

# 3D Visualization Modeling and Mineralization Space Distribution Space Distribution Investigating of Xialei Mn Deposit

Yong Li<sup>1,2</sup>, Xiancheng Mao<sup>1,2\*</sup>, Jia Ren<sup>1,2</sup>, Shijuan Gao<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>MOE Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Central South University, Changsha

<sup>2</sup>School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha

Email: [liyong05301@163.com](mailto:liyong05301@163.com), [xcmao@126.com](mailto:xcmao@126.com)

Received: Oct. 22<sup>nd</sup>, 2014; revised: Nov. 26<sup>th</sup>, 2014; accepted: Dec. 3<sup>rd</sup>, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

This paper is based on the basic ideas that refactored 3D geologic body surface model form 2D geological line string model and the geologic body 3D structure model was built, which was helpful to analyze the spatial distribution relationship between the formation and ore bodies. The perspective of ore bodies influenced by folding was proved from 2D and 3D. On the basis of the geological database, the manganese grade test half variation model was built in geostatistics method. Analyzing the mineralization space structure, the distribution form and grade change rule of spindle, secondary axial and short shaft were finished, which provides the basis and technological supporting for prospecting the rationality.

## Keywords

Two-Dimensional Profile, Surface Model, 3D Structure Model, Geological Database, Variation Function

# 下雷锰矿床三维可视化建模及矿化空间结构分布规律分析

李 勇<sup>1,2</sup>, 毛先成<sup>1,2\*</sup>, 任 佳<sup>1,2</sup>, 高士娟<sup>1,2</sup>

\*通讯作者。

<sup>1</sup>中南大学有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙

<sup>2</sup>中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙

Email: [liyong05301@163.com](mailto:liyong05301@163.com), [xcmiao@126.com](mailto:xcmiao@126.com)

收稿日期: 2014年10月22日; 修回日期: 2014年11月26日; 录用日期: 2014年12月3日

## 摘要

本文采用矿区二维剖面线串模型重构三维地质体表面模型的基本思路, 构建了矿区地质体三维结构模型, 并分析矿体与地层的空间分布关系, 以及从二维、三维角度论证矿体受褶皱作用的影响; 以地质数据库为基础, 应用地质统计学理论方法建立锰品位实验半变异函数模型, 进行矿化空间变化结构分析, 获得锰品位在主轴、次轴、短轴方向的分布形态和品位变化规律, 为深部找矿提供依据和技术支持。

## 关键词

二维剖面, 表面模型, 三维结构模型, 地质数据库, 变异函数

## 1. 引言

广西下雷锰矿位于我国最为重要的锰矿成矿区—桂西南成矿区, 是亚洲最大锰矿之一[1]。“八五”以来, 通过实施下雷锰矿床地质科研和各类锰矿勘查项目, 取得了一批成果, 但多仅属于地表或近地表范围的勘查活动, 尽管对深部锰矿找矿有所实践, 但是对深部矿体的控制程度不够, 深部找矿工作至今仍未取得大的突破。因此, 有必要采取现代化技术手段, 结合搜集的矿区资料, 建立下雷深部锰矿三维可视化结构模型, 分析和挖掘锰矿矿化空间结构分布规律, 为矿山的合理开发提供技术支持。

随着科学技术的突破, 已经涌现出一批优秀的三维矿业软件, 如 GoCAD、DataMine、Surpac 等。GoCAD 主要用来对地层和矿体进行三维建模和可视化显示, 人机交互性强, 是国际上公认的主流建模软件; DataMine 主要用来对矿体进行块体模型的建立, 容差性强, 划分块体科学, 针对性强; Surpac 主要用来建立地质数据库并进行矿化空间统计分析, 能建立矿山实验半变异函数实验模型和理论模型并进行显示。本文主要借助 GoCAD、DataMine、Surpac 等各自的优势进行矿山数字化, 建立矿山地层、矿体的三维模型, 并结合地质数据库进行矿化空间分析, 总结矿化空间结构分布规律。

## 2. 下雷锰矿床地质概况

下雷锰矿所处大地构造单元属华南准地台右江再生地槽, 桂西凹陷、靖西~田东隆起、下雷~灵马拗陷为本区的三级构造单元, 一系列东西向的次级褶皱及走向断裂构成本区域的构造格架。该区域出露地层主要有寒武系( $\epsilon$ )、泥盆系(D)、石炭系(C)、二叠系(P)、三叠系(T)和第四系(Q)。与成矿有关的地层主要为泥盆系, 岩性为一套硅质岩、硅质泥岩、含钙质岩组合, 其中部夹有含锰灰岩或碳酸锰矿层。

区域构造位于地州~向都弧形褶皱带上, 该弧形褶皱带主要由一系列线形褶皱及纵向断裂组成, 分布在湖润至巴荷、向都一带, 在区内呈北东~南西展布, 其南部向南西收敛, 北部向北东向呈帚状散开。区域内“下雷式”锰矿沉积成矿后的空间分布, 受主体构造巴荷~湖润背斜及下雷~上映向斜的控制, 区域构造地质图如图1所示。

矿区为一近东西向, 向西端翘起的向斜构造, 矿区内褶皱、断裂均很发育。锰矿的形成来源于海底热液作用, 由构造作用产生的热能和沿构造上侵的辉绿岩体的双重热液叠加于含锰岩系及沉积锰地层遭

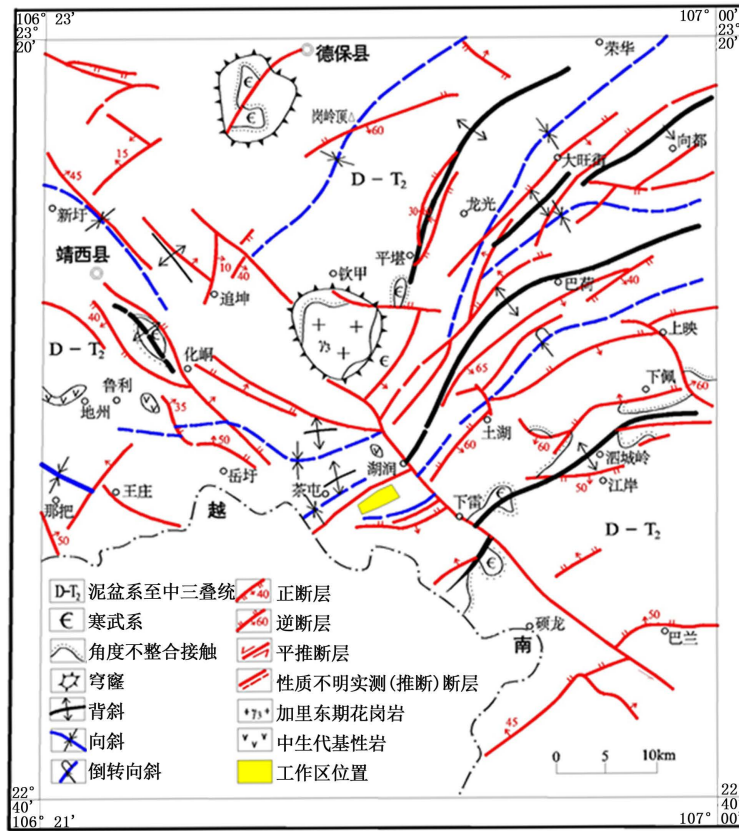


Figure 1. Regional tectonic geological map

图 1. 区域构造地质图

受到变质作用，使原沉积贫锰层进一步富集形成富锰矿层；在次生氧化锰富集阶段，该地区中古生代末上升为陆地，褶皱发育，先形成的原碳酸锰矿层在长期的风化作用下，在近地表部位形成锰帽型优质氧化锰矿[2]。

矿区包括南部、中部、北部三个矿段，有原生沉积碳酸锰矿和次生氧化锰矿组成。锰矿体主要产于上泥盆统五指山组(D<sub>3</sub>w)中，矿体直接顶板为五指山组第三段岩石，直接底板为五指山组第一段岩石，展布于 0 线~37 线之间，在水平投影图上形似“马鞍”。矿体呈层状，共三层，层位稳定，其间有 2 夹层，自下而上为 I 矿层、夹一、II 矿层、夹二、III 矿层。由于工作区内夹二厚度小，一般小于夹石剔除厚度，因此，很难将 II、III 矿层分开，统称为 II+III 矿层。

I 矿层走向延长为 2975~4102 m，0~30 线倾向延伸达 596.91~1810 m，氧化锰矿层厚度为 0.52~1.04 m，平均厚度为 0.78 m，碳酸锰矿层厚度为 0.51~5.88 m，平均厚度为 1.48 m，厚度变化系数为 47.88%，厚度变化属稳定型，锰品位为 10.30%~27.86%，平均品位为 18.90%，品位变化系数为 19.96%；II+III 矿层走向延长为 2955~4165 m，0~30 线倾向延伸达 570.20~1770.60 m，氧化锰矿层厚度为 0.53~3.30 m，平均厚度为 1.16 m，碳酸锰矿层厚度为 0.54~9.13 m，平均厚度为 2.40 m，厚度变化系数为 44.08%，厚度变化属稳定型，锰品位为 11.36%~26.37%，平均为 19.01%，品位变化系数为 17.05%。

### 3. 地层和矿体三维模型的建立

地质体三维结构空间建模是指在计算机环境下与矿床形成和分布相关的各种地质体对象的几何形态和空间分布进行三维定量描述，将地质信息三维可视化，通过计算机建模技术及人机交互构建出表达客

观世界中地质体的几何模型[3]。

### 3.1. 地质体模拟方法选取依据

传统的地质体模型一般仅限于 2D 或者 2.5D 来表达,有自身的局限性,不足以完整地模拟表现一些复杂地质体的空间结构特征,如褶皱、断裂等复杂地质空间结构模型在二维平台上是无法完整地模拟描述出来的;而 GoCAD 是地质领域的真 3D 建模专业软件,是基于一系列互连的曲面提出一种新的地质目标计算机辅助设计方法,以适应地质、地球物理中三维实体与属性建模的需要对空间实体的描述,采用  $F = (x, y, z)$  的数学表达式,能够实现复杂地质构造的真三维空间几何结构。因此,基于多元、多方法集成的思路,采用 GoCAD 与 MapGIS 相结合的地质体三维结构空间建模方法,研究设计了由二维勘探线地质剖面图转换为三维剖面上的地质体轮廓线图,再由三维地质体轮廓线构建三维地质体表面模型的基本思路,构建了下雷矿区的地质、矿体三维可视化结构模型。

### 3.2. 地质数据库的建立

为建立地质体的三维模型,必须先准备好建模用的各种地质原始数据,如勘探工程数据、化验数据、地质图件等。将这些专用于地质建模的数据按照一定的逻辑结构进行组织,即被统称为地质建模数据[4]。该地质建模数据是存储在综合地质数据库中,借助 Surpac 软件进行地质数据库建立。

将地质矿产资料导入到综合地质数据库中,首先必须将纸质介质的地质矿产资料进行数字化,即使是已有的电子资料,通常也需要将其按照综合地质数据库的编码规则来重新进行组织。对下雷锰矿的钻孔资料进行了数字化,下雷地区搜集的实测钻孔、探槽数据包括广西下雷锰矿钻孔柱状图共 449 幅,共收集钻孔 261 个,探槽 37 个。钻孔、探槽数据分别录入开孔坐标数据表、钻孔测斜数据表和化学分析数据三个表格中,数字化完毕后共录入开孔数据 298 条、测斜数据 1877 条、样品化验数据 3040 条等。

下雷锰矿开孔表主要录入了钻孔柱状图中的钻孔编号、X 坐标、Y 坐标、Z 坐标、终孔深度等字段数据,整理好的锰矿开孔数据表部分数据如表 1 所示。

下雷锰矿测斜表主要录入了钻孔弯曲度测量结果表中的内容,主要包括钻孔编号、深度、倾角、方位角等字段数据,整理好的锰矿测斜表部分数据如表 2 所示。

化学分析表主要录入了取样结果表格中的内容,包括样品号、取样位置、样长、真厚度、Mn 品位等字段数据,化学分析数据表部分数据如表 3 所示。

在地质勘探数据表开孔坐标数据表、钻孔测斜数据表、化学分析数据表中,钻孔编号为开孔数据表中的关键字,是其他各表的外键,其他各表通过钻孔编号与开孔坐标数据表相关联,在 Surpac 软件中建立地质数据库。其 E-R 图如图 2 所示,建立的钻孔三维显示效果如图 3 所示。

### 3.3. 地质体和矿体三维模型的建立

整个下雷矿区矿段分布及勘探网工程布置图如图 4 所示,野外实测勘探线工程从右向左依次为 0~37 线分布,整个形状形似“马鞍”,其中 0~22 实测勘探线走向为  $360^{\circ}\sim 180^{\circ}$ ,23~37 实测勘探线走向为  $340^{\circ}\sim 160^{\circ}$ ,工程网间距在基本勘查工程间距内,0 线~30 线基本工程间距为  $200\sim 300 \times 100\sim 200$  m,30 线~37 线基本工程间距为  $100\sim 150 \times 50\sim 100$  m 之内。

广西南宁院提供的共计约 154 幅实测地质勘查剖面图和地形地质图,其属性、拓扑等特性都是不完整的,需要我们进行大量的数字化工作,包括杂线的删除、地层线的完整闭合、地层的拓扑重构以及地形图的等高线高程赋值等工作量。

数字化完成后,在 MapGIS 环境下,对下雷矿区实测勘探线剖面进行地层、矿体圈定,人机交互完成地层、矿体轮廓线的封闭,拓扑重建成区,构建完整的地层、矿体二维闭合线串模型。其中处理完善

**Table 1. Collar table**  
**表 1. 开孔坐标数据表**

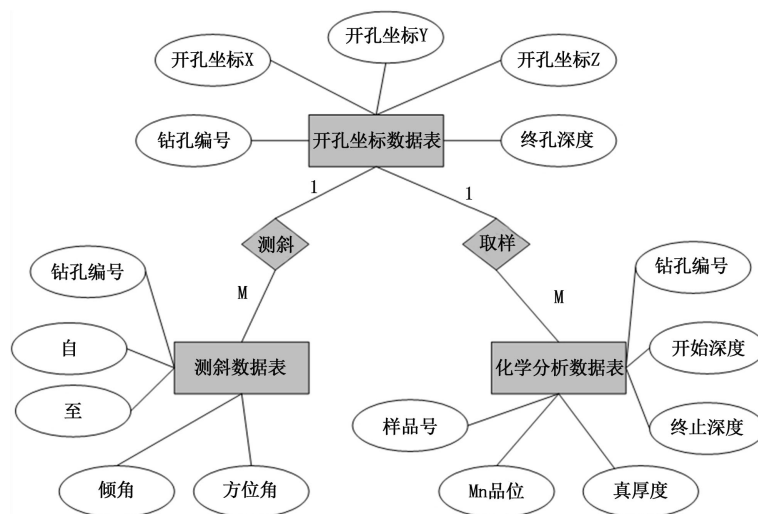
开孔坐标数据表				
钻孔编号	X	Y	Z	终孔深度
CK1	2535100	36368350	342.56	68.62
CK10	2534857	36365043	487.36	315
CK100	2535028	36364554	525.92	174
CK101	2534880	36364609	545.23	119.65
CK108	2535068	36368150	324.6	128.51
CK11	2535122	36366949	387.57	100
CK110	2535242	36366949	336.61	177.98
CK118	2535245	36366949	336.58	205.15
CK138	2535129	36364517	466.04	31.83
CK139	2535026	36364555	526.01	184.02
CK140	2534963	36364578	542.08	73.95
CK142	2535150	36365548	495.97	367.38
CK144	2535589	36366319	436.53	191.12
CK148	2535357	36366348	383.14	188.46
CK149	2535416	36366348	352.49	276.48
CK15	2535368	36366748	345.36	213.51
CK150	2535358	36366348	353.18	172.76
CK154	2535441	36365948	345.55	319.98
CK155	2535409	36365948	359.98	349.65

**Table 2. Survey table**  
**表 2. 测斜数据表**

测斜数据表					
钻孔编号	顺序号	自(m)	至(m)	倾角	方位角
CK704	1	0	50	89°	183°
CK704	2	50	75	88°30'	186°
CK704	3	75	100	88°	245°
CK704	4	100	150	89°	248°
CK704	5	150	202	86°	340°
CK704	6	202	220	85°	25°
CK704	7	220	250	82°30'	17°
CK704	8	250	275	81°	360°
CK704	9	275	300	78°	345°
CK704	10	300	325	76°30'	333°
CK704	11	325	350	74°30'	336°
CK704	12	350	374	73°30'	320°
CK704	13	374	391	72°	326°
CK704	14	391	424	70°	342°
CK704	15	424	450	68°	337°
CK704	16	450	475	86°30'	335°
CK172	1	0	25	65°45'	164°30'
CK172	2	25	50	66°30'	166°
CK172	3	50	75	60°	170°

**Table 3. Chemical analysis table**  
**表 3. 化学分析数据表**

化学分析数据表						
钻孔编号	采样位置(m)					Mn
	样品号	自(m)	至(m)	样长(m)	真厚度(m)	
CK11	4080	87.77	87.78	0.01	0.44	28.54
CK56	5135	151.58	151.61	0.03	0.02	16.23
CK78	470	103.2	103.23	0.03	0.19	12.1
CK518	10071	96.56	96.6	0.04	0.04	2.89
CK95	4940	228.02	228.07	0.05	0.03	9.27
CK97	5102	144.08	144.13	0.05	0.05	4.82
ZK1202	HZK-1202-7	203.8	203.85	0.05	0.57	21.45
CK233	5589	107	107.05	0.05	0.05	23.17
CK178	4839	47.48	47.53	0.05	0.04	7.39
CK101	4677	66.32	66.37	0.05	0.04	11.43
CK61	5544	131.67	131.72	0.05	0.03	14.65
CK74	4123	139.98	140.03	0.05	0.87	1.15
CK178	4588	54.61	54.67	0.06	0.06	5.9
CK637	15092	96.66	96.72	0.06	0.05	36.36
CK231	3653	174.72	174.79	0.07	0.07	30.7
CK32	5260	167.59	167.66	0.07	0.05	18.96
CK45	5303	198.68	198.75	0.07	0.07	6.64
CK602	10832	120.98	121.05	0.07	0.07	24.17
CK79	5359	151.4	151.47	0.07	0.06	14.53



**Figure 2. Geological exploration engineering E-R diagram**  
**图 2. 地质勘探工程 E-R 图**

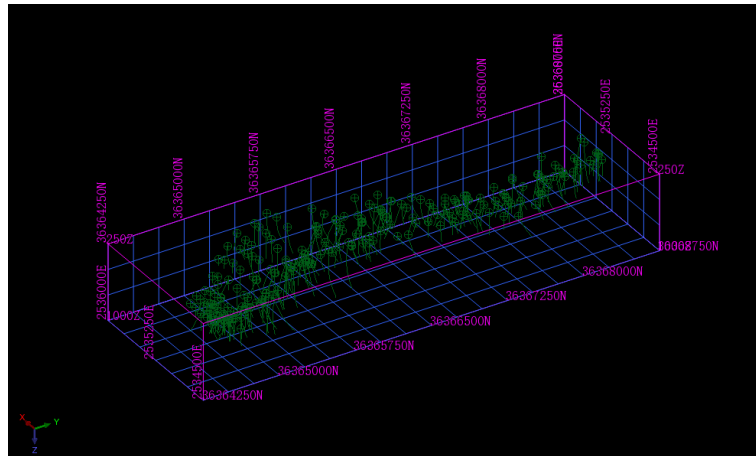


Figure 3. Drilling stereo display effect of Xialei mining area (Surpac environment)  
图 3. 下雷矿区钻孔立体显示效果(Surpac 环境下)

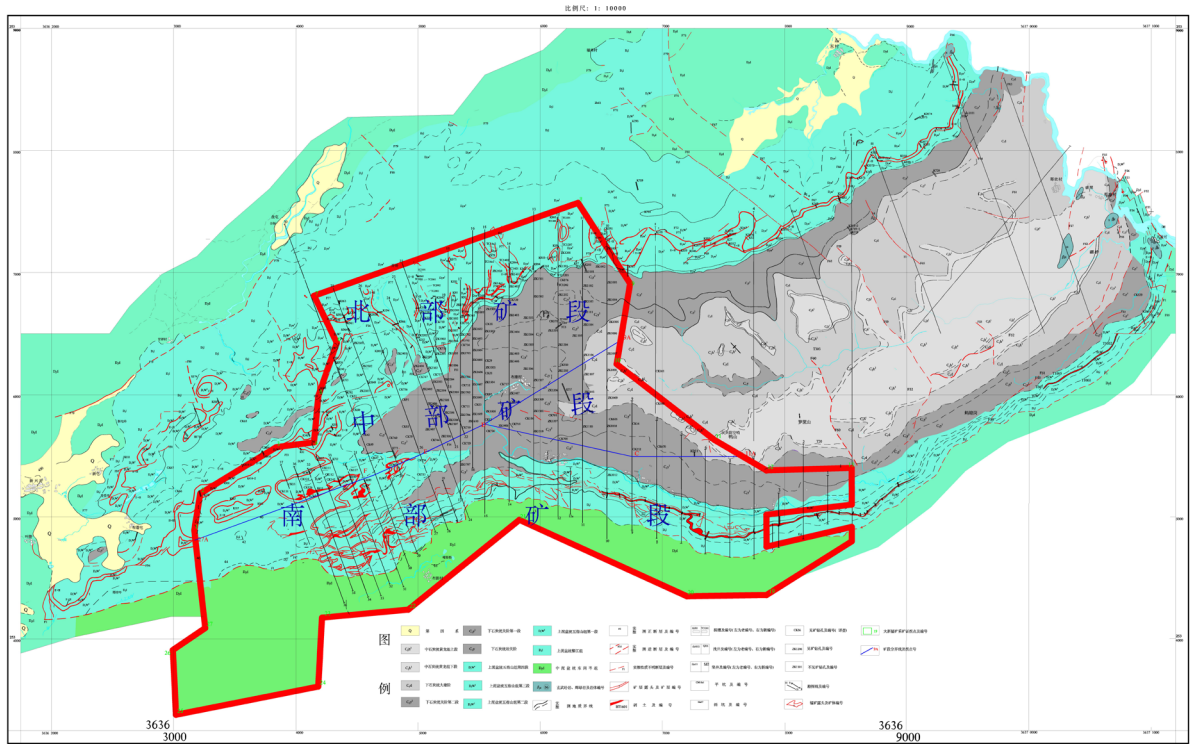
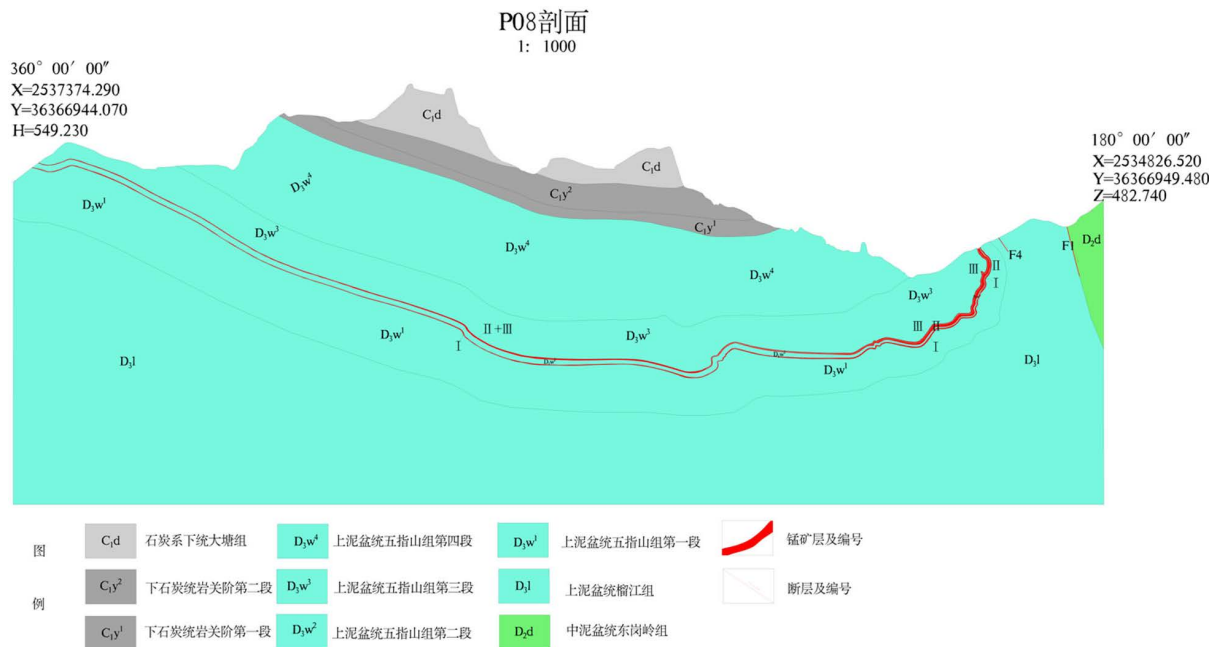


Figure 4. The 37 exploration network engineering plan of Xialei mining area  
图 4. 下雷矿区 37 条勘探网工程布置图

的 P08 剖面如图 5 所示,从图 5 可知下雷矿区地层主要为石炭系下统大塘组(C1d),石炭系岩关阶第一段(C1y<sup>2</sup>),下石炭系岩关阶第一段(C1y<sup>1</sup>),上泥盆系五指山组第四段(D<sub>3</sub>w<sup>4</sup>),上泥盆系五指山组第三段(D<sub>3</sub>w<sup>3</sup>),上泥盆系五指山组第二段(D<sub>3</sub>w<sup>2</sup>),上泥盆系五指山组第一段(D<sub>3</sub>w<sup>1</sup>),上泥盆统榴江组(D<sub>3</sub>l),中泥盆统东岗岭组(D<sub>2</sub>d)。在该二维勘探剖面中会发现矿体受褶皱影响呈现一定的规律性,锰主要富集在向斜部位,但是在整个向斜里弯曲程度不一样的部位锰矿富集程度又不一样,在左侧弯曲平缓的部位,锰矿富集程度较薄,红色锰矿不明显;在右侧弯曲厉害的部位锰分布较富集较厚,红色锰矿凸明显。因此,矿体整



**Figure 5.** Topology checking completely 2-D prospecting line section (P08 section, MapGIS processing)

**图 5.** 拓扑检查完整的二维勘探线剖面图(P08 剖面, MapGIS 处理)

体展现出左薄右厚的规律性, 并受向斜弯曲挤压程度的影响。

提取每条剖面上两个基本控制点信息, 参照剖面的水平、垂直比例因子, 以及剖面经过的转折点坐标, 就可以将二维剖面图中任一点映射为实际地质空间中的三维点, 以此方法实现将二维地质剖面图转为三维地质剖面轮廓线图; 再由三维地质体剖面轮廓线构建三维地质体表面模型算法进行三维矿床模型构建, 在 GoCAD 中人机交互处理, 将三维剖面轮廓线之间相同地层以三角网将其连成面, 由面建体, 推导出对应地质体的三维空间结构模型, 并赋相应的属性和统一命名。以此方法构建了 0~37 实测勘探线间的地层、矿体三维可视化结构模型(如图 6 所示), 观察可知, 整个下雷矿区地层、矿体三维模型形似“马鞍”, 准确地吻合了区域地质图轮廓, 呈现中间大两头小的特征。为了便于观察矿体与地层的关系, 在图 7 中增大了五指山组地层的透明度参数, 矿层设置成红色, 这样便于透过地层看其内部的矿体分布情况, 清晰地可以看出矿层主要赋存在上泥盆五指山组地层中, 被五指山组包裹着, 且顺延该地层分布, 整体性较强, 几乎没有被断层挫断现象, 在勘探线走向和垂直于勘探线的基线方向上连续平展分布, 在基线方向处分布于一个大向斜构造区域, 南强北弱。这说明矿体受褶皱作用影响明显, 在向斜部位富集明显, 受褶皱影响其分布具有一定的规律性。

基于 GoCAD 和 MapGIS 建立的三维地质体模型, 是在统一的坐标系北京 54 坐标下建立起来的, 采用的外业实测剖面数据都是精准到米级精度, 可以确保数据在空间和时间上的一致性, 能够准确无误地反映了研究区地层、矿体的分布情况, 展现地层与矿体的关系, 为矿区下一步工作的展开提供了可靠的数据管理和可视化支持。

### 3.4. 块体模型的建立

块体模型是由规则的小块或单元(称为体元)集合对地质体实体进行描述, 每一个小块或单元都具备具有一定的属性, 比如品位、地层类型等[5] [6]。该模型将线框模型包裹的矿体区域通过一定的立方体进行填充。考虑到矿体厚度较薄, 矿体若建立规格较大则会引入矿体体积的失准。综合考虑勘探网



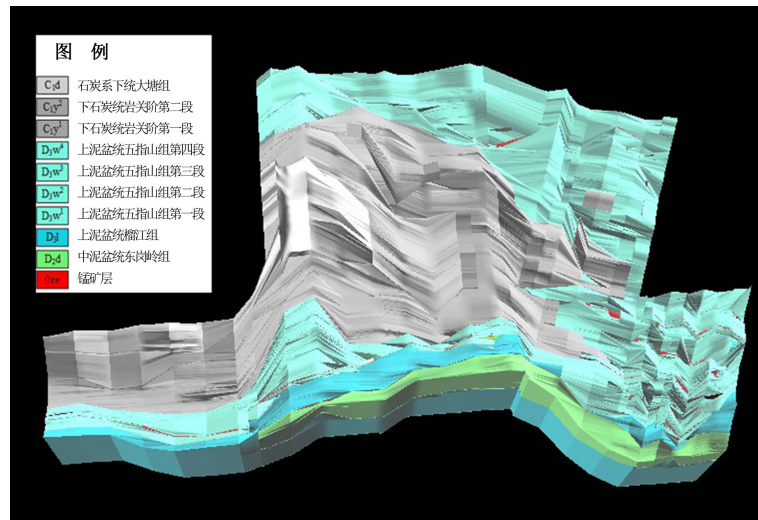


Figure 6. 3-D entity model formation between 0 - 37 line of Xialei mining area (vertical view in the GoCAD)  
图 6. 下雷矿区 0~37 线间的地层三维实体模型(GoCAD 中俯视图)

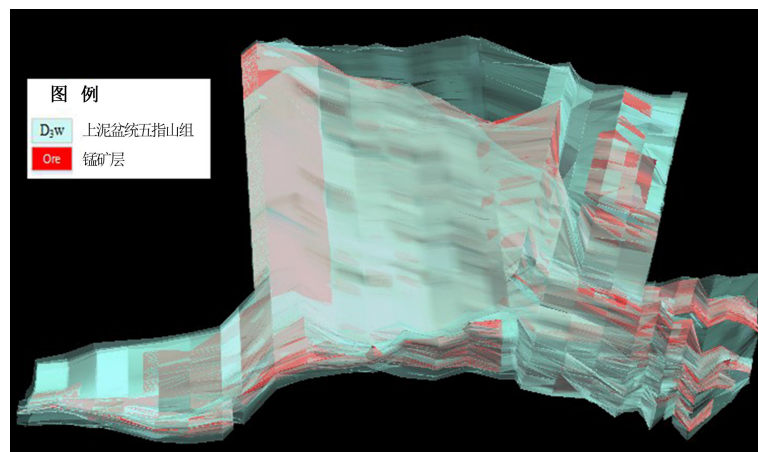


Figure 7. Xialei mining area I ore and D<sub>3</sub>w formation 3-D model (vertical view in the GoCAD)  
图 7. 下雷矿区 I 矿层(Ore)和五指山组(D<sub>3</sub>w)地层三维模型图(GoCAD 中俯视图)

密度、矿体厚度、计算机配置等指标，矿体块体模型宜采用  $10\text{ m} \times 10\text{ m} \times 1\text{ m}$  规格，这样既能很好的模拟了矿体的形态，又不会因为计算机处理数据量过大导致内存不足而加载数据失败。另外还要注意块体模型和地质体模型坐标的统一，选择的坐标范围要能够把矿体所有的块体模型都包含进去，而又不会因为范围太大浪费存储空间。因此，定义了适宜的巨大立方体空间，其中 X 坐标范围 2,534,400~2,539,000，Y 坐标范围 36,362,200~36,371,100，高程 H 范围-200~800 m，这样可以把整个下雷矿区全部囊括进来。以此思想在 DataMine 软件中进行矿体块体模型的建立，将矿体三维实体模型数据(pl 格式)转换为 DataMine 支持的 dxf 格式，人机交互建立矿体块体模型，为以后的资源估算奠定了科学合理的基石作用。建立的 I 矿层块体模型如图 8 所示。

#### 4. 矿体空间变化结构分析

矿体各种标志(如矿石品位、矿体厚度等)在空间上的变化既具有结构性又具有随机性[7]。通过样品

数据统计分析,利用地质统计学的结构分析方法,构造出了矿体标志的变异函数模型,研究矿体标志的空间变化的结构性特征[8],总结矿体的矿化空间结构变化规律,为深部找矿提供决策支持。

#### 4.1. 地质数据样品组合及其统计分析

根据地质统计学的要求,为了保证统计参数是无偏估计量,参与统计的样品数据均具有相同的支架或承载,即样品数据应该具有统一的样品长度[9]。为满足该要求,对矿区所有钻孔中的样品进行组合,形成长度相等的组合样品。在 Surpac 中,根据勘探工程采用长度加权法进行样品组合,选择平均长度 1.01 m 作为组合长度,建立了长度为 1.01 m 的组合样共 2654 个。

对下雷矿区原始样品锰样长和品位、组合样品锰样长和品位进行统计分析,计算其最小值、最大值、平均值、标准差、变化系数,统计结果见表 4 和表 5。

原始样品锰品位的直方图、组合样品锰品位的直方图如图 9 和图 10 所示,无论是原始样品还是组合样品,锰品位的统计分布均表现为近似正态分布。

#### 4.2. 矿化空间结构分布规律分析

地质统计学是利用区域化变量理论为基础,以变异函数为基本工具来研究那些展布于空间并呈现出

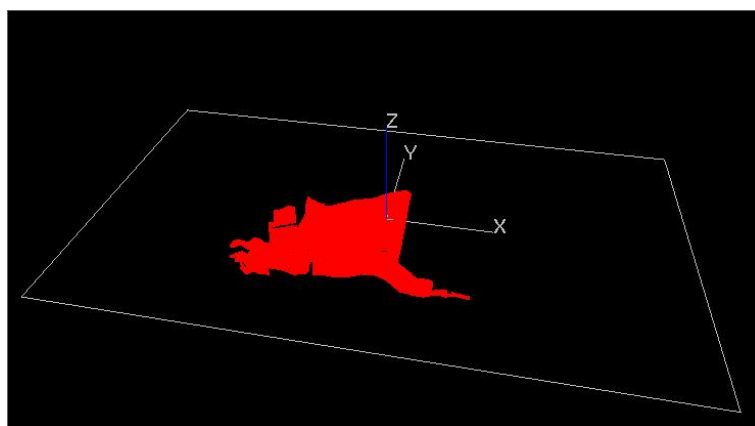


Figure 8. Xialei mining area I ore and D<sub>3</sub>w formation 3-D model (vertical view in the GoCAD)

图 8. 下雷矿区 I 矿层(Ore)和五指山组(D<sub>3</sub>w)地层三维模型图(GoCAD 中俯视图)

Table 4. Long borehole sample assay Mn table in mining area

表 4. 矿区钻孔样品化验 Mn 样长统计表

样品类型	样品数(个)	最小值(m)	最大值(m)	均值(m)	标准差	变异系数
原始样品	3040	0.01	3.16	1.013250	1.084519	1.070337
组合样品	2654	0.76	3.01	1.010000	0.049729	0.409058

Table 5. Mn grade statistics of drilling samples test in mining area

表 5. 矿区钻孔样品化验 Mn 品位统计表

样品类型	样品数(个)	最小值(%)	最大值(%)	均值(%)	标准差	变异系数
原始样品	3040	0.29	54.02	19.124611	7.823077	0.409058
组合样品	2654	0.53	46.75	20.712500	6.560648	0.316748

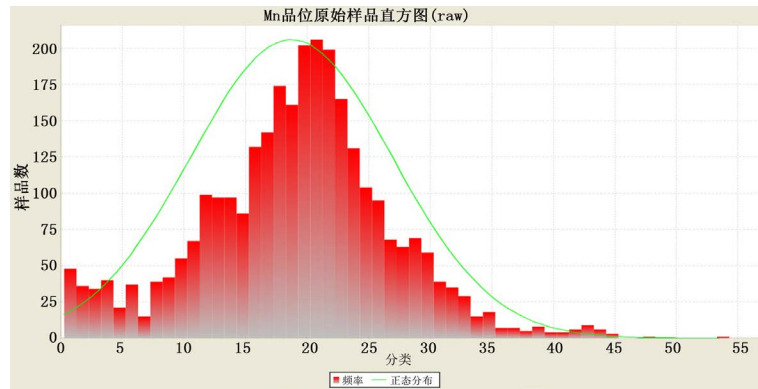


Figure 9. The original sample Mn grade histogram

图 9. 原始样品 Mn 品位直方图

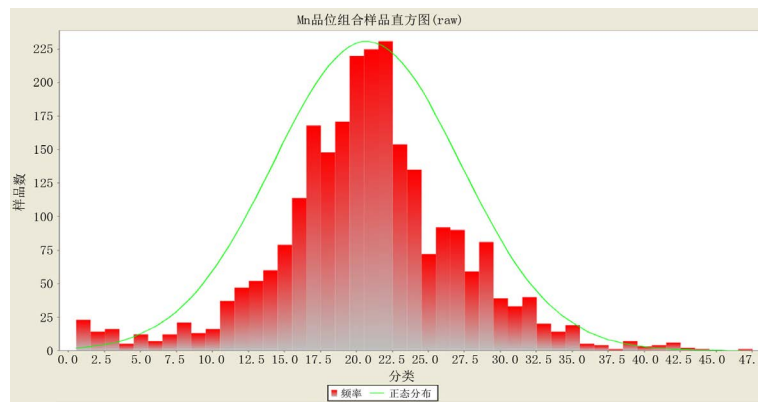


Figure 10. Composite sample Mn grade histogram

图 10. 组合样品 Mn 品位直方图

一定的随机性和结构性的自然现象(包括地质现象)的科学[10]。该方法已经成熟的应用到矿体模拟软件中,能够研究矿体地质规律,进行矿床模拟,并制定最佳的实施方案,与传统方法相比,它具有无偏性、最佳性等[11] [12]。

以全矿区经过特异值处理的组合样品为原始数据,以锰品位为区域化变量,采用球状模型,进行各个方向角度旋转,计算矿体在各个方向的变异函数,调节滞后距,从中找到最佳的实验变异函数,并确定最佳滞后距为 9 m。

以最佳滞后距计算各个方向变异函数,从中搜索出变异椭球体长轴、次长轴、短轴的方位作为基本思路,来确定理想的锰品位变异椭球体。首先在任意一个方向上,采用 9 m 滞后距,角增量选择  $15^\circ$ ,计算全方向(24 个)实验半变异函数,变程越大,越具有较大的空间自相关距离, Mn 品位的空间变化越慢,这样确定最大变程的方向就是椭球体主轴所在的方向。因此按照这种方法确定变异椭球体长轴所在的方向角为  $162.5^\circ$ ,倾伏角为  $20.2^\circ$ 。

接下来进一步确定椭球体的次长轴、短轴的方位,在垂直于主轴的垂直面上,角增量继续选择  $15^\circ$ ,做一系列试验半变异函数,从中找出最大变程的方向即为次长轴方向,经试验得出最佳的次长轴方位角为  $342.2^\circ$ ,倾伏角为  $69.7^\circ$ ;同样的方法继续确定椭球体短轴方位角为  $72.4^\circ$ ,倾伏角为  $0.07^\circ$ 。

对最终确立的实验变异椭球体三个轴方向实验半变异函数进行结构分析,建立拟合球状模型函数曲线,找到最佳拟合效果,得到长轴、次长轴、短轴方向的实验半变异函数模型(如图 11),根据拟合结果得到了锰品位空间变异椭球体的参数,其块金值、基台值、滞后距变现为几何异向性,如表 6 所示。从

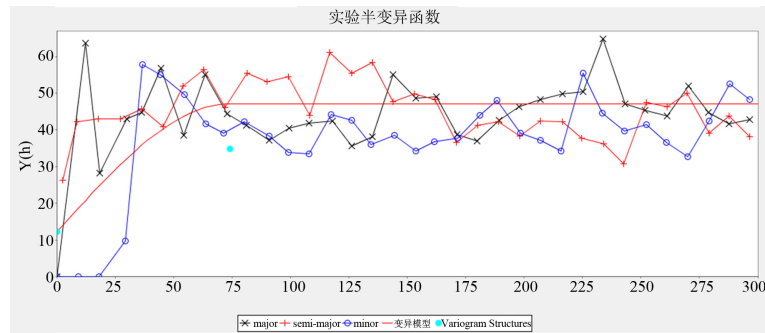


Figure 11. Major axis, semi major axis and minor axis variation function of variation ellipsoid

图 11. 变异椭球体的长轴、次长轴、短轴方向变异函数

Table 6. Spatial variation ellipsoid parameters on Mn grade

表 6. Mn 品位空间变异椭球体的参数

Mn 品位计算方向(方位角 $\angle$ 倾伏角)	块金值	基台值	变程(m)
长轴(162.5° $\angle$ 20.2°)	12.31	41.652	75
次长轴(342.2° $\angle$ 69.7°)	12.31	41.652	42
短轴(72.4° $\angle$ 0.07°)	12.31	41.652	25

表 6 中可以计算长轴与次长轴之比为 1.785，长轴与短轴之比为 3，并依据矿体的产状特征，可以发现椭球体的长轴、次长轴、短轴方向分别与矿体的倾向、走向和垂向方向相符合。

通过上述实验半变异函数结果和理论变异函数曲线进行分析，可以得知：1) 锰品位在倾向和走向方向的变异函数表现出一定周期的上下波动，并没有出现连续单调递增的现象，表明沿矿体走向和倾向有一定的孔穴效应；2) 锰品位表现为几何异向性，具有相同的基台值而变程不同，与实际矿化地质条件相符合，这样有利于找出椭球体所在变异方向的变异比值；3) 锰品位在倾向上连续性较好，变化速度较慢，矿化规律较强，变程在达到约 75 m 的范围内，锰品位均具有一定的空间相关性，但是在垂直方向上连续性较差，变化速度较快，变程到 25 m 时，空间相关性消失，与矿体厚度较薄相符合。

## 5. 总结

1) 运用二维转三维方法，解决了地质剖面二维格式转换到三维格式的技术问题，借助国际主流建模软件 GoCAD 构建了下雷矿区地层、矿体的三维可视化结构模型，从三维空间展示了整个矿区的地层、矿体的变化特征，并分析了矿体与地层的空间分布关系，以及从二维和三维角度总结了矿体自身特征和受褶皱挤压作用的影响规律，为后期指导矿山地质勘探工作提供了有效的技术支持。

2) 依据三维可视化模型结果和地质统计学理论对锰品位进行矿化空间结构分析，能够分析找出锰矿分布所在的最大主轴、次主轴、短轴方向，可以更加直观地分析得出锰品位在倾向、走向、垂向上的空间分布形态、品位变化规律等，这样能够为深部找矿提供决策支持，为深部锰矿开采的进一步实施起到指导作用。

## 基金项目

国家“十二五”科技支撑计划课题(编号：2011BAB04B10)。

## 参考文献 (References)

- [1] 刘作泳, 曹人浩 (1998) 广西锰矿资源开发利用现状及对策. *中国锰业*, 4, 1-5.

- [2] 李升福, 王泽华, 李朗田等 (2009) 桂西南优质锰矿成矿机理分析. *资源环境与工程*, **4**, 363-370.
- [3] 毛先成, 唐艳华, 赖健清等 (2011) 凤凰山矿田成矿地质体三维结构建模与空矿地质因素分析. *地质学报*, **1**, 1507-1519.
- [4] 毛先成, 邹艳红, 陈进等 (2010) 隐伏矿体三维可视化预测. 中南大学出版社, 长沙, 47-68.
- [5] Houlding, S.W. (1994) 3D geoscience modeling-computer techniques for geological characterization. Springer-Verlag, Berlin, 1-309.
- [6] Houldig, S.W. (2000) Practical geostatistics, modeling and spatial analysis. Springer-Verlag, New York and Heidelberg.
- [7] 李岭 (2004) 地质统计学及其在某铜矿山储量计算中的应用. *矿业研究与开发*, **5**, 21-23.
- [8] 孙洪全 (1990) 地质统计学及其应用. 中国矿业大学出版社, 江苏, 1-282.
- [9] 万昌林, 朱利平, 高祥 (2002) 地质统计学评估福建某铜矿资源. *金属矿山*, **6**, 140-143.
- [10] 侯景儒 (1997) 中国地质统计学(空间信息统计学)发展的回顾与前景. *地质与勘探*, **1**, 53-58.
- [11] 李春民, 李仲学, 僧德文等 (2004) 三维地矿工程体视化技术. *矿业研究与开发*, **6**, 50-53.
- [12] 黄厚辉 (2007) MATLAB 平台下基于克立格理论的固体资源储量估算系统的开发. 成都理工大学, 成都.