

云南羊拉铜矿江边矿段三维地质建模及隐伏矿床(矿体)定位预测

坚润堂^{1*#}, 邹国富², 张俊岭³, 苏富彬¹, 宋小美¹

¹百色学院, 广西 百色

²中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司, 云南 昆明

³中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州

Email: 529549698@qq.com, #gisflow@qq.com

收稿日期: 2020年9月4日; 录用日期: 2020年9月20日; 发布日期: 2020年9月27日

摘要

三维地质建模方法在寻找隐伏矿床方面具有独特的优势, 尤其是在地表矿化信息不足的地段, 具有传统方法不可替代的作用。羊拉铜矿床江边矿段因构造破坏和不同期次岩浆作用的叠加, 地表找矿信息较少, 常规的地质、地球物理和地球化学方法进行深部预测往往成果高且效果不佳。本文在深入研究区域成矿规律的基础上, 充分利用研究区已有的勘查数据, 以Surpac软件为平台, 建立了江边矿段的三维地质模型, 并以此模型为基础, 建立了成矿预测信息模型, 并采用三维信息量法, 开展了找矿预测, 圈定了3处远景预测区, 对于指导区内下一步的找矿工作具有一定的指导意义。

关键词

羊拉铜矿江边矿段, 找矿预测, 三维地质建模, 信息量法

Three-Dimensional Geological Modeling and Location Prognosis of Concealed Ore Deposit (Bodies) in Jiangbian Section of Yangla Copper Mine, Yunnan Province

Runtang Jian^{1*#}, Guofu Zou², Junling Zhang³, Fubin Su¹, Xiaomei Song¹

¹Baise university, Baise Guangxi

²Kunming Prospecting Design Institute of China Nonferrous Metals Industry Co., Ltd., Kunming Yunnan

³Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou Guangdong

Email: 529549698@qq.com, #gisflow@qq.com

*第一作者。

#通讯作者

文章引用: 坚润堂, 邹国富, 张俊岭, 苏富彬, 宋小美. 云南羊拉铜矿江边矿段三维地质建模及隐伏矿床(矿体)定位预测[J]. 地球科学前沿, 2020, 10(9): 857-868. DOI: 10.12677/ag.2020.109084

Abstract

The 3D geological modeling method has unique advantages in searching for concealed ore deposits, especially in areas where there has less mineralization information, it has the function that the traditional method can not replace. There's little mineralization information of the surface due to structural failure and superposition of multi-phase magmatism in Jiangbian ore block of Yangla copper deposit, so the prospecting result is not good by conventional geological, geophysics and geochemistry methods. The Yangla copper mine is selected as the research object, based on the existing exploration data in the area, Surpac software as the platform, the three-dimensional geological model of the mine is established by contour modeling method. Based on the model, the metallogenic prediction information model is established, and the three-dimensional information quantity method is used to carry out the metallogenic prediction and delineate the three prospective prediction areas. It has some guiding significance for guiding the next prospecting work.

Keywords

Jiangbian Section of Yangla Copper Mine, Metallogenic Prediction, Three-Dimensional Geological Modeling, Information Method

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

随着找矿难度日益增大，矿产勘查的成功率越来越依赖于深入的成矿规律研究和科学的矿产资源预测理论和方法[1] [2] [3]。三维地质建模与可视化(3D Geosciences Modeling and Visualization)是指采用适当的数据结构在计算机中建立能反映地质构造、矿体形态和各要素之间关系以及地质体物理、化学属性空间分布等特征的数字模型[4]。由于地质体本身三维属性的客观性，必然要求找矿方法由传统的单一向综合、由二维向三维转变，从而更直观更精确地圈定矿体边界、了解地质体三维空间分布形态、准确地解译和圈定地质体以便指导深部找矿和预测，已成为当今地学领域的重点研究方向[5]。同时，随着计算机科学的高速发展，三维地质建模技术、遥感技术、数据仓储技术等为三维地质矿产勘查提供了强大的技术支撑，将空间信息管理、地质解译、空间分析和预测、地学统计、实体内容分析以及图形可视化等工具结合起来，建立精准并且形象的三维地质模型，能够更加准确的表达出各种地质体的三维空间展布以及彼此之间的相互关系，从而更有效地开展成矿规律研究和隐伏矿体找矿预测。基于 Surpac 软件的三维地质建模和可视化的研究已日渐成熟，并取得了显著的成果，如今该软件在矿产勘查、采矿工程和测量等领域均已得到广泛的应用[6]-[11]。

羊拉铜矿床位于青藏高原东缘的金沙江西岸，构造位置处于中咱地块与昌都-思茅地块之间的金沙江缝合带中段(图 1(a))，是迄今为止金沙江构造带内发现的最大规模的铜矿床，因其成矿地质条件优越、矿化类型多样、找矿潜力大而引起了国内外学者的广泛关注，并在区域成矿地质背景及岩浆演化[12]-[25]、矿床地质地球化学[26]-[39]等方面取得了许多重要研究成果和进展。然而有关该矿床三维地质模型和矿体的空间定位预测研究明显不足。本研究以羊拉铜矿床工作程度较低且研究最为薄弱的江边矿段为研究对象，

充分利用矿区已有的地质资料，并借助三维数字矿山软件 Surpac，通过对羊拉铜矿江边矿段进行三维可视化技术研究，直观有效地反映了该矿段矿体、地层、岩体和构造等的空间分布特征，进一步揭示了矿化分布规律，构建了该矿段三维地质模型和成矿预测模型，开展了找矿预测，以期为进一步找矿提供依据。

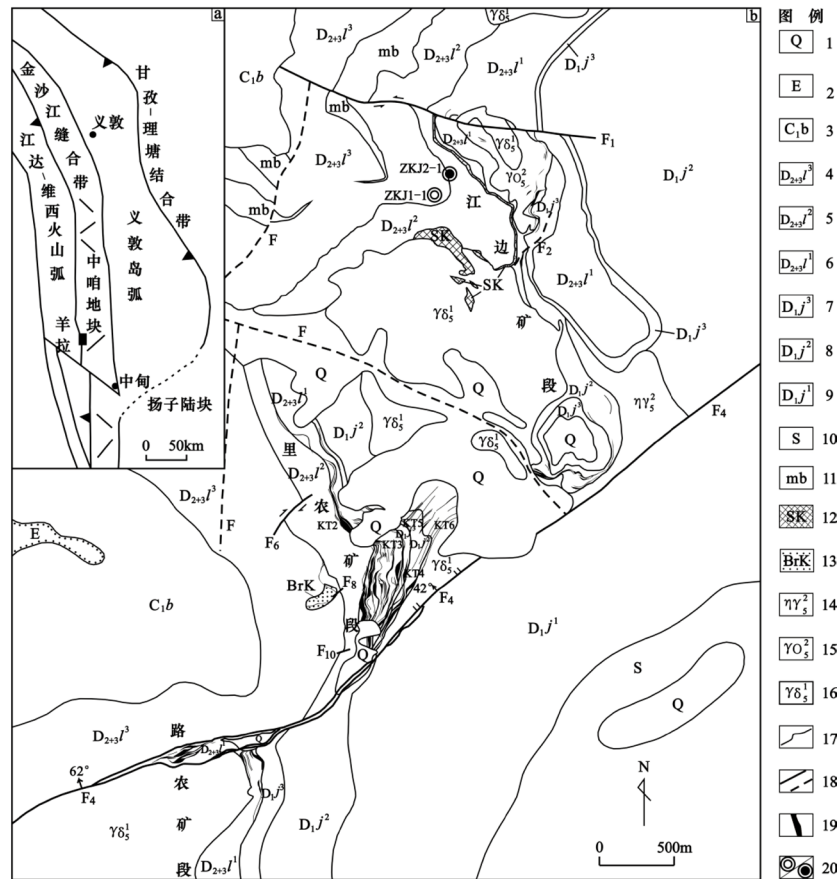


Figure 1. Tectonic location map (a) and eological sketch map (b) of the Yangla copper deposit. 1-eluvial and slope sediments; 2-purple red conglomerate and sandstone; 3-basalt, sericite slate and tuff; 4-metamorphic quartz sandstone and sericite-siltyslate ; 5-fine, middle grained marble and banded marble; 6-metamorphic quartz sandstone and sericite slate; 7-fine, middle grained marble; 8-metamorphic quartz sandstone,quartz schist and sericite-sandy slate; 9-fine, middle grained marble and sericite-quartz schist; 10-biotite-quartz schist with metamorphic quartz sandstone; 11-marble; 12-skarn; 13-hydrothermal breccia; 14-Fine grained adamellite; 15-Plagiogranite; 16-granodiorite; 17-geological boundary; 18-Measured and speculated fault; 19-ore body; 20-ore intersecting and without mineralized drilling

图 1. 羊拉铜矿床大地构造位置图(a)及地质略图(b)。1-残坡积层；2-紫红色砾岩、砂岩；3-玄武岩、绢云板岩、凝灰岩；4-变质石英砂岩、绢云粉砂质板岩；5-细中晶大理岩、条带状大理岩；6-变质石英砂岩、绢云板岩；7-细中晶大理岩；8-变质石英砂岩、石英片岩、绢云砂质板岩；9-细中晶大理岩、绢云石英片岩；10-黑云石英片岩夹变质石英砂岩、绢云板岩；11-大理岩；12-砂卡岩；13-隐爆角砾岩；14-细晶二长花岗岩；15-斜长花岗岩；16-花岗闪长岩；17-地质界线；18-实测及推测断层；19-矿体；20-见矿及未见矿钻孔

2. 研究区地质概况

羊拉大型铜矿床位于云南省迪庆州羊拉乡，夹持于金沙江深大断裂与羊拉大断裂之间(图 1(a))，自北向南分为江边、里农和路农三个矿段(图 1(b))，矿区地层为由一些大小不一的构造岩片所组成的构造混杂堆积体，主要岩性为碳酸盐岩、碎屑岩和变火山岩，原 1:20 德钦幅将其划归嘎金雪山岩群上亚群，并分为 4 个岩性段，时代归属二叠纪。之后云南省地质调查院将矿区内主要赋矿地层划定为泥盆系下统江边组(D_{1j})和泥盆变系中上统里农组(D_{2+3l}) (云南省地质调查院，2006)。江边组细分为三段，上段为浅灰白色

中 - 厚层状细 - 中晶大理岩夹绢云砂质板岩、变质石英砂岩, 顶底板具砂卡岩化; 中段为浅灰色变质石英砂岩、绢云砂质板岩、绢云石英片岩夹绢云绿泥片岩、角闪安山岩、大理岩透镜体; 下段为浅灰色薄层状大理岩夹斜长绿泥片岩, 角闪安山岩, 绢云石英片岩。里农组亦细分为三段, 上段为浅灰色变质石英砂岩夹绢云板岩、灰色厚层状细晶大理岩和浅灰色砂质绢云板岩夹大理岩透镜体, 顶部具强烈砂卡岩化; 中段为灰白色厚层状细 - 中晶大理岩; 下段为浅灰绿色绢云砂质板岩夹变石英砂岩、厚层状透辉石砂卡岩夹变质砂岩、绢云板岩和浅灰 - 灰绿色变质石英砂岩。

受多期构造活动影响, 区内岩石强烈变形, 褶皱、断裂、节理、层间滑脱构造十分发育, 加之多期次岩浆侵入, 使得矿区构造极为复杂。矿区内的褶皱主要有里农背斜和江边向斜, 里农背斜核部被印支期花岗闪长岩侵位而呈构造穹隆状, 轴向近 SN, 南延被 F_4 切断, 褶皱出露长度约 1200 m, 宽 30~300 m, 南部被第四系覆盖及岩体破坏, 褶皱轴面倾向 NW, 倾角 $30^\circ\sim 50^\circ$, 核部枢纽向 NW 倾伏, 倾伏角约 40° , 两翼地层在转折端表现出较明显的揉褶现象。褶皱西翼出露江边组二段和里农组地层, 倾向 SW, 倾角较缓($22^\circ\sim 29^\circ$); 褶皱东翼出露江边组二段和里农组一段, 倾向 NE~SE, 倾角较陡($>50^\circ$)。江边向斜实为里农背斜东翼的一个小型次级褶皱, 轴向 NNW, 核部地层为里农组一段, 两翼为江边组二段、三段, 受岩体影响, 褶皱西翼地层倾角较陡($>50^\circ$), 东翼地层倾角较缓($25^\circ\sim 35^\circ$)。

羊拉矿区断裂构造特别发育, 除区域性的金沙江、羊拉等深大断裂外, 主要有斜穿矿区中部的 NE 向断层 F_4 、近 NE 向的平移断层 F_6 、 F_8 、 F_{10} 和层间破碎带。 F_4 是区内规模最大的断层, 走向 NE, 向东与金沙江断裂带相交, 形成“入”字型分支断层, 向西延出矿区, 区内延长近 6000 m。断面北倾, 倾向 $280^\circ\sim 340^\circ$, 倾角 $42^\circ\sim 80^\circ$, 向深部变陡, 断面起伏。断层两盘地层错距明显, 北盘地层东移, 南盘西移, 错距 360~700 m。基于野外实测, 综合该断层的几何形态、发育历史等判断, 该断层明显具有多期活动特征, 早期为挤压推覆, 控制岩体、地层的分布, 晚期破坏矿体, 属张扭性正断层。层间破碎带是羊拉铜矿床最重要的成矿控矿构造, 羊拉铜矿绝大多数工业矿体均受其控制, 由于层间破碎带一般距离岩体不远, 并且矿体多呈层状、似层状和大的透镜体状, 故形成砂卡岩型、喷流沉积型、多因复成等众多成因认识(关于羊拉铜矿的构造系统及矿床成因将另文讨论, 在此不再赘述)。

岩浆岩在羊拉矿区分布较广, 以侵入岩为主, 喷出岩较少。喷出岩仅在里农组($D_{2+3}l$)、江边组(D_{1j}) 地层中见有层状产出的角闪安山岩、玄武岩, 路远发等(2000)测得玄武岩锆石年龄 362 ± 8.0 Ma。侵入岩出露约占矿区面积的 1/3, 呈岩株状产出, 出露里农(黑云母)复式花岗岩体, 岩性有花岗闪长岩, 黑云二长花岗岩、斜长花岗岩。花岗闪长岩体具有穹窿式侵入特征, 并在西侧变得缓倾, 利于在西侧形成大面积砂卡岩接触带, 并向深部延伸。目前在里农岩体东接触带发现铜矿化带 1 处, 已查明矿体 8 个, 主工业矿体为 JKT1、JKT4, 分别赋存于矿化带之北段和南段, 矿体产状随岩体与围岩接触带产状变化而同步变化, 矿体产状受岩体内外接触带裂隙带控制(唐果等, 2015; 徐巧等, 2016)。

现已查明矿体中, 以里农矿段规模最大, 江边矿段最小。里农矿段矿体主要产在里农复式岩体西侧的 D_{2+3j} 和 D_{1j} 中, 矿体呈层状、似层状和透镜状, 严格受层间破碎带控制, 共圈定工业矿体 8 个, 主矿体为 KT2(上)和 KT5 矿体。路农矿段的主矿体夹持在 F_4 断裂破碎带中, 产状与断层产状一致, 故历来被划归另外一种类型的矿体, 通过详细的编录, 矿石矿物特征、蚀变特征以及地球化学特征的研究, 我们认为路农矿段的矿体实际和里农矿段的矿体同属一类, 只是受到后期构造活动破坏而被卷入断层破碎带中而已。江边矿段的矿体主要产于里农岩体内外接触带中, 现已发现两条主矿体 JKT1 和 JKT2 和一些小的矿化体, 矿体在空间上延伸不远, 品位、厚度均变化较大, 分枝复合现象明显, 早期研究认为属接触交代砂卡岩型矿床, 但经过地表调查和钻孔岩芯的详细编录后, 发现江边矿段矿化类型与里农、路农矿段均有不同, 所以作者更倾向于斑岩型矿化, 可与通吉格铜矿床对比分析, 今后工作中应加强研究。

3. 三维地质模型构建

3.1. 技术路线

系统收集矿区已有的勘查资料和研究成果资料，利用 AutoCAD、MapGIS 等软件进行矢量化或格式化转换处理后，导入 Surpac 软件中提取地质体轮廓线，将钻孔编录信息、地质资料、遥感数据、地球物理资料、地球化学资料以及历年地质报告文本等整理后构建成矿要素地质数据库；通过对成矿地质体、成矿构造与成矿结构面、成矿作用特征的深入分析建立找矿地质概念模型；根据出露地层、构造、岩体、矿体等地质体建立相应的地质体模型，将探槽、钻探、井巷等实际工程转换成工程模型，基于 ASTER GD2 遥感影像提取的 30 m 等高线数据，构建江边矿段的三维地形模型，实现矿段地质现象的三维可视化；基于赋矿地层、控矿构造、蚀变特征、物化探异常等总结成矿规律和成矿模式，提取各地质体的成矿有利信息，采用证据权重法建立矿床三维找矿预测模型，基于定量预测模型进行深边部隐伏矿体找矿预测，提供定位、定质和定量的三维预测成果。本研究三维地质建模及成矿预测技术路线详见图 2。

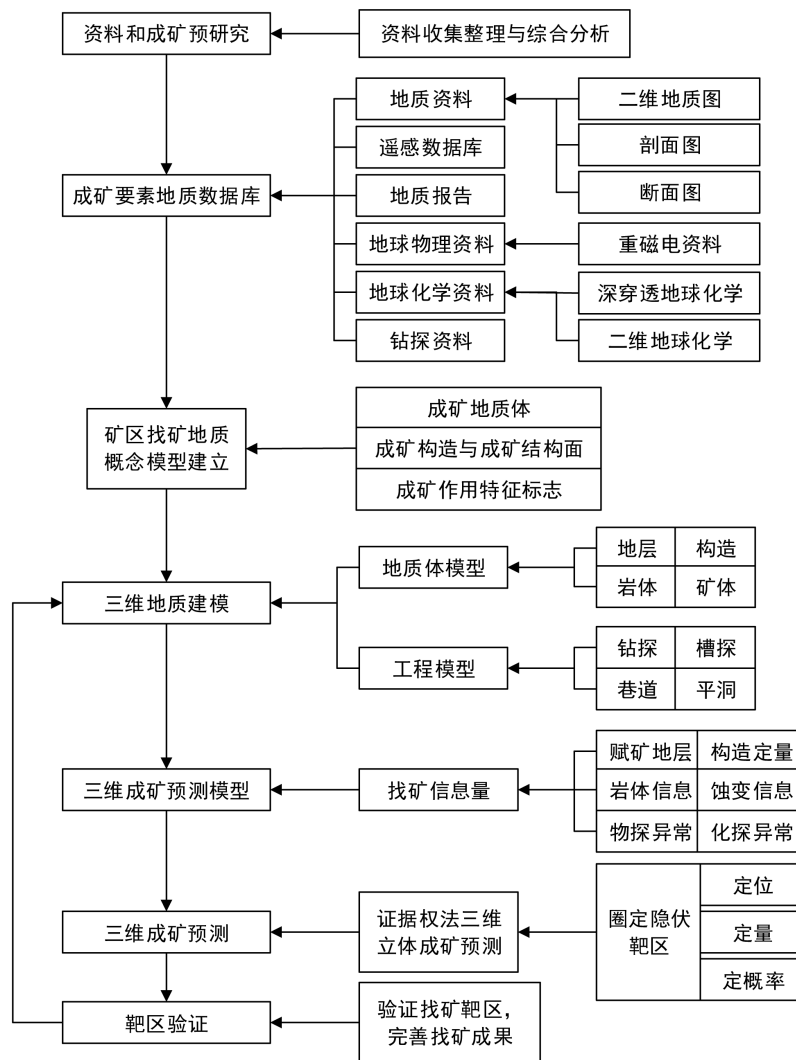


Figure 2. Three-dimensional geological modeling and metal logenic prediction technique route in Jiangbian ore section of Yangla copper deposit

图 2. 云南羊拉铜矿江边矿段三维地质建模及成矿预测技术路线

3.2. 地质数据库

地质数据库是用于管理地表、钻孔、坑道等地质信息的数据库系统，该数据库也是矿区矿产资源评价的基础。原始数据资料数据库是构建矿山三维地质模型的基本组成部分，通过对地形地质图、勘探线剖面图、坑道平面图进行格式统一后导入软件中，为构建三维地质模型奠定基础。利用钻孔、坑道样品化验数据创建孔口位置表、测斜表、化验表和岩性表，依据地质数据库通过 Surpac 软件构建三维模型，实现钻孔三维可视化。

3.3. 轮廓线建模法

三维地质建模是指采用各种数学计算方法和计算机，定量的描述和数学化的计算机表达与矿床形成与分布有关的各种地质对象的几何形态、空间分布进行三维几何模型和场模型。本研究采用基于 Surpac 软件的轮廓线建模法。该方法首先是基于已有包括地质地形数据、钻孔数据、地质剖面数据等数据，在 GIS 或三维地质建模软件的支持下，由地质工作人员通过人机交互的方式提取不同地质界面信息，然后将地质界面信息进行连接闭合，构建相应的地质体三维地质结构模型，最后通过编号或属性赋值的方式，赋予相应地质体三维实体模型以地质意义。该方法是当前主流的三维地质建模方法，其应用最为广泛，在建模过程中可融入地质专家知识，且可对地质模型的结构细节进行精细控制，因此可用于对非常复杂或精细的地质结构进行构建，具有高精度、高可控性的特点。

3.4. 三维数字矿段的建立

羊拉铜矿江边矿段三维地质模型的建立包括地形、地层、构造、岩体、矿体和钻孔等。

3.4.1. 三维地形模型

基于 ASTER GD2 遥感影像提取的 30 m 等高线数据，构建的羊拉矿区江边矿段的三维地形模型详见图 2 所示。矿段地形切割强烈，以高山、狭谷地貌为特征，海拔自金沙江边的 2270 米骤升至二级分水岭的 4286 米，最高点标高 4200 m，最低侵蚀基准面标高 2270 m，相对高差 1930 m，地形、地貌地貌属构造剥蚀侵蚀中 - 高山类型，总体地势北西高、东南低。图 3 为羊拉铜矿江边矿段三维地形模型。

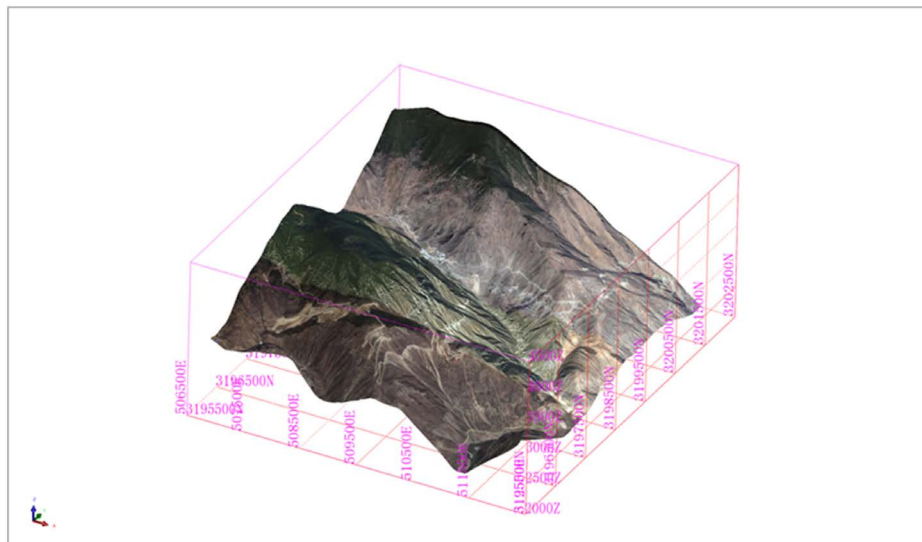


Figure 3. Three-dimensional terrain model of the Jiangbian section of Yangla copper mine
图 3. 羊拉铜矿江边矿段三维地形模型

3.4.2. 三维地层模型

研究区与成矿有关的地层有江边组二段(D_j^2)、江边组三段(D_j^3)、里农组一段($D_{2+3}l^1$)、里农组二段($D_{2+3}l^2$)、里农组三段($D_{2+3}l^3$)。其中江边组二段为矿段主要赋矿层位, 江边组三段为矿段主要含矿层位。图 4 为羊拉铜矿江边矿段三维地层模型。

3.4.3. 三维构造模型

研究利用地质图、勘探线剖面图、钻孔编录数据以及所收集到的产状数据, 构建了羊拉铜矿江边矿段主要断裂模型, 区内主要发育一条近东西走向、横贯研究区大部的一条断裂及局部零星小的次级断裂。图 5 为羊拉铜矿江边矿段三维构造模型。

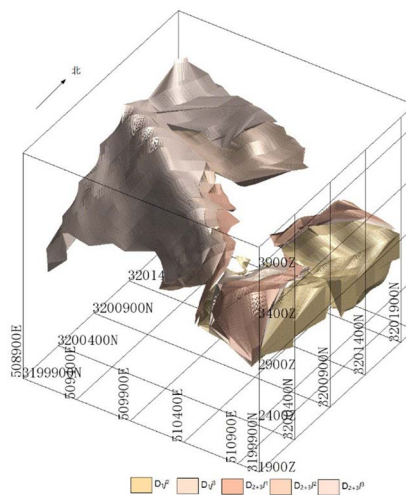


Figure 4. Three-dimensional stratigraphic model of the Jiangbian section of Yangla copper mine
图 4. 羊拉铜矿江边矿段三维地层模型

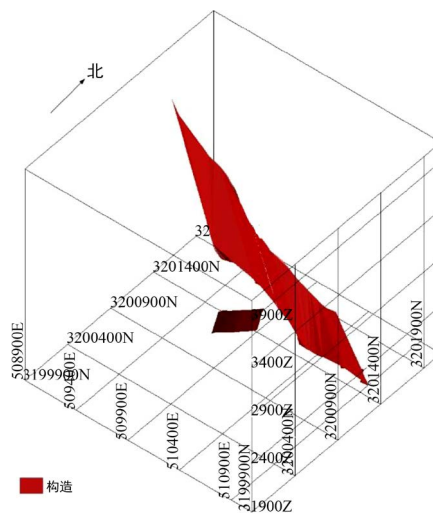


Figure 5. Three-dimensional structure model of the Jiangbian section of Yangla copper mine
图 5. 羊拉铜矿江边矿段三维构造模型

3.4.4. 三维岩体模型

研究区岩浆岩分布较广, 以侵入岩为主。约占矿段总面积的 1/3。出露里农(黑云母)复式花岗岩体,

岩性有花岗闪长岩、花岗闪长斑岩、闪长玢岩、黑云二长花岗岩等。喷出岩较少，分布于里农组(D₂₊₃l)、江边组(D₁j)地层中，呈层状产出，岩性为基性 - 中基性的角闪安山岩、玄武岩，时代为华力西期。图 6 为羊拉铜矿江边矿段三维岩体模型。

3.4.5. 三维矿体模型

羊拉铜矿江边矿段已探明的主要矿体为 JKT1 和 JKT2，矿体延伸较小，呈脉状产于岩体与地层的接触带附近，依据钻孔编录数据、矿体剖面数据及地质矿产图，所构建的研究区三维矿体模型图详见图 7。

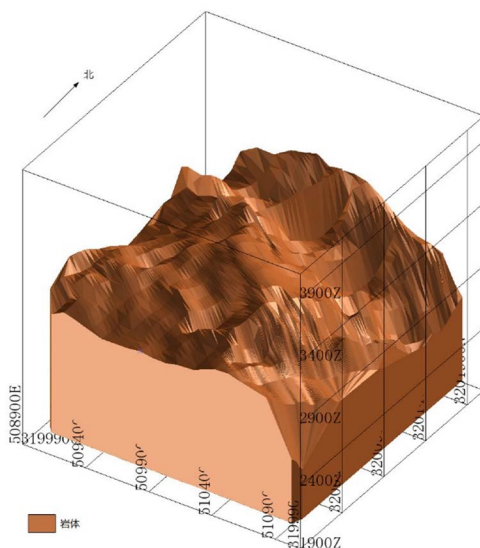


Figure 6. Three-dimensional rock mass model of the Jiangbian section of Yangla copper mine
图 6. 羊拉铜矿江边矿段三维岩体模型

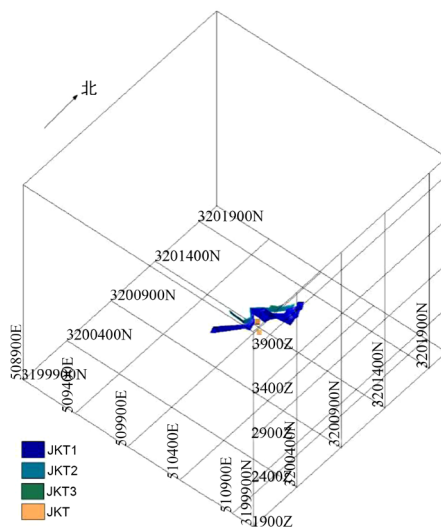


Figure 7. Three-dimensional orebody model of the Jiangbian section of Yangla copper mine
图 7. 羊拉铜矿江边矿段三维矿体模型

4. 成矿预测

在已建立的研究区三维地质模型的基础上，根据研究区已有地质资料，矿体大小、采矿设计需要因

素, 确定单元块体大小为 5 m * 5 m * 5 m, 共划分 3,504,780 个单元立方块, 形成研究区地质三维块体模型, 并在此基础上进行成矿有利条件的分析与提取, 并采用三维信息量法进行评级及圈定预测区。

4.1. 找矿信息模型构建

以研究区成矿规律和成矿模式为指导, 通过三维缓冲分析、三维拓展分析、三维布尔逻辑运算等三维空间分析方法, 提取了研究区成矿有利条件信息, 构建了羊拉铜矿江边矿段找矿信息模型(表 1)。

Table 1. Metallogenic prediction model of Jiangbian section of Yangla copper mine

表 1. 羊拉铜矿江边矿段成矿预测模型

控矿要素	成矿预测因子	特征变量	特征值
地层	赋矿地层信息	赋矿地层	江边组二段(D ₂ ²)
	含矿地层信息	含矿地层	江边组三段(D ₂ ³)
			里农组三段(D ₂₊₃ ³)
构造	构造带特性	断裂缓冲区域	断裂周边 500 m 缓冲区
岩体	岩体接触带	岩体内外接触面缓冲区	岩体接触面±500 m 缓冲区
蚀变带	有利围岩蚀变	成矿有利围岩蚀变	矽卡岩化带(SK)
矿体	矿体影响场	矿体缓冲区	矿体周边 200 m 缓冲区

4.2. 三维信息量计算

信息量方法利用条件概率方法定量化度量控矿或指示要素与已知成矿事实之间的关系, 并利用信息量来反映其对于成矿预测的重要程度, 该方法最早是由 E. B.维索科奥斯特罗夫斯卡娅(1968)及 N. N 恰金(1969)先后出的一种应用于区域成矿预测的一种统计分析方法, 并在国内经由赵鹏大等人在矿床统计预测中应用并取得良好效果。其计算步骤是先是计算各地质因素、找矿标志所提供的找矿信息量, 定量评价各地质因素和标志对指导找矿的作用; 其次, 计算每个单元中各标志信息量的总和, 其大小反映了该单元相对的找矿意义, 用以评价找矿远景区进行预测, 提出找矿远景区。

信息量的计算公式如下(公式 1):

$$I_{AiB} = \ln \frac{P(B|A_j)}{P(B)} = \ln \frac{P(A_j|B)}{P(A_j)} \approx \ln \frac{N_j/N}{S_j/S} \quad (1)$$

公式 1 中, N 为具有成矿事实的立方体单元总数, N_j 为具有成矿事实及控矿或指示要素 j 的立方体单元总数; S 为所有立方体单元总数, S_j 为具有控矿或指示要素 j 的单元总数。 I_{AiB} 为控矿或指示要素, A_j 为支持成矿事实的存在能够提供的信息量。 I_{AiB} 大于 0 表示 A_j 的存在有利于成矿; I_{AiB} 小于 0 表示 A_j 的存在不利于成矿; I_{AiB} 约等于 0 则表示 A_j 的存在并不能提供任何指导性信息。

4.3. 预测结果及靶区优选

采用三维信息量法计算各控矿要素及找矿标志所提供的找矿信息量, 并采用统计分析方法将信息量值分为 3 级, 结合研究区地质实际以及区内已探明矿体等情况, 圈定出 3 处远景预测区(图 8), 其中 I 号预测区位于研究区的西北部, 断裂带与 SK 地层交汇区域附近, 浅表属于脉状矿体, 矿体规模较小, 形态不规则, 但深部在隐伏花岗斑岩体, 是寻找斑岩型铜矿床的理想地区; II 号预测区位于研究区的中部, 侵入岩内外接触带缓冲区范围内, 该区地表民有少量铜矿(化)体显示, 经钻孔验证深部

见含铜斑岩脉，有寻找斑岩型铜矿床的潜力；III号预测区位于现有已知矿体的周围，后经钻孔验证，在III号预测区深部揭露到2条斑岩型铜矿体，并证明了预测结论的正确性。总之，上述3个靶区均具有良好的成矿条件，可作为下一步钻探工作的重点区域，从而为羊拉铜矿江边矿段深边部找矿勘查工作提供科学依据。

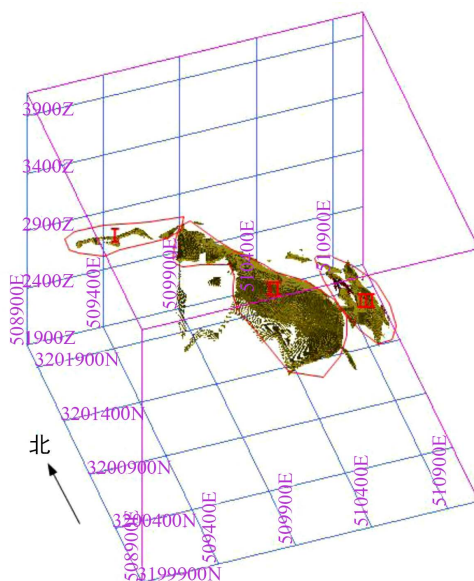


Figure 8. Prospective prediction area stereogram of the Jiangbian section of Yangla copper mine
图 8. 羊拉铜矿江边矿段远景预测区立体图

5. 结论

在分析羊拉铜矿床地质背景及成矿条件的基础上，深入研究了各矿段矿体的产出特征、控矿构造特征，总结了成矿规律，提出了新的认识。并以此为指导，采用轮廓线建模法建立了研究区的三维地质模型和成矿预测信息模型，并采用三维信息量法计算了各控矿要素及找矿标志的信息量，进而圈定了3处远景预测区，其中III号预测区经钻孔验证发现斑岩型铜矿体，证明本预测方法具有一定的可靠性，为羊拉铜矿江边矿段下一步的矿勘查工作提供了科学依据。

基金项目

云南省科技惠民计划项目：(2013CA019)；中国有色金属工业昆明勘察设计院有限公司重点科技项目(20190101)；百色学院2018年度校级科研项目(项目编号：2018KN10)资助。

参考文献

- [1] 赵鹏大, 胡旺亮, 李紫金. 矿床统计预测(第二版)[M]. 北京: 地质出版社, 1994, 1-314.
- [2] 卢作祥, 范永香, 刘辅臣. 成矿规律与成矿预测学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989, 1-245.
- [3] 范永香, 阳正熙. 成矿规律和成矿预测[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003, 1-273.
- [4] 卢大超, 付友山. 三维矿产资源评价软件 Micromine 在金属矿山资源储量估算中的应用——以吉林舒兰季德钼矿为例[J]. 世界地质, 2010, 29(3): 450-455.
- [5] 安乐, 何虎军, 杨兴科, 等. 基于 Surpac 的马蹄沟金矿床三维地质模型构建及找矿预测[J]. 黄金科学技术, 2018, 26(5): 586-595.
- [6] 罗周全, 刘晓明, 苏家红, 等. 基于 Surpac 的矿床三维模型构建[J]. 金属矿山, 2006, 358(4): 33-36+72.

- [7] 罗周全, 鹿浩, 刘晓明, 等. 矿山三维实体建模[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2007, 21(4): 9-15.
- [8] 郭广军, 王海波, 栾欣莉, 等. SURPAC 软件在焦家金矿自动化制图中的应用[J]. 黄金科学技术, 2009, 17(1): 56-59.
- [9] 尚北川, 陈建平, 郑啸, 等. 个旧高松矿田断裂构造三维信息定量特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(5): 1448-1456.
- [10] 陈建平, 于淼, 于萍萍, 等. 重点成矿带大中比例尺三维地质建模方法与实践[J]. 地质学报, 2014, 88(6): 1187-1195.
- [11] 陈建平, 于萍萍, 史蕊, 等. 区域隐伏矿体三维定量预测评价方法研究[J]. 地学前缘, 2014, 21(5): 211-220.
- [12] 魏君奇, 陈开旭, 魏福玉. 滇西羊拉地区构造 - 岩浆 - 成矿作用分析[J]. 华南地质与矿产, 2000(1): 59-62.
- [13] 战明国, 路远发, 陈式房, 等. 滇西德钦羊拉铜矿[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1998.
- [14] 何龙清, 战明国, 路远发. 滇西羊拉铜矿区层序地层划分及赋矿层位研究[J]. 华南地质与矿产, 1998, 14(3): 37-41.
- [15] 王立全, 潘桂棠, 李定谋, 等. 金沙江弧 - 盆地时空结构及地史演化[J]. 地质学报, 1999, 73(3): 206-218.
- [16] 李定谋, 王立全, 须同瑞, 等. 金沙江构造带铜金矿成矿与找矿[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- [17] 曲晓明, 杨岳清, 李佑国. 从赋矿岩系岩石类型的多样性论羊拉铜矿的成因[J]. 矿床地质, 2004, 23(4): 431-442.
- [18] 李文昌, 潘桂棠, 侯增谦, 等. 西南“三江”多岛弧盆 - 碰撞造山成矿理论与勘查技术[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- [19] Wang, X.F., Metcalfe, I., Jian, P., et al. (2000) The Jinshajiang-Ailaoshan Suture Zone, China: Tectonostratigraphy, Age and Evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, **18**, 675-690.
- [20] 高睿, 肖龙, 何琦, 等. 滇西维西 - 德钦一带花岗岩年代学、地球化学和岩石成因[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2010, 35(2): 186-200.
- [21] 王彦斌, 韩娟, 曾普胜, 等. 云南德钦羊拉大型铜矿区花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(6): 1833-1844.
- [22] Zhu, J.J., Hu, R.Z., Bi, X.W., Zhong, Ho. and Chen, H. (2011) Zircon U-Pb ages, Hf-O Isotopes and Whole-Rock Sr-Nd-Pb Isotopic Geochemistry of Granitoids in the Jinshajiang Suture Zone, SW China: Constraints on Petrogenesis and Tectonic Evolution of the Paleo-Tethys Ocean. *Lithos*, **126**, 248-264. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.07.003>
- [23] Yang, X.A., Liu, J.J., Li, D.P., Zhai, D.-G., Yang, L.-B., Han S.-Y. and Wang, H. (2013) Zircon U-Pb Dating and Geochemistry of the Linong Granitoid and Its Relationship to Cu Mineralization in the Yangla Copper Deposit, Yunnan, China. *Resource Geology*, **63**, 224-238. <https://doi.org/10.1111/rge.12006>
- [24] Deng, J., Wang, C.M. and Santosh, M. (2014) Orogenesis and Metallogenesis in the Sanjiang Tethyan Domain, China: Preface. *Gondwana Research*, **26**, 415-418. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.12.003>
- [25] Deng, J., Wang, Q.F., Li, G.J., Li, C. and Wang, C.M. (2014) Tethys Tectonic Evolution and its Bearing on the Distribution of Important Mineral Deposits in the Sanjiang Region, SW China. *Gondwana Research*, **26**, 419-437. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.08.002>
- [26] 魏君奇. 滇西羊拉矿区火山岩痕量元素地球化学[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1999, 18(3): 155-159.
- [27] 路远发, 陈开旭, 战明国. 羊拉地区含矿矽卡岩成因的地球化学证据[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 1999, 24(3): 298-303.
- [28] 路远发, 战明国, 陈开旭. 金沙江构造带嘎金雪山群玄武岩铀 - 铅同位素年龄[J]. 地质通报, 2000, 19(2): 155-158.
- [29] 陈开旭, 魏君奇, 鄢道正, 范玉华. 滇西德钦羊拉地区斑岩及其成矿作用初步研究[J]. 华南地质矿产, 1999(2): 1-8.
- [30] 陈开旭, 路远发, 魏君奇, 等. 滇西北羊拉铜矿区成矿地质背景及多期成矿作用[J]. 矿床地质, 2002, 21(增刊): 361-364.
- [31] 潘家永, 张乾, 马东升, 等. 滇西羊拉铜矿区硅质岩特征及与成矿的关系[J]. 中国科学 D 辑, 2001, 31(1): 10-16.
- [32] 林仕良, 王立全. 云南德钦羊拉铜矿床构造特征[J]. 沉积与特提斯地质, 2004, 24(3): 48-51.
- [33] 李石磊, 苏昌学, 燕永锋, 等. 羊拉铜矿矿床地质特征与成矿规律的研究[J]. 矿业快报, 2008, 24(12): 27-30.
- [34] 胡光龙, 姜华, 蒋靖, 等. 云南德钦羊拉铜矿区矿床控矿因素及找矿远景[J]. 金属矿山, 2008(12): 87-89.

- [35] 刘学龙, 张娜, 尹光侯, 等. 云南德钦羊拉贝吾 - 尼吕铜矿[J]. 云南地质, 2009, 28(1): 34-39.
- [36] 董涛, 李文昌, 曾普胜, 等. 羊拉铜矿床同生沉积叠加岩浆作用的地质特征[J]. 甘肃冶金, 2009, 31(6): 52-64.
- [37] 朱俊, 曾普胜, 曾礼传, 等. 滇西北羊拉铜矿区地层划分[J]. 地质学报, 2009, 83(10): 1415-1420.
- [38] 朱俊, 李文昌, 曾普胜, 等. 滇西羊拉矿区层状铜矿床复合成因的地质地球化学证据[J]. 地质评论, 2011, 57(3): 337-349.
- [39] 杜丽娟, 黄智龙, 李波, 等. 滇西北羊拉铜矿床里农 - 路农接合段构造地球化学与找矿预测[J]. 矿物学报, 2017, 37(4): 434-441.