

doi: 10.12029/gc20220115

周放, 王保弟, 贺娟, 郝明, 王鹏. 2022. 云南北衙斑岩-矽卡岩金铜矿床三维可视化建模与应用[J]. 中国地质, 49(1): 241-252.

Zhou Fang, Wang Baodi, He Juan, Hao Ming, Wang Peng. 2022. 3D visualization modeling and application study of porphyry-skarn gold-copper deposits in Beiya Area, Yunnan Province[J]. Geology in China, 49(1): 241-252(in Chinese with English abstract).

云南北衙斑岩-矽卡岩金铜矿床三维可视化建模与应用

周放, 王保弟, 贺娟, 郝明, 王鹏

(中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘要:【研究目的】位于金沙江—红河巨型构造—岩浆成矿带中段的北衙超大型矿床(已探明金 151.28 t, 铜 22.17 万 t), 是三江特提斯成矿域东段典型的斑岩-矽卡岩型金多金属矿床。近年来, 矿床浅部地质结构与资源状况已得到初步揭示, 但是其深部地质结构、深部控矿构造及深部找矿潜力还不清楚, 制约了深部的找矿发现。【研究方法】本研究以北衙金多金属矿床万洞山矿段 1000 m 以浅空间地质体作为研究对象, 采用 SKUA-GOCAD 平台, 选择“分块建模法”和“双面法”建立了万洞山矿段三维地质模型和金矿体模型; 在此基础上, 通过分析金元素空间变化特征, 模拟变差函数, 采用克里金插值法(Kriging)建立了规模矿体品位模型。【研究结果】结合品位模型和矿体模型, 估算金矿资源量约为 246 t, 同时金元素品位空间分布显示沿万洞山矿段 40° 方向存在一条优势富集带。【结论】“双面法”相比“切片法”能快速准确地建立矿体三维模型; 认为北东向(40°)金品位优势富集带为隐伏深大断裂浅部表现, 金元素不仅在岩体与碳酸盐接触蚀变带中富集, 也在距离岩体一定距离的隐伏断裂中富集, 为未来深部找矿有利方向。

关键词:斑岩-矽卡岩金铜矿床; 三维建模; 矿床可视化; 建模应用; 金沙江—红河成矿带; 矿产资源勘查工程; 北衙; 云南

创 新 点:根据地质模型估算了金元素储量, 与矿山储量报告相差小于 10%; 推测矿山存在隐伏深大断裂, 为深部找矿提供方向; 创建的“双面法”对于复杂层状贵金属矿体建模有较好效果。

中图分类号: P612 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)01-0241-12

3D visualization modeling and application study of porphyry-skarn gold-copper deposits in Beiya Area, Yunnan Province

ZHOU Fang, WANG Baodi, HE Juan, HAO Ming, WANG Peng

(Chengdu Center of Geological Survey, CGS, Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] Beiya supergiant deposit (explored Au: 151.28 t, Cu: 0.2217 Mt) located in the large-scale Jinsha river-Red river tectonic-magma-metallogenic belt, which is the typical porphyry Au polymetallic deposit in the southeastern margin area of Sanjiang-Tethys metallogenic domain. For the past few years, the shallow geological structure and resources of the deposit have

收稿日期: 2019-07-16; 改回日期: 2020-02-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2016YFC0600305, 2018YFC060410603)资助。

作者简介: 周放, 男, 1992 年生, 硕士, 矿物学、岩石学、矿床学专业; E-mail: Fzhou6@163.com。

通讯作者: 王保弟, 男, 1975 年生, 博士, 研究员, 从事青藏高原地质研究工作; E-mail: baodiwang@163.com。

been preliminarily revealed. However, its deep geological structure, deep ore-controlling structure and deep ore prospecting potential are still unclear, which restricts the prospecting and discovery of deep orebody. **[Methods]** In this paper, the shallow spatial geological body at 1000 m of Wandongshan ore block of the Beiya gold polymetallic deposit is taken as the research object. We choosing the "block modeling method" and the "double-sided method" to establish 3-D visualization of Wandongshan ore block and orebody model of Au deposit by using the SKUA-GOCAD platform. Further, Kriging interpolation was employed to acquire grade distribution model of Au based on analytical of spatial variation distribution characteristics and analog variogram. **[Results]** In the light of grade distribution model and orebody model, 246 t gold resource was assessed. Meanwhile, a dominant Au-enrichment belt was revealed along the 40° direction of Wandongshan ore block. **[Conclusions]** Compared with the "slice method", the "double-sided method" can quickly and accurately establishes the three-dimensional model of the ore body. It is believed that the NE trending (40°) gold-grade preponderant enrichment zone is manifested in the shallow part of the hidden deep and large fault, which demonstrate Au is not only enrichment in the contact-alteration zone between intrusion and carbonate, but also concentrated in buried fracture at a certain distance from the intrusion, which is a favorable spots for future deep ore prospecting.

Key words: porphyry-skarn gold-copper deposits; 3D geological modeling; deposit visualization; modeling application; Jinsha river-Red river metallogenic belt; mineral resources exploration engineering; Beiya; Yunnan Province

Highlights: Au resource was assessed in light of geological model which demonstrates tiny deviation (<10%) from reserve report; We speculate that there is a deep buried fracture in Wandongshan strike parallel to 40°(220°) which promise bright future for deep prospecting; The "double-sided method" is more suitable for complex layered precious metal modeling according to the outcome of orebody modeling in this paper.

About the first author: ZHOU Fang, male, born in 1992, master, engaged in mineralogy, petrology and mineralogy; E-mail: Fzhou6@163.com.

About the corresponding author: WANG Baodi, male, born in 1975, doctor, research fellow, engaged in geological research on the Tibet Plateau; E-mail: baodiwang@163.com.

Fund support: Supported by National Key Basic Research and Development Program of China (No.2016YFC0600305, No.2018YFC060410603).

1 引 言

北衙超大型斑岩-矽卡岩型金多金属矿床(以下简称北衙金矿)位于青藏高原东南缘巨型构造-岩浆成矿带中南缘,金属资源丰富,成矿地质条件复杂。自20世纪90年代以来,随着矿床中金元素的发现,北衙金矿规模逐渐扩大,由中型→大型→超大型,成为了国内研究造山型金矿的热点区域。前人从流体包裹体(Liu et al., 2018)、成矿流体(Bao et al., 2018)、微量元素、成矿过程(Sun et al., 2017; Wang et al., 2018)、成矿规律(Mao et al., 2017; Zhou et al., 2018)和成矿潜力(曾琴琴等, 2012; 杨剑等, 2014, 2015; 王明志等, 2016)等方面做了大量研究,从各个角度深入解析了北衙金矿。但是前人的研究工作主要集中在浅部(高程1700 m之上),对于深部地质特征和控矿条件研究较少(和文言等, 2012)。

近年来,随着三维建模技术(Houlding, 1993)的

推广和应用,北衙金矿也开启了矿山三维数字化的进程。矿山先后建立了万洞山岩体和矿体品位模型,成都地质调查中心建立了整个北衙区域的三维地质模型(王鹏等, 2015)。但是,二者建立三维模型都存在不足,对所获模型研究也不够深入,如:(1)北衙矿区地下1000 m以浅三维地质模型可视化程度不够;(2)获得三维模型面都存在尺度较大,模型面精细度不够;(3)深部地层-构造-岩体-矿体耦合关系不清晰;(4)没有利用所建模型,对深部地质体空间耦合关系、品位特征与成矿成岩规律之间关系进行探讨。因此,有必要建立新的北衙金矿深部三维地质模型,对上述问题展开研究和探讨。

本研究以北衙金矿万洞山矿段1000 m以浅地质体为研究对象,通过收集北衙金矿万洞山矿段地质、化探和钻孔资料,在SKUA-GOCAD平台建立了万洞山矿段三维地质精细模型。依据模型开展了资源量评估、深部隐伏断裂圈定和成矿成岩过程的探讨,

以期深部和外围找矿突破提供地质依据和指导。

2 研究区域地质背景

北衙金矿位于“三江”地区德格—中甸陆块、巴颜喀拉—扬子陆块与昌都—思茅陆块3个I级构造单元结合部东侧的扬子陆块西缘(董黎阳等,2013)(图1)。三级构造单元为NNW向金沙江红河断裂、NE向宾川—程海断裂及NE向丽江—木里断裂为边界所夹持的盐源—丽江陆缘裂谷盆地和褶皱、仰冲相带(潘桂棠等,2003;尹福光等,2006)。区内构造、岩浆活动十分强烈,发育一系列近SN向叠瓦状逆冲断层、近SN向开阔褶皱、近SN向走滑断层及其控制的拉分盆地,区内斑岩体受SN向走滑断层和正断层控制。

矿区内出露二叠纪、三叠纪、古近—新近纪和第四纪等时代地层(图2)。三叠系北衙组(T_2b)灰岩和白云岩是主要的容矿地层。北衙组中白云岩普遍存在强烈的碳酸盐蚀变、褐铁矿化特征,形成土褐、土黄色砂糖状褪色蚀变岩石,而灰岩多有大理岩化,局部发育大理岩、矽卡岩及磁铁矿化现象。万硐山矿段中与成矿作用紧密相关的是喜山期富碱二长花岗斑岩,是成矿的赋矿岩石(肖晓牛,2009;王建华等,2015),空间上与构造和矿体呈明显的耦合性。富碱斑岩主要顺SN向控矿断裂发育,呈现出多期次、多阶段混熔侵入特征,并沿破矿断裂方向穿插填充煌斑岩、黑云二长花岗斑岩脉。与成矿相关的富碱斑岩由两期岩浆作用形成,构成了万硐山斑岩体主体,宏观上表现为晚期的灰色二长花岗斑岩呈火焰状穿插于早期的黄褐色二长花岗斑岩内。

北衙金矿由富碱斑岩—热液型、接触交代型和表生成矿型矿床组合而成,接触交代成矿作用和热液成矿作用为最主要的成矿作用(徐兴旺等,2007;和文言,2012)。矿体主要受断裂和岩体控制,存在于围岩蚀变带、斑岩脉体边部的陡缓过渡处、围岩裂隙和层间破碎带中,呈层状、似层状、透镜状、脉状和囊状产出。主要赋矿层位为三营组砂砾岩层、北衙组白云岩和灰岩层。已发现矿体的有万硐山、红泥塘、桅杆坡、金沟坝、炉坪等矿段,目前进入露天开采阶段的只有万硐山矿段。万硐山矿段已揭露矿体400多个,其中规模矿体16个,占北衙金矿资源量50%以上,且岩石露头全面,地质现象丰

富,深部地层直接出露,还有前期大量钻孔、地球物理和地球化学数据支撑。因此,对万硐山矿段详尽、适时的调查和研究可以更加有效地指导矿区外围及深部的找矿工作。

3 万硐山矿段三维地质模型

目前国际上流行的三维建模软件有Petrel、Surpac、Micromine、Dimine、GOCAD等。Petrel在石油工业中使用较多,Surpac、Micromine在矿山应用较多。SKUA-GOCAD兼具上述软件优点,其流程化建模功能、复杂构造模拟能力和多尺度资料融合能力,具有适用范围广、兼容性好、建模速度快、模块化、复杂三维模型精度高、真三维、强大的地质统计学和数值模拟手段丰富等优点,使其成为少数既能用于石油工业还能适应矿山建模的真三维建模平台。在石油行业、矿业、地质力学、地热、地下水等领域应用广泛,得到了超过100所大学和研究机构的认可。因此,选定GOCAD软件作为本次工作的三维建模软件。

3.1 地层构造面模型

地层构造模型是基于数字高程数据(DEM)、勘探线剖面图和地质图地质界限3类数据构建。

DEM数据和地质图界限数据用于构建地表地形、第四系和断裂系统。大致思路为:首先,导入DEM数据,保留建模范围内高程点;然后,通过构造流程建模(Structural modeling workflow,简称SMW)生成地表地形图,并将地层界限投影到地表地形图上,切割出第四系形态;最后,移动第四系面至区域内第四系平均厚度,并设置第四系钻孔分层数据对其进行约束插值(Discrete Smooth Interpolation,简称DSI插值)。三维断面模型则根据断层在地表的延伸和产状,计算深部延伸方向,使用Curves and expansion vector功能建立。

勘探线剖面图用于建立地下地层面模型,包括北衙组四段(T_2b^4)、北衙组三段(T_2b^3)、北衙组二段(T_2b^2)、北衙组一段(T_2b^1)和青天堡组(T_1q)。大致流程如下:首先,数字化勘探线剖面图中地层界线;然后,在构造建模流程中,直接生成地层界面模型;最后,设置钻孔分层数据对地层界面进行约束插值。

在完成所有单个面模型构建后,再将其组合起来,就构成了所有地层的面模型(图3)。

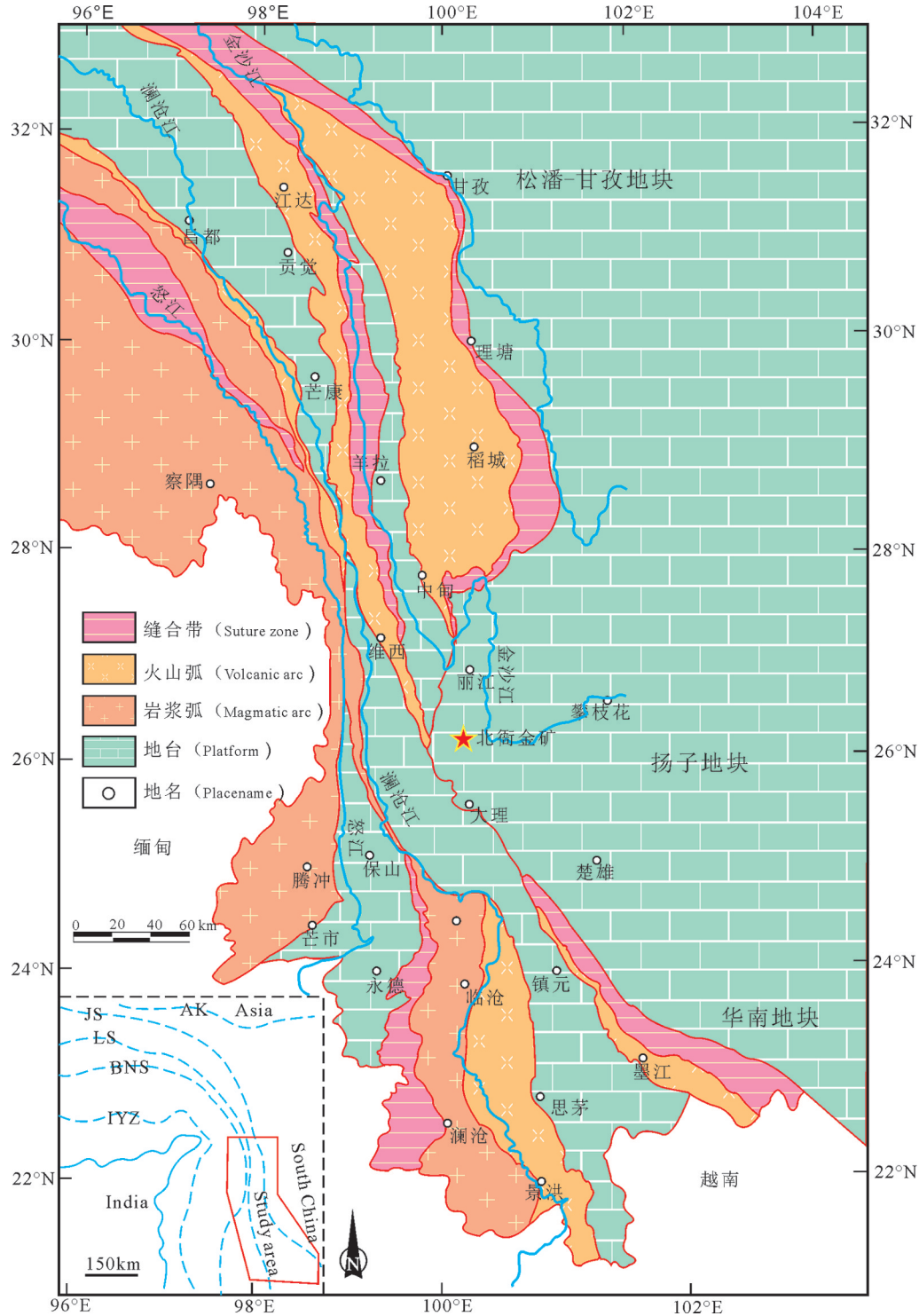


图1 北衙金矿大地构造位置(据 Wang et al., 2014修改)

AK—阿尼玛卿—昆仑缝合带;JS—金沙江缝合带;LS—澜沧江缝合带;BNS—班公湖—怒江缝合带;IYZ—印度—雅鲁缝合带

Fig.1 Tectonic location of Beiya gold-polymetallic deposit (modified from Wang et al., 2014)

AK—Anemaqen—Kunlun suture zone; JS—Jinsha River suture zone; LS—Lancang River suture zone; BNS—Bangong—Nujiang suture zone; IYZ—Indus—Yarlung suture zone

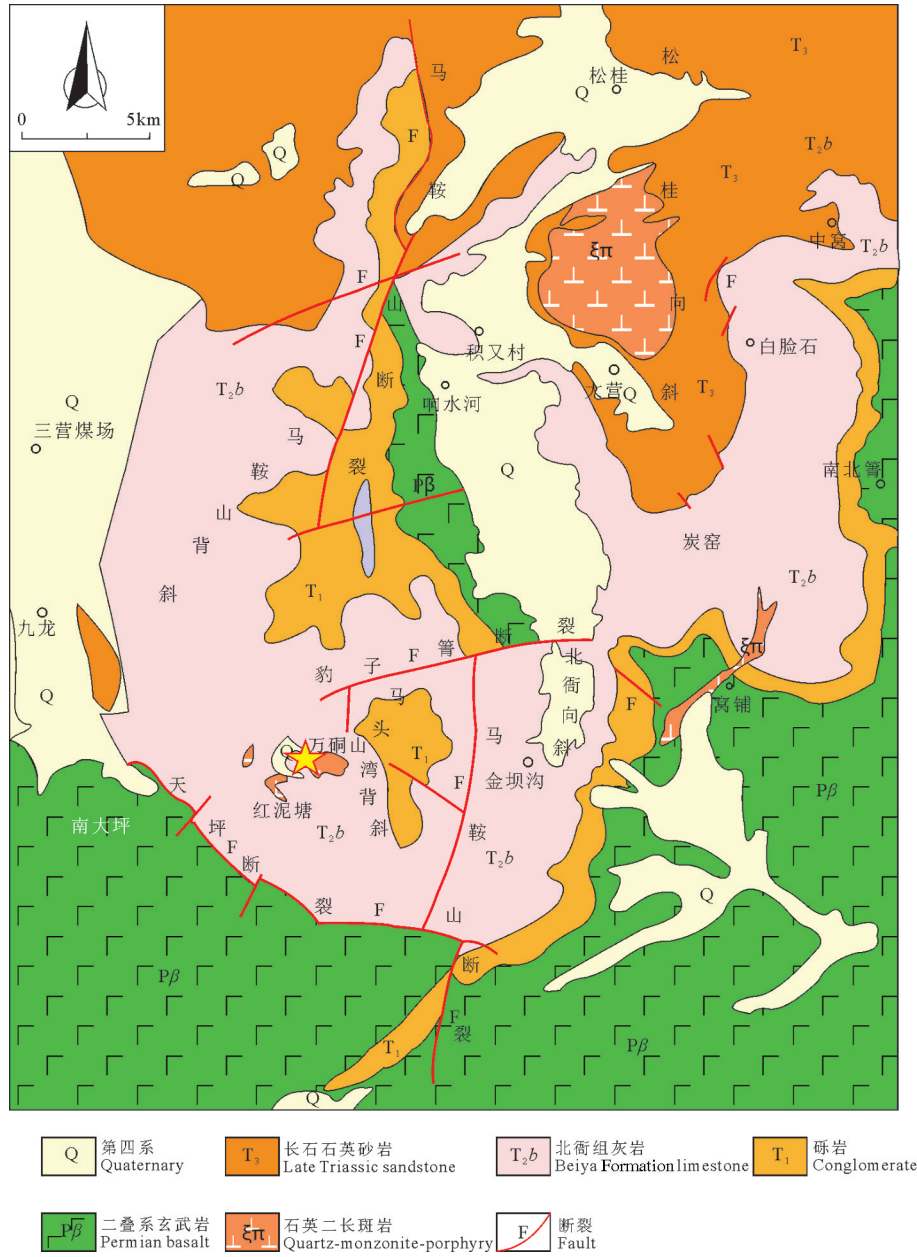


图2 北衙金矿地质简图(据和文言等,2012修改)

Fig.2 Simplified geological map of Beiya gold-polymetallic deposit (modified from He et al.,2012)

3.2 岩体面模型

侵入岩岩体形态和延伸复杂,目前对于这类复杂岩体并没有比较快速或者流程化的建模方法。本文采用相对精确的“切片法”(吴志春等,2016),对岩体开展建模工作。大致思路如下:(1)首先数字化所获勘探线剖面图岩体边界线,然后沿岩体延伸方向建立一系列水平切片;(2)提取水平切片与岩体边界线的交点,将二者交点用线连接成一个完整的封闭折线;(3)将上一步获得封闭曲线的节点设置为控制

点(control node),加密封闭曲线(densify),选择DSI算法插值;(4)将插值获得光滑封闭曲线依次按照岩体延伸方向连接(由线生成面功能),形成岩体初始界面;(5)用数字化岩体界限,对初始岩体界面进行约束和插值,使其形成光滑曲面,完成建模工作。

由于万铜山富碱斑岩体形态非常复杂,南北岩体形态差异较大(呈“南墙北颈”状),分支岩体也较多,在建模时采用南部和北部分开建模,主岩体和分支岩体分开建模,然后再拼接组合成完整岩体的

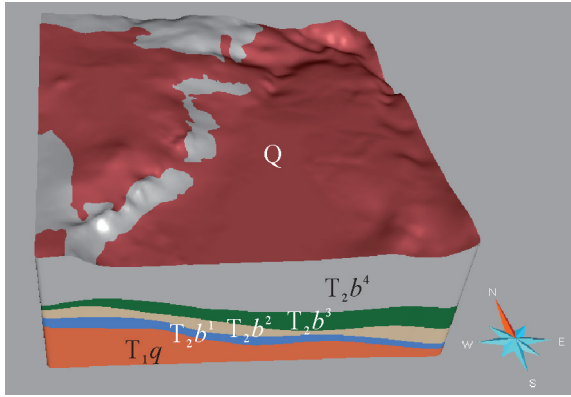


图3 万铜山矿区地层界面模型

Q—第四系; T_2b^4 —北衙组四段; T_2b^3 —北衙组三段; T_2b^2 —北衙组二段; T_2b^1 —北衙组一段; T_1q —青天组

Fig.3 3D geological stratum surface model of Wandongshan
Q— Quaternary; T_2b^4 —Section 4 of Beiya Formation; T_2b^3 —Section 3 of Beiya Formation; T_2b^2 —Section 2 of Beiya Formation; T_2b^1 —Section 1 of Beiya Formation; T_1q —Qingtianbao Formation

方法建立岩体面模型(图4)。

3.3 矿体面模型

贵金属矿体边界主要是根据工业参考指标所规定的边界品位和夹石厚度来确定,实际矿山应用中,矿体形态是由相邻钻孔化探结果所圈定。但是钻孔往往无法完全揭露矿体在地下的形态,因此在三维建模时还需要按照一定连接规则处理矿体的分支和尖灭(张宝一等,2007)。本研究基于勘探线剖面图,提出了一种采用先勾划整体矿体轮廓,然后生成矿体上下面(左右面),最后对上下面(左右面)设置约束条件插值(DSI插值)建立矿体面模型的方法。具体建模思路如图5:①首先数字化勘探线剖面图中矿体,得到矿体边界线,并根据数字化圈定边界,勾勒整个矿体边界轮廓线;②③处理分支矿体和矿体边界,使其符合矿体尖灭规则;④将矿体南北边界尖灭处理到最后南(北)矿体边界中部;⑤将矿体线分为上下两部分(或左右)为后续插值准备上下约束条件(或左右);⑥对上下约束线和矿体轮廓线进行加密和平滑处理;⑦由封闭线直接生成面功能,生成用于插值的上顶面和下底面;⑧将第五步获得上下部约束线,分别设置为上下面约束线后插值,组合上下面完成模型构建。

在万铜山矿段全部规模矿体中进行了实践,取得了较好效果(图6)。

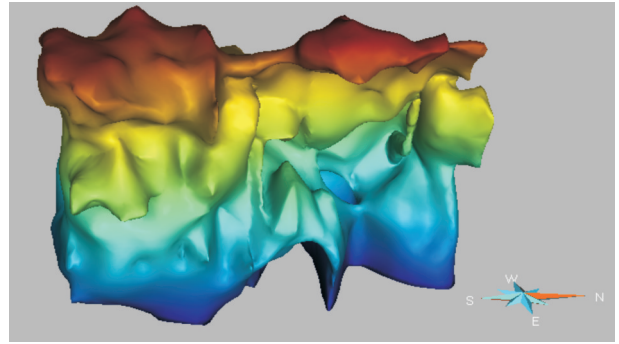


图4 富碱斑岩体面模型(蓝色到红色代表海拔由低到高)

Fig.4 Surface model of alkali-rich porphyry intrusions in Wandongshan (Blue to red represent altitude from low to high)

3.4 体模型(Sgrid)

体模型是三维实体模型的简称,由规定大小六面体块组成,也称为块段模型,主要用来进行属性分析和数值模拟。本次建模在流程外进行,因此选择流程外建立体模型(Sgrid)方法建立万铜山矿段的体模型。

地层-构造-岩体体模型建模思路分为3步:(1)根据 Sgrid-From objects Box 功能生成包含6个地层单元和岩体单元的体模型,设置地表为体模型顶面;(2)运用 Sgrid-Conformable 功能使模型中面与面之间网格形状符合地层形状;(3)由封闭地层界面和岩体面对体模型进行分区(Regions),并赋予不同颜色(图7),完成地层-构造-岩体体模型构建。

矿体体模型建模思路分为两步:(1)通过 Sgrid-From Step vectors 功能生成矿体体模型,设置地表面为模型顶面;(2)利用建立的封闭矿体面对体模型进行分区(Regions),完成矿体体模型构建(图9)。矿体体模型要用于后期品位插值,对六面体方块规格有要求。由于万铜山矿段部分金矿体厚度最小处<1 m,为减少品位均化带来的影响,垂向上选择1 m为六面体方块高。水平方向上,为增加体积精确性,选择4 m×4 m为六面体长和宽。本次工作共建立4422961个单元块,体积 $7.08 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。

3.5 品位模型

品位建模是在矿体体模型基础上,选择合适的空间插值法,根据既有钻孔化验数据、探槽数据和化探数据,推测矿体未知区域品位值的一种方法。本次工作共计使用46404个金化验数据,通过限制特高值(取7 g/t),建立半变异函数(图8)和搜索椭圆(表1),选择普通克里金插值法(Ordinary Kriging)

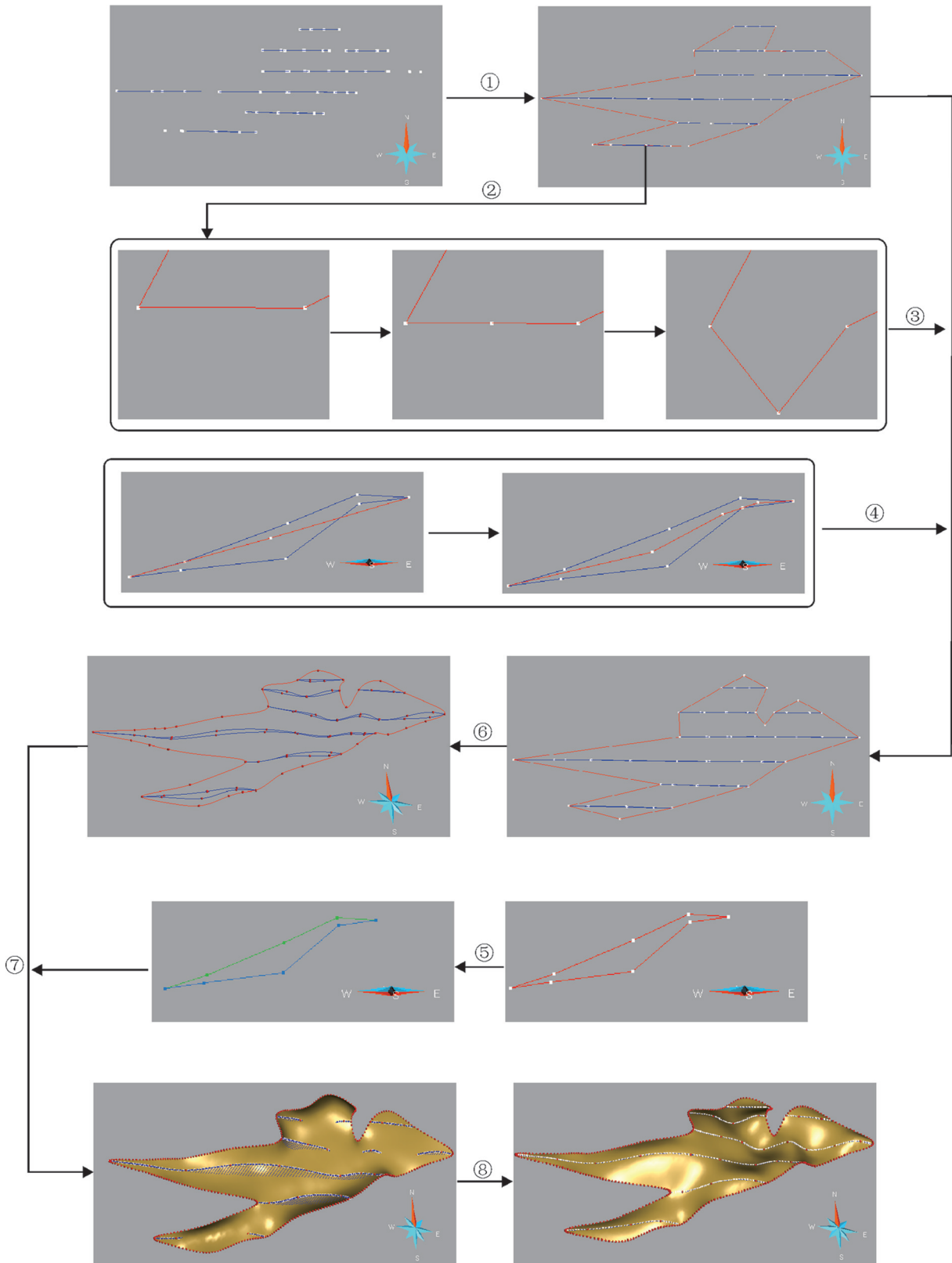


图5 矿体建模流程
Fig.5 Workflow of ore body modelling

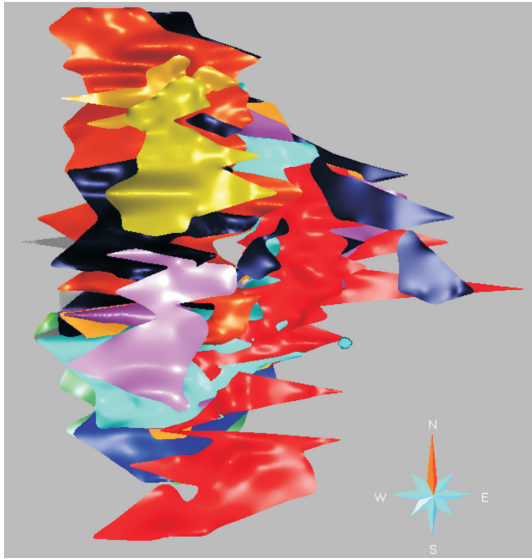


图6 万铜山矿体面模型(俯视图)

Fig.6 Surface model of ore body in Wandongshan (top view)

建立了万铜山矿体金品位模型(图9)。

品位插值结果显示,万铜山矿体金品位最高值8.11 g/t,中位值0.87 g/t,平均值1.14 g/t,方差0.89。其中,平均品位低于矿山勘查报告金元素平均品位,这种差异是因为插值过程中产生了较多低于边界品位的值,从而拉低了矿床的品位值(孙玉建,2008),但是总体金属量与矿山报告相差不大。

4 三维地质模型在北衙金矿中的应用

4.1 实现地下深部的可视化

三维地质模型一个主要应用就是可视化,是后续一切应用的基础。其不仅可以展示说明地下复

杂地质体形状,还能实现地质演化过程的动态演示,对于地质人员理解复杂地质现象,探索深部地质条件,总结深部地质规律有很大帮助。

4.2 储量快速估算

资源量计算公式为:金属量(g)=品位(g/t)×体积(m^3)×体重(t/m^3),其中品位模型已生成,体积可以在GOCAD中根据三维块段个数计算,体重分为地表表生矿体和接触交代型-热液脉型矿体两类。表生矿体体重取 $2 t/m^3$ (蔡新平等,2001),接触交代型和热液脉型矿体体重取氧化矿石(体重约为 $2.81 t/m^3$)与原生矿石(如磁铁矿、黄铁矿、矽卡岩矿石、灰岩型矿石、石英正长斑岩矿石平均体重约为 $3.50 t/m^3$)的平均值 $3.15 t/m^3$ 。万铜山矿区金资源量评估结果见表2。

北衙金矿2013年设计报告显示,2014年前累计资源量($111b+122b+331+332+333$)为227484 kg。本次计算以2014年前勘探剖面图数字化矿体为基础,得出金资源量为246425 kg,与矿山结果相差在10%以内(8%),验证了所建矿体三维模型的准确性。

4.3 空间耦合关系揭示隐伏断裂和成矿过程

本次工作通过提取金品位模型中高品位值体(大于4 g/t)来分析矿体-断裂-岩体之间的空间耦合关系(图10)。

高品位体(品位 $>4 g/t$)在模型中围绕岩体呈直角三角状发育(图10),三边高品位体发育不均,规模差距较大。C边(方位 40°)高品位体规模最大,矿体连续性最好,且与A边近于垂直;A边(方位 130°)规模和矿体连续性次之,B边规模和连续性最小(方位 0°);A、B

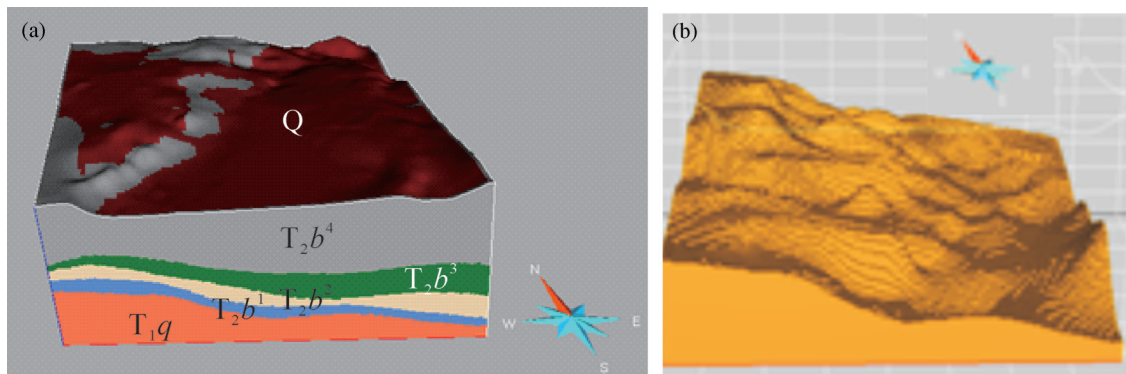


图7 万铜山地层三维实体模型(a)和青天堡组实体模型(b)

Q—第四系; T_2b^4 —北衙组四段; T_2b^3 —北衙组三段; T_2b^2 —北衙组二段; T_2b^1 —北衙组一段; T_1q —青天堡组

Fig.7 Sgrid of stratum in Wandongshan (a) and Qingtianbao Formation (b)

Q—Quaternary; T_2b^4 —Section 4 of Beiya Formation; T_2b^3 —Section 3 of Beiya Formation; T_2b^2 —Section 2 of Beiya Formation; T_2b^1 —Section 1 of Beiya Formation; T_1q —Qingtianbao Formation

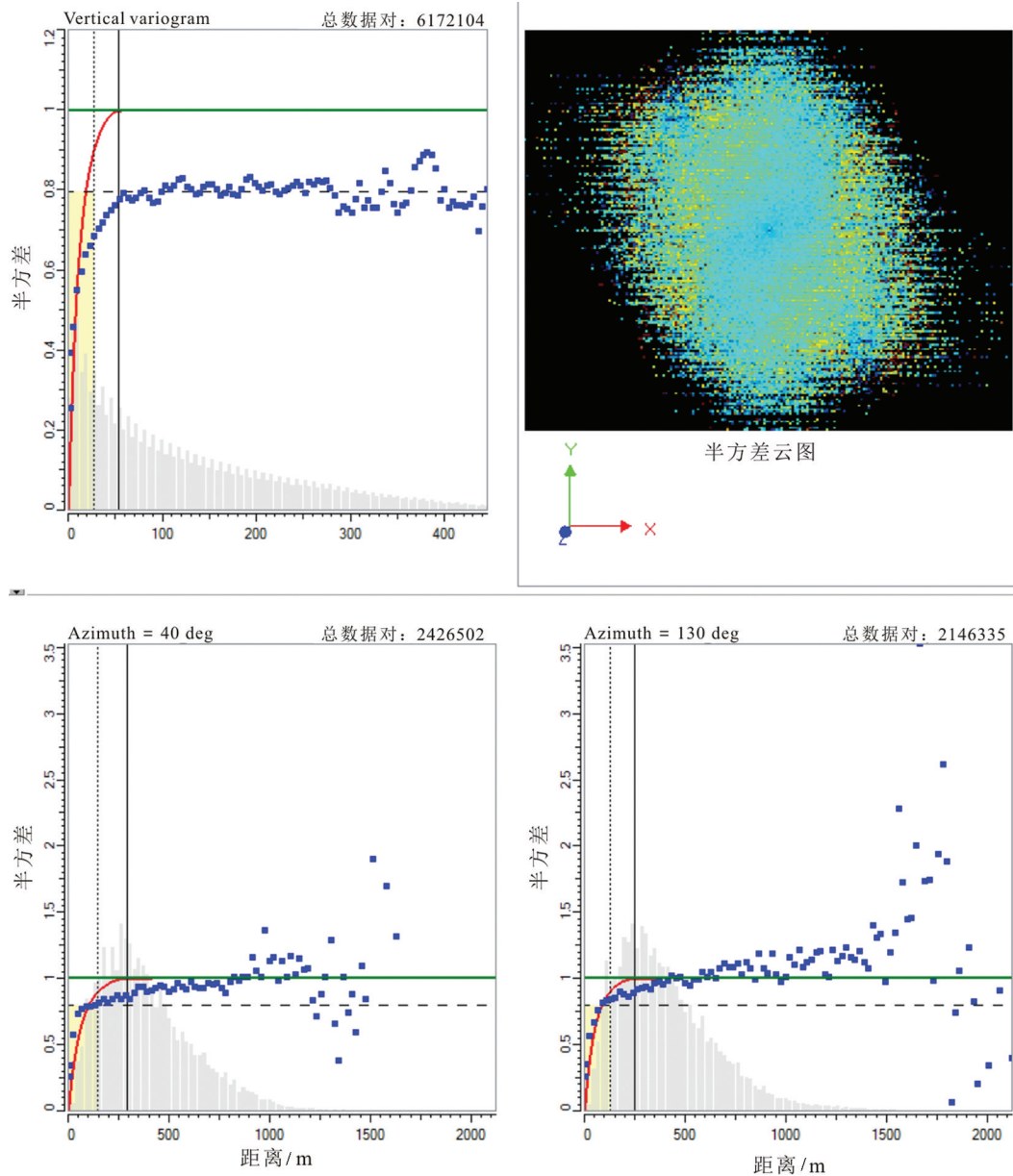


图8 实验半变异函数拟合结果
 Fig.8 Experimental semi-variograms fitting result

边经过主控矿断裂和破矿断裂,离主富碱斑岩体较近,C边无断裂经过,离富碱斑岩体相对也较远。

北衙金矿形成于喜马拉雅中期印度—欧亚板块持续汇聚和SN向挤压的同碰撞造山构造环境中(侯增谦和王二七,2008;王鹏等,2015),属于典型斑岩-矽卡岩型矿床,成矿作用主要集中在侵入体-碳酸盐接触带和断裂带中(陈衍景等,1996)。高品位体A、B边正好沿已知断裂延伸,剩下的高品位三角体C边既无地表断裂经过(图10a),也离富碱斑岩体较远(图10b)。结合万洞山构造控矿的特征(刘

飞等,2015),唯一合理的解释是沿高品位C边可能存在一条隐伏深大断裂(方位40°)。另一方面,A、B边虽然离富碱岩体更近,也有断裂经过,但是金高品位体规模和连续性都与C边相差甚远。说明经过C边的隐伏深大断裂可能比经过A、B边的断裂规模更大,形成的时间更早,所以高品位体越多,矿体越厚。据此划分沿三边的成矿潜力如下:C边(40°)方向为高品位体发育最好、最连续方向,其深部找矿前景最好;A边(130°)方向为后期破矿断裂发育方向,成矿潜力次之;B边(90°)方向高品位发育最

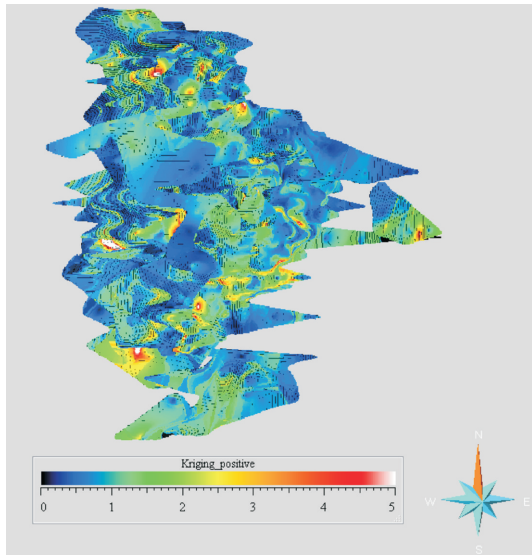


图9 万硐山矿体金品位模型(蓝色→红色代表金品位(g/t)由低值到高值)

Fig.9 Au-grade model of Wandongshan ore body (Blue→red represents gold grade (g/t) from low value to high value)

差,连续性也最不好,这个方向可能断裂延伸并不深,因此成矿潜力最差。

结合前文成矿阶段分析,总结万硐山金矿成矿过程如下:含矿流体从深部和浅部分离析出,并以富碱斑岩体为中心向外迁移,迁移过程中发生接触交代和

表1 半变异函数嵌套模型(搜索椭圆)相关参数

Table 1 Parameters of semi-variogram nested model

模型类型	所占比重	主矿化方向	Rv(垂向) /m	R1(长轴) /m	R2(短轴) /m
指数模型	0.80	40°(220°)	26.81	146.32	125.30
球状模型	0.20	40°(220°)	53.61	292.64	250.66

表2 万硐山矿区金资源量计算结果

Table 2 Reserve assessment result of Wandongshan ore block

矿体类型	总网格数	体积/m ³	体重/(t/m ³)	储量/g
1	307730	4.93×10 ⁶	2	1.04×10 ⁷
2	4073110	6.58×10 ⁷	3.15	2.36×10 ⁸
总计				2.46×10 ⁸

热液成矿作用,在接触部位和断裂带等有利成矿带中形成矿体。北西向次级断裂和北东隐伏深大断裂由于压力骤降更加富集金,这种富集方式比围岩接触带上热液蚀变交代成矿作用更强更快,从而使高品位体在距离岩体一定距离的断裂中连续发育。

5 结 论

本研究通过收集滇西北衙金矿钻孔、探槽、勘探线剖面图、地形地质(DEM)等数据,采用国际主流三维建模软件SKUA-GOCAD,建立了北衙金矿重点成矿区—万硐山矿段三维可视化模型,并对其应用进行了探讨,得出以下认识:

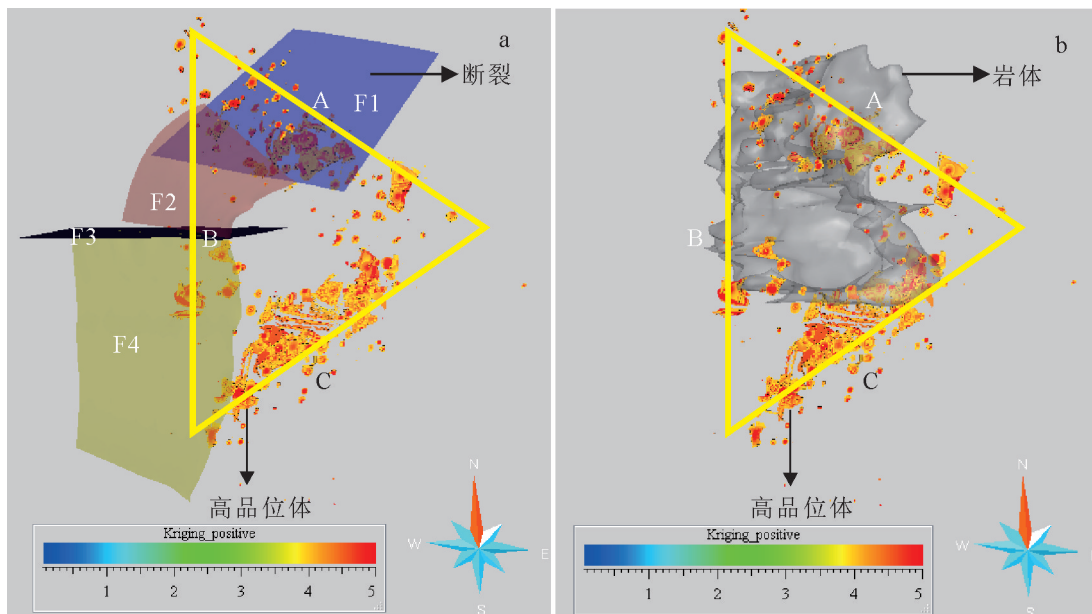


图10 断裂(a)、岩体(b)(70%透明度)与金高品位体(品位>4 g/t)的关系

Fig.10 Spatial coupling relationship between fault plane (a), intrusions (b) (70% transparency) and Au high grade sgrid

(1)“切片法”虽能建立复杂构造精细模型,但人工修改量大,不适合大范围复杂地质体建模。本文提出的“双面法”能快速准确地建立矿体三维模型,对于复杂贵金属矿体建模有较好效果。

(2)估算出万铜山矿段金资源量约为246 t,与矿山普查报告误差约8%,验证了所建矿体三维模型的准确性。

(3)通过品位模型高值体(品位>4 g/t)分布规律研究,认为万铜山矿段40°方向沿品位高值体存在一条隐伏深大断裂,为深部找矿有利方向。金元素不仅在岩体与碳酸盐接触蚀变带中富集,也在距离岩体一定距离的隐伏断裂中富集。

致谢:感谢刘函高级工程师在软件使用方面的指导,感谢云南黄金集团提供相关资料,感谢匿名评审专家给出的宝贵建议和意见使本文质量得到极大提升。

References

- Bao Xinshang, Yang Liqiang, He Wenyan, Gao Xue. 2018. Importance of magmatic water content and oxidation state for porphyry-style Au mineralization: An example from the giant Beiya Au deposit, SW China[J]. *Minerals*, 8(10): 440-454.
- Cai Xiping, Yan Jianguo, Cui Yinliang, Xu Xinwang, Liang Guanghe. 2001. Metallogenic Prediction and Verification Engineering Design of Beiya Au Deposits[R] (internal data). Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 67(in Chinese).
- Chen Yanjing, Chang Zhaoshan. 1996. The advances and problems in geologic study and exploration of the skarn type gold deposits, China[J]. *Geological Exploration for Non-Ferrous Metals*, 5(3): 129-139(in Chinese with English abstract).
- Dong Liyang, Wang Jian, Yin Fuguang, Wang Peng, Zhou Yexin. 2013. The storm deposits from the Middle Triassic Beiya Formation in the Beiya region, western Yunnan and their palaeogeographic implications[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 33(4): 16-21(in Chinese with English abstract).
- He Wenyan, Yu Xuehui, Mo Xuanxue, He Zhonghua, Li Yong, Huang Xingkai, Shu Gangshen. 2012. Genetic types and the relationship between alkalirich intrusion and mineralization of Beiya gold-polymetallic ore field, western Yunnan Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1401-1412(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Wang Erqi. 2008. Metallogenesis of the Indo-Asian collisional orogen: New advances[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(3): 275-292(in Chinese with English abstract).
- Houling S W. 1993. 3D Geo-science Modeling: Computer Techniques for Geological Characterization[M]. London: Springer-Verlag, 1-2.
- Liu Fei, Han Ruisheng, Wang Lei, Tan Wei. 2015. Mechanism of rock- and ore- controlling structures in the Wandongshan ore block of the Beiya super-large porphyry-type poly-metallic gold deposit, Northwestern Yunnan[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(S1): 414-415.
- Liu Heqing, Bi Xianwu, Lu Huangzhang, Hu Ruizhong, Lan Tingguang, Wang Xinsong, Huang Mingliang. 2018. Nature and evolution of fluid inclusions in the Cenozoic Beiya gold deposit, SW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 161: 35-56.
- Mao Jingwen, Zhou Yunman, Liu Huan, Zhang Changqing, Fu Degui, Liu Bo. 2017. Metallogenic setting and ore genetic model for the Beiya porphyry-skarn polymetallic Au orefield, western Yunnan, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 86: 21-34.
- Pan Guitang, Xu Qiang, Hou Zengqian, Wang Liquan, Du Dexun, Li Dingmou, Wang Minjie, Li Xinzhen, Jiang Xinsheng, Hu Yunzhong. 2003. Metallogenic System and Resource Evaluation of Multi-Island Arc Orogenic Process in Sanjiang Area, Southwest China[M]. Chengdu: Chengdu Cartographic Publishing House, 48-65(in Chinese with English abstract).
- Sun Xiaoming, Lin Hai, Fu Yu, Li Dengfeng, Pete H, Yang Tianjian, Liu Zhangrong. 2017. Trace element geochemistry of magnetite from the giant Beiya gold polymetallic deposit in Yunnan Province, Southwest China and its implications for the ore forming processes[J]. *Ore Geology Reviews*, 91: 477-490.
- Sun Yujian. 2008. A Study on Several Issues on Application of Geostatistics in Solid Mineral Resources Estimation[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Wang Baodi, Wang Liquan, Chen Jianlin, Yin Fuguang, Wang Dongbing, Zhang Wanping, Chen Linggang, Liu Han. 2014. Triassic three-stage collision in the Paleo-Tethys: Constraints from magmatism in the Jiangda-Deqen-Weixi continental margin arc, SW China[J]. *Gondwana Research*, 26: 475-491.
- Wang Jianhua, Li Wenchang, Wang Keyong, Yin Guanghou, Wu Song, Jiang Wentao. 2015. The characteristics and evolution of the ore-forming fluids in the Beiya porphyry Au-polymetallic deposit, western Yunnan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(11): 3269-3280(in Chinese with English abstract).
- Wang Mingzhi, Han Runsheng, Wang Lei, Liu Fei, Guo Yuxinyue, Tan Wei. 2016. Tectono-geochemical characteristics of Wandongshan-Bijiashan ore block in the Beiya Au-polymetallic deposit, northwestern Yunnan[J]. *Geology in China*, 43(1): 238-248(in Chinese with English abstract).
- Wang Peng, Yang Jian, Niu Haobin. 2015. 3D Geological Survey Research Report[R](internal data), 61-64(in Chinese).
- Wang Shunying. 2003. The geological conditions of metallogenesis of

- beya gold deposit[J]. *Yunnan Geology*, 22(3): 274–280(in Chinese with English abstract).
- Wang Xuan, Yang Lin, Deng Jun, Li Huajian, Yu Huazhi, Dong Chaoyi. 2018. Identification of multistage hydrothermal mineralizations in the Beiya gold deposit: Evidence from geology, petrography, fluid inclusion, H–O–S isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(5): 1299–1311.
- Wu Zhichun, Guo Fusheng, Jiang Yongbiao, Luo Jianqun, Hou Manqing. 2016. Methods of three-dimensional geological modeling based on geological sections[J]. *Geology and Exploitation*, 52(2): 363–375(in Chinese with English abstract).
- Xiao Xiaoniu, Yu Xuehui, Mo Xuanxue, Yang Guilai, Li Yong, Huang Xingkai. 2009. A study of fluid inclusions from Beiya gold-polymetallic deposit in Western Yunnan[J]. *Earth Science Frontiers*, 16(2): 251–261(in Chinese with English abstract).
- Xu Xinwang, Cai Xinping, Zhang Baolin, Liang Guanghe, Du Shijun, Wang Jie. 2007. Genetic types and framework model of Beiya gold ore district in western Yunnan[J]. *Mineral Deposits*, 26(3): 249–264 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jian, Tang Fawei, Wang Qiao, Wang Yonghua. 2015. Geochemistry and ore-prospecting targeting in Beiya area, Yunnan Province[J]. *Geology in China*, 42(6): 1989–1999(in Chinese with English abstract).
- Yang Jian, Wang Xuben, Wang Yonghua, Wang Qiao, Zeng Qinqin. 2014. The application of integrated geophysical methods of magnetic survey and AMT to the exploration of the Beiya gold deposit[J]. *Geology in China*, 41(2): 602–610(in Chinese with English abstract).
- Yin Fuguang, Pan Guitang, Wan Fang, Li Xinzhen, Wang Fangguo. 2006. Tectonic facies along the Nujiang–Lancangjiang–Jinshajiang orogenic belt in southwestern China[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 26(4): 33–39(in Chinese with English abstract).
- Zeng Qinqin, Wang Yonghua, Yang Jian. 2012. Application of the multi-scale wavelet analytical method: A case study of the Beiya iron–gold mining district in Yunnan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 32(4): 100–105(in Chinese with English abstract).
- Zhang Baoyi, Sang Jianga, Wu Hongmin, Liu Xiuguo, Wu Xincui. 2007. Application of 3D geological modeling and visualization in solidmineral resource estimation[J]. *Geology and Exploitation*, 43(2): 76–81(in Chinese with English abstract).
- Zhou Yunman, Zhang Changqiang, He Zhonghua, Liu Huan, Zhou Guiwu, Sun Jia, Liu Bo. 2018. Geological characteristics and ore-controlling factors of the Beiya gold–polymetallic Ore Deposit, Northwestern Yunnan Province[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 92(5): 1842–1861.

附中文参考文献

- 蔡新平, 晏建国, 崔银亮, 徐兴旺, 梁光河. 2001. 北衙金矿成矿预测及矿区验证工程设计书[R]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 67.
- 曾琴琴, 王永华, 杨剑. 2012. 云南北衙铁金矿区小波多尺度分析综合解释方法应用效果[J]. *沉积与特提斯地质*, 32(4): 100–105.
- 陈衍景, 常兆山. 1996. 中国矽卡岩型金矿床地质研究和勘查的进展与问题[J]. *有色金属矿产与勘查*, 5(3): 129–139.
- 董黎阳, 王剑, 尹福光, 王鹏, 周业鑫. 2013. 滇西北衙地区中三叠统北衙组风暴沉积特征及其古地理意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 33(4): 16–21.
- 和文言, 喻学惠, 莫宣学, 和中华, 李勇, 黄行凯, 苏纲生. 2012. 滇西北衙多金属矿田矿床成因类型及其与富碱斑岩关系初探[J]. *岩石学报*, 28(5): 1401–1412.
- 侯增谦, 王二七. 2008. 印度–亚洲大陆碰撞成矿作用主要研究进展[J]. *地球学报*, 29(3): 275–292.
- 刘飞, 韩润生, 王雷, 谭威. 2015. 滇西北北衙斑岩型金多金属矿床构造控矿作用分析[J]. *矿物学报*, 35(S1): 414–415.
- 潘桂棠, 徐强, 侯增谦, 王立全, 杜德勋, 莫宣学, 李定谋, 汪名杰, 李兴振, 江新胜, 胡云中. 2003. 西南“三江”多岛弧造山过程成矿系统与资源评价[M]. 成都: 成都地图出版社, 48–65.
- 孙玉建. 2008. 地质统计学在固体矿产资源评价中的若干问题研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 王建华, 李文昌, 王可勇, 尹光候, 吴松, 姜文涛. 2015. 滇西北衙斑岩型金多金属矿床成矿流体特征及其演化[J]. *岩石学报*, 31(11): 3269–3280.
- 王明志, 韩润生, 王雷, 刘飞, 郭钰心玥, 谭威. 2016. 滇西北北衙金矿床万洞山–笔架山矿段构造地球化学特征[J]. *中国地质*, 43(1): 238–248.
- 王鹏, 杨剑, 牛浩斌. 2015. 北衙地区三维地质调查成果报告[R]. 61–64.
- 吴志春, 郭福生, 姜勇彪, 罗建群, 侯曼青. 2016. 基于地质剖面构建三维地质模型的方法研究[J]. *地质与勘探*, 52(2): 363–375.
- 肖晓牛, 喻学惠, 莫宣学, 杨贵来, 李勇, 黄行凯. 2009. 滇西北衙金多金属矿床流体包裹体研究[J]. *地学前缘*, 16(2): 251–261.
- 徐兴旺, 蔡新平, 张宝林, 梁光河, 杜世俊, 王杰. 2007. 滇西北衙金矿床类型与结构模型[J]. *矿床地质*, 26(3): 249–264.
- 杨剑, 唐发伟, 王桥, 王永华. 2015. 云南北衙地区成矿地球化学特征及找矿方向[J]. *中国地质*, 42(6): 1989–1999.
- 杨剑, 王绪本, 王永华, 王桥, 曾琴琴. 2014. 电、磁综合方法在云南北衙铁金矿勘查中的应用[J]. *中国地质*, 41(2): 602–610.
- 尹福光, 潘桂棠, 万方, 李兴振, 王方国. 2006. 西南“三江”造山带大地构造相[J]. *沉积与特提斯地质*, 26(4): 33–39.
- 张宝一, 尚建嘎, 吴鸿敏, 刘修国, 吴信才. 2007. 三维地质建模及可视化技术在固体矿产储量估算中的应用[J]. *地质与勘探*, 43(2): 76–81.