

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.2020.0402

张夏林, 吴冲龙, 周琦, 等. 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, 2020, 39(4): 12-20.

Zhang Xialin, Wu Chonglong, Zhou Qi, et al. Three-dimensional geological modeling of manganese deposits based on exploration big data and data market[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(4): 12-20.

基于勘查大数据和数据集市的锰矿床三维地质建模

张夏林^{1a,1b,1c,2}, 吴冲龙^{1a,1b,1c,2}, 周琦², 翁正平^{1a,1b,1c,2}, 袁良军², 何昆洋^{1a}, 张权莉², 杨炳南²

(1. 中国地质大学(武汉) a. 计算机学院; b. 智能地学信息处理湖北省重点实验室; c. 智慧地质资源环境技术湖北省工程研究中心, 武汉 430078; 2. 自然资源部基岩区矿产资源勘查工程技术创新中心, 贵阳 550081)

摘要:以黔东南锰矿集区的李家湾—高地—道坨超大型“大塘坡式”锰矿床为例,探讨了在开展勘查地质大数据的特征和结构分析的基础上,厘定事实表和维度表,进而通过对勘查数据的收集、提取、ETL操作,并应用OWB工具建立锰矿勘探数据的数据集市的思路与方法。进而探讨了以所建立的数据集市为数据支撑平台,建立黔东南超大型锰矿床高精度三维地质模型的途径。该矿床三维地质模型汇集了海量的空间数据与属性数据,是锰矿异质异构勘查开发大数据的有效载体。基于该精细、全息矿床三维地质模型,不但可以直观反映矿床和矿体特征,而且可以作为矿山管理及其深部和外围找矿预测的可视化分析工具。

关键词:勘查大数据;数据集市;三维地质体建模;超大型锰矿

中图分类号: TP31; P618.32

文章编号: 1000-7849(2020)04-0012-09

收稿日期: 2019-11-18

Three-dimensional geological modeling of manganese deposits based on exploration big data and data market

Zhang Xialin^{1a,1b,1c,2}, Wu Chonglong^{1a,1b,1c,2}, Zhou Qi², Weng Zhengping^{1a,1b,1c,2},
Yuan Liangjun², He Kunyang^{1a}, Zhang Quanli², Yang Bingnan²

(1a. School of Computer Science; 1b. Hubei Key Laboratory of Intelligent Geo-Information Processing; 1c. Intelligent Geological Resources and Environment Technology Hubei Engineering Research Center, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430078, China;
2. Technology Innovation Center of Mineral Resources Explorations in Bedrock Zones, Ministry of Natural Resources, Guiyang 550081, China)

Abstract: Taking Lijiawan-Gaodi-Datuo super-large "Datangpo" manganese deposit in northeastern Guizhou as an example, this paper discusses the idea and method of establishing a data market of manganese mine exploration data through collecting, extracting and ETL operation of exploration data based on the analysis of the characteristics and structure of large geological data. Furthermore, the paper describes the way to establish a high-precision three-dimensional geological model of super-large manganese deposits in northeastern Guizhou based on the established data market. The three-dimensional geological model of the deposit condenses a large amount of spatial data and attribute data, and is an effective carrier for large data of heterogeneous exploration and development in manganese mines. Based on the fine and holographic three-dimensional geological model of the deposit, the model not only can directly reflect the characteristics

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972310); 贵州省科技计划(黔科合支撑[2017]2951; 黔科合支撑[2019]2868; 黔科合支撑[2020]4Y039号; 黔科合平台[2018]5618); 贵州省地质勘查基金项目(2019-02号); 贵州省地矿局科研项目(黔地矿科合[2017]2; 黔地矿科合[2018]07)

作者简介: 张夏林(1975—),男,教授,主要从事地学三维信息系统研究工作。E-mail: zhangxialin@cug.edu.cn

of the deposit and orebody, but also can be used as a visual analysis tool for mine management and prospecting prediction in deep and peripheral areas.

Key words: exploration big data; data market; 3D geological modeling; super large manganese deposit

矿床勘查大数据是一种科学大数据^[1]。它们是在矿产勘查过程的不同阶段,按照各种规范和标准所获取的,具有多源、多类、多维、多时空、多尺度以及获取手段多样化等特点^[2-3]。数据类型包括原始数据和综合数据,既有结构化的,也有半结构化的和非结构化的^[4]。在矿山和勘查单位中,它们长期以来多以文本、图形和图像方式呈碎片化状态堆积着。随着信息化程度的不断推进,凸显出“信息孤岛”状况日趋严重,数据海量聚集而知识缺乏,适合大型、超大型矿床的数据管理与可视化软件平台不足等问题^[5]。然而,已有的信息管理技术侧重于结构化数据的规范化存储和应用,难以有效地支持非结构化和半结构化数据的存储、表达和决策分析。为了满足当前矿山企业数字化、可视化和智慧化建设需要,有必要在加强点源主题式对象—关系数据库系统研发和应用的同时,加强数据仓库和数据集市的研发和应用。然后,以此为基础进行精细、动态、全息矿床三维可视化建模^[6-10],并建立支持锰矿勘查开发的大数据集成、融合和应用体系,为在矿床的深部及外围进行找矿的决策分析,提供数据支持、技术支持和可视化工具。为了探索解决这些问题的方法与途径,笔者拟以黔东北锰矿集区的李家湾—高地—道坨超大型锰矿床为例,基于勘查大数据和数据集市进行矿床三维地质建模原理与方法研究,并开发相应的应用软件。

1 黔东北超大型锰矿地质概况

固体矿床勘查的数据集市设计、三维地质建模和决策支持系统的建立,有赖于勘查区地层、断层、褶皱、岩浆岩、赋矿岩系及围岩、岩浆、热液及围岩蚀变等勘查大数据的数据集市构建,以及对矿床基本特征、空间分布、控矿因素和成矿模式的总结。在此基础上,通过对矿床的抽象和结构化,实现三维精细数字化建模。

1.1 区域地质特征

黔东北锰矿集区毗邻湘渝鄂,位于上扬子陆块南华裂谷西部的武陵次级裂谷中^[11]。南华裂谷形成于新元古代晚期,其沉积盖层南华系下部的大塘坡组一段(Nh_1d^1),是超大型锰矿床的主要赋存岩系。区内的构造经历过多期次叠加,较为复杂。除了NEE向的裂谷基底和边缘同沉积断裂之外,其他NE和NNE向断裂和褶皱主要发育于裂谷期

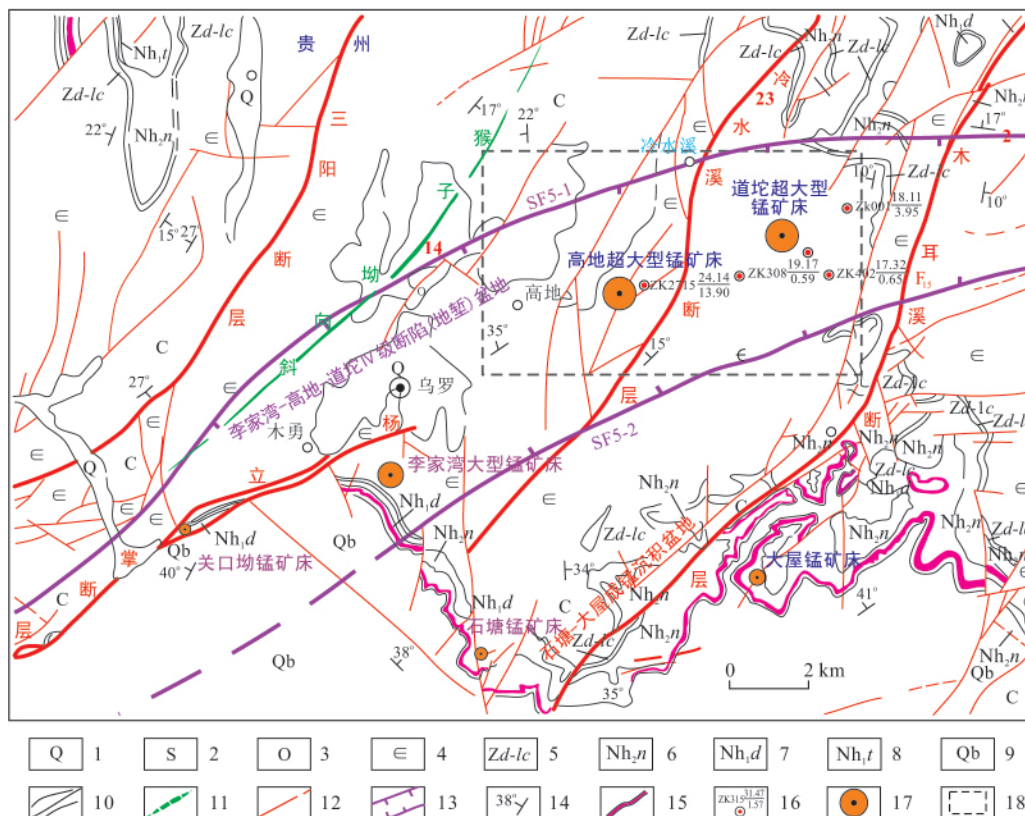
后的海西运动和燕山运动。其中,控制李家湾—高地—道坨超大型锰矿床的形成和分布的,是NEE向的南华裂谷Ⅳ级断陷(洼陷);而对这些矿床产生破坏和改造作用的,是海西期和燕山期的NE走向和NNE走向大型断裂,以及由于燕山期梵净山隆起诱发的走向NE、倾向NW的大型滑脱构造^[12]。这些大型滑脱断裂为上陡下缓的铲状正断层,与伴生的小型反向逆断层在深部汇合,对超大型锰矿床起一定的破坏作用。

1.2 矿床地质特征

李家湾—高地—道坨超大型“大塘坡式”锰矿床的地层为一套粗细相间的陆源碎屑沉积序列。出露的地层由下而上是:两界河组(Nh_1l)含砾长石石英砂岩或含砾泥晶白云岩透镜体;铁丝坳组(Nh_1t)灰色棱角状含砾砂岩和冰碛砾岩;大塘坡组(Nh_1d),下部为含钢灰色条带状菱铁矿的黑色条带状含锰碳质页岩,局部含有少量的砂岩透镜体,上部为夹有深灰色黏土岩的灰黑色炭质页岩;南沱组(Nh_2n)黄绿、黄灰色块状含砾砂岩、页岩、黏土岩^[13]。

区内地表最显著的构造线总体走向NE和NNE,是叠加在南华原生裂谷构造之上的海西期和燕山期构造。主要褶皱为走向NE—SW向延伸的猴子坳向斜、耿溪断背斜和道坨向斜,是经后期改造的南华裂谷残留部分,高地矿床就处于猴子坳向斜的中段。在由燕山期梵净山隆起诱发的走向NE、倾向NW的滑脱构造中,规模较大的断裂有杨立掌、水银厂、三阳、冷水溪、木耳溪断裂等。此外,还有一些规模小但结构复杂的次级断裂。

重点研究和解剖的李家湾—高地—道坨隐伏矿床(图1),发育于梵净山穹隆东北猴子坳向斜的Ⅳ级道坨裂陷槽中,其东侧为区域性木耳断裂,西侧为冷水断裂,表现出“构造控盆、盆控岩相、岩相控矿”^[12-13]的特点。同沉积期构造线呈现NEE走向,褶皱和断裂构造相对简单;后沉积期构造线则呈NNE向走向,褶皱和断裂构造相对复杂一些。锰矿体均产于南华下统大塘坡组第一段(Nh_1d^1)的下部炭质页岩中^[13],形态简单,呈层状、似层状缓倾斜产出,与围岩产状一致。但是,由于受后期构造影响,整个矿床被裂解为若干断块,其北西部矿体走向SE—NW、倾向SW、倾角 $3^\circ\sim 15^\circ$,南东部矿体走向NE—SW、倾向NW、倾角 $5^\circ\sim 19^\circ$ 。矿石的自然类型为炭质页岩型原生碳酸锰矿石,矿石结构主要有泥晶结构和粉砂质结构2种,矿石构造主要有条带状



1. 第四系;2. 志留系;3. 奥陶系;4. 寒武系;5. 震旦系陡山沱组—留茶坡组;6. 南沱组;7. 大塘坡组;8. 铁丝垭组;9. 青白口系;10. 角度不整合界线和地层界线;11. 向斜轴;12. 实测及推测断层;13. 李家湾—高地—道坨Ⅳ级断陷盆地;14. 地层产状;15. 含锰岩系露头;16. 钻孔位置及编号—锰品位(%) / 矿体厚度(m);17. 锰矿床(点);18. 矿床三维建模示范区

图1 贵州省松桃李家湾—高地—道坨超大型锰矿床区域地质简图

Fig. 1 Regional geological sketch of super-large manganese deposit in Songtao Lijiawan-Gaodi-Daotuo, Guizhou Province

构造、块状构造、网脉状构造和气泡状构造等4种。根据矿石的成分和结构构造,矿体可分为条带状菱锰矿矿体、块状菱锰矿矿体和含少量气泡状菱锰矿矿体。矿床的Mn品位由中心相区向外,经过渡相区到边缘相区逐渐降低,平均品位为19.92%^[14]。

2 锰矿床多主题数据集市构建

2.1 锰矿床多主题数据集市设计思路

在数据集市的设计过程中,首先根据勘查区的实际情况和需要设计整体框架,再进行概念模式、逻辑模式和物理模式设计,然后进行数据提取、转换和加载,最后提交决策分析和应用。所涉及的勘查数据,大部分在勘查过程中已经采集并存储于勘查区原始数据库和基础数据库中。为了满足实际需要,应当补充一些通过初步分析所得到的,关于勘查区构造—地层格架和成矿条件等方面的新认识和新成果。

一般地,在进行数据多主题应用之前,例如三维地质实体建模和矿产资源预测、评估前,应当首先按

主题从数据库中把通过各种勘查技术手段所获取的数据,分别提取、整理和存储;然后按照不同尺度的三维建模和矿产资源预测、评估所对应的数据粒度,进行多主题数据集市的构建,并对相关专题或子专题数据进行融合和综合。具体地,为了适应矿床多主题数据集市建模的需要,对于来自不同勘查技术手段,例如物探、化探、钻探、槽探和硃探的数据,应当分别按主题提取、整理和入库。以矿床三维地质建模主题为例,在物探和化探数据库中,主要提取目标对象的空间位置、异常性质、等值线和解译成果等数据;而在钻探、槽探和硃探数据库中,主要提取目标对象的位置、矿体和蚀变带分布等空间数据,以及矿体、蚀变带和围岩等性质特征的属性数据。有些空间数据,例如断层的地下形迹,表现为空间的点、曲线和曲面等形式。为了保证建模和评估的精度和合理性,需要通过坐标变换和投影变换转化,成为勘探线剖面图上的点、线、面等图元。基于已有数据库中的原始数据和经过整理、融合、编图、分析所获取的综合数据,可以直接进行数据完整性检查和清洗,进而按照主题分别进行数据集市构建。必要时,可把多

主题数据集市聚合成数据仓库。根据结构—功能统一性原则,锰矿床勘查数据集市总体上可采用三层结

构^[15](图2)。系统的底层是数据集市服务器,中间层是 OLAP 服务器,顶层是用户访问层。

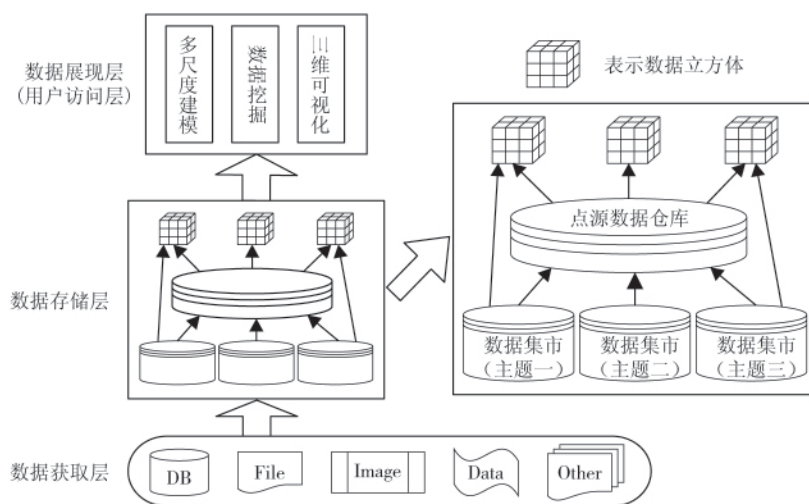


图2 地质数据多主题数据集市与数据仓库系统体系结构^[13]

Fig. 2 Architecture of geological data multi-subject data market and data warehouse system

在数据集市基础上,可进一步构建新型决策支持系统(DSS)——帮助中高层管理人员基于数据仓库、联机分析处理(OLAP)和联机数据挖掘(DM)^[16]。这种新型决策支持系统,适用于研究区的多源、多类、异质、异构大数据。

2.2 锰矿床勘查数据集市模型设计

2.2.1 数据集市的数据源分析

目前,在贵州省地矿局所建立的数据库系统中存储的锰矿勘查数据,主要是103地质大队的勘探和开发数据。数据类型包括勘探区概况、地震勘探、测试分析、钻探、综合研究、矿山开采、生产管理、成果图件和其他数据。这些数据是开展“大塘坡式”超大型锰矿床三维地质建模主题数据仓库(集市)建设的基础。根据三维建模的作业流程和需求,可以构建独立型数据集市的方式,直接从操作型环境中获取数据。由于所涉及的数据具有显著的多源、多类、异质、异构特征,在进行数据集市的数据组织时,首先应当按照不同的类型、粒度和维度进行数据整合、清洗和抽取,再由下而上构建。

2.2.2 锰矿床多主题的数据集市模型

合理的数据结构模型是构建数据集市的基础。在通常情况下,数据结构模型的建立过程可分为概念模型、逻辑模型和物理模型3个阶段。

(1) 锰矿床多主题数据集市的概念模型

数据集市概念模型构建的主要任务,包括主题划分、粒度和层次划分、维度和度量定义等3个部分^[17]。在地质数据集市内部,数据是面向主题进行组织的,而不像一般业务管理系统那样按操作功能进行组织。应当着重解决主题划分时所面临的多

源、多类、异质、异构、多时态和多尺度数据的融合问题。数据集市概念模型构建的关键点,是实体和关系的表达,即制作E-R图。在E-R图中,用实体来体现数据集市的主题——三维多尺度、精细、全息地质建模和资源分析评价所涉及的问题域,以及所要解决的问题(图3)。

(2) 锰矿床多主题数据集市的逻辑模型

数据集市逻辑模型即为中间层数据模型,是对概念模型的主题域及其联系的进一步明确,以及对主题所包含的信息、事实表与维度表的关系的具体描述。逻辑模型设计的关键问题是逻辑建模方法的选择。在数据集市设计中,通常选用星型模式、雪花模式和星型—雪花模式。在逻辑模型的设计过程

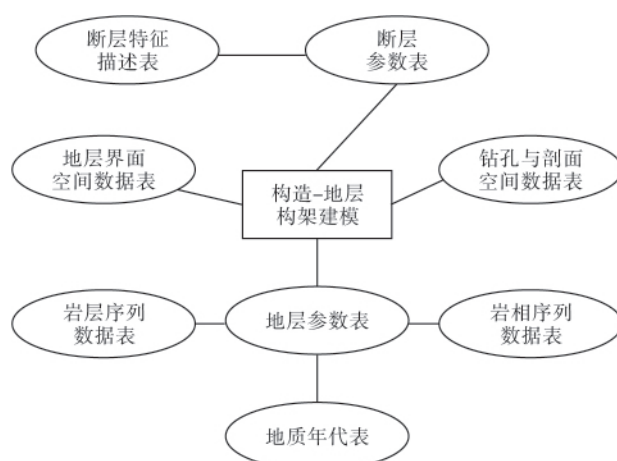


图3 构造—地层格架建模主题的数据集市概念模型

Fig. 3 Data market conceptual model for themes of structural-stratigraphic framework modeling

中,首先要分析主题域,应当对所确定的基本主题域做进一步分析和排队,并且选择出要优先实施的若干个主题域;其次要定义和编制事实表,数据集市的事实表,都由一个包含多个事实的表来描述和记录,然后需要进行粒度和层次的划分。用于描述事实和维的细化与综合程度的粒度,有空间粒度和时间粒度之分,其中,空间粒度可按研究对象的空间分布范围和作业比例尺,划分为矿集区(1:250 000)、矿田(1:50 000)、矿床(1:25 000~1:25 000)和矿体($\geq 1:5 000$)等 4 个级别;时间粒度可划分为宙、代、纪、世、期、时(地质年代单位),空间粒度可划分为宇、界、系、统、阶、带(年代地层单位)。最后是定义维及其度量,通常采用星型或星型-雪花型模式。

在将空间信息融入数据集市时,通常把对空间信息的描述分为单纯空间维、单纯空间度量、空间维+空间度量等 3 种方式。这 3 种方式分别对应 3 种多维数据模型,即仅包含空间维的多维模型、仅包含空间度量的多维模型和既包含空间维又包含空间度量的多维模型。其中,空间维可以使用空间索引树来定义和描述分组层次,而空间度量可表示成空间对象的指针集合,并可通过空间拓扑操作来实现数据索引和聚合。对于锰矿床三维地质建模而言,其数据集市涉及的事实表有:勘查区、区域成矿带、地层、构造、矿体围岩、矿化蚀变带、物探异常、化探异常、矿体特征、矿体埋藏深度。每个事实表都有所属的不同维度,以此来建立锰矿床三维建模主题数据集市的逻辑模型(图 4)。

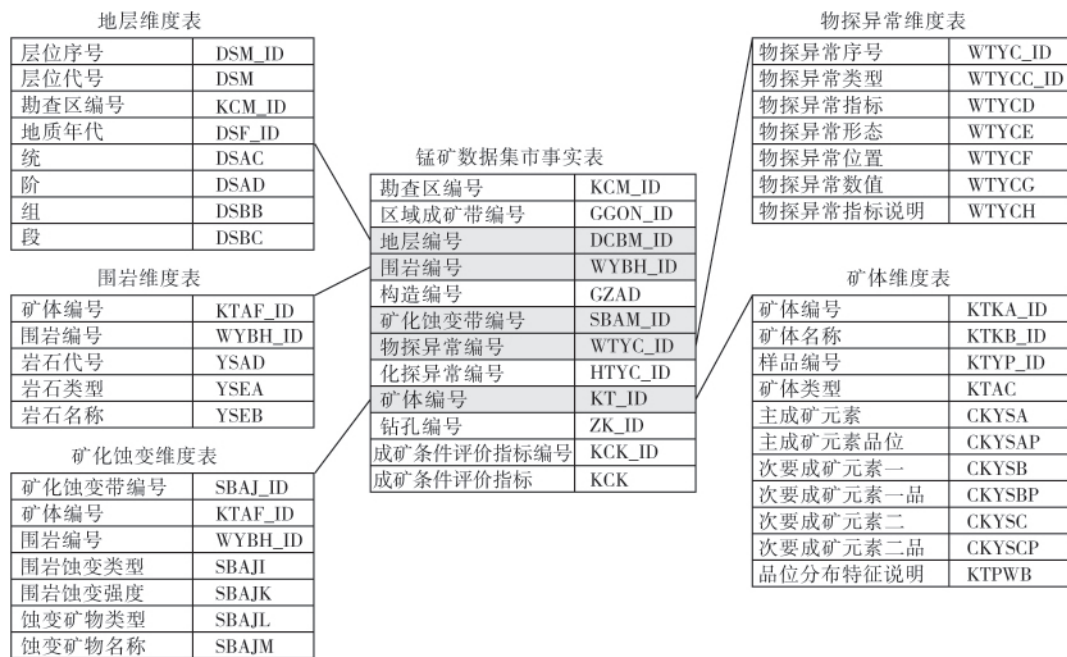


图 4 锰矿床多主题的数据集市逻辑模型

Fig. 4 Logic model of multi-subject data market for manganese deposits

(3) 锰矿床多主题数据集市的物理模型

数据集市的物理模型是完全属性化的数据模型。它将星型架构中的数据、实体和相互之间的关系进行属性化的描述,是数据集市的实施和配置基础。数据集市的物理模型设计主要内容是定义数据模型和确定数据的物理存储模式。

在定义数据模型时,首先要定义数据标准,明确命名约定及字符格式等;其次是定义实体,确认星型图中的事实表和维度表等实体,形成实体间的属性化描述。最后是定义实体的特征,以此来识别出数据集中数据值的范围、类型、大小和完整性描述等。

在确定物理存储模式的过程中,首先需要确定

存储结构,确定面向主题的数据表和表的分割;然后需要确定索引策略,以此解决数据量大、难以存储、管理和处理的问题;最后需要确定存储分配,对数据库管理系统提供的存储分配参数进行物理优化处理,再在数据集中提取相应的地质研究成果,对其非结构化定性数据进行结构化。并通过制定相应规则来提取构造—地层格架建模所需的全部空间数据(地层、岩层、蚀变带、矿体等)和属性数据(各套地层的地质年代、地层单位、岩相等)。

2.2.3 数据采集(ETL)以及应用 OWB 建立数据集市

锰矿床多主题数据集市建立过程中的数据采集,同样包括数据的抽取(extract)、清洗转换

(transform)和装载(load)3个步骤,即 ETL 过程。

其中,数据抽取需要建立在大量前期调研的基础上。在进行数据采集时可将数据源分为 OLTP 数据源(即数据库数据源)和非 OLTP 数据源。前者是在数据集市数据库服务器和原业务系统之间建立起直接连接关系,然后通过 Select 语句进行数据的抽取。对于非 OLTP 数据源的抽取,例如对文本文件的抽取,可通过诸如 SQLServer 的 SSIS 服务的平面数据源和平面目标等组件导入数据库中。在从数据源抽取的过程中,需要先将抽取出的数据放在临时缓存区,等到数据清洗和转换结束后再将临时数据区删除。

数据清洗是指在将从业务系统中抽取的数据导入数据集市之前,对脏数据、不完整的数据和重复的数据所进行的查重、除错、修正或删除等处理;而数据转换则是指在把从数据库系统中抽取的数据向数据集市加载之前,对不一致的和不规范的数据所进行的一致性和规范化处理,并完成数据粒度的转换和数据的汇总和计算。

数据装载则是指把经过清洗和转换的数据加载到数据集市的过程——以数据文件的方式,或者以连接数据库方式进行。除此之外,还需要对装载了数据的数据表建立表索引和表约束,以及对表进行检索、连接、排序和合计等操作。在数据加载时,可以利用多路 I/O 并行操作和多 CPU 协同操作来提高加载效率。目前已经有成熟的工具,可以通过这

些工具将数据进行批量加载。经过上述数据的分析和设计,结合目前的 OWB 的相关技术和工具,完成对贵州超大型锰矿数据集市的建立。

3 基于数据集市的矿床三维地质建模

在锰矿床多主题勘查数据集市的支撑下,可方便地建立多尺度的精细、全息的全息锰矿床三维地质模型^[18-19],让地质和采矿技术人员在可视化环境中直观地了解地质结构,开展矿床地质分析、构建成矿预测模型,完成矿山设计和生产计划制定。

3.1 锰矿床三维建模的基本步骤

采用 TIN-CPG 混合数据结构,是实现锰矿床的构造—地层格架与蚀变带、围岩及内在属性一体化全信息三维建模的有效措施。其中,TIN 数据结构用于表达由地层单元界面构成的勘查区构造—地层格架,而 CPG 数据结构用于表达格架内部的沉积相及各种属性的空间变化^[19-20]。

3.1.1 矿床三维地质建模流程

锰矿床三维地质建模采用图 5 所示的工作流程。其工作内容包括数据准备与预处理、地表三维模型(包括数字高程模型与岩性岩相模型)构建、勘查区构造—地层格架建模、三维格架—地层格架与矿体一体化建模等 4 个部分。此外,还需要对三维地质模型进行必要的检查、修正和优化,并提供相应的维护服务^[6]。

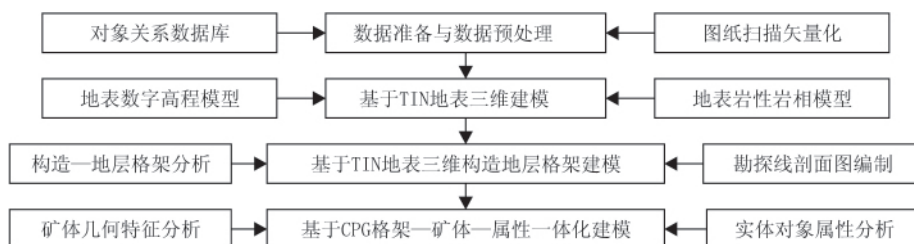


图 5 基于 TIN-CPG 混合数据结构的勘查区和矿床三维地质建模过程

Fig. 5 Three-dimensional geological modeling process of exploration area and deposit based on TIN-CPG mixed data structure

3.1.2 建模数据的预处理

在数据集市的建立方面,需要从已经建立的各类数据库中提取李家湾—高地—道坨锰矿床的空间数据集和属性数据集,然后对这些数据集进行清洗、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、硃探、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

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。

3.1.3 基于 TIN 地表三维建模

为了实现地上地下、地质地理的一体化建模,需要着重解决地表三维模型与地下三维模型的套合与融合问题。地表三维模型即数字高程模型(DEM),

是利用等高线数据(图形)和遥感数据(影像图)建立的。目前常用的 DEM,是采用不规则三角网算法(triangular irregular network,简称 TIN),通过线性和双线性内插建立的。这种数字高程模型的优点是能以不同层次的分辨率来描述地表形态,在某一特定分辨率下,能用更少的空间和时间更精确地表示更加复杂的地表特征。特别当地形包含大量特征,如断裂线、构造线时,TIN 模型能够更好地顾及这些特征并加以表达。

地表三维建模除了对高程的刻画,还在地表模型上融合了岩性岩相模型的构建。矿体、蚀变带、围岩和(或)母岩的岩性和岩相,是矿床尺度精细建模的重要内容。首先需要分析所需要的属性数据,一般包括:地层地质年代、岩石地层单位、岩相(沉积、变质岩和岩浆岩的相、亚相和微相)、结构组成、地球化学成分、同位素和岩石结构构造;主要成矿矿物和次要成矿矿物的含量、空间分布,矿化蚀变类型及其空间分布;褶皱和断层的性质、褶皱轴面和两翼特征、断层面特征、断层岩和断层泥砾特征等。另外,矿体、围岩、母岩和蚀变带的岩性及其空间特征这些数据的建立通常是通过对勘查区地质图的投影获取的。因此,进行三维模型构建时,应先将其还原到三维空间中去(图 6),即先利用平面图上的数据建立地表三维岩性模型,然后将其套合到根据勘探线剖面图或钻孔柱状图所建立的地下三维岩性模型上。

3.1.4 基于 TIN 三维构造—地层格架建模

在矿产资源勘查过程中,开展构造—地层格架三维建模的目的,是形象而直观地展示矿集区、矿田或矿床的控矿条件的整体特征。对构造—地层格架进行分析的主要内容有:了解勘查区的地层、构造史、不同等级、不同时代构造的特征并分析勘查区整体和局部的应力应变机制。这些可通过对矿田原生构造—地层格架分析和现今构造—地层格架分析来实现。

在构造—地层格架三维建模时,要在对格架的

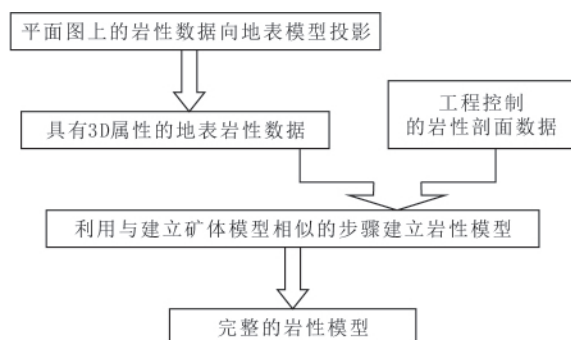


图 6 利用向地表投影的方式建立岩性模型的流程图

Fig. 6 Flow chart of lithologic models based on surface projection

分析基础上,将不同的地质认识转化为相应的空间数据和属性数据,并按照规定补充登录和存入数据库中,再着手构建用于多尺度框架结构建模的空间和属性数据集市,最后采用基于 TIN-CPG 混合结构的建模软件,分尺度进行建模。在开展勘查区构造—地层格架三维建模之前,首先应当开展岩心编录数据和地层、构造数据的标准化,然后形成全区统一的空间数据集市。最后,再基于该数据集市采用与模拟对象相适应的数学模型和内插、外推方法,来拟合目标对象的空间实体模型。

3.1.5 基于 CPG 格架—矿体—属性一体化建模

格架—属性一体化,包括地—地上、地质—地理的一体化,是在格架模型约束下的属性模型构建。其基本要领是:根据不同尺度的精度要求,先基于 TIN 数据结构,进行构造—地层格架、矿体模型和地表岩性及地形地貌的一体化建模;再以格架模型中的构界造面、地层界面和矿体界面为约束条件,基于 CPG 数据结构分别进行各种属性的三维建模。由此可获得不同尺度的地—地下、地理—地质、格架—属性一体化,以及构造—地层格架、矿体及地表一体化的多尺度三维地质模型。对矿体的三维建模的流程如图 7 所示。

3.2 基于混合数据结构的锰矿床三维地质建模

通过对贵州某超大型锰矿的前期勘探,通过各种手段获取了不同类型的地质数据,如勘探线、钻孔、探槽、物探、化探等。首先,通过对已有数据的分析、提取、处理、入库,并从各类数据库中提取关于锰矿的空间数据集和属性数据集,然后对这些数据进行 ETL 过程的进一步处理,构建出贵州超大型锰矿床的数据集市。最后是构建锰矿的三维地质模型,该过程分为数据预处理、地表模型构建、构造—地层格架模型构建、格架—矿体—属性一体化建模 4 个阶段。

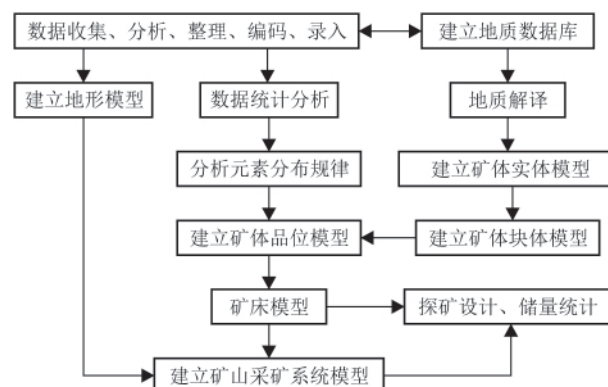


图 7 三维矿体格架—属性一体化建模流程图

Fig. 7 Flow chart of integrated framework-attribute modeling for three-dimensional orebody

预处理阶段完成了对贵州超大型锰矿地层数据的标准化(确定地层序列、地层时代、地层层数、地层编号、地层名称、地层加密层数、地层颜色和地层纹理)、模型格网的剖分(确定CPG格网的边界、方向以及对格网进行平面和垂向的剖分)、确定了基于矿床、矿体精细化三维建模的勘探线间距(100 m)、确定所选钻孔可以有效地体现整体的信息及合理地控制矿体,并完成勘查区地理坐标的转换。地表模型构建阶段首先基于地形等高线图和遥感图像生成了地表数字高程模型(图8),然后构建了地表的三维岩性岩相模型。第三个阶段,通过对贵州超大型锰

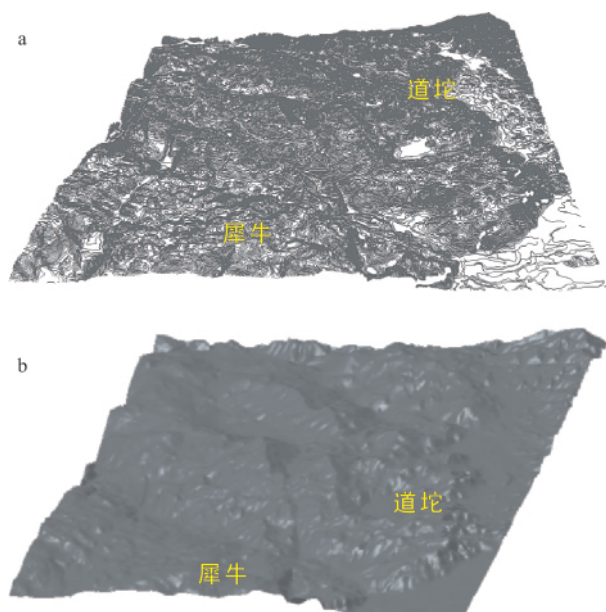


图8 黔东北锰矿区基于地形等高线图(a)和遥感影像图生成的地表数字高程模型(b)

Fig. 8 Digital elevation model of manganese mine area in northeast Guizhou based on topographic contour map (a) and remote sensing image map (b)

矿床的构造史及现今各级序构造的分析,建立矿床构造格架的详细认识,如根据相邻的序列剖面来对断层形迹进行合理的内插或外推,以此作为构造格架三维模型建立的基础。另一方面,地层格架三维模型的建立则需要根据序列剖面上不同地层线提取,通过拓扑推理、克里格插值法或者多点模拟法,并通过合理的内插和外推,建立三维地层格架模型(图9)。根据高精度的钻孔资料,绘制李家湾一高地一道坨超大型矿区地质剖面图(图10),最后基于TIN-CPG混合数据结构,建立具有显著的地上一地下、地理—地质、空间—属性一体化特征的贵州超大型锰矿的三维地质模型(图11),模型的精度跟勘探数据,尤其是钻孔数据的精度一致。

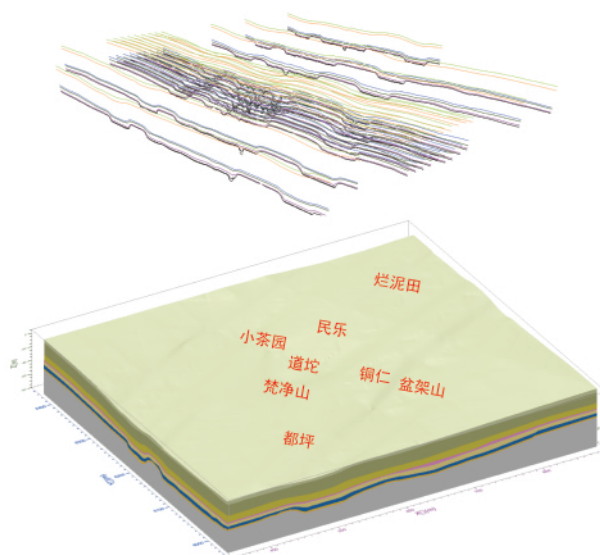


图9 黔东北锰矿矿集区尺度的区域三维地层格架模型

Fig. 9 Regional three-dimensional stratigraphic framework model of manganese mine concentration area in northeast Guizhou

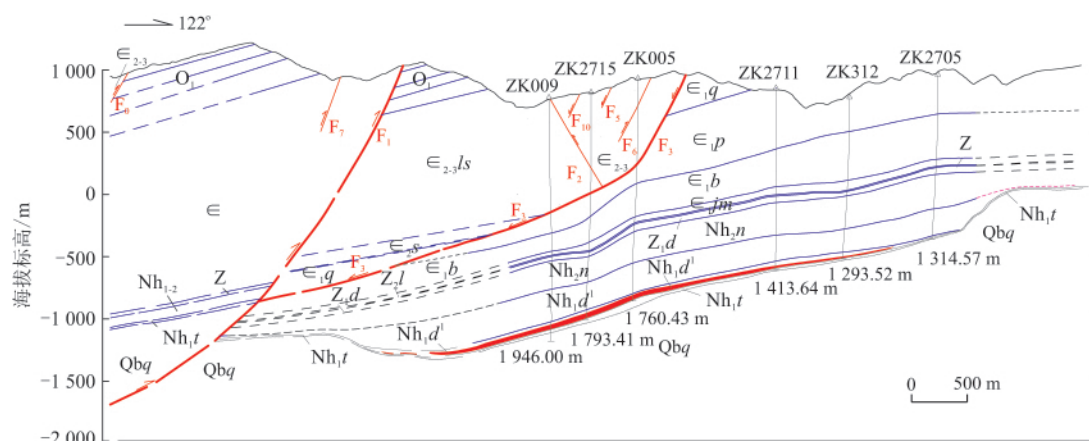


图10 矿区钻探工程及勘探线剖面图

Fig. 10 Borehole distribution and geological section of the mining area

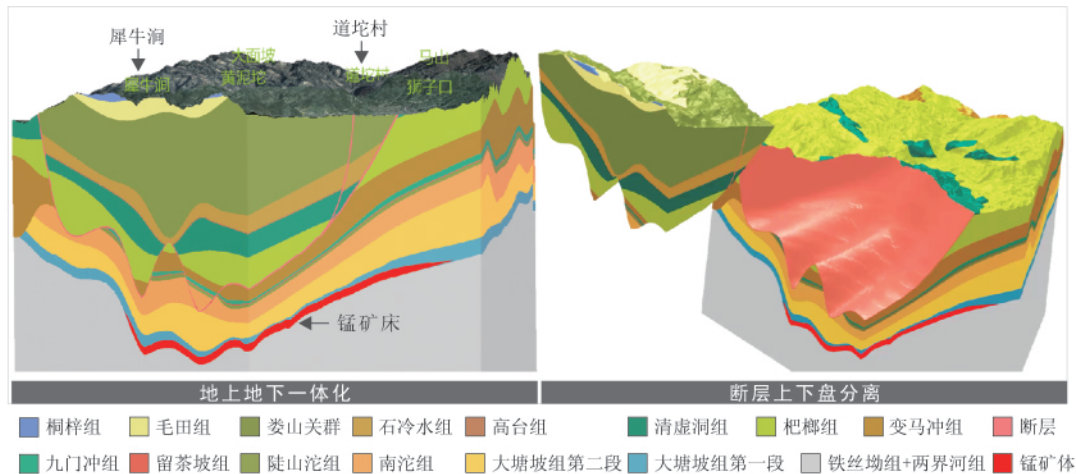


图 11 基于 TIN-CPG 数据结构建立的黔东某超大型锰矿床地上—地下、地理—地质一体化三维地质模型

Fig. 11 Three-dimensional geological model of surface-underground and geographic-geological integration for a super-large manganese deposit in eastern Guizhou based on TIN-CPG data structure

4 结 语

针对目前矿床三维精细全息地质建模中存在数据融合困难的问题,研究了基于锰矿床勘查数据的数据集市结构、建立思路与建立方法,通过在数据集中融合三维地质数据,并支撑三维建模。理论研究与实践表明,通过搭建矿床勘查的多主题数据集市,可以有效管理和应用多源、多类、多样、多源和多主题数据,支持快速、精确、全息地建立矿床的三维地质模型。并且,还能支持从海量的数据中提取决策分析的有效信息。基于所建立的数据集市对李家湾—高地—道坨超大型锰矿床进行了高精度、全要素的三维模型构建。研究和实践结果表明,基于多主题数据集市,开展矿床勘查大数据管理、矿床三维可视化建模、锰矿资源预测评价和决策分析是可行的。

参考文献:

- [1] 谭永杰. 地质大数据体系建设的总体框架研究[J]. 中国地质调查, 2016, 3(3): 1-6.
- [2] 吴冲龙. 地质矿产点源信息系统的开发与应用[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1998, 23(2): 87-92.
- [3] 吴冲龙, 刘刚, 田宜平, 等. 地质信息科学与技术概论[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [4] 刘刚, 吴冲龙, 何珍文, 等. 面向地质时空大数据表达与存储管理的数据模型研究[J]. 地质科技通报, 2020, 39(1): 157-163.
- [5] 吴冲龙, 田宜平, 张夏林, 等. 数字矿山建设的理论与方法探讨[J]. 地质科技情报, 2011, 30(2): 102-108.
- [6] 吴冲龙, 何珍文, 翁正平, 等. 地质数据三维可视化的属性、分类和关键技术[J]. 地质通报, 2011, 30(5): 642-649.
- [7] 翁正平, 何珍文, 毛小平, 等. 三维可视化动态地质建模系统研发与应用[J]. 地质科技情报, 2012, 31(6): 59-66.
- [8] 田宜平, 刘维安, 张夏林. 基于等角度变比例投影的矿体轮廓线自动匹配方法研究[J]. 地质科技通报, 2020, 39(1): 175-180.
- [9] 陈国旭, 田宜平, 张夏林, 等. 基于勘探剖面的三维地质模型快速构建及不确定性分析[J]. 地质科技情报, 2019, 38(2): 275-280.
- [10] 张文彪, 段太忠, 刘彦锋, 等. 定量地质建模技术应用现状与发展趋势[J]. 地质科技情报, 2019, 38(3): 1-9.
- [11] Wang Jian, Pan Guitang. Neoproterozoic South China Palaeocontinents: An overview [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27: 818-825.
- [12] 周琦, 杜远生, 袁良军, 等. 黔湘渝毗邻区南华纪武陵裂谷盆地结构及其对锰矿的控制作用[J]. 地球科学, 2016, 41(2): 177-188.
- [13] 张遂, 周琦, 张平壹, 等. 贵州松桃普觉超大型锰矿床主要特征与找矿实践[J]. 贵州地质, 2018, 35(4): 40-49.
- [14] 覃英, 安正泽, 王佳武, 等. 贵州松桃锰矿整装勘查区道坨隐伏超大型锰矿床的发现及地质特征[J]. 矿产勘查, 2013, 4(4): 345-355.
- [15] 邵玉祥. 三维地质空间点源数据仓库系统构建及关键技术研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2009.
- [16] 马志光, 罗治平. 数据仓库, 联机分析处理和联机分析开采研究[J]. 计算机应用研究, 1999(11): 7-11.
- [17] 李日容, 吴冲龙, 邵玉祥. 运用多维数据模型实现油气勘探数据集市[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(14): 229-232.
- [18] 张夏林, 吴冲龙, 周琦, 等. 贵州省道坨超大型锰矿床精细全息三维地质建模研究[J]. 贵州地质, 2018, 35(4): 27-32, 69.
- [19] 张夏林, 吴冲龙, 周琦, 等. 贵州超大型锰矿集区的多尺度三维地质建模[J]. 地球科学, 2020, 45(2): 634-644.
- [20] 唐丙寅, 吴冲龙, 李新川. 一种基于 TIN-CPG 混合空间数据模型的精细三维地质模型构建方法[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 1218-1225.