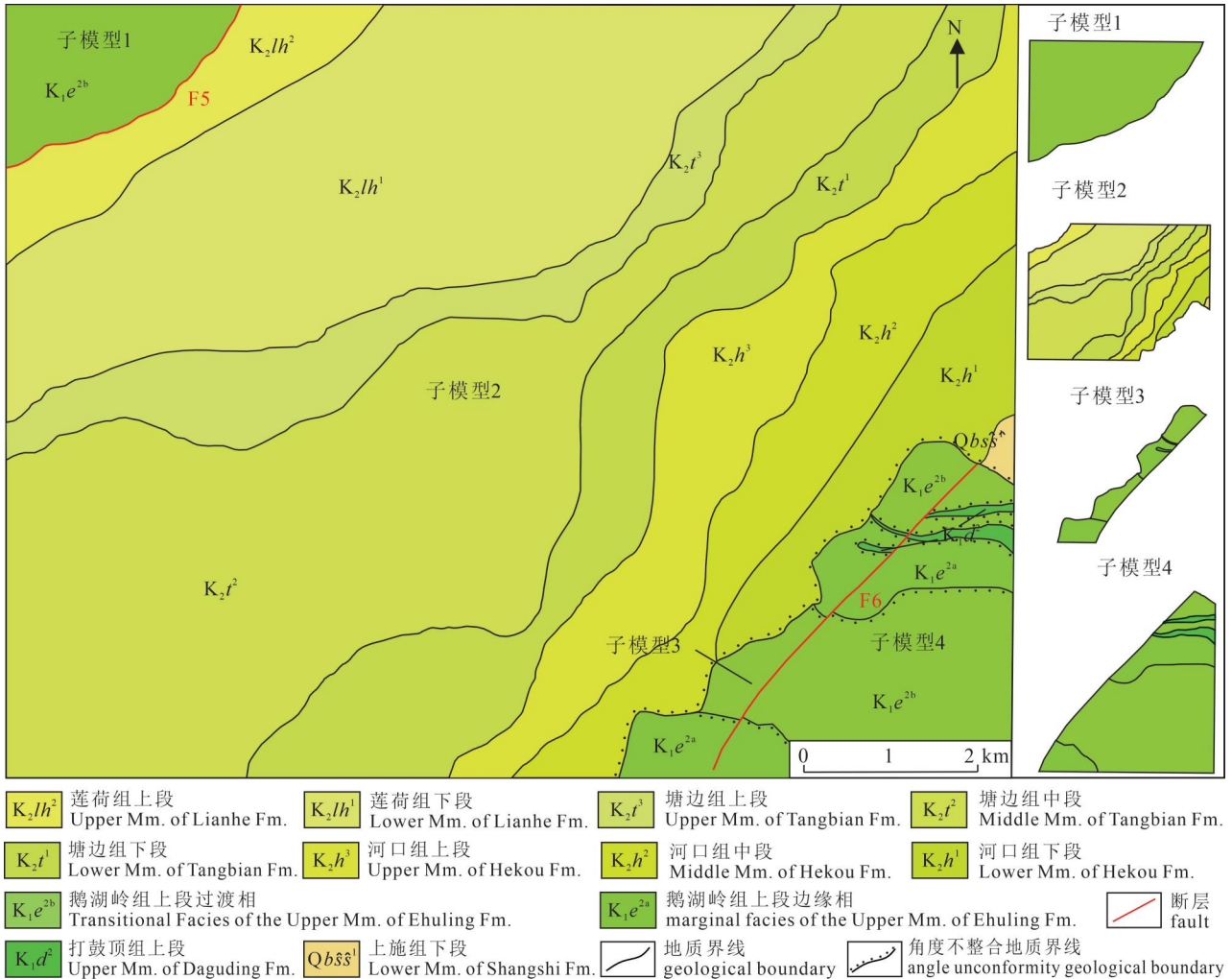


图 2 山阳幅各子模型细分示意图

Fig. 2 The subdivision diagram of each sub-model of Shandang Sheet

杂且耗时,建成的模型修改困难(Wang Gongwen et al., 2015; Guo Jiateng et al., 2021)。隐式三维地质建模是运用数学函数来描述地质界面,建模自动化程度高、人工干预少,后期随着建模数据的增加,模型可快速更新(Caumon et al., 2013; 王权和邹艳红, 2023)。因此,笔者等以江西省 1:2.5 万山碛幅为研究区,基于 Leapfrog Geo 建模软件平台,应用 FastRBF 开展数字地质填图隐式三维建模方法研究,并对复杂地质体和大区域建模难等问题进行了探索,并提出了有效的解决方案。

1 RBF 与 FastRBF 简介

在三维空间中,给定一组不同散点 $P = \{p_i\}_{i=1}^n \subset R^3$ 和一组约束值 $H = \{h_i\}_{i=1}^n \subset R$ 。若能构建一个函数 $f: R^3 \rightarrow R$, 使其对每个散点 p_i 均符合约束条件 $f(p_i) = h_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 则这些散点即可用于定义隐式曲面方程 $f(r) = 0, r \in R^3$ 。

使用 RBF 建立的隐式曲面方程可以表达为 (Carr et al., 2001; 王威等, 2012):

$$f(r) = C(r) + \sum_{i=1}^n \lambda_i \varphi(|r - p_i|) = 0 \quad (1)$$

式中: r —曲面上的任意数据点; n —给定散点的个数; p_i —插值数据点的位置; λ_i —每一个散点的权重系数; $\varphi(|r - p_i|)$ —径向基函数; $C(r)$ —关于 r 的一阶多项式, $C(r) = c_0 + c_1x + c_2y + c_3z$ 。

为确定权重系数值 λ_i 和一阶多项式系数 c_i , 必须符合正交条件式(2)和插值约束条件式(3)。

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = \sum_{i=1}^n \lambda_i p_i^x = \sum_{i=1}^n \lambda_i p_i^y = \sum_{i=1}^n \lambda_i p_i^z = 0 \quad (2)$$

$$f(p_j) = C(p_j) + \sum_{i=1}^n \lambda_i \varphi(p_i - p_j) = h_j \quad (3)$$

式中: $j = 1, 2, \dots, n$ 。

令 $A_{i,j} = \varphi(|p_i - p_j|)$, 由式(2)、(3)可得

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} & 1 & p_1^x & p_1^y & p_1^z \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} & 1 & p_2^x & p_2^y & p_2^z \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nn} & 1 & p_n^x & p_n^y & p_n^z \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_1^x & p_2^x & \cdots & p_n^x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_1^y & p_2^y & \cdots & p_n^y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_1^z & p_2^z & \cdots & p_n^z & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_n \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)可简写为

$$\begin{pmatrix} A & P \\ P^T & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\text{其中, } A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix},$$

$$P = \begin{bmatrix} 1 & p_1^x & p_1^y & p_1^z \\ 1 & p_2^x & p_2^y & p_2^z \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & p_n^x & p_n^y & p_n^z \end{bmatrix}, \lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} h_0 \\ h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

通常条件下,式(5)左侧是一个可逆的半正定矩阵,因而仅有一组解 $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n, c_0, c_1, c_2, c_3)$ 。代入计算出的径向基系数和多项式系数至式(1),即可导出相应的隐式曲面方程:

$$f(x, y, z) = c_0 + c_1x + c_2y + c_3z + \sum_{i=1}^n \lambda_i (\sqrt{(x - p_i^x)^2 + (y - p_i^y)^2 + (z - p_i^z)^2})^3 = 0 \quad (7)$$

当给定的散点数据较多时, RBF 求解效率较低,构建地质界面的过程较为耗时。算法的时间复杂度可以表示为 $O(N^2)$ 、 $O(N)$ 、 $O(N^3)$ 、 $O(N \lg N)$, 其中 $O(N^2)$ 表示运行时间与输入规模 N 的平方成正比; $O(N)$ 表示运行时间与输入规模 N 成正比; $O(N^3)$ 表示运行时间与输入规模 N 的立方成正比; $O(N \lg N)$ 表示运行时间与 N 和 N 的对数的乘积成正比, 计算效率从高到低排序为 $O(N)$ 、 $O(N \lg N)$ 、 $O(N^2)$ 、 $O(N^3)$ 。FastRBF 在 RBF 基础上, 将所需存储空间从 $O(N^2)$ 降低至 $O(N)$, 运算次数从 $O(N^3)$

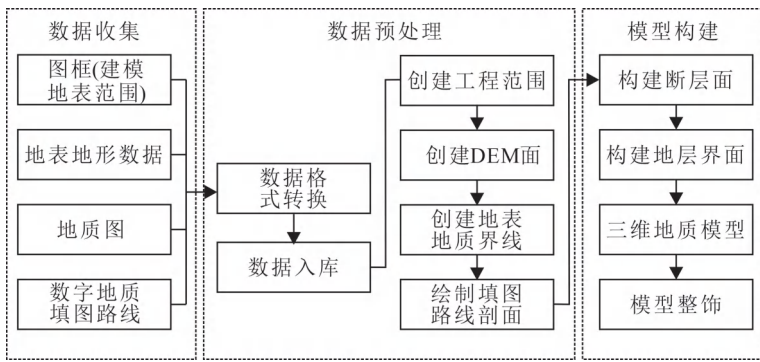


图3 数字地质填图三维建模流程图

Fig. 3 Digital geological mapping three-dimensional modeling flow chart

降低至 $O(N \lg N)$, 显著提升了计算效率 (Carr et al., 2001)。这使得在普通计算机硬件上也能快速处理庞大的数据, 且更适合运用不规则、非均匀采样数据构建三维复杂曲面 (Minimo and Lagmay, 2016; Creus et al., 2019)。同时, FastRBF 还具有出色的外推和

内插能力, 在散点数据分布不均匀的情况下, 能准确地推断出数据的趋势和特征, 使构建的模型精度更高。在面对不同的数据集和复杂的地质问题时, FastRBF 通过自动调整参数, 展现出很强的自适应性 (马粉玲等, 2024)。

2 区域地质概况

1 : 2.5 万山矽幅位于江西省抚州市乐安县与崇仁县交界处, 坐标范围为 $115^{\circ}45'00''E \sim 115^{\circ}52'30''E$ 、 $27^{\circ}35'00''N \sim 27^{\circ}40'00''N$, 面积约 114 km^2 。大地构造位置上, 研究区地处湘桂赣地块北东缘的乐安—抚州断隆带上, 北部与钦州—杭州结合带相距约 50 km , 东部与鹰潭—安远深大断裂相距约 15 km , 遂川—德兴断裂从研究区北西角穿过 (吴志春, 2020b)。

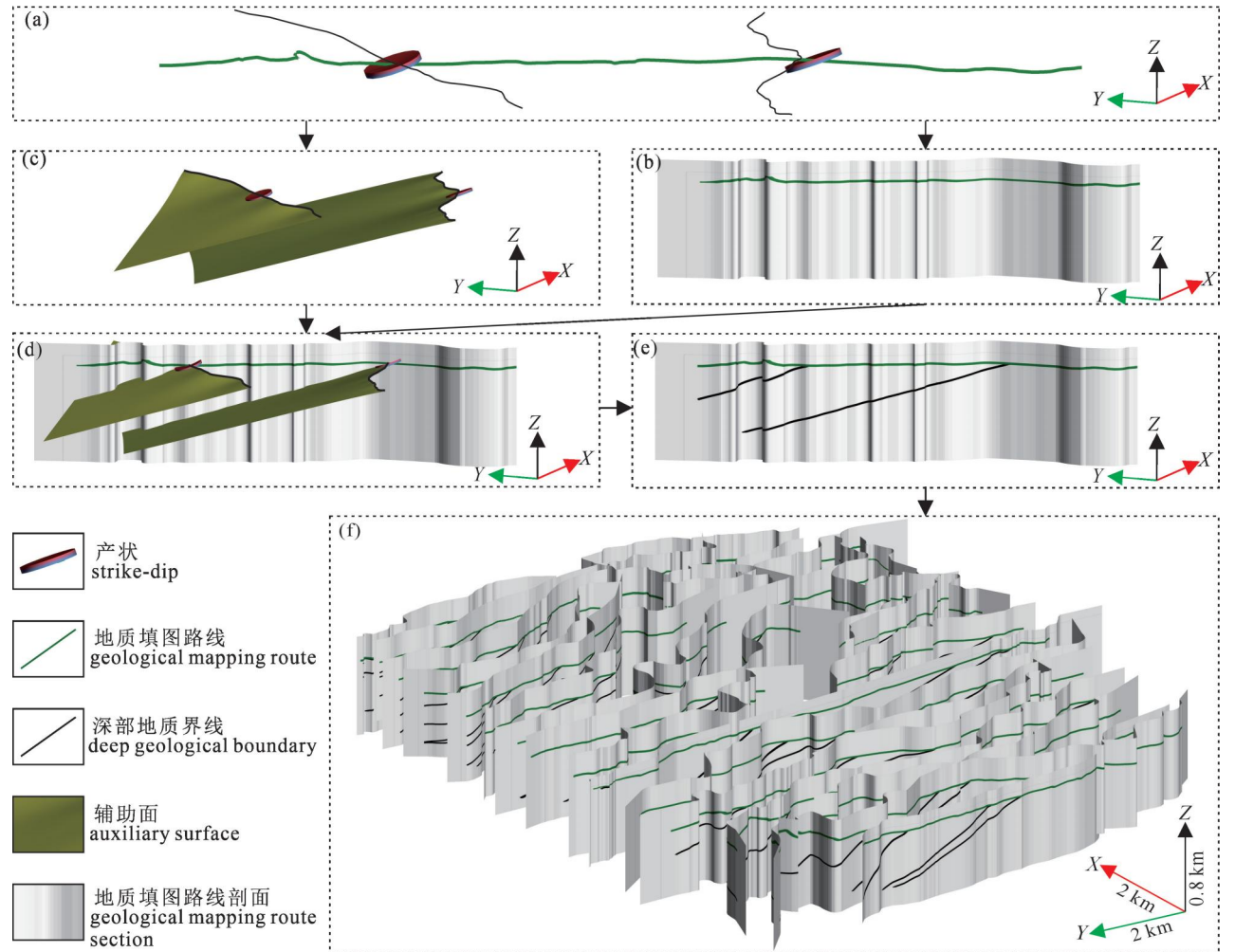


图4 绘制地质填图路线剖面流程及效果图

Fig. 4 Draw the geological mapping route section process and effect diagram

研究区内出露的地层主要为:青白口系上施组下段(Qb_{ss}^1),下白垩统打鼓顶组上段(K_1d^2)、鹅湖岭组上段(K_1e^2),上白垩统河口组(K_2h)、塘边组(K_2t)、莲荷组(K_2lh),第四系联圩组(Qhl)(图 1)。上施组下段(Qb_{ss}^1)的岩性以绢云千枚岩和二云石英片岩为主。打鼓顶组上段(K_1d^2)的岩性以紫红色流纹英安岩为主,在部分区域能看到角砾岩分布。鹅湖岭组上段(K_1e^2)可进一步细分为边缘相(K_1e^{2a})、过渡相(K_1e^{2b})和中心相(K_1e^{2c}),在研究区内仅出现了边缘相(K_1e^{2a})和过渡相(K_1e^{2b})。其中,鹅湖岭组上段边缘相(K_1e^{2a})的岩性为含变质角砾碎斑熔岩,过渡相(K_1e^{2b})为碎斑熔岩。河口组(K_2h)分为上、中、下三段,上段(K_2h^3)岩性以中—厚层砂砾岩及含砾细砂岩为主,中段(K_2h^2)岩性以厚层复成分砾岩夹薄层含砾砂岩为主,下段(K_2h^1)岩性以中厚层砂砾岩夹厚层复成分砾岩为主。塘边

组(K_2t)分为上、中、下三段,上段(K_2t^3)岩性以粉砂岩、泥质粉砂岩及含砾细砂岩为主,中段(K_2t^2)岩性以砾质粗砂岩、粉砂质细砾岩、含砾中细砂岩为主,下段(K_2t^1)岩性主要为泥质粉砂岩。莲荷组分为上、下两段,上段(K_2lh^2)岩性以含砾中—细砂岩、粗砂岩及细砾岩为主,下段(K_2lh^1)岩性以复成分砾岩夹含砾中—粗砂岩为主。第四纪联圩组(Qhl)以松散堆积物为主。

研究区内,断裂构造主要发育在下白垩统红盆两侧的鹅湖岭组地层内,以北东向断层为主。规模较大的断层共有 6 条(编号分别为 F1 至 F6),F1 断层为正断层,产状为 $180^\circ \angle 80^\circ$;F2 断层为左行平移断层,产状为 $140^\circ \angle 50^\circ$,断层面平直,延伸稳定,断层内发育强烈硅化蚀变;F3 断层为正断层,产状为 $135^\circ \angle 60^\circ$,断层内发育有硅化碎裂岩;F4 断层为正断层,产状为 $140^\circ \angle 80^\circ$,断层带内见宽约 50 cm 的

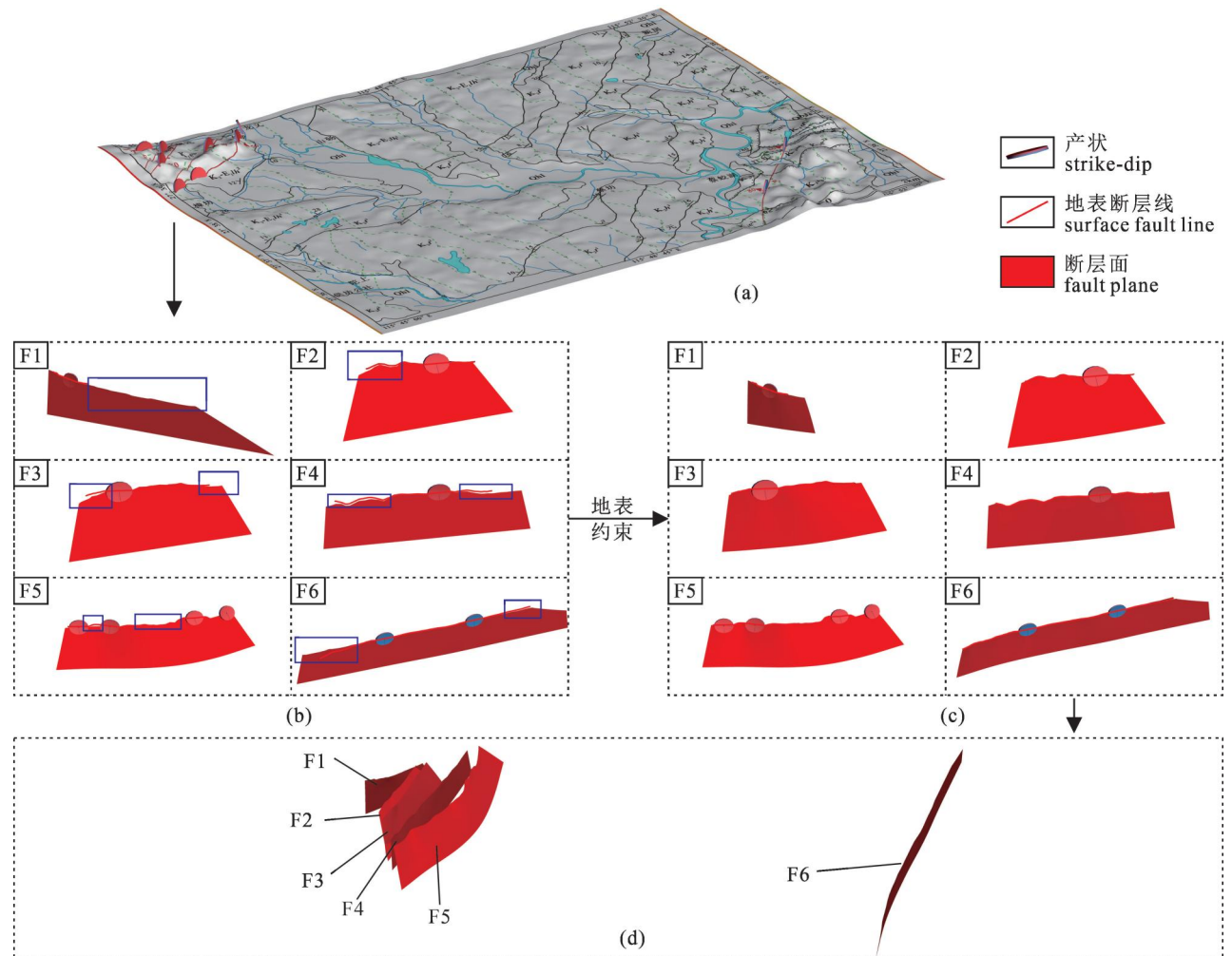


图 5 创建断层面的流程及效果图

Fig. 5 The process and effect diagram of creating fault plane

碎裂岩,发育有绢云母化、水云母化等围岩蚀变;F5断层为正断层,产状为 $135^{\circ} \angle 50^{\circ}$,断层内硅化强烈,形成硅化的断层角砾岩;F6断层为左行平移断层,产状为 $300^{\circ} \angle 80^{\circ}$,断层内发育有宽 20~30 cm 的浅黄白色石英脉,两侧各发育有宽约 20 cm 的绢云母化碎裂岩。

3 建模软件简介与建模流程

3.1 Leapfrog Geo 软件简介

Leapfrog Geo 软件由新西兰 Seequent 公司于 2013 年首次推出。该软件是隐式三维地质建模的代表性软件,其使用的 FastRBF 能够在普通计算机上实现复杂地质界面的快速构建。该软件能够通过直接导入各种建模数据快速构建出精细的三维地质模型,现已广泛应用于地质勘探、矿产资源开发、地下水开采和环境地质学等领域。

3.2 建模流程

分块三维地质建模方法是以断层面、岩体界面和角度不整合面等地质界面为边界,将复杂模型划分成若干个简单的子模型分别构建,最终通过子模型拼接整合形成完整的三维地质模型。由于研究区东南角地质结构较为复杂,建模难度大。笔者等以 F5、F6 断层面和角度不整合界面为边界,将模型拆分为 4 个独立的子模型来构建,再将子模型组合生成完整的山砬幅三维地质模型(图 2)。三维地质模型的建模过程主要包括数据收集、数据预处理和模

型构建 3 个关键步骤(图 3)。

(1)数据收集。本次建模工作中收集的建模数据主要有标准图框、等高线、地质图和地质填图路线。地质填图路线共 28 条,总长约 162.7 km。

(2)数据预处理。建模数据预处理过程主要包括数据格式转换与导入建模软件、创建工程范围、创建 DEM 面、创建地表地质界线、绘制地质填图路线剖面等过程。

(3)模型构建。该过程主要包括断层面构建、地层界面构建、模型生成、模型整饰等过程。

4 数据预处理

4.1 数据格式转换与导入建模软件

在建模前,需对数字地质填图系统中的地质填图路线数据进行格式转换,并将转换后的数据导入建模软件平台。数据格式转换的实现步骤是,在 Mapgis 软件中将 1:2.5 万的图框、等高线、地质填图路线等数据投影变换为 1:1000,再将其转换为 .dxf 格式,并导入建模软件。栅格地质图转换成 .jpg 或 .tif 格式,再导入建模软件,并根据图件四个角点的坐标实现其空间定位。导入后的地质图件作为 DEM 面的贴图纹理,可以实现立体呈现。

4.2 创建工程范围

工程范围即为建模范围,建模范围由顶界面、底界面、四周边界面构成。模型顶界面为 DEM 面,模型底界面为高程-400 m 的水平面,模型四周边界面

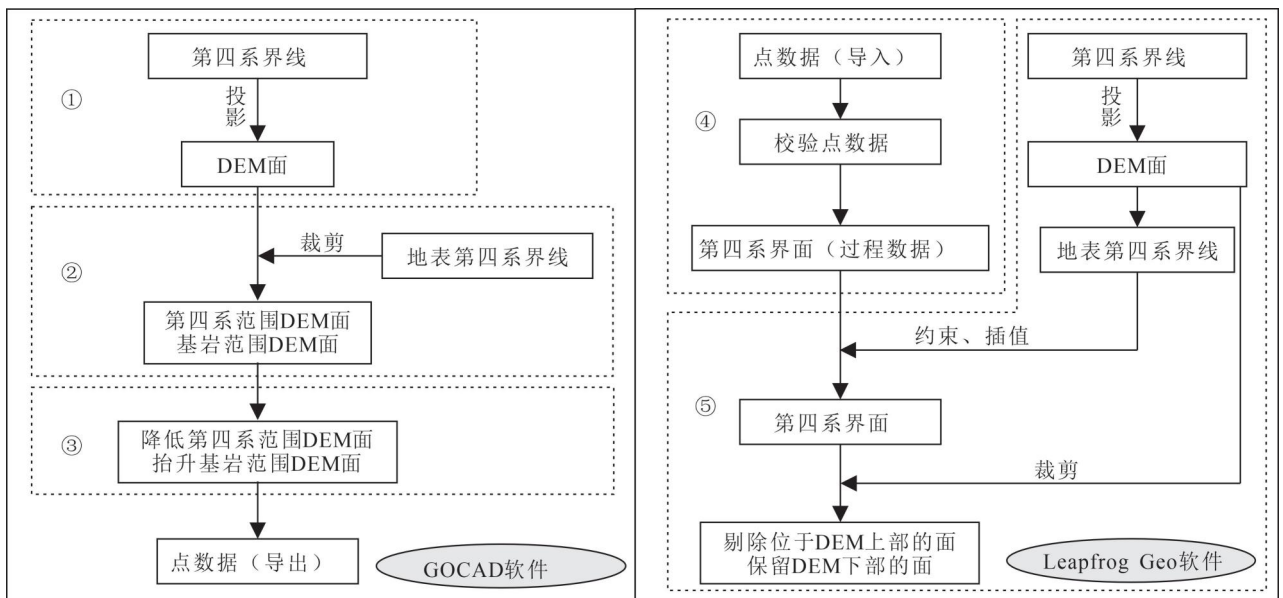


图 6 第四系底界面的创建流程图

Fig. 6 The creation flow chart of Quaternary bottom interface

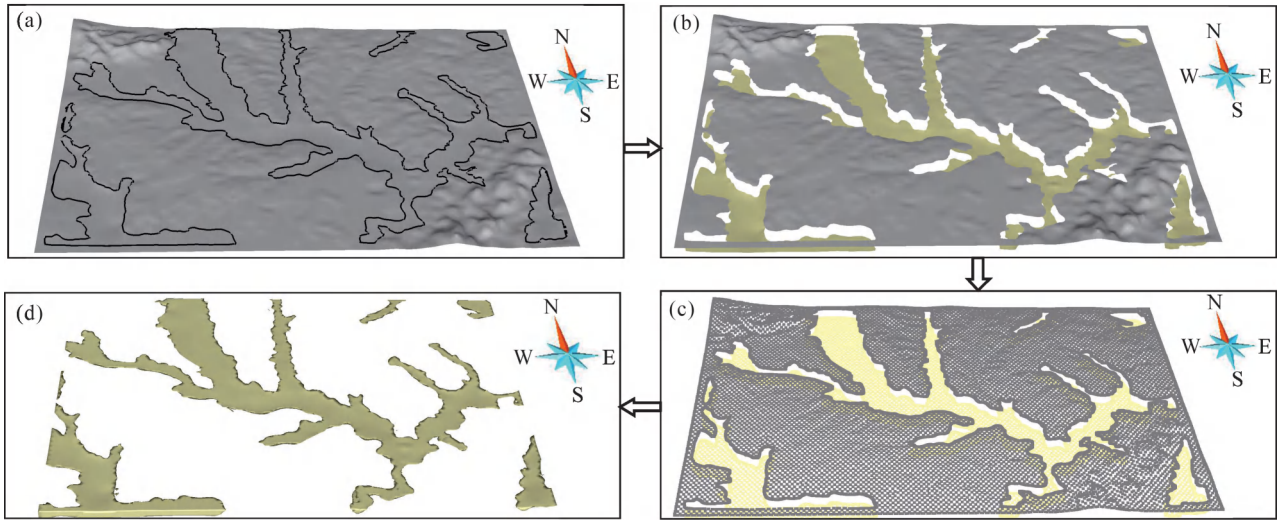


图 7 第四系底界面的创建流程及效果图(Z 轴放大 2 倍显示)

Fig. 7 The creation process and effect diagram of the Quaternary bottom interface (2 times displayed on Z axis)

为 1 : 2.5 万山碛幅图框的内图框的铅垂面。整个模型东西方向长 12.35 km,南北方向长 9.24 km,建模地表面积约 114 km²,建模深度-400 m 至 254 m。

4.3 创建 DEM 面

将等高线数据导入建模软件后,再将其转换成散点数据。建模软件提供了两种根据散点数据创建 DEM 面的方法,一种是根据散点数据构建规则格网(Grid)DEM 面,该方法构建速度快,但创建的 DEM

面精度偏低;另一种是利用散点数据构建不规则三角网(TIN)DEM 面,该方法创建的 DEM 面光滑、精细,并支持面中三角网大小的调整,能够确保复杂地质界面也能够得到精确刻画。笔者等采用了第二种方法创建 DEM 面。

4.4 创建地表地质界线

在建模过程中,地表地质界线主要作为构建深部地质界面的约束数据。地表地质界线导入建模软

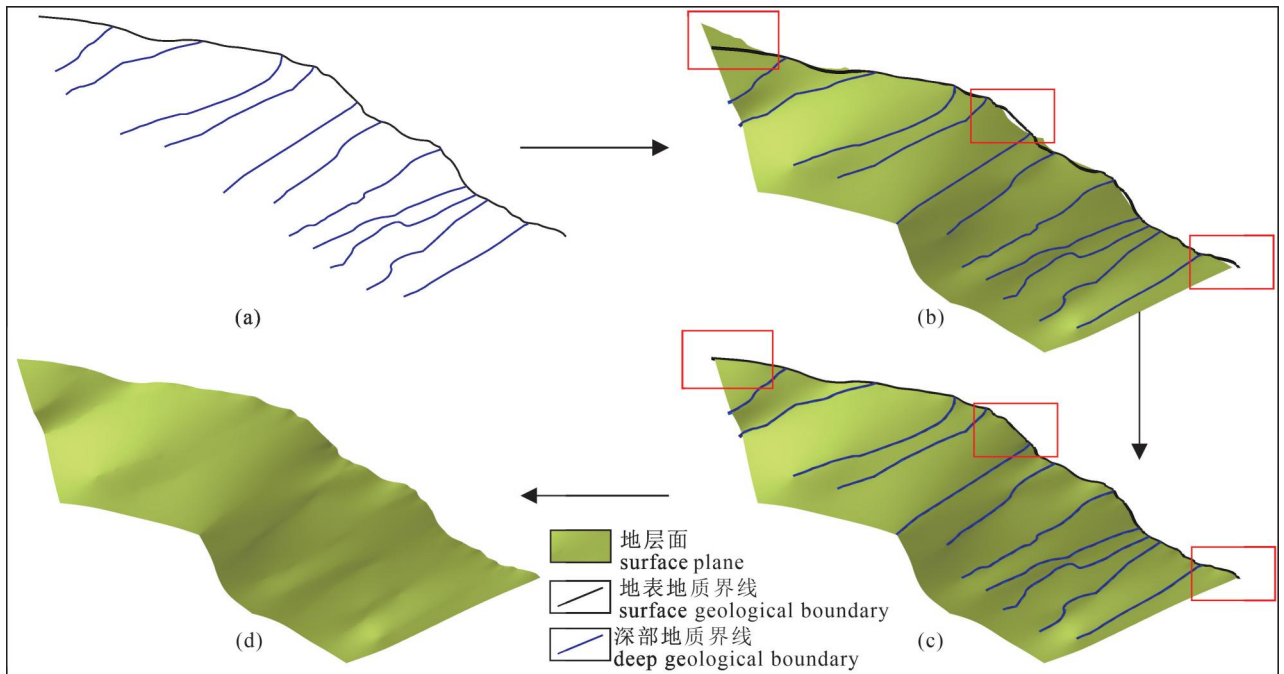


图 8 构建地层面的流程及效果图

Fig. 8 The process and effect diagram of constructing surface plane

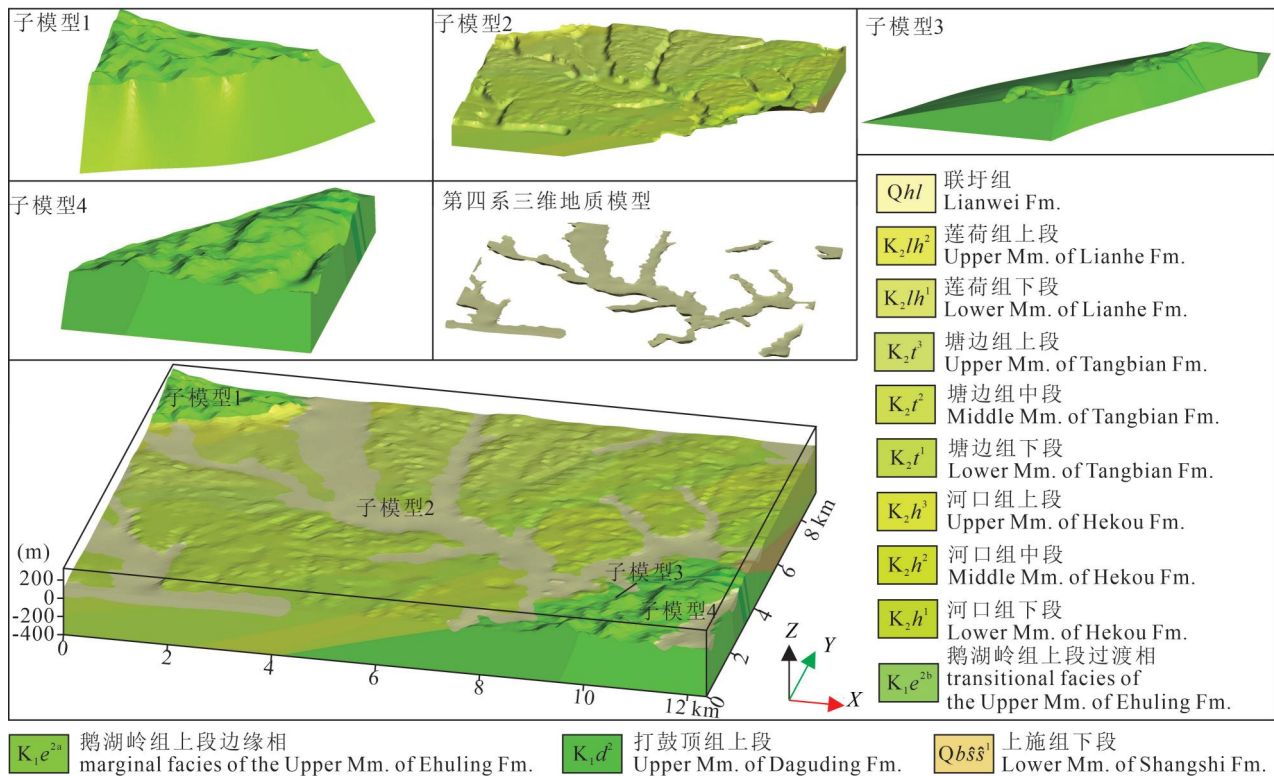


图9 山殇幅各子模型集成示意图(Z轴放大2倍显示)

Fig. 9 Integrated schematic diagram of each sub-model of Shandang Sheet (2 times displayed on Z axis)

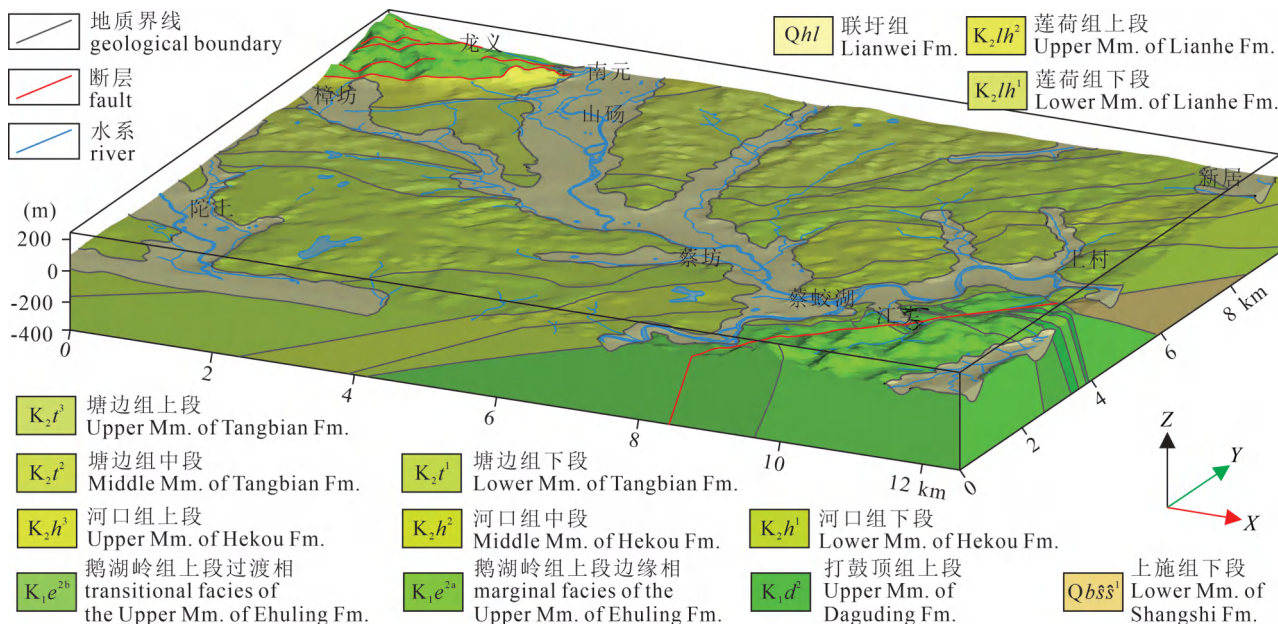


图10 山殇幅三维地质模型(Z轴放大2倍显示)

Fig. 10 Three-dimensional geological model of Shandang Sheet (2 times displayed on Z axis)

件之后,在Z轴方向上投影到DEM面,并将线文件按对应的地质界面拆分成若干个线文件,以便后期地质界面的构建。

4.5 绘制地质填图路线剖面

根据地质填图路线、产状和地表地质界线共同绘制地质填图路线剖面(图4a),具体步骤主要有:

①将地质填图路线数据在 Z 轴方向上垂直投影至 DEM 面,确保地质填图路线与 DEM 面吻合,并根据路线中的分段路线在 Z 轴方向上拉伸出一个空白地质填图路线剖面(图 4b);②根据点间界线和对应的产状数据构建辅助面(图 4c),实现方法是将产状换算成空间向量,通过向量将线拉伸成面;③将辅助面与空白地质填图路线剖面叠合显示,提取辅助面与空白地质填图路线剖面的交线(图 4d),该交线即为深部地质界线(图 4e)。④根据上述步骤完成所有地质填图路线剖面的制作(图 4f)。

5 模型构建

5.1 断层面构建

在建模区内,共有 6 条断层,其中正断层 4 条、

平移断层 2 条。断层面的构建,首先将实际材料图覆盖在 DEM 面上作为贴图纹理,用于断层位置处绘制断层产状(图 5a);然后根据产状创建断层面,断层面会根据产状数据向深部延伸,此时创建的断层面因未受到地表数据的约束,其局部面的边界与地表地质界线不吻合(图 5b);最后用地表地质界线约束断层面(图 5c),得到最终的断层面与所有建模数据都相吻合(图 5d)。

5.2 第四系底界面构建

在 Leapfrog Geo 建模软件中,无法直接基于稀疏产状数据直接构建第四系底界面。针对该问题,笔者等结合 GOCAD 和 Leapfrog Geo 建模软件,采用显一隐交交互式建模方法构建第四系底界面。当第四系地层需要进一步细分时,可将其划分为若干独立

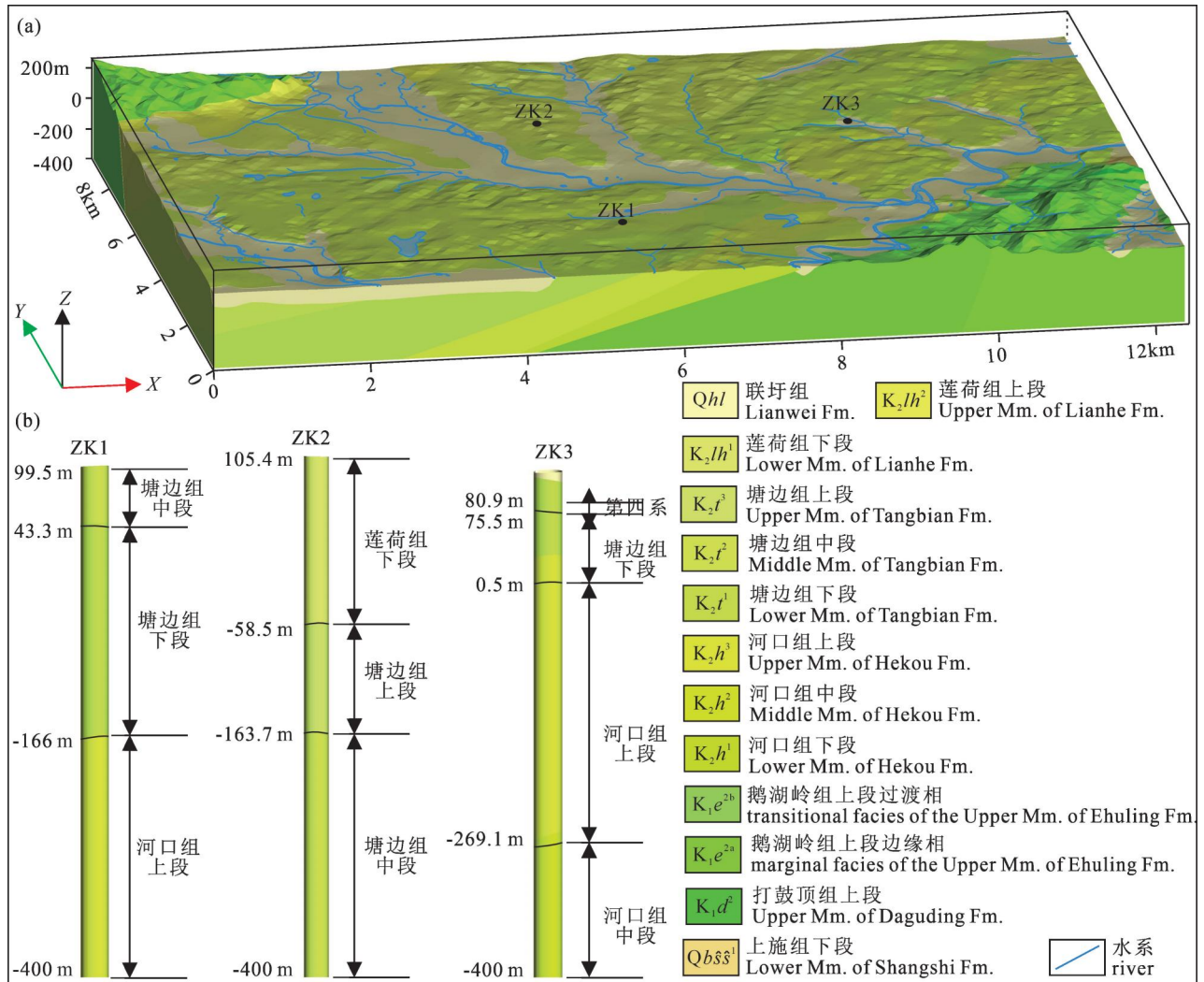


图 11 虚拟钻孔显示效果图:(a)虚拟钻孔三维分布示意图(Z轴放大 2 倍显示);(b)虚拟钻孔展示图
 Fig. 11 Virtual drilling display effect diagram: (a) Three-dimensional distribution diagram of virtual borehole (2 times displayed on Z axis); (b) virtual borehole display diagram

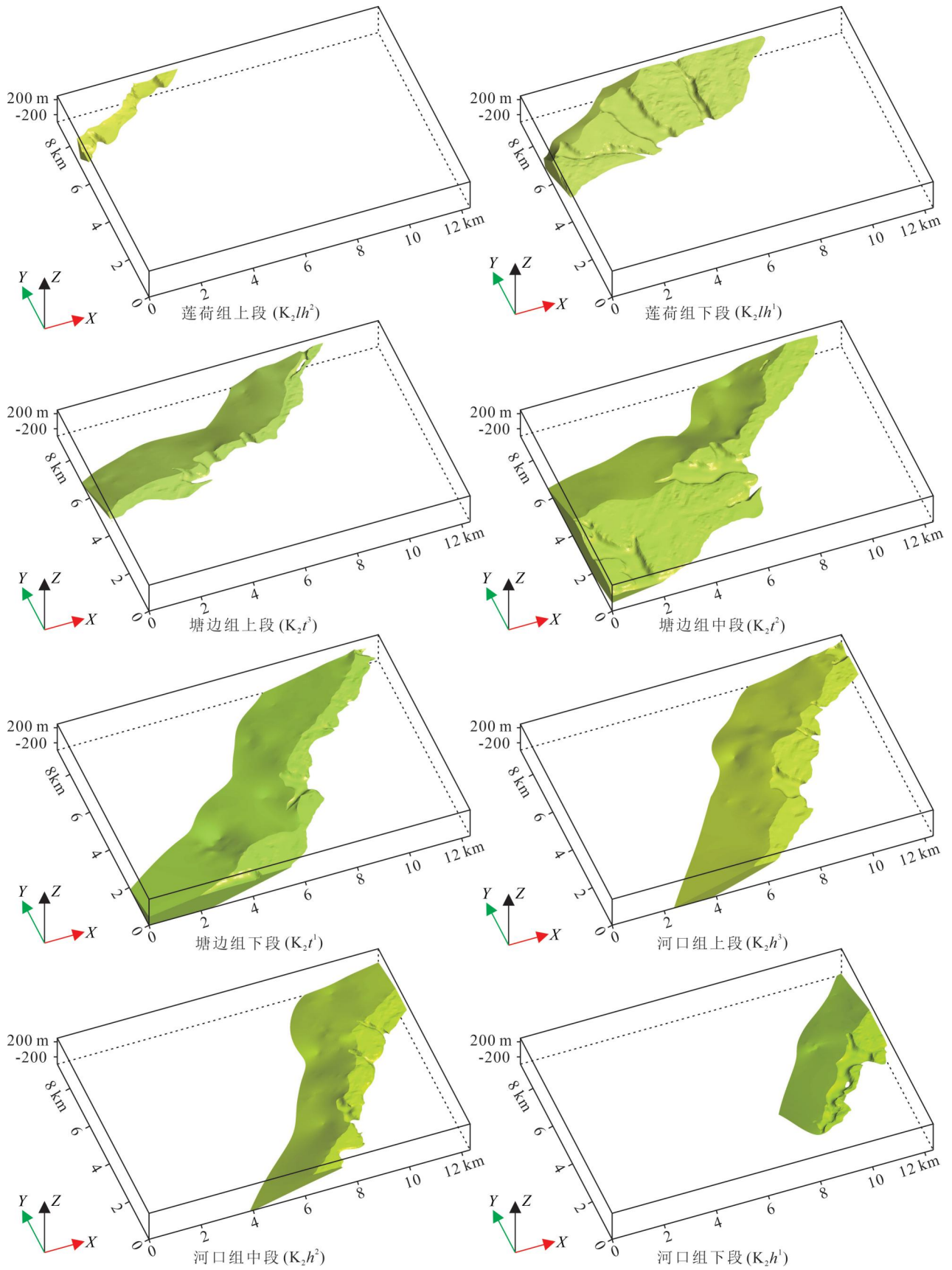


图 12 模型单个显示效果图(Z轴放大 2 倍显示)

Fig. 12 Model single display effect diagram (2 times displayed on Z axis)

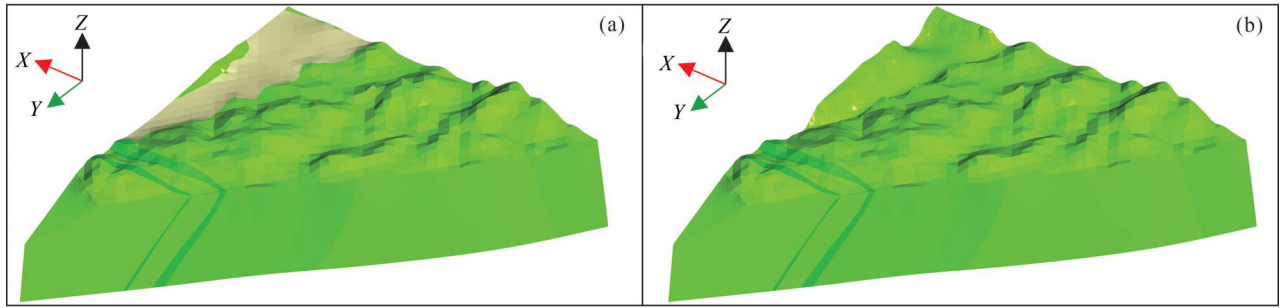


图 13 模型揭盖显示效果图(Z 轴放大 2 倍显示)

Fig. 13 Model uncovered display effect diagram (2 times displayed on Z axis)

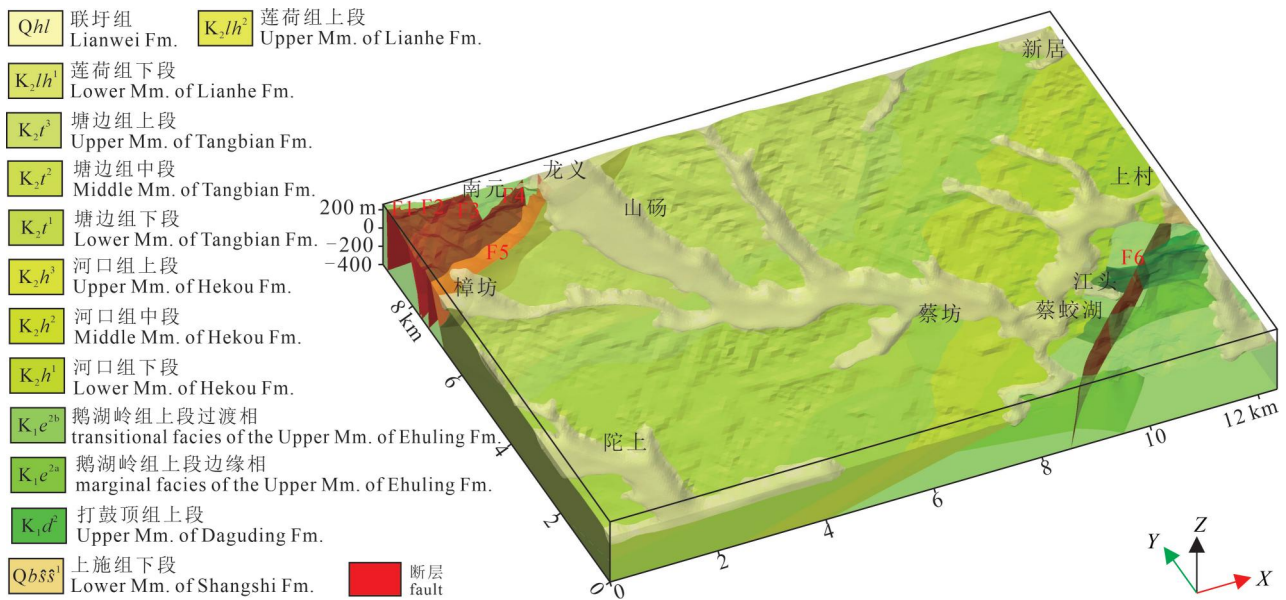


图 14 模型透明显示效果图(Z 轴放大 2 倍显示)

Fig. 14 Model transparent display effect diagram (2 times displayed on Z axis)

的地层单元,并分别按照该方法进行构建。构建的具体步骤(图 6)如下:

(1)在 GOCAD 软件中导入第四系界线,此时界线没有高程属性,为平面数据。对第四系界线中的节点进行加密处理,并将其垂直投影到 DEM 面(图 7a),使第四系界线与 DEM 面完全重叠。投影后的第四系界线为地表第四系界线。

(2)运用“线裁剪面”功能,用地表第四系界线裁剪 DEM 面。裁剪后的 DEM 面可分为第四系范围 DEM 面和基岩范围 DEM 面两部分。加密处理第四系范围 DEM 面中的三角网,使其最窄处至少存在一个三角网格点。

(3)在高程方向上,对第四系范围 DEM 面和基岩范围 DEM 面进行移动。对每块独立的第四系范

围 DEM 面分别下移,下移高度大致为第四系厚度;对基岩范围 DEM 面上移,上移高度大于三角网的最大边长(图 7b)。

(4)将地表第四系界线、下移后的第四系范围 DEM 面、上移后的基岩范围 DEM 面等线面数据转换为散点数据。以地表第四系界线为参考,同时去除第四系范围 DEM 面和基岩范围 DEM 面中与其重复的边界点(图 7c)。将地表第四系界线的点、第四系范围 DEM 面的点、基岩范围 DEM 面的点整合为一个点文件,并以 .dxf 格式从 GOCAD 软件导出。将导出后的点文件导入到 Leapfrog Geo 建模软件,对点数据进行校验,删除重复点数据。基于校验后的点数据创建第四系底界面。

(5)以地表第四系界线为地表约束条件,对地

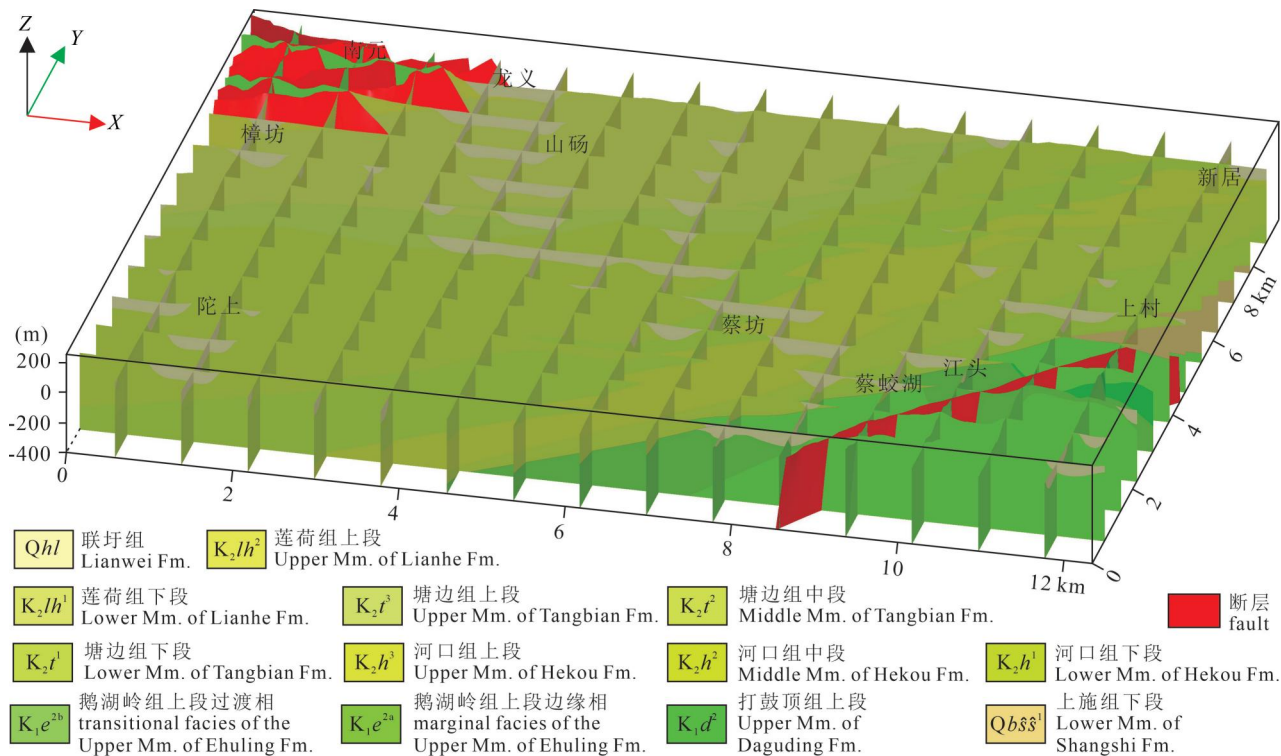


图 15 模型栅状图(Z轴放大2倍显示)

Fig. 15 Model grid diagram (2 times displayed on Z axis)

质界面进行约束、插值等处理。运用DEM面裁剪约束、插值处理后的第四系底界面,剔除位于DEM面上部的第四系底界面,保留DEM下部的面(图7d)。

5.3 其他地层面构建

构建青白口纪、早白垩世、晚白垩世地层界面时,首先在绘制的地质填图路线剖面中,提取出同一地质界面的深部地质界线(图8a);然后应用深部地质界线进行FastRBF插值构建地质界面,此时构建的地质界面因没有受到地表地质界线的约束,局部面的边界与地表地质界线不吻合(图8b);最后运用地表地质界线约束地质界面(图8c),得到最终的地质界面与所有建模数据相吻合(图8d)。

5.4 模型生成

根据建模工程范围,创建一个不含属性信息的空白体元模型。首先以贯穿空白体元模型的F5、F6断层面和角度不整合界面为边界,将空白体元模型拆分为4个独立的子模型(图2)。再运用构建好的地质界面遵循从新到老的顺序切割子模型。若被切割的子模型中含有空隙,则说明地层顺序有误,需要人工调整地层的先后顺序,模型会根据重新定义的地层顺序自动更新。对各个地质体模型赋予相应的属性信息和颜色。当所有子模型都构建完成之后,

将其进行组合生成山场幅三维地质模型(图9)。在对各子模型的构建过程中,需要将F5、F6断层面和角度不整合界面作为三维边界的约束数据,并参与相邻子模型的构建,进而实现分块之间的边界相互吻合,以保证组合后的模型拓扑一致性。

5.5 模型整饰

模型构建完成后,可对模型进行适当整饰,新增地名、水系、地质界线等内容,使模型的可读性更强(图10)。

6 模型应用

6.1 虚拟钻孔

在已构建的三维地质模型中,建模人员可以获取任意位置的虚拟钻孔(图11)。这些虚拟钻孔包含了丰富的深部信息,可为地质研究和工程决策提供支持 and 地质依据。通过虚拟钻孔,研究人员可以模拟和分析地下岩层的空间分布和变化规律,进而更好地理解地质构造和预测潜在的地质风险。

6.2 模型展示

(1)单个地质体三维显示。通过对模型中单个地质体三维显示,可以方便地了解到地质体在研究区内的空间产出状态,包括地表出露范围、地下延伸

产状等信息,同时可以清晰地呈现各地质体之间的接触关系和切割关系(图 12)。

(2)模型揭盖显示。上部的地质体覆盖在下部的地质体之上,使得下部地质体的三维形态和延伸产状无法直观显示。为了更好呈现下部地质体的三维形态特征,运用模型揭盖显示的方法将上部的地质体“剥离”,从而清晰地展示出下部地质体的形态和分布特征(图 13)。

(3)模型透明显示。此方法是通过调整模型边部地质体的透明度,实现对模型内部地质体的可视化,以更加直观地了解地质体空间展布特征和各地质体之间的接触关系(图 14)。

(4)模型栅状显示。该方法允许建模者从 X 轴方向、Y 轴方向、Z 轴方向或任意指定方向对三维模型进行切割,从而通过切片直观地观察模型内部的地质结构特征。在显示过程中,既可以选择单独显示单个切片,也可以将多个切片组合显示,以满足不同的分析需求(图 15)。

7 结论

笔者等以江西省 1:2.5 万山矽幅为例,基于地质填图路线、地质体产状、地形等数据,运用 FastRBF 构建了研究区三维地质模型,并针对部分地质建模难题提出了解决方法,这对开展数字地质填图三维建模的快速化、精确化具有重要意义。取得的主要成果如下:

(1)数字地质填图隐式三维建模的流程主要包括建模数据收集、建模数据处理和模型构建三个关键步骤。其中,地质界面的准确构建是三维地质建模的关键,笔者等系统阐述了断层面、第四系底界面、地层面等地质界面的快速构建方法。

(2)针对稀疏产状数据无法直接构建第四系底界面的问题,融合显式建模与隐式建模的优势,提出了显—隐交互式第四系底界面的构建方法,实现了地质界面的高精度构建。

(3)针对大范围复杂模型一次性构建困难的问题,提出了一种分块建模方法,即以断层面、岩体界面、角度不整合面等地质界面为边界,将模型拆分成若干个子模型分别进行构建,再将构建好的子模型进行组成完整模型的方法。该方法大大降低了三维地质模型的构建难度,提高了建模效率。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese

- with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 郭福生, 谢财富, 邓居智, 杨海燕, 林子瑜, 吴志春. 2017. 矿田三维地质调查方法与实践——以江西相山火山盆地为例. 北京: 科学出版社.
- 郭福生, 吴志春, 李祥, 张万良, 曾文乐, 林子瑜, 谢财富. 2018. 江西相山火山盆地三维地质建模的实践与思考. 地质通报, 37(Z1): 421 ~ 434.
- 郭甲腾, 吴立新, 王江梅, 周文辉, 李超岭, 李丰丹. 2018. 基于隐式化 Coons 曲面的局部地质构造区域集成建模方法. 地理与地理信息科学, 34(1): 1 ~ 6.
- 郭甲腾, 代欣位, 刘善军, 吴立新, 李超岭, 李丰丹. 2021. 一种三维地质体模型的隐式剖切方法. 武汉大学学报(信息科学版), 46(11): 1766 ~ 1773.
- 李超岭. 2003. 我国数字填图技术研究现状与发展趋势. 新疆地质, (S1): 1 ~ 6.
- 李超岭, 李丰丹, 刘畅, 刘园园, 吕霞. 2016. 数字地质调查理论、技术与软件平台. 北京: 地质出版社.
- 李丰丹, 李超岭, 吴亮, 李健强, 吕霞. 2015a. 大数据环境下数字填图数据集成服务技术. 地质通报, 34(7): 1300 ~ 1308.
- 李丰丹, 李超岭, 林敏, 刘畅, 刘园园, 吕霞, 李健强. 2015b. 基于实际材料图的三维断层模型动态构建方法. 地质通报, 34(8): 1570 ~ 1580.
- 李章林, 吴冲龙, 张夏林, 翁正平, 刘刚, 张志庭, 张军强. 2020. 地质科学大数据背景下的矿体动态建模方法探讨. 地质科技通报, 39(4): 59 ~ 68.
- 栗云峰, 郭甲腾, 周文辉, 甘乐, 李超岭, 杜培军. 2017. 区域地质调查路线剖面图加密重建与三维可视化. 测绘与空间地理信息, 40(9): 28 ~ 32+27.
- 马粉玲, 吴志春, 刘平华, 李华亮, 李斌, 国振, 祝一丹. 2024. 江西相山居隆庵铀矿床隐式三维地质建模. 铀矿地质, 40(3): 506 ~ 515.
- 王国灿, 徐义贤, 陈旭军, 郭纪盛, 郁建军, 龚一鸣, 肖龙, 刘修国, 花卫华. 2015. 基于地表地质调查剖面网络基础上的复杂造山带三维地质调查与建模方法. 地球科学: 中国地质大学学报, 40(3): 397 ~ 406.
- 王威, 周杰, 王水林, 李先福. 2012. 基于径向基函数的三维地层分块建模方法研究. 岩土力学, 33(3): 939 ~ 944.
- 吴志春, 郭福生, 郑翔, 张洋洋, 罗建群, 侯曼青. 2015a. 基于 PRB 数据构建三维地质模型的技术方法研究. 地质学报, 89(7): 1318 ~ 1330.
- 吴志春, 郑翔, 张洋洋, 罗建群, 侯曼青. 2015b. 数字地质填图数据构建断层面的方法. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 34(11): 1264 ~ 1270.
- 吴志春, 郭福生, 薛林福, 王国灿, 周万蓬. 2019. 三维地质建模技术在本科生区域地质调查实习中的应用. 中国地质教育, 28(3): 87 ~ 91.
- 吴志春, 郭福生, 张万良, 应阳根, 周万蓬, 李程. 2020a. 江西乐安相山火山盆地多源数据融合三维地质建模. 桂林理工大学学报, 40(2): 310 ~ 322.
- 吴志春. 2020b. 江西相山火山盆地铀矿床三维地质建模及深部成矿条件分析. 导师: 郭福生. 南昌: 东华理工大学博士学位论文.
- 吴志春, 周万蓬, 郭福生, 侯增谦, 宋明春, 庞文静, 张万良, 楼法生, 邓居智, 谢财富, 应阳根, 王会敏, 徐哈宁, 秦耀祖. 2022. 1:50 000 数字地质填图三维建模技术规范[S]. DB36/T 1669-2022. 江西省: 江西省市场监督管理局.
- 王权, 邹艳红. 2023. 基于轮廓线层间形态插值的三维地质隐式曲面重构. 地质科技通报, 42(5): 293 ~ 300.
- 于庆文, 李超岭, 张克信, 杨东来, 朱云海, 葛梦春. 2003. 数字地质填图研究现状与发展趋势. 地球科学, 4: 370 ~ 376.

- 郝军建, 王国灿, 徐义贤, 郭纪盛, 陈旭军, 杨维, 龚一鸣, 陈超, 李永涛, 晏文博, 肖龙. 2015. 复杂造山带地区三维地质填图中深部地质结构的约束方法: 西准噶尔克拉玛依后山地区三维地质填图实践. *地球科学: 中国地质大学学报*, 3: 13.
- 张攀, 王国灿, 肖龙, 张胜业, 周佩, 张云, 沈青强. 2015. 西准噶尔阿克巴斯陶岩体三维形态及其地质意义. *地球科学: 中国地质大学学报*, 40(6): 941 ~ 952.
- 赵义来, 刘亮明, 胡荣国. 2018. 基于地质体产状特征及建模数据特点的三维地质建模方法探讨——以安徽月山矿田为例. *桂林理工大学学报*, 38(4): 752 ~ 760.
- 赵义来, Alison Ord, 汤静如, 胡荣国, 杨启军, 汪劲草, 王本达. 2023. 基于地表数据及产状数据的交切断层建模方法研究. *大地构造与成矿学*, 47(6): 1256 ~ 1266.
- 周文辉, 郭甲腾, 栗云峰, 吴立新, 李超岭. 2016. 基于 Coons 曲面与约束三角网的区域地质调查三维建模方法. *地球信息科学学报*, 18(6): 734 ~ 741.
- Beatson R K, Newsam G N. 1992. Fast evaluation of radial basis functions; I. *Computers & Mathematics with Applications*, 24(12): 7 ~ 19.
- Braga F C S, Rosiere C A, Santos J O S, Hagemann S G, Salles P V. 2019. Depicting the 3D geometry of ore bodies using implicit lithological modeling: An example from the Horto—Baratinha iron deposit, Guanhães block, MG. *REM-International Engineering Journal*, 72(3): 435 ~ 443.
- Calcagno P, Chiles J P, Courrioux G, Guillen A. 2008. Geological modelling from field data and geological knowledge part I. Modelling method coupling 3D potential—field interpolation and geological rules. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171: 147 ~ 157.
- Carr J C, Beatson R K, Cherrie J B, Mitchell T J, Fright W R, McCallum B C, Evans T R. 2001. Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions. *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 1: 67 ~ 76.
- Carr J C, Beatson R K, McCallum B C, Fright W R, McLennan T J, Mitchell T J. 2003. Smooth surface reconstruction from noisy range data. *ACM Graphite*, 3(1): 119 ~ 126.
- Creus P K, Basson I J, Koegelenberg C K, Ekkerd J, de Graaf P J H, Bester M, Mokele T. 2019. 3D Fabric analysis of Venetia Mine, South Africa: Using structural measurements and implicitly-modelled surfaces for improved pit slope design and risk management. *Journal of African earth sciences*, 155(1): 137 ~ 150.
- Caumon G, Gray G, Antoine C, Titeux M O. 2013. Three-dimensional implicit stratigraphic model building from remote sensing data on tetrahedral meshes: Theory and application to a regional model of La Popa Basin, NE Mexico. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3): 1613 ~ 1621.
- De kemp E A. 1998. Three-dimensional projection of curvilinear geological features through direction cosine interpolation of structural field observations. *Computers & Geosciences*, 24(3): 269 ~ 284.
- De kemp E A. 2003. Interpretive tools for 3D structural geological modeling part I: Bézier-based curves, ribbons and grip frames. *GeoInformatica*, 7(1): 55 ~ 71.
- Franke R. 1982. Scattered data interpolation: tests of some methods. *Mathematics of computation*, 38(157): 181 ~ 200.
- Guo Fusheng, Xie Caifu, Deng Juzhi, Yang Haiyan, Lin Ziyu, Wu Zhichun. 2017&. Three-dimensional geological survey method and practice of ore field——Taking Jiangxi Xiangshan volcanic basin as an example. Beijing: Science Press.
- Guo Fusheng, Wu Zhichun, Li Xiang, Zhang Wanliang, Zeng Wenle, Lin Ziyu, Xie Caifu. 2018&. The 3D geological modeling of Xiangshan volcanic basin in Jiangxi Province. *Geological Bulletin of China*, 37(Z1): 421 ~ 434.
- Guo Fusheng, Li Guangrong, Wu Zhichun, Yang Haiyan, Lin Ziyu, Zhou Wanpeng. 2020. 3D Geological Modeling of the Xiangshan Uraniferous Volcanic, Jiangxi Province. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 94(4): 1319 ~ 1320.
- Guo Jiateng, Wu Linxin, Wang Jiangmei, Zhou Wenhui, Li Chaoling, Li Fengdan. 2018&. A regional integrated geological modeling method based on the implicitization of Coons surface. *Geography and Geo-Information Science*, 34(1): 1 ~ 6.
- Guo Jiateng, Wang Jiangmei, Wu Lixin, Liu Cuizhi, Li Chaoling, Li Fengdan, Lin Min. 2020. Explicit implicit integrated 3D geological modelling approach: A case study of the Xianyan Demolition Volcano (Fujian, China). *Tectonophysics*, 795(1): 228648.
- Guo Jiateng, Dai Xinwei, Liu Shanjun, Wu Lixin, Li Chaoling, Li Fengdan. 2021&. An implicit cutting method for 3d geological body model. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 46(11): 1766 ~ 1773.
- Guo Jiateng, Wang Xulei, Wang Jiangmei, Dai Xinwei, Wu Lixin, Li Chaoling, Li Fengdan, Liu Shanjun, Jessell M W. 2021. Three-dimensional geological modeling and spatial analysis from geotechnical borehole data using an implicit surface and marching tetrahedra algorithm. *Engineering Geology*, 284: 106047.
- Hillier M, De Kemp E, Schetselaar E. 2013. 3D from line construction by structural field interpolation (SFI) of geologic strike and dip observations. *Journal of Structural Geology*, 51: 167 ~ 179.
- Li Chaoling. 2003&. The actualities and development trends of the studying of digital geological survey techniques in our country. *Xinjiang Geology*, (S1): 1 ~ 6.
- Li Chaoling, Li Fengdan, Liu Chang, Liu Yuanyuan, Lü Xia. 2016&. Theory, technical method and software platform of digital geological survey. Beijing: Geology Press.
- Li Fengdan, Li Chaoling, Wu Liang, Li Jianqiang, Lü Xia. 2015a&. Data integration and services of digital geological mapping based on big data. *Geological Bulletin of China*, 34(7): 1300 ~ 1308
- Li Fengdan, Li Chaoling, Lin Min, Liu Chang, Liu Yuanyuan, Lü Xia, Li Jianqiang. 2015b&. A dynamic method for modeling faults in 3D based on primitive data map. *Geological Bulletin of China*, 34(8): 1570 ~ 1580.
- Li Zhanglin, Wu Chonglong, Zhang Xialin, Weng Zhengping, Liu Gang, Zhang Zhiting, Zhang Junqiang. 2020&. Discussion on dynamic orebody modeling with geological science big data. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 39(4): 59 ~ 68.
- Li Yunfeng, Guo Jiateng, Zhou Wenhui, Gan Le, Li Chaoling, Du Peijun. 2017&. Refined reconstruction and 3D visualization of routine Section from regional geological survey. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 40(9): 28 ~ 32+27.
- Lyu Mingming, Ren Bingyu, Wang Xiaoling, Wang Jiajun, Yu Jia, Han Shuyang. 2023. Neural spline flow multi-constraint NURBS method for three-dimensional automatic geological modeling with multiple constraints. *Computational Geosciences*, 27(3): 407~424.
- Ma Fenling, Wu Zhichun, Liu Pinghua, Li Hualiang, Li Bin, Guo Zhen, Zhu Yidan. 2024&. Implicit 3D geological modeling of Julong' an uranium deposit in Xiangshan, Jiangxi province. *Uranium Geology*, 40(3): 506 ~ 515.
- Minimo L G, Lagmay A M F A. 2016. 3D modeling of the Buhi debris

- avalanche deposit of Iriga Volcano, Philippines by integrating shallow-seismic reflection and geological data. *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 319(1): 106 ~ 123.
- Nibourel L, Morgenthaler J, Grazioli S, Schumacher I, Schlafli S, Galfetti T, Heuberger S. 2023. Automated extraction of orientation and stratigraphic thickness from geological maps. *Journal of Structural Geology*.
- Rokhlin V. 1985. Rapid solution of integral equations of classical potential theory. *Journal of Computational Physics*, 60(2): 187 ~ 207.
- Wang Gongwen, Li Ruixi, Carranza E J M, Zhang Shouting, Yan Changhai, Zhu Yanyan, Qu Jianan, Hong Dongming, Song Yaowu, Han Jiangwei, Ma Zhenbo, Zhang Hao, Yang Fan. 2015. 3D geological modeling for prediction of subsurface Mo targets in the Luanchuan district, China. *Ore Geology Reviews*, 71: 592 ~ 610.
- Wang Guocan, Xu Yixian, Chen Xujun, Guo Jisheng, Yu Junjian, Gong Yiming, Xiao Long, Liu Xiuguo, Hua Weihua. 2015&. Three-dimensional geological mapping and visualization of complex orogenic belts. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(3): 397 ~ 406.
- Wang Quan, Zou Yanhong. 2023&. Three-dimensional geological implicit surface reconstruction based on intermediate contour morphological interpolation. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 42(5): 293 ~ 300.
- Wang Wei, Zhou Jie, Wang Shuilin, Li Xianfu. 2012&. Research on three-dimensional modeling of strata block based on radial basis function. *Rock and Soil Mechanics*, 33(3): 939 ~ 944.
- Wendland H. 1995. Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree. *Advances in Computational Mathematics*, 4(1): 389 ~ 396.
- Wu Zongmin. 1992. Hermite—Birkhoff interpolation of scattered data by radial basis functions. *Approximation Theory and its Applications*, 8(2): 1 ~ 10.
- Wu Zongmin. 1995. Compactly supported positive definite radial function. *Advances in Computational Mathematics*, 4(1): 283 ~ 292.
- Wu Zhichun, Guo Fusheng, Zheng Xiang, Zhang Yangyang, Luo Jianqun, Hou Manqing. 2015a&. The technical methods of three ~ dimension geological modeling based on PRB data. *Acta Geologica Sinica*, 89(7): 1318 ~ 1330.
- Wu Zhichun, Zheng Xiang, Zhang Yangyang, Luo Jianqun, Hou Manqing. 2015b&. Technological methods of build Fault plane based ondigital geological mapping data. *Journal of Liaoning Technical University: Natural Science*, 34(11): 1264 ~ 1270.
- Wu Zhichun, Guo Fusheng, Li Jintu. 2019. The 3D modelling techniques of digital geological mapping. *Arabian Journal of Geosciences*, (12): 1 ~ 13.
- Wu Zhichun, Guo Fusheng, Xue Linfu, Wang Guocan, Zhou Wanpeng. 2019&. The application of 3d geological modeling technology in regional geological survey practice for undergraduates. *Chinese Geological Education*, 28(3): 87 ~ 91.
- Wu Zhichun, Guo Fusheng, Zhang Wanliang, Ying Yanggen, Zhou Wanpeng, Li Cheng. 2020a&. 3D geological modeling based on multi-source data merging of Xiangshan volcanic basin in Le' an of Jiangxi. *Journal of Guilin University of Technology*, 40(2): 310 ~ 322.
- Wu Zhichun. 2020b&. Three-dimensional geological modelling and deep ore-forming conditions analysis of uranium deposits in the Xiangshan volcanic basin, Jiangxi province. Supervisor: Guo Fusheng. Nanchang: East China University of Technology Doctoral Dissertation.
- Wu Zhichun, Zhou Wanpeng, Guo Fusheng, Hou Zengqian, Song Mingchun, Pang Wenjing, Zhang Wanliang, Lou Fasheng, Deng Juzhi, Xie Caifu, Ying Yanggen, Wang Huiming, Xu Haning, Qin Yaozu. 2022&. Technical specification for 1:50 000 digital geological mapping three-dimensional modeling [S]. DB36/T 1669-2022. Jiangxi Province: Jiangxi Provincial Market Supervision and Administration Bureau.
- Yu Qingwen, Li Chaoling, Zhang Kexin, Yang Donglai, Zhu Yunhai, Ge Mengchun. 2003&. Digital geological mapping and its development. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 4: 370 ~ 376.
- Yu Junjian, Wang Guocan, Xu Yixian, Guo Jisheng, Chen Xujun, Yang Wei, Gong Yiming, Chen Chao, Li Yongtao, Yan Wenbo, Xiao Long. 2015&. Constraining deep geological structures in three-dimensional geological mapping of complicated Orogenic Belts: a case study from Karamay region, Western Junggar. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 3: 13.
- Zhang Pan, Wang Guocan, Xiao Long, Zhang Shengye, Zhou Pei, Zhang Yun, Shen Qingqiang. 2015&. Three-dimensional configuration analysis and its geological significance of Akebasitao Pluton in West Junggar. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(6): 941 ~ 952.
- Zhao Yabo, Hua Weihua, Chen Guoxiong, Liang Dong, Liu Zhipeng, Liu Xiuguo. 2021. New method for estimating strike and dip based on structural expansion orientation for 3D geological modeling. *Frontiers of Earth Science*, 15(3): 16.
- Zhao Yilai, Liu Liangming, Hu Rongguo. 2018&. 3D geological modeling based on the occurrence of geological bodies and data characteristics: a case study from Yueshan ore field, Anhui. *Journal of Guilin University of Technology*, 38(4): 752 ~ 760.
- Zhao Yilai, Alison Ord, Tang Jingru, Hu Rongguo, Yang Qijun, Wang Jincan, Wang Benda. 2023&. Study on modelling method of intersecting faults based on surface and occurrence data. *Geotectonica et Metallogenia*, 47(6): 1256 ~ 1266.
- Zhou Wenhui, Guo Jiateng, Li Yunfeng, Wu Lixin, Li Chaoling. 2016&. 3D Regional geological modeling based on coons surfaces and CD—TIN. *Journal of Geo-information Science*, 18(6): 734 ~ 741.

Acknowledgements: This paper is supported by the National Natural Science Foundation of China “Rapid construction of complex geological bodies in digital geological mapping route modeling——Taking 1:50000 Tuoshang sheet 3D geological model as an example” (No. 41802247), “Research on key technologies and ore-controlling structures of multi-source information fusion 3D modeling of vein-type uranium deposits——Taking Zoujiashan and Julongan deposits in Xiangshan volcanic basin of Jiangxi Province as examples” (No. 42472130), Jiangxi Provincial Natural Science Foundation project “Research on 3D modeling technology of explicit—implicit

interactive digital geological mapping” (No. 20242BAB25183), Jiangxi Provincial Technological Innovation Guidance Program “ Construction of 3D geological—metallogenic model and deep prospecting breakthrough of Xiangshan uranium ore field in Jiangxi Province ”

(No. 20212AEI91008), Yunnan Provincial Key Laboratory of Earth System Science Open Project “ Research on Rapid 3D Geological Modeling Technology Based on Regional Geological Survey Data——Taking Jianchuan Basin in Western Yunnan as an Example ” (No. ESS2021005)

Exploration of implicit three-dimensional modeling method for digital geological mapping

——Taking 1 : 25,000 Shandang sheet, Fuzhou, northeastern Jiangxi as an example

MA Fenling^{1, 2)}, WU Zhichun¹⁾, JIANG Shuming³⁾, LI Hongda^{1, 4)}, GUO Fusheng¹⁾,
LI Hualiang¹⁾, LIU Pinghua⁵⁾, LI Bin¹⁾, JIN Wenlong¹⁾

1) School of Earth Science, East China University of Technology, Nanchang, 330013;

2) Shaanxi Geological and Mineral Third Team Co., Ltd, Baoji, Shaanxi, 721300;

3) Zhejiang Zhenan Comprehensive Engineering Investigation and Surveying Institute Company Limited, Hangzhou, 310000;

4) Shandong Gold Geology and Mineral Exploration Co, Ltd, Laizhou, Shandong, 261400;

5) Institute of Geology, Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

Objectives: Digital geological mapping three-dimensional model is a new expression of regional geological survey results (geological maps). Compared with planar geological maps, it has better readability. In view of the limitations of the current mainstream explicit modeling methods, such as low modeling efficiency, high manual intervention and difficulty in model updating, this paper uses the digital geological mapping data of 1 : 25,000 Shandang sheet in Jiangxi province to explore digital geological mapping implicit three-dimensional modeling method based on Leapfrog Geo software platform.

Methods: Fast radial basis function (FastRBF) is used to quickly construct geological interfaces such as fault plane, Quaternary bottom interface and stratigraphic interface. According to the new and old relationship of the geological body, these geological interfaces are used to cut and fill the blank three-dimensional volume element model of the modeling area in turn, and the cut three-dimensional volume element model of the geological body is given attributes. The three-dimensional volume element model of all geological bodies is combined to generate the digital geological mapping three-dimensional model of Shandang sheet.

Results: At the same time, in view of the difficulty in constructing complex geological models, a block modeling method is proposed. Aiming at the problem that sparse occurrence data cannot directly construct the Quaternary bottom interface, an explicit—implicit interactive modeling method is proposed.

Conclusions: This modeling method realizes the high-precision and rapid construction of digital geological mapping three-dimensional model in Shandang sheet, showing a good application prospect.

Keywords: digital geological mapping three-dimensional modeling; Implicit three-dimensional modeling; fast radial basis function (FastRBF); Shandang sheet.

First author: MA Fenling, female, born in 1999, master student, majoring in geological resources and geological engineering, specializing in 3D geological modeling research; Email: m2420202253@163.com

Corresponding author: WU Zhichun, male, born in 1986, associate professor, is mainly engaged in remote sensing geological interpretation, three-dimensional geological modeling research; Email: 563970964@qq.com

Manuscript received on: 2025-02-24; Accepted on: 2025-04-29; Published online on: 2025-05-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2025.05.055

Edited by: ZHANG Yuxu