

基于多源数据和先验知识约束的 复杂地质体三维建模研究

雷传扬^{1,2)}, 刘兆鑫¹⁾, 文辉¹⁾, 范敏¹⁾, 蒋华标¹⁾, 王波¹⁾,

马国玺³⁾, 谢海洋⁴⁾, 陶海江³⁾, 郝金波⁵⁾

- 1) 四川省地质调查院、稀有稀土战略资源评价与利用四川省重点实验室, 成都, 610081;
2) 四川省地矿局四〇五地质队, 四川都江堰, 611830; 3) 武汉中地数码科技有限公司, 武汉, 430073;
4) 四川省地矿局一〇九地质队, 成都, 610100; 5) 成都市地质环境监测站, 成都, 610042

内容提要: 三维地质模型可以直观的展现地下地质情况, 对传统地矿行业的转型升级和城市规划建设都具有重要意义。针对复杂地质条件下三维模型的构建, 笔者等提出了一种基于多源数据和地质先验知识约束的三维地质建模方法。以成都市为例, 基于 MapGIS10.0 软件三维地质建模模块, 在 DEM 数据、数字地质图、综合地质剖面图、钻孔数据、物探解译数据、构造纲要图等多源数据, 以及地质体展布形态、产状和厚度变化, 断层性质、延伸方向、产状变化、对地质体的错切、褶皱类型、形态特征、两翼产状变化等地质先验知识的共同约束下, 开展复杂地质条件下三维地质模型构建研究。笔者等详细介绍了复杂地质体三维建模数据源的准备、建模流程与方法、模型的构建与可靠性分析。认为采用分块建模技术可有效降低复杂地质体三维模型构建的难度, 提高建模效率, 实现模型的无痕拼接, 且易于后期模型的修改完善。本次基于多源数据和地质先验知识约束, 采用分块建模技术首次构建了成都市三维地质模型。笔者等通过地质先验知识(地质规律)和静态数据(可视化和抽稀钻孔数据)对模型的可靠性进行了分析, 其中抽稀钻孔数据分析采用未参与建模的真实钻孔对三维地质模型中地质体埋深和分层厚度进行误差计算, 获得地质体埋深误差均值为 33.15 m, 分层厚度误差均值 21.37 m, 认为模型的可靠性较高, 可为成都市城市规划和重大工程选址提供重要的基础地质数据支撑。

关键词: 多源数据; 地质先验知识; 复杂地质体; 分块建模; 三维地质建模

三维地质模型可以将复杂地质现象三维可视化, 提高地质资料的易理解性, 不仅在区域地壳稳定性评价、城市规划、重大工程选址、海绵城市建设、地下空间开发利用和地质资源环境承载力评价等诸多方面具有重要作用, 还可以促进地球科学的发展 (Turner, 2006; 朱发华和贺怀建, 2010; 黄敬军等, 2015; Jessell et al., 2016; 何登发等, 2018; Hao Ming et al., 2019, 2021; 陈根深等, 2019; 卞小芮等, 2021), 其构建方法和可靠性评价一直是工程地质学和地质信息科学研究的热点 (祁光等, 2014; 明镜, 2015; Bistacchi et al., 2015; 李兆亮等, 2016; Wang Zhangang et al., 2016; Song Renbo et al., 2019)。国外三维地质建模及相关研究开展较早,

经历了线框模型、面模型、体模型到集成建模的发展阶段, 目前理论研究、程序研发和应用服务等方面相对成熟 (Jessell et al., 2016), 尤其是 Mallet (2002) 提出的离散光滑插值 (discrete smooth interpolation, DSI) 算法, 标志着曲面建模技术的重大突变。国内三维地质建模及相关研究起步较晚, 但发展迅速, 近年来已取得不少成果。吴冲龙等 (1993) 引入盆地系统概念对盆地三维模拟技术进行了改进, 建立了切合实际的地质作用概念模型, 随后其团队就三维构造—地层几何形态的插值方法、三维地质建模和地矿勘查图件编制一体化方法、精细三维地质模型的构建方法、结构—属性一体化三维地质建模技术等方面进行了深入研究, 并研发了国产数字矿山软

注: 本文为成都市规划和自然资源局资助项目 (编号: 5101012018002703) 和甘肃省文县阳山金矿资源基地综合调查 (编号: ZD20220310) 的成果。

收稿日期: 2022-02-04; 改回日期: 2022-06-06; 网络首发: 2022-06-20; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.06.141

作者简介: 雷传扬, 男, 1985 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事区域地质、矿产地质、城市地质和生态地质的调查与研究工作; Email: lcy850610@126.com。



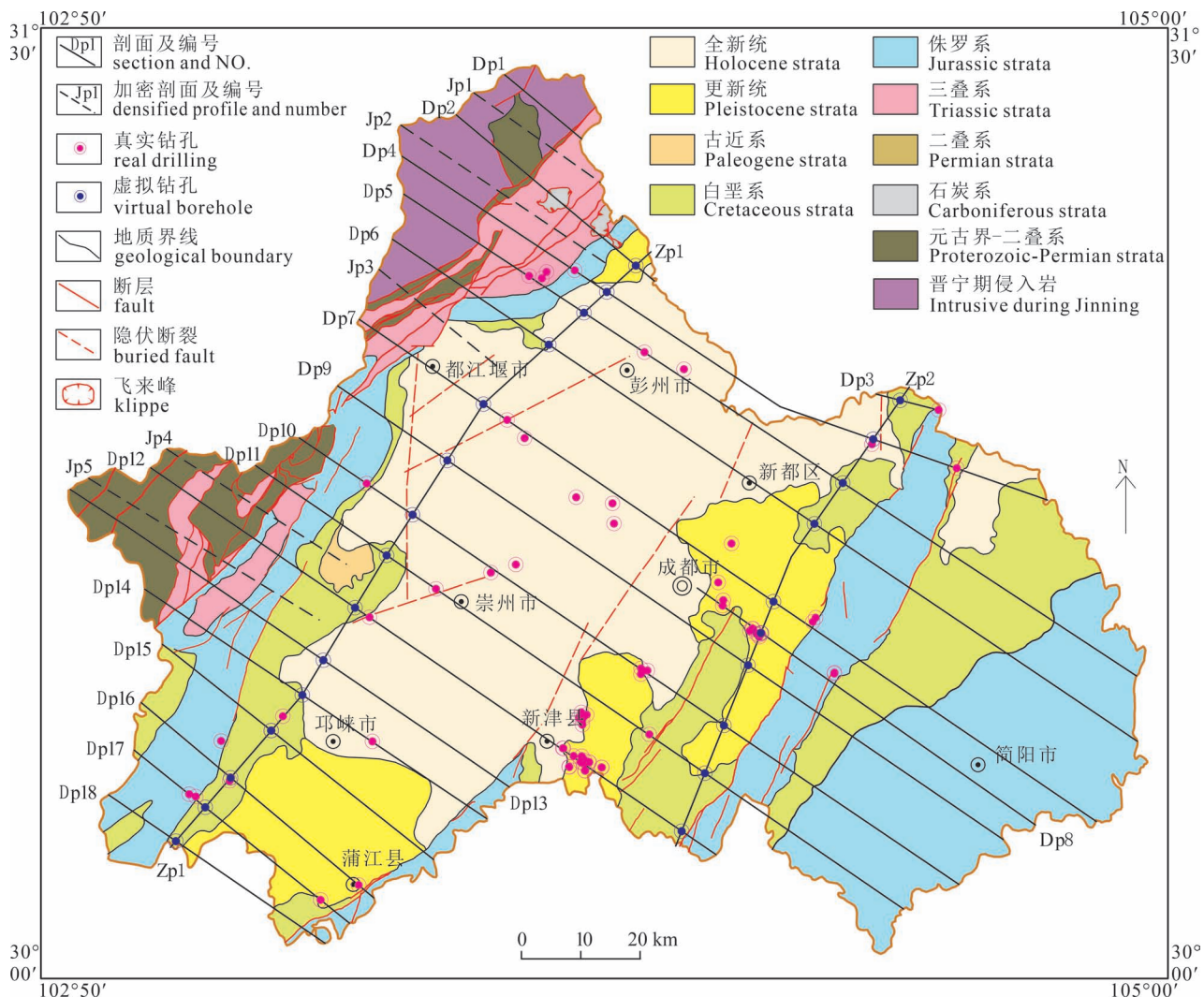


图 1 成都市地质略图及综合地质剖面部署 (据王波等, 2021 修改)

Fig. 1 Geological map of Chengdu and deployment of comprehensive geological section (modified after Wang Bo et al., 2021&)

件 (QuantyMine) (田宜平等, 2000; 陈国旭等, 2010; 张夏林等, 2010; 唐丙寅等, 2017; 陈麒玉等, 2020)。潘懋等 (2007) 提出了“多元数据—多方法集成—多层次干预”的建模思路, 深入研究了蝴蝶细分算法及其在三维地质建模中的应用 (董攀等, 2008)。吴信才和童恒建 (2004) 基于文件方式与数据库相结合的存储模式实现了面向对象的三维空间数据模型, 以此为基础建立了早期城市三维地质模型构建系统, 其团队深入研究了基于钻孔数据、平面地质图、地质剖面图以及地表 DEM 数据等约束下三维地质模型的构建和模型的精度评估及误差修正 (朱良峰等, 2004, 2007, 2009; 侯卫生等, 2007; 张忠贵等, 2015; 万波等, 2016), 并研发了 MapGIS 三维地质建模软件。

笔者等在已有研究基础上, 依托成都市城市地

下空间资源地质调查应用系统开发及数据整合建库项目, 深入研究了基于多源数据和先验知识约束的复杂地质体三维模型构建, 重点论述了分块三维地质建模的优势和模型无痕拼接的原理和基本思路, 在此基础上首次构建了成都市三维地质模型, 并基于静态数据和地质先验知识分析了模型的可靠程度, 认为成都市三维地质模型的可靠性较高, 可为成都市城市规划和重大工程选址提供重要的基础地质数据支撑。

1 地质概况

成都市位于四川盆地西部, 构造上属于龙门山前中—新生代前陆盆地, 该盆地囊括了成都平原大部 (图 1)。受青藏高原向东逸出影响 (张家声等, 2003), 构造形迹主要表现为北东—南西向的断裂

和褶皱(图1,图2)。据成都市沉积建造、构造特征和演化,结合地球物理资料,以江油—灌县断裂(龙门山前缘断裂)、龙泉山断裂带为界,将成都市构造单元划分为龙门山逆冲推覆构造带、川西前陆盆地、龙泉山褶断带和川中前陆盆地(王波等,2021)。成都平原主体位于川西前陆盆地,该盆地西以龙门山为界,东以龙泉山为界,形成了“两山夹一盆”的构造格局。

成都市地层隶属于上扬子地层分区,从西向东横跨龙门山地层小区、成都地层小区和重庆地层小区,西北角以安县—灌县断裂为界,属于龙门山地层小区,为巨厚的上三叠统含煤层系和中生代红色磨拉石建造,受龙门山冲断带逆冲推覆作用影响,地层变形强烈;中部以龙泉山西坡断裂为界,西侧为成都地层小区,被第四系覆盖,构成成都平原的主体,边缘受构造影响出露少量侏罗纪、白垩纪、古近纪和新近纪地层,区内地层连续发育;东侧为重庆地层小区,主要分布中—上侏罗统及下白垩统陆相地层,在河流、沟谷等低洼地带分布有少量第四系冲洪积物(表1)。

2 建模数据源分析

成都市三维地质建模面积 14335 km²,控制深度为 2000 m,区内地形地貌、地层岩性、地质构造非常复杂,除中心城区外,其他区域地质工作程度相对偏低。本次收集了大量地质资料,以此为基础,开展三维地质模型构建研究,直接参与模型构建的数据源有数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)、数字地质图、综合地质剖面图、勘探钻孔数据、物探解译数据、构造纲要图。

2.1 DEM 数据

目前获取 DEM 数据的方式主要包括:①从现有地形图等高线获取;②通过 GPS、全站仪等野外测量高精度仪器直接从地面获取;③根据航空或航天影像,通过摄影测量途径获取。不同方式获取的 DEM 数据优缺点和适用性差异明显。利用现有地形图数字化后等高线精度不高,数字化过程耗时较长,但成本低,适用于中小比例尺 DEM 数据的获取;利用野外测量获得数字地形图建立的 DEM 数据精度最高,获取速度慢,成本极高,仅适用于小范围高精度 DEM 数据的获取;摄影测量获取的 DEM 数据精度较高,尤其是近年来干涉雷达和激光扫描仪等新型传感器的应用,可以快速获取高精度、高分辨率的影像数据,获取成本比较高,适用于大范围较高精度

DEM 数据的获取(高轩,2011)。本次成都市三维地质建模面积 14335 km²,采用基于航天飞机搭载成像雷达采集数据所构建 SRTM-1 DEM 地形数据,分辨率精度为 30 m,利用其高程属性值,结合成都市 1:250000 数字地质图和构造纲要图约束,直接构建三维地表地质模型。

2.2 数字地质图

数字地质图是通过野外地质调查实测编绘形成的二维图件,客观反映地质体及各类构造在平面区域内的分布和交切关系,是约束三维地质模型地表部分的重要数据源。成都市域范围涉及成都市幅、绵阳市幅和宝兴县幅共三幅 1:250000 区域地质图。本次收集了成都市域内大量存量地质资料,开展深入研究,建立了成都市地层统一划分标准体系(王波等,2021;刘兆鑫等待刊文章),通过对不同图幅开展地层清理、不一致处理、图面整饰以及属性编辑等工作,形成了成都市 1:250000 数字地质图,作为本次构建成都市三维地质模型的基础地质图。

2.3 综合地质剖面图

综合地质剖面图是基于大量钻孔数据、物探解译数据和各类地质调查工作绘制的剖面图,结合地质专家的先验知识绘制而成(王波等,2021),综合反映建模范围内地层框架结构、断裂及褶皱展布规律、形态特征,对全区深部地质结构具控制性作用,是建模数据源中比较复杂的一类。为了让构建的综合地质剖面图更加准确、客观,本次收集了成都市域范围各类地质剖面 558 条,共 9252 km。在对全域剖面资料综合研究的基础上,结合地质图、钻孔数据和物探解译成果,在成都市全域绘制了 25 条综合地质剖面图,共 2002 km,基本上控制了全域断层、褶皱等重要构造和地质单元(图1)。其中 18 条剖面呈北西—南东向贯穿成都市域,与地层和构造走向基本垂直,控制了成都市域内主要地质单元和构造,为区域主干剖面;考虑到西北角龙门山地区断层、褶皱、飞来峰等广泛发育,地质构造极为复杂,补充绘制了 5 条区域约束剖面图。为了使综合地质剖面尽量客观反映地下真实地质情况,本次以实测重磁电解译剖面为基础,开展了重磁电联合反演,视反演情况对剖面进行了修改。另外,鉴于成都市不同地层小区地质构造复杂程度差异明显,在成都平原东西两侧,绘制了两条纵剖面图,起到建模分区的作用,为分块建模做准备。

2.4 钻孔数据

相对于各类地质剖面图和物探解译数据,钻孔

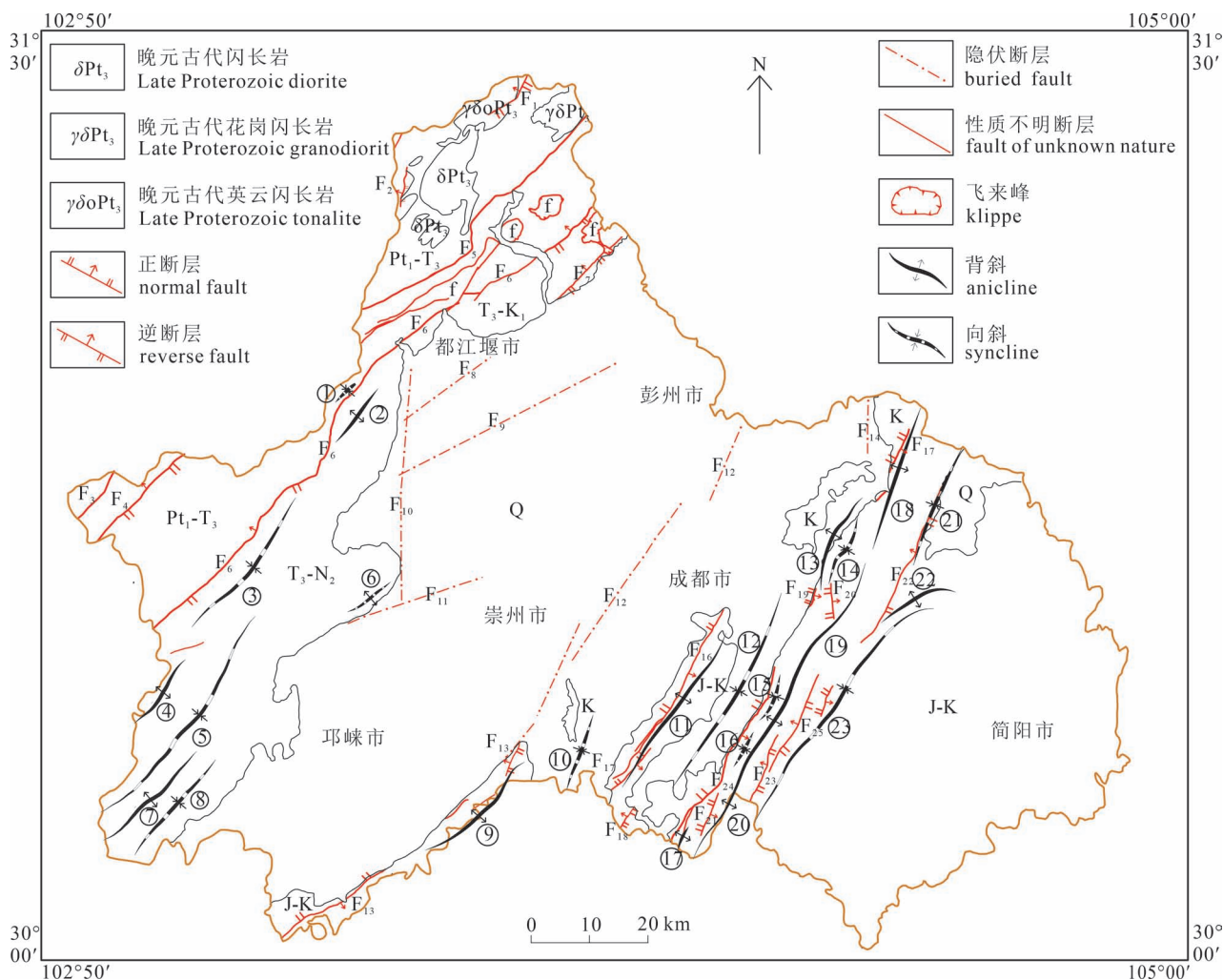


图 2 成都市构造纲要图

Fig. 2 Structural outline map of Chengdu

Q—第四系; N₂—上更新统; K—白垩系; J—侏罗系; T₃—上三叠统; Pt₁—古元古界; ①—赵公山向斜; ②—中皇观背斜; ③—李家坪桥背斜; ④—南宝山向斜; ⑤—高家场背斜; ⑥—龙凤场向斜; ⑦—崇姑山向斜; ⑧—三合场背斜; ⑨—熊坡背斜; ⑩—普兴场向斜; ⑪—苏码头背斜; ⑫—藉田向斜; ⑬—金龙寺背斜; ⑭—罗家山向斜; ⑮—卧龙寺向斜; ⑯—土门子向斜; ⑰—大林场背斜; ⑱—三皇庙背斜; ⑲—三大湾背斜; ⑳—白云背斜; ㉑—中兴场向斜; ㉒—五凤溪背斜; ㉓—贾家场向斜; F₁—老君堂断裂; F₂—龙溪—虹口断裂; F₃—岷堂子弧形断裂带; F₄—盐井弧形断裂带; F₅—映秀断裂; F₆—安县—灌县断裂带; F₇—九陵镇断裂; F₈—聚源断裂; F₉—竹瓦铺—什邡断裂; F₁₀—都江堰—大邑断裂; F₁₁—大邑—崇州断裂; F₁₂—新津—成都—德阳隐伏断裂带; F₁₃—蒲江—新津断裂; F₁₄—德阳—金堂断裂; F₁₅—谢家沟断层; F₁₆—廖家沟断层; F₁₇—三家沟断层; F₁₈—九龙山断层; F₁₉—龙泉驿断层; F₂₀—四方山断层; F₂₁—三星场断层; F₂₂—红花岗断层; F₂₃—尖尖山断层; F₂₄—马鞍山断层; F₂₅—久隆场断层; f—飞来峰

Q—Quaternary; N₂—Upper Pleistocene strata; K—Cretaceous strata; J—Jurassic strata; T₃—Upper Triassic strata; Pt₁—Paleoproterozoic strata; ①—Zhaogong mountain syncline; ②—Zhonghuangguan anticline; ③—Lijiaping bridge anticline; ④—Nanbao mountain syncline; ⑤—Gaojiachang anticline; ⑥—Longfengchang syncline; ⑦—Suigu mountain syncline; ⑧—Sanhechang anticline; ⑨—Xiongpo anticline; ⑩—Puxingchang syncline; ⑪—Sumatou anticline; ⑫—Jietian syncline; ⑬—Jinlongsi anticline; ⑭—Luoja mountain syncline; ⑮—Wolongsi syncline; ⑯—Tumenzi syncline; ⑰—Dalinchang anticline; ⑱—Sanhuangmiao anticline; ⑲—Sandawan anticline; ⑳—Baiyun anticline; ㉑—Zhongxingchang syncline; ㉒—Wufengxi anticline; ㉓—Jiajiachang syncline; F₁—Laojuntang fault; F₂—Longxi—Hongkou fault; F₃—Yaotangzi arcuate fault zones; F₄—Yanjing arcuate fault zones; F₅—Yingxiu fault; F₆—Anxian—Guanxian fault zones; F₇—Jiuling towm fault; F₈—Juyuan fault; F₉—Zhuwapu—Shifang fault; F₁₀—Doujiangyan—Dayi fault; F₁₁—Dayi—Chongzhou fault; F₁₂—Xinjin—Chengdu—Deyang buried fault zones; F₁₃—Pujiang—Xinjin fault; F₁₄—Deyang—Jintang fault; F₁₅—Xiejiaogou fault; F₁₆—Liaojiaogou fault; F₁₇—Sanjiagou fault; F₁₈—Jiulong mountain fault; F₁₉—Longquanyi fault; F₂₀—Sifang mountain fault; F₂₁—Sanxingchang fault; F₂₂—Honghuatang fault; F₂₃—Jianjian mountain fault; F₂₄—Maan mountain fault; F₂₅—Jiulongchang fault; f—klippe

表 1 成都市地质单元特征统计表

Table 1 Characteristic statistics of geological units in Chengdu

年代		龙门山地层小区				成都地层小区				重庆地层小区			
系	统	名称	代号	主要岩性	厚度(m)	名称	代号	主要岩性	厚度(m)	名称	代号	主要岩性	厚度(m)
白垩系	古近系	名山组	E ₁₋₂ ^m	下部为砾岩,上部为砂岩、与粉砂岩、泥岩构成不等厚韵律层。	>50	名山组	E ₁₋₂ ^m	以泥岩、粉砂质泥岩为主,下部夹粉砂岩、泥质粉砂岩。	>175	缺失	K ₁ ^g	泥岩、粉砂岩夹砂岩。	50~177
	上统	灌口组	K ₂ ^g	下部砾岩为主,上部为砂岩、含砾砂岩与粉砂岩、粉砂质泥岩构成不等厚韵律层。	328	灌口组	K ₂ ^g	以粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩类为主,韵律结构较强,层间夹砂岩。	458				
		夹关组	K ₁₋₂ ^j	下部砾岩为主,上部砂岩、与粉砂岩、粉砂质泥岩构成不等厚韵律层。	568	夹关组	K ₁₋₂ ^j	以砂岩为主,夹含砾砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩等。	160		古店组	砂岩、粉砂岩及泥岩不等厚互层。	168~258
侏罗系	下统	缺失	缺失	缺失	缺失	天马山组	K ₁ ^t	以泥岩、粉砂质泥岩、粉砂岩为主。	135	七曲寺组	K ₁ ^q	砂岩、粉砂岩及泥岩不等厚互层。	188
	上统	莲花口组	J ₃ ^l	砾岩夹砂岩、泥质粉砂岩、泥岩不等厚互层,局部夹细砾岩。	1223	蓬萊鎮组	J ₃ ^p	以泥岩、粉砂岩为主,夹砂岩和透镜状细砾岩。	600	蒼溪组	K ₁ ^c	以泥岩、粉砂岩,夹厚层砂岩为主,下部砂岩中夹透镜状砾岩。	190
侏罗系	中统	遂宁组	J ₃ ^{sn}	砾岩与砂岩、粉砂岩、泥岩组成韵律层。	155	遂宁组	J ₃ ^{sn}	以泥质岩类为主,夹粉砂岩和砂岩。	600~800	蓬萊鎮组	J ₃ ^p	泥岩、粉砂质泥岩、粉砂岩夹砂岩、页岩、泥灰岩。	865
		沙溪庙组	J ₂ ^s	以砂岩夹泥页岩组成的韵律层为主,夹少许砂砾岩。	231	沙溪庙组	J ₂ ^s	以细砂岩为主,夹泥质粉砂岩、粉砂质泥岩。	440	遂宁组	J ₃ ^{sn}	以泥岩、粉砂质泥岩为主,夹砂岩及粉砂岩,组成不等厚互层。	350~370
	下统	自流井组	J ₁₋₂ ^z	砾岩与砂岩、粉砂岩、泥岩组成下粗上细的韵律层。	402	自流井组	J ₁₋₂ ^z	以泥岩、粉砂质泥岩为主,夹泥质岩类、粉砂岩等。	340~440	沙溪庙组	J ₂ ^s	砂岩与粉砂岩、泥岩组成略等厚互层。	440
三叠系	上统	须家河组	T ₃ ^x	砂岩、含砾砂岩与粉砂岩、泥岩组成不等厚韵律互层。	>1000	须家河组	T ₃ ^x	下部以泥岩、粉砂岩为主,上部为砂岩夹泥岩,局部夹含泥质砂砾岩。	>210	未出露			

注:数据来源于钻孔统计分析和综合研究

数据更能真实反映地质信息,属于最可靠的地下探测数据,是三维地质建模过程中需严格约束的数据。钻孔数据主要包括钻孔点位信息、分层信息以及各类测试和动态监测数据,其中点位信息和分层信息用于结构模型的构建,而各类测试和动态监测数据用于属性建模。将钻孔分层信息与各类剖面图分层信息相融合,用于复杂地质体模型的构建和完善,可以明显提高三维地质模型的精度和表现能力(Lemon and Jones, 2003; 朱良峰等, 2006; 张明明等, 2015)。笔者等收集了成都市域范围内 27 万余份钻孔数据,经数据清洗后(张夏林等, 2020; 雷传扬等, 2020),其中 67420 份钻孔的点位信息和分层信息等要素完整,属于有效数据,可用于三维建模。但以孔深 <100 m 的工程勘查钻孔为主,对于构建控制深度为 2000 m 的模型来说,孔深 ≥ 100 m 的钻孔数据才具有实际意义,孔深 ≥ 100 m 的钻孔数据 2281 份,其中孔深 100~300 m 的钻孔数据 1546 份,300~2000 m 的钻孔数据 615 份, ≥ 2000 m 的钻孔数据 120 份,最大钻孔深度可达 5000.19 m。据成都市地层统一划分标准体系(刘兆鑫等待刊文章),对这 2281 份钻孔数据进行标准化,建立了有效钻孔数据库,用于成都市三维地质模型的构建和可靠性分析。

2.5 物探解译数据

物探解译数据可较好地约束地下地质体形态和断裂构造,为构建深部地质体和断裂构造三维模型提供验证和支撑信息(毛先成等, 2020; 冉祥金, 2020),在有效利用钻孔数量有限,且分布不均的情况下,物探解译数据可作为构建三维地质模型的重要数据源。本次收集了成都市域范围内大量物探资料,包括成都市城市物探工作报告、四川盆地成都平原地球物理勘查成果、四川盆地航空物探总结报告、成都平原水文物探工作成果、四川盆地成都平原重力磁力详查总结报告、四川盆地西部大邑地区地震普详查成果报告以及成都市地下空间资源地质调查形成的物探专项成果等五十余份,其中对构建成都市三维地质模型具有关键作用的物探数据主要包括:①据高精度重力数据反演的成都平原第四系厚度等值线图;②据大地电磁测深数据解译的成都市地层结构框架;③据微动探测成果解译的成都市地层岩性划分成果;④据面波及高密度电法反演的成都市断裂构造产状特征等。

2.6 构造纲要图

构造纲要图是用不同线型表示一个地区主要地

质构造特征的二维图件,是搭建三维地质模型构造格架的重要数据源。本次在成都市幅、绵阳市幅和宝兴县幅三幅构造纲要图的基础上,对成都市域主要地质构造进行了系统梳理,统一编号,编制了成都市构造纲要图(图 2)。通过研究相关资料,总结了地质构造的形态、产状和规模等信息,并将这些信息赋给对应的断裂或褶皱作为属性值,为搭建成都市三维地质模型构造格架提供数据支撑。

3 建模流程与方法

3.1 建模流程

成都市三维地质建模工作内容主要包括建模数据源准备、数据处理和三维模型构建 3 个部分:①建模数据源的准备包括地表 DEM 数据、数字地质图、构造纲要图、综合地质剖面图、物探解译数据和标准化钻孔数据的准备;②数据处理工作包括将各类二维图件导入 MapGIS10.0 软件三维地学建模模块,以及各类图件之间的一致性处理;③采用交互方式完成成都市三维地质模型的构建。鉴于成都市从西至东跨越龙门山逆冲推覆构造带(龙门山地层小区)、川西前陆盆地(成都地层小区)、龙泉山褶皱带和川中前陆盆地(龙门山地层小区)四个构造单元,不同构造单元地貌特征、构造样式、地质结构、地层沉积特征等均存在较大差异,采用分块建模技术构建不同构造单元的三维地质模型,详细的建模流程见图 3。

3.2 插值方法

本次三维地质建模主要是结构建模,重点刻画不同类型地质构造界面的三维空间展布形态、厘定不同类型界面的空间拓扑关系,在此基础上构建成都市三维地质模型。受龙门山造山带、龙泉山褶皱带影响,成都市域地质构造复杂,地质体规模悬殊明显且形态不规则,尤其是龙门山逆冲推覆构造带内侵入岩体、断层、褶皱、飞来峰等广泛发育,给三维地质建模工作带来了极大的挑战。鉴于不规则三角网(TIN)构面过程中三角形大小和形态可根据界面复杂程度,模型精度和美观度进行调整,且拟合界面的精度较高(熊祖强等, 2007; 唐丙寅等, 2017),尤其是对断裂、褶皱和岩体界面等复杂界面有很好的拟合与逼近效果(Caumon et al., 2009; 李兆亮等, 2016)。本次成都市三维地质建模采用插值加密的三角网构建各类地质构造界面,在界面构建过程中根据界面大小和复杂程度,通过 MapGIS10.0 软件三维地学建模模块中不同插值算法改变三角形的大

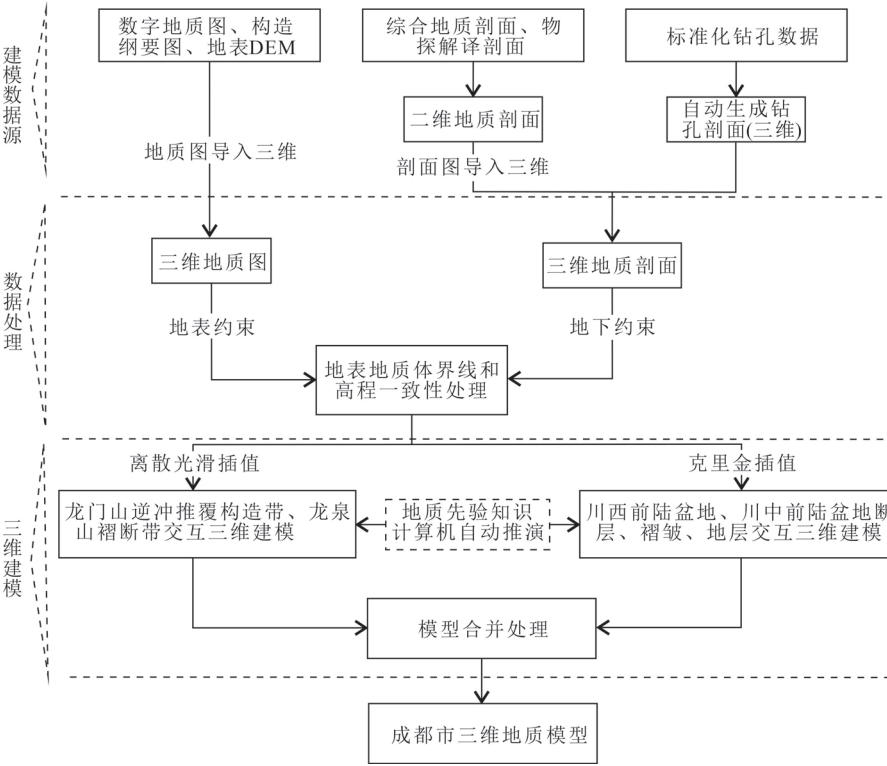


图3 成都市三维地质模型构建流程

Fig. 3 Construction process of 3D geological model in Chengdu

小和形态,再设置合适的插值参数加密构面,同时通过人为适当增加约束数据,如物探解译的成都市地层结构框架、地层岩性划分和断裂构造产状特征等数据,使构建的界面能更加真实的刻画实际的地质构造界面,完成成都市三维地质模型的构建。

克里金插值法(Kriging)能最大程度保证构建地质界面与原始数据的拟合,插值结果更接近原始地质体特征,构建的地质界面更符合实际情况,在界面水平且起伏变化相对稳定的区域采用克里金插值可以取得良好的拟合效果(颜慧敏,2005;杨鹏程等,2021),但对于界面起伏变化较大,如不规则岩体界面、断层两侧、褶皱附近突变的数值点拟合较差(张明明等,2015)。川西前陆盆地和川中前陆盆地地质构造相对较简单,各类地质界面的构建采用克里金插值法进行加密插值。

离散光滑插值法(DSI)是对不规则三角网的改进,适用于各类复杂界面的构建,如大倾角、非层状地层界面以及断层、褶皱、不规则侵入体等地质构造界面的构建(王长海等,2014;张明明等,2015),弥补了克里金插值法仅适合于层状地层界面插值的缺陷。龙门山逆冲推覆构造带和龙泉山褶断带地质构

造复杂,各类地质界面的构建采用离散光滑插值法进行加密插值。

3.3 建模方法

为了实现程序的自动化和智能化,减少人工干预,提高三维地质建模的高效性和精准性。首先将DEM数据、数字地质图、综合地质剖面图、勘探钻孔数据、物探解译数据、构造纲要图等建模数据源导入三维地学建模模块,获取点、线数据,通过处理数据源内部和之间的不一致性,融合成统一的建模数据源模型。然后以分块建模单元为对象,自动搜索建模单元内地质体对应的建模数据源,包括点和弧段线数据。过程中支持地质技术人员实时添加尖灭线、辅助线等,将地质体展布形态、产状和厚度变化,断层性质、延伸方向、产状变化、对地质体的错切,褶皱类型、形态特征、两翼产状变化等地质先验知识融入

到建模过程中。

多源数据和地质先验知识约束下,对于不含断层、褶皱等简单地质界面的构建,通过建模模块提供的关联匹配功能,获取融合后的建模数据源,进行耦合Delaunay三角剖分、插值拟合,结合三维曲面光滑算法,构建光滑的简单地质界面模型;对于含断层、褶皱、侵入岩体等复杂地质界面的构建,采用多层DEM表面模型构建方式,首先基于各地层(尤其是控制性地层或关键地层)的界面点按多层DEM表面模型构建方法对各个地层进行插值拟合,然后以断层、褶皱和侵入体等为约束,形成空间中严格按地层组为要素进行划分的三维地层模型的骨架结构,继而引入地下空间中的特殊地质对象(如断层、褶皱、侵入体等)。在此基础上,利用相交处理算法和人工干预手段处理各类地质界面之间的矛盾,保障各类地质界面间互不相交,空间拓扑关系正确无误,完成三维地下空间轮廓初始模型的构建。由于剖面区要素的存在和建模过程中产生的临时曲面数据,地质体初始轮廓模型中存在一定数量的冗余数据,通过点与多面体的位置关系算法,找出冗余数据列表,并将其删除,获得无冗余数据的、完整封闭的

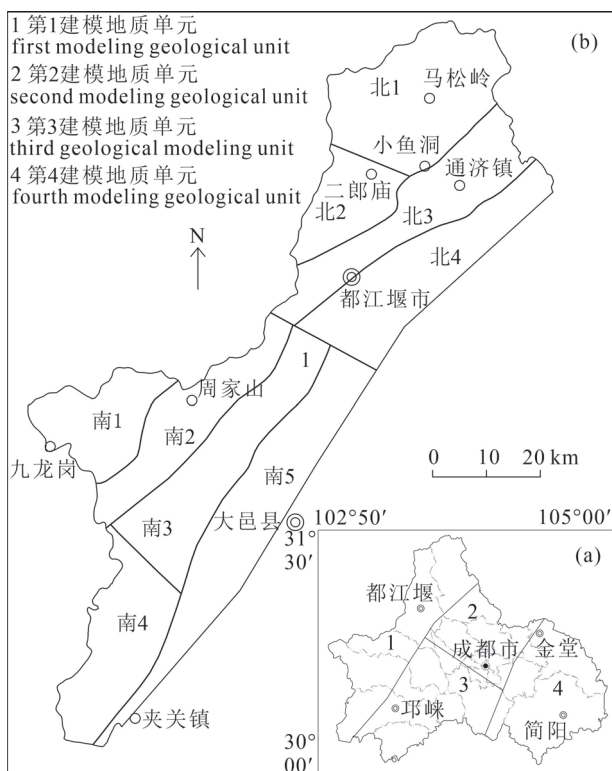


图4 成都市域(a)及龙门山逆冲推覆构造带(b)建模单元细分示意图

Fig. 4 Division diagram of modeling geological units in thrusting nappe structure of Longmen Mountains

复杂地质体轮廓模型。最后通过地层属性特征和地质面几何拓扑关系,将属性数据赋给地质体轮廓模型,完成地质体模型的构建。

4 三维地质模型构建

本次采用 MapGIS10.0 软件三维地学建模模块构建成都市三维地质模型。采用分块三维地质建模技术,以三条综合地质剖面(1条横向,2条纵向)为边界,将成都市分为4个大的建模地质单元(图4a),而龙门山逆冲推覆构造带地质构造极为复杂,整体建模复杂度过高,工作量巨大,采用人工构建剖面的方式进一步细分为9个小的建模地质单元(图4b)。

4.1 分块三维地质建模

分块三维地质建模的指导思想是“分块建模、综合约束、统一集成、逐步完善”(刘小杨,2014)。分块建模是指以断裂界线、不整合地层界线、岩体侵入界线以及人工构建剖面等为边界,将建模区划分为多个建模地质单元,在统一的三维坐标系统下,完成各建模地质单元三维地质模型的构建,适合于大

面积、地质条件复杂区域三维地质模型的构建;综合约束是指在推断深部地质界线、断裂构造过程中,以地质理论和地质先验知识为指导,充分综合利用各类地质、物探、钻探等已知约束数据,提高深部地质推断的可靠性;统一集成是指将分别构建的三维地质模型集成到同一三维空间框架下,完成模型的构建;地质工作是一个由浅而深,由疏而密的过程,三维地质模型亦如此,随着地质工作的积累,获得的地下地质信息日趋丰富,应以此为基础不断完善模型。

4.1.1 分块三维地质建模的优势

分块三维地质建模用于建模面积大,复杂地质条件下模型的构建优势明显,主要体现在3个方面:①降低建模难度,提高建模效率。分块建模可以将复杂地质条件下大面积三维地质模型划分为多个建模地质单元,各建模单元内地质结构相对简单和独立,开展地质综合研究、数据一致性处理和建模相对简单;划分后的建模任务可以分配到团队不同成员,极大提高了建模效率。②易于模型的集成和融合。分块建模是基于统一的三维坐标系统建模,以断裂界线、不整合地层界线、岩体侵入界线等为界划分不同的建模地质单元,不同建模地质单元模型的集成不会留下拼接痕迹,模型的美观度和精确度都得到了明显的改善。③易于后期模型的修改完善。随着地质工作持续开展、调查方法和技术的创新,获得的地下地质数据不断积累,对地下地质的认识逐渐深入,已有模型需要进一步修改完善,分块三维建模可以实现对某一个独立建模地质单元的修改和完善,使模型的修改完善变得相对容易。

4.1.2 无痕拼接的原理和基本思路

以断裂界线、不整合地层界线、岩体侵入界线以及人工构建剖面等为边界,将建模区划分为若干个建模地质单元。分块模型构建过程中,利用相邻分块边界线作为自身三维边界约束数据,同时也将相邻建模地质单元一定范围内的建模数据源作为自身的建模数据,参与模型的构建,从而达到分块之间边界相互吻合的效果。

4.2 模型成果集成与表达

本次成都市三维地质模型的集成采用分块组合,统一集成的方式。完成建模区所有建模地质单元模型构建之后,将其导入到 MapGIS10.0 软件三维地学建模模块,在统一的空间坐标系统下完成模型的集成,形成成都市完整的三维地质模型,然后进行色彩渲染(图5、图6)。模型组合以建模地质单

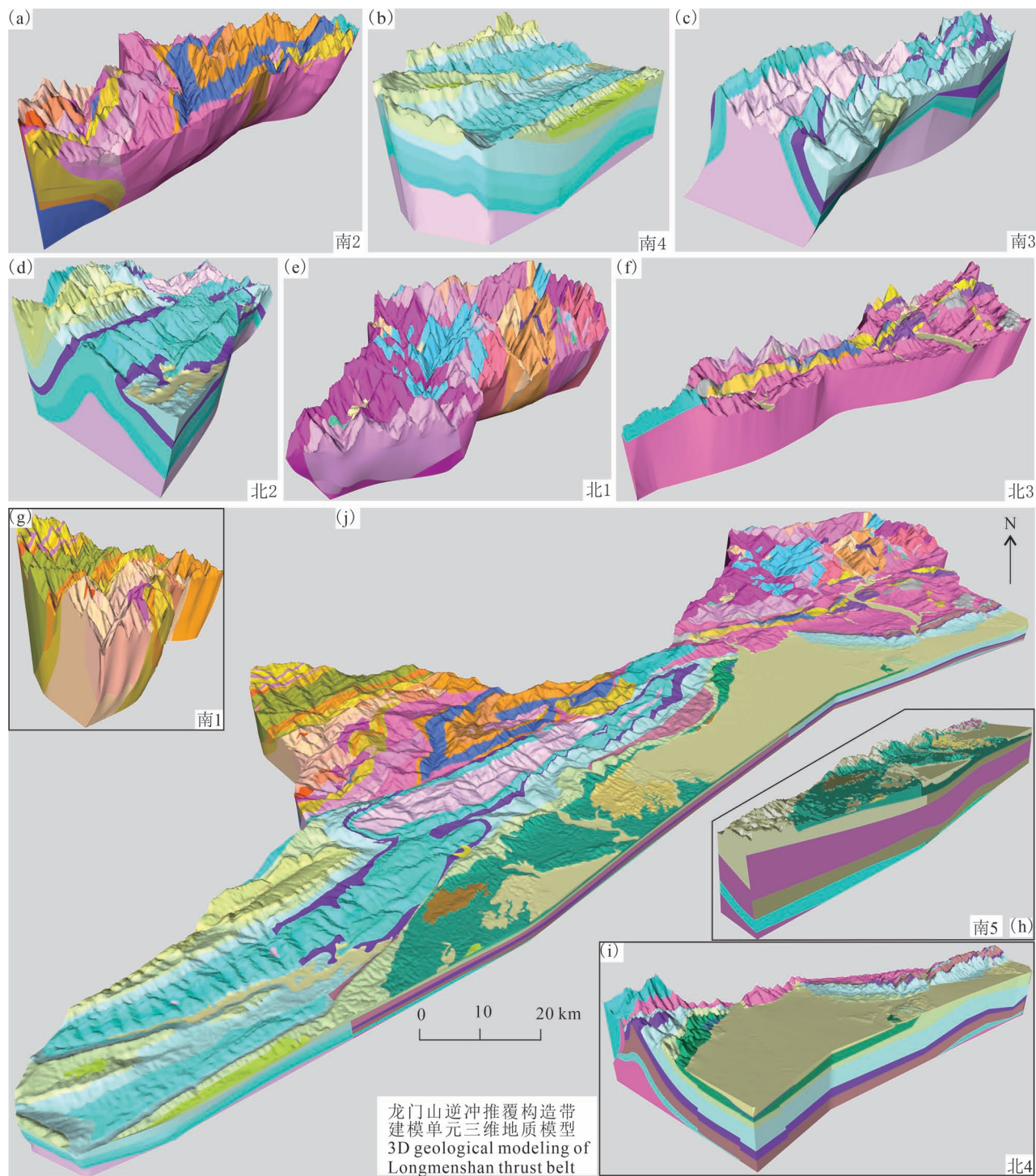


图 5 龙门山逆冲推覆构造带各建模地质单元集成示意图

Fig. 5 Schematic diagram of integration of modeling geological units in thrusting nappe structure of Longmen Mountains

元为对象,遵循由简单到复杂,对已组合的地质体进行不断剥离,简化剩余未组合模型的原则(吴志春等,2016),将模型边界面、地表三维地质模型面、断层面、第四系界面、地层界面和岩体界面按地质体先新后老的顺序依次组合,将地表三维地质模型面作

为模型的顶界面,用第四系底界面约束下伏基岩地质体的顶界面,岩体界面约束侵入围岩界面,组合过程中重点关注断层对地质体的错切和地质体之间的错切关系,用切割地质体去裁剪被切割地质体,实现相邻地质体之间的无痕拼接。

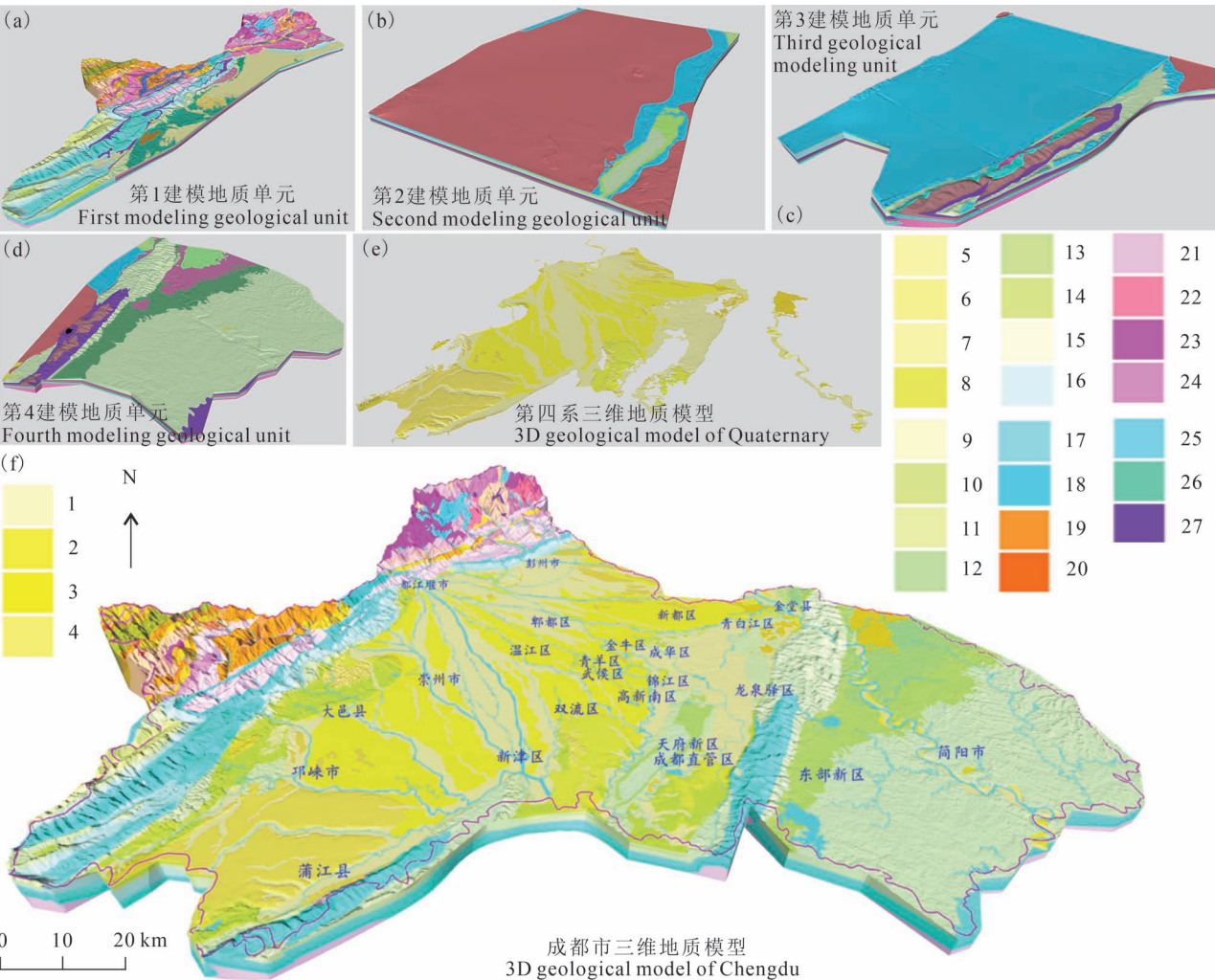


图 6 成都市各建模地质单元集成示意图

Fig. 6 Schematic diagram of integration of modeling geological units in Chengdu

1—全新统；2—资阳组；3—成都黏土；4—广汉组；5—庐山组；6—名山组；7—大溪砾岩；8—灌口组；9—夹关组；10—天门山组；11—古店组；12—七曲寺组；13—白龙组；14—苍溪组；15—蓬莱镇组；16—莲花口组；17—遂宁组；18—沙溪庙组；19—早震旦世正长花岗岩；20—元古代花岗岩闪长岩；21—晋宁期正长花岗岩；22—晋宁期花岗闪长岩；23—晋宁期二长花岗岩；24—晋宁期英云闪长岩；25—晋宁期闪长岩；26—晋宁期辉长岩；27—晋宁期蛇纹岩

1—Holocene strata; 2—Ziyang Formation; 3—Chengdu clay; 4—Guanghan Formation; 5—Lushan Formation; 6—Mingshan Formation; 7—Daxi conglomerate; 8—Guankou Formation; 9—Jiaguan Formation; 10—Tianshan Formation; 11—Guandian Formation; 12—Qiqusi Formation; 13—Bailong Formation; 14—Cangxi Formation; 15—Penglaizhen Formation; 16—Lianhuakou Formation; 17—Suining Formation; 18—Shaximiao Formation; 19—Early Sinian Syenogranite; 20—Proterozoic Granodiorite; 21—Jinning Syenogranite; 22—Jinning Granodiorite; 23—Jinning Monzogranite; 24—Jinning Tonalite; 25—Jinning Diorite; 26—Jinning Gabbro; 27—Jinning Serpentine

5 模型可靠性分析

由于地质资料、研究方法和地质认识等的不确定性,加上通过算法插值构建的三维地质模型与实际情况本身就存在一定的偏差(刘顺昌等,2021),导致了三维地质模型的不确定性。为了检验成都市三维地质模型的可靠程度,在前人研究的基础上(李毓和杨长青,2009;徐传龙,2014;殷大发,

2018;吴腾飞等,2020),提出基于地质先验知识和静态数据分析三维地质模型可靠程度的方案,具体包括模型地质规律分析、可视化分析和抽稀钻孔数据分析:①地质规律分析是对三维地质模型中地质体界线、展布规律、形态特征以及构造组合样式、错切关系等与综合研究成果进行一致性分析;②可视化分析是对三维地质模型中各类界面与建模数据源的一致性分析;③抽稀钻孔数据分析是抽出一定数

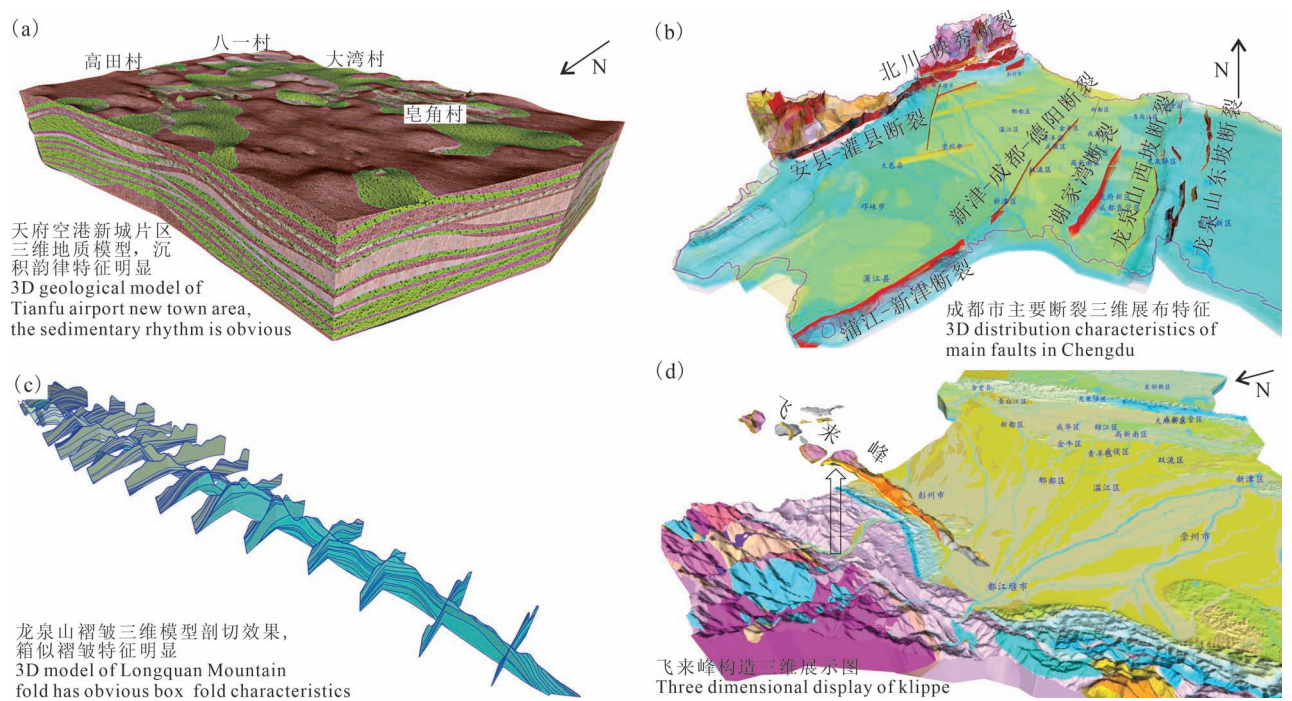


图 7 三维地质模型充分反映地质认识和地质规律

Fig. 7 The 3D geological model fully reflects the geological understanding and geological rule

量的真实钻孔数据不参与建模,在完成模型构建后,利用这些数据与模型进行一致性分析。

5.1 地质规律分析

综合研究在成都市三维地质模型构建过程中具有支撑作用,构建的模型应充分反映已有地质认识并符合地质规律(吴胜和等,2001; Bahar et al. , 2004; 李珊珊,2015; 谭学群等,2019)。通过对比分析表明,成都市三维地质模型表达的地质体展布规律、形态特征、产状变化和地质界面(图 7a),断层类型、断层面产状变化、断层面之间的新老关系和错切关系(图 7b),褶皱类型、轴面形态、两翼地层产状变化(图 7c)以及飞来峰的地质特征(图 7d)等与已有地质认识一致并符合地质规律(刘树根等,2003; 梁斌等,2014; 张威等,2020; 王世明等,2021)。

5.2 可视化分析

通过从三维地质模型中切剖面与参与建模的钻孔数据(图 8a—d)和综合地质剖面图(图 8e、8f)进行对比,二者一致性良好。表 1 根据钻孔数据和区域地质资料统计了成都市不同地层小区地层的厚度和主要岩性特征,须家河组和自流井组仅分布在龙门山地层小区和成都地层小区,须家河组在龙门山地层小区的厚度远大于成都地层小区,而自流井组在两个地层小区的厚度接近;沙溪庙组、遂宁组和

莲花口组在龙门山地层小区、成都地层小区和重庆地层小区均有分布,但三者在不同地层小区的厚度变化特征差异明显,龙门山地层小区沙溪庙组最薄,其他两个地层小区厚度相当,遂宁组在成都地层小区最厚,重庆地层小区次之,龙门山地层小区最薄,而莲花口组整体厚度较大,尤其是在龙门山地层小区厚达 1223 m;下白垩统地层在龙门山地层小区普遍缺失,具西薄东厚的分布特征;夹关组、灌口组和名山组仅分布在龙门山地层小区和成都地层小区,夹关组具西厚东薄的特征,而灌口组和名山组厚度变化特征与之刚好相反,具西薄东厚的特征;重庆地层小区广泛缺失上白垩统和古始新统地层。以上变化规律在成都市三维地质模型中得到了精确的表达(图 6~图 8)。

5.3 抽稀钻孔数据分析

选取未参与模型构建的真实钻孔 551 个,与从模型中对应位置提取的 551 个虚拟钻孔进行对比分析。以真实钻孔为准,分析二者在地层埋深和分层厚度这两个方面的差异,来反映三维模型的精度。由于真实钻孔存在未揭穿某一地质体的可能性,而本次成都市三维地质模型控制深度为-1700 m,显然从三维地质模型中提取的虚拟钻孔深度与真实钻孔深度存在差异,因此真实钻孔与虚拟钻孔的最后

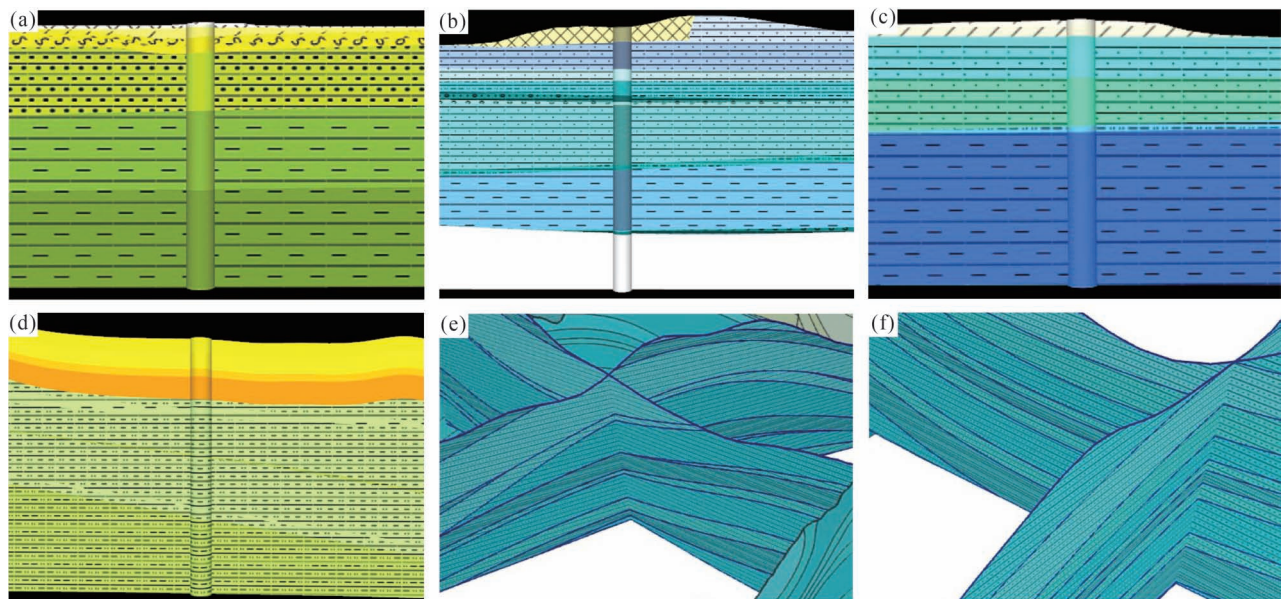


图 8 成都市三维地质模型可靠性对比分析图:(a)锦城广场三维地质模型切剖面与参与建模钻孔分层信息对比;(b)淮州新城三维地质模型切剖面与参与建模钻孔分层信息对比;(c)空港新城三维地质模型切剖面与参与建模钻孔分层信息对比;(d)国际生物城三维地质模型切剖面与参与建模钻孔分层信息对比;(e)—(f)龙泉山地区三维地质模型切剖面与建模数据源对比(蓝线为切剖面分层界线,灰线是综合地质剖面分层界线)

Fig. 8 Comparative analysis of reliability of 3D geological model in Chengdu:(a) Comparison of stratification information between 3D geological model of Jincheng square and borehole involved in the modeling;(b) Comparison of stratification information between 3D geological model of Huazhou new town and borehole involved in the modeling;(c) Comparison of stratification information between 3D geological model of Airport new town and borehole involved in the modeling;(d) Comparison of stratification information between 3D geological model of International biological city and borehole involved in the modeling;(e)—(f) Comparison between 3D geological model and modeling data source in Longquan Mountain Area(blue line is the stratification boundary from 3D geological,gray line is the stratification boundary from comprehensive geological section)

一层,不参与模型数学精度的评价。

5.3.1 地质体埋深评价模型精度

开展同一位置,真实钻孔与虚拟钻孔之间地质体埋深误差对比分析时(图 9),首先计算真实钻孔中某一层的底板埋深与虚拟钻孔对应的底板埋深的误差(式 1),再综合计算整个钻孔的地质体埋深误差作为该钻孔附近三维地质模型的误差(式 2)。

钻孔第 i 层的埋深误差:

$$P_i = |B_{vi} - B_{ri}| \tag{1}$$

式中 P_i 代表虚拟钻孔第 i 层地质体的埋深误差, B_{vi} 代表虚拟钻孔第 i 层地质体的埋深, B_{ri} 代表真实钻孔第 i 层地质体的埋深。

整个钻孔的埋深误差:

$$P = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1} (P_i)^2}{n-1}} \tag{2}$$

式中 P 代表整个虚拟钻孔地质体的埋深误差,

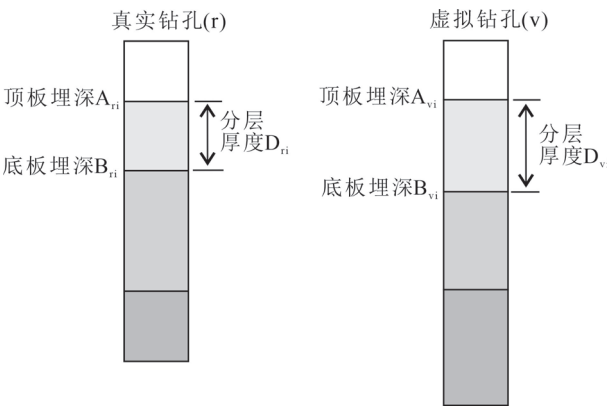


图 9 抽稀钻孔数据对比分析示意图
Fig. 9 Schematic diagram of comparative analysis of borehole data

n 代表参与计算的虚拟钻孔分层总数。

通过上述评价方法统计获得(图 10a),地质体埋深误差小于 5 m 的钻孔数量占 45.37%,误差小

表 2 成都市三维地质模型地质体埋深和分层厚度误差统计表

Table 2 Error statistics of buried depth and layered thickness of 3D geological model in Chengdu

评价因子	计数	极小值	极大值	均值	中位值	标准差	5%截尾均值	10%截尾均值
地质体埋深误差(m)	551	0	89.35	33.15	21.28	25.32	27.26	18.25
分层厚度误差(m)	551	0	67.38	21.37	14.55	13.59	19.63	11.71

注:5%截尾均值指剔除 5%误差较大值之后的平均数;10%截尾均值指剔除 10%误差较大值之后的平均数。

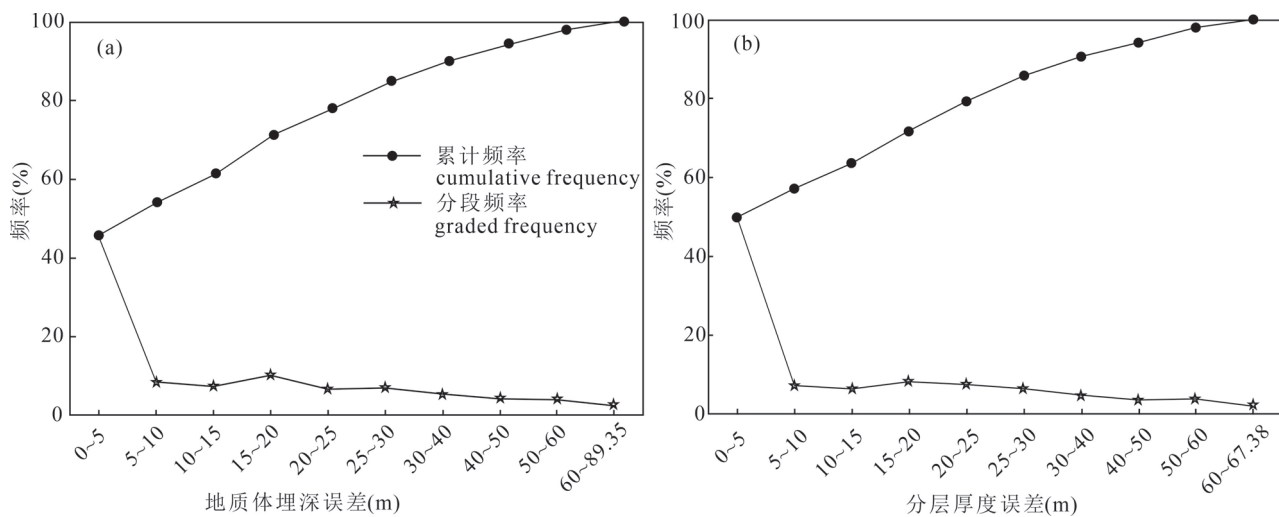


图 10 成都市三维地质模型地质体埋深(a)和分层厚度误差(b)频率统计

Fig. 10 Frequency statistics of buried depth error (a) and layered thickness error (b) of 3D geological model in Chengdu

于 20 m 的钻孔数量占 77.51%。地质体埋深误差统计数据(表 2)显示,地质体埋深误差平均值为 33.15 m,标准差为 25.32 m,剔除 10%误差较大值(误差值为 60~89.35 m)之后的平均数为 18.25 m。

5.3.2 分层厚度评价模型精度

开展同一位置,真实钻孔与虚拟钻孔之间分层厚度误差对比分析时(图 9),同样首先计算真实钻孔中某一层的分层厚度与虚拟钻孔对应的分层厚度的误差(式 3),再综合计算整个钻孔的分层厚度误差作为该钻孔附近三维地质模型的误差(式 4)。

钻孔第 i 层的分层厚度误差为:

$$Q_i = |D_{vi} - D_{ri}| \tag{3}$$

式中 Q_i 代表虚拟钻孔第 i 层的分层厚度误差, D_{vi} 代表虚拟钻孔第 i 层的分层厚度, D_{ri} 代表真实钻孔第 i 层的分层厚度。

整个钻孔的分层厚度误差:

$$Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1} (Q_i)^2}{n-1}} \tag{4}$$

式中 Q 代表整个虚拟钻孔的分层厚度误差, n 代表参与计算的虚拟钻孔分层总数。

通过上述评价方法统计获得(图 10b),分层厚

度误差小于 5 m 的钻孔数量占 50.01%,误差小于 25 m 的钻孔数量占 79.33%。地质体埋深误差统计数据(表 2)显示,地质体埋深误差平均值为 21.37 m,标准差为 13.59 m,剔除 10%误差较大值(误差值为 50~67.38 m)之后的平均数为 11.71 m。

综上所述,成都市三维地质模型全面反映了已有地质认识,且符合地质规律,刻画的地质体埋深误差均值为 33.15 m,分层厚度误差均值为 21.37 m,表明成都市三维地质模型的可靠性较高,可为成都市城市规划和重大工程选址提供重要的基础地质数据支撑。

6 之于国内外读者的借鉴

笔者等从建模数据源准备、建模流程与插值方法选择、三维地质模型构建和可靠性分析 4 个方面详细介绍了基于多源数据和先验知识约束的复杂地质体三维建模方法。该方法构建的三维地质模型符合地质规律和认识,可靠性较高,能够清晰地辅助开展地质分析和研究,对城市规划、重大工程选址,以及找矿预测等都具有重要的数据支撑作用,此外还可以辅助评价资源环境承载能力及国土空间开发适应性。

6.1 多源数据约束,避免模型的多解性

同一地区描述复杂地质体的数据具有多源性,常见的数据包括地质图、地质剖面图、钻孔数据、地质体埋深等值线和厚度等值线、断层数据、物探解译数据等。目前有关三维地质模型构建的方法很多,如基于地质剖面图(张伟等,2013;吴志春等,2016;汪淑平等,2016)、产状推演(文武,2007;杨永乐,2013;赵义来等,2018)、平面地质图和剖面图(王祥浩,2020)、钻孔数据(张天福等,2020;刘成军等,2022)、物探解译数据(祁光等,2012;兰学毅等,2015),但多数是基于单一的数据源开展模型的构建,单一的数据源仅能从某一方面反映地质体地下的二维特征,建模的精度很难保证。为了更加精确的刻画复杂地质体的三维形态特征,本文采用 DEM 数据、数字地质图、综合地质剖面图、钻孔数据、物探解译数据、构造纲要图等多种数据作为建模约束条件,不同数据之间可相互约束和验证,有效避免了三维地质模型的多解性问题。

6.2 先验知识约束,模型更符合地质规律

地质体具有“三非”特性,即非直见性、非参数化和非均质性(何珍文等,2012),有限的地质数据很难对其进行准确的刻画,本文在多源数据约束的基础上,结合地质先验知识构建成都市三维地质模型。通过梳理各类地质资料,开展综合研究,提取有效约束信息,掌握成都市地质情况。主要包括:成都市域范围内不同断裂的性质、活动时限、延伸方向、产状变化、两盘的相对运动方向、对地质体的错切以及不同断裂之间的错切;地层的分区情况,不同地层小区地层的缺失情况,地层的展布形态、产状和厚度变化;褶皱的类型、整体形态特征、两翼产状变化、转折端的形态等地质先验知识。将掌握的地质先验知识,作为有效约束条件,在地质数据有限的情况下,指导地质技术人员构建各类地质结构面,充分发挥地质技术人员在模型构建过程中的主观能动性,准确刻画复杂地质体在三维空间的展布情况,有效实现复杂地质体交互式半自动建模,提高三维地质建模的效率和精准度,使模型更加符合地质规律和地质认识。

另外,随着三维建模技术的发展,可以将更多的地质先验知识进行量化、形式化表达,通过数据输入和建模参数的调整实现地质先验知识的自动整合,显著提高三维自动化建模的精准度,使得构建的三维地质模型更加符合地质规律和地质认识。

7 结论

(1)在多源数据和地质先验知识约束下,采用分块三维地质建模方法构建复杂地质体,可以降低建模难度,提高建模效率,实现模型的无痕拼接,且易于后期模型的修改完善,是未来一段时间复杂地质体三维模型构建的主要研究方向。

(2)本次基于多源数据和先验知识约束,采用分块三维地质建模方法完成了成都市三维地质模型的构建,通过静态数据和地质先验知识的可靠性分析,认为模型的可靠性较高,可为成都市城市规划和重大工程选址提供重要的基础地质数据支撑。

致谢: 本文的撰写得了成都市城市地下空间资源地质调查应用系统开发及数据整合建库项目全体成员的共同支持,尤其是项目负责人尹显科教授级高工在文章撰写过程中给予了大力支持;成文及修改过程中与中国地质大学李红博士和中国地质科学院矿产资源研究所贺文博士进行了有益交流;匿名审稿专家、编委和责任编辑提出了宝贵的意见和建议,使文章得到了进一步提升和完善!在此一并表示感谢。

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)
- 卞小芮,陈永春,苏东,杨磊,张晨晖,陈舟,付业盛. 2021. 海绵城市建设的地质影响及适宜性研究——以常州市为例. 中国煤炭地质, 33(3): 35 ~ 42.
- 陈根深,郭绪磊,刘刚,陶坤燊,陈麒玉,周宏. 2019. 宜昌长江南岸岩溶流域典型区三维地质建模. 安全与环境工程, 26(2): 1 ~ 8.
- 陈国旭,吴冲龙,张夏林,田宜平,刘刚. 2010. 三维地质建模与地矿勘查图件编制一体化方法研究. 地质与勘探, 46(3): 542 ~ 546.
- 陈麒玉,刘刚,何珍文,张夏林,吴冲龙. 2020. 面向地质大数据的结构—属性一体化三维地质建模技术现状与展望. 地质科技通报, 39(4): 51 ~ 58.
- 董攀,潘懋,吴自兴. 2008. 一种改进的自适应蝴蝶细分算法及其在三维地质建模中的应用. 地理与地理信息科学, 24(6): 34 ~ 38.
- 高轩. 2011. 基于大比例尺地形图的城郊道路 DEM 构建研究. 导师: 李云岭和仲伟政. 山东科技大学硕士学位论文.
- 何登发,单帅强,张煜颖,鲁人齐,张锐铭,崔永谦. 2018. 雄安新区的三维地质结构: 来自反射地震资料的约束. 中国科学: 地球科学, 48(9): 1207 ~ 1222.
- 何珍文,吴冲龙,刘刚,田宜平,张夏林,翁正平. 2012. 地质空间认知与多维动态建模结构研究. 地质科技情报, 31(6): 46 ~ 51.
- 侯卫生,吴信才,刘修国,陈国良. 2007. 一种基于平面地质图的复

杂断层三维构建方法. 岩土力学, 28(1): 169 ~ 172.

黄敬军, 姜素, 张丽, 魏永耀, 缪世贤. 2015. 城市规划区资源环境承载力评价指标体系构建——以徐州市为例. 中国人口·资源与环境, 25(S2): 204 ~ 208.

兰学毅, 杜建国, 严加永, 安明, 万秋, 郭冬, 廖梦奇, 王云云, 陶龙, 张启燕, 张莎莎. 2015. 基于先验信息约束的重磁三维交互反演建模技术——以铜陵矿集区为例. 地球物理学报, 58(12): 4436 ~ 4449.

雷传扬, 王静, 谢海洋, 王波, 范敏. 2020. 地质大数据建库存量资料收集与整理方法研究. 国土资源科技管理, 37(4): 70 ~ 80.

李珊珊. 2015. 地质模型质量评价与控制方法研究. 科技视界, (13): 253.

李毓, 杨长青. 2009. 储层地质建模策略及其技术方法应用. 石油天然气学报, 31(3): 30 ~ 35.

李兆亮, 潘懋, 韩大匡, 刘文岭, 胡水清, 刘培刚, 颜玫. 2016. 三维构造建模技术. 地球科学, 41(12): 2136 ~ 2146.

梁斌, 朱兵, 王全伟, 付小芳, 郝雪峰. 2014. 成都平原第四纪地质与环境. 北京: 科学出版社.

刘成军, 刘恒光, 侯卫生, 王典, 陈晓丹, 张华, 陈勇华. 2022. 基于多点统计学的地质体三维重构及其在地铁工程中的应用. 中山大学学报(自然科学版)(中英文), 61(1): 94 ~ 104.

刘树根, 罗志立, 赵锡奎, 徐国盛, 王国芝, 张成江. 2003. 中国西部盆地系统的耦合关系及其动力学模式——以龙门山造山带—川西前陆盆地系统为例. 地质学报, 77(2): 177 ~ 186.

刘顺昌, 李黎, 徐德馨, 曹厚臻. 2021. 复杂地质条件下高精度三维地质建模研究. 人民长江, 52(8): 127 ~ 132.

刘小杨. 2014. 辽宁鞍山—本溪地区深部地质特征及三维地质建模. 导师: 薛林福和方洪宾. 吉林大学博士学位论文.

毛先成, 王琪, 陈进, 邓浩, 刘占坤, 王金利, 陈建平, 肖克炎. 2020. 胶西北金矿集区深部成矿构造三维建模与找矿意义. 地球学报, 41(2): 166 ~ 178.

明镜. 2015. GIS在三维地学建模中的应用现状及思考. 数字技术与应用, (10): 91 ~ 92.

潘懋, 方裕, 屈红刚. 2007. 三维地质建模若干基本问题探讨. 地理与地理信息科学, 23(3): 1 ~ 5.

祁光, 吕庆田, 严加永, 吴明安, 邓震, 郭冬, 邵陆森, 陈应军, 梁锋, 张舒. 2014. 基于先验信息约束的三维地质建模: 以庐枞矿集区为例. 地质学报, 88(4): 466 ~ 477.

祁光, 吕庆田, 严加永, 吴明安, 刘彦. 2012. 先验地质信息约束下的三维重磁反演建模研究——以安徽泥河铁矿为例. 地球物理学报, 55(12): 4194 ~ 4206.

冉祥金. 2020. 区域三维地质建模方法与建模系统研究. 导师: 薛林福. 吉林大学博士学位论文.

谭学群, 刘云燕, 周晓舟, 刘建党, 郑荣臣, 贾超. 2019. 复杂断块油藏三维地质模型多参数定量评价. 石油勘探与开发, 46(1): 185 ~ 194.

唐丙寅, 吴冲龙, 李新川. 2017. 一种基于TINCPG混合空间数据模型的精细三维地质模型构建方法. 岩土力学, 38(4): 1218 ~ 1225.

田宜平, 袁艳斌, 李绍虎, 吴冲龙. 2000. 建立盆地三维构造—地层格架的插值方法. 地球科学, 25(2): 191 ~ 194.

万波, 尹芮芮, 左泽均, 王润, 吴信才. 2016. 一种基于三角网的地质体三维模型切割方法. 地球科学, 41(11): 1966 ~ 1976.

汪淑平, 王伟, 孙黎明, 马志豪. 2016. 基于地质剖面数据的含断层地质体三维建模方法. 测绘地理信息, 41(3): 59 ~ 63.

王波, 雷传扬, 刘兆鑫, 范敏, 王兴强, 叶凡忠, 张莹. 2021. 三维地质建模过程中综合地质剖面构建方法研究. 沉积与特提斯地质, 41(1): 112 ~ 120.

王世明, 张明, 林刚, 吴腾飞, 宋同伟, 裴秋明, 巫锡勇. 2021. 成都市中心城区第四系三维地质模型构建与隐伏断裂分析. 地质学报, 95(8): 2601 ~ 2612.

王祥浩. 2020. 基于平面地质图和剖面图的地质体三维建模研究. 导师: 刘星. 安徽理工大学硕士学位论文.

王长海, 周晓琴, 许国, 陈碧宇. 2014. 基于离散光滑理论的高精度三维模型构建方法. 武汉大学学报(工学版), 47(5): 604 ~ 609.

文武. 2007. 基于产状推演的地质建模方法与软件实现. 导师: 黄地龙. 成都理工大学硕士学位论文.

吴冲龙, 张洪年, 周江羽. 1993. 盆地模拟的系统观与方法论. 地球科学, 18(6): 741 ~ 747.

吴胜和, 张一伟, 李恕军, 吴志宇, Jan E R. 2001. 提高储层随机建模精度的地质约束原则. 石油大学学报(自然科学版), 25(1): 55 ~ 58.

吴腾飞, 王世明, 李豪, 林刚, 宋同伟. 2020. 成都中心城区砂卵石层三维建模及分布规律研究. 地下空间与工程学报, 16(6): 1746 ~ 1753.

吴信才, 童恒建. 2004. 3维地理信息系统数据模型的设计. 计算机工程, 30(6): 93 ~ 95.

吴志春, 郭福生, 姜勇彪, 罗建群, 侯曼青. 2016. 基于地质剖面构建三维地质模型的方法研究. 地质与勘探, 52(2): 363 ~ 375.

熊祖强, 贺怀建, 夏艳华. 2007. 基于TIN的三维地层建模及可视化技术研究. 岩土力学, 28(9): 1954 ~ 1958.

徐传龙. 2014. 三维地质建模质量控制方法及应用. 辽宁化工, 43(8): 1082 ~ 1085.

颜慧敏. 2005. 空间插值技术的开发与实现. 导师: 陈伟. 西南石油学院硕士学位论文.

杨鹏程, 文卫兵, 王彦兵, 程津, 涂新斌, 李思达. 2021. 基于遗传—克里金插值算法的岩土勘探工程三维地质建模. 湘潭大学学报(自然科学版), 43(4): 85 ~ 92.

杨永乐. 2013. 基于产状数据的地层曲面模拟. 导师: 龚灏和周仲礼. 成都理工大学硕士学位论文.

殷大发. 2018. 煤矿三维地质模型精度评价及动态更新技术探讨. 煤矿开采, 23(4): 20 ~ 24.

张家声, 李燕, 韩竹均. 2003. 青藏高原向东挤出的变形响应及南北地震带构造组成. 地学前缘, 10(S1): 168 ~ 175.

张明明, 李晓晖, 袁峰, 胡训宇, 王兴会. 2015. 地层三维建模及面模型插值方法对比研究. 安徽地质, 25(3): 182 ~ 186.

张天福, 张云, 程先钰, 孙立新, 程银行, 周小希, 王少铁, 马海林, 鲁超. 2020. 鄂尔多斯盆地北部东胜地区侏罗系—白垩系钻孔数据库与三维地质模型. 中国地质, 47(S1): 220 ~ 245.

张威, 周荣军, 何玉林, 刘韶, 马超. 2020. 龙泉山西麓山前断裂浅部构造特征及活动性. 大地测量与地球动力学, 40(9): 942 ~ 946.

张伟, 薛林福, 彭冲, 柴源, 成伟. 2013. 基于剖面三维地质建模方法及在本溪地区应用. 地质与资源, 22(5): 403 ~ 408.

张夏林, 吴冲龙, 翁正平, 李章林, 綦广, 陈国旭, 田宜平. 2010. 数字矿山软件(QuantyMine)若干关键技术的研发和应用. 地球科学, 35(2): 302 ~ 310.

张夏林, 吴冲龙, 周琦, 翁正平, 袁良军, 朱福康, 李章林, 张志庭, 杨炳南, 赵亚涛. 2020. 贵州超大型锰矿集区的多尺度三维地质建模. 地球科学, 45(2): 634 ~ 644.

张忠贵, 吴信才. 2015. 一种通用的网络时空数据模型. 计算机应用与软件, 32(9): 84 ~ 87.

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.

- 朱发华, 贺怀建. 2010. 复杂地层建模与三维可视化. 岩土力学, 31(6): 1919 ~ 1922.
- 朱良峰, 陈国良, 吴信才, 刘修国. 2007. 基于线框架模型的三维地质断层结构模型及其构建技术. 地学前缘, 14(2): 276 ~ 282.
- 朱良峰, 吴信才, 刘修国, 尚建嘎. 2004. 基于钻孔数据的三维地层模型的构建. 地理与地理信息科学, 20(3): 26 ~ 30.
- 朱良峰, 吴信才, 潘信. 2006. 三维地层模型误差修正机制及其实现技术. 岩土力学, 27(2): 268 ~ 271.
- 朱良峰, 吴信才, 潘信. 2009. 三维地质结构模型精度评估理论与误差修正方法研究. 地学前缘, 16(4): 363 ~ 371.
- Bahar A, Abdel-Aal O, Ghani A, Silva F P, Kelkar M. 2004. Seismic integration for better modeling of rock type based reservoir characterization: A field case example[R]. SPE-88793-MS.
- Bian Xiaorui, Chen Yongchun, Su Dong, Yang Lei, Zhang Chenhui, Chenzhou, Fu Yesheng. 2021&. Study on geological impact and suitability in sponge city construction—a case study of Changzhou city. Coal Geology of China, 33(3): 35 ~ 42.
- Bistacchi A, Balsamo F, Storti F, Mozafari M, Swennen R, Solum J, Tueckmantel C, Taberner, C. 2015. Photogrammetric digital outcrop reconstruction, visualization with textured surfaces, and three-dimensional structural analysis and modeling: innovative methodologies applied to fault-related dolomitization (vajont limestone, southern alps, Italy). Geosphere, 11(6): 2031 ~ 2048.
- Caumon G, Collon-Drouaillet P, Le Carlier de Veslud C, Viseur S, Sausse J. 2009. Surface-based 3D modeling of geological structures. Mathematical Geosciences, 41(8): 927 ~ 945.
- Chen Genshen, Guo Xulei, Liu Gang, Tao Kunyu, Chen Qiyu, Zhou Hong. 2019&. 3D geological modeling in typical area of karst basin on the south bank of the Yangtze River in Yichang city. Safety and Environmental Engineering, 26(2): 1 ~ 8.
- Chen Guoxu, Wu Chonglong, Zhang Xialin, Tian Yiping, Liu Gang. 2010&. Study on integration of 3D geological modeling and mineral resource exploration mapping. Geology and Prospecting, 46(3): 542 ~ 546.
- Chen Qiyu, Liu Gang, He Zhenwen, Zhang Xialin, Wu Chonglong. 2020&. Current situation and prospect of structure attribute integrated 3D geological modeling technology for geological big data. Bulletin of Geological Science and Technology, 39(4): 51 ~ 58.
- Dong Pan, Pan Mao, Wu Zixing. 2008&. A kind of new adaptive refinement scheme based on modified butterfly subdivision method and its application on 3d geological models. Geography and Geo-information Science, 24(6): 34 ~ 38.
- Gao Xuan. 2011&. Research on creating dem of suburban roads based on large scale digital map. Supervisor: Li Yunling and Zhong Weizheng. Master degree of Shandong University of science and technology.
- Hao Ming, Li Minghui, Zhang Jianlong, Liu Yujie, Huang Congjun, Zhou Fang. 2021. Research on 3D geological modeling method based on multiple constraints: A case study of Huaying Mountain Kangyangju in Guang'an City. Earth Science Informatics, 14: 291 ~ 297.
- Hao Ming, Wang Donghui, Deng Chao, He Zhengwei, Zhang Jianlong, Xue Dongjian, Ling Xiaoming. 2019. 3D geological modeling and visualization of above-ground and underground integration—taking the Unicorn Island in Tianfu new area as an example. Earth Science Informatics, 12: 465 ~ 474.
- He Dengfa, Dan Shuaiqiang, Zhang Yuying, Lu Renqi, Zhang Ruifeng, Cui Yongqian. 2018#. Three-dimensional geological structure of Xiong'an New District: Constraints from reflected seismic data. Scientia Sinica(Terrae), 48(9): 1207 ~ 1222.
- He Zhenwen, Wu Chonglong, Liu Gang, Tian Yiping, Zhang Xialin, Weng Zhengping. 2012&. Cognition and dynamic modeling architecture of geological space. Geological Science and Technology Information, 31(6): 46 ~ 51.
- Hou Weisheng, Wu Xincan, Liu Xiuguo, Chen Guoliang. 2007&. A complex fault modeling method based on geological plane map. Rock and Soil Mechanics, 28(1): 169 ~ 172.
- Huang Jingjun, Jiang Su, Zhang Li, Wei Yongyao, Miu Shixian. 2015&. Establishment of evaluation index system of resource environmental carrying capacity in urban planning area: Take Xuzhou as an example. China Population, Resources and Environment, 25(S2): 204 ~ 208.
- Jessell M, Ailleres L, Kemp E D, Lindsay M, Wellmann F, Hillier M, Laurent G, Carmichael T, Martin R. 2016. Next generation three-dimensional geologic modeling and inversion. Society of Economic Geologists, Special Publication, 18: 262 ~ 271.
- Lan Xueyi, Du Jianguo, Yan Jiayong, An Ming, Wan Qiu, Guo Dong, Liao Mengqi, Wang Yunyun, Tao Long, Zhang Qiyang, Zhang Shasha. 2015&. 3D gravity and magnetic interactive inversion modeling based on prior information: A case study of the Tongling ore concentration area. Chinese Journal of Geophysics, 58(12): 4436 ~ 4449.
- Lei Chuanyang, Wang Jing, Xie Haiyang, Wang Bo, Fan Min. 2020&. Research on the method of the collection and sorting out the stocking data of the construction of geological big database. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 37(4): 70 ~ 80.
- Lemon A M, Jones N L. 2003. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections. Computers & Geosciences, 29(5): 547 ~ 555.
- Li Shanshan. 2015&. Study on quality evaluation and control method of geological model. Science and Technology Vision, (13): 253.
- Li Yu, Yang Zhangqing. 2009&. Strategy of reservoir geological modeling and application of technical method. Journal of Oil and Gas Technology, 31(3): 30 ~ 35.
- Li Zhaoliang, Pan Mao, Han Dakuang, Liu Wenling, Hu Shuiqing, Liu Peigang, Yan Mei. 2016&. Three-dimensional structural modeling technique. Earth Science, 41(12): 2136 ~ 2146.
- Liang Bin, Zhu Bing, Wang Quanwei, Fu Xiaofang, Hao Xuefeng. 2014&. Quaternary geology and environment of Chengdu Plain. Beijing: Science Press.
- Liu Chengjun, Liu Hengguang, Hou Weisheng, Wang Dian, Chen Xiaodan, Zhang Hua, Chen Yonghua. 2022&. 3D geological reconstruction with multiple-point statistics and its application in metro station engineering. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 61(1): 94 ~ 104.
- Liu Shugen, Luo Zhili, Zhao Xikui, Xu Guosheng, Wang Guozhi, Zhang Chengjiang. 2003&. Coupling relationships of sedimentary basin—orogenic belt systems and their dynamic models in West China—A case study of the Longmenshan Orogenic Belt—West Sichuan Foreland Basin System. Acta Geologica Sinica, 77(2): 177 ~ 186.
- Liu Shunchang, Li Li, Xu Dexin, Cao Houzhen. 2021&. High-precision 3D geological modeling under complex geological conditions. Yangtze River, 52(8): 127 ~ 132.

- Liu Xiaoyang. 2014&. The Deep Geological characteristics and 3D geological modeling in Anshan—Benxi area, Liaoning province. Supervisor: Xue Linfu and Fang Hongbin. Doctoral Dissertation of Jilin University.
- Mallet J L. 2002. Geomodelling. Oxford: Oxford University Press.
- Mao Xiancheng, Wang Qi, Chen Jin, Deng Hao, Liu Zhankun, Wang Jinli, Chen Jianping, Xiao Keyan. 2020&. Three-dimensional modeling of deep metallogenic structure in Northwestern Jiaodong peninsula and its gold prospecting significance. *Acta Geoscientia Sinica*, 41(2): 166 ~ 178.
- Ming Jing. 2015#. Application status and thinking of GIS in 3D geoscience modeling. *Digital Technology and Application*, (10): 91 ~ 92.
- Pan Mao, Fang Yu, Qu Honggang. 2007&. Discussion on several foundational issues in three-dimensional geological modeling. *Geography and Geo-information Science*, 23(3): 1 ~ 5.
- Qi Guang, Lü Qingtian, Yan Jiayong, Wu Mingan, Deng Zhen, Guo Dong, Shao Lusen, Chen Yingjun, Liang Feng, Zhang Shu. 2014&. 3D geological modeling of Luzong ore district based on priori information constrained. *Acta Geologica Sinica*, 88(4): 466 ~ 477.
- Qi Guang, Lü Qingtian, Yan Jiayong, Wu Mingan, Liu Yan. 2012&. Geologic constrained 3D gravity and magnetic modeling of Nihe deposit—A case study. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(12): 4194 ~ 4206.
- Ran Xiangjin. 2020&. The research of method and system of regional three-dimensional geological modeling. Supervisor: Xue Linfu. Doctoral Dissertation of Jilin University.
- Song Renbo, Qin Xiaoqian, Tao Yeqing, Wang Xiyuan, Yin Biao, Wang Yuexiang, Li Wenhui. 2019. A semi-automatic method for 3D modeling and visualizing complex geological bodies. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78: 1371 ~ 1383.
- Tan Xuequn, Liu Yunyan, Zhou Xiaozhou, Liu Jiandang, Zheng Rongchen, Jia Chao. 2019&. Multi-parameter quantitative assessment of 3D geological models for complex fault-block oil reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, 46(1): 185 ~ 194.
- Tang Bingyin, Wu Chonglong, Li Xinchuan. 2017&. A fine 3D geological modeling method based on TIN—CPG hybrid spatial data model. *Rock and Soil Mechanics*, 38(4): 1218 ~ 1225.
- Tian Yiping, Yuan Yanbin, Li Shaohu, Wu Chonglong. 2000&. Interpolation method for establishing 3-D tectonic—stratigraphic basin framework. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(2): 191 ~ 194.
- Turner A K. 2006. Challenges and trends for geological modelling and visualisation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(2): 109 ~ 127.
- Wan Bo, Yin Ruirui, Zuo Zejun, Wang Run, Wu Xincui. 2016&. 3D Geological Model Intersection Algorithm Based on Triangular Mesh. *Earth Science*, 41(11): 1966 ~ 1976.
- Wang Bo, Lei Chuanyang, Liu Zhaoxin, Fan Min, Wang Xingqiang, Ye Fanzhong, Zhang Kun. 2021&. A geological 3D modeling method of comprehensive geological section for Chengdu. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 41(1): 112 ~ 120.
- Wang Shiming, Zhang Ming, Lin Gang, Wu Tengfei, Song Tongwei, Pei Qiuming, Wu Xiyong. 2021&. Construction of Quaternary 3D geological model and analysis of buried faults in the urban area of Chengdu. *Acta Geologica Sinica*, 95(8): 2601 ~ 2612.
- Wang Shuping, Wang Wei, Sun Liming, Ma Zhihao. 2016&. 3D Modeling Method of Geological Faults Based on Section Map. *Journal of Geomatics*, 41(3): 59 ~ 63.
- Wang Xianghao. 2020&. Study on 3D modeling of geological body based on plane geological map and geological section map. Supervisor: Liu Xing. Master degree of Anhui University of Technology.
- Wang Zhangang, Qu Honggang, Wu Zixing, Yang Hongjun, Du Qunle. 2016. Formal representation of 3D structural geological models. *Computers and Geosciences*, 90: 10 ~ 23.
- Wang Zhanghai, Zhou Xiaoqin, Xu Guo, Chen Biyu. 2014&. A high-precision 3D modeling method based on discrete smooth construction theory. *Engineering Journal of Wuhan University*, 47(5): 604 ~ 609.
- Wen Wu. 2007&. Based on the occurrence inferred geological modeling method and software implementation. Supervisor: Huang Dilong. Master degree of Chengdu University of Technology.
- Wu Chonglong, Zhang Hongnian, Zhou Jiangyu. 1993&. On theoretical problems in basin modelling. *Earth Science*, 18(6): 741 ~ 747.
- Wu Shenghe, Zhang Yiwei, Li Shujun, Wu Zh Yu, Jan E R. 2001&. Geological constraint principles in reservoir stochastic modeling. *Journal of the University of Petroleum, China*, 25(1): 55 ~ 58.
- Wu Tengfei, Wang Shiming, Li Hao, Lin Gang, Song Tongwei. 2020&. 3D modeling and exploring the spatial distribution of the sand—pebble layer in the central Chengdu, Sichuan Province. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 16(6): 1746 ~ 1753.
- Wu Xincui, Tong Hengjian. 2004&. Design of 3D GIS data model. *Computer Engineering*, 30(6): 93 ~ 95.
- Wu Zhichun, Guo Fusheng, Jiang Yongbiao, Luo Jianqun, Hou Manqing. 2016&. Methods of three-dimension geological modeling based on geological sections. *Geology and Prospecting*, 52(2): 363 ~ 375.
- Xiong Zuqiang, He Huaijian, Xia Yanhua. 2007&. Study on technology of 3D stratum modeling and visualization based on TIN. *Rock and Soil Mechanics*, 28(9): 1954 ~ 1958.
- Xu Chuanlong. 2014&. QC methods and application of 3D geological modeling. *Liaoning Chemical Industry*, 43(8): 1082 ~ 1085.
- Yan Huimin. 2005&. Development and implementation of spatial interpolation technology. Supervisor: Chen Wei. Master degree of Southwest Petroleum Institute.
- Yang Pengcheng, Wen Weibing, Wang Yanbing, Cheng Jin, Tu Xinbin, Li Sida. 2021&. Three-dimensional geological modeling of geotechnical exploration engineering based on genetic—Kriging interpolation algorithm. *Journal of Xiangtan University (Natural Science Edition)*, 43(4): 85 ~ 92.
- Yang Yongle. 2013&. Based on occurrence data of ground surface simulation. Supervisor: Gong Hao and Zhou Zhongli. Master degree of Chengdu University of Technology.
- Yin Dafa. 2018&. Exploration of precision evaluation and dynamic update technology of coal mine 3D geological model. *Coal Mining Technology*, 23(4): 20 ~ 24.
- Zhang Jiasheng, Li Yan, Han Zhujun. 2003&. Deformation responses to eastwards escaping of the Qinghai—Tibet plateau and tectonics of the south—north seismic zones in China. *Earth Science Frontiers*, 10(S1): 168 ~ 175.
- Zhang Mingming, Li Xiaohui, Yuanfeng, Hu Xunyu, Wang Xinghui. 2015&. Comparative study between three-dimensional strata modeling and surface model interpolation. *Geology of Anhui*, 25

- (3): 182 ~ 186.
- Zhang Tianfu, Zhang Yun, Cheng Xianyu, Sun Lixin, Cheng Yinhang, Zhou Xiaoxi, Wang Shaoyi, Ma Hailin, Lu Chao. 2020&. Borehole databases and 3d geological model of Jurassic—Cretaceous strata in Dongsheng area, north Odors basin. *Geology in China*, 47(S1): 220 ~ 245.
- Zhang Wei, Xue Linfu, Peng Chong, Chai Yuan, Cheng Wei. 2013&. The 3d modeling method based on profiles and its application in Benxi, Liaoning province. *Geology and Resources*, 22(5): 403 ~ 408.
- Zhang Wei, Zhou Rongjun, He Yulin, Liu Shao, Ma Chao. 2020&. Characteristic of Shallow Structure and Fault Activity in Western Piedmont of Longquanshan. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 40(9): 942 ~ 946.
- Zhang Xialin, Wu Chonglong, Weng Zhengping, Li Zhanglin, Qi Guang, Chen Guoxu, Tian Yiping. 2010&. Research and application of the digital mine software QuanyMine. *Earth Science*, 35(2): 302 ~ 310.
- Zhang Xialin, Wu Chonglong, Zhou Qi, Weng Zhengping, Yuan Liangjun, Zhu Fukang, Li Zhanglin, Zhang Zhiting, Yang Bingnan, Zhao Yatao. 2020&. Multi-scale 3D modeling and visualization of super large manganese ore gathering area in Guizhou China. *Earth Science*, 45(2): 634 ~ 644.
- Zhang Zhonggui, Wu Xincui. 2015&. A general network spatiotemporal data model. *Computer Applications and Software*, 32(9): 84 ~ 87.
- 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.
- Zhu Fahua, He Huaijian. 2010&. Complex strata modeling and 3D visualization. *Rock and Soil Mechanics*, 31(6): 1919 ~ 1922.
- Zhu Liangfeng, Chen Guoliang, Wu Xincui, Liu Xiuguo. 2007&. 3-D geological fault model and its construction based on wire-frame model. *Earth Science Frontiers*, 14(2): 276 ~ 282.
- Zhu Liangfeng, Wu Xincui, Liu Xiuguo, Shang Jianga. 2004&. Reconstruction of 3D strata model based on borehole data. *Geography and Geo-information Science*, 20(3): 26 ~ 30.
- Zhu Liangfeng, Wu Xincui, Pan Xin. 2006&. Mechanism and implementation of error correction for 3D strata model. *Rock and Soil Mechanics*, 27(2): 268 ~ 271.
- Zhu Liangfeng, Wu Xincui, Pan Xin. 2009&. Theory of accuracy assessment and methods for error correction in 3D geological structure models. *Earth Science Frontiers*, 16(4): 363 ~ 371.

Research on 3D geological modeling of complex geological body based on multi-source data and prior geological knowledge

LEI Chuanyang^{1, 2)}, LIU Zhaoxin¹⁾, WEN Hui¹⁾, FAN Min¹⁾, JIANG Huabiao¹⁾,
WANG Bo¹⁾, Ma Guoxi³⁾, XIE Haiyang⁴⁾, TAO Haijiang³⁾, HAO Jinbo⁵⁾

1) *Evaluation and Utilization of Strategic Rare Metals and Rare Earth Resource Key Laboratory of Sichuan Province Geological Survey, Chengdu, 610081;*

2) *405 Geological Brigade of Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources, Dujiangyan, Sichuan, 611830*

3) *Wuhan Zondy Cyber Science & Technology Co., Ltd, Wuhan, 430073;*

4) *109 Geological Brigade of Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources, Chengdu, 610100;*

5) *Chengdu Institute of Geo-environment Monitoring, Chengdu, 610042*

Objectives: Visualization of the three-dimensional geological model for the underground geological conditions is of great significance to the transformation and upgrading of the traditional geology and mineral industry, urban planning and construction. For constructing a 3D model under complex geological conditions, a 3D geological modeling method based on multi-source data and geological prior knowledge constraints is used in this paper.

Methods: Taking Chengdu as an example, we applied a 3D geological modeling module of the MapGIS10.0 to build the 3D geological model through integrating all the complex geological information concerning the DEM data, digital geological map, comprehensive geological profile, borehole data, geophysical interpretation data, structural outline map, as well as geological prior knowledge such as geological body distribution form, attitude and thickness change, fault characteristic, extension direction, attitude change, staggered cutting of geological body, fold type, morphological characteristics, attitude change of two wings etc. This paper explicates the detailed model building process including the preparation of 3D modeling data source of complex geological body, modeling process and method, model construction and reliability analysis.

Results: We proposed that the block modeling technology can effectively reduce the difficulties of building a three-dimensional model of a complex geological body, improve the modeling efficiency, and realize the traceless splicing of the model, while it would be easier to modify and improve the model at a later stage. Based on the

constraints of multi-source data and geological prior knowledge, the block modeling technology is first used to construct the three-dimensional geological model of Chengdu.

Conclusions: We examined the dependability of the model through geological prior knowledge (geological rule) and static data (visualization and real sparse drilling data which does not participate in the modeling) to calculate the error of the buried depth and layered thickness of the geological body in the three-dimensional geological model. Finally, it shows that the average error of the buried depth of the geological body is 33. 15 m and the average error of the layered thickness is 21. 37 m, which suggests that the model has high reliability and can provide important basic geological data support for Chengdu urban planning and major project site selection.

Keywords: multi-source data; prior geological knowledge; complex geological body; block modeling; 3D geological modeling

Acknowledgements: This study was supported by the project of Chengdu municipal bureau of planning and natural resources (No: 5101012018002703), Yangshan gold mine resources base comprehensive investigation project in Wenxian County, Gansu Province (No: ZD20220310)

First author: LEI Chuanyang, male, born in 1985, doctor, senior engineer, engages in the investigation and research of ecological geology, urban geology, and regional geology; Email: lcy850610@ 126. com

Manuscript received on: 2022-02-04; Accepted on: 2022-06-06; Network published on: 2022-06-20
Doi: 10. 16509/j. georeview. 2022. 06. 141 **Edited by:** LIU Zhiqiang

