

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.06.005

胶东三山岛超巨型金矿床三维地质模型及深部矿体与断裂的耦合关系

李瑞翔^{1,2,3},高书剑^{2,3*},薛冰⁴,李恒猛^{2,3},刘向东^{2,3},隋晓玲^{2,3}LI Ruixiang^{1,2,3}, GAO Shujian^{2,3*}, XUE Bing⁴, LI Hengmeng^{2,3}, LIU Xiangdong^{2,3}, SUI Xiaoling^{2,3}

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. 山东省物化探勘查院, 山东 济南 250013

1. 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 Institute of Geophysical & Geochemical Exploration, Ji'nan 250013, Shandong, China

摘要:近年在胶东三山岛地区的深部和北部海域找矿取得重大进展,已成为中国深部找矿的典型案列。对三山岛金矿床进行三维可视化分析,对指导深部找矿具有重要的实际意义。基于311个钻孔资料建立了三山岛超巨型金矿床的三维地质模型,剖析了金矿床的三维空间特征,指出了沿控矿断裂深部找矿的重点区段。三维可视化分析发现,研究区以往认为各自独立的数个金矿床,主要矿体向深部相互连接,构成资源量超过1000 t的超巨型金矿床;赋矿的三山岛断裂产状起伏变化明显,浅部倾角较陡,向深部逐渐变缓,呈铲式阶梯状。对主要矿体厚度、品位变化与断裂面倾角变化的耦合关系分析表明,矿体品位和厚度沿走向和倾向均呈现高低相间变化的特点,两者呈正相关。金矿体主要赋存于断裂表面坡度较缓段,在三山岛北部海域,三山岛断裂在2000 m深度范围内有2个倾角明显缓倾的台阶,分别赋存了浅部和深部金矿体。其中,浅部台阶位于-20~-600 m标高,断裂表面坡度平均值为48.21°,矿体赋存部位的断裂表面坡度平均值为44.72°;深部台阶位于-940~-1760 m标高,断裂表面坡度平均值为44.56°,矿体赋存部位的断裂表面坡度平均值为42.75°。综合分析认为,断裂的缓倾角段是深部找矿的重点区域。

关键词:三山岛金矿;三维模型;表面坡度;深部找矿;胶东

中图分类号:P618.51;P628⁺.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)06-0968-09

Li R X, Gao S J, Xue B, Li H M, Liu X D, Sui X L. The three-dimensional geological model and the coupling relationship between deep ore body and fault of Sanshandao super giant gold deposit in Jiaodong. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41 (6): 968-976

Abstract: In recent years, great progress has been made in the deep prospecting in the Sanshandao area and the northern sea area, Jiaodong, and it has become a typical case of deep prospecting in China. The three-dimensional visualization analysis of it is of great

收稿日期:2021-06-24;修订日期:2021-12-12

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《胶东金矿集区三维地质建模(玻璃胶东)》(编号:KC2017008)、《胶西北焦家一仓上地区深部金矿成矿预测》(编号:KC2018006)、《胶东金矿集区高品位矿段形成机制及找矿预测》(编号:202009)、山东省第六地质矿产勘查院项目《焦家式金矿》(编号:LYKY2020-01)

作者简介:李瑞翔(1987-),男,工程师,从事地质调查和矿产勘查。E-mail:li ruixiang456@163.com

* 通信作者:高书剑(1969-),男,研究员,从事地质矿产勘查工作。E-mail:lydzkcc@126.com

practical significance to the guidance of deep prospecting. In this paper, the three-dimensional geological model of Sanshandao super giant gold deposit is established based on 311 borehole data. The three-dimensional spatial characteristics of the gold deposit are analyzed, and the key ore-prospecting sections along the ore-controlling faults are pointed out. The three-dimensional visualization analysis shows that the main orebodies of several gold deposits, which were previously considered to be independent, are connected to each other to the deep, and constitute a super-giant gold deposit with more than 1000 tons of resources. The Sanshandao fault, which is endowed with ore, has obvious fluctuation of occurrence, with steep dip angle in the shallow part and gradual slow dip angle in the deep part, showing a shovel step shape. The coupling relationship between the thickness and grade of the main orebody and the dip angle of the fracture surface shows that the grade and thickness of ore body change alternately along strike and dip, and they are positively correlated. The gold orebody mainly occurs in the section where the fracture surface with relatively low slope. In the northern sea area, the Sanshandao fault has two significant steps with low-angle dip in 2000 m depth range, which occurrence the shallow and deep gold ore body respectively. In the shallow step of the fracture, which located at $-20\sim-600$ m elevation, the average slope of the surface is 48.21° while it is 44.72° at the orebody occurrence section. In the deep step of the fracture, which located at $-940\sim-1760$ m elevation, the average slope of the surface is 44.56° while it is 42.75° at the orebody occurrence section. Comprehensive analysis shows that the gentle dip angle section of the fault is the key area for deep ore prospecting.

Key word: Sanshandao gold deposit; 3D model; surface slope; deep prospecting; Jiaodong

胶东是中国重要的黄金资源基地和全球三大金矿集区之一, 累计探明金资源储量占全国总量的 $1/3$ 左右^[1-2]。胶东地区位于华北板块东南缘, 郯庐断裂以东, 秦岭-大别山-苏鲁造山带的西北部, 为华北克拉通东南缘与大别-苏鲁造山带东北段的结合位置, 由隶属华北板块的胶北隆起、胶莱盆地和苏鲁超高压带的威海隆起组成。该地区共有 200 余处探明资源储量的金矿床(区), 集中分布于胶西北(莱州-招远)、栖霞福(栖霞-蓬莱-福山)和牟乳(牟平-乳山)3 个成矿小区(图 1)^[3]。自 2011 年实施找矿突破战略行动以来, 在胶东的三山岛、焦家、招平等重要金矿带连续实现找矿重大突破^[4], 新发现 4 个储量在 100 t 以上的超大型金矿床, 8 个大型金矿床, 121 个中小型金矿床, 新增金资源储量 2957.62 t。三山岛断裂带是胶西北三大金矿成矿带之一, 近年在三山岛矿区深部及北部海域分别探明 383 t 和 470 t 金资源储量^[5-7], 取得了丰富的深部找矿成果。

以往研究通过二维图(各种尺度平面地质图、地质剖面图)或准三维图(栅状图、晕渲图)的方式表达地质现象, 缺乏对矿床三维特征的直观表达, 制约了对矿床空间分布规律的深入研究和深部找矿信息的准确捕捉^[8-13]。20 世纪 90 年代以来, 三维地学模拟相关理论及方法蓬勃发展, 为地学研究提供了全新的视角和手段。三维地质建模更注重三维结构和属性建模、空间分析和模拟技术的发展与应用, 已成为地学与信息科学的交叉技术前沿和攻

关热点^[14-18]。就三山岛地区而言, 虽然前人对该区的金矿床进行了大量勘查研究^[19-24], 但尚没有清晰地刻画出金矿床的三维空间特征, 尤其是对不同勘查区之间矿体的空间关系、矿体的深部产出规律及深部矿体与断裂构造的耦合关系缺乏深入研究。宋明春等^[3]提出, 以前认为由多个独立矿床组成的三山岛金矿田实际为一个超巨型金矿床, 开启了对三山岛地区金矿床勘查研究的新思路。本文在系统处理研究区大量矿产勘查数据的基础上, 基于 311 个钻孔资料建立了三山岛超巨型金矿床三维地质模型, 分析了矿床的三维特征, 探讨了断裂与矿体的耦合关系。为进一步开展深部找矿和矿床研究提供了重要依据, 期望为中国相似类型的矿床勘查提供典型示范。

1 矿床三维地质建模方法

1.1 建模数据

建模使用的数据资料为三山岛北部海域矿段、三山岛矿段、西岭矿段、新立矿段等勘查成果资料, 包括勘查线剖面图 81 张、钻孔柱状图 311 张、1:5 万区域地质图 1 张、1:1 万地形地质图 5 张和数字高程数据 1 份。

311 个钻孔主要分布于三山岛北部海域、三山岛、西岭和新立 4 个矿段(图 2), 数据来源于各矿段勘查报告, 浅部大致形成 $114\sim 214$ m \times $112\sim 230$ m (走向 \times 斜深)的工程间距, 深部及外围大致形成 $224\sim 382$ m \times $176\sim 430$ m (走向 \times 斜深)的工程间距,

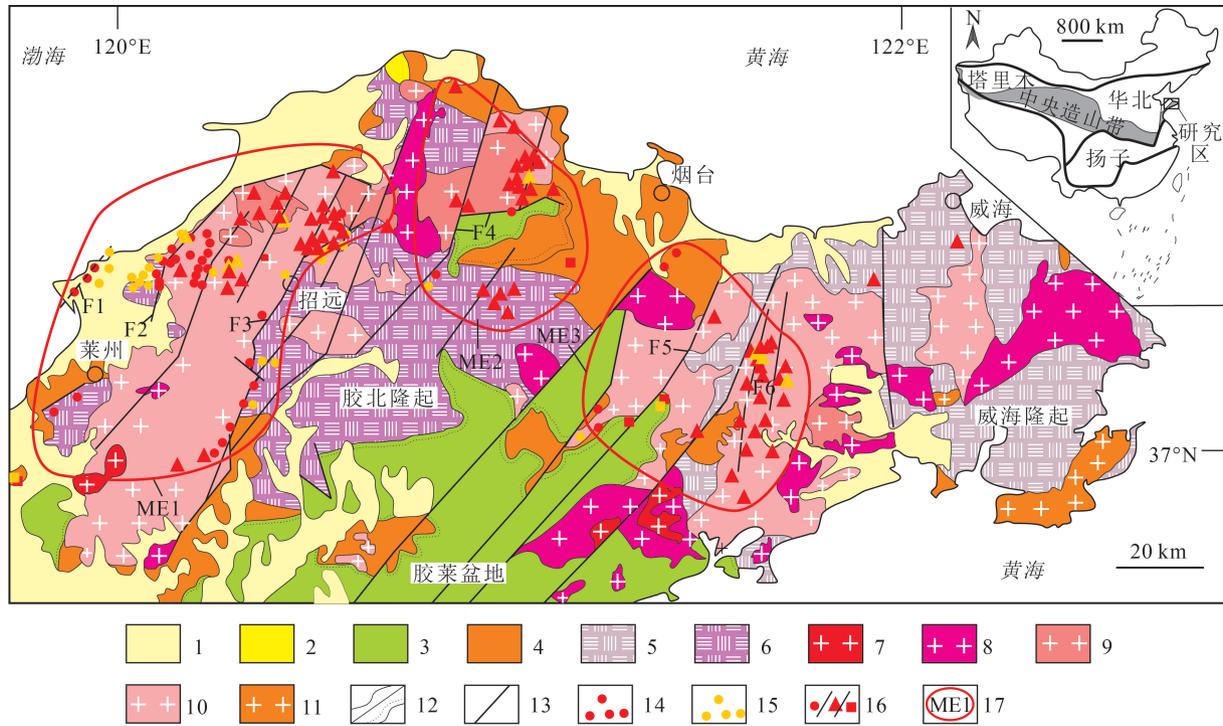


图 1 胶东地区区域地质及金矿床分布图^[3]

Fig. 1 Regional geological map of the Jiaodong Peninsula showing the distribution of gold deposits

1—第四系;2—新近系、古近系;3—白垩系;4—古—新元古界;5—含榴辉岩的新元古代花岗质片麻岩;6—太古宙花岗—绿岩带;7—白垩纪崂山花岗岩;8—白垩纪伟德山花岗岩;9—白垩纪郭家岭花岗岩闪长岩;10—侏罗纪花岗岩;11—三叠纪花岗岩;12—整合/不整合地质界限;13—断层;14—以往探明的浅部金矿床位置(直径由大到小分别表示资源储量≥100 t 的超大型金矿床、资源储量 20~100 t 的大型金矿床、资源储量 5~20 t 的中型金矿床和资源储量小于 5 t 的小型金矿床);15—新探明的深部金矿床位置(直径大小的意义同图例 14);16—蚀变岩型金矿/石英脉型金矿/其他类型金矿;17—金成矿小区范围及编号;ME1—胶西北成矿小区;ME2—栖霞福成矿小区;ME3—牟乳成矿小区

最大勘查深度为 2300 m。

1.2 数据处理

数据处理主要包括平面数据处理、剖面数据处理、钻孔数据处理等。

平面数据处理主要是对矿区平面地质图进行坐标系统和格式转换,随后对图件进行拼接并删除

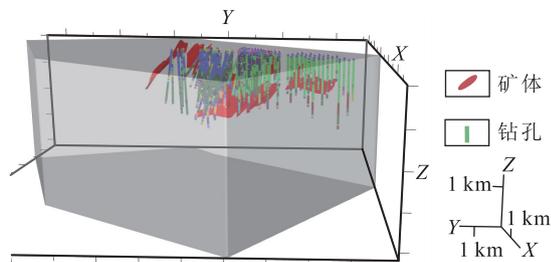


图 2 三山岛超巨型金矿床矿体和钻孔三维模型图

Fig. 2 Three-dimensional model of ore body and borehole in Sanshandao super giant gold deposit

与建模无关的部分内容,最后对形成的图件进行属性赋值。剖面数据处理主要是对不同矿段勘查线剖面图矢量化,在原矿体圈定的基础上对各矿段缝合部位矿体进行重新圈定,确保矿体的连续性。勘查线剖面一般浅部有较系统的探矿工程控制,深部无探矿工程控制,依据矿床成矿规律、矿床模型及综合物探反演形成。钻孔数据处理主要是对收集的 311 个钻孔进行数字化,包括钻孔开孔坐标、孔深、测斜数据、岩性分层数据、样品采集信息、样品基本分析结果等。

1.3 建模参数

模型构建所用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。

1.4 建模方法

三维地质体建模采用基于多源数据和多方法

集成的模型构建策略。针对地质情况的复杂性和多解性,采用基于复杂地质体的交互建模方案。三维可视化实体建模主要包括矿床范围内地层、构造、岩浆岩、围岩蚀变和矿化体 5 种实体模型。

建模的程序包括数据预处理、生成断层面、处理断层之间的接触关系、生成被断层截切的地层面、处理上下地质体的交切关系、生成封闭地质体,以及将构造、地层、岩体、矿体等多种类型的地质单元最终融合成一套地质模型。

2 矿床三维空间特征

2.1 区域地质概况

三山岛巨型金矿床位于胶东西北部,区域内出露基岩要为侏罗纪玲珑型花岗岩和新太古代胶东变质杂岩(太古宙花岗-绿岩带),局部有白垩纪郭

家岭型花岗岩和伟德山型花岗岩,有较多中基性和酸性脉岩,西部沿海区域被大面积第四系松散沉积物覆盖(图 3)。断裂构造较发育,主要为 NNE—NE 走向,也见近 SN 和 NW 走向的断裂,三山岛和焦家断裂是胶东 2 条重要的控矿断裂带^[25-27]。

2.2 主要地质体三维特征

矿床三维模型区主要由第四系、侏罗纪玲珑型花岗岩,新太古代胶东变质杂岩和三山岛断裂成矿带组成(图 4-a)。第四系呈层状,起伏较小,厚度一般为 30~40 m,最厚 50 m。玲珑型花岗岩是模型区的主要地质体,隐伏于第四系及新太古代胶东变质杂岩之下,被三山岛断裂带一分为二(图 4-c、e),岩体顶面呈不规则凹槽状,波状起伏明显,底面超出模型深度。新太古代胶东变质杂岩位于三山岛断裂带上盘,隐伏于第四系之下。有东西两片分布区

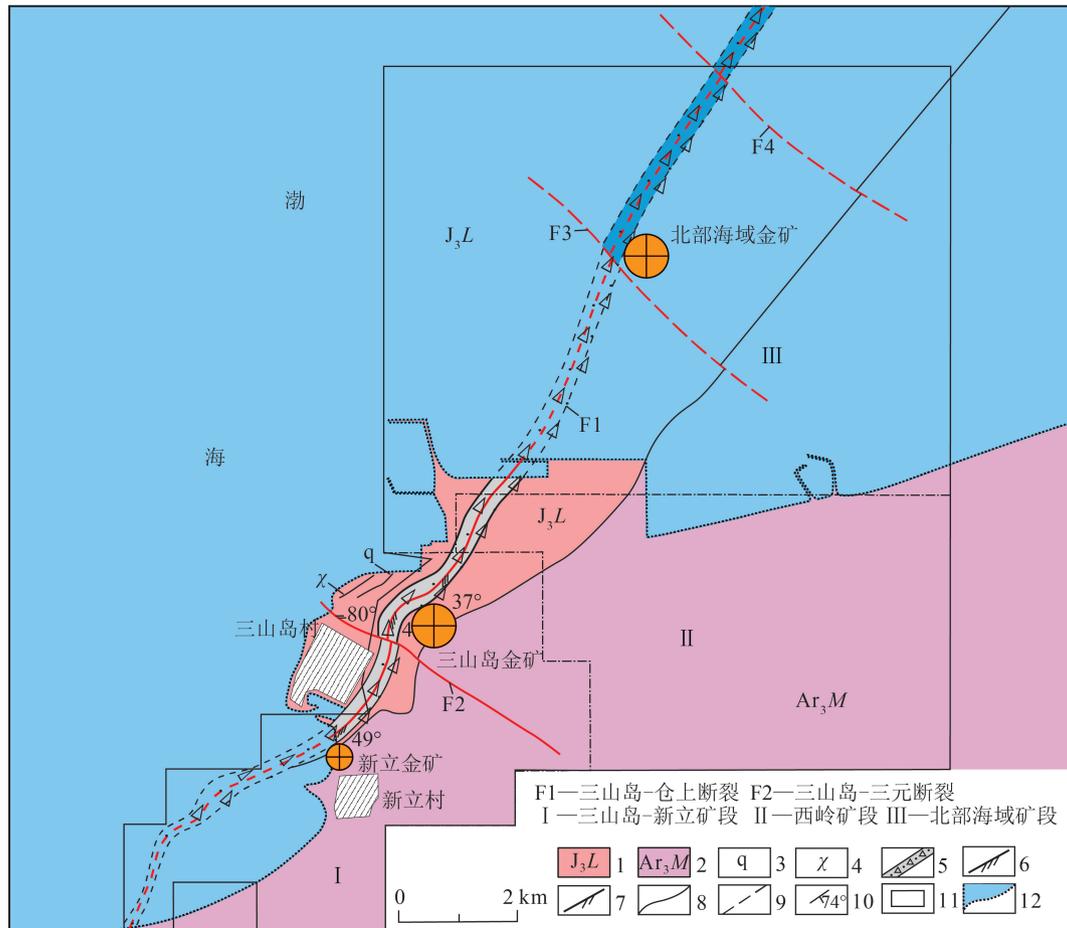


图 3 三山岛超巨型金矿床区域地质图

Fig. 3 Geological map of the Sanshandao super giant gold deposit

1—玲珑序列花岗岩;2—马连庄序列变辉长岩;3—石英脉;4—煌斑岩脉;5—构造破碎带;6—压扭性断层;7—张扭性断层;
8—地质界线;9—推测性质不明断裂;10—产状;11—矿床范围;12—海岸线及渤海

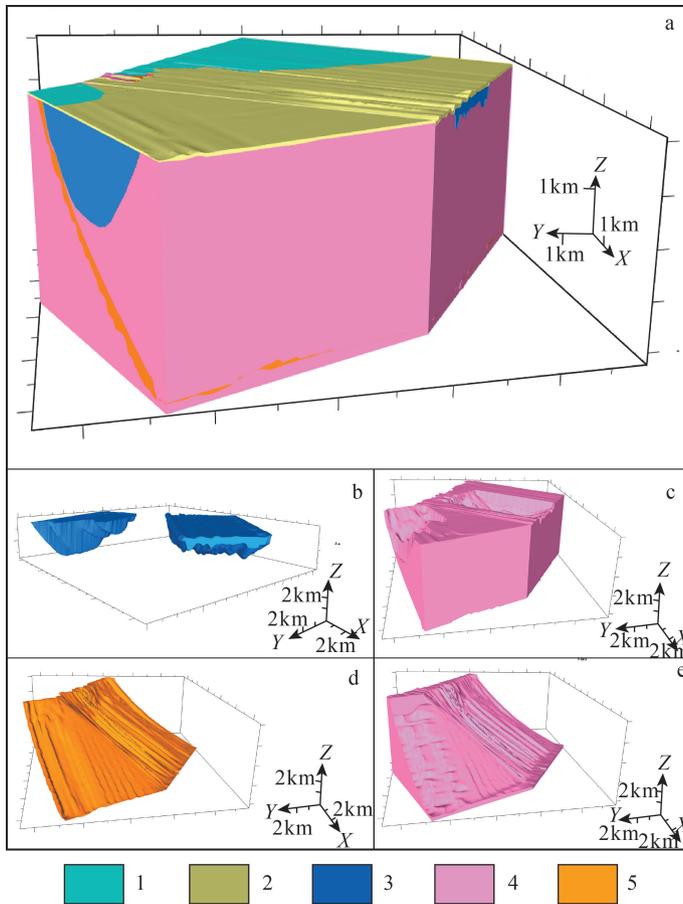


图4 三山岛超巨型金矿床三维地质模型

Fig. 4 The 3D geological model of the Sanshandao super giant gold deposit

1—海域;2—第四系;3—新太古代变质杂岩;
4—侏罗纪玲珑型花岗岩;5—蚀变带

(图4-b), 东侧片区NW向长6.09 km, SE向宽3.14 km, 沿长轴方向中间厚度大, 向两侧逐渐变窄, 顶部剥蚀面平缓, 底部形态不规则, 呈波状起伏, 最大深度527 m。西侧片区SW方向延伸至模型外, 模型范围内NW向长3.12 km, SE向宽2.18 km, 沿长轴方向中间厚度大, 向两侧逐渐变薄, 顶部剥蚀面平缓, 底部形态不规则, 呈波状起伏, 最大厚度860 m。

2.3 断裂和蚀变带三维特征

三山岛断裂为区内控矿断裂, 大部分被第四系及海水覆盖, 仅在三山岛村出露地表, 浅部主要沿玲珑型花岗岩与胶东变质杂岩接触带展布, 深部切入到玲珑型花岗岩中^[28]。断裂平面上呈“S”形展布, 总体走向35°, 局部走向70°~80°。断裂倾向

SE, 倾角多在40°~50°之间, 沿倾向断裂面起伏变化明显, 浅部倾角较陡, 向深部逐渐变缓, 呈铲式阶梯状, -800~-1400 m标高范围内, 断裂倾角由陡快速变缓。

断裂蚀变带沿三山岛断裂带两侧展布, 其形态、规模和产状与三山岛断裂带基本一致。断裂蚀变带呈连续带状展布(图4-d), 矿床内蚀变带走向长8.77 km, 倾斜深6.81 km, 其上下表面均呈舒缓波状分布, 厚度60~400 m, 沿倾向断裂倾角大幅度变化部位蚀变带厚度增大^[29]。

2.4 矿体三维特征

以往勘查在矿床中圈出98个金矿体, 经三维空间对比认为, 原新立矿段①号、②号矿体群, 原三山岛矿段、西岭矿段及北部海域矿段I号矿体群等57个矿体空间分布对应, 赋矿岩性、层位相同, 实际为同一矿体在走向和倾向上的尖灭再现, 现将其编号为I号矿体(图5)。这些以往认为是独立金矿床的勘查区, 主要矿体在三维空间上相互连接, 实际为同一金矿床。该金矿床已累计查明金资源量超过1000 t, 为世界罕见的超巨型金矿床。矿床的I号主矿体分布于三山岛断裂主裂面下盘的黄铁绢英化碎裂岩带及黄铁绢英岩化花岗岩碎裂岩带内^[30], 赋存标高-10~-2313 m, 矿体呈大脉状、似层状, 局部透镜状, 沿走向和倾向呈波状延伸, 尖灭再现、膨胀夹缩、分枝复合现象明显。矿体产状与主裂面基本一致, 矿

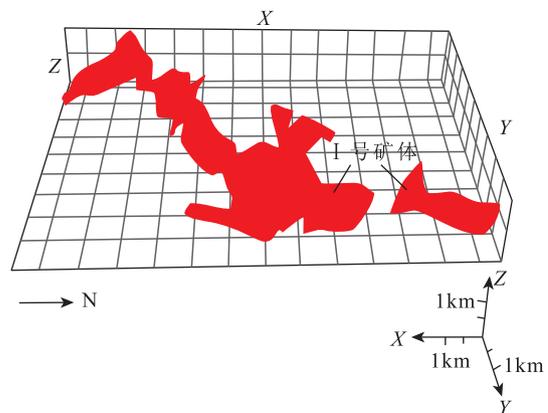


图5 三山岛超巨型金矿床矿体三维分布(矿体边界品位1 g/t)

Fig. 5 Three-dimensional distribution of orebodies in the Sanshandao super giant gold deposit

体走向 $12^{\circ}\sim 62^{\circ}$, 总体 35° 左右; 倾向 SE, 倾角 $30^{\circ}\sim 88^{\circ}$, 多在 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 之间变化。

3 矿体品位、厚度及断裂坡度变化分析

3.1 矿体厚度变化

在主矿体分布范围内均匀提取厚度统计数据点 2749 个, 矿体厚度变化范围为 $1.00\sim 122.83\text{ m}$, 主要集中在 $1.00\sim 30.00\text{ m}$, 平均 12.60 m , 厚度分布不均匀。在厚度三维分布水平投影图(图 6-a)中, 矿体南段浅部厚度较大, 向深部逐渐变小; 矿体北段中部矿体厚度显著增厚。矿体沿走向和倾向厚度值均呈现厚—薄相间变化, 且存在无矿、弱矿间隔。

3.2 矿体品位变化

2749 个品位数据点的分布区间为 $1.00\sim 35.32\text{ g/t}$, 主要集中在 $1.00\sim 6.00\text{ g/t}$, 平均 2.43 g/t , 品位数值变化小, 分布较均匀。在品位三维等值线图(图 6-b)中, 图形色阶变化小, 品位较高的区域与矿体厚度较大的区域空间位置吻合。经计算, 品位与厚度的相关系数为 0.523 , 二者呈正相关。

3.3 品位×厚度变化

品位×厚度值可以反映矿化富集情况, 品位×厚度值越大, 表明矿化越富集。对三山岛超巨型金矿床矿体进行品位×厚度分析, 2749 个数据点的品位×厚度值为 $1.00\sim 892.58(\text{m}\cdot\text{g/t})$, 主要集中在 $1.00\sim 100(\text{m}\cdot\text{g/t})$, 平均 $51.83(\text{m}\cdot\text{g/t})$ 。在矿体的南

段, 浅部矿化富集程度相对高, 向深部逐渐减弱, 矿化富集区分布于 $131\sim 46$ 线之间, $0\sim -500\text{ m}$ 标高范围内。在矿体北段, 深部矿化富集程度好于浅部, 对矿体厚度×品位值进行显著高值分析, 提取厚度×品位值具有显著正异常的区域, 作为金矿床富矿段。在矿体北段的中部存在 1 处富矿段, 分布于 $80\sim 38$ 线之间, $-1000\sim -1700\text{ m}$ 范围内, 品位×厚度值大于 $240(\text{m}\cdot\text{g/t})$, 矿化富集程度远高于周围(图 6-c)。

3.4 断裂表面坡度变化

断裂表面坡度是断裂倾角的反映。在三山岛断裂面三维模型上, 均匀提取 17767 个表面坡度值进行统计分析, 坡度值范围为 $7.11^{\circ}\sim 87.33^{\circ}$, 平均 44.79° , 主要集中在 $35^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 之间。可见, 坡度总体较陡, 且变化范围和变化幅度很大。

在断裂三维模型中, 沿倾斜方向的剖面线每间隔 20 m 标高提取 1 个表面坡度值, 分别计算各标高区段的平均坡度值, 制作断裂由浅到深表面坡度变化折线图(图 7)。图中折线呈现明显的波浪式起伏变化, 指示断裂倾角呈陡—缓—陡—缓阶梯式变化, 有 2 段明显的坡度由陡变缓的“台阶”, 第一段位于 -600 m 标高范围, 其中地表约 -20 m 标高坡度较陡, 为陡倾段, $-20\sim -600\text{ m}$ 标高坡度较平缓; 第二段位于 $-260\sim -1760\text{ m}$ 标高范围, 其中 $-260\sim -940\text{ m}$ 标高坡度较陡, $-940\sim -1760\text{ m}$ 标高坡度平缓。

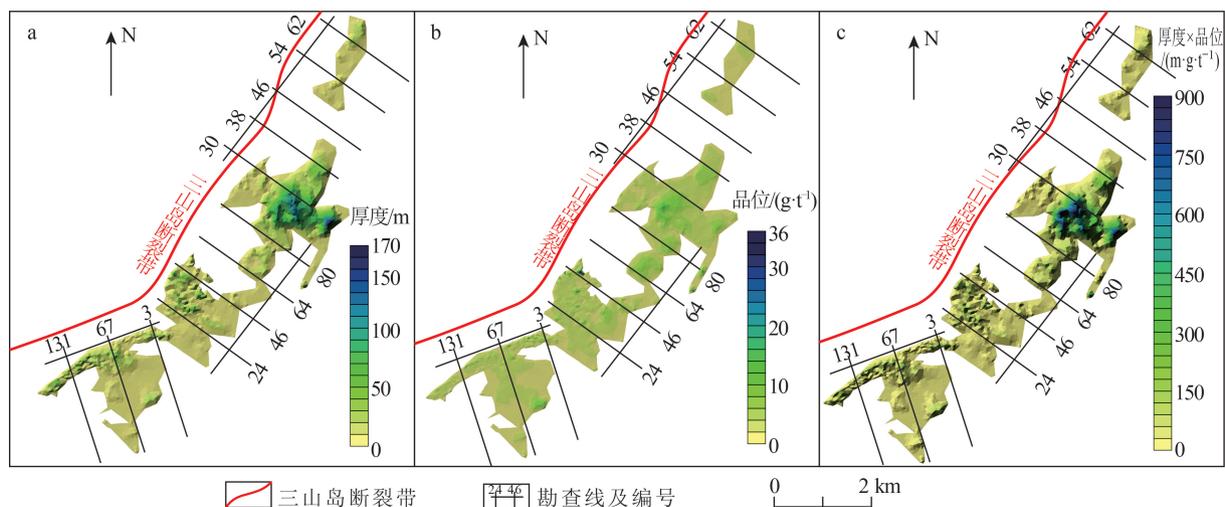


图 6 三山岛超巨型金矿床矿体厚度(a)、品位(b)和厚度×品位(c)分布水平投影图

Fig. 6 Horizontal projection of orebody thickness(a), grade(b) and thickness × grade(c) distribution of the Sanshandao super giant gold deposit

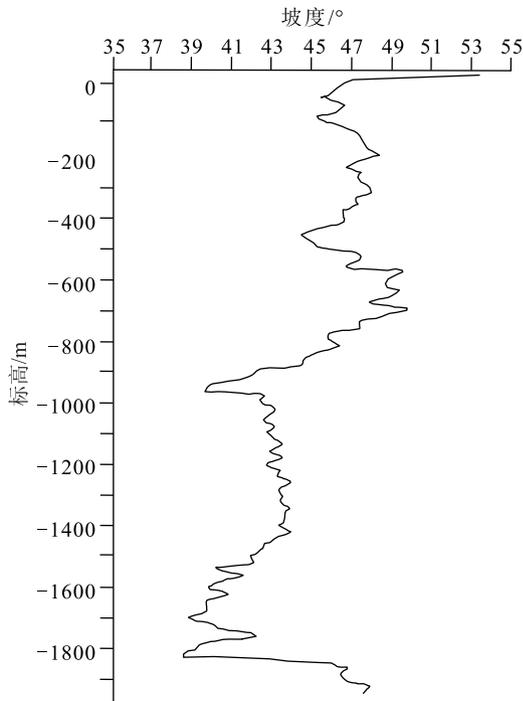


图7 断裂由浅到深断裂表面坡度变化折线图
Fig. 7 Broken line diagram of surface slope change from shallow to deep fracture

4 断裂倾角变化与金成矿的关系

胶东金矿受断裂构造控制是公认的事实,以往地质工作者通过对浅部金矿与断裂的关系研究,提出了较一致的断裂控矿规律性认识^[31-32],然而对深部金矿与断裂的耦合关系尚缺乏深入的研究。本文的矿床三维模型为讨论断裂形态与金成矿关系提供了丰富的信息。

断裂和矿体分布符合阶梯成矿模式^[28-29],浅部第一台阶金矿体主要位于-600 m以上深度范围,占矿体总体积的22.44%;深部第二台阶金矿体主要位于-1000 m以下,占矿体总体积的77.56%。将断裂表面坡度变化折线图(图7)与矿体厚度×品位分布图(图6-c)对比发现,断裂表面坡度较缓段与矿化富集程度高的矿体段在空间位置对应,呈现出明显的阶梯式成矿规律。相比较而言,断裂的第二处“台阶”规模大,其赋存矿体的品位、厚度亦明显增大,表现为“台阶”规模越大,矿化富集越好。

为进一步分析赋矿台阶内断裂坡度变化与金矿体分布的关系,分别提取了三山岛北部海域矿段

浅部第一台阶(-600 m以浅)和深部第二台阶(-600 m以深)的断裂表面坡度与矿区勘查见矿范围内的断裂表面坡度进行对比分析。第一台阶断裂坡度范围为13.70°~86.12°(图8),集中在35°~65°,平均48.21°;该台阶见矿范围内断裂表面坡度为13.69°~67.53°,集中在25°~60°,平均44.72°。第二台阶断裂表面坡度为7.11°~87.33°(图9),集中在30°~65°,平均44.56°;见矿范围内断裂表面坡度为7.11°~69.94°,集中在30°~60°,平均42.75°。可见,2个赋矿台阶的断裂整体坡度均略大于矿体分布范围内的断裂坡度值。

上述断裂倾角变化与矿体赋存位置的关系分析表明,断裂倾角的变化控制了金矿体的空间分布,断裂形态的阶梯式特点造成了金矿体的阶梯式分布,“台阶”的规模越大,矿化富集越好,断裂陡倾角段常常无矿,缓倾赋矿台阶的总体倾角略大于矿体分布范围内的断裂倾角。这种断裂赋矿规律指示,断裂的缓倾角段是深部找矿的重点区域。从三山岛断裂带由浅到深构造表面坡度变化趋势看,-1760~-2000 m标高断裂表面坡度逐渐变陡,预计-2000~-3000 m标高可能形成第3个赋矿台阶。由于深部金矿体埋藏深度大,常规的以探测金矿床中硫化物富集体为目标的找矿方法已不适用于深部找矿,而胶东金矿的控矿断裂规模大,对地质体有明显的切割错动,因而采用适宜的地球物理方法可以探测到大深度的断裂信息,通过精细的反演推断解释能够有效识别断裂深部结构和明显的倾角变化^[33-34],进而圈定深部赋矿台阶。这种深部矿阶梯找矿方法可以有效地解决受断裂控制的热液型矿床的深部找矿难题。

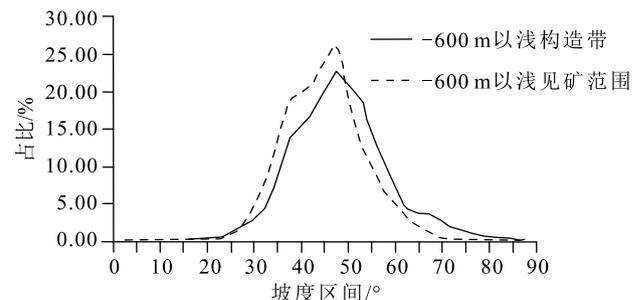


图8 -600 m以浅断裂坡度与见矿范围断裂坡度分布折线图
Fig. 8 Broken line diagram of distribution of fault slope and the section where occurrence the ore body above -600 m

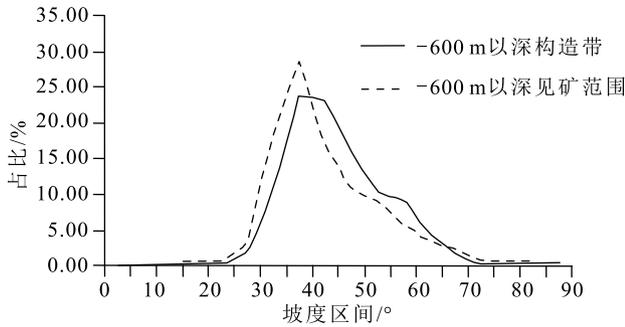


图 9 -600 m 以深断裂坡度与见矿范围断裂坡度分布折线图

Fig. 9 Broken line diagram of distribution of fault slope and the section where occurrence the ore body below -600 m

5 结 论

(1) 主要基于 311 个钻孔资料建立了三山岛超巨型金矿床三维地质模型。对矿床三维空间特征研究表明,以往认为各自独立的数个金矿床,其主要矿体向深部连为一体,构成资源量超过 1000 t 的同一金矿床,即三山岛超巨型金矿床。

(2) 三山岛超巨型金矿床矿体厚度三维分布呈现厚—薄相间变化,矿体品位值三维分布与厚度呈正相关,矿体品位 \times 厚度的三维分布显示了矿化富集程度的不均匀性,局部形成矿化富集区。

(3) 三山岛断裂整体呈上陡下缓的阶梯状,在 2000 m 深度范围内有 2 个倾角明显缓倾的台阶,分别赋存了浅部和深部金矿体,二者之间的断裂陡倾段无矿。浅部第一台阶和深部第二台阶的断裂表面坡度均略大于矿体赋存范围的断裂坡度值。

(4) 断裂的缓倾角段是深部找矿的重点区域,预计三山岛断裂于 -2000~ -3000 m 标高可能形成第 3 个赋矿台阶。深部金矿找矿方法应当由传统的探测硫化物富集体引起的异常转向探测深部断裂结构及断裂阶梯式的产状变化部位。

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研究员的耐心指导,在此表示诚挚的谢意。

参考文献

[1] 毛景文,赫英,丁悌平.胶东金矿形成期间地幔流体参与成矿过程的碳氧氢同位素证据[J].矿床地质,2002,21(2): 121-128.
[2] 邓军,王庆飞,杨立强,等.胶西北金矿集区成矿作用发生的地质背景[J].地学前缘,2004,11(4): 527-533.

[3] 宋明春,宋英昕,丁正江,等.胶东焦家和三山岛巨型金矿床的发现及有关问题讨论[J].大地构造与成矿学,2019,43(1): 92-110.
[4] 于学峰,宋明春,李大鹏,等.山东金矿找矿突破进展与前景[J].地质学报,2016,90(10): 2847-2862.
[5] 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.
[6] 宋明春.对我国深部金矿资源勘查有关问题的认识与思考[J].黄金科学技术,2017,25(3): 1-2.
[7] 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.
[8] 毛先成,张苗苗,邓浩,等.矿区深部隐伏矿体三维可视化预测方法[J].地质学刊,2016,40(3): 363-371.
[9] 刘少华,肖克炎,王新海.地质三维属性建模及其可视化[J].地质通报,2010,29(10): 1554-1557.
[10] 陈建平,吕鹏,吴文,等.基于三维可视化技术的隐伏矿体预测[J].地学前缘,2007,(5): 54-62.
[11] 张洋洋,周万蓬,吴志春,等.三维地质建模技术发展现状及建模实例[J].东华理工大学学报(社会科学版),2013,32(3): 403-409.
[12] 李青元,张丽云,魏占营,等.三维地质建模软件发展现状及问题探讨[J].地质学刊,2013,37(4): 554-561.
[13] Huang Leilei, Wang Gongwen, Emmanuel John M, et al. Multi-scale Numerical Simulation and 3D Modeling for Deep Mineral Exploration in the Jiaojia Gold District, China[J]. Natural Resources Research, 2020, 29(1): 415-438.
[14] 毛先成,张苗苗,邓浩,等.矿区深部隐伏矿体三维可视化预测方法[J].地质学刊,2016,40(3): 363-371.
[15] 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.
[16] 潘懋,方裕,屈红刚.三维地质建模若干基本问题探讨[J].地理与地理信息科学,2007,23(3): 1-5.
[17] 王功文,张寿庭,燕长海,等.基于地质与重磁数据集成的栾川钨多金属矿区三维地质建模[J].地球科学-中国地质大学学报,2011,36(2): 360-366.
[18] 王功文,郭运生,杜杨松,等.基于 GIS 的云南普朗斑岩铜矿床三维成矿预测[J].矿床地质,2007,26(6): 651-653.
[19] 宋明春,崔书学,姜洪利,等.山东胶西北矿集区和焦家金矿田成矿构造系统[J].地质通报,2011,30(4): 573-578.
[20] 王金辉,田京祥.三山岛断裂在海域北延位置的确定及成矿预测[J].地质学报,2017,91(12): 2771-2780.
[21] 杨奎锋,朱继托,程胜红,等.胶东三山岛金矿构造控矿规律研究[J].大地构造与成矿学,2017,41(2): 272-282.
[22] 刘日富,周鑫,吕雨璐,等.胶东三山岛—仓上断裂带控矿规律与找矿勘查实践[J].地质与勘探,2019,55(2): 528-541.
[23] 赵冬冬,金刚,李海松,等.山东省莱州市三山岛金矿床地质特征

- 及成因探讨[J].地质找矿论丛,2013,28(4): 546-551.
- [24] 张军进,丁正江,刘殿浩,等.山东莱州三山岛北部海域超大型金矿勘查实践与找矿成果[J].黄金科学技术,2016,24(1): 1-10.
- [25] 宋明春,张军进,张丕建,等.胶东三山岛北部海域超大型金矿床的发现及其构造-岩浆背景[J].地质学报,2015,89(2): 365-383.
- [26] 姜晓辉,范宏瑞,胡芳芳,等.胶东三山岛金矿中深部成矿流体对比及矿床成因[J].岩石学报,2011,27(5): 1327-1340.
- [27] 郭春影.胶东三山岛-仓上金矿带构造-岩浆-流体金成矿系统[D].中国地质大学(北京)博士学位论文,2009.
- [28] 周国发,吕古贤,申玉科,等.山东三山岛金矿床地质特征及找矿预测[J].黄金科学技术,2011,19(4): 1-5.
- [29] 王建,朱立新,马生明,等.胶东三山岛北海域金矿床热液蚀变作用研究[J].地质通报,2020,39(11): 1807-1826.
- [30] 刘祥朋,王玺,宋英昕,等.胶西北西岭特大型金矿床蚀变围岩特征研究[J].东华理工大学学报(自然科学版),2017,40(3): 225-236.
- [31] Yan J Y, Wang Z H, Wang J H, et al. Using marine magnetic survey data to identify a gold ore - controlling fault: a case study in Sanshandao fault, eastern China [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2018, 15(3): 729-738.
- [32] 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.
- [33] 宋明春,宋英昕,李杰,等.深部矿阶梯式找矿方法: 以胶东金矿集区深部找矿为例[J/OL].中国地质: 1-14[2021-06-03].
- [34] 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.