

# 固体勘查开发信息系统与三维地质建模在福泉大湾超大型磷矿勘查中的应用

魏世鹏, 宋普洪, 陆跃荣, 刘波, 陈峰

(贵州省地质矿产勘查开发局 104 地质大队, 贵州 都匀 558000)

**[摘要]**随着矿区浅部矿的日益减少,深部找矿越来越受到重视,三维地质建模技术在成矿预测、资源定量评价等方面得到了广泛的应用。本文以黔中磷矿矿集区超大型矿床“大湾磷矿”为例,利用 QuanyPES 三维建模软件基于地质大数据的特征和结构分析的基础上,通过对地质图、钻孔和采样点的地层、岩性、构造、品位等数据的收集、分析和提取,构建了福泉大湾超大型磷矿床高精度三维地质模型。该模型汇聚了海量的空间数据和属性数据,不但可以直观反映矿床和矿体特征,而且为矿山建设管理和外围找矿预测提供可视化工具。

**[关键词]**三维地质模型;超大型磷矿;深部找矿

**[中图分类号]**P619.21\*3;P623.6 **[文献标识码]**A **[文章编号]**1000-5943(2022)01-0072-08

## 1 引言

数字矿产勘查是地质信息科学理论和方法论框架下,运用集成化的地质信息技术,建立完善的数据资源体系,使数据流转顺畅充分共享,进而打通勘查、设计、开采、选冶和管理、决策等各个环节,为实现探采一体化和智能化奠定基础(吴冲龙等,2021.)。

近十几年来,随着矿产传统行业领域对先进的研究方法和计算机技术的不断应用,地质大数据与人工智能的时代已经到来(周永章,2021)。人工智能和云服务技术将会逐步应用与智能化的地质数据采集,甚至可能成为野外地质数据采集的主流技术(陈根生等,2019)。长期以来在勘查和矿山单位,海量的地质资料多以文本、图形、图像等方式以碎片化的状态堆积着(张夏林,2020)。地质学本质上是一种三维科学(Diepolder G W,2011),但地质数据具有混合、采样、稀缺、多源、多形、时空、多变、因果、相关、定向、局域性、代表性、独立性、加和性等特征(赵鹏大等,2021.),今信息化程度的不断推

进,这种大量信息堆积而知识缺乏的“信息孤岛”的状态愈发明显。随着计算机技术的不断发展,涌现出越来越多的地质类应用软件,这极大提高了勘查的精度和找矿的效率,丰富着地质成果的表现性和服务方式,其中开展精细化三维地质建模可以让地质技术人员更加直观理解复杂构造关系,提高分析判断能力。国产软件“固体勘查开发信息系统”(简称 QuanyPES)孕育而生,与其他地质类软件相比,QuanyPES 能更加快速、更加精确的实现矿区三维地质建模,为矿产资源勘查、资源预测、矿产资源设计、规划、建设和开采的辅助决策提供了快速的直观反映。能将虚拟的现实和现实的现实完全融为一体,在地理信息和地质信息方面做到真正意义上的“所见及所得”。克服常规地理信息系统上的抽象。

## 2 地质背景

### 2.1 区域地质

大湾矿区位于上扬子陆块上扬子地块黔北隆

**[收稿日期]**2021-09-30 **[修回日期]**2021-12-09

**[作者简介]**魏世鹏(1993—),男,助理工程师。从事矿产勘查工作。邮箱:weishipeng0019@sina.com。

起区(王剑等,2012;Zhu et al,2007;刘静江等,2015)之风冈南北向隔槽式褶皱变形区内(图 1)。区内构造样式以隔槽式褶皱为主,具典型的侏罗山式褶皱组合特点;具有近南北向的构造线特征,同时也控制了含磷岩系的展布方向和磷矿体赋存的空间位置。区内出露最老地层为青白口系下江时期清水江组,出露于白岩-高坪复背斜之核部;

背斜出露的最新地层是中三叠统,区内出露地层由老至新依次是:青白口系、南华系、震旦系、寒武系、石炭系、二叠系及下-中三叠系。第四系仅零星分布,不整合覆于前述各地层之上。缺失奥陶纪、志留纪、泥盆纪时期的沉积。其含磷岩系主要为陡山沱组第四段( $Z_1d^4$ )和陡山沱组第二段( $Z_1d^2$ )。

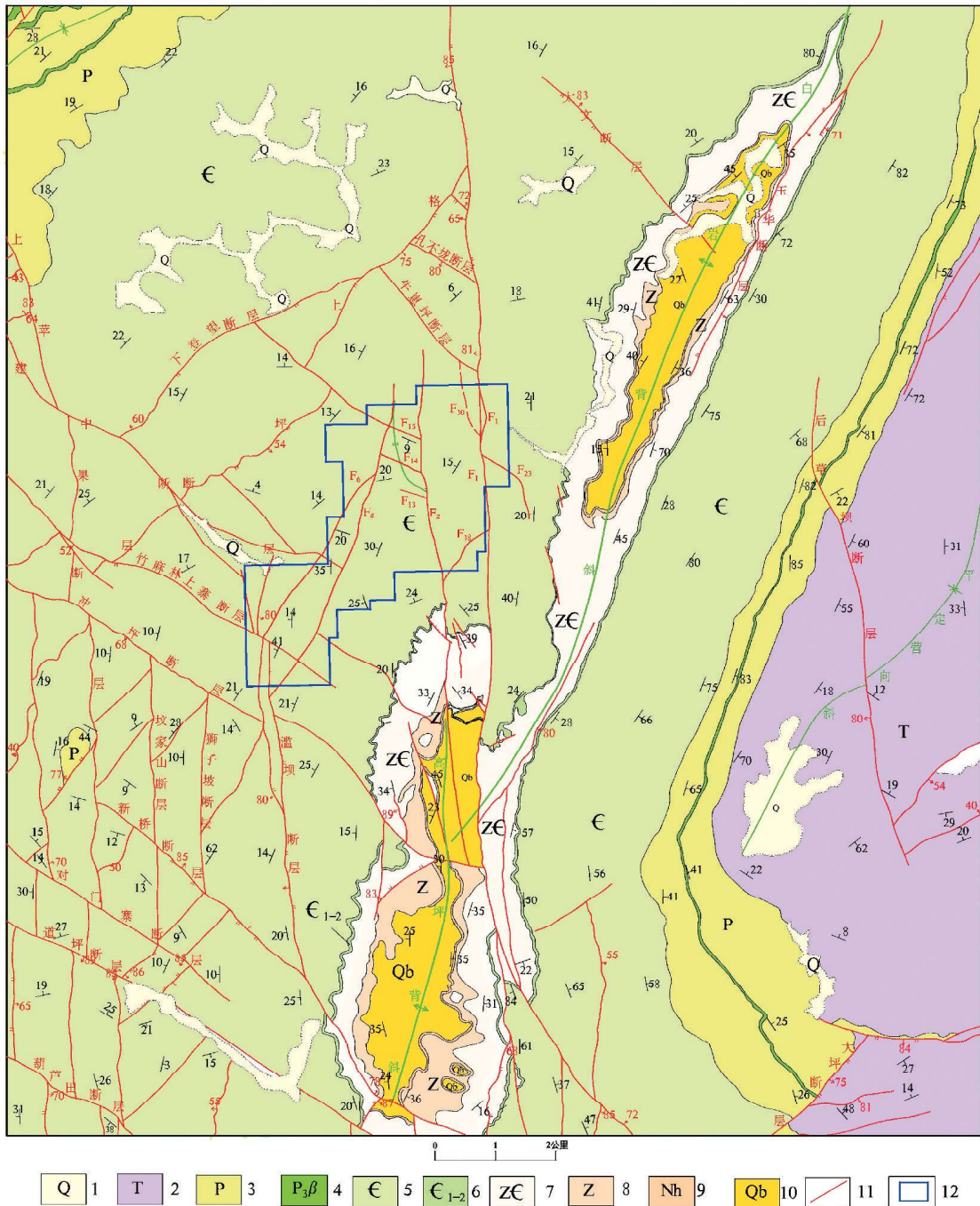


图 1 大地构造位置图

Fig. 1 Geotectonic location map

1—第四系;2—三叠系;3—二叠系;4—峨眉山玄武岩;5—寒武系;6—寒武系第一至二统;7—震旦至寒武系;8—震旦系;9—南华系;10—青白口系;11—断层;12—矿区

### 2.2 矿区地质

矿区含矿产层位为震旦系下统陡山沱组,分为四段由一套台地相磷块岩、砾岩、白云岩、硅质岩和粘土岩组成的含磷岩组,厚 5.46~68.29 m。与下伏南沱组呈假整合接触。矿区有两层矿体,沿用相邻矿区俗称“a、b”矿层。①陡山沱组第一段( $Z_1d^1$ ):为灰色白云岩,灰、深灰、灰绿色泥质粉砂岩或粉砂质泥岩,灰、浅肉红色白云岩、含砾白云岩(底砾岩),砾石成份以板岩、变余凝灰质粉砂岩为主,磨圆度较好,砾径 0.5~5 cm,为基底式胶结,胶结物为白云质。厚 1.30~36.52 m。②陡山沱组第二段( $Z_1d^2$ ):为 a 矿层产出层位,主要为灰、深灰、灰黑色条纹状、条带状磷块岩,炭泥质磷块岩次之,亦见致密状、砂屑状、角砾状及硅质磷块岩,厚度不稳定,③陡山沱组第三段( $Z_1d^3$ ):为灰、灰白色中厚层白云岩、硅质白云岩、硅质岩,偶含角砾状白云岩或磷块岩团块、条带。厚 2.14~33.80 m。④陡山沱组第四段( $Z_1d^4$ ):即 b 矿层,以灰、深灰色中厚层致密状磷块岩为主,亦有条带状、砂屑状、团块状、角砾状磷块岩,局部夹炭泥质、硅质磷块岩,厚度不稳定。

区内地表最显著的构造线总体走向主要为 SN、NW、NE 三组,SN 组断层发育于矿区中部和西部,中部断层规模较大,对矿区矿体破坏作业较

大,西部断层规模相对较小,多被 NE 断层切割。NW 向断层主要发育于图区南西部,少部分发育于图区北部,NW 向断层多切割 NE 向和近 SN 向断层,该组断层为本区发育较晚断层。NE 向组断层主要发育于图区西部,少量发育于图区的北东部和南西部,NE 向断层多被 NW 向对此切割。

### 3 软件系统

固体矿产勘查信息系统(QuantyPES),是基于国产具有完全自主知识产权的三维地质信息系统平台 QuantyView 开发的。这种具有完善的硬、软件配置的分布式固体矿产资源勘查信息系统,能够全面支持目前普查、详查、勘探各个阶段的信息化工作。固体矿产勘查信息系统(QuantyPES)软件在前期资料搜集整理的基础上,构建原始数据库;采用野外数据采集系统,进行钻孔编录,同时构建基础数据库;在数据库的支持下,采用人机交互与自动化相结合的方式,进行各类勘查图件的计算机辅助编绘;采用知识驱动、系列剖面拓扑推理与多点地质统计学相结合的技术,进行地上-地下、地质-地理、结构-属性一体化的矿床精细、全息三维地质建模;同时采用传统法和克里格法进行三维储量计算与对比。最后,在完成上述各项工作的基础上,完成成果数据库构建(如图 2)。

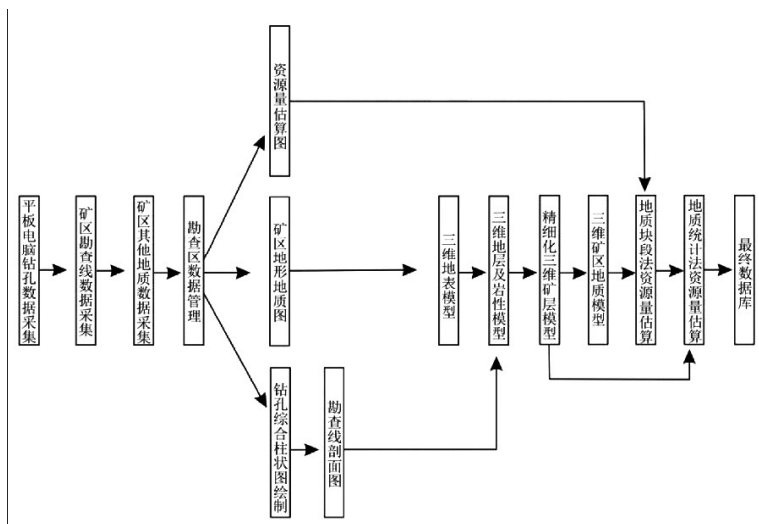


图 2 数据库建立流程图

Fig. 2 Flow chart of database establishment

固体矿产三维建模能够在较短的时间内,完成整个矿床及矿区地下-地上、地质-地理、空间-属性的一体化模型的构建,所需的时间比国内外已有软件更短;可以随着勘查工作进展,对所建立

的大型三维地质模型进行局部更新,增添一个钻孔和剖面无需整体推倒重来;并能够在该地质模型中,融入了所获得的全部地质属性信息,既包含地层、岩性、岩相、结构、构造信息,也包含矿物成



分、地下水、地球化学和地球物理信息;而且在构建三维构造-地层格架的基础上,细致地刻画每个构造-地层单元的结构和成分特征。并能够根据矿体的特征,进行针对中国固体矿床真实地质特征进行真实模型的构建。

## 4 前期准备工作

### 4.1 数据库的建立

固体矿产开发信息系统的数据库建立依赖于勘查区的地层、构造、赋矿岩系等勘查大数据的整理与分析,以及对矿体基本特征、空间分布形态、控矿因素及成矿模式的总结。并通过对地层、矿体的抽象化和结构化实现三维精细化数字建模。

收集矿区及毗邻区所施工的钻孔资料,包括钻机班报表、曲度测量记录、孔深校正、地质编录、采样记录及采样分析结果等,按照系统给定的模板把钻孔的详细信息录入到系统内,构建基础数据库。矿区正在施工的钻孔,采用钻孔野外数据采集模块,钻孔野外数据采集模块是固体矿产勘查数据采集子系统的重要组成部分。根据野外工

作特点,该模块可基于手持平板电脑进行操作。其设计原则是方便、快捷、可靠,有利于在野外取全取准钻孔岩性编录原始数据,并可方便地转入室内台式机或便携机中进行处理。完善数据库。构建大湾数据库的关键是根据勘探钻孔岩芯和勘查线剖面图,进行平衡剖面分析、推理和计算(毛小平等,1998)。载基于知识驱动的系列剖面拓扑推理(何珍文等,2012)恢复成矿区的古地理格局和沉积模式。

### 4.2 绘制勘查线剖面图

通过从数据库中提取各类数据和资料,可以实现柱状图、剖面图、平面图等图件的计算机辅助编绘。避免数据重复录入,减轻数据处理、图件编绘的工作量,提高图件编绘精度和更新速度;保证图件遵循相关的国家、行业标准,实现图式、图例的标准化、规范化。完成四大类矿产地质图件的编绘,包括:柱状图类、剖面图类、平面图类、投影图类。利用数据库以人机交互的方式绘制勘查区勘查线剖面图,利用采样信息和样品分析结果人工辅助绘制出矿床及矿层顶底板等高线(如图3)。

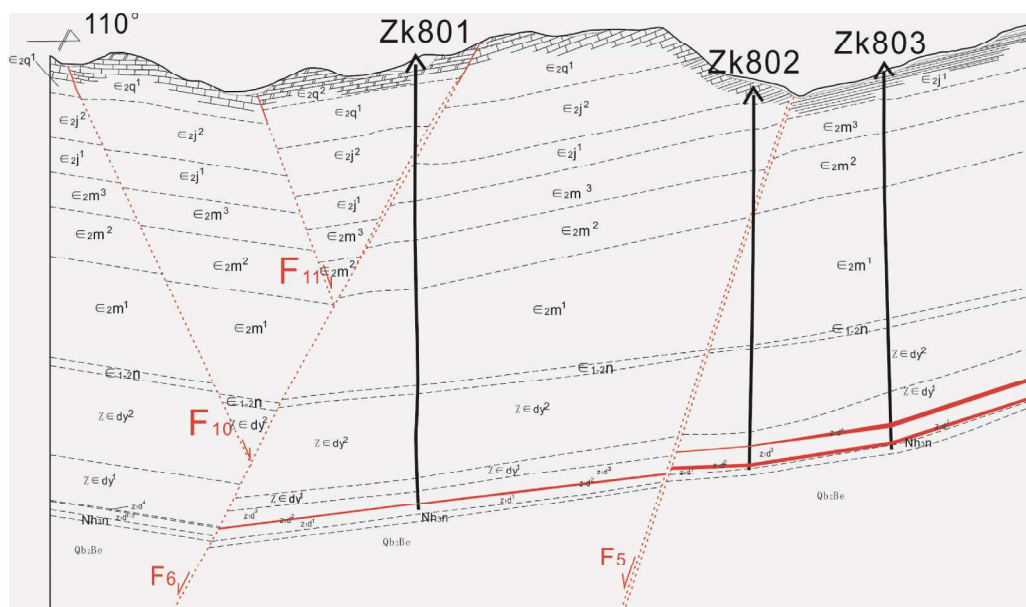


图3 勘查线剖面图

Fig. 3 Profile of prospecting line

### 4.3 建模数据的整理和预处理

在数据集市的建立方面,需要从已经建立的数据库中提取大湾磷矿床的空间数据集和属性数据集,然后对这些数据集进行筛选、坐标校正和抽

取,装载到矿床三维地质建模的主题数据集市中的各个信息表中;在三维地质建模相关的数据处理方面,地质现象及其控制因素的复杂且多变,决定了地质数据的多样性和不确定性,因而需要首先对通过露头调查、钻探、槽探、物探、化探、遥感、

摄影测量等技术手段获得的原始数据进行整理、建库,再采用各种二维图形编辑和数据预处理软件。具体步骤:一是针对不同的勘查手段例如钻探、槽探、物探、化探、遥感等数据的提取,提取所建模所需的地层界线、构造、矿层顶底板等高线等空间数据(如图4、图5)。二是结合矿区地质地形图,提取地表等高线、地层分层界线、构造等空间信息,确定各套地层、构造和矿体在空间位置及几何形态的关系。三是再采用各种二维图形编辑和数据预处理软件进行综合处理和编图,并结合地质专家知识对复杂的地质结构和成分进行识别、解释、描述、定位等处理;然后通过转换接口把数据转换为三维地质建模软件可接受的格式。除此之外,还需要考虑不同尺度下勘查线密度的选择、钻孔的选择(考虑钻孔的信息完整性、对矿体的控制程度、分布情况)以及勘查区地理坐标的转换等问题(张夏林,2020;贾然,2021)。

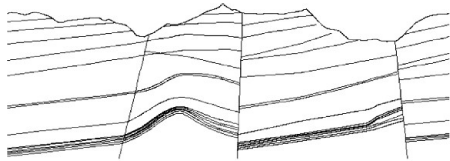


图4 地质界线

Fig. 4 Geologic boundary

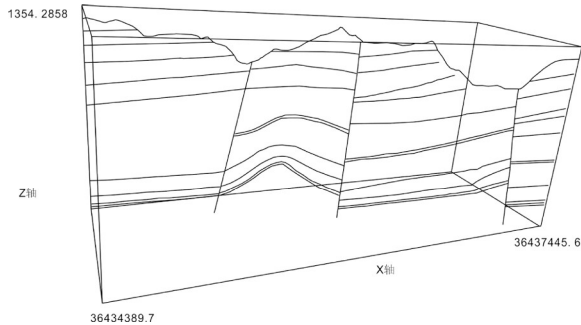


图5 界线立体化

Fig. 5 Tridimensional boundary

## 5 基于数据库的三维矿体地质建模

### 5.1 基于地表三维建模

为实现地上地下地质地理一体化建模,其中关键问题是地表地层出露情况与地下模型相互套合,QuantyPES 建造地表三维地质模型为数字高程模型(DEM)是利用地表等高线和遥感数据建立的,通过提取的地表高程等高线采用不规则三

角网算法(triangular irregular network)生成地表等高面(如图6、图7)依据矿区内钻探工程达到的最低标高,由地表向下设置一定深度,生成矿区概略模型。(如图8)。

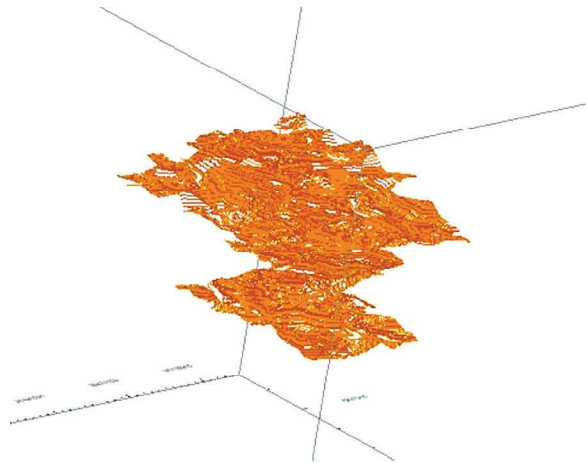


图6 地表等高线

Fig. 6 Surface contour line

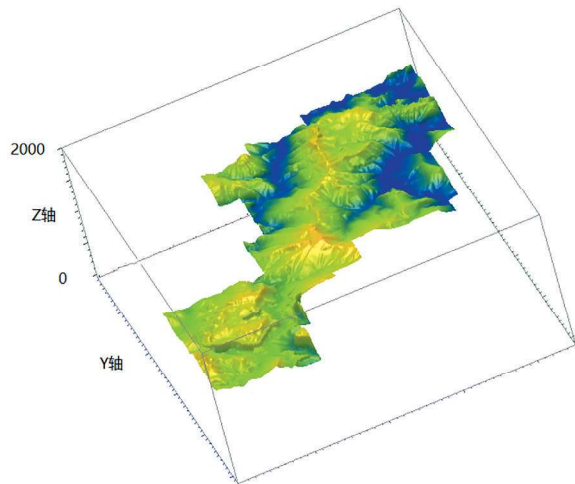


图7 地表面

Fig. 7 Surface of the Earth

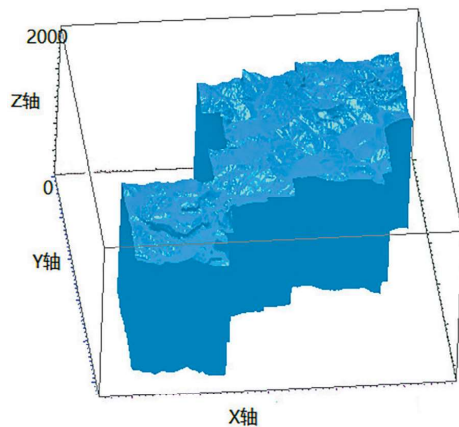


图8 矿区概略模型

Fig. 8 General model of the mining area

## 5.2 断层模型

考虑沉积型磷矿床以古地理、构造为主要控矿因素,本次研究通过勘探线剖面图数据,提取断层接触面完成对断层模型的构建。在矿床范围内分布断层大部分未经破碎。主要分为三组走向主要为SN、NW、NE三组断层(倾角 $50^{\circ}\sim 80^{\circ}$ )。对矿层有较大影响的是SN组断层,通过岩心编录以及地表露头观测中揭露的断层信息,构建了断层面模型,并构建断层三维实体模型,构建模型(如图9、图10)。建造断层面的方法同样是采用不规则三角网算法,利用提取的各个勘查线剖面中的断层线生成断层面。

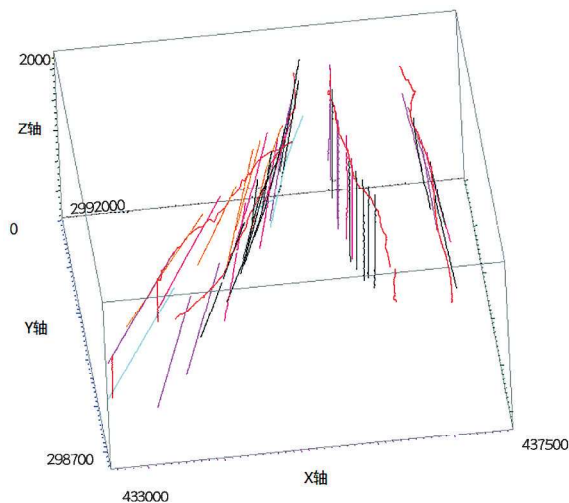


图9 断层线

Fig. 9 Fault line

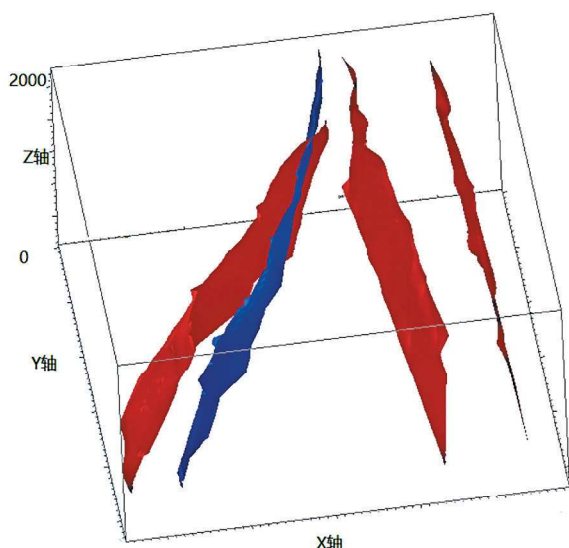


图10 断层面

Fig. 10 Fault plane

## 5.3 断层分割矿区概略模型

利用生成的断层面切割已构建的矿区概略模型,将矿区概略模型根据断层空间位置分为多个小体。在断层面切割概略体时,断层面必须要大于概略体,在现实中,矿区内大多数为隐伏断层,为了能够切开概略体,需要延长构造线或者将构造线外推到概略体外,然后生成断层面(如图11)。在断层断距、方位不改变的情况下人为的把断层扩大化。某些断层未切穿矿体,同样的认为把断层扩大化,使其断层面超过概略体。未受断层影响的地层其地层界线是连续的,在后期处理过程中被扩大化的断层可以恢复真实断层形态。

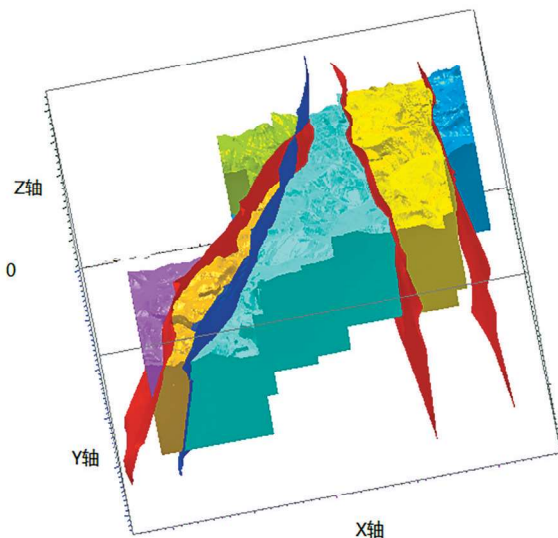


图11 断层面切割矿区模型

Fig. 11 Model of fault plane cutting mining area

## 5.4 地层建模

根据提取的勘查线剖面地层信息,利用地层线建造地层面,然后用地层面分割已被断层切个的小体。这样依次进行分割,直至将矿区地层及矿层分割完毕(如图12)。针对地层的岩性、颜色、应力、赋水性等不同的属性对各个地层进行赋属性。最后将地层按照顺序依次叠加,并在矿区地表加上卫星图片。(如图13)。

## 5.5 矿层建模

矿体三维建模需要提取矿体的边界线,将不同剖面的矿体边界线通过控制线连接,生成完整的矿体模型。矿体三维建模的目的是让矿体能够多角度、多尺度且直观、形象地展示在地质人员和



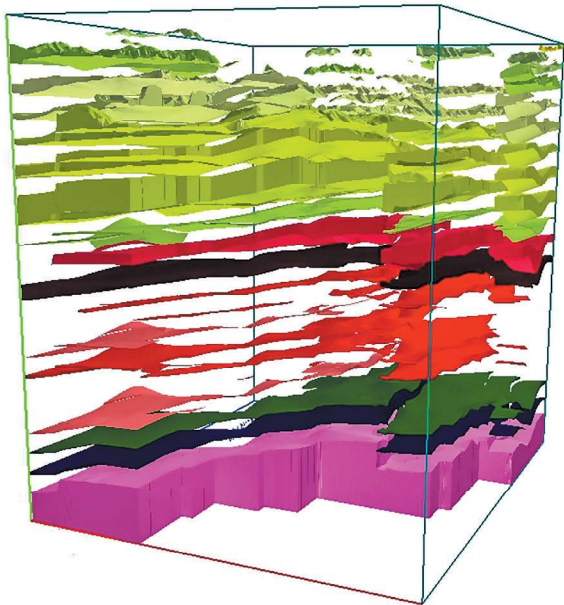


图 12 矿区地层爆炸模型

Fig. 12 Model of strata explosion in mining area

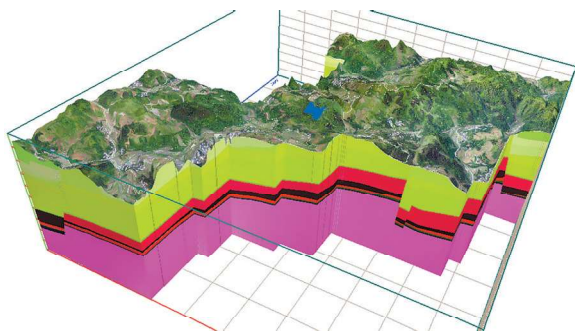


图 13 矿区地表贴图及三维地质模型

Fig. 13 Surface mapping of mining area or three-dimensional geological mode

采矿人员眼前。建模的数据来源为地质勘查工程数据,包括经过综合整理得出的勘探线剖面图、地质工程平面图和矿体资源量估算图等。

图 14 所示的大湾矿体模型(红色部分),是通过克里格法插值方法模拟生成。从统计意义上说,这是从变量相关性和变异性出发,在有限区域内对区域化变量的取值进行无偏、最优估计的一种方法;而从插值角度讲,这是对空间分布的数据求线性最优、无偏内插估计一种方法。这种方法对于形态较简单的物体效果不错,但对于形态、产状都较为复杂的矿体,这种方法达不到理想效果,甚至违背实际情况。解决方法是对于形态和对应关系复杂的对象,采用人机交互方式,由地质工作人员找出不同剖面间的对应数据,手工给定点与点的对应关系(控制线的方式),由这些限制条件来保证建立的矿体模型,能够最大限度地符合实

际地质状况和空间分布规律。

### 5.6 地质模型验证

开展三维地质建模是为了更好的提升三维可视化表达、分析、设计、决策等能力,并有助于感知和发现隐伏矿体(吴冲龙等,2020;田宜平等,2020)。把已做好的矿层模型整合到地层模型中,构成完整的矿床三维地质模型(如图 13)。最后,利用数据库中的钻孔信息,利用钻孔在空间的真实坐标制作钻孔模型并整合在三维地质模型中,通过钻孔岩芯采样段标注特征和矿层模型、地层模型对比是否重合,验证矿床三维地质模型的正确性。图 14 所示,大湾磷矿矿床三维地质模型与钻孔模型完全一致,说明了三维地质模型的可靠性。

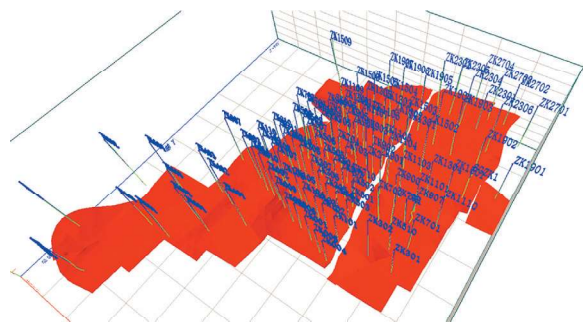


图 14 矿体模型验证

Fig. 14 Verification of orebody mode

## 6 结论

本文以福泉大湾超大型磷矿为例进行精细化建模。该模型的建立对该类型矿床成因模式的认知从定性上升到定量。运用三维建模的方法建立对应的实体模型,从三维视角对其产状、规模、空间位置关系等进行分析,揭示了该矿床的结构特征、矿体形态、控矿要素及后期构造叠加改造的情况,这有助于更加深刻的认识大湾磷矿的成矿机制、矿体赋存状况和分布规律。建立综合致矿信息精细化三维地质模型,定量圈定找矿靶区并评价其资源潜力(赵鹏大等,2020),并进行可视化显示,这对于指导矿床勘探工作,优化矿山持续性勘探成本有着重要意义。

### [参考文献]

陈根生,刘军旗,何忆,等. 2019. 基于 wold wind 移动端的地质数据野外采集系统[J]. 计算机系统应用,28(4):96-104.

- 何珍文,吴冲龙,刘刚,等. 2001. 地质空间认知与多维动态建模结构研究[J]. 地质科技情报,31(06):46-51.
- 贾然,王浩然,王功文,等. 2021. 河南栾川西沟铅锌银金矿床三维地质建模与深部找矿预测评价[J]. 地学前缘,28(03):156-169.
- 刘静江,李伟,张宝民,等. 2015. 上扬子地区震旦纪沉积古地理[J]. 古地理学报,17(06):735-753.
- 毛小平,黄延祜,吴冲龙. 1998. 体元结构模型在三维地震模型正演模拟研究中的应用[J]. 地球物理学报,(06):833-840.
- 田宜平,吴冲龙,刘刚,等. 2020. 地质科学大数据可视化关键技术讨论[J]. 地质科技通报,39(4):29-36.
- 吴冲龙,刘刚,周琦,等. 2020. 地质科学大数据统合应用的基本问题[J]. 地质科技通报,39(4):1-11.
- 吴冲龙,张夏林,周琦,等. 2021. 数字勘查与地矿勘查行业数字化转型[J]. 贵州地质,38(02):119-128.
- 王剑,段太忠,谢渊,等. 2012. 扬子地块东南缘大地构造演化及其油气地质意义[J]. 地质通报,31(11):1739-1749.
- 赵鹏大,陈永清,张寿庭,等. 2021. 大型-超大型矿床成矿地球动力学背景,过程与评价:定量勘查与评价[M]. 北京:地质出版社,1-50.
- 赵鹏大,陈永清. 2021. 数字地质与数字矿产勘查[J]. 地学前缘,28(3):1-5+434.
- 周永章,左仁广,刘刚,等. 2021. 数学地球科学跨越发展的十年:大数据、人工智能算法正在改变地质学[J]. 矿物岩石地球化学通报.
- 张夏林,吴冲龙,周琦,等. 2020. 基于勘查大数据和数据集市的锰矿床三维地质建模[J]. 地质科技通报,39(4):12-20.
- Diepolder G W. 2011. German Geological Surveys: Federal-State Collaboration for 3-D Geological Modeling[C]// Berg R C. Mathers S J, Kessler H, et al. Synopsis of Current Three dimensional Geological Mapping and Modeling in Geological survey organizations. Illinois state Geological Survey Circular 578, 48-52.
- Zhu M Y, Zhang J M, Yang A H. 2007. Integrated Ediacaran (sinian) chronostratigraphy of South China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 254(1-2):7-61.

## Application of Solid Exploration Development Information System and Three-Dimensional Geological Modeling in Dawan Super-large Phosphorite Exploration of Central Guizhou

WEI Shi-peng, SONG Pu-hong, LU Yue-rong, LIU Bo, CHEN Feng

(104 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Duyun 558000, Guizhou, China)

[ **Abstract** ] With the decrease of shallow deposits in the mining area, more and more attention has been paid to deep prospecting. 3D geological modeling technology has been widely used in metallogenic prediction, quantitative evaluation of resources and so on. Based on the analysis of the characteristics and structure of the large-scale Dawan phosphorite deposit in the central phosphorite ore concentration area of Guizhou, based on the collection, analysis and extraction of geological map, borehole and sampling point data of strata, lithology, structure and grade, a high-precision 3D geological model of the Dwan phosphorite deposit in central Guizhou has been constructed. The model not only reflects the characteristics of deposit and ore body directly, but also provides visual tools for mine construction management and peripheral ore prospecting.

[ **Key Words** ] Three-dimensional geological model; Super-large phosphate deposit; deep prospecting