

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.06.006

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

王永庆¹, 李山^{1*}, 杨真亮¹, 刘彩杰^{1,2}, 隋晓玲¹, 刘向东¹WANG Yongqing¹, LI Shan^{1*}, YANG Zhenliang¹, LIU Caijie^{1,2}, SUI Xiaoling¹, LIU Xiangdong¹

1. 山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队, 山东 招远 265400;

2. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059

1. Shandong Bureau No.6 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Zhaoyuan 265400, Shandong, China;

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

摘要:胶东玲珑金矿田是著名的玲珑式石英脉型金矿产地,近年深部找矿发现了资源量超过600 t的蚀变岩型巨型金矿床,深入研究金矿床的三维空间特征,有助于指导该区进一步的深部找矿。利用375个钻孔资料建立了玲南-水旺庄巨型金矿床三维地质模型,分析了金矿床的三维空间特征和主要矿体的空间分布规律。矿床由3个主矿体组成,矿体沿招平断裂北段的九曲蒋家断裂和破头青断裂主裂面下盘分布。赋矿断裂沿走向呈舒缓波状,沿倾向由浅到深由陡变缓且呈阶梯状。矿体厚度的三维分布沿走向和倾向均呈现厚—薄相间变化,矿体品位与厚度相关系数为0.192,矿体品位×厚度的三维分布构成了4处矿化富集区。分析表明,断裂表面坡度变化较大区域易于矿体富集,且矿体主要富集在坡度较缓部位。由此认为,断裂倾角变化是金矿化富集的关键因素,深部找矿应注重对断裂倾角变化的研究和探测。

关键词:三维地质特征;断裂;控矿规律;玲南-水旺庄;金矿床;胶东

中图分类号:P618.51;P628+.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)06-0977-09

Wang Y Q, Li S, Yang Z L, Liu C J, Sui X L, Liu X D. Three-dimensional geological characteristics and fracture-controlling laws of Lingnan-Shuiwangzhuang giant gold deposit in Jiaodong. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(6): 977-985

Abstract: The Linglong gold field in Jiaodong Peninsula was well known for numerous quartz vein-type gold deposits. In recent years, a giant altered rock type gold deposit with resources of more than 600 tons was discovered in the deep. Detail study on three-dimensional characteristics of this gold deposit will help guide further deep prospecting in the region. This paper introduces how to establish a three-dimensional geological model of the Lingnan-shuiwangzhuang giant gold deposit using 375 drilling holes. The three-dimensional spatial characteristics and the spatial distribution law of main orebodies were revealed through the 3D model. There were three main ore bodies, which were distributed along the footwall of the Jiuqu-Jiangjia Fault and the Potouqing Fault in the north section of Zhaoping Fault Systems. The ore-bearing faults are in a gentle wave shape along the striking direction, and dip angle gradually changes to gentle from shallow to deep along the dipping direction. The thickness of ore bodies shows an alternating change of along the striking thickness along the strike and inclination. The correlation coefficient between the grade and thickness of the ore body is 0.192. The three-dimensional distribution of the product of the grade and thickness constitutes four mineralized enrichment areas. The analysis shows that the ore bodies are easy to be enriched in the areas with large slope changes on the fault surface and the areas with gentle slope. It can be seen that

收稿日期:2021-06-24;修订日期:2021-12-20

资助项目:国家自然科学基金项目 NSFC-山东联合基金《胶东深部金矿断裂控矿机理》(批准号:U2006201)、省财政资金项目“深地资源勘查开采”重点研发计划专项《深部金矿评价理论、方法与预测》(编号:2017CXGC1604)、山东省地质矿产勘查开发局项目(编号:KC2017008、KC2018006、202009)、山东省第六地质矿产勘查院科研项目《焦家式金矿编撰》(编号:LYKY2020-01)

作者简介:王永庆(1985-),男,工程师,从事地质矿产勘查研究。E-mail:316810367@qq.com

*通信作者:李山(1986-),男,高级工程师,从事地质矿产勘查研究。E-mail:569706751@qq.com

the change of fault dip angle is the key factor of gold mineralization enrichment, and the study and exploration of the change of fault dip angle should be paid more attention to in deep prospecting.

Key words: three-dimensional geological characteristics; fracture-controlling laws; Lingnan-Shuiwangzhuang; gold deposit; Jiaodong

玲南-水旺庄巨型金矿床位于胶东招平断裂带北段,区内基础地质调查、地质科研、地质找矿等工作较系统全面^[1-7]①。矿床西侧为玲珑金矿田,该金矿田位于招平断裂下盘,以石英脉型金矿为特色,矿床规模除玲珑金矿为超大型外,其他均为中小型^[8-11]。2005 年以来,地质工作者陆续在招平断裂带及其下盘探明多处大一超大型金矿,累计探明金资源量逾 600 t^[12-14],远远超过石英脉型金矿的资源量,改变了玲珑金矿田的矿床类型格局。以往的金矿勘查工作是由多个单位在不同时间、不同区域实施不同勘查项目完成的,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。本文基于玲南-水旺庄金矿床 375 个钻孔资料的三维地质建模工作,分析了矿床主要地质体、矿体和断裂的三维空间特征,研究了矿体的厚度、品位及赋矿断裂倾角的变化,讨论矿化富集程度与断裂三维变化的关系,为进一步开展深部找矿和矿床的开发提供了三维可视化平台和客观、真实的数据支持,也为深化成矿规律研究提供了新的重要信息。

1 地质概况

玲南-水旺庄金矿床位于胶东半岛西北部,区内及附近大部分出露侏罗纪玲珑型花岗岩和文登型花岗岩,东部有较多的新太古代花岗质片麻岩,第四系沿沟谷分布,基岩中白垩纪脉岩较发育。招平断裂是胶东重要的断裂成矿构造带,断裂长达 120 km,走向 NNE—NE,倾向 SE,倾角 30°~70°,断裂带一般宽 40~300 m,最宽达 800 m。研究区位于招平断裂北段,此处断裂分叉为破头青和九曲蒋家 2 支断裂。破头青断裂总体走向 60°,倾向 SE,倾角 28°~45°,平均 33°,长 5500 m,宽 30~330 m,钻探工程控制最大倾斜深 3231 m(未尖灭),最大垂深 1631 m。九曲蒋家断裂走向为 33°左右,倾向 SE,倾角 23°~60°,出露走向长约 6000 m,宽 8~460 m,平均 80 m,已控制倾斜深 4728 m(未尖灭),最大垂深

2282 m^[15-17]。

2 三维地质模型构建方法

三维地质建模是在各种地质勘探、物化探等原始数据基础上,结合地质专家的知识 and 经验实现对地质体对象的解译,并以适当的数据结构建立地质体的三维数学模型,展现地质体的三维几何形态和特征属性,它是分析地质体空间分布规律并实现控矿因素定量提取的前提和基础^[18]。目前国内三维建模技术逐渐成熟,有多种建模软件可供使用^[19-26]。本文三维建模工作以 Creatar 三维地质信息综合展示分析软件为平台,依托玲南-水旺庄巨型金矿床勘查工程数据,以人机交互的方式完成高精度大比例尺三维地质建模。

2.1 建模数据及处理

建模数据多源性是三维地质建模最大的特点,模型构建的关键是將这些数据有效地融合,以提高模型的精度和可靠性^[27-29]。本文系统收集了水旺庄、李家庄、东风、东风 171、岭南、栾家河 6 个金矿区 13 套勘查成果资料,其中勘查线剖面图 148 张,钻孔柱状图 375 张。首先对原始剖面资料和地面坐标数据进行坐标转换,建立统一的坐标系统;其次,提取三维建模用到的位置信息和属性信息;随后把剖面图中区文件转换为线文件,删除与矿体建模无关的部分,线文件经过拓扑错误检查以后,转换为新的区文件。

建模范围为玲南-水旺庄金矿床地表约 4000 m 标高,平面地质图比例尺为 1:10000,勘查线剖面图比例尺为 1:2000,控制网度为 60 m×60 m,最小厚度设为 0.1 m。

2.2 三维建模流程与技术

地质体建模采用基于复杂地质体的交互建模方法^[30-34]。依据金矿床范围确定建模边界,采用自上而下的建模方式,水平网格大小设为勘查工程基本网度的 1/2。垂直网格大小、最小厚度等依据实际情况进行调整。建模顺序为断裂模型-地表(初始基底)模型-地层模型-岩体模型-蚀变带模型。

对于金矿体的三维建模,主要是利用钻孔数据

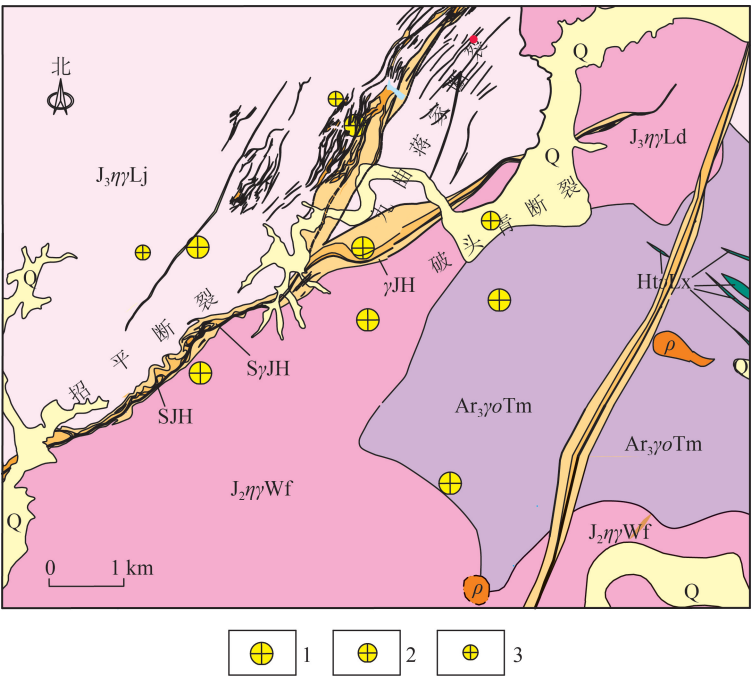


图 1 招平断裂带北段地质和金矿床分布图
Fig. 1 Geological and gold distribution map of the northern section of Zhaoping fault zone

Q—第四系; Ar₃γoTm—新太古代晚期谭格庄序列牟家单元细粒奥长花岗岩; HtγLx—古元古代晚期莱州序列西水单元细粒变辉长岩; J₂ηγWf—中生代印支期文登序列阜山单元粗中粒二长花岗岩; J₃ηγLj—中生代玲珑序列九曲单元弱片麻状细中粒含石榴二长花岗岩; J₃ηγLd—中生代玲珑序列大庄子单元含斑粗中粒二长花岗岩; ρ—伟晶岩; S_γJH—黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩; SJH—黄铁绢英岩化碎裂岩; γJH—黄铁绢英岩化花岗岩; 1—特大型金矿; 2—大型金矿; 3—中型金矿

和二维勘查图件(剖面图、中段图)提取矿体轮廓线,采用三维矿体表面建模方法,建立三维矿体模

型。先从各剖面图中导出矿体的轮廓线,通过连接“矿体轮廓线”创建新“面集”,由封闭的“面集”对象集合,生成“地质体”数据集,建立矿体三维结构模型。最后将地表、构造、地层、岩体、蚀变岩、矿体等多种类型的地质单元融合成一套地质模型^[35](图 2)。

3 矿床三维地质特征

3.1 地层三维特征

模型体内地层仅有第四系,位于模型的表面,呈不规则板状,规模较小,厚度 0.5~20 m,一般 1~5 m。

3.2 岩体三维特征

侵入岩体为模型体的主要组成部分。其中,新太古代片麻岩套残留于侏罗纪花岗岩上部,岩体顶部剥蚀面起伏明显,底部接触面不规则。侏罗纪文登型花岗岩位于模型体上部,大部出露于地表,顶部剥蚀面起伏明显,东北部位于新太古代片麻岩套下方,两者接触面不规则,岩体底部为断裂蚀变带,岩体整体位于招平断裂带上盘,南西厚北东薄,最大厚度 4000 m。侏罗纪玲珑型花岗岩位于模型体下部,岩体的顶面与断裂蚀变带接触,底面延伸至模型体底部,整体位于招平断裂带下盘,岩体表面呈波状舒缓。

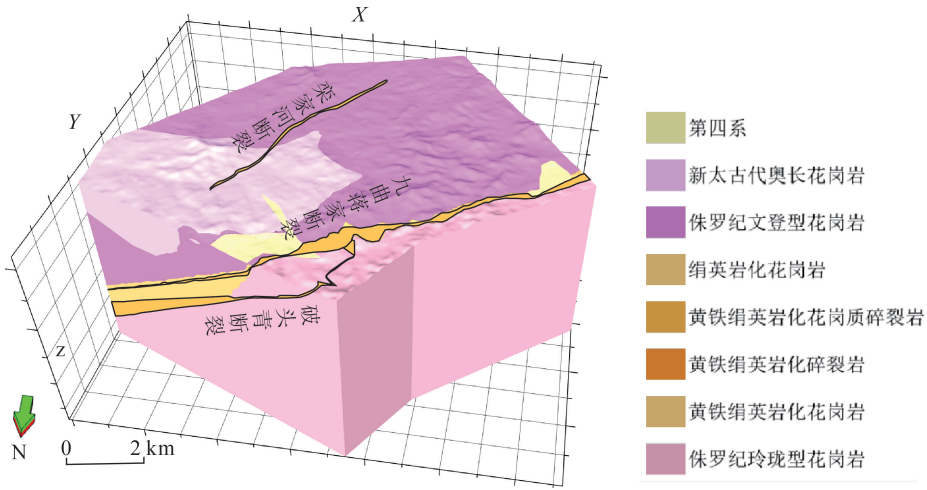


图 2 玲南—水旺庄金矿区三维地质模型
Fig. 2 Three-dimensional geological model of Lingnan - Shuiwangzhuang gold mining area

3.3 断裂和蚀变破碎带三维特征

区内控矿断裂为招平断裂,该断裂在水旺庄矿区西南部是一条完整的断裂,之后,由西南向东北逐渐形成分叉。分叉后,右侧的一支为破头青断裂,走向 NE,左侧的为九曲蒋家断裂,走向 NNE,二者间的分叉逐渐扩大,这种特点与地表破头青断裂和九曲蒋家断裂露头完全对应。但是,由地表至深部的蚀变带规模不同,地表的绢英岩化蚀变带规模小,分别沿 2 条断裂附近断续分布;而向深部蚀变带规模逐渐增大,至-1300 m,沿 2 条断裂的蚀变带合二为一,成为一条宽大的蚀变带(图 2)。浅部玲珑金矿田内帚状构造群为招平断裂的次级断裂,中部的九曲蒋家断裂与东部破头青断裂在九曲村以东区域的深部相互叠加影响,形成千米级巨厚蚀变带,金的主矿体产于九曲蒋家断裂所影响的绢英岩化花岗质碎裂岩带内。

3.4 矿体三维特征

已探明的金矿体主要分布在-2290 m 标高以浅,共计 134 个。矿体沿控矿断裂走向方向呈平行、断续排列,呈层状、脉状产出,主矿体主要集中在控

矿断裂主裂面以下。以往不同勘查区查明的多个矿体在三维空间上相互连接,构成大的矿体和矿体群,矿体三维空间连续性较好,规模较大,其中受控于九曲蒋家断裂的水旺庄②号矿体与受控于招平主断裂的东风 171-1 号矿体相互连接,二者在三维空间上处于同一高程位置,构成一个向 NE 侧伏的巨大矿体(图 3-b)。由此可见,以往作为独立矿床勘查和研究的水旺庄、李家庄、东风、东风 171、岭南、栾家河等矿区实际上为同一矿床,该矿床累计探明资源量超过 600 t,属于超巨型金矿床,本文称为岭南-李家庄金矿床。

对三维模型体垂直断裂走向截取铅直切片(图 4-a)可见,矿体赋存于主断面下盘的蚀变破碎带中,且主要在断裂倾角的陡、缓变化部位。分别截取-50 m、-650 m、-1300 m、-1950 m 标高的断裂和矿体水平切片(图 3-c)可见,矿体主要赋存于断裂沿走向波动大的部位。沿断裂倾斜方向截取的系列垂直切片(图 4-a)显示,相对浅部的矿体沿走向不连续,呈平行近等距分布,矿体向深部延伸较稳定,单个矿体沿倾斜方向的延伸大于沿走向方向

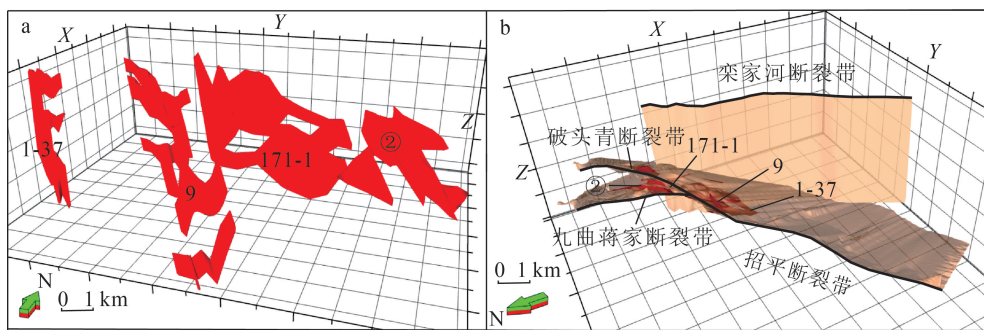


图 3 171-1 和②号矿体与断裂空间关系(a)及矿体三维展布(b)

Fig. 3 Spatial relationship between No. 171-1 and No. ② orebodies and faults(a) and three-dimensional distribution of orebodies(b)

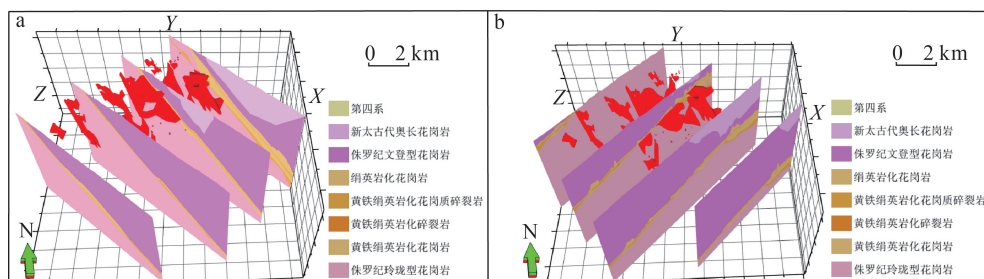


图 4 断裂和矿体沿倾向(a)和走向(b)的铅直切片

Fig. 4 Straight sections of faults and orebodies along dips (a) and strike (b)

的延长。沿断裂倾斜方向截取的系列切片(图 4-b)显示,矿床的南部矿体较零散,北部矿体完整且规模巨大,矿体群沿走向的分布范围长度大于沿倾向的总体延伸长度,矿体群总体向 N 侧伏,侧伏角较小。

根据最新勘查成果,在招平断裂北段水旺庄矿区深部开展了钻孔初步验证工作并取得突破,将招平断裂勘查深度从-1500 m 以浅延伸至-2100 m 以深,新增金资源量逾 110 t^[16],深部找矿潜力巨大。

4 矿体空间变化及断裂控矿规律

以往大量矿区勘查研究及上述矿床的三维特征表明,胶东主要金矿床(包括玲南—水旺庄金矿床)均受断裂构造控制,前人主要依据浅部金矿勘查工作总结归纳了一系列断裂控矿规律,如断裂拐弯控矿、分支断裂控矿、玲珑金矿田帚状控矿构造系统,蚀变岩型金矿产于主断裂带,石英脉型金矿产于次级张性裂隙等^[1-3],且运用断裂控矿规律取得了很好的找矿效果。但是深部金矿与断裂的关系尚缺乏深入研究,本文基于大量钻探资料建立的三维地质模型对深部赋矿规律研究和深部找矿方向进行了讨论。

4.1 矿体厚度和品位空间变化

统计矿体厚度、品位、厚度×品位的分布,可以定量显示矿化富集程度及变化,深化分析矿化富集规律。在矿体三维模型中均匀提取插值后数据点 5160 个,对矿体厚度进行差值分析。结果表明,矿体厚度范围为 1.00~93.08 m,主要集中在 1.00~22.00 m,平均 8.04 m,标准差 10.66,厚度变化较明显(图 5-a)。在厚度三维分布图(图 6-a)中,厚度高值区域分布较集中,沿倾向呈线性分布,沿走向高值区与低值区相间分布,无矿/弱矿间隔明显。

对提取的 5160 个品位数据点进行分析表明,矿体品位值 1.00~18.65 g/t,平均 2.20 g/t,标准差 1.52,品位数据分布均匀(图 5-b)。在品位三维分布图(图 7-a)中,品位分布均匀,图形切割不明显,相对高差较小。将 Z 轴坐标拉大后,显示出几个较高品位的富集区。将品位分布与厚度分布比较后发现,厚度较大区域,品位较高,两者相关系数为 0.192,为正相关。

对提取的 5160 个矿体品位×厚度数据点进行分析表明,品位×厚度范围为 1.00~471.26 g/t·m,平均 27.41 g/t·m,标准差 47.56,数据变化明显(图 5-c)。将品位×厚度的 3 倍(82.23 g/t·m)作为矿化富集区,共提取矿化富集区 4 处(图 8),矿化富集区沿走向间隔一定距离分布,总体分布南部略浅、北部略深。

4.2 断裂坡度变化及与矿化富集的关系

断裂坡度是反映断裂变化的关键因子,应用坡度分析一定程度上可以反映断裂的展布特征^[36-39]。对三维模型中的整个控矿断裂经坡度分析后,提取表面坡度值 7718 个,坡度最小值 4.68°,最大值 67.13°,平均 35.69°(图 9-a);在控矿断裂的含矿区域提取表面坡度值 1866 个,最小值 5.79°,最大值 66.23°,平均 35.53°;在矿化富集区提取坡度值 196 个,最小值 18.25°,最大值 51.27°,平均 34.47°。可见,矿化富集区断裂坡度值较小。

根据品位×厚度圈定的 4 处矿化富集区编号为 I、II、III、IV,每个矿化富集区分别沿倾向的上方、下方和外围(两侧)外推 400 m 距离,作为缓冲区(图 9-b)。矿化富集区 I 位于-1500~-220 m 标高以浅,矿化富集区坡度 24.96°~49.70°,平均 38.97°,波动幅度小;上方缓冲区坡度 36.45°~50.33°,平均 41.33°,坡度变化也较小;下方缓冲区坡度 9.86°~59.95°,

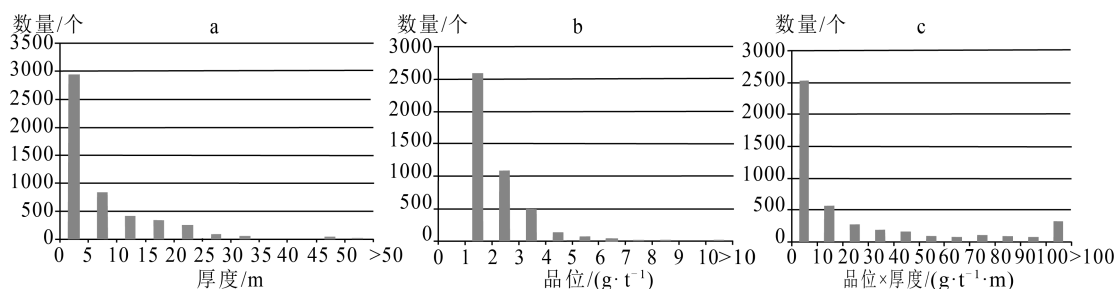


图 5 岭南—李家庄金矿床矿体品位(a)、厚度(b)和品位×厚度(c)分布直方图

Fig. 5 Distribution histograms of grade (a), thickness (b) and grade × thickness (c) of the orebody in Lingnan-Lijiazhuang gold deposit

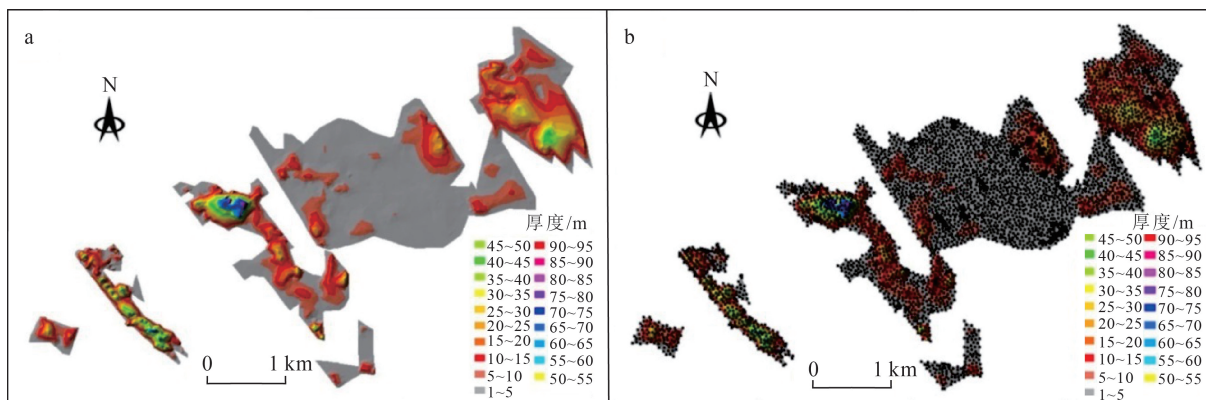


图6 岭南-李家庄金矿矿体厚度三维分布图(a)和数据点位置图(b)

Fig. 6 3D orebody thickness distribution map(a) and data point location map (b) of Lingnan-Lijiazhuang gold deposit

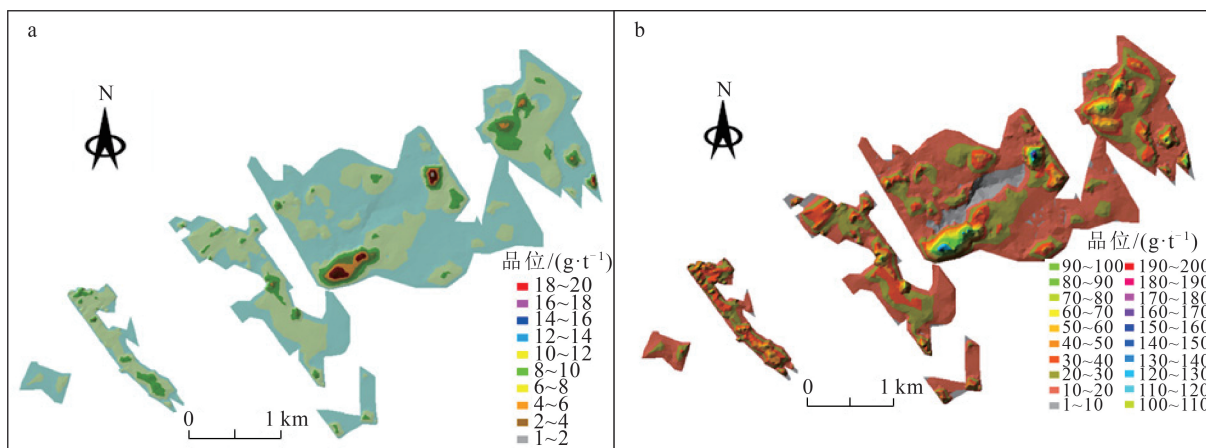


图7 矿体品位三维分布图(a)和Z值拉伸10倍的品位三维分布图(b)

Fig. 7 Three-dimensional grade distribution diagrams of the ore body (a) and of the Z-value tensile 10 times (b)

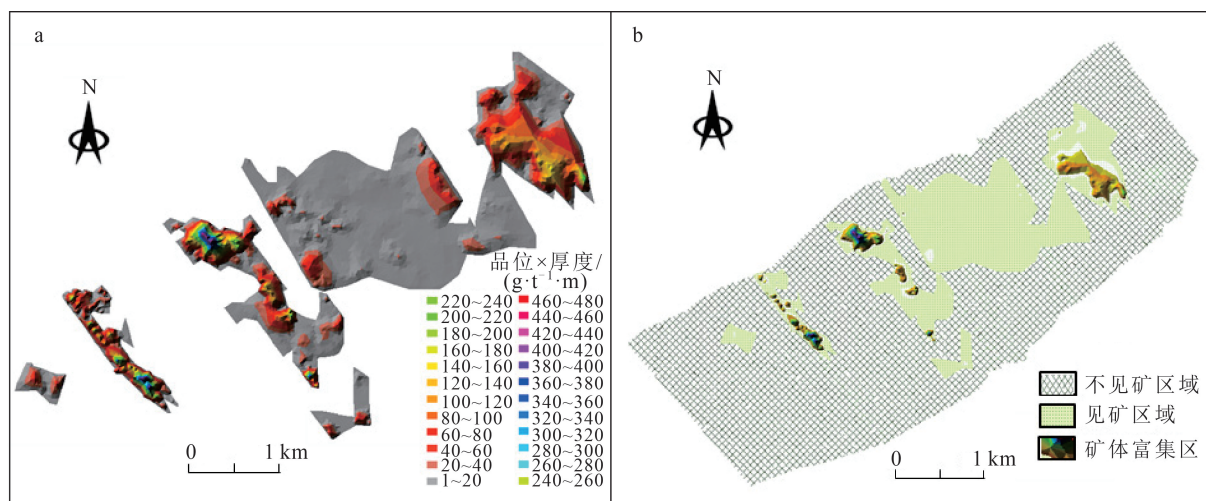


图8 矿体品位×厚度三维分布图(a)和矿化富集区分布图(b)

Fig. 8 Three-dimensional distribution map of orebody grade × thickness (a) and distribution map of mineralized enrichment area (b)

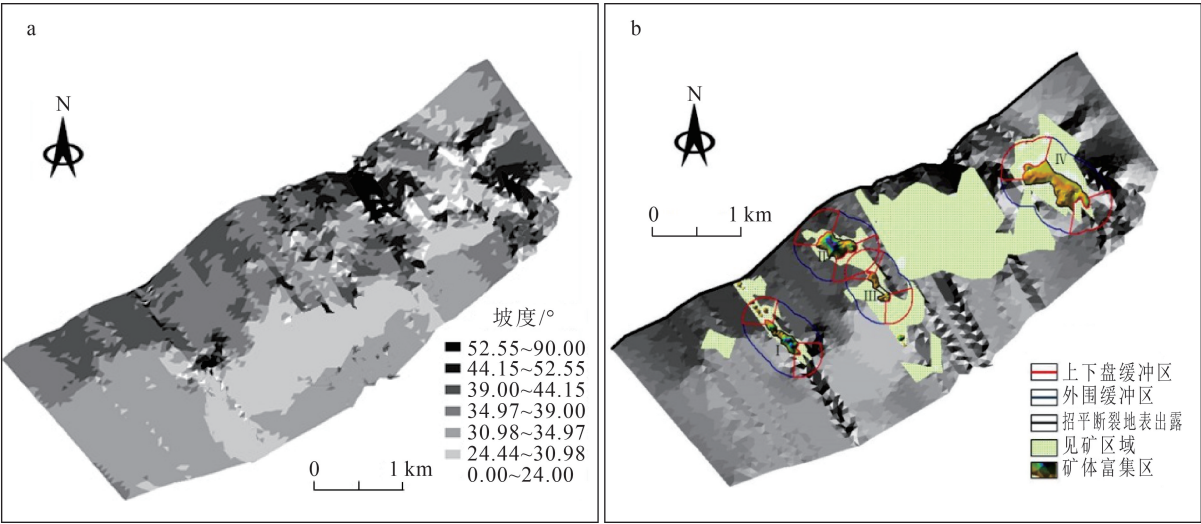


图 9 招平断裂带坡度图(a)和矿化富集区及缓冲区分布图(b)

Fig. 9 The slope map of Zhaoping Fault Zone (a) and the distribution map of mineralization enrichment area and buffer zone (b)

平均 41.13° , 坡度变化大(图 10-a)。整体看, 矿化富集区坡度值小于上、下方坡度值, 说明断裂沿倾斜方向呈现由陡变缓再变陡的过程, 而矿体主要富集在断裂倾角平缓部位。矿化富集区Ⅱ位于 -800 m 标高以浅, 矿化富集区坡度 $34.71^{\circ} \sim 45.30^{\circ}$, 平均

40.42° ; 上方缓冲区坡度 $35.62^{\circ} \sim 44.63^{\circ}$, 平均 40.31° ; 下方缓冲区坡度 $27.33^{\circ} \sim 42.65^{\circ}$, 平均 36.63° (图 10-b)。整体看, 该矿化富集区坡度变化不明显。矿化富集区Ⅲ位于 $-1500 \sim -570\text{ m}$ 标高, 矿化富集区坡度 $24.83^{\circ} \sim 40.82^{\circ}$, 平均 32.17° ; 上方缓冲

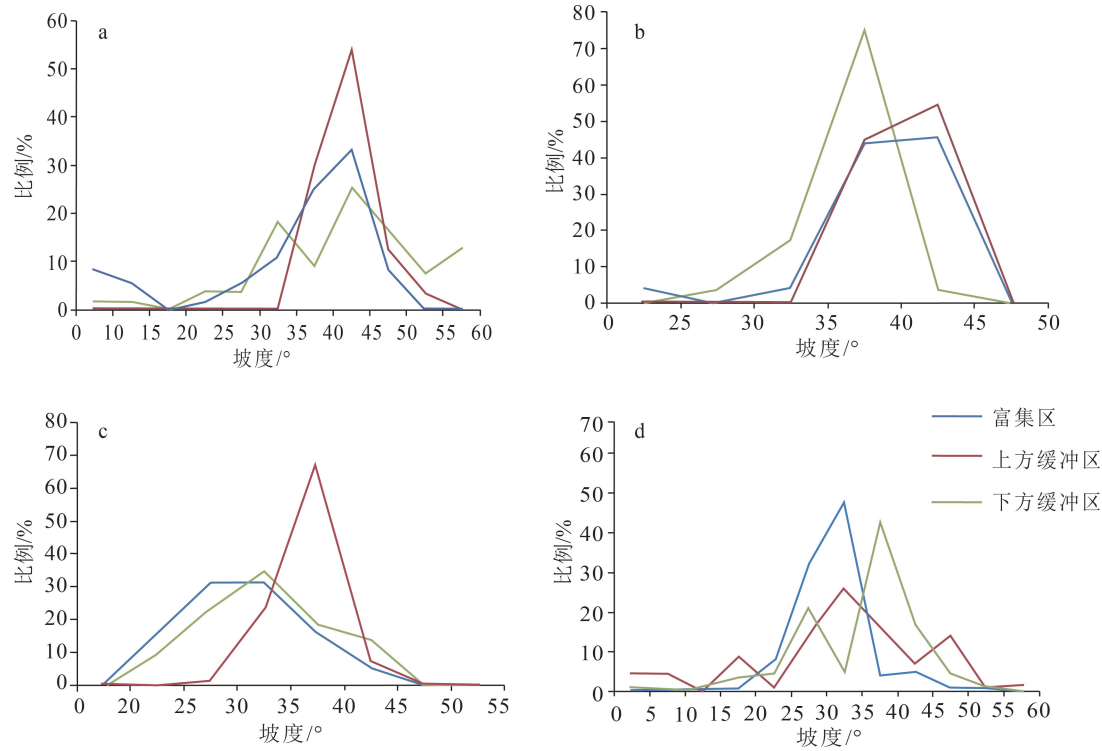


图 10 矿化富集区 I (a)、II (b)、III (c)、IV (d) 及其缓冲区坡度比例折线

Fig. 10 Slope ratio line charts of mineralization enrichment area I (a), II (b), III (c), IV (d) and its buffer zone

区坡度 $28.62^{\circ} \sim 42.29^{\circ}$, 平均 36.57° ; 下方缓冲区坡度 $21.82^{\circ} \sim 42.29^{\circ}$, 平均 32.35° 。整体看, 缓冲区坡度波动较大, 矿化富集区坡度值偏低。矿化富集区 IV 位于 $-1662 \sim -300$ m 标高, 矿化富集区坡度 $18.25^{\circ} \sim 51.27^{\circ}$, 平均 30.62° ; 上方缓冲区坡度 $23.18^{\circ} \sim 55.71^{\circ}$, 平均 36.84° ; 下方缓冲区坡度 $16.94^{\circ} \sim 51.03^{\circ}$, 平均 35.90° 。整体看, 缓冲区坡度变化较大, 矿化富集区坡度值明显偏低。

总之, 4 处矿化富集区的缓冲区坡度值波动均较大, 而矿化富集区表面坡度相对平缓。这说明, 断裂表面坡度变化控制了金矿体的分布和矿化富集程度, 断裂表面坡度变化较大的区域有利于金成矿, 而坡度陡缓转折的较缓部位易形成厚度大、品位高的矿化富集区。将金矿化富集等值线与断裂表面变化率图叠合发现, 金矿化富集区域与断裂变化率大的区域吻合, 同样指示断裂坡度变化大的区域是成矿的有利区域。断裂坡度变化与矿体分布和矿化富集的关系, 符合阶梯成矿模式^[3,6], 其形成机理是: 成矿流体沿断裂运移时, 在断裂陡倾段, 流体由较深部的高压区向较浅部的低压区快速运移, 不易沉淀成矿; 在断裂缓倾段, 流体在近等压条件下横向缓慢运移, 易沉淀成矿。因此, 矿体主要赋存于断裂缓倾段。这种断裂赋矿规律对深部找矿具有实际应用价值, 指导在深部找矿中应重视对控矿断裂产状变化的研究和探测, 采用高精度地球物理和三维建模等技术手段, 查清断裂深部结构, 将断裂产状明显变化的区段圈定为重点钻探验证靶区。

5 结 论

本文基于胶东水旺庄、李家庄、东风、东风 171、岭南、栾家河 6 个金矿区的勘查成果资料, 通过对 375 个钻孔数据处理, 建立了金矿床三维地质模型, 对矿体特征进行了三维可视化分析。

(1) 以往分别勘查的相邻 6 个矿区均受招平断裂控制, 位于同一矿化蚀变带, 其主要矿体在三维空间上相互连接或在较近距离内平行、断续分布, 实际为同一矿床, 矿床金资源量大于 600 t, 为一个超巨型金矿床, 即玲南-水旺庄金矿床。矿床中矿体主要分布于断裂产状变化较大的区域。

(2) 矿体厚度变化较大, 厚度高值区与低值区相间分布; 矿体品位较均匀, 品位与厚度呈正相关,

关系数为 0.192; 品位×厚度值变化明显, 构成 4 处矿化富集区。

(3) 断裂倾角变化是金矿化富集的关键因素, 矿体多分布于断裂表面坡度变化较大的区域, 而矿化富集区主要分布于断裂坡度陡缓转折的较缓部位。因此认为, 深部找矿要重视对控矿断裂产状变化的研究和探测。

致谢: 本次研究得到山东省地质矿产勘查开发局首席专家宋明春的详细指导, 在此表示诚挚的谢意, 同时感谢审稿专家提出的宝贵修改意见。

参考文献

- [1] 李士先, 刘长春, 安郁宏, 等. 胶东金矿地质 [M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [2] 吕古贤, 崔书学, 周明岭, 等. 胶东金矿成矿规律和成矿模式研究 [J]. 矿物学报, 2011, 31(S1): 72-73.
- [3] 宋明春, 伊丕厚, 徐军祥, 等. 胶西北金矿阶梯式成矿模式 [J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(7): 992-1000.
- [4] 丁正江, 孙丰月, 纪攀, 等. 胶东中生代有色金属及贵金属矿床成矿系列 [J]. 地质论评, 2015, 61(S1): 816-817.
- [5] 王德瑞. 胶西北金矿床构造-流体成矿动力学 [D]. 中国地质大学 (北京) 博士学位论文, 2020.
- [6] 宋明春, 林少一, 杨立强, 等. 胶东金矿成矿模式 [J]. 矿床地质, 2020, 39(2): 215-236.
- [7] 宋明春, 宋英昕, 丁正江, 等. 胶东金矿床: 基本特征和主要争议 [J]. 黄金科学技术, 2018, 26(4): 406-422.
- [8] 宋明春. 大型-超大型矿床勘查方法与实践 [M]. 北京: 地质出版社, 2018: 1-397.
- [9] 宋明春, 李三忠, 伊丕厚, 等. 中国胶东焦家式金矿类型及其成矿理论 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2014, 44(1): 87-104.
- [10] 张瑞忠. 招平金矿带构造控矿机理及深部成矿预测 [D]. 中国地质大学 (北京) 博士学位论文, 2017.
- [11] 宋明春. 胶东金矿深部找矿主要成果和关键理论技术进展 [J]. 地质通报, 2015, 34(9): 1758-1771.
- [12] 宋明春. 胶西北金矿集中区深部大型-超大型金矿找矿与成矿模式 [M]. 北京: 地质出版社, 2010: 1-339.
- [13] 张丕建, 宋明春, 刘殿浩, 等. 胶东玲珑金矿田 171 号脉深部金矿床特征及构造控矿作用 [J]. 矿床地质, 2015, 34(5): 855-873.
- [14] 宋英昕, 宋明春, 丁正江, 等. 胶东金矿集区深部找矿重要进展及成矿特征 [J]. 黄金科学技术, 2017, 25(3): 4-18.
- [15] 刘国栋, 宋国政, 鲍中义, 等. 胶东招平断裂北段深部找矿新突破及对断裂空间展布的新认识 [J]. 大地构造与成矿学, 2019, 43(2): 226-234.
- [16] 霍光, 刘彩杰, 范家盟, 等. 胶东玲珑金矿田深部钻孔揭露招平断裂带及其意义 [J]. 矿产勘查, 2019, 10(7): 1609-1617.
- [17] 于学峰, 李大鹏, 田京祥, 等. 山东金矿深部勘查进展与成矿理论创新 [J]. 山东国土资源, 2018, 34(5): 1-13.
- [18] 武强, 徐华. 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), 2004, (1): 54-60.
- [19] 陈麒玉, 刘刚, 何珍文, 等. 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, 2020, 39(4): 51-58.
- [20] 田宜平, 吴冲龙, 翁正平, 等. 地质大数据可视化关键技术探讨[J]. 地质科技通报, 2020, 39(4): 29-36.
- [21] 潘诗辰, 毛先成. 三维空间下的证据权建模方法与资源预测应用[J]. 地质学刊, 2015, 39(3): 373-382.
- [22] 吕鹏, 张炜, 刘国, 等. 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, 2013, (3): 13-18.
- [23] 张夏林, 吴冲龙, 周琦, 等. 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, 2020, 39(4): 12-20.
- [24] 李章林, 吴冲龙, 张夏林, 等. 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, 2020, 39(4): 59-68.
- [25] 刘刚, 吴冲龙, 何珍文, 等. 面向地质时空大数据表达与存储管理的数据模型研究[J]. 地质科技通报, 2020, 39(1): 164-174.
- [26] 余牛奔, 齐文涛, 王立欢, 等. 基于 3DMine 软件的三维地质建模及储量估算——以新疆巴里坤矿区某井田为例[J]. 金属矿山, 2015, (3): 138-142.
- [27] 吴志春, 郭福生, 林子瑜, 等. 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), 2016, 46(6): 1895-1913.
- [28] 曹婧. 面向地质建模的数据管理技术研究及应用[D]. 中国石油大学(华东)硕士学位论文, 2017.
- [29] 王功文, 张智强, 李瑞喜, 等. 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, 2021, 51(9): 1594-1610.
- [30] 刘同文, 于广婷, 张志进, 等. 胶东金矿三维地质建模技术研究[J]. 地矿测绘, 2018, 34(2): 1-3.
- [31] 胡莹. 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, 2014, 37(2): 90-94.
- [32] 李晔, 张保威. 基于过程优化的三维建模流程优化方法[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2013, 26(3): 432-435.
- [33] 张伟, 薛林福, 彭冲, 等. 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, 2013, 22(5): 403-408.
- [34] 冉祥金. 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, 2020.
- [35] 陈东锋, 邹艳红, 毛先成, 等. 大尹格庄金矿床矿体三维建模与矿化分布规律[J]. 地质找矿论丛, 2014, 29(4): 527-534.
- [36] 毛先成, 王琪, 陈进, 等. 胶西北金矿集区深部成矿构造三维建模与找矿意义[J]. 地球学报, 2020, 41(2): 166-178.
- [37] 刘亢, 曲国胜, 宁宝坤, 等. 坡度分析在昆明盆地断层分段中的应用[J]. 防灾科技学院学报, 2012, 14(4): 1-7.
- [38] 卢喜平. 基于 Google Earth 的 DEM 数据获取及坡度分析应用[J]. 四川水利, 2018, 39(5): 100-104.
- [39] 卢尚龙. 基于 ArcGIS 不规则三角网的三维建模与坡度分析[J]. 广东科技, 2014, 23(Z1): 108-109.
- ①李洪奎, 胶东金矿构造环境与成矿作用. 山东省地质科学实验研究院, 2016.