doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2013.01.006

# 虎头崖铅锌多金属矿床矿体 三维空间变化结构及分布规律

曹 芳,毛先成,邹艳红,赵 莹,邹品娟,吴泽权 (中南大学地球科学与信息物理学院,长沙 410083)

**摘要:** 文章利用 Vulcan 和 Datamine 三维可视化软件建立了虎头崖铅锌多金属矿床矿体的三维 实体模型、块体模型及地层三维实体模型;运用地质统计学方法分析了虎头崖矿区 67 线以东和 117 线以西矿体的 Pb, Zn 品位空间变化结构,得出搜索椭球体,实现了虎头崖铅锌多金属矿床矿 体、地层形态和铅锌品位变化形态的空间分布展示;结合三维建模结果和铅锌矿体空间变化结构, 总结出矿体空间分布规律,并用三维可视化软件对矿体分布规律进行显示,指导隐伏矿体的预测, 寻找有利的找矿部位。

**关键词:** 虎头崖铅锌矿;三维建模;地质统计学;矿化结构;矿体分布规律;青海省 **中图分类号:** P628;P618.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2013)01-0041-09

# 0 引言

地质统计学自上世纪 50 年代初提出以来,已发 展成为集数学、地质和采矿为一体的新兴边缘学科。 它是数学地质的一个分支,是以区域化变量理论为 基础,以变异函数为主要工具,研究在空间分布上既 有随机性又有结构性的自然现象的科学<sup>[1-2]</sup>。利用 地质统计学研究矿体空间变化结构,能充分利用各 种信息,给出每一估计量相对应的估计方差,这种估 计是最优的和无偏的<sup>[3]</sup>,具有传统地质学方法无可 比拟的优越性。三维可视化技术能够直观地反映工 程控制程度,矿体与地层的形态、产状等特征,使找 矿人员可从三维空间角度分析矿体的形态、延伸、厚 度、产状、品位变化趋势等,有利于找矿预测分析。 因此,利用三维可视化技术和地质统计学相结合的 方法来研究矿体空间变化结构及分布规律具有一定 的优势。 随着信息技术的发展,一批基于三维可视技术 和地质统计学的大型矿业软件已研发成功并得以推 广,其中比较著名的软件有 Surpac,Micromine,Datamine,Vulcan<sup>[4-5]</sup>。其中,Vulcan 主要用来对矿体 进行三维建模和可视化显示;Datamine 是基于统计 数据库的矿业系统,强调交互性,能对变异函数等值 线、变异函数实验模型和理论模型进行成图,可显示 矿体品位的分布并对品位进行估值<sup>[6-8]</sup>。本研究综 合利用 Vulcan 和 Datamine 等三维可视化软件建立 了虎头崖铅锌多金属矿床矿体和地层的三维实体模 型和块体模型,并进行矿体空间变化结构分析,结合 三维建模结果和铅锌矿体空间变化结构,总结矿体 空间分布规律。

### 1 矿体地质特征

虎头崖铅锌多金属矿区位于祁曼塔格五一河铁 矿东侧、巴音郭勒河以西的虎头崖一带。矿区由15

收稿日期: 2012-07-03; 改回日期: 2013-01-14; 责任编辑: 赵庆

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号:41172297)和中国地质调查局地质调查工作项目(编号:资[2011]03-01-64)资助。

作者简介: 曹芳(1987-),女,硕士研究生,研究方向为 GIS、地学三维建模和隐伏矿立体预测。通信地址:中南大学校本部地学楼 436 室;邮政编码:410083;E-mail:caofang1525@126.com

**通信作者:** 毛先成(1963-),男,教授,博士,主要从事地学三维建模和隐伏矿立体预测研究。通信地址:中南大学校本部地学楼 420 室; 邮政编码:410083;E-mail:xcmao@126.com

个主要矿体组成近 EW 走向的铅 锌矿带,矿带断续延长达 4 000 m 以上,延深 > 300 m,含矿带厚 120~240 m,矿体呈层状、透镜 状产出。铅锌矿带大致分为 2 部 分:①67 线以东,有 I -17, I -31, I -32, I -33, I -34, I -35, I -36 等 7 个矿体;矿体走向 EW,地表 倾向 N,倾角 75°~85°,延深 50 m 处变为 S 倾,倾角 70°~85°;② 117 线以西,有 I -19, I -20, I -21, I -1, I -2, I -3, I -4, I -5 等 8 个矿体,矿体走向 70°,倾向 SW,倾角 75°~85°。

# 2 矿体和地层的三维建 模

矿体和地层的三维建模是指 运用三维建模技术,对矿体和地 层进行三维可视化模拟和表达。 由于矿体不仅具有形状、空间关 系等信息,还具有矿体成分、品位 等属性,对矿体建立三维实体模 型以表达矿体表面形状、空间位 置,建立块体模型以表达矿体内 部结构。本研究综合利用 Vulcan 和 Datamine 软件各自的优 点,建立了矿体和地层的三维可 视化模型。主要内容包括:

(1)建立地质数据库。对地 形数据、勘探工程数据、编录数 据、化验数据和地质图件等相关 原始资料进行收集、整理和数字 化。共收集钻孔 116 个,坑道 27 个,探槽 11 个,样品化验数据

4 392条,地质编录数据 1 657 条,建立了地质数据 库,由孔口坐标数据表、钻孔测斜数据表、钻孔编录 及化验数据表组成。对这些数据进行组织转换,导 入三维可视化建模软件。

(2)在勘探线剖面上进行矿体和地层边界线的 圈定,得到矿体和地层的线串模型。

(3)依顺序连接矿体和地层的轮廓线,建立矿体



图 C大崖柏柠甸 仲的二维头体模型 Fig. 1 Three-dimensional solid model of ore body in Hutouya Pb-Zn deposit





和地层的实体模型。为便于分析矿体与地层的空间 分布关系,分别建立了矿体的三维实体模型(图 1) 和主要地层的三维实体模型(图 2),以表达它们的 表面形状和空间位置关系。研究区域的主要矿体包 括 67 线以东的 7 个矿体和 117 线以西的 8 个矿体; 主要地层为:第四系(Q<sub>4</sub>),石炭系下统大干沟组 (C<sub>1</sub>d),元古界狼牙山群上岩组第一岩性段 (PtLn<sup>b1</sup>)、第二岩性段(PtLn<sup>b2</sup>)、第 三岩性段(PtLn<sup>b3</sup>)、第四岩性段 (PtLn<sup>b4</sup>)、第五岩性段(Ptln<sup>b5</sup>)。其 中,狼牙山群上岩组第二岩性段为 厚层状大理岩夹薄层含铁石英砂 岩、碳质灰岩及含薄层条带状硅质 岩,是虎头崖铅锌矿成矿的主要赋 矿层位。

(4) 建立矿体块体模型。块体 模型采用的立方体单元规格为 20 m ×20 m×20 m。但因矿体形态呈薄 层状,若直接采用 20 m×20 m×20 m 进行建模,则不能模拟矿体的形

态,还会造成矿体体积的丢失。为解决这一问题,研 究中将矿体的实体模型转换为规格为2m×2m×2 m的块体进行输出,然后合并成20m×20m×20m 的立体单元。图3为虎头崖矿区I-17矿体的2m ×2m×2m块体模型,其与实体模型基本一致,很 好地模拟了矿体的形态。在进行块体建模时,选择 合适的原型起点,以保证所有矿体的块体单元与地 质空间中的立方体单元具有统一的坐标系统,即相 同的块体单元中心坐标和单元尺寸。

# 3 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)在空间上的变化既有结构性又具随机性<sup>[1-2]</sup>。在对原始数据收集、建库以及样品数据统计的基础上,利用地质统计学的结构分析方法,构建出矿体标志的变异函数模型,研究矿体标志空间变化的结构性特征<sup>[9]</sup>。由于虎头崖矿区 67 线以东和 117 线以西的两部分矿体相距较远,本研究分别对其进行样品统计分析和矿体空间变化的结构分析。



图 3 虎头崖矿区 I-17 矿体的 2 m×2 m×2 m 块体模型 Fig. 3 2 m×2 m×2 m block model of ore body I-17

#### 3.1 样品数据统计分析

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应具有相同的 支架或承载,即样品数据应该具有统一的样品长 度<sup>[10]</sup>。为此,分别对 67 线以东和 117 线以西的所 有钻孔中的样品进行组合,均选择原始样品平均长 度 1 m 作为样品组合长度,形成长度相等的组合样 品。67 线以东的原始样品得到长度为 1 m 的组合 样共 2 660 个;117 线以西的原始样品得到长度为 1 m 的组合样共 2 053 个。

对虎头崖矿区 67 线以东矿体和 117 线以西矿体的原始样品和组合样品的 Pb,Zn 品位分别进行统计分析,计算出最小值、最大值、平均值、标准差、变化系数,统计结果见表 1 和表 2。从 67 线以东矿体和 117 线以西矿体的原始样品 Pb,Zn 品位的直方图和组合样品 Pb,Zn 品位的直方图(图 4,图 5)可知,原始样品和组合样品的 Pb,Zn 品位的统计分布均表现为单峰正不对称分布,近似于对数正态分布。

表 1 虎头崖矿区 67 线以东矿体样品 Pb, Zn 品位统计表

Table 1 Statistical table of Pb and Zn grade of sample in the east of the exploration line 67 in Hutouya mining area

样品类型		样品数/个	$w_{ m B\ min}/\%$	$w_{\mathrm{B}\mathrm{max}}/\sqrt[9]{0}$	平均值/%	标准差/%	变异系数
Pb 晶位	原始样品	2430	0	27.21	0.59534	1.857871	3.1207
	组合样品	2660	0	25.86	0.542	1.52463	2.813
Zn 品位	原始样品	2430	0	29.23	0.80428	2.429723	3.021
	组合样品	2660	0	28.73	0.738	2.018	2.7344

#### 表 2 虎头崖矿区 117 线以西矿体样品 Pb, Zn 品位统计表

Table 2 Statistical table of Pb and Zn grade

of sample in the west of the exploration line 117 in Hutouya mining area

样品类型		样品数/个	$w_{\mathrm{B}\mathrm{min}}/\sqrt[9]{0}$	$w_{ m Bmax}/ \%$	平均值/%	标准差/%	变异系数
Pb 晶位	原始样品 组合样品	$\begin{array}{c} 1989 \\ 2051 \end{array}$	0 0	$\begin{array}{c} 45.76\\ 45\end{array}$	0.91688 0.88	3.38014 3.223	3.6866 3.6625
Zn品位	原始样品 组合样品	1989 2052	0 0	37.14 36.72	1.28478 1.2371	3.955945 3.73194	3.0791 3.0167



图 4 虎头崖矿区 67 线以东矿体 Pb, Zn 品位的原始样品和组合样品直方图

Fig. 4 Histogram of Pb and Zn grade of original sample and composite sample in the east of the exploration line 67 in Hutouya mining area

#### 3.2 矿体空间变化的结构分析

以虎头崖铅锌矿 67 线以东和 117 线以西矿体 的组合样品数据为原始数据,以 Pb,Zn 品位为区域 化变量,计算了三维空间中各个方位的实验半变异 函数,绘制主要平面方向上的实验半变异函数等值 线图,构建三维变异椭球体,揭示矿体标志空间变化 的结构性特征。

对三维空间中各个方向均计算了实验半变异函

数。在任意一个方向面上,计算了 12 至 30 个方向 的实验半变异函数,每一个方向按照 10 m 的滞后距 计算实验半变异函数值  $\gamma^*$  (*h*)。在每一个方向面 上,根据实验半变异函数的计算结果,可绘制实验半 变异函数值  $\gamma^*$  (*h*)的等值线图。

以 67 线以东矿区矿体的 Pb 品位为例,从其矿体走向倾斜面方向的 Pb 品位实验半变异函数等值 线图(图 6)可知,实验半变异函数等值线的延伸方 向在此斜面上的侧伏角为 60°,侧伏方向为 E,根据



图 5 虎头崖矿区 117 线以西矿体 Pb, Zn 品位的原始样品和组合样品直方图



数学公式可得到其倾向为 SE(约 114°),倾角为 56. 8°,表明往 SE 方向 Pb 品位在空间上的变化相对较 慢,具有较大的空间自相关距离;而在与之垂直的 NE-SW 方向上,Pb 品位在空间上的变化相对较快, 具有较小的空间自相关距离。由此可初步确定,三 维变异椭球体的长轴方向为 114°,倾角为 56.8°。

为进一步确定变异椭球体的次长轴、短轴的方向,对坐标轴进行旋转,计算并绘制出与变异椭球体 长轴方向相垂直的平面方向上的变异函数等值线图 (图 7)。从图 7 可看出,此面上等值线延伸方向的 侧伏角为 53°,侧伏向为 204°,根据数学公式可算出 其倾向为 252°,倾角为 25.9°,表明沿此方向 Pb 品 位在空间上变化相对较慢,选为三维变异椭球体的 次长轴方向;那么,此面上与该方向相垂直的另一方 向,其侧伏角为 37°,侧伏向为 24°,根据公式算得其 倾向为 351.8°,倾角为 19.2°,选为三维变异椭球体 的短轴方向。 根据上述分析,反映虎头崖矿区 67 线以东 Pb 品位空间变异方向的椭球体 3 个轴的方向为:①长 轴倾向 114°,倾角 56.8°;②次轴倾向 252°,倾角 25.9°;③短轴倾向 351.8°,倾角 19.2°。这里统一采 用线状构造的倾向、倾角来表示 3 个轴的方向。

对变异椭球体 3 个轴方向的实验半变异函数, 采用球状模型进行拟合<sup>[8]</sup>,可得到该 3 个方向的理 论半变异函数模型(图 8,图 9)。根据实验半变异函 数的理论模型(球状模型)拟合结果,得到了虎头崖 矿区 67 线以东 Pb 品位空间变异椭球体的参数(表 3,图 10)。表 3 中的方向和变程分别为图 10 所示 椭球体 3 个轴的延伸方向、长度。

按照上述同样的方法对虎头崖矿区 67 线以东的 Zn 品位和 117 线以西的 Pb, Zn 品位进行矿化结构分析,可以得到其三维变异椭球体的参数(表 3)。

Pb,Zn品位在空间上的变化具有明显的结构性特征,上述半变异函数模型和椭球体参数表明,不同



## 图 6 虎头崖矿区 67 线以东 Pb 品位在走向倾 斜面上的实验半变异函数等值线图

Fig. 6 Contour of experimental semivariogram of Pb grade in the inclined surface along the trend of ore body in the east of the exploration line 67 in Hutouya mining area 图面方向:上为北,下为南,左为西,右为东;图面倾角:75°



图 7 虎头崖矿区 67 线以东 Pb 品位在与长轴方向 相垂直的斜面上的实验半变异函数等值线图 Fig. 7 Contour of experimental semivariogram of

Pb grade in the inclined surface perpendicular to of ore body in the east of the exploration line 67 in Hutouya mining area

图面方向:上为114°,下为294°,左为24°,右为204°;图面倾角:33.2°



#### 图 8 虎头崖矿区 67 线以东 Pb 品位长轴与次轴方向 实验半变异函数及理论模型

Fig. 8 Experimental semivariogram and theoretical model of Pb grade in the long and secondary long axis in the east of the exploration line 67 in Hutouya mining area



### 图 9 虎头崖矿区 67 线以东 Pb 品位短轴方向 实验半变异函数及理论模型

Fig. 9 Experimental semivariogram and theoretical model of Pb grade in the short axis in the east of the exploration line 67 in Hutouya mining area

位置	Pb,Zn 晶位	方向	块金值	基台值	变程/m
		长轴方向(114°/56.8°)	0.21	1.81	85
	Pb	次长轴方向(252°∠25.9°)	0.21	1.81	60
c7 4P い ナ		短轴方向(351.8°∠19.2°)	0.21	1.81	25
07 线以乐		长轴方向(114°∠56.8°)	0.21	3.41	85
	Zn	次长轴方向(252°∠25.9°)	0.21	3.41	60
		短轴方向(351.8°∠19.2°)	0.21	3.41	25
		长轴方向(105.4°之65.2°)	1.2	12.3	75
	Pb	次长轴方向(250.9°∠20.8°)	1.2	12.3	60
117 姓り西		短轴方向(345.8°∠12.8°)	1.2	12.3	20
117 线以四		长轴方向(84.5°/43.1°)	1.6	16.2	105
	Zn	次长轴方向(218.8°∠36.7°)	1.6	16.2	65
		短轴方向(328.9°/24.8°)	1.6	16.2	60

#### 表 3 虎头崖矿区 Pb,Zn 品位空间变异椭球体参数 Table 3 Parameters of spatial variation ellipsoid of Pb and Zn grade in Hutouva mining area



图 10 虎头崖矿区 67 线以东 Pb 品位空间变异椭球体 Fig. 10 Spatial variation ellipsoid of Pb grade in the east of the exploration line 67 in Hutouya mining area *x* 轴.东;*y* 轴.北;*z* 轴.上

矿体的不同品位在不同方向的空间相关性或空间连续性有明显的差别,例如虎头崖矿区 67 线以东的Pb品位沿倾向 114°,倾角 56.8°方向变化速度最慢,连续性较好,在达到约 85 m的距离范围内,Pb品位均具有一定程度的空间相关性;沿倾向 351.8°,倾角 19.2°的方向,Pb品位的变化速度最快,连续性较差,在达到约 25 m的距离后,Pb品位的空间相关性消失。而虎头崖矿区 117 线以西的 Zn品位沿倾向 84.5°,倾角 43.1°的方向变化速度最慢,连续性较好,在达到约 105 m的距离范围内,Zn品位具有一定的空间相关性;沿倾向 328.9°,倾角24.8°的方向,Zn品位变化速度最快,连续性较差,在达到约 60 m的距离后,Zn品位的空间相关性消失。

对比 Pb,Zn 品位的空间变异椭球体参数与对应的 铅锌矿体的形态、产状可知,Pb,Zn 品位的变异函数模 型与变异椭球体较好地反映了铅锌矿体的空间分布形 态、产状和品位变化:①椭球体的长轴、次长轴、短轴的 方向分别与矿区矿体的走向、倾向、厚度方向基本一 致,如虎头崖矿区 67 线以东的矿体走向 EW,倾向 S,倾 角 70°~85°,与 67 线以东 Pb,Zn 品位的变异椭球体基 本一致;②椭球体的形态和空间方位与矿体的空间展 布形态和延伸方向相似;③变异函数模型表达的是不 同方位的空间相关距离和连续性差异,与矿体 Pb,Zn 品位的空间分布与变化相似,即矿体沿近似走向上连 续性好、沿厚度方向连续性差。

# 4 矿体空间分布规律与有利的找矿部 位

(1)矿体的形态、产状与空间分布特征。矿体呈 多层状产出,互相平行展布,单个矿体不论沿走向或 倾向均稳定地延展,从不穿层(图 1)。该矿体的分 布特征、沉积环境及含矿层的多种岩性组合皆显示 喷流沉积的成矿特点。矿体沿走向除局部富集、厚 度变化较大外,总体连续延长变化不大;在垂直方向 的变化方面,分布于海拔 3 500 m 到地表的矿体平 均厚度较大、品位较高,而在 3 500 m 标高以下的矿 体厚度变小、品位变低(图 11)。

(2)矿体的空间分布受地层层位控制。矿区大部 分矿体呈多层状产于元古界狼牙山群上岩组第二岩性 段(即厚层状大理岩夹薄层含铁石英砂岩、碳质灰岩及 含薄层条带状硅质岩)中。铅锌矿多赋存于该岩性段 含铁石英砂岩与厚层大理岩的接触部位,与该岩性段 薄层条带状硅质岩、夕卡岩有一定的成因关系。矿体 的分布、形态及产状与元古界狼牙山群上岩组第二岩 性段的分布和产状基本一致(图 12)。



地质找矿论丛

**图 11** 虎头崖矿区矿体在垂向上的分布 Fig. 11 Vertical distribution of ore bodies in Hutouya Pb-Zn deposit



图 12 矿体与赋矿地层的空间分布关系 Fig. 12 Spacial distribution relationship between ore bodies and the host stratum

(3)有利的找矿部位。矿区多金属矿体主要产 于元古界狼牙山群上岩组底部第二岩性段厚层状大 理岩与条带状-纹层状硅质岩、透辉石透闪石石榴石 夕卡岩及透镜状含碳质灰岩的层间接触部位。有关 测试结果表明,该类硅质岩、层间夕卡岩、碳质与硫 化矿体,均系海底喷流热水沉积而成。尤其硅质岩、 夕卡岩的出现是该岩性段含矿的主要特征,也是该 类矿体的直接找矿标志。矿区该含矿层位沿走向从 8 线往东和 153 线往西均继续展布(图 12),显然为 理想的找矿地段。

## 5 结论

(1)采用的 Vulcan 软件在剖面图的配准、矿体

的圈定方面有着操作简便的优势,而 采用的 Datamine 软件在建立块体模 型、生成半变异函数等值线方面有一 定的优势,本研究综合利用 Vulcan 和 Datamine 两种三维可视化软件的 优点进行三维可视化建模和矿体空 间变化结构分析。

(2)运用地质统计学理论方法对 矿体 Pb,Zn 品位进行了空间变化结 构分析,可以更直观地了解铅锌矿体 的空间分布形态、产状和品位变化, 在此基础上进行品位估值和储量计 算更加合理。

(3)根据三维建模结果和矿体 Pb,Zn品位变化结构,在空间范围内 总结了矿体分布规律,并利用三维可 视化软件对矿体分布规律进行显示, 不仅使其变得更加生动、直观,还为 矿体分布规律的合理性提供了可靠 依据,从而更好地预测隐伏矿体。

#### 参考文献:

- [1] 李岭. 地质统计学及其在某铜矿山储量计
   算中的应用[J]. 矿业研究与开发,2004,24
   (5):21-23.
- [2] 孙英君,王劲峰,柏延臣. 地质统计学方法 进展研究[J]. 地球科学进展,2004,19(2): 265-270.
- [3] 陈春. 矿床三维地质建模与成矿信息定量 提取[D]. 长沙:中南大学,2010.
- [4] 杨建宇,秦德先,康泽宁,等. 地质统计学在 北衔金矿的应用[J]. 矿业研究与开发, 2006,26(2):14-17.
- [5] 尚晓明,王李管. 地质统计学在某铜矿储量计算中的应用[J]. 中国钼业,2007,31(6):12-16.
- [6] Johnson T. Structural block modeling at BHP iron ore's Mt Whaleback Mine[R]. Australian Institute of Mining and Metallurgy, 2001, 23: 169-186.
- [7] Imielinski T, Virmani A. Datamine—interactive rule discovery system[J]. ACM SIGMOD Record, 1995, 24(2): 472.
- [8] Neilson L, Kapageridis I. Environmental management with Vulcan[CP]. Envirosoft 2000,2000:461-70.
- [9] 孙洪泉. 地质统计学及其应用[M]. 徐州:中国矿业大学出版 社,1990:1-282.
- [10] 万昌林,朱利平,高祥. 应用地质统计学评估福建某铜矿资源 [J]. 金属矿山,2002(6):49-52.

(School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, china)

**Abstract**: Three-dimensional solid models and block models of the ore bodies and the stratums in the Hutouya Pb-Zn polymetallic deposit are established by using Vulcan and Datamine software. The spatial variation of the ore bodies' Pb and Zn grade in the east of the exploration line 67 and the west of the exploration line 117 are analyzed by geostatistic method and a search ellipsoid is obtained and spatial variation of ore bodies' morphology and ore grade is displayed. The spatial distribution model of ore bodies is summarized to guide ore prediction, or location of possible blind ore bodies.

**Key Words**: Hutouya Pb-Zn deposit; three-dimension model; geostatistics; spatial analysis of mineralization; distribution pattern of ore bodies; Qinghai province