

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2024.03.006

江西省冷水坑斑岩型矿床控矿地质体三维地质特征

王立立^{1,3}, 陈 祺^{2,3*}, 曾闰灵^{2,3}, 欧阳永棚^{2,3}, 李增华¹, 杨立飞¹

WANG Li-Li^{1,3}, CHEN Qi^{2,3*}, ZENG Run-Ling^{2,3}, OUYANG Yong-Peng^{2,3}, LI Zeng-Hua¹, YANG Li-Fei¹

1. 东华理工大学地球科学学院, 江西 南昌 330013; 2. 江西省地质局第十地质大队, 江西 鹰潭 335001;

3. 鹰潭市紧缺及优势矿产勘查与研究重点实验室, 江西 鹰潭 335001

1. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China;

2. The tenth Geological Brigade of Jiangxi Geological Bureau, Yingtan 335001, Jiangxi, China;

3. Yingtan Key Laboratory of Exploration and Research of Scarce and Advantage Minerals, Yingtan 335001, Jiangxi, China

摘要: 江西省冷水坑银铅锌矿田处于扬子地块与华夏地块拼接带南侧, 武夷银多金属成矿带和钦杭成矿带的交汇部位, 为我国重要的银铅锌矿田。本文基于矿田地质图、勘探线剖面图和钻孔柱状图等地质资料, 运用 GOCAD 软件, 建立了矿田斑岩体、断裂和矿体的三维模型以及矿体的品位模型, 直观地展示了各成矿地质体相互关系。上述模型表明斑岩型矿体主要产于花岗斑岩的前缘带和主体带; Ag 品位分布具有空间差异性, 高品位值主要分布在矿体的上部, Pb 和 Zn 的品位分布相对均一; 矿体主要产于断裂 F1 和 F2 之间, 且矿体和花岗斑岩体产状均明显受断裂控制。冷水坑银铅锌矿田成矿地质体三维模型的建立为后期矿田深边部找矿提供了重要的技术支撑, 尤其对其外围及深部隐伏斑岩型矿体的寻找具有一定的指导意义。

关键词: 冷水坑矿田; 银铅锌矿床; 斑岩型矿体; 三维地质模型; 控矿规律

中图分类号: P628

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2024)-03-0504-15

Wang L L, Chen Q, Zeng R L, OuYang Y P, Li Z H and Yang L F. 2024. Three-Dimensional Geological Characteristics of Ore-Controlling Geological Body of Lengshuikeng Porphyry Deposit in Jiangxi Province. *South China Geology*, 40(3): 504–518.

Abstract: The Lengshuikeng silver-lead-zinc ore field in Jiangxi Province is located on the southern side of the suture zone of the Yangtze block and the Cathaysian block, and the intersection of the Wuyi silver polymetallic metallogenic belt and the Qinhang metallogenic belt. It is an important silver-lead-zinc ore field in China. Based on the geological data of ore field geological map, exploration line profile and borehole histogram, using GOCAD software, the three-dimensional model of porphyry body, fracture and ore body, as well as the grade model of ore body have been established, which provides a visual representation of the relationship between ore-forming geological bodies. This model further confirmed that the porphyry ore body is produced in the front and main zones of the granite porphyry, and is controlled by the regional nappe structure. The silver grade distribution is spatially variable, with high-grade ores mainly distributed in the upper part of the ore body, and the grade distribution of lead and zinc is relatively uniform; the ore body is

收稿日期: 2024-07-31; 修回日期: 2024-09-01

基金项目: 江西省地质局基础地质调查评价项目 (赣地质字[2023]16 号)、江西省地质局矿产资源综合利用研究等公益性项目 (赣地质字[2022]19 号)、江西省自然科学基金面上项目 (20224BAB203037)、鹰潭市科技计划项目 (20233-185656、202412-28880)

第一作者: 王立立(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事三维地质建模研究, E-mail: 1905782004@qq.com

通讯作者: 陈祺(1992—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事地质勘查研究及三维地质建模, E-mail: 774247174@qq.com

mostly produced between F1 and F2, and both the ore body and the granite porphyry body are controlled by fractures. The establishment of the 3D model of the Lengshuikeng silver-lead-zinc ore field provides important technical support for future prospecting of the deep edge of the ore field, especially for the exploration of the peripheral and deep concealed porphyry ore bodies.

Key words: Lengshuikeng ore field; Ag-Pb-Zn deposit; porphyry ore deposit; 3D geological model; ore-controlling regularity

江西省贵溪市冷水坑银铅锌矿床是国内外少见的斑岩型银铅锌矿床,近年来,研究者对其开展了地质特征、流体包裹体和地球化学等方面的研究(赵志刚等,2008;左力艳等,2008),认为斑岩型矿体属于构造-岩体-矿床三体一位的次火山热液型成因。据2021年完成的江西省贵溪市冷水坑+银珠山银铅锌矿区矿产资源国情调查报告,冷水坑矿田累计查明资源储量Ag 9909.6吨,Pb 186.87万吨,Zn 278.90万吨,共伴生Au 5.50吨(曾祥辉等,2022)。冷水坑矿田内矿化类型较为复杂,主要有似层状热液矿床和潜火山斑岩型矿床,兼有脉状矿床,具有“多位一体”的特征。

冷水坑矿田以往勘查工作所形成的地质资料均以二维形式呈现,缺乏系统的矿床三维空间综合研究,对相邻矿区主要矿体的相互关系、深部变化、三维空间展布规律等研究尚不清楚,制约了对成矿规律的深入认识和对找矿方向的科学判断(王永庆等,2022)。本文基于冷水坑矿田历年勘探资料开展三维地质建模工作,建立了冷水坑矿田三维地质模型,对矿田内与斑岩型矿体相关的主要岩体的空间展布规律,以及斑岩型矿体与岩体和断裂的空间关系展开研究,讨论了斑岩型矿体的控矿要素。通过建立的三维地质模型,分析斑岩型矿体与相关地质体的空间分布规律,总结矿体的空间分布特征及控矿规律,为矿田斑岩型矿体的开采和就矿找矿工作提供一定的参考。

1 矿田地质特征

冷水坑铅锌银矿田地处扬子地块与华夏地块拼接带南侧,华夏地块北缘的武夷隆起区,武夷银多金属成矿带和钦杭成矿带的交汇部位,月凤山中生代火山盆地北西边缘(肖茂章和漆光明,

2014; 咎芳等,2016)。武夷隆起区主要构造是北北东向展布的花岗岩-构造隆起带和一系列巨大断裂带。它们主要形成于印支-燕山早期陆内造山阶段,后经燕山晚期伸展作用的改造形成了现今的盆岭构造格局(李兆鼎等,2003)。

矿田内出露的地层主要有震旦系上统老虎塘组(Z_2l)、下白垩统鹅湖岭组(K_1e)等,局部出露下石炭统梓山组 C_1z (图1)。老虎塘组是一套由石英云母片岩、云母石英片岩、黑云母斜长片麻岩等组成的变质岩系,主要分布在矿田的中部、北西和北东部。下白垩统火山岩可以划分为上部的鹅湖岭组(K_1e)和下部的打鼓顶组(K_1d)。打鼓顶组在矿田的深部,下部为复成份角砾岩、流纹质晶屑凝灰岩、粗晶屑凝灰岩等,上部为长英质角砾岩,是似层状银铅锌体的主要赋矿层位(何细荣,2010)。鹅湖岭组主要由凝灰岩和流纹岩组成,是层控型矿床的主要产出部位。

区内主要发育加里东期和燕山期侵入岩,其中以燕山期岩浆活动最为强烈。侵入岩按岩性可划分为花岗斑岩、石英正长斑岩、流纹斑岩和正长花岗斑岩等,空间上受火山构造控制,时间上与火山岩同期或稍晚,与火山岩构成了侵入岩-次火山岩-火山岩构造火山盆地(咎芳等,2016)。区域内出露燕山期花岗斑岩(锆石 U-Pb 年龄 157.3 ± 1.3 Ma, 孟祥金等,2012)、流纹斑岩(锆石 U-Pb 年龄 137 ± 2.1 Ma ~ 138.8 ± 1.4 Ma, 徐庆胜等,2014)和石英正长斑岩(锆石 U-Pb 年龄 134 ± 1.1 Ma ~ 134.5 ± 1.1 Ma, 钱迈平等,2015),钾长花岗斑岩(锆石 U-Pb 年龄为 134.6 ± 1.3 Ma ~ 135.1 ± 1.2 Ma, 钱迈平等,2015)、二长斑岩、闪长玢岩及玄武岩等岩脉。其中,燕山早期花岗斑岩与银铅锌矿床的形成和分布关系密切。

研究区内主要构造以断裂为主,其次还有以

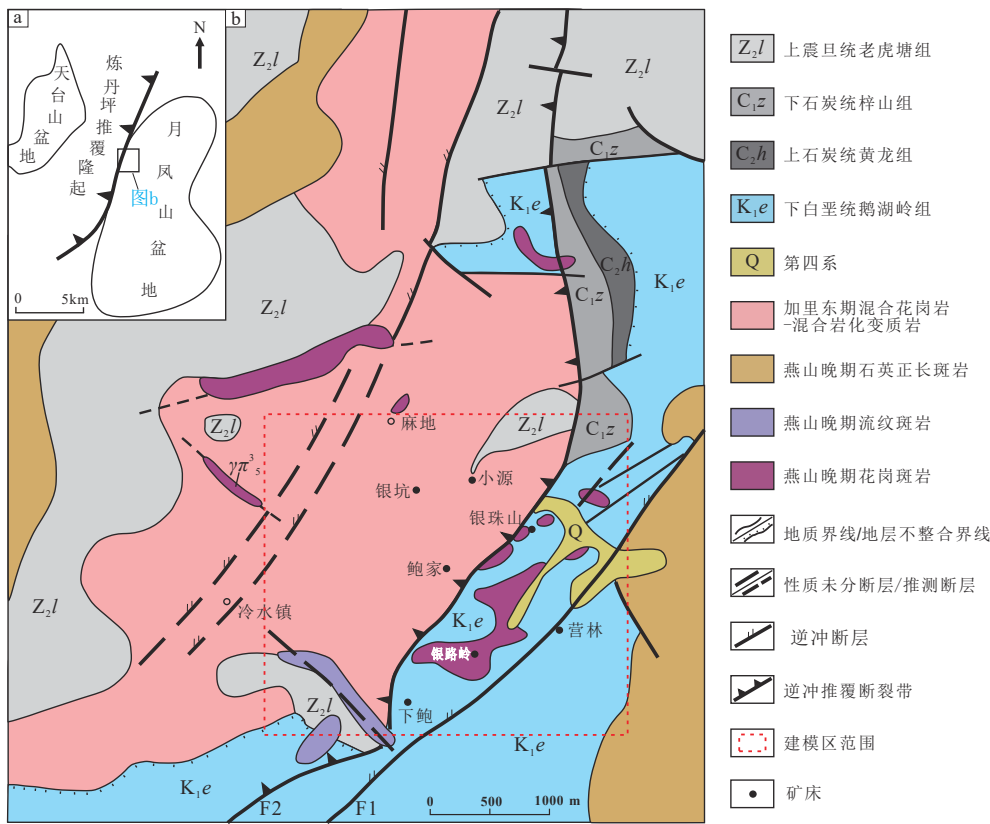


图 1 冷水坑地区构造简图 (a) 和冷水坑银铅锌矿田地质简图 (b)

Fig. 1 Structural sketch of Lengshuikeng (a) and geological sketch of Lengshuikeng Ag-Pb-Zn ore field (b)

据曾祥辉等(2022)修改

变质岩基底和火山岩地层构成的简单褶皱构造(张春茂, 2013)。区域内发育的断裂构造主要有北东向断裂和北西向断裂两组。其中北东向断裂主要有 F1 和 F2 断裂(图 1), 这两条断裂与区域内矿体的形成关系密切。F1 断裂位于研究区东南部, 为逆断层, 主要活动特征为压性-扭性-张性, 是重要的导岩-导矿构造。冷水坑矿田处于 F1 断裂的上盘, 下盘目前未探查达到工业品位的矿体(余心起, 2008)。F2 断裂为逆冲推覆构造, 该断裂垂直断裂倾角从浅部至深部, 呈断坪-断坡-断坪-断坡状变化, 推覆距离大于 1000 m (张奎奎等, 2010)。逆冲断裂带从研究区的中部穿过, F2 是逆冲断裂生成的主要断裂, 同时还派生了许多的次级断裂, F2 和这些次级断裂的构造裂隙为矿体的形成提供了容矿和储矿空间。

冷水坑银铅锌矿田是一个以潜火山斑岩型矿床和似层状热液矿床为主, 兼有少数脉状矿床的“多位一体”矿床。冷水坑矿田目前已经探明的矿

床有七个, 即银路岭、鲍家、银珠山、下鲍、银坑、营林、小源矿床(图 1)。其中斑岩型矿床有银路岭、鲍家、银珠山、下鲍, 矿床内主要产出银铅锌矿体。矿体主要产于燕山期花岗斑岩的内部及接触带附近, 矿体与斑岩体的产状大体一致(明小泉和贺海龙, 2018)。

斑岩型矿体中绿泥石化、绢云母化、硅化和碳酸盐化较为发育, 斑岩体的内外接触带绢云母化较为发育, 绿泥石化主要分布在含矿斑岩体的中心部位以及岩体边缘和靠近岩体的围岩部位。碳酸盐化分布较为广泛, 主要发育在含矿斑岩体内和火山碎屑岩中, 硅化主要分布在花岗斑岩体内。

2 三维地质模型构建

三维地质建模是以各类地质勘探资料为基础, 以计算机为平台, 结合地质专业人士的认识, 对各类地质体、断裂构造的几何形态和分布规律进行立体展示的技术方法, 三维地质模型可以直

观地表现各个地质体之间的空间分布和地质形态特征,帮助我们更加直观认识深部各地质要素(武强和徐华, 2004; 毛先成等, 2011)。

近年来我国建模技术发展较快,技术较为成熟,建模方法多样,有多种建模软件可供选择(吕鹏, 2013; 潘诗辰和毛先成, 2015; 陈麒玉等, 2020; 李章林等, 2020; 田宜平等, 2020; 张夏林等, 2020)。此次建模以法国 Nancy 大学研发的 GOCAD (Geological Object Computer Aided Design) 软件为建模平台, GOCAD 软件可以运用离散光滑插值算法(DSI)对生成的地质体进行光滑处理与模拟,可以使建立的模型更加接近实际(刘镐, 2024)。与其他建模软件相比较, GOCAD 软件空间分析能力较强(董梅等, 2008; 张燕飞等, 2011; Jin X et al., 2020),与其他软件的兼容性较好、可视化性能和复杂地质体构建能力较强(李铎,

2020; 朱振洲等, 2020)。本文采取 GOCAD 为建模软件并收集冷水坑银铅锌矿田以往积累的地质勘探数据建立三维地质模型。研究区的建模范围(图 1)东西方向和南北方向距离为 3.3 km, 面积 10.89 km², 建模深度为 1.5 km。

2.1 数据预处理

三维地质建模一个最大的特点就是建模数据的多源性,将这些数据有效的进行融合是建立模型的关键,如此可以使模型的精度和可靠性大大提高(吴志春等, 2016; 王功文等, 2021)。三维地质模型的构建也可以看作是对区域内地质数据进行处理达到三维可视化的过程,在这个可视化过程中,需要将各类地质数据的参数进行统一(叶思源等, 2010; 刘镐, 2024)。本文系统收集了冷水坑矿田历年勘查资料,其中钻孔 513 个、地质地形图 8 幅、勘探线剖面图 63 幅(表 1)。

表 1 冷水坑矿田三维建模数据一览表

Table 1 List of 3D modeling data of Lengshuikeng ore field

数据类型	数量	数据源简介
勘探线剖面图	63(幅)	勘探线剖面图有矢量和图片两种格式,勘探线间距为50 m, 部分为100 m, 有地层分界线和岩体界线
钻孔	513(个)	包括钻孔位置信息、测斜数据、地层分层和岩性等信息
等高线数据	1(研究区)	等高线(有高程值)用于构建DEM面
地质地形图	8(幅)	为MapGIS格式的矢量图,确定出露地表的各个地质界面

冷水坑矿田开发较早,积累了大量的勘探资料,这些数据在格式、比例尺、投影参数都有很大差异,将收集到的资料进行统一化处理,保证后期建模所使用的数据是数字化格式、地质图件是矢量化格式、矢量数据的投影参数统一。

2.2 三维建模流程与技术

此次建模方法是基于多元数据融合及约束-插值的三维地质体复杂交互建模(张伟等, 2013; 胡莹等, 2014; 刘同文等, 2018; 冉祥金, 2020; 曾敏等, 2022)。根据冷水坑银铅锌矿田工作程度图确定建模的范围,建模秉承由上至下、先简单后复杂、先地层后岩体的顺序进行。在地质图上确定建模范围,将建模范围的边界线导入到 GOCAD 中,确定建模边界。将处理后的剖面图和钻孔数据导入到 GOCAD 中,数据加载主要包括以下几个步骤:(1)剖面图加载:在 CAD 中将剖面图转为“DXF”格式文件,在 GOCAD 软件中导入;(2)钻

孔数据加载:第一步,加载钻孔路径信息(Path),主要包括钻孔名(Wellname)、方位角(Amizuth)、倾角(Inclination)、孔深(depth)等;第二步,加载钻孔位置信息,主要包括钻孔的坐标(X,Y)、高程(Z)和最大孔深(Max_depth);第三步,岩性分层数据加载,主要包括钻孔名(Wellname)、钻孔分层深度(Depth)、地层、岩体的岩性标注(Maker);第四步,加载样品分析数据(Grade),通过测井(Well)-测井曲线(Well-log)-间隔性测井曲线(intervallog),添加样品分析数据。利用钻孔对地质界面进行约束,约束过程需多次重复进行,以达到建立的地质界面即平滑美观,又与事实最接近。结合地质图上的断裂线以及剖面图上的断裂线,建立断裂面模型。矿体模型的建立可以参考地层界面构建的方法。将建立的模型组合起来,形成一个封闭的空间,利用 GOCAD 软件中的 Model 3D 的功能构建地质体三维地质模型。

冷水坑银铅锌矿田三维地质模型采用钻孔建模与剖面建模相结合的方法。先从剖面图中确定各个地层的分界线,生成地层界面,然后以钻孔为控制点对生成的地质界面进行插值美化,将生成的地质界面组合建立三维地质模型,具体流程见图 2。

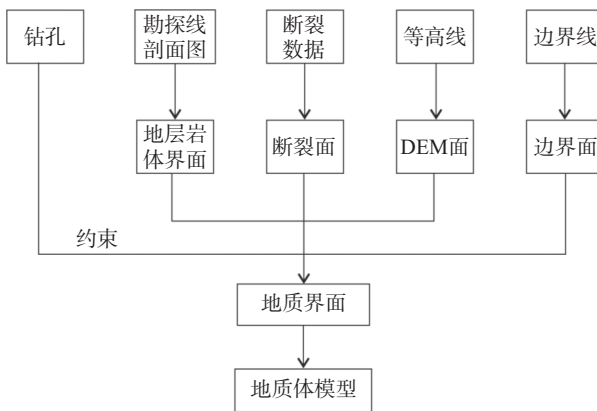


图 2 建模流程图
Fig. 2 Modeling flow chart

3 矿田三维模型

3.1 地层三维模型

矿区广泛出露的地层有震旦系上统老虎塘

组、白垩系上统鹅湖岭组。震旦系上统老虎塘组变质岩主要分布在建模区西北部,厚度由西北角至东南减薄。由于推覆断裂(F2)的逆冲推覆作用,白垩系下统打鼓顶组整体位于区内深部。白垩系鹅湖岭组主要出露于矿区东南部,鹅湖岭组由深至浅、由西北至东南分为鹅湖岭组下段、中段、上段(图 3)。

3.2 岩体三维模型

矿区内岩浆岩主要产于加里东中晚期、燕山早期和燕山晚期,其中燕山早期岩浆活动最为强烈(肖婷, 2019)。本次建模的岩体为燕山早期花岗斑岩,燕山晚期花岗斑岩,燕山晚期流纹斑岩,燕山晚期正长花岗斑岩。

3.2.1 燕山早期花岗斑岩

燕山早期花岗斑岩整体沿着推覆面从西北(标高-1120 m)至东南(标高 340 m)侵入,最终在建模区中东部出露地表,纵观整个花岗斑岩岩体,为出露面积约 0.36 km² 的舌状岩体(图 4a)。深部岩体沿着 F2 断裂面产生的岩浆通道上升,与上部的变质岩接触,浅部的岩体侵入到下白垩统鹅湖岭组下段。根据建立的模型,观察到燕山早期花岗斑岩整体呈岩墙产出,厚度为 120 ~ 290 m。

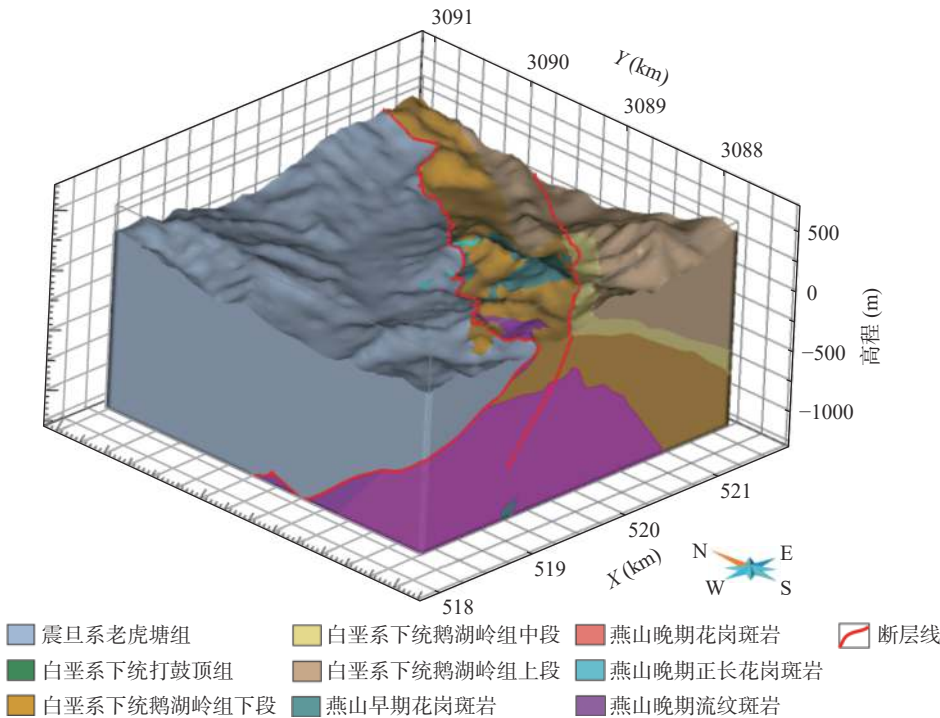


图 3 冷水坑矿田三维地质模型
Fig. 3 3D geological model of Lengshuikeng ore field

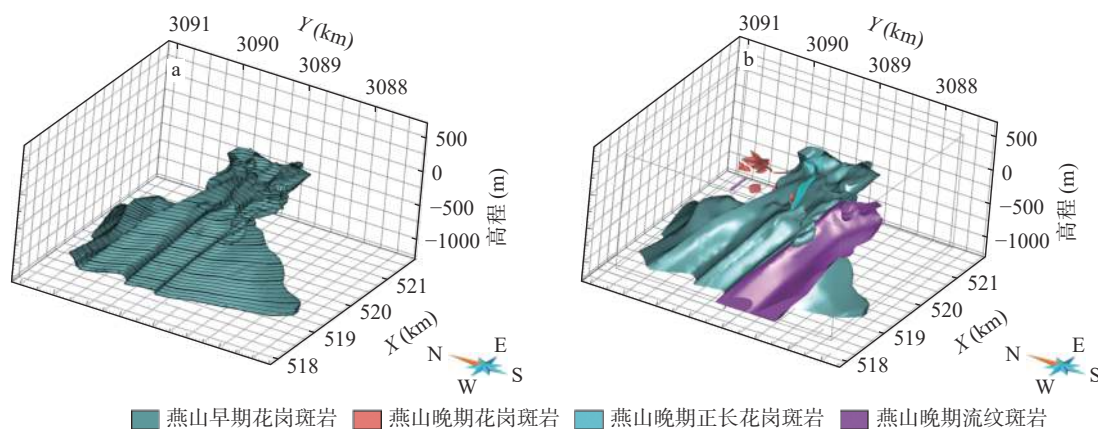


图 4 建模区内岩体

Fig. 4 Rock mass in modeling area

a. 燕山早期花岗斑岩高程轮廓图; b. 建模区岩体三维模型图

部分岩体呈岩株产出,与火山岩呈侵入接触关系。小岩株位于 F1 和 F2 两组断层之间且受 F2 断裂控制较为明显。该岩体是斑岩型矿体主要产出部位,规模最大,矿化较普遍,形成了矿化面积达 8 km^2 的银铅锌矿田,是一个携带了极为丰富流体的成矿岩体。

3.2.2 燕山晚期花岗斑岩

建模区内,燕山晚期花岗斑岩,其零散分布于白垩系打鼓顶组 $20 \sim 280 \text{ m}$ 标高内,规模较小,呈岩脉产出(图 4b),厚度 $5 \sim 50 \text{ m}$,产状受 F2 推覆构造的影响。在空间上大部分侵位于矿区 F2 推覆构造之下的白垩系上统打鼓顶组火山岩中,少部分侵位于 F2 推覆构造之上的老虎塘组变质岩中和 F2 之下的燕山早期花岗斑岩中。

3.2.3 燕山晚期流纹斑岩

燕山晚期流纹斑岩整体沿着推覆面从西北(标高 -1120 m)至东南(标高 280 m)发育,最终在建模区南部震旦系老虎塘组和下白垩统鹅湖岭组的交界处出露。根据模型的形态特征,燕山晚期流纹斑岩整体呈岩墙产出,受 F2 控制明显,深部岩体沿推覆面呈 40° 穿过震旦系老虎塘组,浅部的岩体侵入于白垩系上统鹅湖岭组下段。岩墙整体厚度变化较为均一,最宽处约 330 m ,最窄处约 210 m ,平均宽度约 260 m (图 4b)。

3.2.4 燕山晚期正长花岗斑岩

建模区内,燕山晚期正长花岗斑岩呈近乎直立的岩墙产出(图 4b)。该岩体由建模区中南部

深处(标高 -1120 m)上侵并在地表(标高 320 m)出露。岩墙厚度变化较小,为 $30 \sim 80 \text{ m}$ 。岩体侵入含矿斑岩体和下白垩统打鼓顶组和鹅湖岭组,主要产于 F1 和 F2 两断层之间,局部穿过 F2 并侵入震旦系上统老虎塘组。

3.3 断裂三维模型

此次建立的断裂模型主要是北东向的 F1 和 F2 断裂,这两条断裂与矿体的形成密切相关。根据建立的模型,断层 F2 延伸至模型底界, F1 断层为逆断层,向深部延伸至 -700 m 左右。F2 的上盘是变质岩,最厚处厚度达 1000 多米,较薄处仅十几米,总体向北东逐渐变薄。F1 断层主要穿过鹅湖岭组和打鼓顶组上部。

3.3.1 F1 断裂

F1 断裂处于区域的南东角,走向为北东 $40^\circ \sim 50^\circ$,在建模区内,沿走向方向延伸约 2.8 km 。F1 断裂倾向北西,从北东至南西倾角为 $80^\circ \sim 50^\circ$ (图 5a、5b),断裂中间部位有明显的变形,是由于挤压形成。断裂切穿下白垩统鹅湖岭组到达地表,使该地层发生错位,出露地表最高处高程为 260 m 左右,穿过下白垩统打鼓顶组的顶部,到 -700 m 左右消失。

3.3.2 F2 断裂

F2 断裂分布于矿田的中部,属于逆冲推覆构造,出露地表。研究区内断裂走向北段近南北向、中间近北东 $40^\circ \sim 60^\circ$ 、南段转为近北北西向,由于剥蚀作用,断裂在地表平面上呈不规则状。断裂

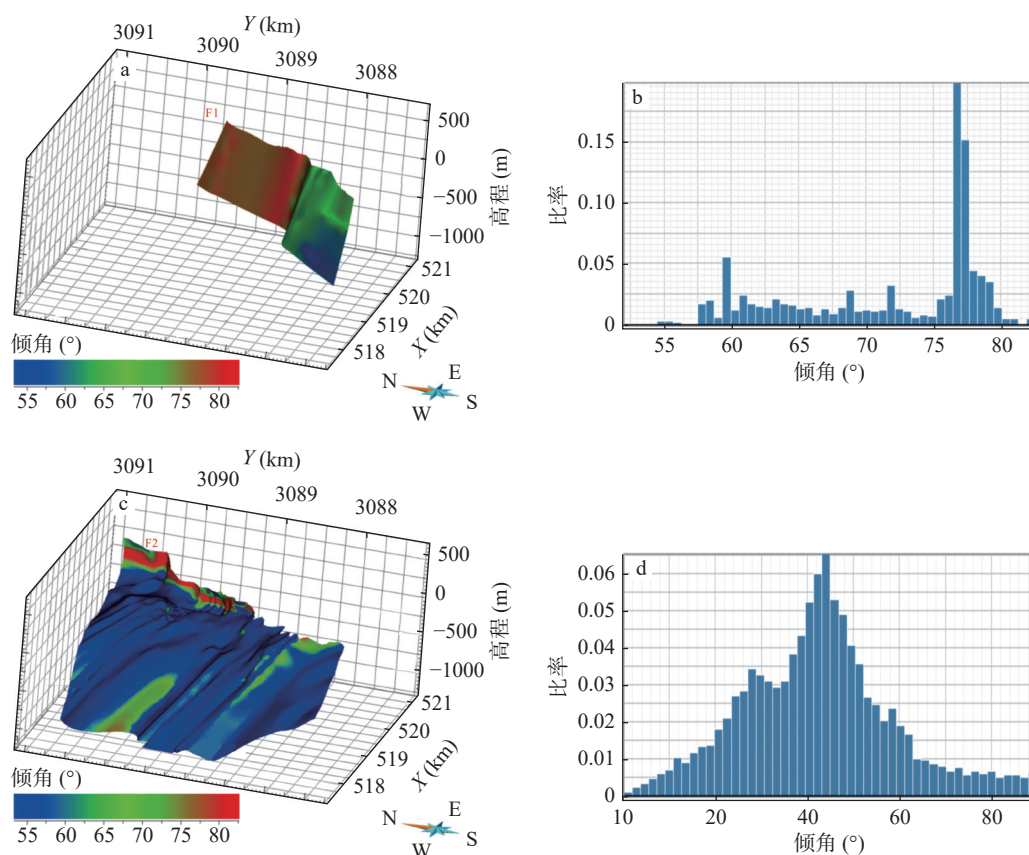


图5 断层和断层倾角统计图

Fig. 5 Statistics of fault and fault dip angle

a. F1 三维空间展布图; b. F1 倾角累计直方图; c. F2 三维空间展布图; d. F2 倾角累计直方图

推覆距离约在 1200 m 到 2000 m 之间。F2 断裂倾向总体呈北西向, 倾角变化较大: 从地表往地下延伸, 呈断坪-断坡交替变化, 从地表往下断层的产状很陡, 倾角为 $65^{\circ} \sim 90^{\circ}$, 大部分在 80° 左右, 局部呈直立状, 向下延伸约 200 ~ 300 m, 到达 -70 m 左右向西北方向突然变缓, 倾角变小, 近乎水平, 总体呈梨状, 局部较为平缓。在 -350 m 左右, 断裂又变陡, 倾角大约在 $35^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 之间, 大致以此角度延伸至建模范围以外(图 5c、5d)。出露地表的断层受地表地形的影响, 断裂大多比较弯曲, 呈弧状。F2 断裂上盘为震旦系变质岩, 从断层的前段向西北方向, 上盘的变质岩厚度依次变大, 从 0 m 增厚至近 1500 m, 被该断裂推覆至上白垩统火山岩之上。F2 断裂下盘为正常的地层层序。

3.4 矿体三维模型

3.4.1 矿体三维模型

研究区的矿体三维模型的构建采用剖面连接

法。通过提取各勘探线剖面图中的矿体解译线, 多工程矿体利用三角网将同一类型的矿体解译线连接起来, 边部沿矿体走向采用四分之一勘探线间距外推(平推), 单工程矿体沿矿体走向向两侧进行二分之一工程间距外推(尖推), 封闭形成矿体三维模型, 可作为已知成矿事件用于预测变量的定量提取。

研究区斑岩型矿床有 4 个, 即银路岭、鲍家、银珠山和下鲍矿床, 赋存于标高 350 ~ -775 m 之间的燕山早期花岗斑岩内或其接触带附近。矿体在平面上大致呈北东向带状分布, 随燕山早期花岗斑岩产出。矿体多呈透镜状和似层状, 主要产于花岗斑岩前缘带、主体带及接触带附近, 部分产于岩体近根部带及外带火山岩中, 矿体形态相对较规则, 产状与花岗斑岩产状一致, 走向北东, 倾向北西, 总体走向长约 1770 m, 倾向延深约 2100 m, 矿体的倾向随深度增加而逐渐变陡, 中浅部的矿

体倾角为 $5^{\circ} \sim 35^{\circ}$,中深部为 $35^{\circ} \sim 60^{\circ}$,矿体平均厚度为1~50 m。矿体主要分布在中部银珠山矿床附近规模大,较为连续,厚度较大,由中部向南西和北东两侧,矿体的厚度逐渐变薄,规模也变小。从浅部到深部,矿体的连续性降低,厚度也变薄,规模变小(图6)。

3.4.2 矿体品位模型

收集到的研究区样品分析数据包含Ag、Pb、Zn的品位数据,将其以钻孔属性导入到GOCAD软件中。根据矿体的面模型生成SGrid实体模型,设定的单元块大小为 $20\text{ m} \times 20\text{ m} \times 5\text{ m}$,为后面插值做好准备。再对Ag、Pb和Zn品位数据进行变异函数分析,根据相应的分析结果选择适应的变异函数模型,然后运用克里格法插值生成品位模型。

矿体中Ag平均品位为131.4 g/t,最高品位值为1051.5 g/t,90%以上的品位值大于40.8 g/t;Pb平均品位为1.4%,最高品位11.2%,90%以上的

品位值大于0.9%;Zn平均品位2.3%,最高品位18.2%,90%以上的品位值大于1.6%(图7)。空间上看,Ag品位分布具有空间差异性,高品位值主要分布在矿体的上部,品位为25~150 g/t;向深部延伸的矿体部位,Ag品位相对较低,小于10 g/t(图7a)。Pb品位分布相对均一,矿体的顶部和深部延伸部位品位变化较小,在0.5%~1.5%之间,在矿体中间有两处高值,品位大于3%(图7b)。Zn的品位分布相对均一,多为1%~3%,但是有两处较高值(大于5%),主要分布于矿体的上部(图7c)。高品位Ag、Pb、Zn相对较为集中,主要集中于矿田南部鲍家及下鲍矿床、东南部银路岭矿床、中部银珠山南矿床,矿田北部品位相对较低且连续性较差。

4 斑岩型矿化作用空间分布规律分析

借助建立的三维地质模型,直观地分析矿体

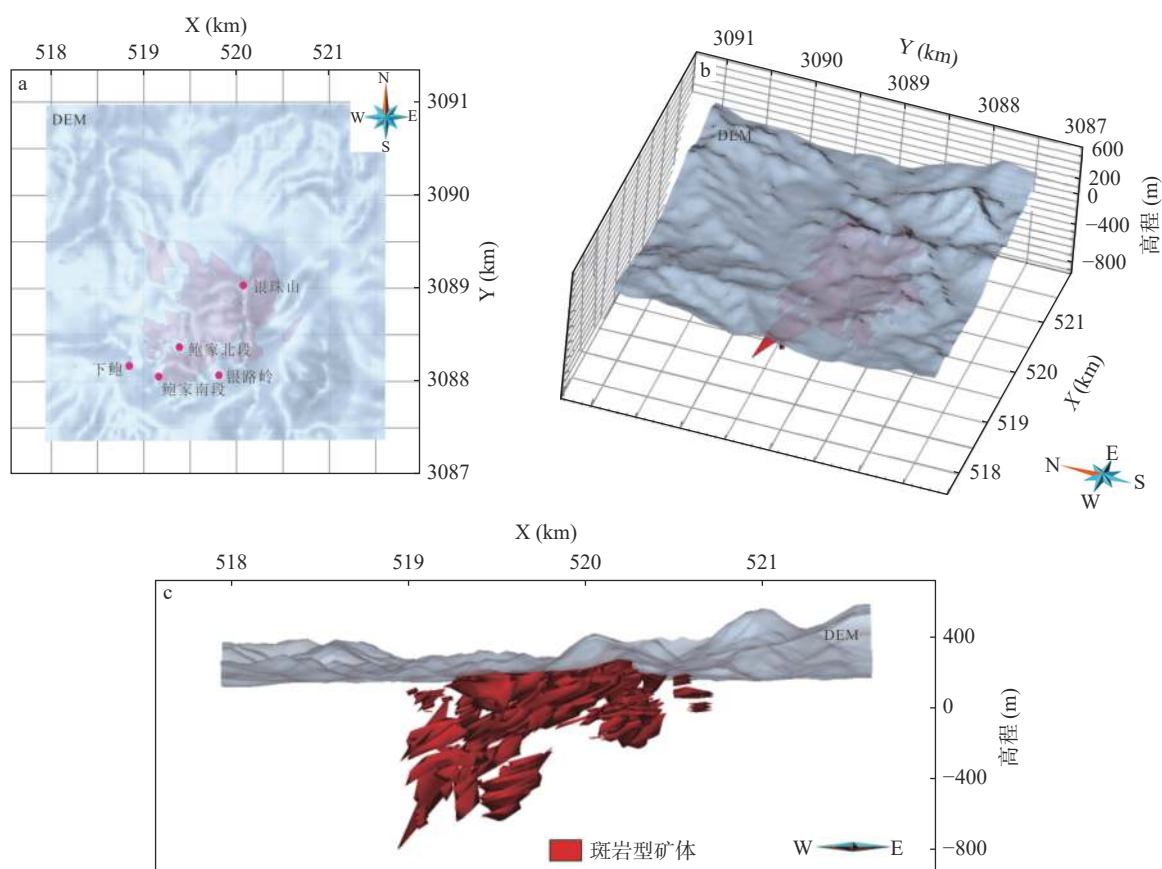


图6 斑岩型矿体空间分布图

Fig. 6 Spatial distribution map of porphyry ore body

a. 俯视图; b. 斜视图; c. 侧视图

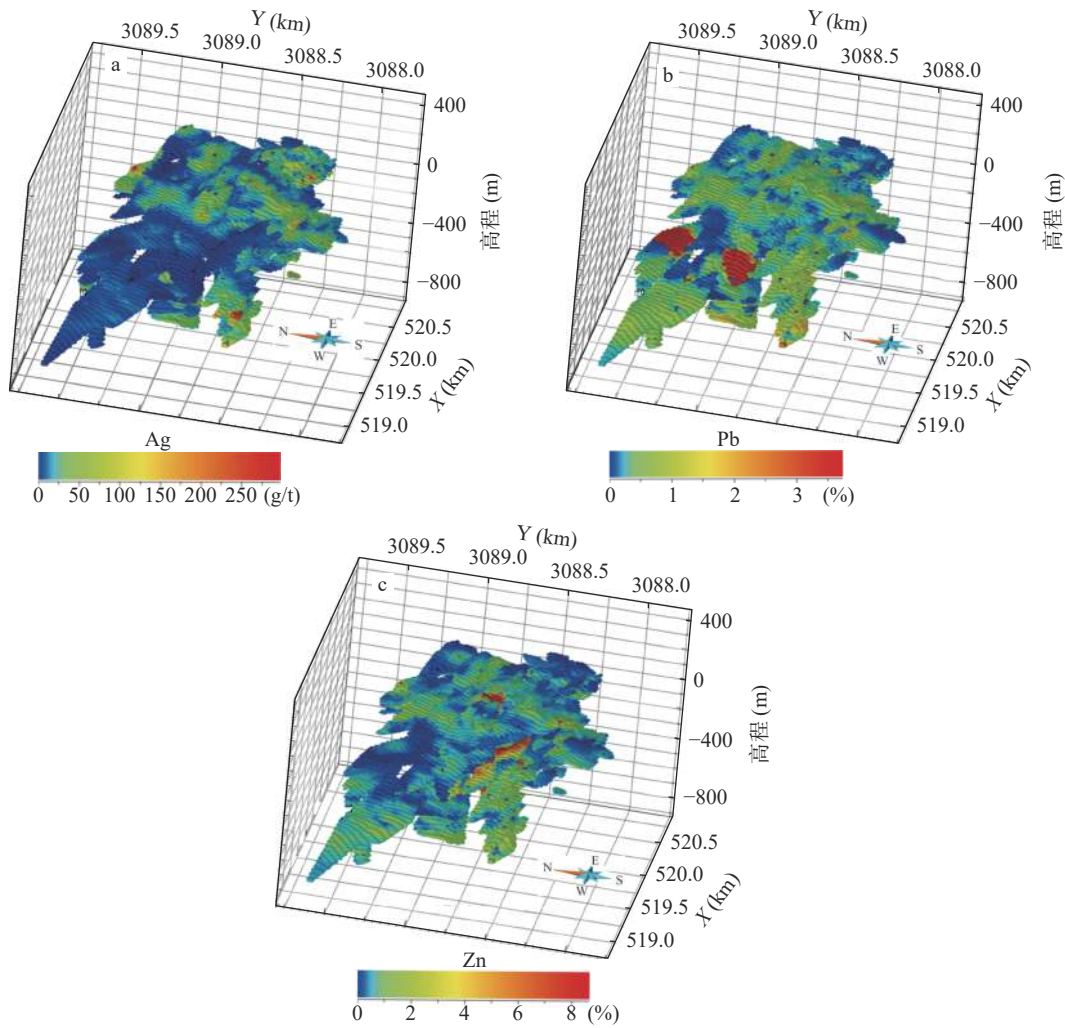


图7 矿体品位模型图

Fig. 7 Orebody grade model

a. 矿体中 Ag 品位; b. 矿体中 Pb 品位; c. 矿体中 Zn 品位

与各个地质体之间的关系,有助于更加准确地认识斑岩型矿体的分布规律以及控矿规律。

4.1 斑岩型矿体与花岗斑岩的空间关系

矿体产于燕山期花岗斑岩体内及接触带附近,分布相对较集中,总体呈北东向展布,矿体产出范围南北长约 1.74 ~ 1.94 km,东西宽约 1.31 ~ 1.86 km,面积约 2.28 ~ 3.61 km²。矿体纵向延伸 1 100 多米,最高处高程值为 360 m,目前勘测到的花岗斑岩最深部为-760 m,再向岩体深部,银铅锌矿化仍然存在,但是矿化范围缩小,强度减弱。

矿体主要产于花岗斑岩前缘带、主体带及接触带附近,部分产于岩体近根部带及外带火山岩中,多呈透镜状(罗淦川等, 2014),矿体形态相对较规则,矿体较为连续,厚度由中间向两边变薄,

产状与花岗斑岩一致(图 8、图 9)。

从花岗斑岩与矿体平面中段图(图 10)中可以看出,矿体形成于花岗斑岩突起周边形成的凹盆、凹槽和突起四周形成的多层次凹陷构造中。斑岩型矿体在花岗斑岩体近地表顶部分布较为均匀,但在由缓变陡部位,矿体规模变小,在近乎直立的岩墙中,矿体规模变大。矿体在空间上有一定的递变性,从浅部到深部、从矿田中部至东北和南西两侧,矿体形态由较规则变为较复杂,厚度由厚变薄,规模由大变小。

矿体中 Ag 在靠近地表以下的部位品位大致在 50 ~ 100 g/t 之间,高品位矿体主要分布在花岗斑岩体的中上部,部分在花岗斑岩体主体向下的部位,在花岗斑岩体右翼(自西向东看)变缓部位

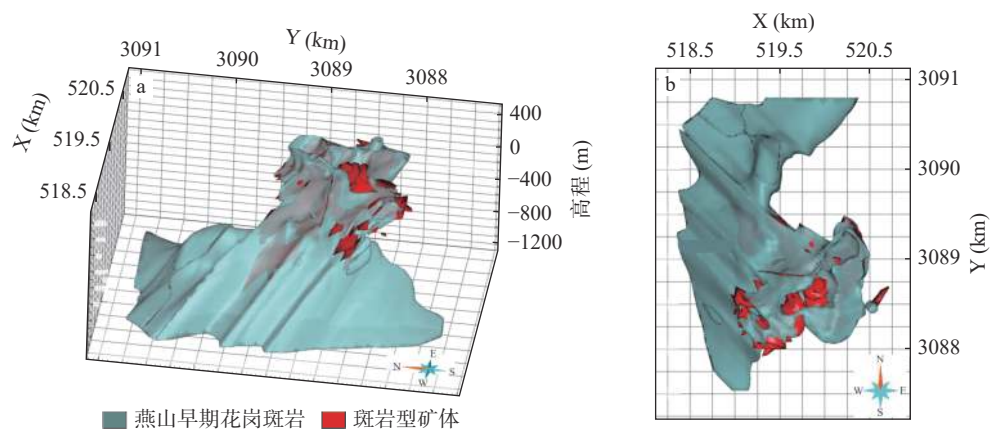


图 8 斑岩型矿体与花岗斑岩关系示意图

Fig. 8 Schematic diagram of relationship between porphyry ore body and granite porphyry

a. 斜视图; b. 俯视图

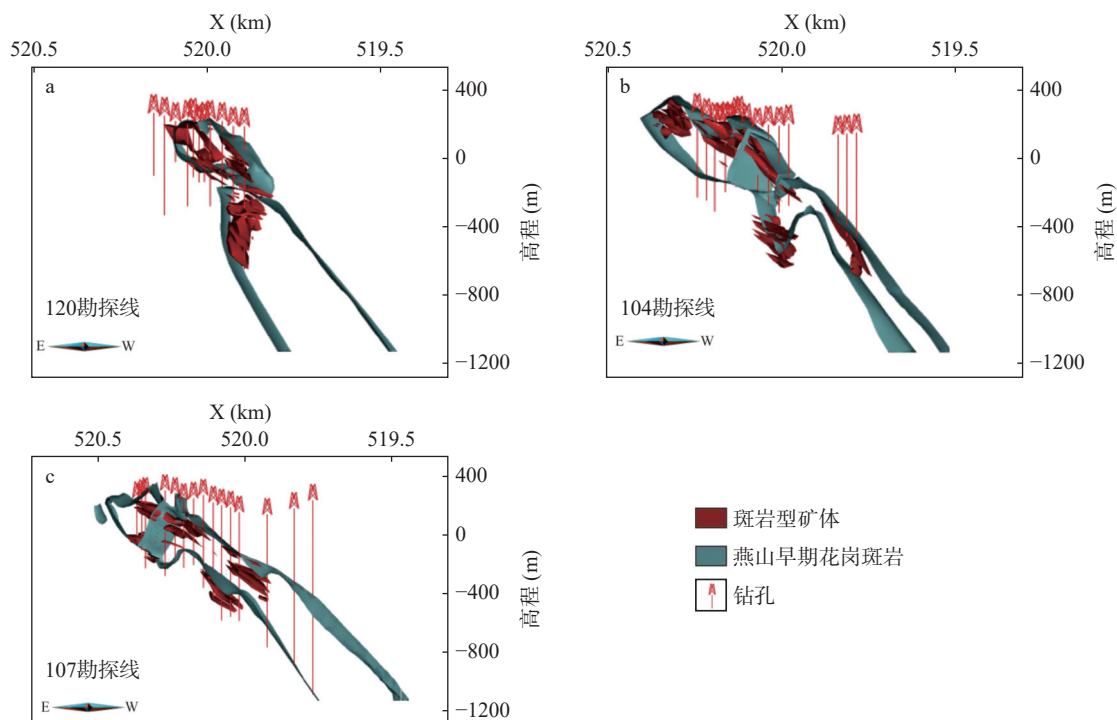


图 9 矿体与花岗斑岩勘探线剖面图

Fig. 9 Ore body and granite porphyry slice section diagram

Ag 品位大致在 100 ~ 250 g/t 之间。在花岗斑岩体的深部由缓变陡部位, Ag 品位相对较低, 低于 25 g/t(图 11a、11b)。Pb 靠近地表部位品位分布较均匀, 大致在 0.5% ~ 1.5% 之间, 在花岗斑岩中部变窄处有两处高品位值, 大于 3%, 在花岗斑岩深部由缓变陡处 Pb 品位在 0.4% ~ 1.4% 之间(图 11c、11d)。Zn 在地表以下部位品位分布也比较均匀, 在 0.2% ~ 2% 之间, 在花岗斑岩体右翼(自北向东看)变窄处有一处品位值较高, 约为 4% ~ 8%, 在

花岗斑岩深部由缓变陡处, 向深部延伸 Zn 品位逐渐变大, 在 0.1% ~ 2% 之间(图 11e、11f)。靠近花岗斑岩的矿体品位相对较高, 远离花岗斑岩体时矿体品位降低。高品位矿体主要分布在花岗斑岩体内和花岗斑岩周围接触带附近, 花岗斑岩体顶部 Ag、Pb、Zn 品位都比较高。

4.2 斑岩型矿体与断裂的空间关系

矿体均产于 F1 与 F2 之间, 大部分靠近 F2, 部分矿体接近地表, 大部分为隐伏矿体。矿体呈

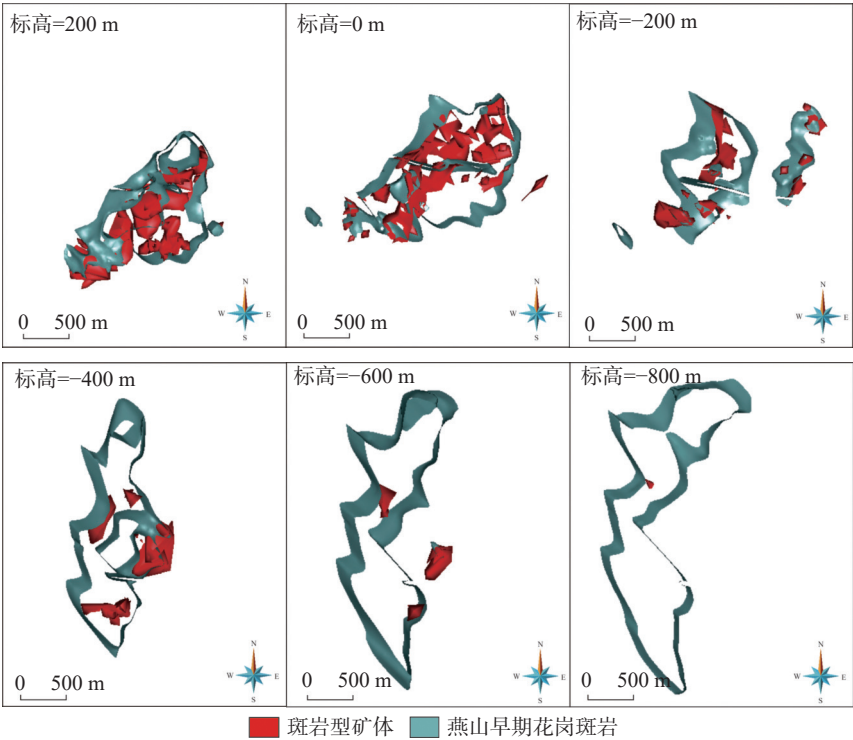


图 10 不同标高中段的花岗斑岩与矿体平面图

Fig. 10 Plans of granite porphyry and middle part of ore body with different elevations

透镜状,大致以北东向带状延展分布。矿体走向控制长 50 ~ 1100 m,倾向延深 12 ~ 813 m,平均延深 185 m,各矿体厚度为 1.77 ~ 12.12 m,平均厚度 5.23 m;厚度变化系数 0% ~ 152%,平均变化系数 86%,矿体厚度稳定程度多属稳定和较稳定类型,少数属不稳定类型;有尖灭再现、分枝复合现象(图 12)。

在研究区,F1 位于矿区南东部,是区域性湖石断裂的中段部分。该断裂上盘上升而下盘下降,可能使矿田内向东延伸的矿体受到湖石断裂带(F1)错断的影响并下降,从而隐伏于更深处。基于以上分析,考虑到湖石断裂带(F1)东侧下盘鹅湖岭组广泛分布,并偶见花岗斑岩脉。因此,可能存在潜在的花岗斑岩和层状银铅锌矿床,但需要进一步的研究和勘探加以确认。

Ag、Pb、Zn 高品位值的矿体集中分布在 F1 和 F2 之间,且靠近 F2。其中,Ag 在 F2 断裂面的顶部附近品位较高,沿 F2 断裂面自上而下 Ag 品位逐渐降低(图 13a、13b)。Pb 在靠近 F2 断裂的下盘且矿体向深部延伸的部位品位较高,部分品位大于 2.5%(图 13c、13d)。靠近 F2 断裂面顶部

Zn 品位较高。在矿体向深部延伸部位,Zn 品位较低,远离 F2 断裂面,品位逐渐增高(图 13e、13f)。F1 离矿体相对较远,对矿体品位的影响较小。

4.3 斑岩型矿体深部找矿建议

依据矿田矿体及相关地质体空间赋存位置关系、以及矿体品位的空间分布规律,分析认为斑岩型矿体产出于 F1 与 F2 断裂之间,且主要产于花岗斑岩及其接触带部位,因此花岗斑岩顶部膨胀部位及凹凸部位应是勘查的重点。对于品位较高的矿体,如有向深部延伸的趋势,其深部也是需要关注的重点区域。

5 结论

本文基于冷水坑银铅锌矿田的勘查成果资料,系统收集整理了研究区的钻孔、勘探线剖面图、地质地形图,构建了研究区三维地质模型,实现了断裂构造、岩体、地层以及斑岩型矿体等地质要素的三维空间可视化。

(1)冷水坑银铅锌矿田斑岩型矿体主要产在

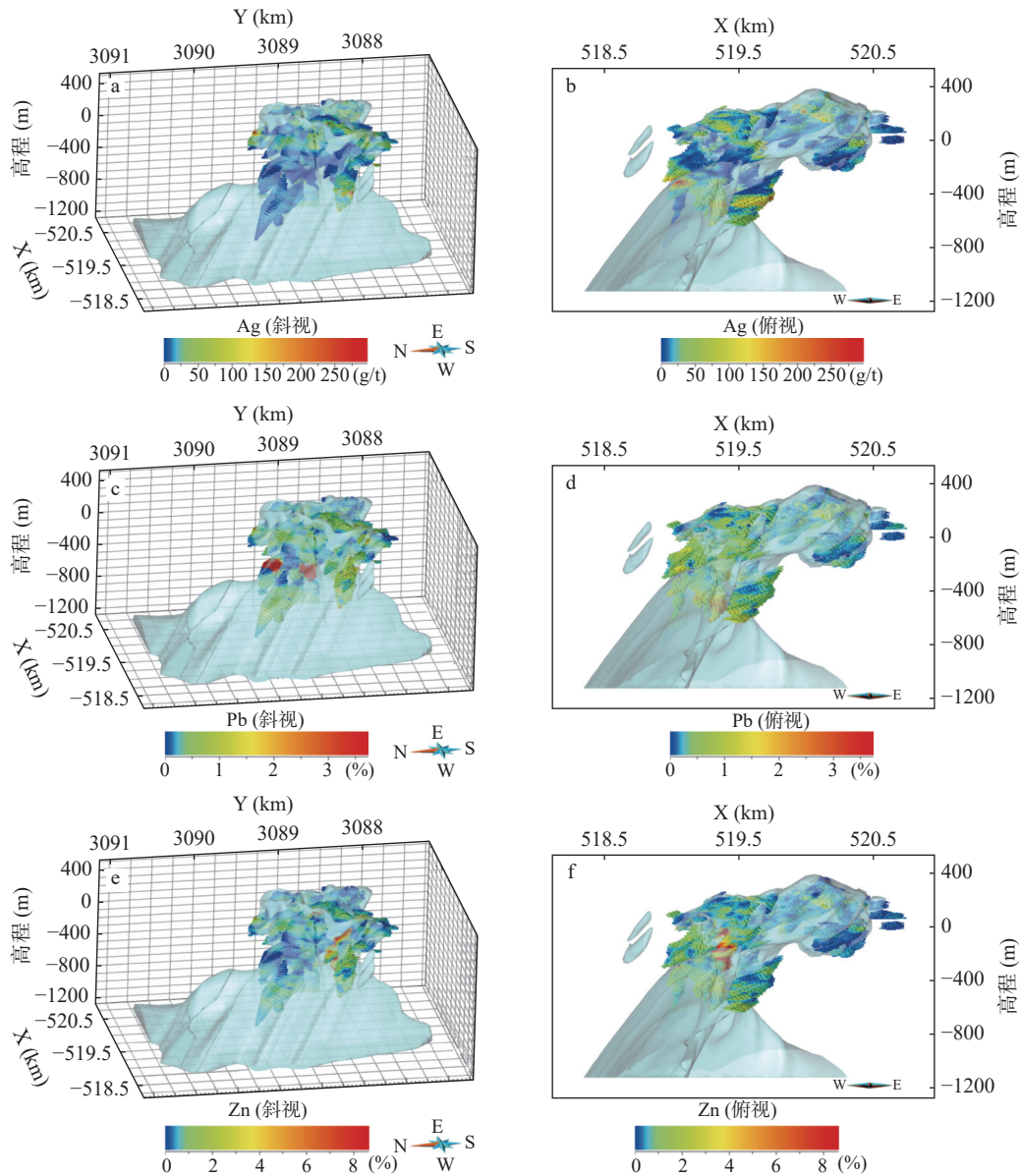


图 11 矿体品位与花岗斑岩体的关系

Fig. 11 The relationship between ore grade and porphyry body

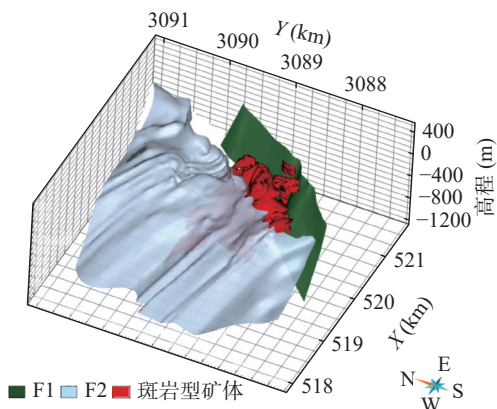


图 12 斑岩型矿体与断层的关系

Fig. 12 Relationship between porphyry ore body and fault

花岗斑岩的前缘带和主体带。

(2) 利用样品分析数据建立矿体属性三维模型(品位模型), 直观反映冷水坑银铅锌矿田矿体品位的空间变化情况, Ag 品位分布具有空间差异性, 高品位值主要分布在矿体的上部, Pb 和 Zn 的品位分布相对均一。

(3) 矿体、花岗斑岩以及断裂的三维模型表明矿体主要产于 F1 和 F2 之间, 且矿体和花岗斑岩产状明显受断裂控制, 从三维空间角度上揭示了逆冲推覆构造对冷水坑矿田的导岩-导矿作用。

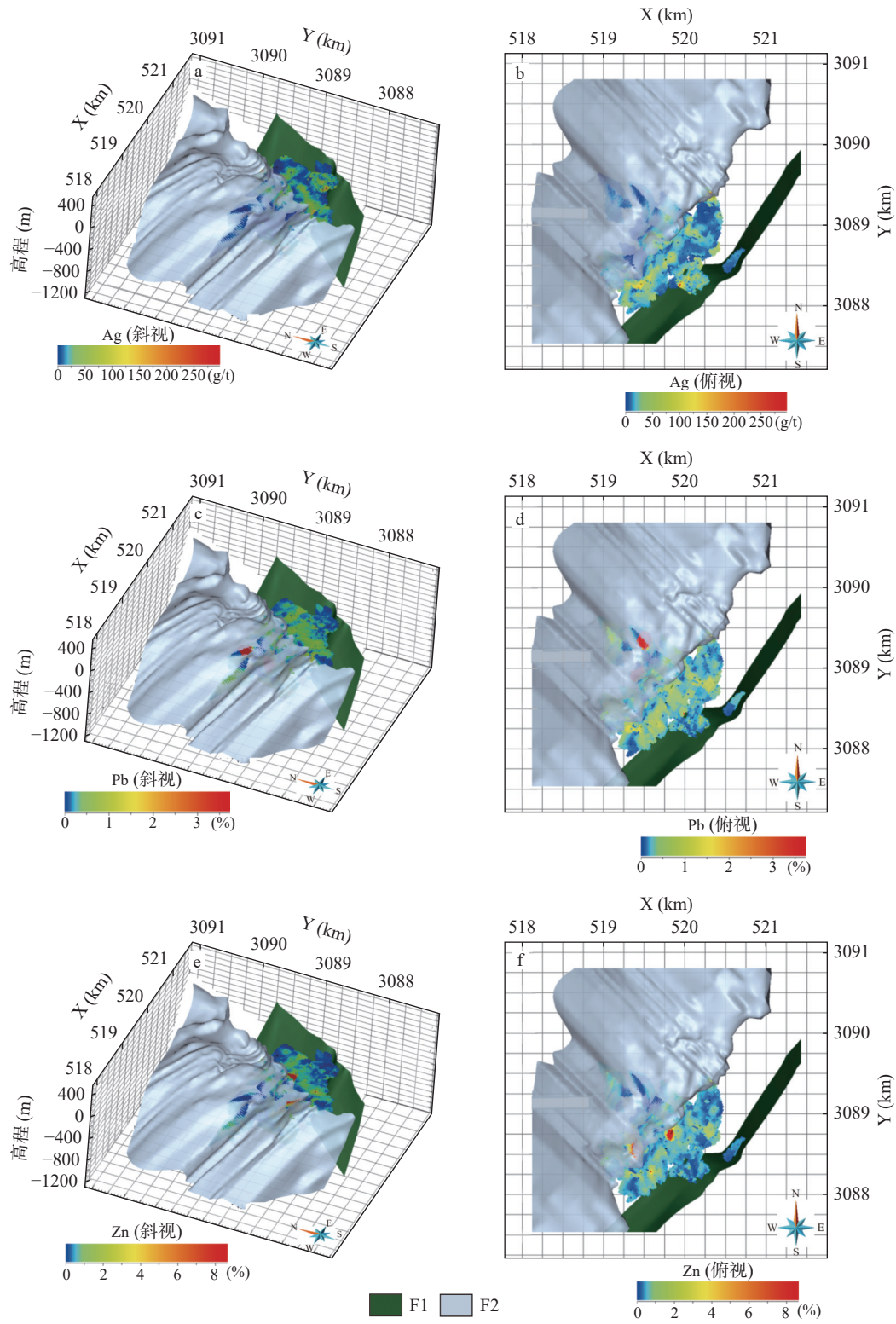


图 13 矿体品位模型与断裂关系图
Fig. 13 Orebody grade model and fracture relationship diagram

参考文献:

陈麒玉,刘 刚,何珍文,张夏林,吴冲龙.2020.面向地质大数据的结构—属性一体化三维地质建模技术现状与展望 [J]. 地质科技通报,39(4):51-58.

董 梅,慎乃齐,胡 辉,刘 飞.2008.基于 GOCAD 的三维地质模型构建方法 [J]. 桂林工学院学报,28(2):188-192.

何细荣,黄冬如,饶建锋.2010.江西贵溪冷水坑矿田下鲍银铅锌矿床地质特征及成因探讨 [J]. 中国西部科

- 技,9(25):1-3+28.
- 胡莹.2014.三维建模流程的优化和简化[J].湖南师范大学自然科学学报,37(2):90-94.
- 李铎.2020.山东省曲家金矿床GOCAD三维建模与成矿预测[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文.
- 李章林,吴冲龙,张夏林,翁正平,刘刚,张志庭,张军强.2020.地质科学大数据背景下的矿体动态建模方法探讨[J].地质科技通报,39(4):59-68.
- 李兆鼎,权恒,李之彤.2003.中国东部中生代火成岩及其深部过程[M].北京:地质出版社.
- 刘镛.2024.贵州烂泥沟金矿三维定量成矿预测研究[D].贵州大学博士学位论文.
- 刘同文,于广婷,张志进,宋冠涵.2018.胶东金矿三维地质建模技术研究[J].地矿测绘,34(2):1-3.
- 罗绿川,周耀湘,肖婷.2014.江西冷水坑矿田斑岩型银铅锌矿床成矿期次探讨[J].民营科技,(8):77.
- 吕鹏,张炜,刘国,王淑玲.2013.国外重要地质调查机构三维地质填图工作进展[J].国土资源情报,(3):13-18.
- 毛先成,唐艳华,赖健清,邹艳红,陈进,彭省临,邵拥军.2011.凤凰山矿田成矿地质体三维结构与控矿地质因素分析[J].地质学报,85(9):1507-1518.
- 明小泉,贺海龙.2018.冷水坑层状富铅锌银矿地质特征及成矿[J].四川地质学报,38(1):73-76.
- 孟祥金,徐文艺,杨竹森,侯增谦,李振清,于玉帅,肖茂章,何细荣,万浩章.2012.江西冷水坑矿田火山-岩浆活动时限:SHRIMP锆石U-Pb年龄证据[J].矿床地质,31(4):831-838.
- 潘诗辰,毛先成.2015.三维空间下的证据权建模方法与资源预测应用[J].地质学报,39(3):373-382.
- 钱迈平,张宗言,余明刚,骆学全,张雪辉,孙建东,段政.2015.江西贵溪冷水坑晚侏罗世铁锰白云岩地层层龄及沉积环境[J].地层学杂志,39(4):380-394.
- 冉祥金.2020.区域三维地质建模方法与建模系统研究[D].吉林大学博士学位论文.
- 田宜平,吴冲龙,翁正平,刘刚,张志庭,陈麒玉.2020.地质大数据可视化关键技术探讨[J].地质科技通报,39(4):29-36.
- 王功文,张智强,李瑞喜,李俊建,沙德铭,曾庆栋,庞振山,李大鹏,黄蕾蕾.2021.华北重点矿集区大数据三维/四维建模与深层次集成的资源预测评价[J].中国科学:地球科学,51(9):1594-1610.
- 王永庆,李山,杨真亮,刘彩杰,隋晓玲,刘向东.2022.胶东玲南—水旺庄巨型金矿床三维地质特征及断裂控矿规律[J].地质通报,41(6):977-985.
- 吴志春,郭福生,林子瑜,侯曼青,罗建群.2016.三维地质建模中的多源数据融合技术与方法[J].吉林大学学报(地球科学版),46(6):1895-1913.
- 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:地球科学),(1):54-60.
- 肖茂章,漆光明.2014.江西冷水坑铅锌银矿田成矿系统与成矿模式[J].地质与勘探,(2):311-320.
- 肖婷,陈琪,周耀湘,吴筱萍,贺玲.2019.江西省贵溪市东坑—麻地调查区地质特征及找矿前景[J].世界有色金属,(21):48+50.
- 徐庆胜,魏英文,黄安杰,吴才来,赵红松,狄永军.2014.江西上饶梨子坑火山盆地潜火山岩地球化学特征、锆石U-Pb年龄及其与铅锌矿成矿关系[J].地质论评,60(4):932-944.
- 叶思源,吴树仁,何淑军.2010.三维地质建模的数据融合与误差分析[J].桂林理工大学学报,30(3):350-355.
- 余心起,吴淦国,张达,狄永军,代堰锴,邱骏挺.2008.北武夷地区逆冲推覆构造的特征及其控矿作用[J].地质通报,(10):1667-1677.
- 咎芳,漆剑,杨启军.2016.江西冷水坑铅锌矿田断裂构造与成矿作用[J].云南地质,35(4):483-487.
- 张春茂.2013.江西省冷水坑银铅锌矿床矿石特征及成矿条件[D].成都理工大学硕士学位论文.
- 张伟,薛林福,彭冲,柴源,成伟.2013.基于剖面三维地质建模方法及在本溪地区应用[J].地质与资源,22(5):403-408.
- 张夏林,吴冲龙,周琦,翁正平,袁良军,何昆洋,张权莉,杨炳南.2020.基于勘查大数据和数据集市的锰矿床三维地质建模[J].地质科技通报,39(4):12-20.
- 张燕飞,朱杰勇,张威.2011.基于GOCAD的三维地质模型构建[J].河北工程大学学报:自然科学版,28(4):69-73.
- 张垚垚,王长明,徐贻赣,刘建光,万浩章,张达.2010.江西冷水坑银铅锌矿床综合找矿模型[J].金属矿山,(12):100-106.
- 赵志刚,万浩章,董光裕,何细荣.2008.江西贵溪冷水坑银铅锌矿田及外围构造—岩浆—成矿系统解析[J].中国西部科技,7(30):25-28.
- 朱振洲,雷晓东,武雄,徐能雄,姜兴宇.2020.基于三维地质建模的北京市昌平新城地热资源量评价[J].现代地质,34(1):207-213.
- 左力艳.2008.江西冷水坑斑岩型银铅锌矿床成矿作用研究[D].中国地质科学院博士学位论文.

曾 敏,赵信文,陈 松,王晓晗,皮鹏程,侯清芹,孙慧敏.2022.基于多源数据融合的广州南沙核心区三维工程地质建模 [J]. 华南地质,38(2):281-291.

曾祥辉,贺 玲,章敬若,何细荣,陈国华,饶建锋,杨明桂. 2022. 北武夷冷水坑银铅锌矿田构造控岩-控矿特征 [A]. //江西省地质学会,江西省自然资源厅,江西省地质局,东华理工大学. 2022. 江西地学新进展. 江西省地质矿产勘查开发局九一二大队; 江西省地质局.

Jin X, Wang G W, Tang P, Hu C M, Liu Y W, Zhang S K. 2020. 3D geological modelling and uncertainty analysis for 3D targeting in Shanggong gold deposit (China)[J]. Journal of Geochemical Exploration, 210: 106442.