

黑龙江省多宝山矿集区二道坎银铅锌矿床 三维地质建模及找矿预测

尹业长¹, 张子实^{2*}, 杨元江³, 郑博³, 李成禄³, 谭凯月³, 赵忠海^{1,4}

(1. 辽宁工程技术大学矿业学院; 2. 烟台黄金职业学院地质与测量工程系; 3. 黑龙江省自然资源调查院;
4. 中国地质调查局东北地质科技创新中心)

摘要:二道坎银铅锌矿床是近年来在多宝山矿集区新发现的一个大型独立银矿床,其是黑龙江省发现的首个独立银矿床,也为探讨区域成矿规律提供了重要的研究案例。针对二道坎银铅锌矿床缺乏系统研究且深部勘查程度较低的现状,通过系统收集并整理矿区地质、钻探、地球化学等多源数据资料,利用Micromine软件建立了矿区三维地质模型,在“三位一体”找矿预测理论的指导下,结合立方体预测与找矿信息量法开展了深部成矿预测,最终圈定了4处找矿靶区。研究结果表明,二道坎银铅锌矿区构造角砾岩,北东向和北西向断裂交会部位,Ag、Pb、Zn异常等可作为直接找矿标志,在矿床深部仍具有较大找矿潜力。

关键词:二道坎银铅锌矿床;三维地质建模;找矿预测;找矿信息量法;三位一体;立方体预测;多宝山矿集区

中图分类号:TD15 P632

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)10-0091-12

doi:10.11792/hj20251014

引言

随着全球矿产资源的持续开发,浅表矿和易识别矿的发现概率显著降低,深部矿和隐伏矿的勘查已成为当前矿产勘查领域的重点和难点^[1-2]。深部找矿不仅面临着地质信息获取困难、勘探成本高昂等实际挑战,还需突破传统二维勘查技术在空间信息缺失、信息综合利用能力弱及预测精度低等方面的局限性^[3]。在此背景下,三维地质建模及找矿预测技术应运而生。该技术凭借在地质要素可视化、多源数据整合及深部构造解析等方面的独特优势,逐渐成为矿产资源勘查领域不可或缺的重要技术手段^[4-7]。

三维地质建模及找矿预测技术自20世纪80年代兴起以来,经历了从理论探索到实践应用的快速发展。COX等^[8]通过系统分析大量地质数据,开创性地提出了基于多要素的矿床模型化表达方法,奠定了三维建模的理论基础。KELK等^[9]进一步发展了矿床三维可视化技术,将地质要素通过三维空间直观表达。CHRISTIAN^[10]系统阐述了三维地质建模的概念与方法,推动了该技术在矿产勘查领域的广泛应用。近年

来,随着计算机技术的飞速发展,三维地质建模与找矿预测技术不断革新,基于“三步式”矿产资源评价^[11]、致矿异常预测^[12],以及综合信息预测^[13]的理论与方法体系日趋完善。同时,证据权重法、找矿信息量法等经典统计预测方法也被引入三维地质建模中,显著提升了深部找矿预测的精度与效率^[14]。众多研究成果表明,三维地质建模技术在深部矿产资源勘查领域具有广阔的应用前景^[15-16]。

二道坎银铅锌矿床是近年来在多宝山矿集区新发现的一个大型独立银矿床,其银平均品位超过400 g/t^[17],在国内外均属罕见。该矿床是黑龙江省发现的首个独立银矿床,为区域成矿规律探讨提供了重要的研究案例。然而,目前针对二道坎银铅锌矿床的研究主要集中于矿床地质特征及成因分析^[18-19],缺乏系统的三维地质建模与深部找矿预测研究,难以满足深部找矿勘查的实际需求。

针对上述研究现状与深部勘查需求,本文以二道坎银铅锌矿床为研究对象,以“三位一体”找矿预测理论为指导,开展三维地质建模与深部找矿预测。具体研究内容包括:①基于钻孔、剖面、化探等多源数据,

收稿日期:2025-06-05; 修回日期:2025-07-23

基金项目:国家自然科学基金项目(42372108);黑龙江省自然科学基金项目(PL2024D021);辽宁省教育厅基本科研项目(LJ222410147089, LJ212410147031);辽宁省自然科学基金项目(2024-MS-207, 20240349);山东省自然科学基金项目(ZR2024QD274)

作者简介:尹业长(1992—),男,讲师,博士,研究方向为岩石学、矿物学、矿床学;E-mail:yinyechang@lntu.edu.cn

*通信作者:张子实(1998—),男,硕士,从事三维地质建模方面的研究工作;E-mail:zs125750@163.com

采用显示建模方法构建矿床三维地质模型,实现地质要素的可视化表达;②结合立方体预测和找矿信息量法,提取与成矿相关的地质要素,开展深部靶区预测。本研究可为二道坎银铅锌矿床的深部找矿勘查提供科学依据,同时为类似矿床的三维地质建模与深部找矿预测提供参考。

1 区域地质背景

中国东北地区位于中亚造山带东缘,夹持于西伯

利亚板块与华北克拉通之间,主要由额尔古纳地块、兴安地块、松嫩地块、佳木斯地块等微陆块拼贴而成(见图1-A)^[20-23]。该区域处于古亚洲洋构造域、蒙古—鄂霍茨克洋构造域与古太平洋构造域的交会部位,经历了由古生代至中生代多期次复杂的构造—岩浆活动,为成矿提供了良好的地质条件,形成了一系列斑岩型、矽卡岩型、浅成低温热液型等矿床^[24-28]。

多宝山矿集区(见图1-B)地处兴安地块和松嫩地块碰撞拼合带附近的大兴安岭弧盆系扎兰屯—多

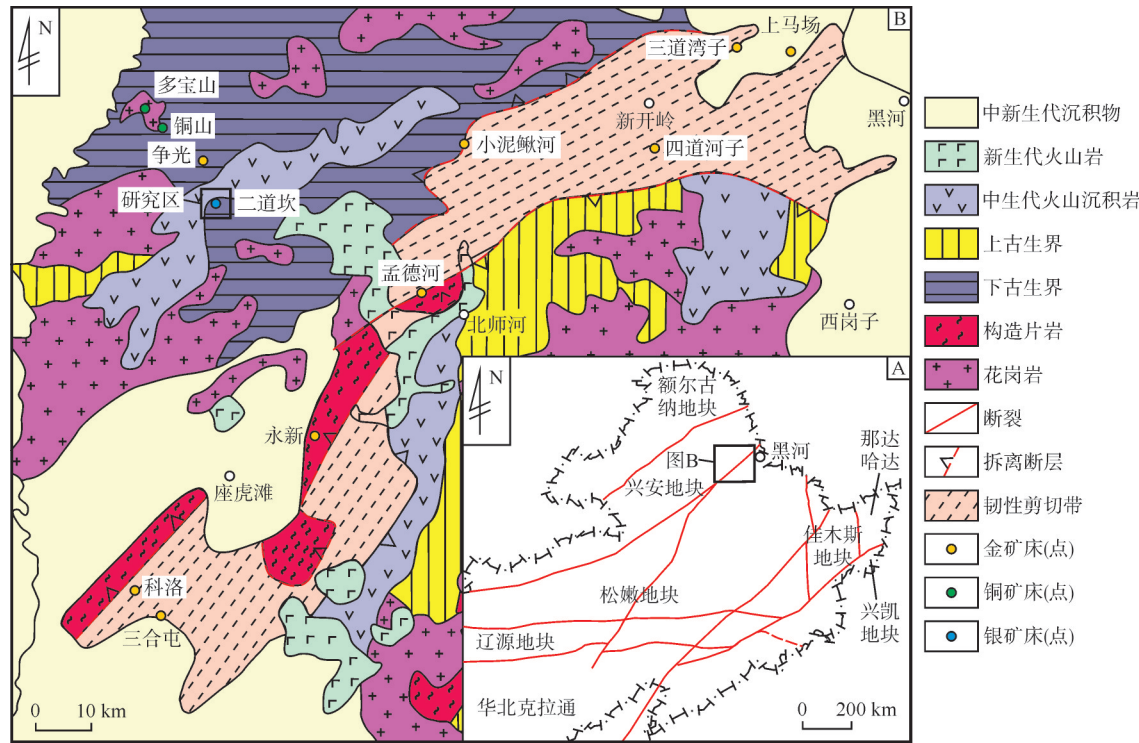


图1 中国东北地区大地构造分区图(A)及多宝山矿集区区域地质图(B)

Fig. 1 Geotectonic division map of Northeast China (A) and regional geological map of the Duobaoshan ore province (B)

宝山岛弧,区域内矿产以铜、钼、金、银等金属为主,并伴生铅、锌、铁等^[29-32]。区域内出露地层主要包括奥陶系铜山组、多宝山组和裸河组。其中,多宝山组是由中—酸性角砾岩、熔岩及凝灰岩组成的海相火山岩,夹少量沉积岩,与成矿关系密切,是多宝山矿集区主要的赋矿层位。此外,出露地层还有泥盆系泥鳅河组和腰南桑组,白垩系龙江组、光华组、九峰山组、甘河组、西岗子组及第四系玄武岩和河漫滩堆积层^[33]。多宝山矿集区内主要发育北西向、北东向、南北向和东西向断裂,构造多期叠加导致发育多处规模不等的韧性剪切变形带和少量褶皱,其中,北东向和北西向深大断裂是控制岩浆活动和成矿作用的主要构造。区域内侵入岩广泛发育,呈明显带状展布特征。加里东期侵入岩主要岩性包括花岗闪长岩、闪长岩及辉长岩脉等,仅在霍龙门及多宝山铜矿区零星分布;华力西期岩浆活动频繁,以中深成花岗岩类为主,主要包

括花岗质杂岩、碎裂正长花岗岩及碱长花岗岩等,整体呈北东向条带状展布,广泛出露于嫩江—黑河一带;燕山期侵入岩以中酸性—酸性岩类为主,主要岩性包括闪长岩、二长花岗岩、花岗闪长岩及正长花岗岩,总体呈北东向延伸,广泛出露于嫩江—黑河一带^[19]。

2 矿区地质特征

2.1 地层

二道坎银铅锌矿床位于多宝山矿集区东北部^[17],矿区内出露地层较为简单,以下泥盆统泥鳅河组(D₁nq)为主(见图2),矿体主要赋存于该组地层中,其主要岩性为浅海沉积相的碎屑沉积岩(泥岩、泥灰岩及碳质页岩)组合,发生了绢云母化、绿泥石化。矿区中部中生代地层主体岩性包括灰色流纹岩、英安岩及火山碎屑岩。矿区北部和南部中生代地层主要构

成为中性火山岩,岩性以安山岩和火山碎屑岩为主。第四系(Q)主要分布于山坡及沟谷地带。

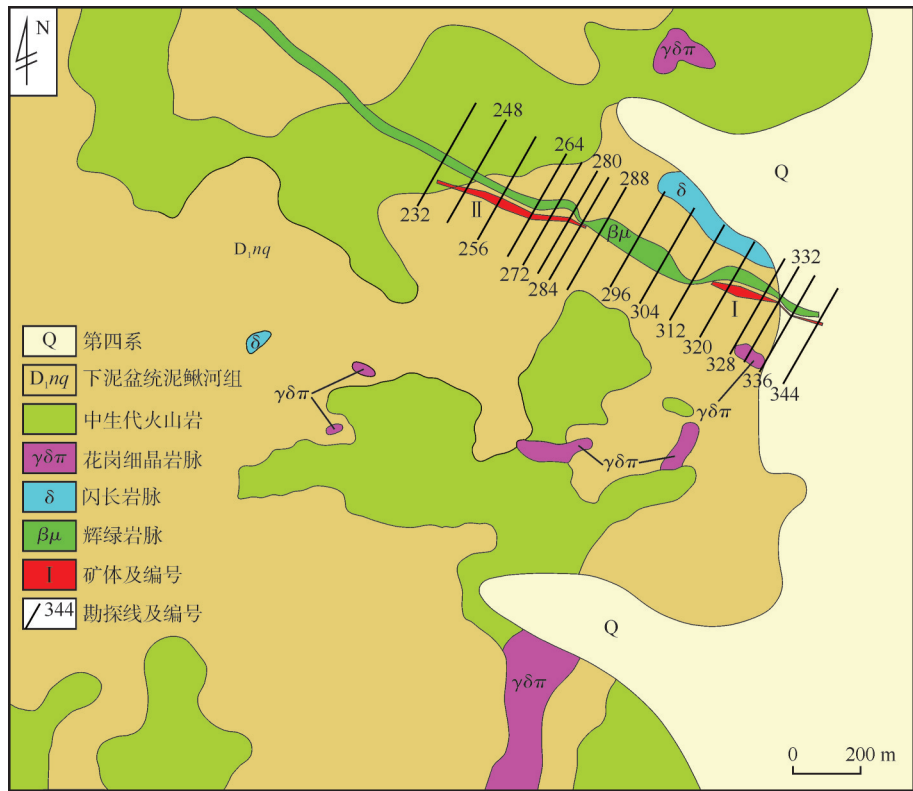


图2 二道坎银铅锌矿区地质简图

Fig. 2 Geological sketch map of the Erdaokan Ag-Pb-Zn Deposit

2.2 构造

矿区受北西向—南东向双向挤压应力作用,主要发育北北东向和北西西向两组断裂^[19]。其中,北北东向断裂为后期构造,控制了中生代火山岩的展布;北西西向断裂为主要容矿构造,形成了构造破碎带及辉绿岩墙。控矿构造主要分布于矿区中部 344 勘探线—320 勘探线、284 勘探线—264 勘探线,由两段构造角砾岩带组成,总长度约 600 m,分别控制 I、II 号矿体的产出位置。

2.3 岩浆岩

矿区内岩浆活动主要表现为晚三叠世潜火山岩及岩脉,沿泥鳅河组顺层侵入。这一期岩浆活动引发了多期次热液成矿作用,为矿区提供了重要的银、铅、锌成矿物质来源。矿区内发育的侵入岩以闪长岩、闪长玢岩、辉绿岩、安山岩和英安斑岩为主(见图3)^[33]。

3 矿床地质特征

3.1 矿体特征

二道坎银铅锌矿区现阶段发现的 2 条银铅锌多金属矿体(I、II 号)均赋存在下泥盆统泥鳅河组粉砂质泥岩、灰岩层位或与其辉绿岩脉的接触带部位,形态均表现为上宽下窄的脉状或岩墙状,宽度随深度增

加而逐渐减小,直至尖灭(见图4)。矿体空间分布明显受北西西向断裂控制,矿体主要赋存于构造破碎带内部。其中, I 号矿体位于矿区中东部,走向控制长度 356 m,倾向最大延伸 151 m,赋存标高 249~403 m,呈上宽下窄的脉状;矿体平均真厚度 6.24 m,走向 288°,倾向 198°,倾角 82°~88°,近直立;银品位 42~10 940 g/t,平均值 558 g/t^[19]。矿体中伴生铅、锌、锰等有益组分。

II 号矿体位于 I 号矿体北西方向 500 m 处,产于北西西向构造带中,矿体走向延伸 462 m,倾向最大延伸 225 m,标高 180~405 m,同样呈上宽下窄的脉状;矿体平均真厚度 14.10 m,走向 284°,倾向 12°,倾角 87°;银品位 42~6 704 g/t,平均值 506 g/t。伴生组分中,铅平均品位 0.70%,最高值 9.14%;锌平均品位 0.41%,最高值 6.35%;锰平均品位 7.65%,最高值 25.41%。

3.2 矿石特征

二道坎银铅锌矿床矿石类型以构造角砾岩型为主,石英细脉型次之(见图5)。矿石主要由角砾(75%~85%)、岩块(10%)及胶结物(15%)组成。其中,角砾成分复杂,包括泥岩、灰岩、次火山岩及少量碳酸盐岩,多呈棱角状至次棱角状,粒径(0.2~25 cm)

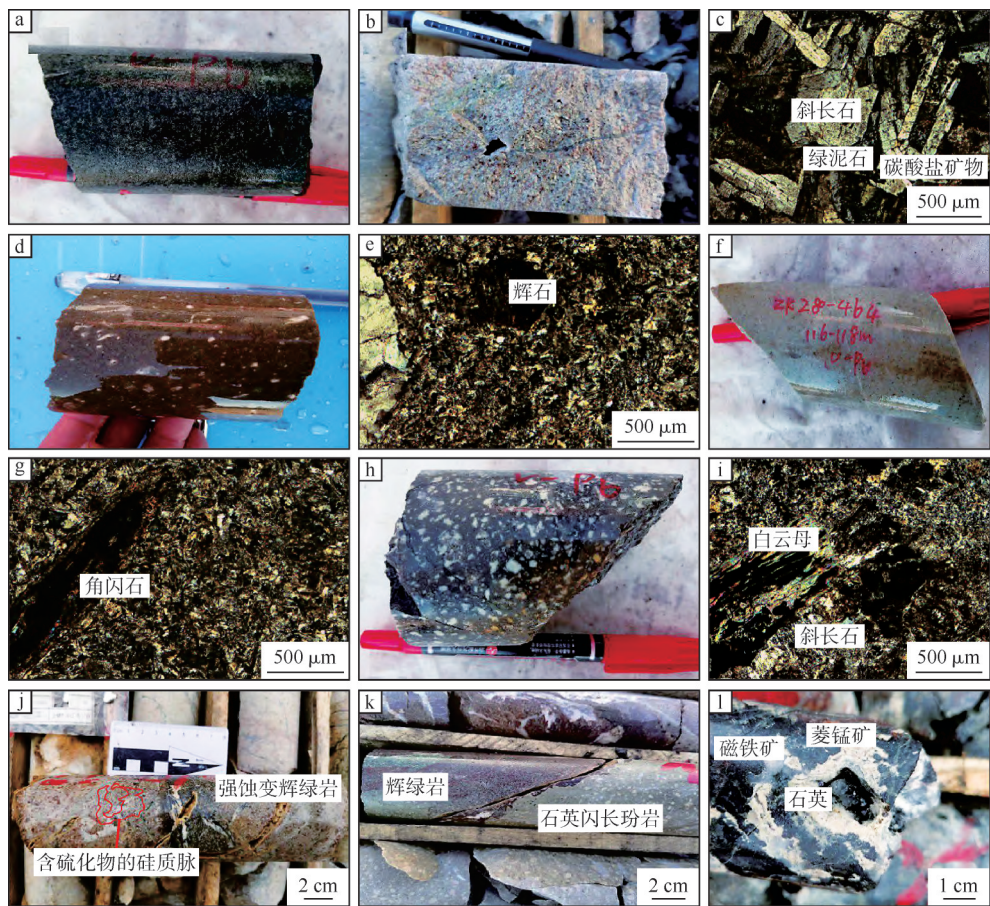


图3 二道坎银铅锌矿床岩浆岩、矿石手标本及显微照片

Fig. 3 Magmatic rocks, ore hand specimens, and photomicrographs of the Erdaokan Ag-Pb-Zn Deposit

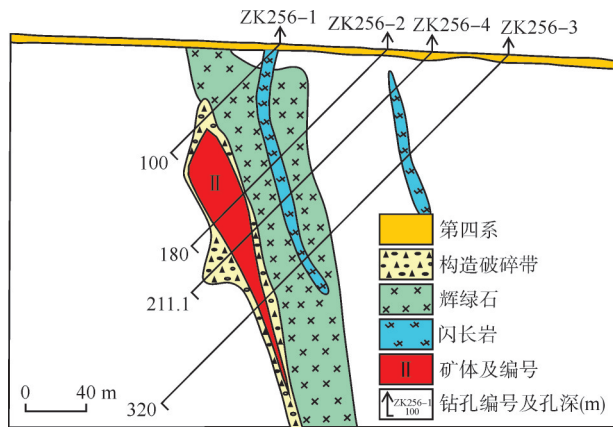
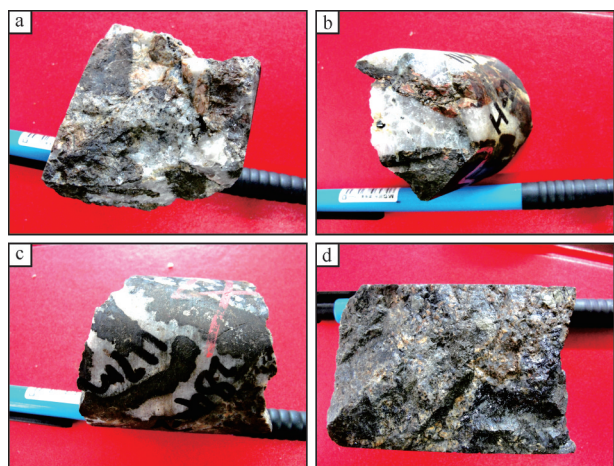


图4 二道坎银铅锌矿区256勘探线剖面图

Fig. 4 Section along Exploration Line 256 in the Erdaokan Ag-Pb-Zn District

变化范围较大。胶结物主要为硅质,局部可见碳酸盐矿物碎屑与铁质氧化物混合产出。矿石结构为他形晶粒状结构、自形晶一半自形结构、交代溶蚀结构、胶体结构等,矿石构造主要为角砾状构造、条带状构造、稀疏浸染状构造、细脉状构造和致密块状构造等。

二道坎银铅锌矿床矿石矿物组成复杂,金属矿物主要包括黄铁矿、方铅矿、闪锌矿及磁铁矿,并含有少量黄铜矿、黝铜矿、毒砂等;贵金属矿物主要包括辉银



a—含沥青、方铅矿化、磁铁矿矿石 b—一块状矿石中硅质胶结角砾
c—一条带状磁铁矿化、硅化矿石 d—一方铅矿化、闪锌矿化、碳酸盐化矿石

图5 二道坎银铅锌矿床典型矿石

Fig. 5 Typical ores of the Erdaokan Ag-Pb-Zn Deposit

矿、深红银矿、脆银矿和自然银。其中,深红银矿多呈单矿物产于碳酸盐或裂隙中,辉银矿则主要以乳滴状或不规则包裹体形式赋存于方铅矿内。脉石矿物主要包括石英、方解石、铁白云石、菱铁矿、天然沥青等,并含少量云母、长石、辉石、橄榄石等。矿物生成顺序研究表明,磁铁矿形成最早,呈脉状或块状分布于石英及硅质胶结物中,其后形成的黄铁矿、方铅矿、闪锌

矿及含银矿物常以石英脉形式穿切早期磁铁矿,显示多期次矿化叠加特征。值得注意的是,沥青作为特殊脉石矿物,常与金属硫化物共生,可能对银富集起到了一定作用。

3.3 围岩蚀变与矿化阶段

二道坎银铅锌矿床发育有多种类型围岩蚀变,并呈现出显著的分带现象。矿区内已识别出的蚀变类型包括硅化、碳酸盐化、绢英岩化、绿泥石化等。其中,硅化、黄铁矿化和碳酸盐化不仅分布广泛,而且与银矿化的关系尤为密切。根据蚀变矿物组合及其发

育强度的空间变化规律,自矿体核部向外围可依次划分出3个蚀变带,矿体近旁为强黄铁绢英岩化叠加碳酸盐化的内带,向外过渡为弱黄铁绢英岩化与碳酸盐化并存的中带,最外侧则为以碳酸盐化为主、伴有绿泥石化的外带。

基于野外地质调查、矿物共生组合、矿石组构的详细研究,将二道坎银铅锌矿床按照从早到晚划分为3个成矿阶段:石英—硫化物阶段(Ⅰ)、石英—沥青—含银多金属硫化物阶段(Ⅱ)和碳酸盐阶段(Ⅲ)^[34]。各成矿阶段及其矿物组合见图6。

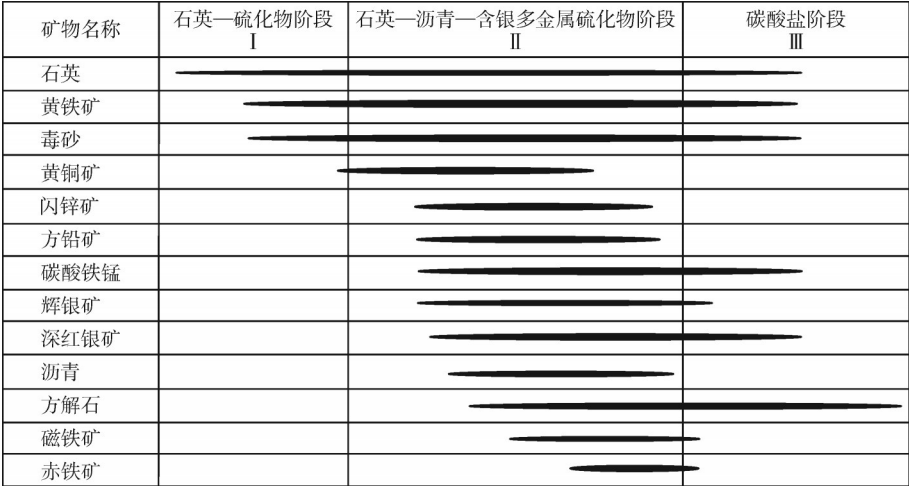


图6 二道坎银铅锌矿床矿物生成顺序

Fig. 6 Paragenetic sequence of the Erdaokan Ag-Pb-Zn Deposit

4 “三位一体”找矿预测地质模型

基于对全国230个危机矿山接替资源勘查项目和129个典型矿床的深入研究,叶天竺等^[35]整合了海量的地球化学数据、国内外最新矿床学研究成果,以及重点类型矿床的勘查发现,构建了一套以“成矿地质体—成矿构造及成矿结构面—成矿作用特征及标志”为核心的“三位一体”找矿预测理论及“三位一体”

找矿预测地质模型。通过厘清三者之间的时空耦合关系,可对勘查区潜在资源进行有效预测^[36]。

本研究综合已有成果,系统分析了二道坎银铅锌矿床的成矿地质体、成矿构造及成矿结构面、成矿作用特征及标志。针对该矿床的主要矿化期,结合区域地质概况、岩体特征、蚀变类型和矿体展布规律等信息,提炼出关键找矿要素,最终构建了二道坎银铅锌矿床“三位一体”找矿预测地质模型(见表1)。

表1 二道坎银铅锌矿床“三位一体”找矿预测地质模型

Table 1 “Trinity” metallogenic prediction geological model of the Erdaokan Ag-Pb-Zn Deposit

要素	主要标志	特征描述
成矿地质体	赋矿围岩	构造角砾岩为赋矿围岩,可作为直接找矿标志
	赋矿地层	矿体赋存于下泥盆统泥鳅河组沉积岩中,可作为间接找矿标志
成矿构造及成矿结构面	深大断裂	北东向和北西向断裂交会部位是重要的找矿标志,北西向断裂是重要容矿构造,可作为直接找矿标志
	接触带控矿构造	矿体主要赋存于构造角砾岩中,原岩为下泥盆统泥鳅河组,可作为间接找矿标志
成矿作用特征及标志	矿体特征	主要为脉状、细脉状
	蚀变类型	矿化蚀变类型主要包括硅化、黄铁矿化、碳酸盐化、绢英岩化、绿泥石化等,可作为间接找矿标志
	矿石矿物	金属矿物主要包括黄铁矿、方铅矿、闪锌矿及磁铁矿等;贵金属矿物主要包括辉银矿、深红银矿、脆银矿和自然银等
	脉石矿物	脉石矿物主要包括石英、方解石、菱铁矿、天然沥青等
	地质特征	英安岩脉、闪长岩脉、闪长玢岩脉、辉绿岩脉为成矿有利岩体,可作为间接找矿标志
	地球化学特征	Ag、Pb、Zn异常可作为直接找矿标志

5 三维地质建模

5.1 三维地质体模型构建

在经历了多阶段、不同程度的火山-岩浆侵入作用后,矿区岩层展现出复杂的形态特征、多变的产状样式及多样化的构造特征。本研究基于勘探线剖面图、地质图等基础资料,通过系统整合与分析,全面揭示了矿区各类地质体的形态特征和空间分布规律,为地层、岩体等关键地质信息的提取提供了可靠依据。在完成空间配准的基础上,系统整理并提取剖面图中

的地质信息,采用拓扑分析方法对剖面地质信息进行系统解译与提取,重点对地层界线、岩体界线、构造界线等地质要素进行高精度矢量化处理,最终建立与成矿有关的六大岩体模型(闪长岩、辉绿岩、安山岩、英安斑岩、英安岩、构造角砾岩,见图7-a~f)及泥鳅河组2套沉积岩模型(凝灰砂岩、粉砂质泥岩,见图7-g、h)。在地质单元三维模型的基础上,通过布尔运算实现地质体间的拓扑关系重构,最终构建出无冲突的综合地质三维模型(见图8)。

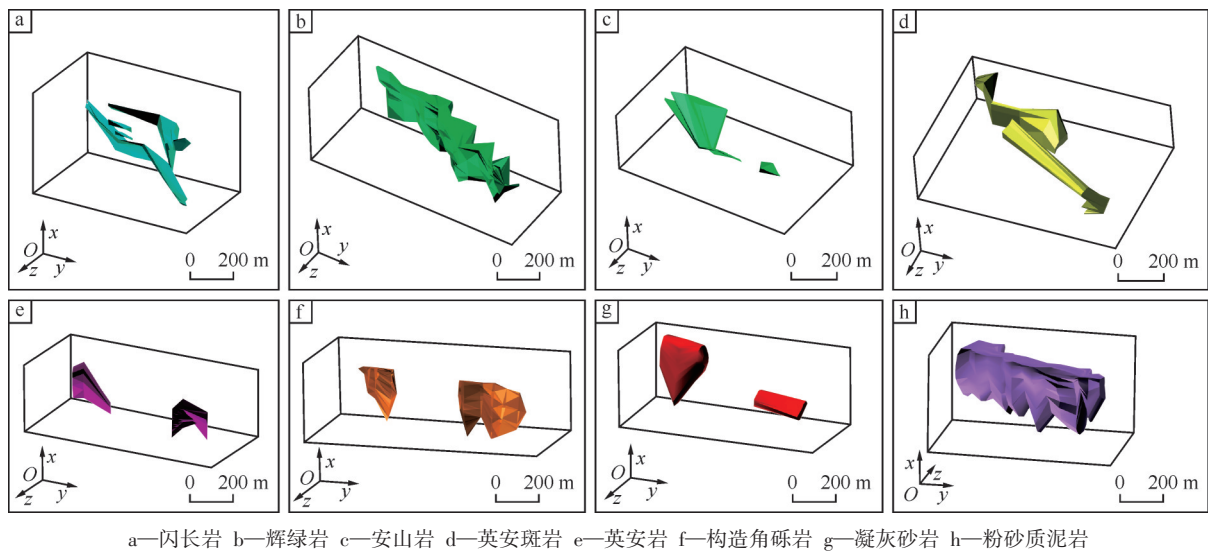


图7 二道坎银铅锌矿床地质单元三维模型

Fig. 7 3D model of geological units in the Erdaokan Ag-Pb-Zn Deposit

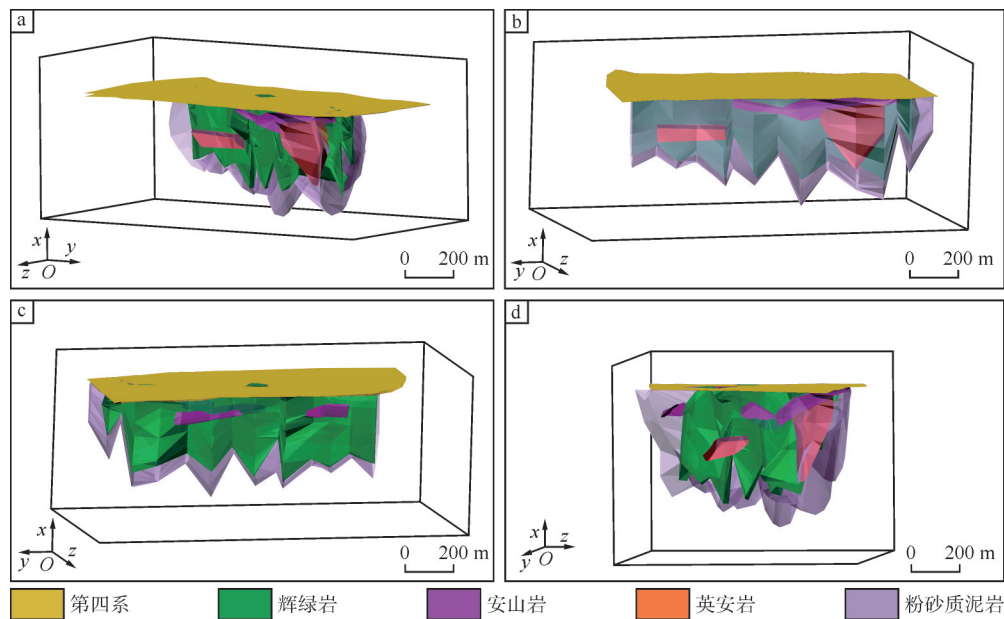


图8 二道坎银铅锌矿床综合地质三维模型

Fig. 8 Integrated 3D geological model of the Erdaokan Ag-Pb-Zn Deposit

5.2 三维矿体模型构建

三维矿体模型的构建是矿区三维地质建模的核心环节,其不仅能够直观展现矿体在三维空间中的展

布形态及其与围岩的接触关系,还可为后续资源量估算和成矿预测提供可靠的几何约束。本研究采用显示建模法构建二道坎银铅锌矿床矿体模型(见图9)。

首先,基于矿区地质数据,结合钻孔岩芯编录数据,分析矿体在垂向上的厚度变化及品位分布特征;其次,在三维建模 Micromine 软件中配准三维空间中的勘探线剖面图,通过对剖面图的系统解译,厘定矿体界线,提取各剖面的矿体边界矢量数据,确保剖面间矿体空间拓扑关系的准确性;最后,利用 Micromine 软件中的线框工具,将相邻剖面线之间的矿体边界线以三角网形式进行拓扑连接。在矿体建模过程中,边界线的厘定应以品位数据为基础,并符合工业指标要求。对于开放端部的矿体线框,需进行外推封闭处理。外推原则:无限外推时,宜平推勘探线间距的 1/4;有限外推则根据相邻勘探线情况区别对待,单线见矿时,按勘探线间距的 1/4 尖推;双线见矿但其中一线为边界品位时,按勘探线间距的 1/2 尖推。外推封闭方向应与矿体产状和延伸方向保持一致。最后,利用软件对连接线框进行拓扑校验,排除无效连接、未封闭面及无效交叉点等问题,以确保生成正确的矿体实体模型。

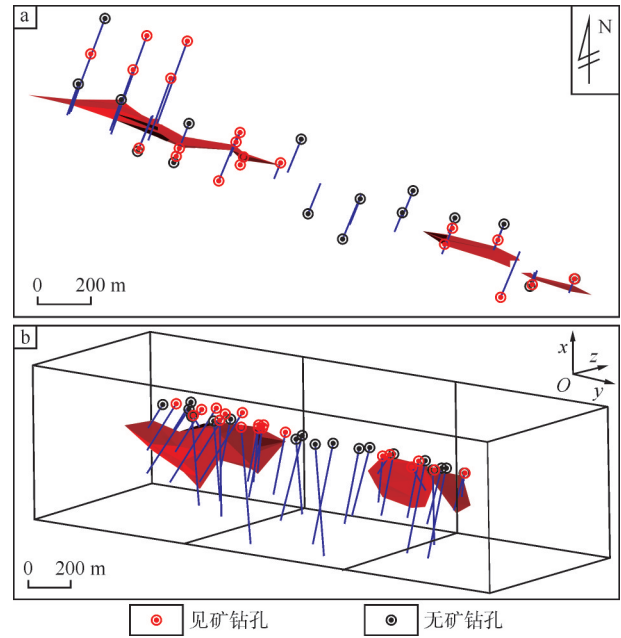


图9 二道坎银铅锌矿床矿体模型平面展示图(a)及三维展示图(b)

Fig. 9 Plan view (a) and 3D view (b) of the orebody model of the Erdaokan Ag-Pb-Zn Deposit

5.3 三维构造破碎带模型构建

矿区内构造发育明显,控矿构造为位于矿区中部的北西向构造破碎带。本次构造破碎带模型的建立以钻孔数据为基础,通过钻孔揭示出的构造破碎带位置,结合矿区地质资料,精确界定构造破碎带的空间展布范围,进而圈定构造破碎带的轮廓线。采用与构建岩体三维模型相同的方法,连接构造破碎带轮廓线,得到相应的构造破碎带三维模型(见图10)。结

合钻探工程资料,认为构造破碎带呈现出向深部延伸的趋势。

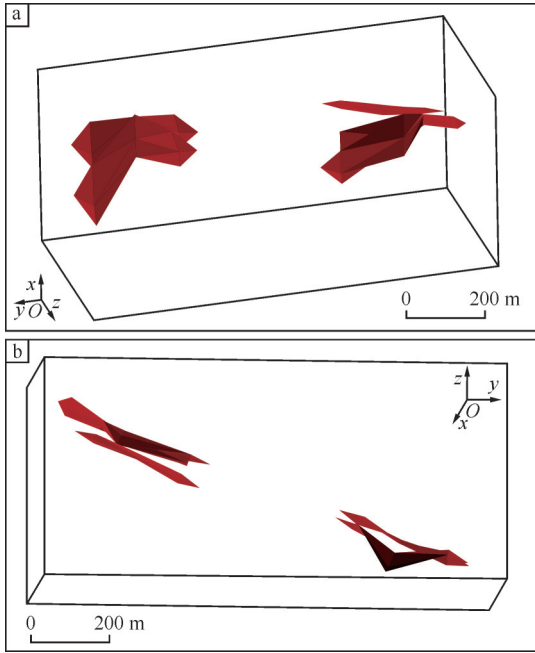
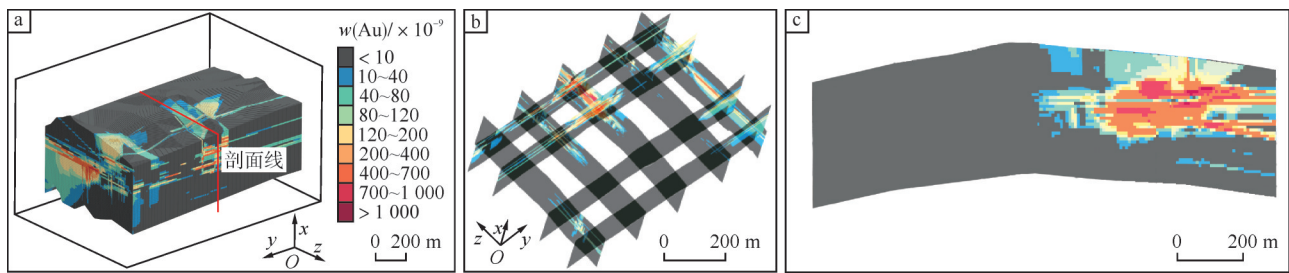


图10 二道坎银铅锌矿床构造破碎带三维模型
Fig. 10 3D model of tectonic fault zones in the Erdaokan Ag-Pb-Zn Deposit

5.4 三维品位模型构建

三维地质模型不仅能够直观展示不同地质单元的空间几何特征,清晰地展示其与矿体之间的相互关系,同时还可初步反映矿体的产出层位及控矿构造特征。然而,当需要进行量化分析时,则需引入块体模型。块体模型是在实体模型框架内建立的离散化三维网格系统,通过将地质体模型划分为多个规则的立方体单元,并运用空间插值技术为每个单元赋予坐标、品位等属性参数,从而实现地质体的数字化。该模型不仅能整合矿区多源地质信息,还可精确计算矿体品位分布,为资源量估算和成矿预测建立数据基础。

块体模型的构建,必须以矿区三维地质模型作为边界约束条件,以此界定模型的整体空间范围。确定单元块大小时,需要统筹考虑多重因素,包括最小可采单元规格、勘探工程控制程度及模型整体规模等。单元块尺寸的划分范围一般控制在勘探线网度的 1/5 ~ 1/3。本文块体模型的构建,结合地质体形态、产状和规模大小等因素,最终确定单元块的尺寸为 7 m×7 m×7 m,利用建模软件在矿区共计生成了 760 037 个单元块,其中,矿体块体 5 646 块。基于样品品位的空间自相关性,利用距离幂次反比法对块体模型的空值小立方体进行品位赋值,从而建立三维品位模型(见图11)。



a—矿体品位模型 b—三维品位-剖面模型组合图 c—品位模型剖面

图 11 二道坎银铅锌矿床三维品位模型

Fig. 11 3D grade model of the Erdaokan Ag-Pb-Zn Deposit

6 成矿预测

6.1 成矿有利信息提取

6.1.1 地质体信息提取

矿区主要岩石类型包括石英闪长玢岩、石英闪长岩、闪长岩、英安岩和辉绿岩。前期勘探成果与三维地质模型分析表明,辉绿岩与矿体之间存在显著的空间伴生关系,而闪长岩、英安岩等岩脉则与矿体呈平行产出,这些现象共同揭示了岩脉与矿体之间密切的成因联系。

在成矿预测过程中,将石英闪长玢岩、石英闪长岩、闪长岩统一归类为闪长岩类。闪长岩类、英安岩及辉绿岩为成矿有利岩体。以辉绿岩为代表,因其作为间接找矿标志与矿体空间距离较远,本研究采用缓冲区分析方法,分别建立了 20 m、50 m、80 m 不同半径的缓冲区(见图 12),以确定辉绿岩缓冲区对矿体的最佳影响范围。

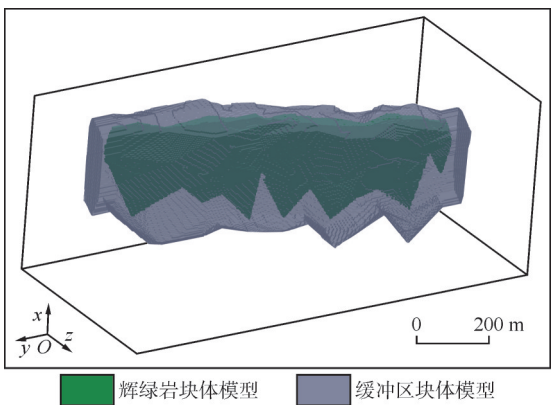


图 12 辉绿岩缓冲区块体模型

Fig. 12 Block model of diabase buffer zone

辉绿岩最佳缓冲半径统计结果见图 13。由图 13 可知:当缓冲半径为 50 m 时,辉绿岩缓冲区内含银矿体 5 264 块,占矿体总数量的 93.23 %。基于此,对闪长岩与英安岩同样建立了 50 m 缓冲区(见图 14)来作为找矿预测的重要指示要素。

基于前期地质勘探成果,结合三维模型分析,从

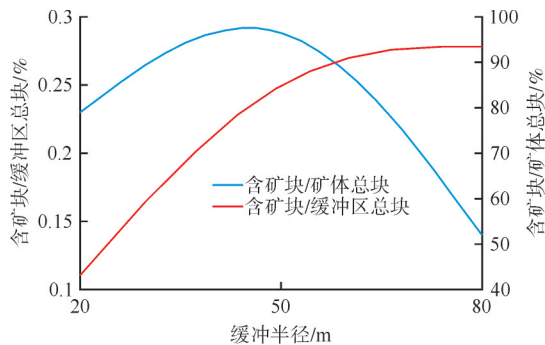


图 13 辉绿岩最佳缓冲半径统计结果

Fig. 13 Statistical results of the optimal buffer radius of diabase

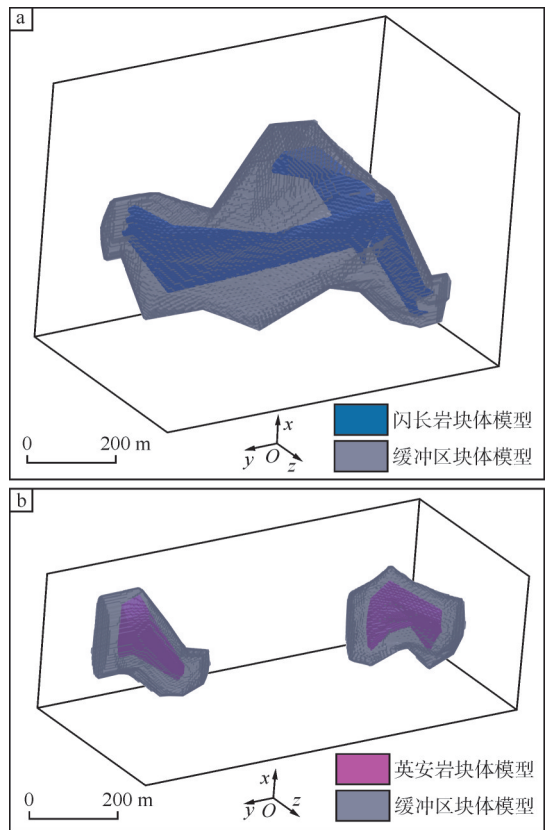


图 14 闪长岩缓冲区块体模型(a)及英安岩缓冲区块体模型(b)

Fig. 14 Block model of diorite buffer zone (a) and block model of dacite buffer zone (b)

平面展布特征来看,构造角砾岩与矿体的走向、延伸范围均表现出高度相似,通过三维可视化分析,二者的几何形态、空间展布及产状特征等方面均表现出良

好的对应关系,进一步证实矿体赋存于构造角砾岩中。利用立方体模型统计方法,构造角砾岩作为赋矿围岩共 10 327 块,其中,含银矿体 4 115 块,含矿比例高达 72.883 %,表明构造角砾岩作为赋矿围岩,可以作为直接地质找矿标志,因此未对构造角砾岩进行缓冲区分析。

6.1.2 构造信息提取

断裂是岩浆热液运移的关键通道,对矿床的形成具有重要控制作用。北西西向断裂为主要容矿构造,北北东向构造则对前者进行了改造,推测与热液成矿过程相关。通过建立不同半径的构造破碎带缓冲区(见图 15),以确定构造破碎带对矿体的最佳影响范围。

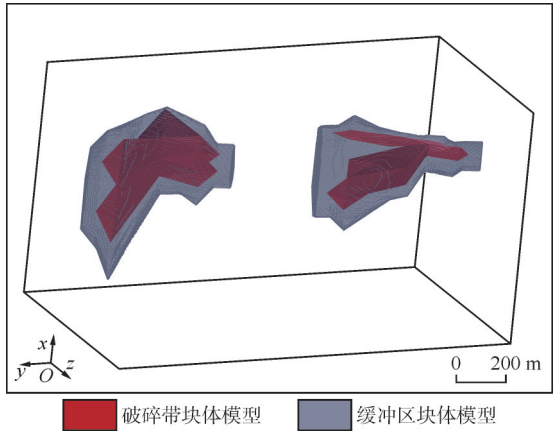


图 15 构造破碎带缓冲区块体模型

Fig. 15 Block model of tectonic fault buffer zone

构造破碎带最佳缓冲半径统计结果见图 16。由图 16 可知:构造破碎带的缓冲区半径为 50 m 时,缓冲区含矿数量为 3 146 块,占研究区矿体总数量的 55.72 %,因此,本次选取构造破碎带 50 m 缓冲半径作为地质找矿有利要素。

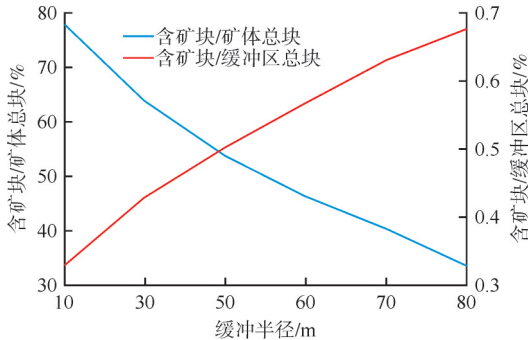


图 16 构造破碎带最佳缓冲半径统计结果

Fig. 16 Statistical results of the optimal buffer radius of tectonic fault zones

6.2 靶区圈定

6.2.1 找矿信息量法

找矿信息量法是一种区域找矿预测的定量方法,其以成矿理论为基础,通过量化各地质要素和标志与

矿体之间的关联程度,评估找矿潜力^[14]。该方法的核心原理是利用条件概率计算控矿要素或找矿标志的找矿信息量(见式(1)):

$$I_{A(B)} = \lg \frac{P(A/B)}{P(A)} \quad (1)$$

式中: $I_{A(B)}$ 为在 B(有矿)发生的条件下,A 标志存在所提供的信息量; $P(A/B)$ 为已知 B(有矿)时 A 标志的条件概率; $P(A)$ 为 A 标志的先验概率。

由于直接计算概率在实践中存在困难,通常采用样本频率值来近似估计,因此得到式(2):

$$I_{A(B)} = \lg \frac{\frac{N_j}{N}}{\frac{S_j}{S}} \quad (2)$$

式中: N_j 为存在 A 标志且含矿的单元数; N 为含矿单元总数; S_j 为存在 A 标志的单元数; S 为单元总数。

基于前文对成矿地质条件的系统分析,综合典型矿床的特征分析及“三位一体”找矿预测地质模型,筛选出具有显著找矿指示意义的关键地质要素作为预测模型的核心变量。研究过程中直接选取所有有利的找矿标志作为研究对象,经过总结,共归纳出 8 个找矿预测信息要素,分别是:构造角砾岩、英安岩 50 m 缓冲区、闪长岩 50 m 缓冲区、辉绿岩 50 m 缓冲区、构造破碎带 50 m 缓冲区、Ag 异常、Pb 异常、Zn 异常,结合块体模型成果计算出各个找矿要素的信息量,见表 2。

表 2 二道坎银铅锌矿区找矿标志信息量统计结果

Table 2 Statistical results of information quantity for prospecting indicators in the Erdaokan Ag-Pb-Zn District

找矿标志	含矿块体数量	总块体数量
构造角砾岩	4 115	10 327
英安岩 50 m 缓冲区	1 024	29 800
闪长岩 50 m 缓冲区	702	14 250
辉绿岩 50 m 缓冲区	5 264	160 969
构造破碎带 50 m 缓冲区	3 146	63 895
Ag 异常	2 159	37 203
Pb 异常	4 185	194 440
Zn 异常	3 746	274 877

二道坎银铅锌矿区找矿标志计算结果见表 3。由表 3 可知:各找矿标志的信息量值反映了该找矿标志在找矿过程中的有利程度。在三维找矿预测过程中,利用这些有利标志的信息可以计算每个单元块的累计信息量值,这一综合指标能够客观反映单元块体的成矿潜力,其数值变化与成矿概率呈正相关关系。具体表现为,单元块的综合信息量值越高,指示该区成矿概率越大。

6.2.2 找矿靶区

对于矿区的每个立方体块中都对应一种或多种

表3 二道坎银铅锌矿区找矿标志计算结果
Table 3 Calculation results of prospecting indicators in the Erdaokan Ag-Pb-Zn District

找矿标志	N_j	N	S_j	S	$(N_j/N)/(S_j/S)$	$I_{A(B)}$
构造角砾岩	4 115	5 646	10 327	760 037	53.640 093	1.729 490
英安岩 50 m缓冲区	1 024	5 646	29 800	760 037	4.625 701	0.665 178
闪长岩 50 m缓冲区	702	5 646	14 250	760 037	6.631 566	0.821 616
辉绿岩 50 m缓冲区	5 264	5 646	160 969	760 037	4.402 177	0.643 667
构造破碎带 50 m缓冲区	3 146	5 646	63 895	760 037	6.628 049	0.821 386
Ag异常	2 159	5 646	37 203	760 037	7.812 113	0.892 769
Pb异常	4 185	5 646	194 440	760 037	2.897 368	0.462 004
Zn异常	3 746	5 646	274 877	760 037	1.834 523	0.263 523

属性,通过立方体单元内的多种信息量值进行叠加,得到综合信息量值。综合信息量值的大小反映了矿区块体内找矿标志的显示强度及与成矿的关联性。为评估不同信息量区间的成矿预测能力,选取0.3为间隔对信息量值进行区间划分,统计各区间内含矿体单元频率,以此评估不同信息量区间的成矿预测能力。信息量区间含矿情况频率见图17。由图17可知:信息量值 ≤ 3.4 的块体占绝大多数,与成矿的关系更为密切。

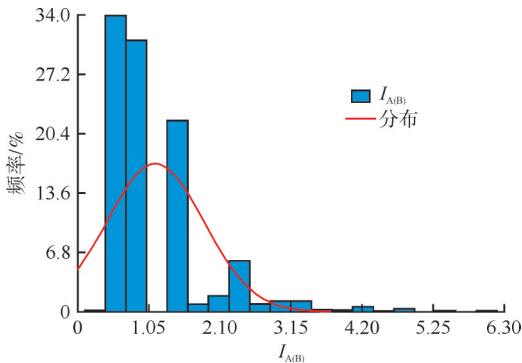


图17 信息量区间含矿情况频率

Fig. 17 Frequency of mineralization within information quantity intervals

找矿信息量统计折线图见图18。由图18可知:随着找矿信息量值的增大,满足信息量阈值的含矿块体和总块体数量均呈下降趋势,而含矿浓度则逐渐升高。这验证了本次预测符合统计规律:信息量增大使筛选出的单元块体在特征上更接近矿体特征,从而实现靶区的逐步缩小。

为排除低潜力数据的干扰,将信息量阈值定为3.4,可有效筛选出成矿概率更高的靶区。进一步统计表明,信息量值大于3.4的块体包含已知矿体单元块体数量达4 298块,占已知矿体总量的76.12%,这一显著的空间耦合关系验证了临界值的合理性。基于单元块体信息量浓度,对信息量进行了三级划分,分别为3.4~3.8,3.8~4.2及大于4.2。其中,信息量值越高,对应的成矿概率就越大。

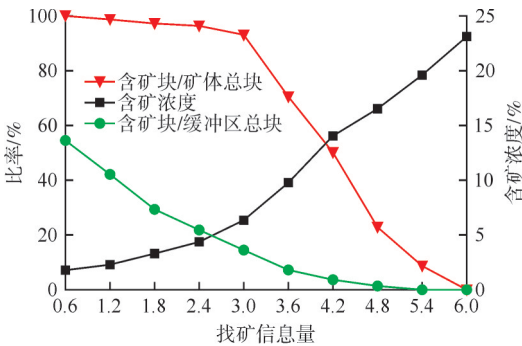


图18 找矿信息量统计折线图

Fig. 18 Line chart of statistical results of prospecting information quantity

通过设定综合找矿信息量阈值(>3.4),圈定成矿有利区域(见图19-a)。剔除与已知矿体重叠的区域后,矿区共圈定4处具有潜力的找矿靶区(见图19-b、c)。

7 结 论

1)二道坎银铅锌矿床的矿体主要赋存于下泥盆统泥鳅河组沉积岩内,构造角砾岩为主要的赋矿围岩。Ag、Pb、Zn异常,以及北东向与北西向断裂交会部位和构造破碎带,可作为直接找矿标志。辉绿岩与矿体密切共生,闪长岩、英安岩等岩脉与矿体平行产出,矿化蚀变类型以黄铁矿化、硅化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化为主,这些特征可作为间接找矿标志。

2)基于Micromine软件构建了二道坎银铅锌矿区三维模型,包括地质体、矿体、构造破碎带和矿体品位模型。该模型直观展示了各地质体与成矿要素的三维空间展布及其相互关系,可为类似矿床的三维建模提供参考。

3)以“三位一体”找矿预测理论为指导,采用立方体预测模型方法和找矿信息量法,定量提取并计算了有利找矿标志信息量,最终圈定出4处找矿靶区,可为下一步找矿勘查提供参考。

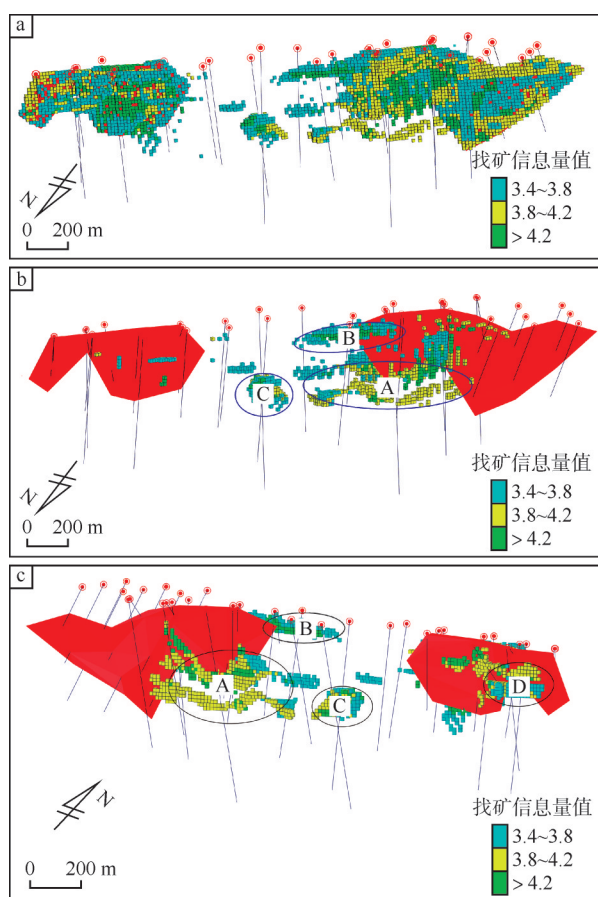


图 19 二道坎银铅锌矿区深部找矿靶区预测图

Fig. 19 Prediction map of deep prospecting targets in the Erdaokan Ag-Pb-Zn District

【参 考 文 献】

- [1] 邓震,孟贵祥,祁光,等.阿舍勒矿集区VMS型矿床深部勘查模型研究[J].地质学报,2025,99(3):1 046-1 060.
- [2] 邴元敏,李顺达,黄丙湖.三山岛金矿床深部三维地质模型与资源量估算[J].黄金,2025,46(3):66-71.
- [3] 赵忠海,崔晓梦,孙景贵,等.基于三维地质-地球物理建模的深部成矿预测——以黑河地区永新金矿床为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2024,54(2):498-515.
- [4] 李敏,张子实,赵忠海,等.黑龙江省下嘎来奥伊河铅锌多金属矿床三维地质建模及深部找矿预测[J].黄金,2023,44(7):37-47.
- [5] 陈建平,周冠云,褚志远,等.山东蒙阴金刚石矿床地质大数据三维建模与成矿预测[J].矿床地质,2024,43(4):802-820.
- [6] 孔亮,王功文,汪程.基于Gocad三维地质建模与深部成矿预测——以河南灵宝市灵金一矿为例[J].矿物学报,2015,35(增刊1):866-867.
- [7] ZHOU G Y, CHEN J P, AN W T, et al. Three-dimensional mineral prospectivity mapping based on natural language processing and random forests: A case study of the Xiyu diamond deposit, China[J]. Ore Geology Reviews, 2024, 169: 106082.
- [8] COX D P, SINGER D A. Mineral deposit models [M]. Washington: United States Government Printing Office, 1992.
- [9] KELK B, RAPER J. Three dimensional application in geographical information systems[J]. Geographical Journal, 1990, 156(2): 226.
- [10] CHRISTIAN J T. 3D geoscience modeling: Computer techniques for geological characterization[J]. Earth-Science Reviews, 1996, 40(3/4): 299-301.
- [11] 肖克炎,丁建华,刘锐.美国“三步式”固体矿产资源潜力评价方法评述[J].地质论评,2006,52(6):793-798.
- [12] 王堃屹,周永章.粤西庞西洞地区非结构化地质信息机器可读表达与致矿异常区域智能预测[J].地学前缘,2024,31(4):47-57.
- [13] 肖凡,陈信宇.基于数值模拟与勘查数据协同驱动的矿产定量预测——以凡口铅锌矿为例[J].大地构造与成矿学,2025,49(2):298-316.
- [14] 牟江涛,吉明甲,魏丽琼,等.基于加权信息量法的找矿靶区优选方法——以青海省都兰县沟里地区金矿为例[J].黄金,2025,46(4):72-78.
- [15] 杨旺东,高福磊,王功文,等.四川红泥坡铜矿床三维地质建模及控构造演化的新认识[J].现代地质,2020,34(3):598-608.
- [16] MOHAMMADPOUR M I, BAHRROUDI A, ABEDI M. Three dimensional mineral prospectivity modeling by evidential belief functions, a case study from Kahang porphyry Cu deposit[J]. Journal of African Earth Sciences, 2021, 174: 104098.
- [17] 李玉洁,李成禄,杨元江,等.大兴安岭东北部多宝山矿集区二道坎银铅锌矿床磁铁矿地球化学特征[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(2):436-449.
- [18] 鲁涛,孙刚,袁茂文.大兴安岭东北部多宝山矿集区二道坎银铅锌矿床有机质特征及对成矿作用的影响[J].世界地质,2021,40(2):256-264.
- [19] 鲍希波,尹国良,于献章.黑龙江省嫩江县二道坎村银多金属矿床地质特征及找矿标志[J].黄金,2019,40(7):20-23.
- [20] 宫昀迪,李碧乐,李治华,等.大兴安岭北段小柯勒河花岗斑岩脉成因及地质意义:锆石U-Pb年龄、岩石地球化学及Hf同位素制约[J].吉林大学学报(地球科学版),2021,51(6):1 753-1 769.
- [21] ZHU M, PASTOR-GALAN D, MIAO L, et al. Evidence for early Pennsylvanian subduction initiation in the Mongol-Okhotsk Ocean from the Adaatsag Ophiolite (Mongolia)[J]. Lithos, 2023, 436/437: 106951.
- [22] 梁琛岳,刘永江,宋志伟,等.黑龙江虎林杂岩变形样式与时代:对中国东北部早白垩世古太平洋板块俯冲的启示[J].岩石学报,2020,36(3):685-702.
- [23] 赵盼,徐备,陈岩.蒙古-鄂霍茨克洋:演化过程和最终闭合[J].中国科学(地球科学),2023,53(11):2 541-2 559.
- [24] SHU Q H, CHIARADIA M. Mesozoic Mo mineralization in north-eastern China did not require regional-scale pre-enrichment [J]. Economic Geology, 2021, 116(5): 1 227-1 237.
- [25] ZHANG C P, WANG E D, BI Z W, et al. Geochronology and isotope geochemistry studies of an epithermal gold deposit in the northern Lesser Khingan Range, NE China: The Gaosongshan example [J]. Ore Geology Reviews, 2019, 105: 356-374.
- [26] 孙永刚,靳皇玉,王永胜,等.大兴安岭北段斑岩型钼(铜)矿床主要硫化物化学成分特征及地质意义——以770钼(铜)矿床为例[J].黄金,2024,45(11):27-33, 136.
- [27] ZHAO Z H, SUN J G, LI G H, et al. Age of the Yongxin Au deposit in the Lesser Xing'an Range: Implications for an Early Cretaceous

- geodynamic setting for gold mineralization in NE China[J].Geological Journal, 2018, 54(4): 2 525–2 544.
- [28] 程国华,王瑞良,曾庆栋,等.黑龙江鹿鸣钼矿区花岗质杂岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素、辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J].岩石学报, 2015, 31(8): 2 450–2 464.
- [29] 李希元,崔健,胡望水,等.基于多源地球物理数据的机器学习方法在地质体分类中的应用——以黑龙江多宝山矿集区为例[J].地球物理学报, 2022, 65(9): 3 634–3 649.
- [30] PAN Z D, HOU H S, FU W, et al. Velocity structure and Cu-Au mineralization of the Duobaoshan ore district, NE China: Constrained by first-arrival seismic tomography[J].Minerals, 2022, 12(8): 959.
- [31] HAO Y J, REN Y S, DUAN M X, et al. Mineralization time and tectonic setting of the Zhengguang Au deposit in the Duobaoshan ore field, Heilongjiang Province, NE China[J].Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(15): 655.
- [32] 赵元艺,王江朋,赵广江,等.黑龙江多宝山矿集区成矿规律与找矿方向[J].吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(6): 1 676–1 688.
- [33] 李孔亮,杨文鹏,李成禄,等.黑龙江省二道坎银矿床三叠纪岩浆岩地球化学特征、构造环境及意义[J].矿物岩石地球化学通报, 2024, 43(4): 787–808.
- [34] YANG Y J, LI C L, WANG Z Y, et al. Characteristics and metallogenic significance of Fe-Mn carbonate minerals in the Erdaokan Ag deposit, Heilongjiang Province, Northeast China: Constraints from Sm-Nd geochronology and trace elements[J].Minerals, 2024, 14(7): 655.
- [35] 叶天竺,吕志成,庞振山,等.勘查区找矿预测理论与方法: 总论[M].北京:地质出版社, 2014.
- [36] 莫文毅,刘云华,刘占晋,等.冀东矿集区金厂峪金矿床“三位一体”成矿预测模型及找矿预测[J].黄金, 2024, 45(11): 1–8.

3D geological modeling and prospecting prediction of the Erdaokan Ag-Pb-Zn Deposit in the Duobaoshan ore province, Heilongjiang Province

Yin Yechang¹, Zhang Zishi², Yang Yuanjiang³, Zheng Bo³, Li Chenglu³, Tan Kaiyue³, Zhao Zhonghai^{1,4}

(1. College of Mining, Liaoning Technical University;

2. Department of Geology and Survey Engineering, Yantai Gold College;

3. Natural Resources Survey Institute of Heilongjiang Province;

4. Northeast Innovation Center for Geological Science and Technology, China Geological Survey)

Abstract: The Erdaokan Ag-Pb-Zn Deposit is a large independent silver deposit recently discovered in the Duobaoshan ore province. It not only represents the first independent silver deposit found in Heilongjiang Province but also provides a significant case study for understanding regional metallogenic regularity. Owing to the lack of systematic research and low degree of deep exploration in the Erdaokan Ag-Pb-Zn Deposit, multi-source data, including geological, drilling, and geochemical information, were systematically collected and integrated. By using Micromine software, a 3D geological model of the mining area was established. Guided by the "trinity" prospecting prediction theory, deep mineral prediction was conducted by integrating the cube prediction method and the information quantity method for prospecting, resulting in the delineation of 4 prospecting target areas. Results indicate that structural breccias, intersections of NE- and NW-trending faults, and Ag, Pb, Zn anomalies in the Erdaokan Ag-Pb-Zn District can serve as direct prospecting indicators, suggesting substantial exploration potential remains at depth.

Keywords: Erdaokan Ag-Pb-Zn Deposit; 3D geological modeling; prospecting prediction; information quantity method for prospecting; trinity; cube prediction; Duobaoshan ore province