

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.143>



三维综合信息分析圈定北衙金矿床深部靶区

周放¹, 王保弟¹, 贺娟¹, 郝明¹, 王鹏¹, 董芸希²

1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川成都 610081
2. 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059

摘要: 在三维空间中综合已揭露浅部地质和深部地球物理资料进行深部预测, 既能深化浅部认识, 还能减少地球物理多解性带来的困扰, 成为深部成矿预测的新趋势和重要手段。以北衙金矿床万洞山矿段为例, 通过收集钻孔、勘探线剖面、化探和地球物理等资料, 在三维建模平台中建立了万洞山矿段三维地质模型; 基于建模结果, 综合地表、浅部和深部重力资料, 对成矿地质条件和深部成矿潜力进行了研究和分析, 筛选出隐伏断裂、斑岩体和青天堡组砂岩3种成矿有利要素, 对应建立了成矿有利区三维体模型(sgrid)。在此基础上, 采取多源信息综合方法, 对3种成矿控制要素的有利成矿区域取交集, 圈定了万洞山矿段海拔1 100~900 m内深部靶区, 为周边同类型矿段深部靶区预测提供了参考。

关键词: 北衙金矿床; 三维建模; 成矿潜力; 多源信息综合; 深部靶区; 地球物理。

中图分类号: P612

文章编号: 1000-2383(2020)08-3028-12

收稿日期: 2020-03-02

Deep Ore Body Targeting Based on 3D Integrated Information

Zhou Fang¹, Wang Baodi¹, He Juan¹, Hao Ming¹, Wang Peng¹, Dong Yunxi²

1. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, China

2. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: The combination of subsurface geology and deep geophysics data is a new tendency and method for the mineralizing prognosis of deep zone in the three-dimensional space, of which the results can deepen the cognitions of subsurface feature and reduce risks from multiplicities of geophysical interpretations. Focused on the Beiya gold deposit, 3D visualization of Wandongshan key ore sections was realized by using the GOCAD modeling platform based on the geological, geochemical, and deep geophysical data in this study. Furthermore, metallogenetic regularity and deep metallogenetic potential of geological bodies were analyzed, and three favorable factors were screened out for mineralization including hidden faults, beschtauite, and Qingtianbao sandstone. In addition, corresponding sgrid was established. Comprehensive multi-source information synthesis method was adopted to locate deep buried ore body of Wandongshan ore section with an altitude between 1 100—900 m via obtaining results from intersections of three favorable areas for mineralization. This study provides an important reference for the prediction of deep target area in this belt as well as in similar type of ore sections in the surrounding areas.

Key words: Beiya gold deposit; three-dimensional geological modeling; metallogenetic potential; multi-source information synthesis; deep targeting; geophysics.

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

作者简介: 周放(1992—), 男, 助理工程师, 从事三维地质建模及应用研究。ORCID: 0000-0002-6667-1873。E-mail: Fzhou6@163.com

引用格式: 周放, 王保弟, 贺娟, 等, 2020. 三维综合信息分析圈定北衙金矿床深部靶区. 地球科学, 45(8):3028—3039.

0 引言

随着我国经济的快速发展,矿产资源消耗量逐年递增,地表浅部找矿难度日益增加,对已有矿山实行深部探测“攻深找盲”(翟裕生等,2004)、增加资源储量、延长矿山寿命,将成为满足我国未来矿产需求的重要手段之一。经过理论研究和实际勘探,很多老矿山深部有巨大的找矿潜力(李惠等,2006;焦彦杰等,2019),如九龙脑矿田深部第二找矿空间(赵正等,2017)、山东夏甸金矿和招远—平度断裂金矿深部矿脉(孙忠实等,2003)、江西相山铀矿、湖北大冶铁矿深部矿体(李淑玲等,2007)的发现,均说明老矿山深部具有巨大的找矿潜力。

北衙金矿床自20世纪90年代被发现以来,随着矿床中金元素的发现,其规模逐渐扩大(中型→大型→超大型),成为国内研究斑岩型金矿的热点矿床。前人对矿床成因类型和成矿规律的研究(肖晓牛等,2009;和中华等,2013;牛浩斌等,2014)及地球物理勘查工作(曾琴琴等,2012;杨剑等,

2014a,2014b;王桥等,2016)显示该地区深部及外围还有巨大的成矿潜力。

北衙金矿床包含万洞山、红泥塘、桅杆坡、金沟坝、炉坪等矿段,但是已开采的只有万洞山矿段,矿床深部及外围预测工作也主要针对万洞山矿段。根据建立的数字矿床模型和金矿化强度等值线模型,前人推测万洞山矿段深部靶区位于52号矿体以下和矿段南西向深部(陈爱兵等,2007;姜华等,2007),并进行了钻孔验证,为早期矿山开采工作指明了方向。但是前人预测时间较早,采用的早期(2005年以前)地质和化探数据,预测的深度也较浅(海拔1500 m以浅)。因此,有必要综合后期钻孔、化探和深部地球物理数据,采用新方法手段对万洞山矿段深部靶区进行下一步预测,为矿区深部找矿和增储工作提供依据和支撑。

本文在前人研究的基础上,收集万洞山矿段地表地质、钻孔、勘探线剖面图、化探、地球物理等地质资料,建立了万洞山矿段(图1)三维地质模型;结合前期深部地球物理资料,拟合浅部地质资料,针

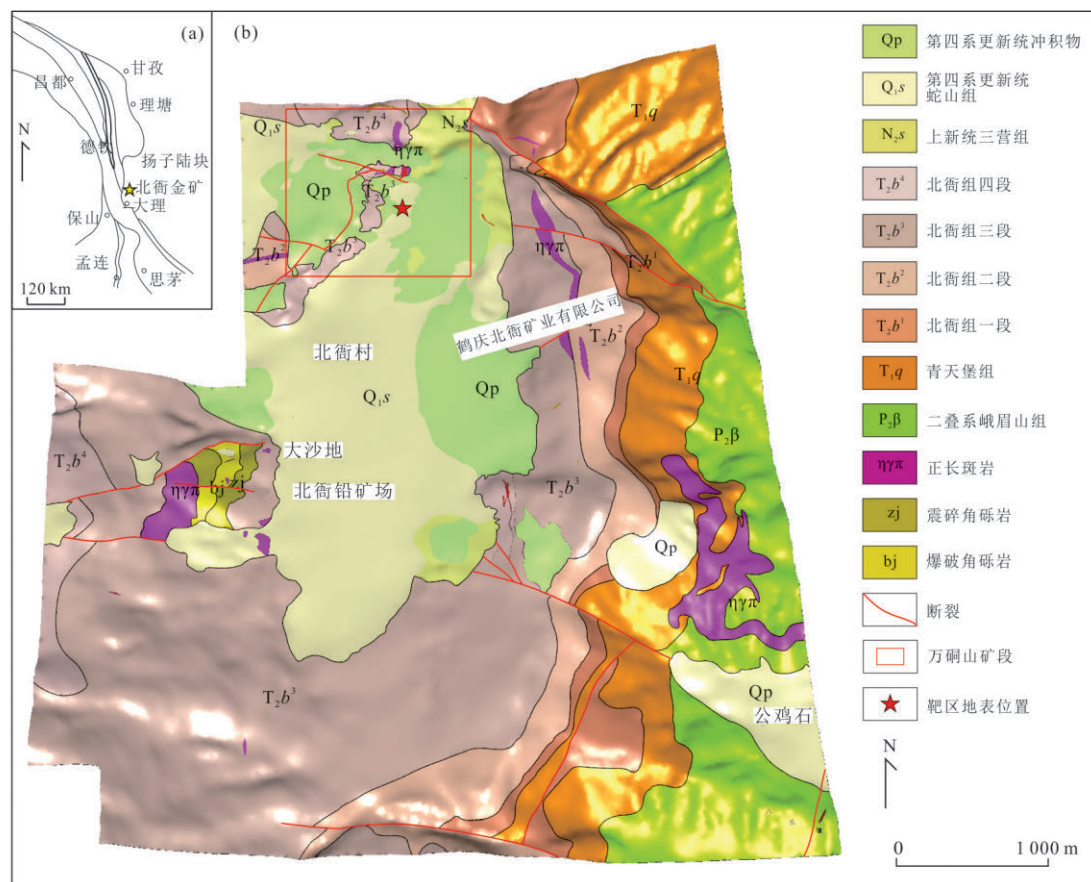


图1 北衙金矿大地构造位置(a)和三维地质图(b)

Fig.1 The tectonic location (a) and 3D geological map of Beiya gold deposit (b)

据杨剑等(2014b)修改

对深部地球物理探测方法易受浅部地表开采与浅部矿体干扰(祝嵩和肖克炎, 2015)的不足, 采用多源地质信息综合方法, 以成矿控制要素有利组合部位的圈定与筛选(陈建平等, 2014), 实现了三维空间内万铜山矿段 1 100~900 m 深边部找矿靶区矿产资源的定位与评价, 为矿山外围找矿提供了参考。

1 矿区地质概况

北衙超大型金矿床位于三江特提斯—喜马拉雅造山带与扬子克拉通交界处(尹福光等, 2006; 董黎阳等, 2013; Fu *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2016)(图 1a), 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(薛传东等, 2008; 王保弟等, 2018), 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、开阔褶皱、走滑断层及其控制的拉分盆地。

矿区内出露古生界、二叠系、三叠系、第三系和第四系等。其中中三叠世北衙组(T_2b)灰岩和白云岩是主要的容矿地层, 多数白云岩存在强烈的碳酸盐化蚀变、褐铁矿化, 形成土褐色、土黄色砂糖状褪色蚀变岩石; 而灰岩多大理岩化, 局部发育大理岩、矽卡岩及磁铁矿化现象。

如前所述, 北衙金矿床目前开采的只有万铜山矿段(图 2, 图 3)。万铜山矿段内矿体主要由热液脉型矿体、矽卡岩型和斑岩型矿体(郭钰心玥, 2015)组成, 受断裂和岩体控制, 矿体一般分布在距岩体 0~60 m 范围内(图 3)。矿石矿物组合包含黄铜矿、黄铁矿、磁(赤)铁矿、褐铁矿、方铅矿等, 呈透镜状、似层状、脉状和囊状产出在断裂破碎带、富碱斑岩接解

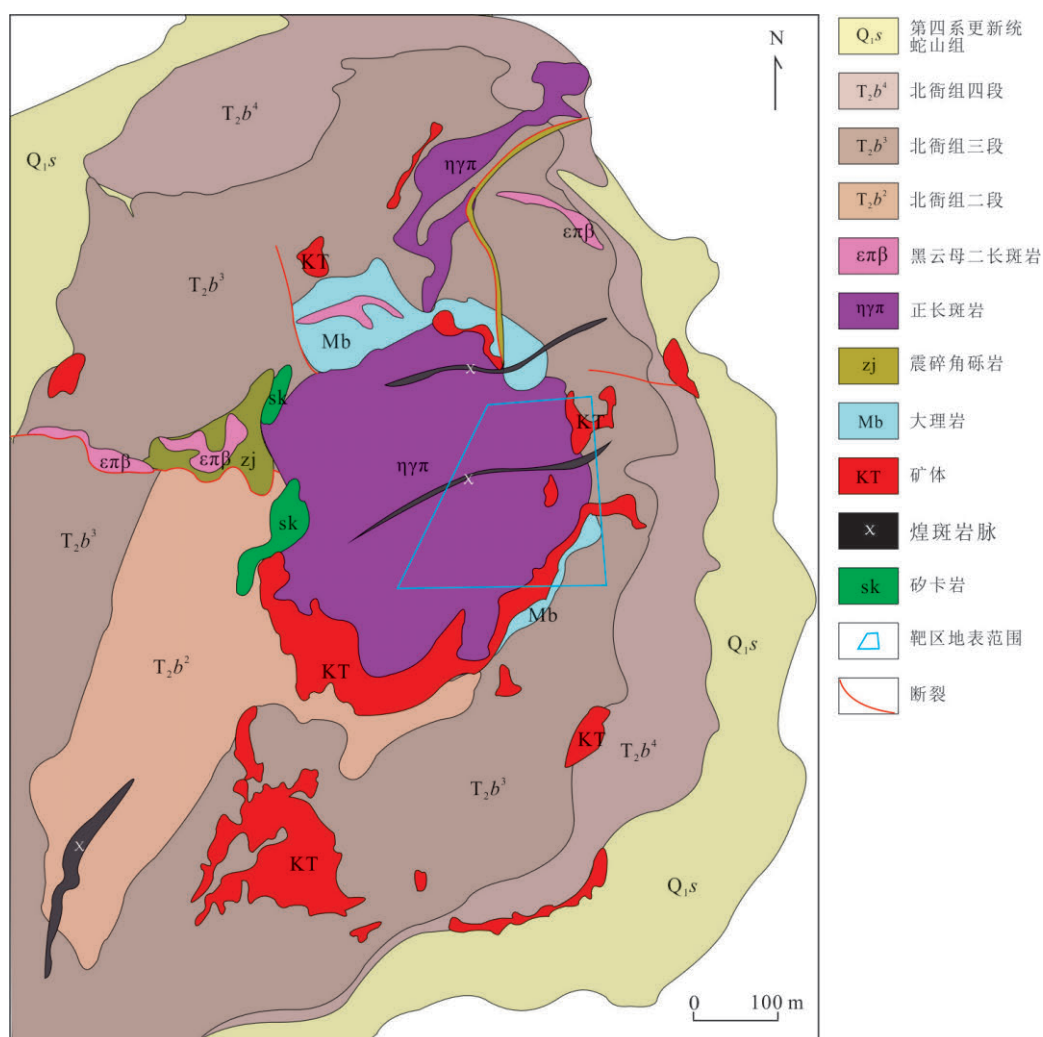


图 2 万铜山矿段地质简图

Fig.2 Simplified geological map of Wandongshan ore section

据马睿(2018)修改

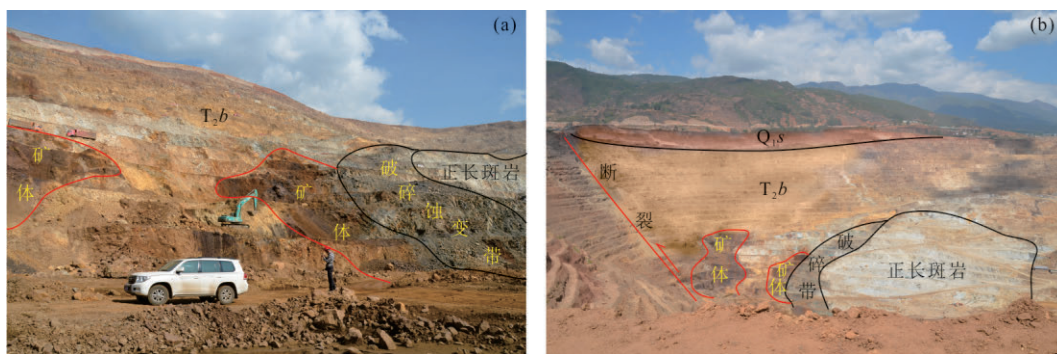


图3 北衙金矿床万洞山矿段正长斑岩—矿体—地层接触关系

Fig.3 Spatial coupling relationship of intrusions-ore body-stratum in Wandongshan ore section, Beiya gold deposit

a. 近景; b. 远景

蚀变带及富碱斑岩体内(刘飞, 2015). 成矿以岩体为中心, 向外迁移的含矿流体在岩体顶部、内外接触带或远离岩体的碳酸盐岩围岩中, 形成受深部岩浆作用控制的由斑岩型、矽卡岩型及热液型金多金属矿床组成的统一的金多金属成矿系统(和文言等, 2012; 马睿, 2018). 其中以岩浆热液型和接触交代型(矽卡岩型)铁金矿为主, 兼有少数残坡积型铁金矿(刘飞, 2015). 成矿热液来自地壳深处(Deng *et al.*, 2015)或地幔(肖晓牛等, 2009; Li *et al.*, 2016), 随着幔源岩浆上涌, 在断裂带或围岩接触带附近等有利地段成岩成矿(薛传东等, 2008).

矿段内与矿体密切相关的是喜山期富碱二长花岗斑岩, 其产出受SN向主断裂控制, 呈岩株和岩墙状, 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, 呈现出多期次、多阶段混熔侵入特征. 与成矿相关的富碱斑岩成岩年龄为 34.9~33.1 Ma(和文言等, 2012), 由两期岩浆作用形成, 构成了万洞山斑岩体主体, 为赋矿岩石(肖晓牛等, 2009; 王建华等, 2015), 空间上与构造和矿体呈明显的耦合性.

综合来看, 北衙金矿由多期次成矿作用叠置而成, 矿化成因类型复杂, 受成矿作用空间分布和成矿时代控制. 矿体产出受喜山期富碱二长花岗岩和SN向走滑断层、正断层共同控制, 隐伏断裂或断裂带为成矿热液运移提供了上升通道和有利容矿场所(薛传东等, 2008), 富碱斑岩为成矿热液运移提供动力和热能来源(李勇, 2009; 肖晓牛等, 2011).

2 三维地质建模

三维地质建模是深部探测的重要手段, 运用计

算机辅助技术, 在虚拟三维立体空间中, 将获得的地质、测井、地球物理、地球化学资料和各种解释结果或者概念模型综合生成三维定量随机可视化模型. 本文选择能建立复杂构造的GOCAD软件进行万洞山矿段的建模. 建模对象主要是万洞山矿段地层(青天堡组砂岩)、断裂、岩体、矿体和品位属性模型.

2.1 地层、断裂和岩体三维模型

地层断裂模型主要是基于地表地质、地表高程、勘探线剖面图和钻孔中提取的数字化界线连接而成. 从地表地质图中可以提取断裂的地表延伸, 根据其产状生成断裂的深部延伸(图4b), 共建立了SN向、EW向4条主干断裂面模型. 地层模型由数字化勘探线剖面图中地层界线结合钻孔数据约束而成, 由于是面向深部, 故本文只建立了青天堡组砂岩三维地层模型. 富碱斑岩体由南向北形态变化大, 故以72号勘探线为界, 将富碱斑岩体分为南部岩体和北部岩体分别建立, 建模方法采用相对精确的“切片法”(吴志春等, 2016); 之后将南北岩体拼接到一起, 插值美化完成建模工作.

上述建立的都是三维面模型, 还需要建立能进行地球物理插值的体模型(sgrid). 体模型以地表高程面为顶面, 地下900 m(后文讨论)平面为底面, 通过object cage功能生成(图4d).

2.2 数字矿床模型

数字矿床模型包含矿体面模型和实体模型. 矿床面模型, 由勘探线剖面线数字化得到的矿体轮廓插值形成. 首先, 根据勘探线剖面图勾勒单个矿体轮廓, 沿矿体边缘生成包围整个矿体的外框线, 加密插值生成矿体上、下面(左、右面), 最后对上、下面(左、右面)设置矿体上表面线约束条件和钻孔约

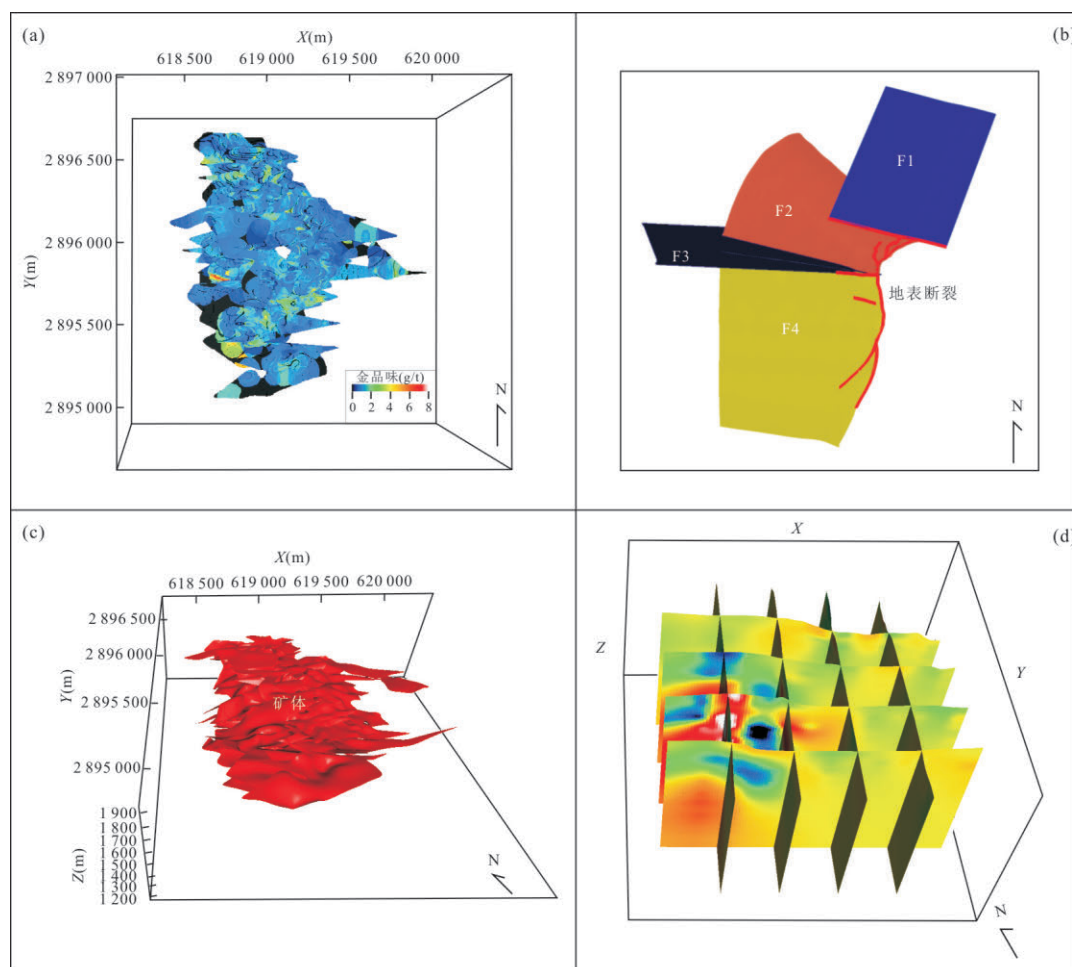


图 4 北衙金矿万洞山矿段地质体三维建模结果

Fig.4 3D modeling results of geological bodies in Wandongshan ore section, Beiya gold deposit

a. 矿体金品位模型(黑色为空值); b. 主干断裂三维面模型; c. 矿体面模型; d. 万洞山三维实体模型栅格

束条件后插值. 这种方法建立的三维矿体模型与“切片法”具有相同的精度, 特别适用于热液矿床中延伸较远的层状矿体(图 4c).

矿体实体模型来自面模型对区域实体模型的切割(分区). 由于地统计学插值法对单个体元大小规格有要求, 与前文中用于地球物理插值的体模型不同, 本次选择建立体元大小为 $4\text{ m} \times 4\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的矿体模型.

2.3 金元素品位模型

在矿体模型基础上, 根据现有钻孔、探槽和化探等测试数据, 选择克里金插值法(Ordinary Kriging), 通过限制特高值(11.54 g/t)拟合半变异函数和搜索椭圆, 建立了万洞山矿体金元素的品位模型(图 4a).

3 成矿地质条件及深部成矿潜力

3.1 成矿地质条件

万洞山浅部为矽卡岩成矿和热液成矿作用的复合成矿组合, 靠近富碱斑岩体与围岩的接触带发生矽卡岩矿化, 在围岩内部和岩性界面形成热液脉型矿体. 矽卡岩成矿主要由富碱斑岩体携带深部成矿热液(葛良胜等, 2002; 薛传东等, 2008)与三叠系碳酸盐岩发生围岩蚀变, 在岩体周边和断裂中堆积形成(图 3). 热液型矿体是成矿热液沿岩性界面或岩性通道运移一定距离后, 物理化学条件发生变化而沉淀成矿. 整个成矿系统中, 富碱斑岩扮演了重要的作用, 不仅为含矿流体上升提供了动力和热能, 同时也是成矿物质和成矿流体的主要载体(肖晓牛等, 2011), 因此同时代富碱斑岩体及其与围岩的接触面既是深部找矿首要目标, 也是深部成矿的必要条件. 深部断裂既控岩又控矿(崔银亮等,

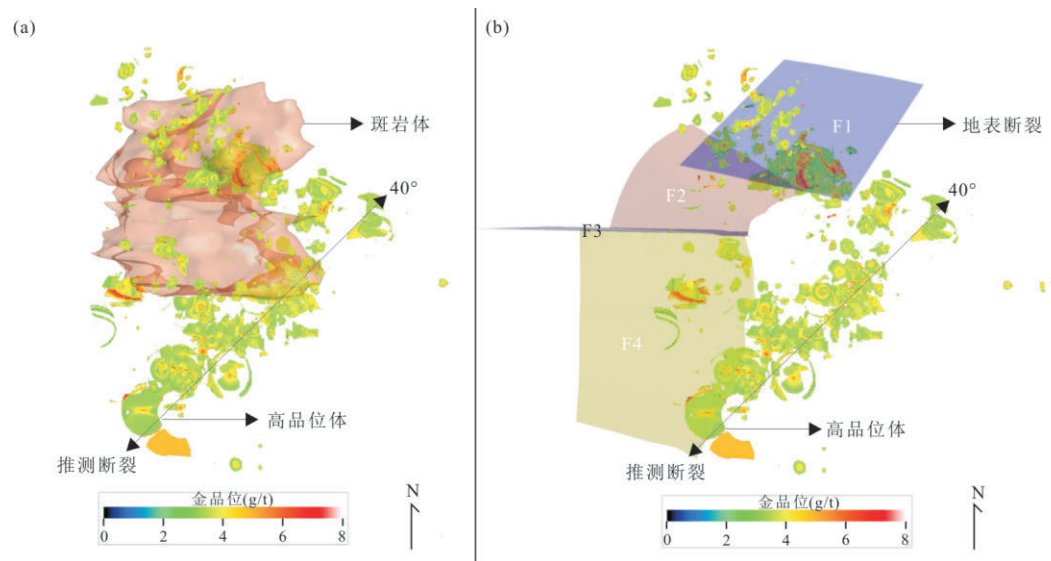


图 5 断裂(a)和岩体(b)(70%透明度)与金高品位体的关系

Fig.5 Spatial coupling relationship between fault plane (a), intrusions (b) (70% transparency) and Au high grade sgrid

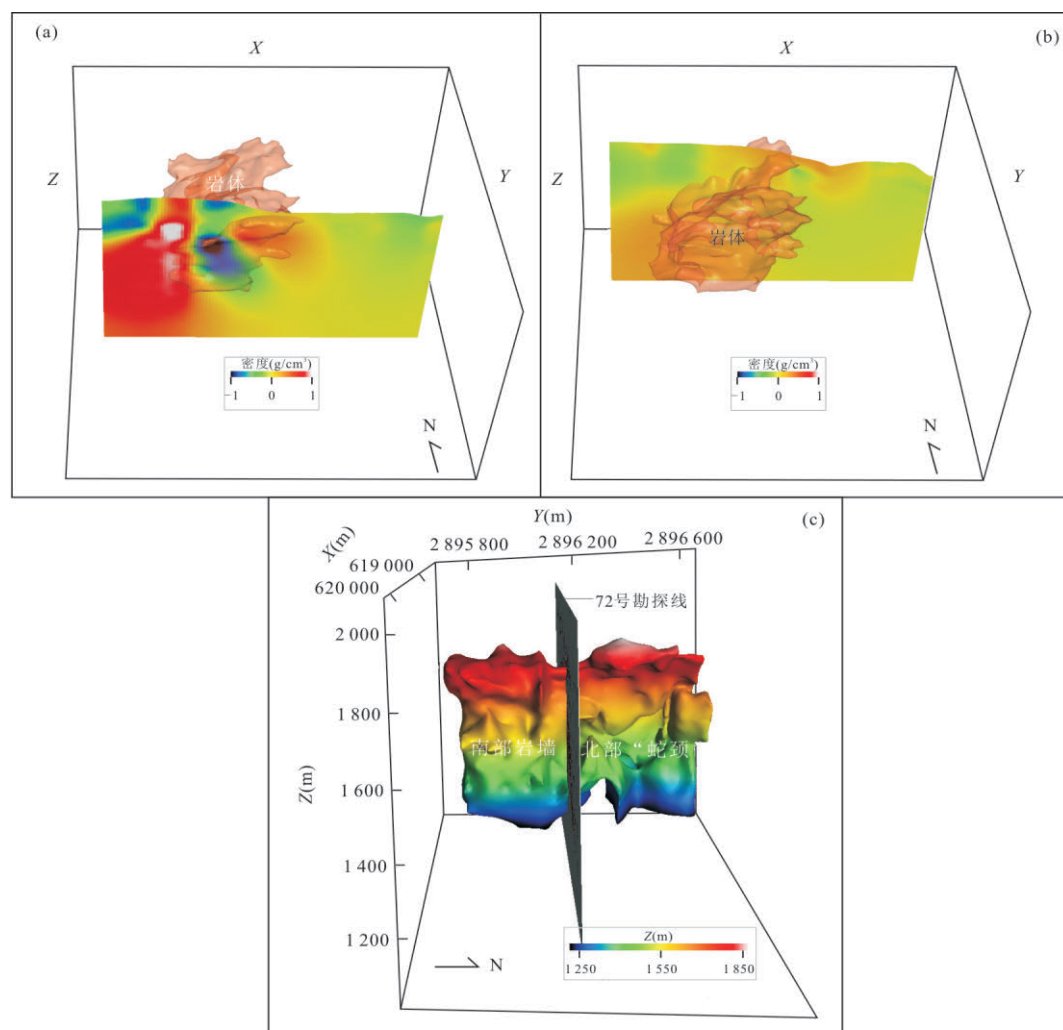


图 6 北衙金矿万洞山矿段密度切片(a,b)和富碱斑岩体面模型(c)

Fig.6 Density slice (a, b) and beschtauite (c) in Wandongshan ore section, Beiya gold deposit

2003),还起着容矿的作用,是深部找矿的次要目标.青天堡组砂岩与碳酸盐岩的岩性突变面及其自身的岩性通道(孔隙、裂隙和层间破碎带等)是热液型矿体沉淀成矿的物理化学边界,但是热液型矿体与矽卡岩型矿体相比只占少数,且规模较小,因此青天堡组砂岩是深部找矿的最后目标.北衙组碳酸盐岩地层底部在海拔 1 100~2 000 m 之间,位于深部靶区预测深度(海拔 1 100~900 m)以上,且大部分已被钻孔揭露,不作为本次深部靶区预测的目标.

3.2 深部断裂潜力区

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,属于典型斑岩—矽卡岩型矿床(侯增谦和王二七,2008),成矿作用主要集中在侵入体—碳酸盐接触带和断裂带中(陈衍景和常兆山,1996),发育大量高品位异常体.因此,可以提取金矿体中高品位异常体(大于 3 g/t)来分析断裂往深部的延伸和成矿潜力(图 5).

万铜山矿段地表存在 SN(F2、F4)向和 EW(F1、F3)向两个方向断裂,两个方向品位高异常值存在明显差异(图 5b).SN 方向金元素高品位值分布较少,矿体分散,连续性差,大部分高品位体集中在地表附近,深部基本无延伸.EW 方向金元素高品位值分布相对较密,矿体较集中,矿体连续性较 SN 向更优,高品位体由浅部向深部明显减少,深部延伸程度中等.NE 40°方向金高品位体规模最大,矿体集中,具有显著连续性,由浅部到深部高品位体无显著减少,向深部延伸最深,且该方向无地表断裂经过,离富碱斑岩体较远;结合万铜山构造控矿的特征(刘飞等,2015),笔者推测沿此方向存在一条向深部延伸的隐伏断裂.

根据前文中断裂是深部找矿重要地质条件的认识,结合金高品位异常体分布,笔者认为 NE(40°)方向为高品位体发育最好、最连续的方向,深部找矿前景最好;EW 方向为后期破矿断裂发育方向,深部找矿潜力次之;SN(90°)方向由于岩体遮蔽,其深部成矿潜力不明,需要进一步的研究.

3.3 岩体深部延伸和成矿潜力

目前已有钻孔尚未完全钻穿万铜山富碱斑岩体,根据矿山绘制勘探线剖面图的岩体形态趋势,以 72 号勘探线为界将富碱斑岩体分为南部岩体和北部岩体.南、北岩体的形态特征有明显的差异,北部岩体整体呈蛇颈状,规模较小,包含较多围岩捕

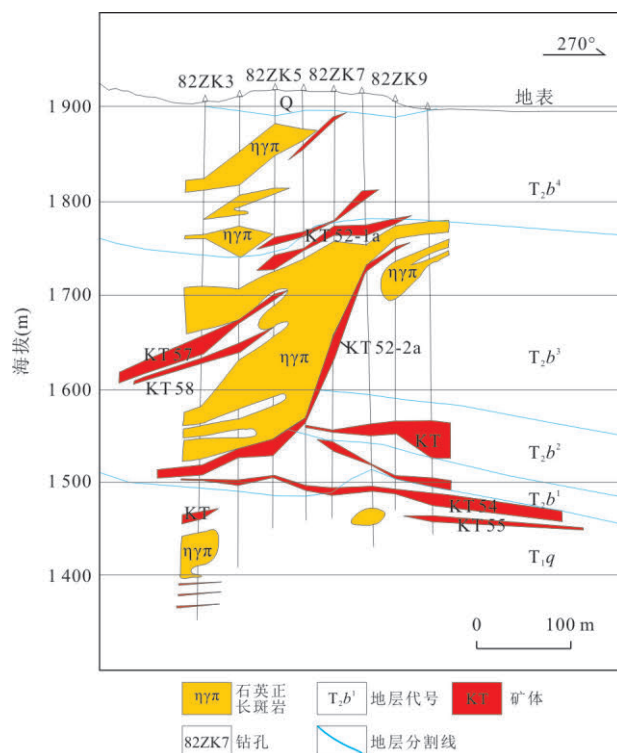


图 7 82 号勘探线剖面图

Fig.7 Geological section along 82 exploratory line

虏体,分支较多,底部收敛;南部岩体分支少,只有一个较大的围岩捕虏体,主体呈岩墙状,规模较大,底部较北部岩体膨大(图 6c).

南部和北部岩体的重力反演结果也有明显区别.南部岩体具有连续、明显的低密度异常(低密度异常是该地区富碱斑岩体的重要特征),低密度异常也有向深部延伸的趋势(图 6a);北部岩体呈脉状、蛇颈状,重力反演结果很难分辨其是否有向深部延伸的趋势(图 6b).综合浅部已揭露信息和重力反演结果,推测南部岩体比北部岩体在 900 m 以深延伸更远,深部找矿潜力更大.

3.4 青天堡组砂岩(T_{1,q})深部成矿潜力

青天堡组上部为一套灰紫色含砾砂岩和含粉砂质泥岩,形成于冲积扇—河流相环境中;下部主要由灰紫色、黄绿色玄武质砂砾岩和灰色、灰黄色中—厚层状中粒长石岩屑砂岩构成,形成于三角洲—潮坪相沉积环境中.青天堡组上部和下部均以砂岩为主,下部较上部粒度更大,胶结更差,孔隙更发育,水动力环境更强.上部砂岩中存在热液型金矿体,已获得钻孔资料的证实(48、60、82 号勘探线)(图 7 中 55 号矿体),下部砂岩较上部具有更优的物理条件(胶结程度和孔隙),因此,在深部砂岩与富碱斑岩体的接触带及附近具有形成深部热液型矿

床的潜力。

目前收集到的万铜山钻孔资料已揭露最大深度为909 m,平均海拔1 553 m,二叠系玄武岩界面约位于海拔900 m.因此,本次建模将海拔900 m作为模型的底部,深边部靶区对象主要为海拔1 100~900 m之间钻孔目前尚未揭露地段。

综合上述成矿有利要素深部潜力分析结果,笔者认为万铜山矿段深部成矿有利区域主要位于二叠纪玄武岩界面以上,南部富碱斑岩体向ES方向的深部空间。

4 深部靶区圈定

深部靶区圈定与地表成矿远景区圈定所用方法类似,均为分析成矿有利要素、确定成矿要素的重要程度(姜德波等,2010),最后对成矿控制要素、有利要素进行叠加.重叠的要素越多,该区域的成矿有利度就越高,反之越低。

前文研究表明北衙金矿深部与成矿有关的要素主要有富碱斑岩体、隐伏断裂和砂岩层.根据成矿要素成矿地质条件及深部成矿潜力区的分析结果,建立三者深部有利成矿区体模型,再按照成矿有利要素重要等级排序求交集来确定深部靶区。

4.1 富碱斑岩体有利成矿区

矿体大多存在于富碱斑岩体与围岩的接触带及砂岩物性通道中,较少存在于富碱斑岩体自身中.深部成矿潜力分析显示富碱斑岩体深部成矿有利区位于南部岩体下部与围岩的接触带中.因此,笔者通过重力资料在深部的反演结果,在南部富碱斑岩体下部建立了富碱斑岩体与围岩的接触带六面体模型(surface).模型横向上由富碱斑岩体底部

低密度异常区沿Y方向至无低密度异常区;纵向上始于南部富碱斑岩体底部,沿低密度异常终于建模底部(海拔900 m).通过软件新建区功能(regions),利用六面体面模型对万铜山矿段体模型分区(region),得到富碱斑岩体深部有利成矿区体模型(图8)。

4.2 深部隐伏断裂有利成矿区

在推测的隐伏断裂中,金高品位体由浅到深无显著减少,矿体集中且连续,是深部成矿次要有利区域.有利成矿区圈定以隐伏断裂为中心,由浅至深(海拔900 m)建立包含主要金高品位值体的六面体模型(surface);对万铜山矿段体模型进行分区,获得深部隐伏断裂有利成矿区体模型(图9)。

4.3 青天堡组砂岩有利成矿区

青天堡组砂岩与碳酸盐岩的岩性突变面及其自身的岩性通道(孔隙、裂隙等)是热液型矿体沉淀成矿的物理化学边界,是深部找矿的最后有利区域.本文保留万铜山矿段内青天堡组砂岩,作为最后深部成矿有利区域.通过砂岩与北衙组地层界面对万铜山矿段体模型进行分区,得到青天堡组砂岩的体模型,即砂岩成矿有利区(图10a)。

4.4 深部靶区圈定及其意义

将上述3个有利成矿区(region)体模型求交集(intersect),按照青天堡组砂岩、断裂有利成矿区、富碱斑岩体有利成矿区的顺序,依次取交集后获得万铜山矿段深部靶区体模型(图10b).在三维空间中对靶区体模型进行分析,获得靶区体积、重量和地表范围(图2)等参数,依据这些参数布置钻孔对其进行验证,可以提高钻孔成功率、降低矿山勘探风险和成本,也为下一步施工指明了方向。

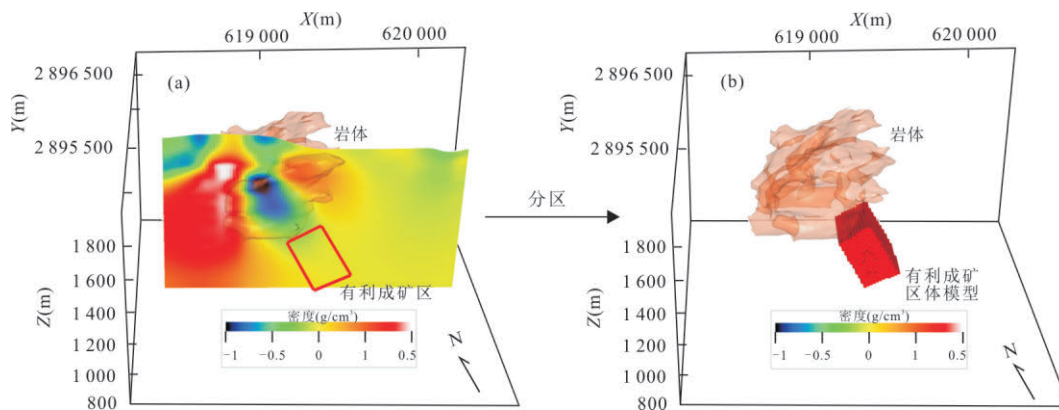


图8 富碱斑岩有利成矿区

Fig.8 Favorable area for mineralization of beschtaute in Wandongshan ore block

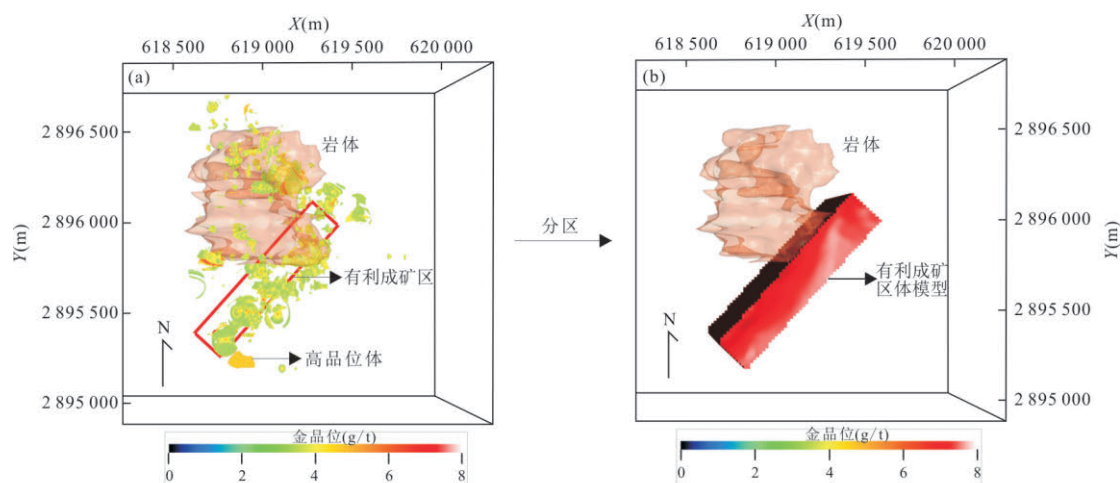


图9 深部隐伏断裂有利成矿区

Fig.9 Favorable area for mineralization of hidden faults in Wandongshan ore block

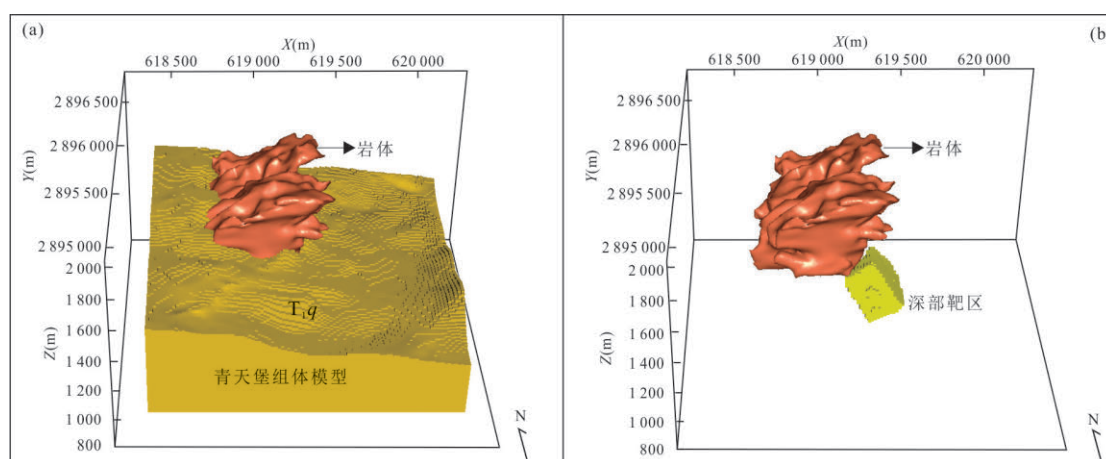


图10 青天堡组砂岩有利成矿区(a)和深部靶区(b)

Fig.10 Favorable area for mineralization of Qingtianbao sandstone (a) and spatial location of deep prospecting target area (b)

5 结论

(1) 本文建立了北衙矿床万洞山矿段富碱斑岩体、断裂和地层等成矿有利要素的三维模型。

(2) 建立了矿体三维模型和金元素品位模型。金元素异常值(>3 g/t)分布特征表明沿 $NE40^\circ$ 方向存在一条隐伏断裂,为深部有利成矿地质条件。

(3) 对成矿地质条件及深部成矿潜力区的分析表明,深部潜力区位于万洞山矿段富碱斑岩体南部。采用空间要素叠加法,对富碱斑岩体、断裂和砂岩等有利成矿要素的成矿有利区进行了叠加,获得了万洞山矿段海拔 $1100\sim 900$ m以浅地下空间深部靶区1处。

(4) 结合浅部地质数据与地球物理资料探索了深部潜力区和深部靶区预测方法,实现了深部

找矿靶区的圈定,为矿山开采提供了方向。

致谢:中国地质调查局成都地质调查中心杨剑高级工程师、王桥高级工程师和夏时斌博士在地球物理学方面给予了指导;审稿专家对本文提出了宝贵意见;在此一并感谢。

References

- Chen, A.B., Qin, D.X., Jiang, H., et al., 2007. Metallogenetic Prediction Based on Digital Deposit in Deep and Outside for Beiya Gold Deposit. *Nonferrous Metals*, 59(4): 137–140, 160 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J.P., Yu, P.P., Shi, R., et al., 2014. Research on Three-Dimensional Quantitative Prediction and Evaluation Methods of Regional Concealed Ore Bodies. *Earth Science Frontiers*, 21(5): 211–220 (in Chinese with English abstract).

- Chen, Y.J., Chang, Z.S., 1996. The Advances and Problems in Geologic Study and Exploration of the Skarn Type Gold Deposits, China. *Geological Exploration for Non-Ferrous Metals*, 5(3): 129—139 (in Chinese with English abstract).
- Cui, Y.L., Yan, J.G., Chen, X.S., 2003. The Prospecting Mark and Mode of Beiya Gold Deposit in Western Yunnan. *Gold*, 24(7): 7—10 (in Chinese with English abstract).
- Deng, J., Wang, Q. F., Li, G. J., et al., 2015. Geology and Genesis of the Giant Beiya Porphyry-Skarn Gold Deposit, Northwestern Yangtze Block, China. *Ore Geology Reviews*, 70: 457—485. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.02.015>
- Dong, L.Y., Wang, J., Yin, F.G., et al., 2013. The Storm Deposits from the Middle Triassic Beiya Formation in the Beiya Region, Western Yunnan and Their Palaeogeographic Implications. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 33(4): 16—21 (in Chinese with English abstract).
- Fu, Y., Sun, X. M., Lin, H., et al., 2015. Geochronology of the Giant Beiya Gold-Polymetallic Deposit in Yunnan Province, Southwest China and Its Relationship with the Petrogenesis of Alkaline Porphyry. *Ore Geology Reviews*, 71: 138—149. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.05.016>
- Ge, L.S., Guo, X.D., Zou, Y.L., et al., 2002. Geological Characteristics and Genesis of Beiya Gold Deposit, Yunnan Province. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 17(1): 32—40, 46 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Y.X.Y., 2015. Zoning Regularities of Mineralization and Alteration and Prospecting Direction for the Beiya Gold Poly-Metallic Deposit, Northwestern Yunnan, China (Dissertation). Kunming University of Science and Technology, Kunming (in Chinese with English abstract).
- He, W.Y., Yu, X.H., Mo, X.X., et al., 2012. Genetic Types and the Relationship between Alkali-Rich Intrusion and Mineralization of Beiya Gold-Polymetallic Ore Field, Western Yunnan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1401—1412 (in Chinese with English abstract).
- He, Z.H., Zhou, Y.M., He, W.Y., et al., 2013. Genetic Types and Metallogenic Regularity of Beiya Superlarge Gold-Polymetallic Deposit, Northwestern Yunnan. *Mineral Deposits*, 32(2): 244—258 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z.Q., Wang, E.Q., 2008. Metallogenesis of the Indo-Asian Collisional Orogen: New Advances. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(3): 275—292 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, H., Qin, D.X., Yao, Z.H., et al., 2007. Research and Application of Gold Mineralization Enrichment Law at X Section of Beiya Gold Deposit in Yunnan. *Metal Mine*, (11): 87—91 (in Chinese with English abstract).
- Jiao, Y.J., Huang, X.R., Li, G.M., et al., 2019. Deep Structure and Mineralization of Zhaxikang Ore-Concentration Area, South Tibet: Evidence from Geophysics. *Earth Science*, 44(6): 2117—2128 (in Chinese with English abstract).
- Li, H., Cen, K., Shen, Y.L., et al., 2006. New Geochemical Methods and Best Technique Combination for Prediction of Blind Orebody in the Deep and Surrounding of Crisis Mines. *Geology and Prospecting*, 42(4): 62—66 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.L., Meng, X.H., Fan, Z.G., et al., 2007. Application of Fine Gravity and Magnetic Data Processing and Interpretation in the Prospecting of Crisis Mines. *Earth Science*, 32(4): 559—563 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. C., Wang, J. H., He, Z. H., et al., 2016. Formation of Au-Polymetallic Ore Deposits in Alkaline Porphyries at Beiya, Yunnan, Southwest China. *Ore Geology Reviews*, 73: 241—252. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.05.003>
- Li, Y., 2009. The Metallogenic Geochemistry and Significance of Prospecting of Gold Polymetallic Ore Concentration Area in Beiya in Western Yunnan Province (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Liu, F., 2015. Metallogenic Tectonic Analysis and Ore-Finding Direction of the Beiya Porphyry-Type Gold Polymetallic Deposit in Northwestern Yunnan, China (Dissertation). Kunming University of Science and Technology, Kunming (in Chinese with English abstract).
- Liu, F., Han, R.S., Wang, L., et al., 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. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(Suppl.): 414—415 (in Chinese).
- Lou, D.B., Xiao, K.Y., Ding, J.H., et al., 2010. Introduction to the Main Functions of MRAS. *Mineral Deposits*, 29 (Suppl.): 753—754 (in Chinese).
- Ma, R., 2018. Alteration and Element Migration Characteristics of the Ore-Bearing Porphyry in the Super-Large Beiya Gold Deposit, Yunnan Province, SW China (Dis-

- sertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Niu, H.B., Hu, W.Y., Ding, J., et al., 2014. New Knowledge and Prospecting Direction of the Beiya Polymetallic Deposit in Northwestern Yunnan. *Mineral Deposits*, 33 (Suppl.): 730—732 (in Chinese).
- Sun, Z.S., Deng, J., Wang, P.F., et al., 2003. Successful Deep Ore Body Targeting: A Case Study of Xiadian Gold Deposit in Shandong. *Mineral Deposits*, 22(3): 318 (in Chinese).
- Wang, B.D., Wang, L.Q., Wang, D.B., et al., 2018. Tectonic Evolution of the Changning-Menglian Proto-Paleo Tethys Ocean in the Sanjiang Area, Southwestern China. *Earth Science*, 43(8): 2527—2550 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J.H., Li, W.C., Wang, K.Y., et al., 2015. The Characteristics and Evolution of the Ore-Forming Fluids in the Beiya Porphyry Au-Polymetallic Deposit, Western Yunnan. *Acta Petrologica Sinica*, 31(11): 3269—3280 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Yang, J., Yao, W., 2016. Experiment and Discussion of Prospecting Significance by Using CSAMT on Beiya Gold-Polymetallic Deposits in Northwest Yunnan Province. *Geological Science and Technology Information*, 35(6): 262—268 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Z.C., Guo, F.S., Jiang, Y.B., et al., 2016. Methods of Three-Dimensional Geological Modeling Based on Geological Sections. *Geology and Exploration*, 52(2): 363—375 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, X.N., Yu, X.H., Mo, X.X., et al., 2009. A Study of Fluid Inclusions from Beiya Gold-Polymetallic Deposit in Western Yunnan. *Earth Science Frontiers*, 16(2): 250—261 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, X.N., Yu, X.H., Mo, X.X., et al., 2011. Geochemical Characteristics of Metallogenesis in the Gold-Polymetallic Deposit in Beiya, Western Yunnan Province. *Geology and Exploration*, 47(2): 170—179 (in Chinese with English abstract).
- Xue, C.D., Hou, Z.Q., Liu, X., et al., 2008. Petrogenesis and Metallogenesis of the Beiya Gold-Polymetallic Ore District, Northwestern Yunnan Province, China: Responses to Indo-Asian Collisional Process. *Acta Petrologica Sinica*, 24(3): 457—472 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J., Wang, X.B., Wang, Y.H., et al., 2014a. The Application of Integrated Geophysical Methods of Magnetic Survey and AMT to the Exploration of the Beiya Gold Deposit. *Geology in China*, 41(2): 602—610 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J., Wang, X.B., Zeng, Q.Q., et al., 2014b. Gravity and Magnetic Field Characteristics and Comprehensive Prospecting Evaluation in Beiya Gold Mine. *Progress in Geophysics*, 29(4): 1856—1862 (in Chinese with English abstract).
- Yin, F.G., Pan, G.T., Wan, F., et al., 2006. Tectonic Facies along the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang Orogenic Belt in Southwestern China. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 26(4): 33—39 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, Q.Q., Wang, Y.H., Yang, J., 2012. Application of the Multi-Scale Wavelet Analytical Method: A Case Study of the Beiya Iron-Gold Mining District in Yunnan. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 32(4): 100—105 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, Y.S., Deng, J., Wang, J.P., et al., 2004. Researches on Deep Ore Prospecting. *Mineral Deposits*, 23(2): 142—149 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z., Wang, D.H., Chen, Y.C., et al., 2017. “Jiulongnao Metallogenic Model” and the Demonstration of Deep Prospecting: The Extended Application of “Five Levels+Basement” Exploration Model. *Earth Science Frontiers*, 24(5): 8—16 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, S., Xiao, K.Y., 2015. Three-Dimensional Geologic Modeling and Deep Ore Body Prospecting of Tieshan Iron Deposit of Daye Iron Ore District. *Mineral Deposits*, 34(4): 814—827 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈爱兵, 秦德先, 姜华, 等, 2007. 基于数字矿床的北衙金矿深边部成矿预测. 有色金属, 59(4): 137—140, 160.
- 陈建平, 于萍萍, 史蕊, 等, 2014. 区域隐伏矿体三维定量预测评价方法研究. 地学前缘, 21(5): 211—220.
- 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. 有色金属矿产与勘查, 5(3): 129—139.
- 崔银亮, 晏建国, 陈贤胜, 2003. 滇西北衙金矿床找矿标志和找矿模式研究. 黄金, 24(7): 7—10.
- 董黎阳, 王剑, 尹福光, 等, 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. 沉积与特提斯地质, 33(4): 16—21.
- 葛良胜, 郭晓东, 邹依林, 等, 2002. 云南北衙金矿床地质特征及成因研究. 地质找矿论丛, 17(1): 32—40, 46.
- 郭钰心玥, 2015. 滇西北北衙金多金属矿床矿化蚀变分带规律及找矿方向 (硕士学位论文). 昆明: 昆明理工大学.
- 和文言, 喻学惠, 莫宣学, 等, 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. 岩石学报, 28(5): 1401—1412.
- 和中华, 周云满, 和文言, 等, 2013. 滇西北衙超大型金多金属矿床成因类型及成矿规律. 矿床地质, 32(2): 244—258.
- 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. 地球学报, 29(3): 275—292.
- 姜华, 秦德先, 姚志华, 等, 2007. 北衙金矿X段金矿化富集规律研究及应用. 金属矿山, (11): 87—91.
- 焦彦杰, 黄旭日, 李光明, 等, 2019. 藏南扎西康矿集区深部结构与成矿: 来自地球物理的证据. 地球科学, 44(6): 2117—2128.
- 李惠, 岑况, 沈镛立, 等, 2006. 危机矿山深部及其外围盲矿预测的化探新方法及其最佳组合. 地质与勘探, 42(4): 62—66.
- 李淑玲, 孟小红, 范正国, 等, 2007. 危机矿山重磁资料精细处理与解释: 以湖北省大冶铁矿为例. 地球科学, 32(4): 559—563.
- 李勇, 2009. 滇西北衙金多金属矿集区成矿地球化学特征及找矿意义(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 刘飞, 2015. 滇西北衙斑岩型金多金属矿床成矿构造解析及找矿方向(硕士学位论文). 昆明: 昆明理工大学.
- 刘飞, 韩润生, 王雷, 等, 2015. 滇西北衙斑岩型金多金属矿床构造控矿作用分析. 矿物学报, 35(增刊): 414—415.
- 娄德波, 肖克炎, 丁建华, 等, 2010. MRAS的主要功能简介. 矿床地质, 29(S1): 753—754.
- 马睿, 2018. 云南北衙超大型金斑岩蚀变作用及元素迁移特征研究(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 牛浩斌, 胡文懿, 丁俊, 等, 2014. 滇西北衙金多金属矿床两期成矿新认识及找矿方向. 矿床地质, 33(S1): 730—732.
- 孙忠实, 邓军, 王培福, 等, 2003. 成功的深部矿体定位预测: 以山东夏甸金矿为例. 矿床地质, 22(3): 318.
- 王保弟, 王立全, 王冬兵, 等, 2018. 三江昌宁—孟连带原—古特提斯构造演化. 地球科学, 43(8): 2527—2550.
- 王建华, 李文昌, 王可勇, 等, 2015. 滇西北衙斑岩型金多金属矿床成矿流体特征及其演化. 岩石学报, 31(11): 3269—3280.
- 王桥, 杨剑, 姚文, 2016. 滇西北衙金多金属矿床CSAMT方法试验及找矿意义探讨. 地质科技情报, 35(6): 262—268.
- 吴志春, 郭福生, 姜勇彪, 等, 2016. 基于地质剖面构建三维地质模型的方法研究. 地质与勘探, 52(2): 363—375.
- 肖晓牛, 喻学惠, 莫宣学, 等, 2009. 滇西北衙金多金属矿床流体包裹体研究. 地学前缘, 16(2): 250—261.
- 肖晓牛, 喻学惠, 莫宣学, 等, 2011. 滇西北衙金多金属矿床成矿地球化学特征. 地质与勘探, 47(2): 170—179.
- 薛传东, 侯增谦, 刘星, 等, 2008. 滇西北衙金多金属矿田的成岩成矿作用: 对印—亚碰撞造山过程的响应. 岩石学报, 24(3): 457—472.
- 杨剑, 王绪本, 王永华, 等, 2014a. 电、磁综合方法在云南北衙铁金矿勘查中的应用. 中国地质, 41(2): 602—610.
- 杨剑, 王绪本, 曾琴琴, 等, 2014b. 北衙金矿重磁场特征与综合找矿评价. 地球物理学进展, 29(4): 1856—1862.
- 尹福光, 潘桂棠, 万方, 等, 2006. 西南“三江”造山带大地构造相. 沉积与特提斯地质, 26(4): 33—39.
- 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. 沉积与特提斯地质, 32(4): 100—105.
- 翟裕生, 邓军, 王建平, 等, 2004. 深部找矿研究问题. 矿床地质, 23(2): 142—149.
- 赵正, 王登红, 陈毓川, 等, 2017. “九龙脑成矿模式”及其深部找矿示范: “五层楼+地下室”勘查模型的拓展. 地学前缘, 24(5): 8—16.
- 祝嵩, 肖克炎, 2015. 大冶铁矿田铁山矿区三维地质体建模及深部成矿预测. 矿床地质, 34(4): 814—827.