

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.06.007

胶东大尹格庄-曹家洼金矿床三维空间特征及矿化富集规律新认识

解天赐^{1,2,3},戴长国^{4*},李瑞翔^{2,3},刘向东^{2,3},隋晓玲²,薛欢欢²XIE Tianci^{1,2,3}, DAI Changguo^{4*}, LI Ruixiang^{2,3}, LIU Xiangdong^{2,3}, SUI Xiaoling²,XUE Huanhuan²

1. 山东理工大学资源与环境工程学院, 山东 淄博 255000;

2. 山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队, 山东 招远 265400;

3. 山东省深部金矿探测大数据应用开发工程实验室, 山东 威海 264209;

4. 山东省核工业二七三地质大队, 山东 烟台 264000

1. School of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong, China;

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

3. Shandong Provincial Big Data Application and Development Engineering Laboratory of Deep Gold Prospecting, Weihai 264209, Shandong, China;

4. Shandong Province Nuclear Industry Geological Group 273, Yantai 264000, Shandong, China

摘要:基于291个钻孔资料建立了大尹格庄-曹家洼金矿床三维地质模型,剖析了金矿床的三维空间特征,指出了深部找矿方向。矿床主要由4个规模较大的矿体组成,矿体赋存于招平断裂下盘,主要分布在0~-1740 m标高之间。赋矿的招平断裂表面起伏变化明显,表现出浅部倾角较陡,向深部逐渐变缓的特征。招平断裂及金矿体受后期断裂切割。将被切割的矿体复原后进行三维可视化分析表明,主矿体厚度三维分布不均匀,呈厚、薄相间分布;主矿体品位分布较均匀,厚度较大区域品位也较高,二者相关系数为0.352;厚度×品位三维分布显示了明显的NEE向侧伏特征,侧伏向75°。矿床有4个矿化富集段,其空间位置与断裂倾角沿倾向呈现的三段陡-缓转折和相对缓倾角位置吻合,构成阶梯成矿特征。这说明,断裂倾角变化对金的沉淀富集有明显的控制作用,今后找矿中应重视对断裂倾角变化的研究和探测。分析认为,①-1与I-2号矿体之间、I-2号矿体北侧、沿②-69矿体75°方向延深位置均具有较好的找矿前景。研究成果为该矿床的深入研究和进一步深部找矿提供了重要的依据。

关键词:三维模型;深部金矿;大尹格庄-曹家洼;矿化富集规律

中图分类号:P618.51;P628+.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)06-0986-07

Xie T C, Dai C G, Li R X, Liu X D, Sui X L, Xue H H. New understandings of 3D feature and mineralization enrichment regularity in the Dayingezhuang-Caojiawa gold deposit of Jiaodong Peninsula. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(6): 986-992

Abstract: This paper established a 3D geological model of the Dayingezhuang-Caojiawa gold deposit based on 291 boreholes data, analyzed the characteristics of gold deposit in the three-dimensional space and pointed out the direction of deep prospecting. The deposit consists of four large ore bodies which mainly distributed between 0 and -1740 m elevation in the footwall of Zhaoping fault. The surface undulation of Zhaoping fault where occurred the orebodies changes obviously, showing the characteristics of steep dip in the

收稿日期:2021-11-14;修订日期:2022-02-21

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)和山东省第六地质矿产勘查院《焦家式金矿编著》(编号:LYKY2020-01)

作者简介:解天赐(1990-),男,工程师,从事地质矿产勘查。E-mail:chdxct@163.com

*通信作者:戴长国(1972-),男,工程师,从事地质矿产勘查工作。E-mail:sygh266@163.com

shallow part and gradual slowdown to the deep part. Zhaoping fault and gold ore bodies are cut by later faults. The three-dimensional visualization analysis of the rehabilitated ore body from shows that the 3D thickness distribution of main ore body is not uniform, showing thick and thin alternating distribution; The distribution of the grade of the the main ore body is uniform, and the area with larger thickness also has higher grade. The correlation coefficient between the thickness and the grade is 0.352. The three-dimensional distribution of thickness \times grade shows that the ore body has an obvious NEE lateral characteristic, with lateral direction of 75°. There are four enrichment mineralization sections in the deposit, and their spatial locations are consistent with the three positions where the dip angle of the fault change from steep to slow and the position where the fault has a relatively slow inclination, which formed the characteristics of step mineralization. It indicates that the variation of fault dip angle has an obvious control effect on gold precipitation and enrichment. The study and detection of fault dip Angle should be emphasized in future prospecting work. The analysis shows that the position between ①-1 and I-2 orebody, the north of I-2 orebody and the position along the 75° direction of ②-69 orebody all have good prospecting prospect. The research results provide an important basis for further research and deep prospecting of the deposit.

Key words: 3D model; deep gold mine; Dayingezhuang-Caojiawa; mineralization enrichment regularity

大尹格庄-曹家洼金矿床是胶东招平断裂成矿带中部的重要矿床,多位学者对矿床构造特征^[1-3]、成矿规律^[4]、找矿模式^[5]、找矿方向^[6-9]等进行了研究。近年来,随着矿床深部勘查工作取得重要的突破,有学者进行了矿床三维地质建模^[10-13]、深部成矿规律^[14-19]、三维成矿预测^[20-23]等研究。但以往的研究主要是利用浅部勘查和矿山开采资料,尚没有利用近年的深部勘查资料进行三维地质建模和可视化分析,对矿床主要矿体的三维空间分布、深-浅部变化、矿体与断裂构造的空间关系等缺乏深入的认识,制约了对成矿规律的深入研究和深部找矿前景的准确判断。本文在全面收集利用矿山生产和矿床最新勘探成果资料的基础上,基于 291 个钻孔资料建立了大尹格庄-曹家洼金矿床三维地质模型,对矿体和主要控矿地质因素的三维空间形态进行了精细刻画和分析,指出了深部找矿方向,为矿床的深入研究和进一步深部找矿提供了重要的依据。

1 地质概况

矿床位于招平断裂中段,断裂下盘(西侧)为侏罗纪玲珑型花岗岩,上盘(东侧)为早前寒武纪变质岩系,包括古元古代荆山群和新太古代 TTG 质花岗片麻岩(图 1)。招平断裂带大致沿玲珑花岗岩与早前寒武纪变质岩系接触带展布,总体走向 20°,倾向 SE,倾角 21°~58°;断裂蚀变带宽 4~78 m,最宽达 140 m。断裂南段较平直,北段呈蛇曲状,沿倾向略显波状弯曲,穿切玲珑型花岗岩。大尹格庄断裂、栾家河断裂、南周家断裂切割并错断招平断裂。

2 矿床三维地质模型构建方法

三维地质建模方法,按建模数据源可分为地质填图(PRB)数据建模、钻孔数据建模、三维地震资料建模、剖面数据建模、多源数据融合建模^[24-31]。前 4 种建模方法为单一数据建模方法,建模数据单一且模型尺度受限,不能充分反映实际地质情况,而基于地质、物探、化探、遥感、钻探等多源数据的建模方法,数据利用率高,数据间综合解释并相互印证,构建的模型准确性高,是本次采用的建模方法。

本次采用北京超维创想信息技术有限公司 Creator XModeling 软件构建矿床三维模型。地质体

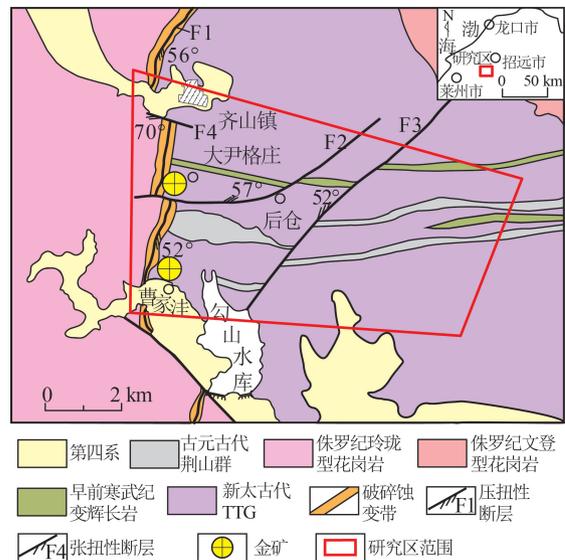


图 1 大尹格庄-曹家洼金矿床地质简图^①

Fig. 1 geological sketch of Dayingezhuang-Caojiawa gold deposit
F1—招平断裂;F2—大尹格庄断裂;F3—栾家河断裂;F4—南周家断裂

模型采用基于多源数据的三维地质体复杂交互建模方式构建。从可利用的基础数据中,提取和解译出单个地质体界面的相关原始数据,建立单个地质体界面的三维空间形态,并进行交互式编辑;然后将建立好的地质体界面进行求交,去掉地质体界面的多余部分;最后将各个地质体界面拼合形成三维地质体^[32]。

2.1 建模数据及参数

三维建模范围包含大尹格庄、后仓、焦格庄、曹家洼4个矿段,数据来源为勘查线剖面图67张、钻孔柱状图291张,1:5万区域地质图1张,1:1万地形地质图5张,数字高程数据1份。

建模范围为东经120°20′01~120°26′34°、北纬37°10′43~37°15′07°,标高为地表至-4000 m。平面地质图比例尺为1:1万,勘查线剖面图比例尺为1:2000,水平控制网度为60 m×60 m,最小厚度设为0.1 m。三维地质模型包括三维岩体模型(包括构造、地表、地层、岩体、围岩、蚀变带)和三维矿体模型。

2.2 建模流程

首先对收集的地质资料进行标准化处理,主要包括统一坐标系、图件拼接及无关内容剔除;其次对支撑三维地质建模的数据(包括钻孔数据、剖面数据、等值线图、等厚线图等进行加工处理,基于地质工作者的经验和认识,根据导入的原始信息,提取和处理地层、断层、矿体、构造异常区等地质体的控制信息,包括地层界线赋属性、模型数据提取、模型质量控制、拓扑检查处理、数据一致性检查等,为建模提供数据基础。以处理后的数据为基础,完成矿区由面元到体元的构建,最终建成包含构造、岩体、地层、矿体等地质体于一体的矿床三维地质模型。

3 矿床三维地质特征

3.1 地层三维特征

区内地层主要为第四系和古元古代荆山群(图2)。第四系呈薄层状覆于地表,水库及河流处厚度较厚,可达十余米。荆山群位于模型体上部,沿NE—SW向呈带状分布,两侧延伸至模型体外,模型范围内东西长8800 m,南北宽148~723 m,厚度不足200 m,中部被栾家河断裂错断。

3.2 岩体三维特征

岩体为模型体的主要组成部分,在招平断裂的上、下盘均有分布。上盘主要为新太古代栖霞TTG片麻岩,下盘为侏罗纪玲珑花岗岩岩体。

栖霞片麻岩在模型体内呈楔形,沿南、东、北3个方向延伸至模型体外,顶面为较平缓的剥露面,底面紧贴断裂蚀变带展布,与断裂面基本平行。受构造影响,底面沿EW方向呈阶梯状,沿SN方向呈波状。岩体厚度自西向东逐渐增大,模型范围内最厚可达3639 m。

玲珑岩体主体位于模型体下部,在模型体西侧出露地表,大部分位于招平断裂下盘,上覆早前寒武纪变质岩系(图2)。上表面呈不规则凹槽状、阶梯状或波状,底面延伸至模型体外。

3.3 断裂三维特征

招平断裂带(位于模型体中部且贯穿整个模型,总体走向352°~38°,倾向SEE,倾角9°~50°,宽20~100 m。主断裂面沿侏罗纪玲珑岩体与新太古代栖霞TTG片麻岩接触界面展布。平面形态变化较大,呈“S”形展布。被NE向大尹格庄断裂、栾家河断裂及近EW向的南周家断裂错断呈6段(图3)。沿招平断裂发育破碎蚀变带,以主断裂面为界,向两侧破碎、蚀变程度逐渐减弱。断裂表面起伏变化明显,浅部倾角较陡,向深部逐渐变缓,南部倾角较缓,北部倾角较陡。

大尹格庄断裂位于模型体西北部,切割招平断裂(图3),上盘向SW移动,并被南周家断裂错断。大尹格庄断裂地表呈弧形弯曲,走向56°~100°,倾向NW,倾角42°~60°,自浅部向深部,倾角由陡变缓。断裂的水平断距为260~450 m,垂直断距260~450 m。

栾家河断裂位于模型体中部(图3),切割招平断裂,上盘向SW移动,也被南周家断裂错断。断裂走向44°~52°,倾向NW,倾角50°~55°。水平断距300~600 m,垂直断距200~300 m。

南周家断裂位于模型体北侧,地表可见露头,整体走向105°,倾向SW,倾角较陡,切割招平断裂、大尹格庄断裂和栾家河断裂(图3),断裂上盘向东移动,水平断距140~750 m。垂直方向错动不大。

3.4 破碎蚀变带三维特征

破碎蚀变带沿招平断裂主断面两侧(上、下盘)展布,其形态和产状与招平断裂基本一致,上覆岩

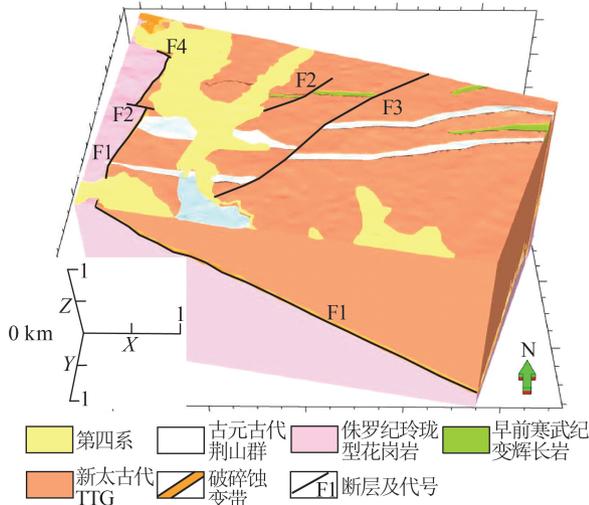


图 2 大尹格庄-曹家洼金矿床三维地质模型

Fig. 2 3D geological model of Dayingezhuang-Caojiawa gold deposit

体主要为栖霞 TTG 花岗岩, 下伏玲珑花岗岩。模型体内蚀变带走向长 6.5 km, 倾斜长 8.8 km, 厚度变化较大, 从几十米至几百米。蚀变带上、下表面均呈凹槽状、阶梯状或波状, 受多次构造影响, 蚀变带被错断为 6 个部分。整体看, 浅部蚀变带产状较陡, 向深部逐渐变缓, 模型体南侧蚀变带较陡, 北侧蚀变带较缓。

3.5 矿体三维特征

已控制和建模的金矿体主要分布在-1740 m 标高以浅。本次三维建模对矿床中以往不同阶段、不同矿段、不同勘查单位圈定的金矿体进行了重新圈连。共圈定矿体 133 个, 其中主要矿体有 4 个。

矿体主要赋存于招平断裂主裂面下盘。浅表部见矿效果较差, 在 0 m 标高以上近乎不见矿。向深部金矿体形态趋于完整, 具明显的 NE 向侧伏(图 4-a)。①-1、②-1、②-69 和 I-2 号矿体为 4 个主矿体(图 4-b), 主矿体呈似层状, 沿倾向的延伸大于沿走向的延长。主矿体浅部形态复杂, 分支复合现象明显, 向深部矿体形态趋于简单。小矿体多且零散, 多为透镜状、小脉状, 且浅部小矿体明显多于深部。

4 金矿体空间位置复原及品位、厚度变化分析

4.1 矿体位置复原

在三维地质模型中, 大尹格庄-曹家洼金矿床断裂构造复杂, 大尹格庄、栾家河和南周家 3 条断裂错断招平断裂带, 并将受招平断裂控制的金矿体分

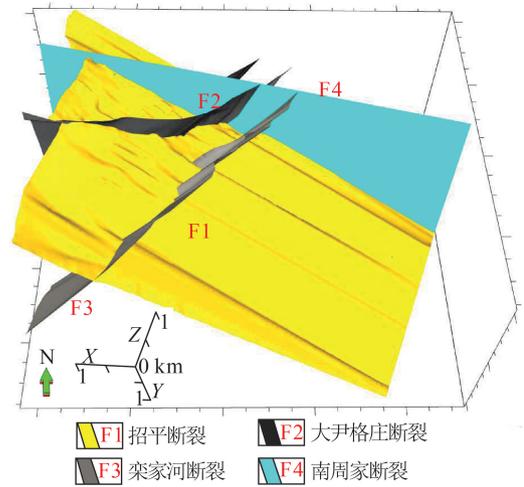


图 3 大尹格庄-曹家洼金矿床断裂构造三维模型

Fig. 3 3D model of fault in the Dayingezhuang-Caojiawa gold deposit

割成多个部分(图 5)。依据断裂之间及断裂与地质体之间的交切关系, 判断断裂形成的先后顺序为招平断裂—大尹格庄断裂—栾家河断裂—南周家断

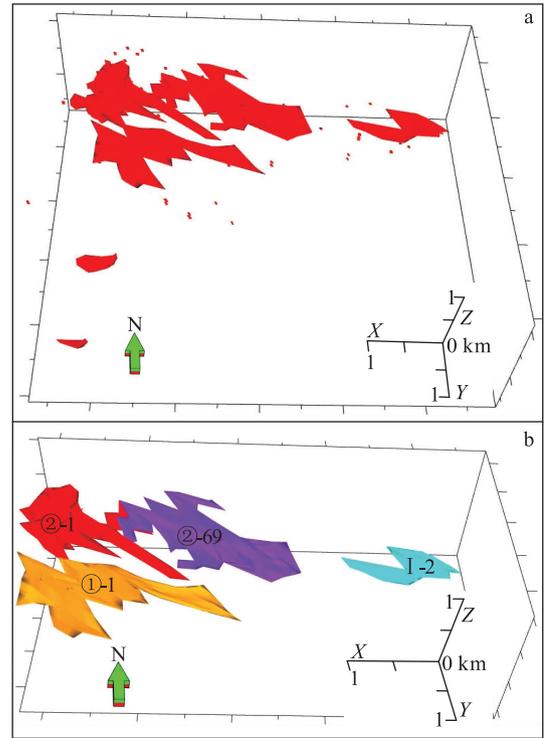


图 4 大尹格庄-曹家洼金矿床矿体三维模型(a) 和主矿体三维模型(b)

Fig. 4 3D model of all ore bodies(a) and the major ore bodies(b) of Dayingezhuang-Caojiawa gold deposit

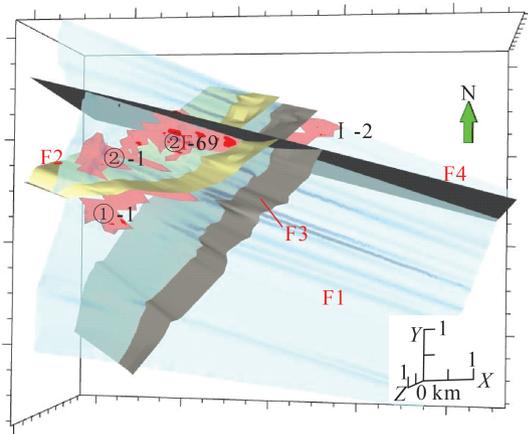


图5 大尹格庄-曹家洼金矿床断裂和主矿体三维模型
Fig. 5 3D model of fault and the major ore bodies of Dayingezhuang-Caojiawa gold deposit

裂。在三维空间上,金主矿体主要赋存于招平断裂主裂面下的黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩带中,虽然被后期断裂切割,但仍能看出其空间位置基本一致。根据断裂的错动方向及断距判断,主要矿体在被断裂错断前应为一个完整的超大型矿体(群)。为深入分析矿体产出规律,利用三维地质建模软件对矿体位置进行了还原。

复原后原①-1、②-1号矿体的空间位置相对应,应为同一矿体被后期的大尹格庄断裂错断,二者之间有一段无矿/弱矿间隔带(图6)。②-1与②-69矿体相互连接为同一矿体。I-2号矿体位于②-69矿体向深部的延伸,他们的空间位置和赋矿岩性基本一致,还原后为同一矿体(图6)。

还原后的主矿体厚度变化(图6)图显示,厚大矿体部位大致沿断裂倾向排列为近似等间距的4行,各行间为无矿/弱矿间隔,弱矿间隔的距离在100~200 m之间。

4.2 矿体品位与厚度分布空间变化

将复原后的矿体抽稀为相同的结点密度,在厚度、品位水平分布图中均匀布点并提取点位相关属性值。合计布点1152个,提取各点的厚度、品位等属性值,制作了厚度、品位分布直方图。

矿床主矿体厚度1.00~102.89 m,平均6.60 m,主要集中在1.00~10.00 m(图7-a),仅少部分区域厚度可达30 m以上。矿体厚度分布不均匀,在走向上和倾向上均呈厚、薄相间分布,无矿、弱矿间隔

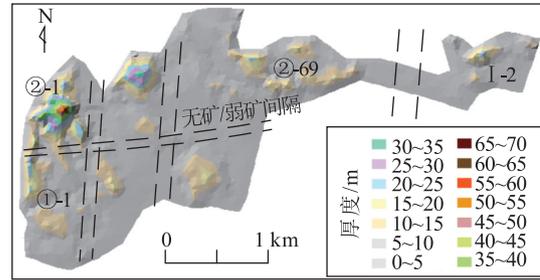


图6 大尹格庄-曹家洼金矿床复原主矿体及厚度变化图
Fig. 6 Thickness contour map of the restored main ore body of Dayingezhuang-Caojiawa gold deposit

明显(图6)。

矿床主矿体品位1.00~14.90 g/t,平均2.23 g/t,主要集中在1.00~5.00 g/t(图7-b),整体品位偏低。矿体品位分布较均匀,矿体中部位位较高,向外围逐渐变降低(图8),厚度较大区域品位往往较高,品位大于5 g/t的部位多对应厚度极高区域。品位与厚度相关系数0.352,呈显著正相关。

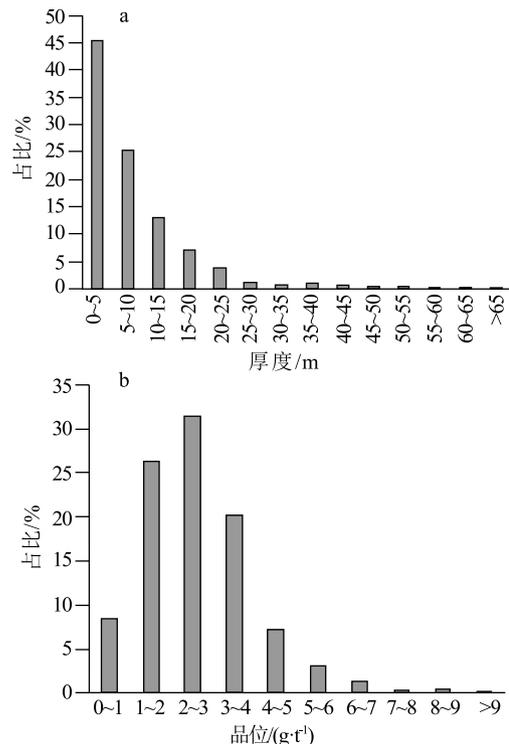


图7 大尹格庄-曹家洼金矿床主矿体厚度(a)和品位(b)分布直方图

Fig. 7 Distribution histogram of thickness (a) and grade (b) of the restored main ore body of Dayingezhuang-Caojiawa gold deposit

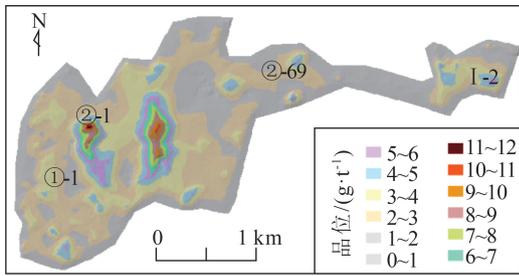


图 8 大尹格庄-曹家洼金矿床复原主矿体品位分布图
Fig. 8 Grade contour map of the restored main ore body of Dayingezhuang-Caojiawa gold deposit

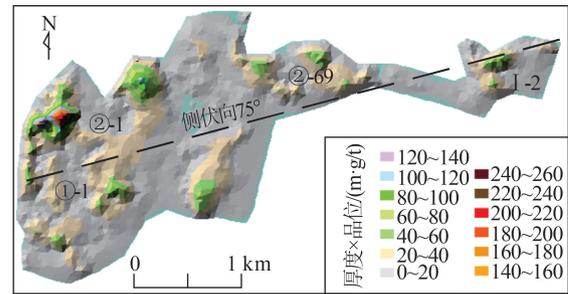


图 9 大尹格庄-曹家洼金矿床复原主矿体厚度×品位分布图
Fig. 9 Thickness×grade contour map of the restored main ore body of Dayingezhuang-Caojiawa gold deposit

矿体厚度×品位分布与厚度分布形态基本一致,指示了矿体品位分布均匀性及品位和厚度之间的正相关性。矿床主矿体厚度×品位值为 $1.00 \sim 257.67 \text{ m} \cdot \text{g/t}$,平均 $17.77 \text{ m} \cdot \text{g/t}$ 。矿体具明显的 NE 向侧伏,存在多处厚度×品位明显偏高的矿化富集段(图 9)。对矿体进行厚度×品位值分布趋势分析表明,矿体的侧伏向约为 75° (图 10)。

5 讨论

矿床的矿化富集规律是正确认识成矿规律和指导找矿的基础和前提。大尹格庄-曹家洼金矿床由于受多条断裂切割,矿体的空间关系一直未查明,对矿化富集规律的认识存在诸多偏差,导致深部找矿方向不明,浪费了很多钻探工程。矿床三维可视化分析提供了深化矿化富集规律认识的新视角。

在矿体复原后的厚度×品位分布图上,出现多处较明显的矿化富集区(图 9)。矿化富集区沿矿体

倾斜方向呈串珠状分布,大致组成南、北 2 个串珠,二者近于平行,其总体展布方向指示的矿体侧伏方向为 75° 。矿体复原前被断裂切割的 4 个主矿体大致显示了 SEE 向的侧伏特征(图 4),使早期深部勘查阶段沿已知矿体向 SEE 方向延伸的深部布设了较多钻探工程,找矿效果不理想。后期将深部钻孔调整到已知矿体的 NEE 向(75°)深部,取得重要找矿进展,探获了②-69、I-2 等金矿体。

矿体厚度×品位明显偏高的矿化富集段,沿矿体倾斜方向大致等距分布,形成矿化强、弱相间分布的空间格局(图 9)。矿化富集段或强矿化区主要有 4 段,其分布的海拔标高分别为 $0 \sim -400 \text{ m}$ 、 $-600 \sim -800 \text{ m}$ 、 $-1000 \sim -1400 \text{ m}$ 、 $-1500 \sim -1700 \text{ m}$,矿化富集段之间弱矿间隔的距离在 $100 \sim 200 \text{ m}$ 之间。

将矿化富集段与赋矿的招平断裂主断面叠合发现,矿化富集段位置与断裂表面坡度陡-缓转折

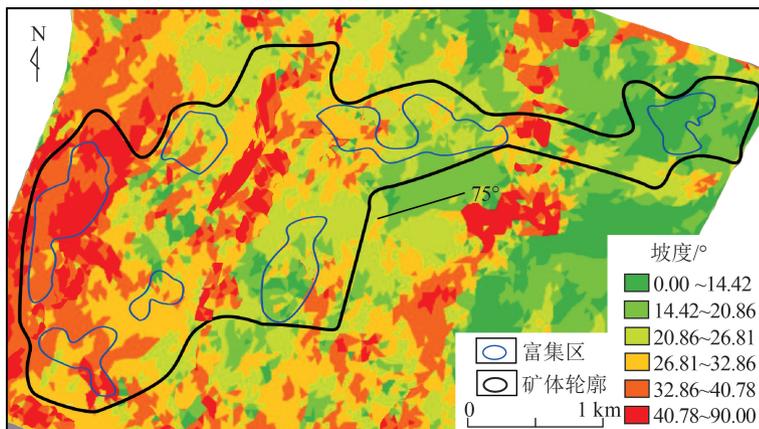


图 10 大尹格庄-曹家洼金矿床显著富集部位与断裂坡度变化部位叠合图
Fig. 10 Superposition map of significant mineralization enrichment areas and fault slope change locations of Dayingezhuang-Caojiawa gold deposit

部位吻合,并主要赋存于断裂倾角较缓位置。如位于复原后矿体 NW 侧的矿化富集段(图 9 中①-1 和②-1 矿体编号左侧)处于断裂倾角由 $40.78^\circ \sim 90^\circ$ 向 $32.86^\circ \sim 40.78^\circ$ 变化的转折部位,且大部分与后者的位置一致(图 10);位于复原后矿体由宽大转为较窄位置的矿化富集段(图 9 中②-69 矿体编号附近)处于断裂倾角由 $26.81^\circ \sim 32.86^\circ$ 向 $20.86^\circ \sim 26.81^\circ$ 变化的转折部位,且大部分与后者的位置一致(图 10)。在断裂坡度变化图(图 10)中显示 3 条 NNE 向延伸的陡倾角带(红色),其间和旁侧为相对缓倾角带(黄色和绿色),指示断裂沿倾向其倾角呈现三段

陡—缓转折的阶梯式变化。在金矿体厚度×品位分布图(图9)中,矿化富集段(图中的较深色者)显示NNE向带状特征,除最西侧的矿化富集段外,其他矿化富集段的位置与断裂缓倾角带吻合。而前述分析表明,最西侧的矿化富集段处于断裂倾角变缓的转折部位。这说明,金矿化富集段主要分布于断裂倾角转折和较缓的台阶部位,由浅部至深部的4段矿化富集段构成阶梯模式^[15,19]。因此认为,断裂倾角变化对金的沉淀富集有明显的控制作用,今后找矿中应重视对断裂倾角变化的研究和探测。

根据上述矿化富集规律和断裂控矿规律,推测在矿床南部原①-1与I-2号矿体之间应存在1处矿化富集区,在I-2号矿体北侧、沿②-69矿体75°方向延深位置也具有较好的找矿前景。

6 结论

(1)基于291个钻孔资料建立了大尹格庄—曹家洼金矿床三维地质模型。三维视角下赋矿的招平断裂表面起伏变化明显,浅部倾角较陡,向深部逐渐变缓。矿床内4条断裂形成的先后顺序为招平断裂—大尹格庄断裂—栾家河断裂—南周家断裂。矿床中的多个矿体在被后期断裂错断前为一个超大型矿体。

(2)矿体复原后,其厚度分布不均匀,呈厚、薄相间分布;矿体品位分布较均匀,矿体厚度较大区域品位也较高,二者相关系数为0.352;厚度×品位三维分布显示了NEE向侧伏特征,呈现7处矿化富集区。

(3)控矿的招平断裂由浅部至深部呈现三段陡—缓转折的阶梯式变化。矿化富集区沿断裂倾斜方向近等间距分布,形成矿化强、弱相间分布的空间格局,其位置与断裂表面坡度陡—缓转折和较缓位置吻合,构成阶梯成矿特征。①-1与I-2号矿体之间、I-2号矿体北侧、沿②-69矿体75°方向延深位置均具有较好的找矿前景。

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。

参考文献

[1] 李子英,张瑞忠,周春生,等.胶东大尹格庄金矿床控矿构造系统[J].金属矿山,2010,405(3):86-90.
 [2] 杨斌,周鑫,段磊,等.胶东大尹格庄金矿区构造演化与控矿作用[J].黄金,2020,41(9):35-40.
 [3] 史启发.大尹格庄金矿构造控矿作用及找矿预测[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文,2013:1-53.
 [4] 庄吉平,李金祥.招远市曹家洼金矿大构造控矿规律[J].黄金科学技术,2001,9(S1):25-27.
 [5] 徐贵忠,杨茂森,周瑞,等.焦家、玲珑和大尹格庄金矿田地质—地球化学找矿模式[J].矿床地质,2002,21(S1):735-738.

[6] 李惠,郑涛,汤磊,等.山东招远大尹格庄金矿床隐伏矿定位预测的叠加晕模式[J].有色金属矿产与勘查,1998,7(3):51-54,58.
 [7] 张瑞忠.胶东大尹格庄金矿床控矿构造规律与矿体定位预测[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文,2008:1-59.
 [8] 张瑞忠,高帮飞,郭春影,等.胶东大尹格庄金矿床矿体定位与成矿预测[J].黄金,2008,29(4):9-13.
 [9] 李卫革,李龙义,张瑞忠,等.胶东大尹格庄金矿床地质特征与深部资源前景[J].地质力学学报,2003,9(3):254-260.
 [10] 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.
 [11] 李彩凤,陈建平.山东省大尹格庄—夏甸金矿田三维立体建模[C]//中国地质学会.中国地质学会2015学术年会论文摘要汇编(中册).2015:243-248.
 [12] 孙书彬,吴洋,姜新吉,等.基于3D CAD MineStar软件的胶东大尹格庄金矿三维数字实体模型的建立[J].黄金科学技术,2015,23(2):63-67.
 [13] 李洪奎,翁占斌,董鑫,等.招平断裂带金矿地质[M].北京:地质出版社,2019:426-518.
 [14] 宋明春,崔书学,伊丕厚,等.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,2010:1-3.
 [15] 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.
 [16] 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机理[J].吉林大学学报(地球科学版),2014,44(1):87-104.
 [17] 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.
 [18] 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.
 [19] 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.
 [20] 李彩凤.山东省大尹格庄—夏甸金矿田三维建模及成矿预测[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文,2016.
 [21] 毛先成,王迷军,刘占坤,等.基于勘查数据的胶东大尹格庄金矿床控矿地质因素定量分析[J].地学前缘,2019,26(4):84-93.
 [22] 陈进,毛先成,刘占坤,等.基于随机森林算法的大尹格庄金矿床三维成矿预测[J].大地构造与成矿学,2020,44(2):231-241.
 [23] 陈进,毛先成,邓浩.山东大尹格庄金矿床深部三维定量成矿预测[J].地球学报,2020,41(2):179-191.
 [24] 李自红,刘鸿福,张敏,等.地震与活动断裂空间关系的三维可视化建模[J].地震地质,2013,35(3):565-575.
 [25] 林冰仙,周良辰,闫国年.虚拟钻孔控制的三维地质体模型构建方法[J].地球信息科学学报,2013,15(5):672-679.
 [26] 周良辰,林冰仙,王丹,等.平面地质图的三维地质体建模方法研究[J].地球信息科学学报,2013,15(1):46-54.
 [27] 吴志春,郭福生,郑翔,等.基于PRB数据构建三维地质模型的技术方法研究[J].地质学报,2015,89(7):1318-1330.
 [28] 吴志春,郭福生,姜勇彪,等.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,2016,52(2):363-375.
 [29] 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.
 [30] 乐靖,王晖,范廷恩,等.基于地震等时格架的倾角导向储层静态建模方法[J].石油物探,2017,56(3):449-458.
 [31] 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.
 ①山东省第六地质矿产勘查院.山东省年招远市后仓矿区金矿详查报告.2016.