

文章编号 10258-7106(2007)06-0651-08

基于 GIS 的云南普朗斑岩铜矿床三维成矿预测^{*}

王功文^{1,2} 郭远生³ 杜杨松¹ 范玉华³ 郭欣^{1,3} 庞振山¹ 陈建平^{1,2}

(1 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 2 中国地质大学北京市国土资源信息开发研究重点实验室, 北京 100083; 3 云南迪庆有色金属有限责任公司, 云南 香格里拉 650215)

摘 要 文章根据云南普朗斑岩铜矿床地质特征以及矿区 72 个见矿钻孔中 8 145 个岩芯样品的铜含量分析数据, 采用 GIS 空间分析技术和利用邻近距离统计分析方法, 优化和提取了矿床定位预测所需点位的数据信息(包含三维空间坐标及其对应的铜含量数值)。在此基础上, 选用反距离权重内插法, 在比例尺 1:10 000 的尺度上, 确定了该矿区铜元素在海拔 3 171~4 319 m 不同高度的空间分布状况, 并利用 3D-GIS 的规则六面体成像技术和邻近采样点插值法, 建立了该铜矿床含矿岩体(铜含量不小于 0.2%)和铜矿体(铜含量不小于 0.3%)的三维模型, 确定含矿岩体和铜矿体的形态为“锥状体”。最后, 在综合分析云南普朗铜矿床特征及其保存条件和剥蚀状况以及钻探资料和矿床三维空间特征的基础上, 确定矿床的南西侧具有较好的找矿潜力, 认为矿床的东、北两侧深部是有利的成矿远景区。

关键词: 地质学; GIS; 斑岩铜矿床; 三维; 定位预测; 云南普朗

中图分类号: P618.41; P612

文献标识码: A

Three-dimensional metallogenic prediction of Pulang porphyry copper deposit in Yunnan Province by using GIS technology

WANG GongWen^{1,2}, GUO YuanSheng³, DU YangSong¹, FAN YuHua³, GUO Xin^{1,3},
PANG ZhenShan¹ and CHEN JianPing^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2 Beijing Key Laboratory of Research and Exploration Information of Land and Resources, Beijing 100083, China;

3 Diqing Nonferrous Metal Company Ltd. of Yunnan Province, Xianggelila 650215, Yunnan, China)

Abstract

Based on geological characteristics and Cu analyses of 8 145 samples collected from 72 boreholes showing mineralized porphyry in the Pulang porphyry copper deposit, Yunnan, the authors, using GIS spatial analysis and neighborhood statistics, optimized and selected data of localized points composed of three-dimensional coordinate values and corresponding Cu contents for the localization and prediction of the deposit. The spatial distribution of copper on the scale of 1:10 000 and at the depths from 3 171 m to 4 319 m in this deposit was also determined by using Inverse Distance Weighted (IDW). Meanwhile, the 3D models for the mineralized body with Cu (tenor) 0.2% and the ore body with Cu (tenor) 0.3% in this deposit were set up by using Regular Hexahedron Imaging Technique of 3D-GIS and Spatial Interpolation of Adjacent Sampling Points, leading to the shape defi-

^{*} 本文得到云南省香格里拉普朗铜矿成矿规律与成矿预测研究项目(H02215)和国家“十一五”科技支撑计划项目(编号:2006BAB01A08)的共同资助

第一作者简介 王功文,男,1972 年生,讲师,博士,目前主要从事资源定量评价与 3S 技术方面的研究和教学工作。E-Mail: gongwenwang@sohu.com

收稿日期 2007-03-30; **改回日期** 2007-07-20。张绮玲编辑。

nition of the mineralized body as a large lens and the ore body as a cone. According to geological and spatial features and borehole data of the deposit combined with its preserving and denudation condition, the southwest area of the deposit is considered to be a potential district in search for ore bodies, and the deep parts on the northern and eastern sides of the ore deposit are thought to be ore-forming promising areas.

Key words: geology, GIS, porphyry copper deposit, three-dimension, localization and prediction, Pulang in Yunnan Province

云南普朗铜矿是中国西南三江地区重要斑岩成矿带中的典型矿床,近年来,随着矿区深部钻探工程的实施,其资源储量具有较好的前景。以往有关该矿床的成矿预测研究集中于矿床的地质、化探、物探和遥感资料的定性或半定量分析(范玉华等,2006;谭康华等,2005;李光军等,2005;连长云等,2005),但未进行矿床空间分布的定量分析及其三维空间定位研究。本文根据云南普朗斑岩铜矿床的地质特征,结合已有的矿区 72 个见矿钻孔(钻孔较好地覆盖了含铜矿化的矿区范围,约 4.5 km^2 ;钻孔深度范围在 $139 \sim 750.20 \text{ m}$ 之间,平均深度为 387 m ,控制了该矿区铜矿化体的深部范围)数据和钻孔中已经测试分析的 8 145 个岩芯采样点铜含量数据,利用 GIS 技术(李德仁,1997)和邻近距离统计分析方法(neighborhood statistics)(Haining, 1990),通过三维规则块体插值方法进行该矿床的三维定位预测研究,实现了云南普朗铜矿床的定位预测,为矿床的深部隐伏矿体找矿和矿床的储量计算提供参考依据。

1 地质特征

云南普朗斑岩铜矿床位于普朗-红山铜多金属成矿亚带南缘。普朗复式岩体由 5 个岩体构成,在平面上呈“喇叭”状,面积为 8.9 km^2 (图 1)。矿区构造发育,岩石蚀变强烈,从斑岩体核部向外依次为强硅化带→钾化硅化带→绢英岩化带,呈现出典型的斑岩型蚀变分带特征(侯增谦,2004)。矿体中心矿化连续,向四周有分枝现象。矿体顶、底板主要为石英二长斑岩,其次为石英闪长玢岩、花岗闪长斑岩和角岩。

云南普朗铜矿成矿作用发生于普朗复式斑岩体内,矿化与蚀变相伴进行,在岩体中心形成由细脉浸染状矿石组成的筒状矿体,岩体边部产出脉状矿体。根据辉钼矿 Re-Os 测年(曾普胜等,2004)和矿化斑

岩体 K-Ar 测年数据^①,普朗斑岩铜矿钾硅酸盐化(黑云母化和钾长石化)的黑云石英二长斑岩年龄值为 $(235.4 \pm 2.4) \text{ Ma} \sim (221.5 \pm 2.0) \text{ Ma}$,石英-辉钼矿阶段的辉钼矿 Re-Os 年龄值为 $(213 \pm 3.8) \text{ Ma}$,两者十分相近。成矿元素以铜为主,伴有金、银、钼、钡、硫等多种有用组分。矿区圈定两个矿化体,7 个工业矿体,其中首采区有矿体 6 个,矿床规模达到大型(Wang et al., 2007)。矿体与围岩无明显的界线,围岩具弱铜矿化,其铜品位为 $0.05\% \sim 0.19\%$ 。矿体控制厚度为 $17.0 \sim 370.41 \text{ m}$,最大厚度 700.30 m ,厚度变化系数 52.03% ,厚度变化稳定;铜品位 $0.20\% \sim 3.74\%$,平均 0.57% ,品位变化系数 68.69% ,比较均匀。矿石在强硅化带内以表外矿为主,Cu 品位一般为 $0.20\% \sim 0.40\%$;钾化硅化带以表内矿为主,Cu 品位一般为 $0.40\% \sim 1.56\%$;在绢英岩化带内以表外矿为主,Cu 品位一般为 $0.22\% \sim 0.50\%$ 。从走向、倾向上看,中部矿体厚大、品位高,向四周厚度逐渐变薄、铜品位逐渐变低。

2 定位预测

根据本文收集的云南普朗斑岩铜矿床 72 个见矿钻孔中 8 145 个岩芯采样点的铜含量分析数据,通过直方图统计分析(图 2),认为所选取的样品铜品位分布属于偏正态分布,尤其是品位大于边界品位 0.2% 的高值区,其直方图分布具有递减趋势,这表明对选取的数据进行空间处理分析具有可行性。利用邻近距离统计分析方法,筛选和提取矿体出露的三维空间位置和相应的铜品位等相关信息。在此基础上,以 3D-GIS 为技术平台,通过利用该矿床的成矿模式(谭康华等,2005;李光军等,2005),选取三维块体插值法构建了矿床的三维模型,并结合矿体不同深度的铜品位截面等值线图,推测矿体深部的隐伏矿体和找矿有利部位,从而实现了普朗铜矿床的

① 云南迪庆普朗铜矿首采地质勘探报告, 2005.

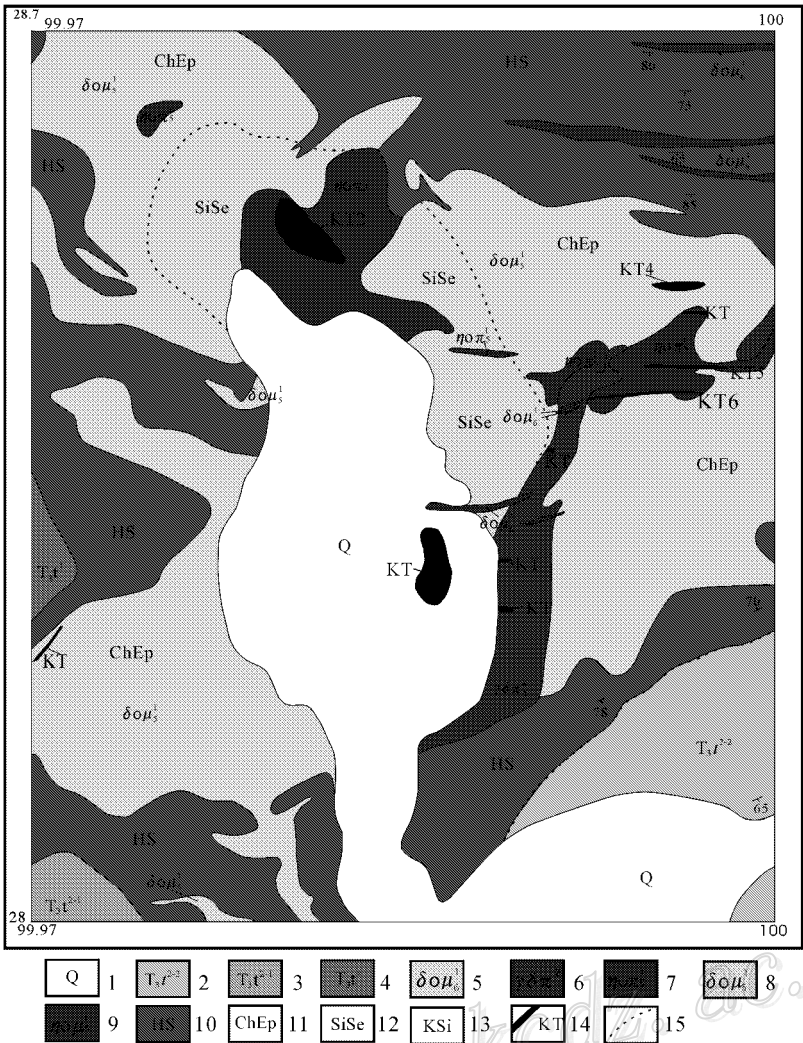


图 1 云南普朗铜矿床 1 : 10 000 地质略图[据云南迪庆普朗铜矿首采地质勘探报告(2005) 修改]

1—第四纪残坡积物 ; 2—三叠纪图姆沟组二段 ; 3—三叠纪图姆沟组一段 ; 4—三叠纪图姆沟组 ; 5—喜马拉雅期石英闪长玢岩(脉) ;
6—喜马拉雅期花岗闪长斑岩 ; 7—燕山期石英二长斑岩 ; 8—印支期石英闪长玢岩 ; 9—印支期二长闪长玢岩 ; 10—角岩带 ;
11—青磐岩化带 ; 12—硅化绢云母化带 ; 13—钾化硅化带 ; 14—矿体(矿化体) ; 15—实测地质界线

Fig. 1 Geological sketch map of the Pulang porphyry copper deposit , Yunnan Province(modified from Pulang Copper Deposit Exploration Report by Yunnan Diqing Company Ltd. , 2005)

1—Quaternary eluvial-slopewash materials ; 2—2nd Member of Triassic Tumugou Formation ; 3—1st Member of Triassic Tumugou Formation ; 4—Triassic Tumugou Formation ; 5 —Quartz diorite of Himalayan period ; 6—Granodiorite of Himalayan period ; 7—Quartz monzonite of Yanshanian period ; 8—Quartz diorite of Indosinian period ; 9—Monzonite of Indosinian period ; 10—Hornstone belt ; 11—Propylitization belt ; 12—Silicification and sericitization belt ; 13—K-feldspar alteration and silicification belt ; 14—Ore body ; 15—Measured geological boundary

定位预测。在此基础上,可以利用该矿床的三维模型进行矿体单元块体的数值估算,并由此计算矿体的体积,为矿床的储量计算提供帮助。

利用统计分析技术进行上述钻孔数据的成矿信息优化,选取 GIS 二维空间的反距离权重内插法(Inverse Distance Weighted , IDW)(Fisher , 1992 ;

Mark , 2001),可以预测并绘制出大比例尺(1 : 10 000)普朗含矿岩体高程在 3 171 ~ 4 319 m 范围内任意高度的铜元素等值线分布图。图 3 和图 4 为本次研究中海拔高度分别为 3 900 m 和 3 800 m 截面的铜元素等值线图,图中显示矿体近地表二维形态呈“龟状”。

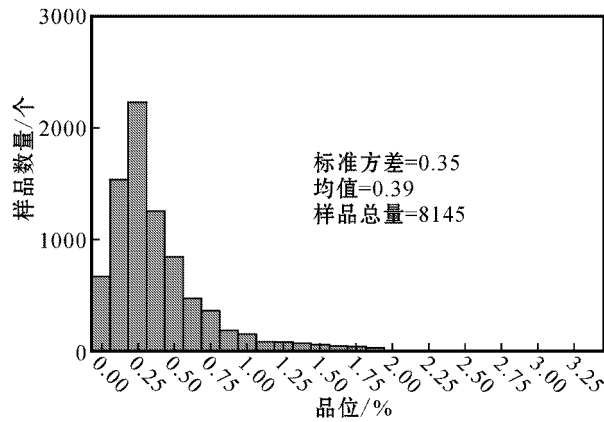


图 2 云南普朗铜矿钻孔样品铜含量测试分析
统计分析直方图

Fig. 2 Histogram showing copper tenor of borehole samples
from the Pulang deposit , Yunnan Province

在上述研究的基础上,基于钻孔数据的三维数值和各采样点铜品位提取的数值,在同一坐标系系统和同一尺度条件下,选取邻近样点插值法(朱大明等 2005;武强等 2004;Wu,2004;Lemon,2003),利用三维邻近半径球形搜索法进行六面体空间插值(胡进娟等 2005),实现三维网格化钻孔数据的规则

六面体成像,建立了普朗铜矿床不同品位的三维立体模型图(图 4 和图 5)。三维网格化钻孔数据的规则六面体成像是钻孔数据经过插值和网格化后生成的规则数据,本文六面体成像的三维数据点在三维空间中表达成一个小长方体,长、宽、高的大小与数据体的三个方向的大小和比例有关,即一幅三维图形被表达成一系列的小长方体,其颜色反映该点的值。云南普朗矿床的长、宽、高(X、Y、Z)分别为 2 320 m、3 069 m 和 1 148 m,对应的长方体单元总数为 $72 \times 72 \times 766 = 3\,970\,944$ 个。其中,高度取值为化学测试样品的长度(1.5 m)。

普朗铜矿床的三维模型统计分析表明(图 4),研究区已有块体数量为 3 970 944,铜品位高于 0.2% 的预测块体数为 113 068,实测块体数为 7 122,总计 120 190,占总体积的 3.03%。

根据云南普朗斑岩铜矿床地质特征及其地貌环境分析(谭康华等 2005;李光军等 2005),该矿床位于青藏高原东南边缘的高山侵蚀区,海拔在 3 790~4 319m 之间,不同的蚀变岩抗剥蚀能力有明显的差异(章革等 2004)。分布在矿区北侧的硅化蚀变岩石抗剥蚀能力较强,而分布在西南和东南部的绢

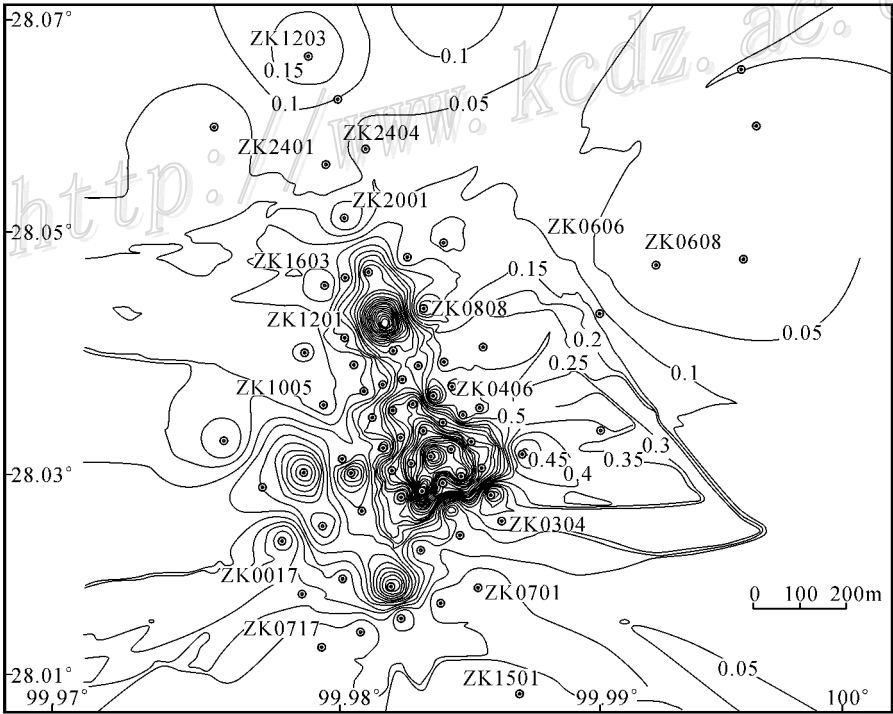


图 3 云南普朗铜矿床 3 900 m 截面铜元素等值线图

Fig. 3 Contour diagram of Cu tenor at 3 900 m level of the Pulang porphyry copper deposit , Yunnan Province

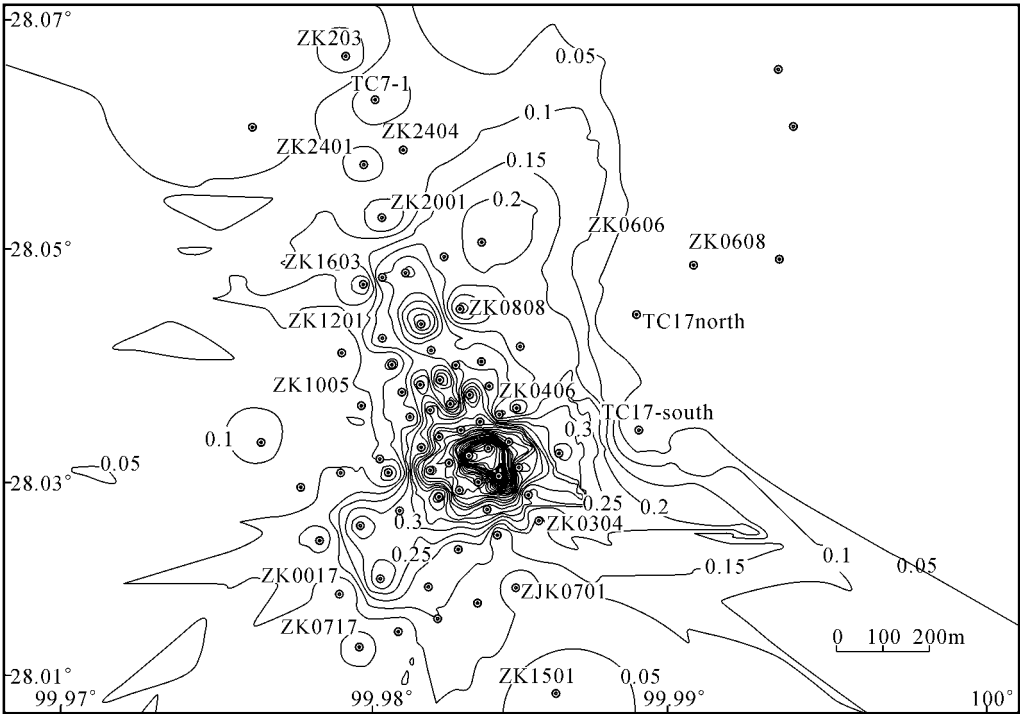


图 4 云南普朗铜矿床海拔 3 800 m 截面铜元素等值线图

Fig. 4 Contour diagram of Cu tenor at 3 800 m level of the Pulang porphyry copper deposit , Yunnan Province

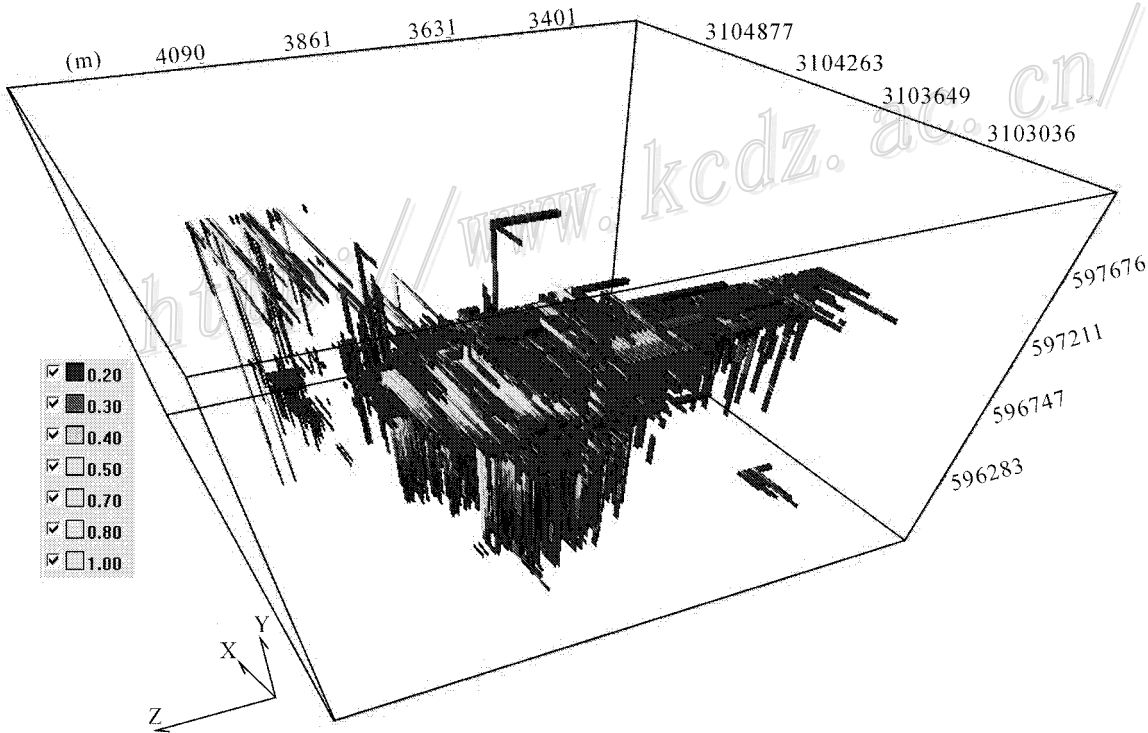


图 5 云南普朗铜矿含矿斑岩体(铜含量 $\geq 0.2\%$)三维立体模型图

Fig. 5 Three-dimensional model of the porphyry body with Cu(tenor) $\geq 0.2\%$ in the Pulang copper deposit , Yunnan Province

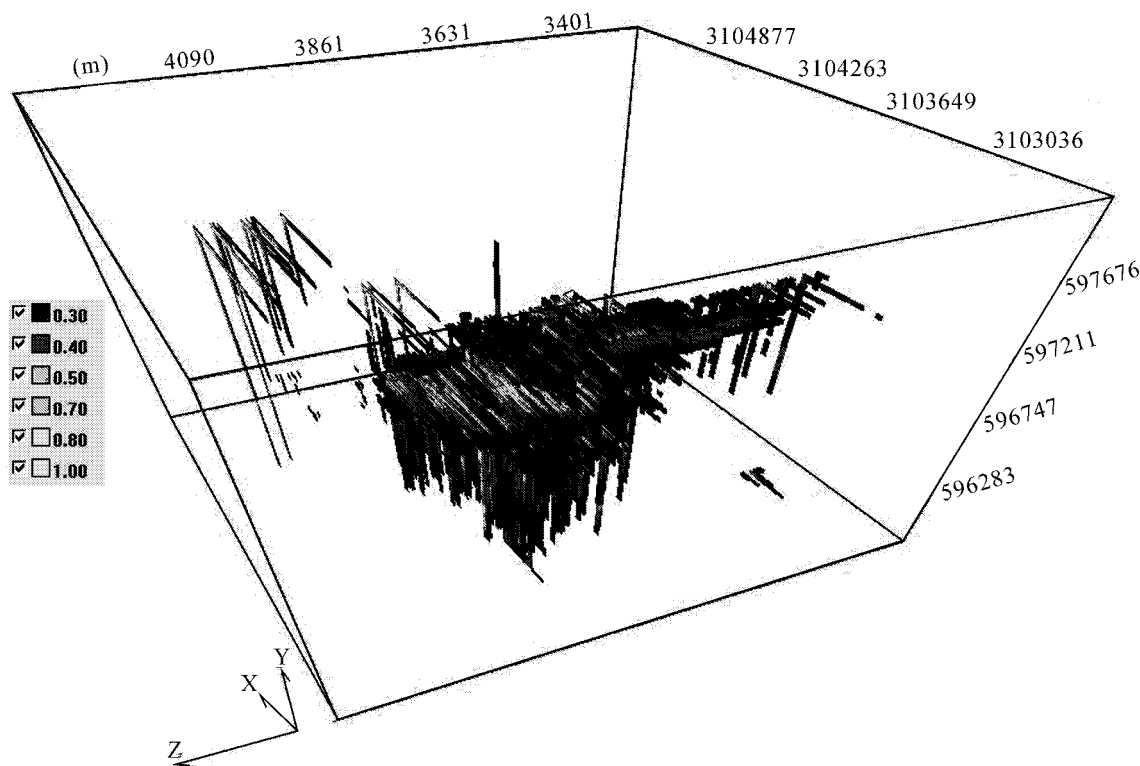


图 6 云南普朗铜矿矿体(铜含量 $\geq 0.3\%$)三维立体模型图

Fig. 6 Three-dimensional model of the ore body with Cu (tenor) $\geq 0.3\%$ in the Pulang copper deposit, Yunnan Province

云岩化蚀变岩石抗剥蚀能力较差,这是区内形成负地形的原因之一(王功文等,2004)。图4显示了普朗铜矿含矿岩体(铜含量 $\geq 0.2\%$)呈“锥状体”,近南北向(X)为长轴,东西向(Y)为短轴,垂向(Z)近直立。岩体内部品位普遍高于边缘品位。图5显示了普朗铜矿矿体(铜含量 $\geq 0.3\%$)呈“锥状体”,三维形态近似含矿岩体,反映了铜矿床主要分为斑岩铜矿体和北部周边矿体两个部分,其主体部分为斑岩铜矿体。相对于普朗铜矿区北部矿体(平均海拔在4 150 m左右),南部斑岩主矿体顶部具有一定程度的剥蚀(平均海拔在3 910 m左右),深部矿化连续。斑岩铜矿体周边的铜矿化赋存在围岩接触带,呈脉状产出,深部位位较低,矿化连续性差,但保存条件好,剥蚀程度低。近地表最低含矿钻孔是ZK0705(图2和图3),其海拔高程为3 865 m,邻近最高含矿钻孔是PLD00X(图2和图3),其海拔高程为3 997.7 m,两者的高程差为132.7 m。

综合矿床地质特征、钻探工程和矿床的三维空间特征,认为矿化富集部位主要为岩体的钾化硅化带和绢英岩化带。目前,斑岩矿体的核部强硅化带及东侧的钾化硅化带和绢英岩化带矿化明显,而对

称出现的南西侧的钾化硅化带和绢英岩化带尚未有工程控制,推断南西侧的钾化硅化带和绢英岩化带有类似东侧的矿体存在,是矿床外围找矿的有利部位。在普朗斑岩复式岩体北、东两侧外接触带,有较好的铅、锌异常。经地表初步追索,有矿化体存在,矿床三维模型的延展趋势较好,预示深部存在铜矿化,具有较好的成矿远景。

值得提出的是,本文选取的三维插值法为邻近“点”反距离系数法,其定量预测以钻孔数据及其采样分析测试为基础,由此可知,见矿化钻孔的数量及其测试样品含矿化岩芯的数量都会影响到矿体三维定位的预测结果。本文在选取钻孔及其测试样品统计分析时,未见矿的钻孔以及见矿钻孔中未见矿化(Cu的含量低于0.05%)的岩芯段以背景值出现,同理,个别高值离散值可能被插值到低值区,由此,认为该方法是基于铜品位某一区间的最低阈值进行插值,计算结果对于储量的计算具有参考价值,避免了人为夸大计算储量。另外,本文的预测结果为普朗铜矿床的三维空间找矿方向提供了参考依据,但仍需要钻探工程予以验证。

3 结 论

根据本文的研究成果,主要得出以下几个方面的结论:

(1)基于一定数量的钻孔数据和相应的岩芯样品金属含量的测试数据分析,利用GIS技术和数学插值方法,能够快速、准确地确定矿体的三维形态,其有助于推测深部隐伏的矿体,根据矿床的三维空间形态,能够统计分析出含矿化块体单元的数量,为矿床的储量计算提供参考依据。

(2)根据云南普朗铜矿床的三维空间特征,结合矿区的地质、地形地貌现状分析,认为普朗铜矿床的含矿岩体近地表二维形态呈“龟状”,垂向矿体(铜含量0.2%、0.3%)的三维形态为“锥状体”。

(3)在云南普朗斑岩铜床近地表蚀变分带和铜矿化岩体对应分析的基础上,结合矿床的三维空间形态特征,认为该矿床的南西侧钾化硅化带和绢英岩化带有较好的铅、锌异常,是矿床外围找矿的有利部位,云南普朗斑岩铜矿床的北、东侧外接触带深部具有较好的成矿远景。

(4)本文应用的三维矿床定位预测方法与矿区钻孔的合理设计以及全面系统的采样和测试分析关系密切。因此,该方法的可行性和可靠性,一方面取决于已开展矿区的钻孔工程的数量,钻孔工程能够较好地控制矿床的深度和近地表矿化岩体的范围;另一方面取决于相关含矿化岩芯分析测试数据的数据和质量。

References

- Fan Y H and Li W C. 2006. Geological characteristics of the Pulang porphyry copper deposit, Yunnan [J]. *Geology in China*, 33(2): 352~362 (in Chinese with English abstract).
- Fisher T R and Wales R Q. 1992. Three-dimensional solid modeling of geo-objects using N on-uniform rational B-Splines (NURBS) [A]. In: *Three-dimensional modeling with geoscientific information systems* [M]. Kluwer Academic Publishers, 85~105.
- Haining R. 1990. *Spatial data analysis in the social and environmental sciences* [M]. Cambridge University Press.
- Hou Z Q. 2004. Porphyry Cu-Mo-Au deposits: Some new insights and advances [J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 131~144 (in Chinese with English abstract).
- Hu J J and Sheng Y H. 2005. Three dimensional interpolation based on regular hexahedron [J]. *Modern Surveying and Mapping*, 28(5): 10~12 (in Chinese with English abstract).
- Lemon A M and Jones N L. 2003. Building solid models from boreholes and user defined cross-sections [J]. *Comput. & Geosciences*, 29(3): 547~555.
- Li D R. 1997. RS, GPS and GIS composite definition, theory, and key technology [J]. *The Journal of Remote Sensing*, 1(1): 64~68 (in Chinese with English abstract).
- Li G J, Tan K H, Zhang S Q, Huang D Z and Meng Q. 2005. The ore-prospecting index and model of Pulang Cu deposit, Xianggelila [J]. *Yunnan Geology*, 24(2): 175~185 (in Chinese with English abstract).
- Lian C Y, Zhang G and Yuan C H. 2005. Application of SWIR reflectance spectroscopy to Pulang porphyry copper ore district, Yunnan Province [J]. *Mineral Deposits*, 24(6): 621~637 (in Chinese with English abstract).
- Mark Jessell. 2001. Three-dimensional geological modelling of potential-field data [J]. *Computers & Geosciences*, (27): 455~465.
- Tan K H, Li G J, Huang D Z and Zhang S Q. 2005. The ore-controlling conditions of large scale Pulang porphyry copper deposit [J]. *Yunnan Geology*, 24(2): 167~174 (in Chinese with English abstract).
- Wang G W and Chen J P. 2004. New insights of quantitative assessment to four dimensional space-time of deposits [J]. *Geoscience*, 18(4): 537~542 (in Chinese with English abstract).
- Wang G W, Chen J P and Du Y S. 2007. Three-dimensional localization prediction of deposit and mineralization environment quantitative assessment: A case study of porphyry copper deposits in Sanjiang region, China [A]. In: Zhao P D, Frits Agterberg, Cheng Q M, ed. *Proceedings of IAMG 07 geomathematics and GIS analysis of resources, environment and Hazard* [C]. Beijing: 102~105.
- Wu L X. 2004. Topological relation embodied in a generalized tri-prism (GTP) model for a 3D geosciences modeling system [J]. *Computer & Geosciences*, 30(4): 405~418.
- Wu Q and Xu H. 2004. Study of 3D geology and visualization [J]. *Science in China (Series D)*, 34(1): 54~60 (in Chinese).
- Zeng P S, Hou Z Q, Li L H, Qu W J, Wang H P, Li W C, Meng Y F and Yang Z S. 2004. Age of the Pulang porphyry copper deposit in NW Yunnan and its geological significance [J]. *Geology Bulletin of China*, 23(11): 1127~1131 (in Chinese with English abstract).
- Zhao P A. 2002. "Three-Component" quantitative resource prediction and assessments: Theory and practice of digital mineral prospecting [J]. *Earth Science*, 27(5): 482~489 (in Chinese with English abstract).
- Zhu D M, Pu R K, Li W, Liu M L, Cheng X J and Qin D X. 2005. 3D ore deposit simulation and mineral resources assessment based on GIS [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Sci-*

ence and Technology), 30(3):1~5(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

范玉华, 李文昌. 2006. 云南普朗斑岩铜矿床地质特征[J]. 中国地质, 33(2):352~362.

侯增谦. 2004. 斑岩矿床—新认识与新进展[J]. 地学前缘, 11(1):131~144.

胡进娟, 盛业华. 2005. 基于规则六面体的三维空间数据插值方法[J]. 现代测绘, 28(5):10~12.

李德仁. 1997. 论 RS、GPS 与 GIS 集成的定义、理论与关键技术[J]. 遥感学报, 1(1):64~68.

李光军, 谭康华, 张世权, 黄定柱, 孟 青. 2005. 普朗铜矿找矿标志及找矿模型[J]. 云南地质, 24(2):175~185.

连长云, 章 革, 元春华. 2005. 短波红外光谱矿物测量技术在普朗

斑岩铜矿区热液蚀变矿物填图中的应用[J]. 矿床地质, 24(6):621~637.

谭康华, 李光军, 黄定柱, 张世全. 2005. 普朗大型斑岩 铜矿控矿条件[J]. 云南地质, 24(2):167~174.

王功文, 陈建平. 2004. 矿床四维时空定量评价的新认识[J]. 现代地质, 18(4):537~542.

武 强, 徐 华. 2004. 三维地质建模与可视化方法研究[J]. 中国科学(D 辑), 34(1):54~60.

曾普胜, 侯增谦, 李丽辉, 屈文俊, 王海平, 李文昌, 蒙义峰, 杨竹森. 2004. 滇西北普朗斑岩铜矿床成矿时代及其意义[J]. 地质通报, 23(11):1127~1131.

赵鹏大. 2002. “三联式”资源定量预测与评价-数字找矿理论与实践探讨[J]. 地球科学, 27(5):482~490.

朱大明, 蒲荣昆, 李 伟, 刘妙龙, 程效军, 秦德先. 2005. 基于 GIS 的三维矿体形态模拟与矿产资源评价[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 30(3):1~5.

<http://www.kcdz.ac.cn/>