

贵州省道坨超大型锰矿床精细全息三维地质建模研究

张夏林¹, 吴冲龙¹, 周琦², 朱福康¹, 袁良军³, 赵亚涛¹, 杨炳南³,
李章林¹, 翁正平¹, 张志庭¹, 张权莉²

(1. 中国地质大学(武汉)计算机学院, 湖北 武汉 430074; 2. 贵州省地质矿产勘查开发局, 贵州 贵阳 550003;
3. 贵州省地质矿产勘查开发局 103 地质大队, 贵州 铜仁 554300)

[摘要] 贵州省道坨超大型锰矿床属于“大塘坡式”锰矿床, 具有世界上独特的成矿环境和机制, 本文研究综合应用道坨超大型锰矿详实勘探资料, 构建高精度全要素三维地质模型的方法。建立了道坨超大型锰矿床地上-地下一体化三维模型, 包含着丰富的地质属性信息和更为精细的地质空间信息, 形象地表达了矿体的三维空间分布状况、矿体与围岩之间的叠覆关系、燕山期形成的典型“W”型铲式重力滑脱构造的空间形态, 以及该重力滑脱构造系统对地层及矿体的交切关系, 直观表达了该矿床的成矿机制、赋存状况和分布规律。

[关键词] 三维地质建模; 可视化; 地质大数据; 锰矿

[中图分类号] P618. 32; TD67 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1000-5943(2018)-04-0291-06

1 引言

黔湘渝毗邻区的南华纪“大塘坡式”锰矿床, 是中国最重要、资源潜力最大的锰矿床类型(周琦等 2013, 周琦等 2016)。贵州省地质局 103 地质大队在近期的研究和勘查中, 取得了重大突破, 发现了贵州松桃道坨、普觉(西溪堡)、桃子坪和高地等四个隐伏的超大型锰矿床, 改变了我国锰矿石依赖进口的格局。这些超大型锰矿床占全球超大型锰矿床总数的 1/3, 属于一种全新的矿床类型, 为形成于 Rodinia 超大陆裂解背景下、南华纪武陵次级裂谷中的古天然气渗漏沉积型锰矿床(周琦等, 2016)。为了揭示该矿床的成矿环境和机理, 需要对典型矿床进行全面解剖和总结。作者以道坨超大型锰矿床为例, 基于精细、全息和实现表达、分析、设计、模拟和决策三维可视化的理念(吴冲龙等, 2011, 2012), 以及系列快速、动态三维地质建模技术(吴冲龙等, 2006; HE Zenwen et al, 2008; 张夏林等, 2010; 刘刚等 2011, 李章林等, 2011; 翁正平等, 2012), 直观、形象地揭示矿

床的地质结构、矿体形态、成矿环境和控矿要素等地质特征, 以及所有这些地质特征的空间分布。

2 道坨超大型锰矿地质简况

为了进行矿床的精细、全息三维地质建模, 需要首先研究和掌握研究区的地质特征及其空间分布, 从中采集准确可靠的空间数据和属性数据。

2.1 黔东锰矿资源富集区地质概况

黔东锰矿资源富集区的地层分布状况与区域一致。但大型和超大型矿床均分布于走向 NEE 的武陵次级裂谷(Ⅲ级地堑盆地)中的杨家湾、道坨、大塘坡和西溪堡等多个Ⅳ级地堑盆地中。巨大的锰矿体赋存于南华系底部的大塘坡组底部黑色岩系——大塘坡组第一段中(Nh₁d¹), 所有的矿体均呈现为 NEE 向展布的长透镜体和似层状体。

南华系自下而上为下统两界河组、铁丝坳组、大塘坡组和上统南沱组。据研究(袁良军等 2013), 两界河组和铁丝坳组的含砾砂岩相当于 Sturtian 冰期沉积, 而南沱组的含砾砂岩相当于

[收稿日期] 2018-09-20 [修回日期] 2018-11-16

[基金项目] 贵州省科技计划项目《锰矿勘查与开发大数据管理与智能处理系统研发应用》(黔科合支撑[2017]2951), 贵州省锰矿资源预测评价科技创新人才团队(黔科合平台[2018]5618)及贵州省地矿局项目《黔东北若干超大型锰矿床三维地质建模与数据挖掘》联合资助。

[作者简介] 张夏林(1975—), 男, 教授, 博士, 从事地学三维信息系统研究工作。

Marinoan 冰期沉积,大塘坡组则属于 2 个冰期之间的间冰期沉积。

重点研究和解剖的道坨超大型隐伏矿床,发育于梵净山穹窿东北猴子坳向斜的Ⅳ级道坨地堑盆地中,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”(周琦等 2106)的特点。同沉积期构造线呈现 NEE 走向,褶曲和断裂构造相对简单;后沉积期构造线则呈 NNE 向走向,褶曲和断裂构造相对复杂一些。成矿期(准同沉积期)构造格架与成矿期后(后沉积期)构造格架的叠加关系,以及成矿期后(后沉积期)构造格架对含矿岩系的可能影响和破坏,有待通过三维可视化建模技术来进一步揭示。

2.2 道坨超大型锰矿床地质概况

赋存于炭质页岩中的道坨矿床的锰矿体,形态简单,呈层状、似层状缓倾斜产出,与围岩的产状一致。其北西部矿体走向 SE-NW,倾向 SW,倾角 3°~15°;南东部矿体走向 NE-SW 向,倾向 NW,倾角 5°~19°。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两种,矿石构造主要有条带状构造、块状构造、网脉状构造和气泡状构造等四种。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%。与此相应,菱锰矿矿石的构造类型也由条带状构造、转变为块状构造,再转变为含气泡状构造。该区成矿后断层构造发育,例如 F1 断层和 F3 断层就发育在矿体上覆地层中,由于断层形成时间晚于成矿时间,加上断层发育在浅部。对矿体没有造成破坏作用。

3 道坨超大型锰矿床精细全息三维地质建模

相对于框架建模而言,精细三维地质建模是指采用矿区准确而详实的勘探资料,建立跟地质实际情况尽可能吻合一致的高分辨率三维地质模型;而全息是指采用多源、多类、多量、多维、多尺度、多时态和多主题特征的矿区勘查资料,构建包含地表模型、地层模型、构造模型、矿体模型等种类繁多的子模型(张夏林等 2012)。本文以道坨

超大型锰矿床为例,探索基于详实勘探资料开展精细、全息的矿床三维地质模型构建方法。

3.1 锰矿床三维地质建模方法

典型锰矿的精细全息三维地质建模,是采用基于 TIN-CPG 混合数据结构(Zhang Zhiting et al. 2013,唐丙寅等 2017)和地质知识驱动的系列剖面拓扑推理方法(Perrin M 2005),并且与层面建模方法相结合来实现的。之所以如此,是由于多期次构造叠加把南华古裂谷改造成为面目全非的残留盆地,使得本来结构较为简单的锰矿床变得十分复杂,矿床的空间展布方向及其与后沉积构造的关系难以直观地识别。同时,为了快速准确地构建矿床的构造-地层格架模型,需要采用三角网(TIN)三维数据结构,而为了精细刻画矿床和矿体的各种要素及其相互关系,需要采用角点网格(CPG)三维数据结构。由于 TIN-CPG 混合数据结构集中地体现了 TIN 数据结构和 CPG 数据结构的优点,因此也就成为本文开展典型矿床三维地质建模的首选数据结构。

建模的流程大致如下(图 1):第一步,根据矿床边界确定建模范围,再利用系列勘探剖面构建出一个简单的框架模型,可称为“概略三维地质体”;第二步,从主题数据集中提取、组织并导入详细的钻孔、样品、剖面和地形等三维模型数据集;第三步,采用知识驱动的系列剖面拓扑推理与层面建模结合法,基于 TIN 数据结构分别构建细致的矿区地表模型和地下地质结构面(格架)模型,并将其转换为 TIN-CPG 混合数据结构模型;第四步,利用各个地质结构面反复切割“概略三维地质体”,便成为复杂的空间格架与属性融合的三维地质实体模型;第五步,把地表模型与地下模型套合起来,成为地上地下一体化的三维地质模型。

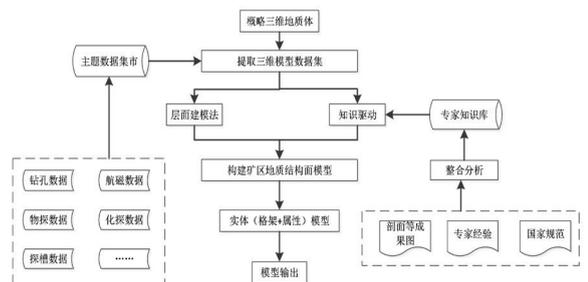


图 1 高精度全要素三维地质体建模方法的整体实现流程

Fig. 1 General process of high precision total factor 3D geological body modeling method

3.3 锰矿床三维地质建模过程

建模工作基于 QuantyMine (2008; 张夏林等) 三维矿业件平台进行, 依次建立了地表模型、地层模型、矿体模型和断层模型, 并探讨了地上一体三维可视化建模方法。

3.3.1 地表建模

用于地表实体模型构建的地形高程数据, 来自于大比例尺矿山地形地质图和高分辨率遥感图片。数据的采集方法是: 首先把矿山地形地质图导入到 QuantyMine 平台中, 对有高程值的等高线进行三角剖分, 得到代表地形地貌的三角形网格; 然后对三角形网格进行高程渲染, 得到高分辨率的地表模型。为了使地表模型的信息量更加丰富, 形象更加直观, 可对其进行高分辨率卫星照片的地表纹理映射。地质图包含地壳表层的岩石分布、地层年代、地质构造、岩浆活动等地质信息。遥感影像可用于识别较大规模的断裂和地层, 也能提供隐伏矿体预测的有效信息。将遥感数据与地形数据结合, 可以真实地表达地表地形地貌; 而将地质图与地形数据叠合, 实现地质、地理一体化, 可以更精细地反映地质现象 (何珍文等 2012)。图 4 为采用高分辨率航天遥感图像纹理映射的三维地表实体模型。



图 4 采用高分辨率航天遥感图像纹理映射的地表模型

Fig. 4 Surface model of high resolution aerial remote sensing picture texture mapping

3.3.2 地层建模

地层三维模型能直观地揭示矿体产状及矿体与围岩的相互关系。其构建先与地表模型分开进行, 然后合成为一体。考虑到矿床地质结构的复杂性, 为了提高建模效率, 需要先构建一个简化的框架模型, 即“概略三维地质体”, 然后逐步进行细节刻画并嵌入属性数据。其做法是: 先把勘探线剖面图坐标转换为模型坐标, 提取地层边界线进行处理, 再通过钻孔数据 (或钻孔柱状图) 对比来校正建模区域的范围, 利用系列剖面进行简单的内插外推, 构建出一个粗略的框架模型。由于

地质体本身是一个非均质、非连续的三维空间实体, 而勘探工程所揭露地质信息有限, 所拥有的地层属性数据和空间数据通常不很充分, 要在剖面和钻空间进行矿床三维地质模型的精细刻画, 需要在利用地质知识进行拓扑推理的基础上, 利用克里格法或者最小距离平方反比等插值方法进行内插或外推 (翁正平等 2012), 依次建立各个地层界面、分层界面、尖灭岩层界面及透镜体界面的空间模型。然后由下而上用各个地质界面 (曲面) 依次剪切“概略三维地质体”, 同时给每个层位赋予相应的地质属性和代号。最初的“概略三维地质体”经过各个地质分界面反复切割, 便成为复杂的空间格架与属性融合的三维地质实体模型。最后, 在对所建立的模型进行检查、验证和交互修正之后, 以地表三维模型的边框为准, 对整个矿床三维地质模型进行边界裁剪成型 (图 5)。

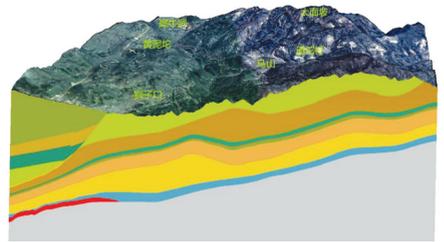


图 5 黔东北松桃锰矿田道坨超大型锰矿的三维地层模型

Fig. 5 3D strata model of Daotuo super-large manganese ore in Songtao manganese field, northeast Guizhou

3.3.3 矿体建模

矿体建模的目的是表达矿体及其矿石相的三维结构和空间展布特征。在建模过程中, 首先逐一从数据集市勘探剖面数据文件中, 提取各套地层和矿体的轮廓线框数据, 并根据空间位置及几何形态确定其在空间上的对应关系 (李章林等 2011)。若相邻剖面上矿体轮廓线框之间的形态有很大差别, 为了合理、准确地表达矿床和矿体在地层中的空间分布, 需要在相邻剖面的线框之间添加控制线 (图 6)。然后, 对边界上的两个线框进行封闭处理。处理方式包括直接封闭线框, 或者按照一定比例对边界线框进行外推处理。在完成侧面和边界面构建之后, 可形成一个封闭的空间, 并基于这一系列封闭面完成模型的构建。最后, 从数据库中提取品位、矿石结构构造和矿石相等属性数据, 并采用随机模拟法嵌入格架模型中, 经过有效性和封闭性进行校验, 便得到最终的三维矿体模型 (图 7)。

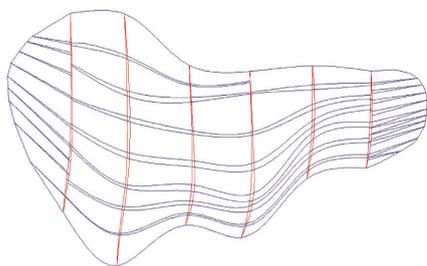


图 6 矿体轮廓线添加控制线

Fig. 6 Orebody outline add control line

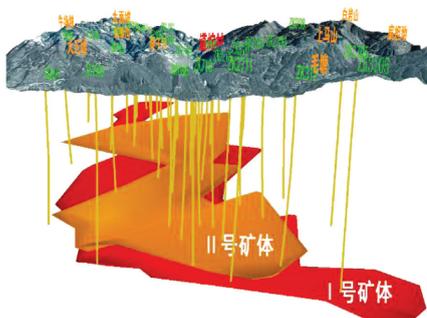


图 7 运用添加控制线建立的矿体模型

Fig. 7 Orebody model by add control line

3.3.4 断层建模

首先要识别出断层完整的空间形迹,建立起断层的地质模型和概念模型。在钻孔中识别断层,是断层精细建模的基础,也是提取断层数据的重要来源。利用从钻孔中获取的断点数据,结合纵横勘探剖面的分析和综合结果,可以识别断层性质、断距和两盘地层产状,推断钻孔间断层的展布方式等(图 8)。断层数据在空间中表现为空间曲线、空间点和空间曲面等形式。为了保证工作精度和合理性,需要从不同勘探工程中获取数据,

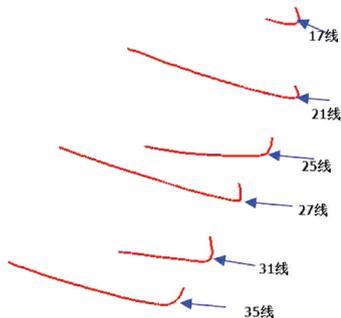


图 8 道坨超大型锰矿系列勘探剖面上的 F3“W”形铲式重力断层形迹

Fig. 8 F3“W” shovel-type gravity fault trails in the exploration sections of Daotuo super-large manganese ore series

经过坐标变换和投影变换成为统一的空间数据。通过对断层产状和性质的综合解释,可以组合出符合地质规律的断层面模型。当断层规模较大时,能够在相应的建模尺度中表达出来时,就作为独立的断层体处理,并通过多个空间曲面的围合或切割成形。如图 9 所示,所获得的 F3 断层模型,是一个正面呈“W”形,侧面为犁状的典型重力滑脱构造。

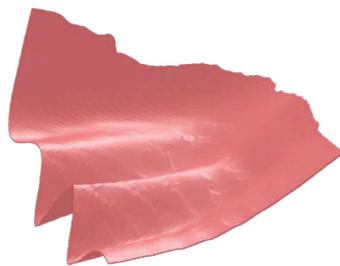


图 9 道坨超大型锰矿床 F3 典型“W”形犁式重力滑脱断层(体)建模结果

Fig. 9 Typical “W” plow-type gravity slippage fault plane (body) modeling results of Daotuo super-large manganese deposit F3

3.3.5 地层、矿体、断层一体化

矿床三维地质精细全息建模的目标,是实现地层-矿体-断层和空间结构-属性特征的一体化。其基本要领是:在断层体三维模型的基础上,将已经建好的断层体顶面作为断层上盘的底面参与上盘建模,而将已经建好的断层体底面作为下盘的顶面参与下盘建模(图 10);然后,用矿体的顶

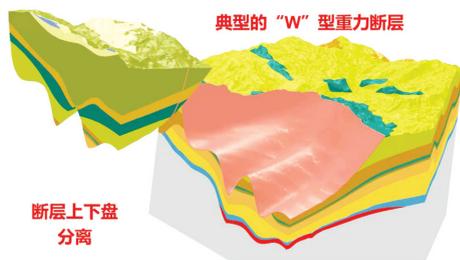


图 10 F3 重力滑脱断层分别与上下盘地层融合建模

Fig. 10 Fusion modeling of F3 gravity slippage fault with upper and lower strata

底界面分别剪切所在的地层体并嵌入其中,并利用随机模拟方法融入岩性、岩相、成分、品位矿相等各种属性。最后,把上下盘地层、矿体连同断层“体”套合起来,即成为完整的矿床三维地质模型(图 11)。经过这样的细致处理后,地层、矿体与断层就能紧密无缝地贴合在一起了,南华系、震旦系和寒武系的多期次叠加变形,在该模型中也得到了精细的刻画。成矿地质体的空间结构和重力

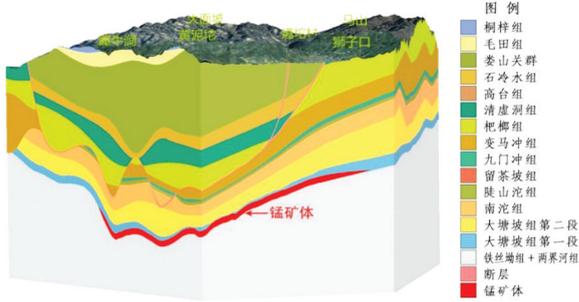


图 11 道坨超大型矿床 F3 重力滑脱断层与地层体一体化建模结果

Fig. 11 Integrated modeling of gravity slippage fault and stratigraphy in Daotuo super-large deposit F3

滑脱构造系统,及其对地层及矿体的交切、改造关系和可能的破坏,也都直观而形象地表达出来了。

4 结论

综上所述,本文以道坨超大型锰矿床为例,给出了一种矿床精细全息三维地质建模的思路与方法;即以遥感影像纹理的映射来描绘地表形貌,以断层形迹的界面来约束地层延续,以岩层界面的剪切来刻画地层细节,以矿体特征的变化来充实地层结构,再以随机模拟的方式来融合属性信息,然后在统一的坐标系中将几个模型叠合起来,实现断层、地层、矿体的一体化建模,以及空间结构与特征属性的一体化建模。

实践结果证明,基于上述思路与方法建立的道坨超大型锰矿床三维地质模型,包含着精细的地质结构和全面的属性信息,直观而形象地表达了矿床和矿体的三维复杂结构、矿体与围岩之间的叠覆关系、燕山期形成的典型“W”形犁式重力滑脱构造,并且揭示了该重力滑脱构造系统与地层及矿体的交切关系和可能的影响、破坏。

显然,开展精细全息的大比例尺的矿床地质三维可视化建模,能够有效地实现对矿床复杂地质结构的表达,以及同成矿期构造和后期构造的表达,所生成的矿床三维地质模型既符合其空间结构的实际状况,又具备准确的地质科学涵义。这样的三维地质模型,有助于认识该矿床的成矿机制、赋存状况和分布规律,从而可为这类矿床的深部及外围三维成矿预测提供直接依据,还可作为地质大数据的可视化载体和分析平台。

[参考文献]

HE Zhenwen, WU Chonglong, TIAN Yiping, et al. , 2008. Three-dimensional Reconstruction of Geological Solids Based on Section Topology Reasoning [J]. Geo-spatial Information Science, 11 (3): 201-208.

Perrin M, Beiting Z, Rainaud J, et al. , 2005. Knowledge-driven applications for geological modeling [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 47 (1/2): 89-104.

Zhang Zhiting, Wu Chonglong, Mao Xiaoping, et al. , 2013. A research on method and technique of 3-D dynamic structural evolution modeling of fault basin, International Journal Oil, Gas and Coal Technology, 6 (1/2): 40-62.

何珍文,吴冲龙,刘刚,等. 2012. 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 (6): 46-51.

李章林,吴冲龙,张夏林,等. 2011. 带精细属性特征的矿体实体模型动态构建方法 [J]. 中国矿业大学学报, 40 (6): 990-994.

刘刚,吴冲龙,何珍文,等. 2011. 地上一体化的三维空间数据库模型设计与应用 [J]. 地球科学-中国地质大学学报, 36 (2): 367-374.

邵玉祥. 2009. 三维地质空间点源数据仓库系统构建及关键技术研究 [D]. 中国地质大学 (武汉), 博士学位论文.

唐丙寅,吴冲龙,李新川. 2017. 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, 38 (4): 1218-1225.

翁正平,何珍文,毛小平,等. 2012. 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, 31 (6): 59-66.

吴冲龙,何珍文,翁正平,等. 2011. 地质数据三维可视化的属性、分类和关键技术 [J]. 地质通报, 30 (5): 642-649.

吴冲龙,翁正平,刘刚,等. 2012. 论中国“玻璃国土”建设 [J]. 地质科技情报, 31 (6): 1-8.

袁良军,周琦,杜光映,等. 2013. 贵州松桃西溪堡大型锰矿床 F1 犁式断层特征及对锰矿体破坏与保存作用探讨 [J]. 贵州地质, 30 (3): 170-176.

张夏林,吴冲龙,翁正平,等. 2010. 数字矿山软件 (QuantyMine) 若干关键技术的研发和应用 [J]. 地球科学-中国地质大学学报, 35 (2): 303-310.

张夏林,蔡红云,翁正平,等. 2012. “玻璃国土”建设中的矿山高精度三维地质建模方法 [J]. 地质科技情报, (6): 27-31.

张夏林,方世明,汪新庆,等. 2000. 数据仓库技术在国土资源信息系统中的应用探讨 [J]. 计算机工程, 27 (9): 139-142.

周琦,杜远生,覃英. 2013. 古天然气渗流沉积型锰矿床成矿系统与成矿模式——以黔湘渝毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿为例 [J]. 矿床地质, 32 (3): 457-466.

周琦,杜远生,袁良军,等. 2016. 贵州铜仁松桃锰矿国家整装勘查区地质找矿主要进展及潜力预测 [J]. 贵州地质, 33 (4): 237-244.

周琦,杜远生,袁良军,等. 2016. 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, 41 (2): 177-188.

Main Geologic Characteristics and Prospecting Prediction of Dawu Manganese Deposit in Songtao, Guizhou

ZHANG Ping-yi, ZHANG Sui, YUAN Liang-jun, ZHANG Ren-biao, ZHENG Chao

(103 Geological Party, Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development of Guizhou Province, Tongren 554300, Guizhou, China)

[Abstract] Dawu manganese was a middle scale manganese explored and accessed by 103 geological party in 1970s. the manganese deposit occur in the black rock series bottom of the 1st section of Datangpo formation, Nanhua series, the orebody occur bedded and stratoid, the seam strike NE 70°, the average thickness is 1.42 m and the average grade is 18.85%. in the mining area, from NW to SE, the manganese-bearing rock series and manganese orebody developed from nothing. In Dawu manganese deposit, there are only transient phase and marginal facies kept in the ancient natural gas seepage sedimentary metallogenic system, the intermediate phase should in Qigongpo area but be eroded absolutely. By tectono paleogeography recovery study, it's inferred the length of Dawu graben basin is more than 14 km, the width is about 4 km and distribute along NE 70°. Therefore, it has potential to found middle-large scale manganese deposit in Niushutang, Daa-Mengxi area in NE of the basin.

[Key words] Manganese deposit; Deposit characteristics; Prospecting prediction; Dawu, Songtao; Guizhou

(上接第296页)

Study of Fine Holographic 3D Geological Modeling of Daotuo Super-large Manganese Ore in Guizhou

ZHANG Xia-lin¹, WU Chong-long¹, ZHOU Qi², ZHU Fu-kang¹, YUAN Liang-jun³, ZHAO Ya-tao¹, YANG Bing-nan³, LI Zhang-lin¹, WENG Zheng-ping¹, ZHANG Zhi-ting¹, ZHANG Quan-li²

(1. School of Computer Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

2. Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Guiyang 550004, Guizhou, China;

3. 103 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Tongren 554300, Guizhou, China)

[Abstract] The Daotuo superlarge manganese deposit in Guizhou Province belongs to the 'Datangpo type' manganese deposit, which has a unique ore-forming environment and mechanism in the world. In this paper, it studies the comprehensive application of the detailed exploration data of the Daotuo superlarge manganese ore and constructs the method of high-precision 3D geological model. A 3D model of ground to underground integration of the Daotuo superlarge manganese deposit is established, which contains rich geological property information and finer geological space information, which expresses the three-dimensional spatial distribution of the ore bodies, the overlapping relationship between ore bodies and wall rock, the spatial form of the typical "W" shovel-type gravity slippage structure formed by the Yanshan period, and the intersection relationship between the gravity slippage tectonic system to the stratum and ore bodies, intuitive expressed the mineralization mechanism of the deposit, status of occurrence and distributing regulation.

[Key words] 3D geological modeling; Visualization; Geological big data; Manganese ore