

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.06.004

胶东焦家超巨型金矿床三维空间特征及赋矿规律

杨真亮^{1,2}, 徐韶辉^{2*}, 高书剑², 薛冰³, 刘向东², 王慧²YANG Zhenliang^{1,2}, XU Shaohui^{2*}, GAO Shujian², XUE Bing³, LIU Xiangdong², WANG Hui²

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. 山东省物化探勘查院, 山东 济南 250000

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

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

3. Shandong Institute of Physical and Chemical Exploration, Ji'nan 250000, Shandong, China

摘要:胶东地区近年深部找矿取得重大突破。研究金矿床的三维空间特征对于深化成矿规律认识、指导深部找矿具有重要意义。在基于500个钻孔资料建立的胶东焦家地区三维地质模型的基础上,分析了金矿床的三维空间特征。通过三维透明化分析发现,以往作为独立金矿床勘查、开采的多个浅部矿区,其主要矿体向深部连为一体,构成资源量超过1000 t的同一个超巨型金矿床,矿床主要由3个矿体组成。赋矿的焦家断裂在三维空间上起伏波动较大,沿倾向呈铲式阶梯状形态,在断裂倾角由陡变缓的下部主矿体厚度较大。矿体厚度的三维分布图出现数处厚度较大区域,沿矿体走向和倾向厚度呈现厚-薄相间变化,矿体品位与厚度相关系数为0.337,矿化强度的三维分布显示有4处矿化富集区。分析表明,矿化富集区与断裂倾角变化部位相吻合,且矿体主要富集在倾角较缓部位。认为深部找矿应重视对断裂构造三维空间变化的分析及阶梯模式的应用。

关键词:三维模型;赋矿规律;焦家金矿;大数据

中图分类号:P618.51;P628⁺.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)06-0958-10

Yang Z L, Xu S H, Gao S J, Xue B, Liu X D, Wang H. 3D spatial characteristics and ore-host regularity of Jiaojia super giant gold deposit in Jiaodong. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(6): 958-967

Abstract: In recent years, the deep prospecting in Jiaodong area has made great breakthroughs. It is of great significance to study the 3D spatial characteristics of gold deposits for deepening the understanding of metallogenic regularity and guiding deep prospecting. Based on the data of 500 boreholes, a 3D model of Jiaojia area in Jiaodong is established, and the three-dimensional spatial characteristics of gold deposits are analyzed. Through three-dimensional transparency analysis, it is found that the main ore bodies of several shallow mining areas, which used to be independent gold deposit exploration and mining, are connected to the deep, forming the same super giant gold deposit with a resource of more than 1000 t. The deposit is mainly composed of three ore bodies. The Jiaojia fault, which is the host of ore, fluctuates greatly in three-dimensional space and presents a shovel ladder shape along the dip. The main ore body locates at parts of turning point lower of the fracture inclination. 3D distribution map of orebody thickness shows that there are several high value areas. Along the strike and dip of ore body, the thickness presents the alternation of thick and thin. The correlation coefficient between ore body grade and thickness is 0.337. The 3D distribution of ore body mineralization intensity shows that there are four mineralization

收稿日期:2021-06-09; **修订日期:**2021-10-24

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)、山东省财政资金项目《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《胶东金矿集区三维地质建模(玻璃胶东)》(编号:KC2017008)、《胶西北焦家—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研究》(编号:)和山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队项目《焦家式金矿》(编号:LYKY2020-01)

作者简介:杨真亮(1985-),男,高级工程师,从事地质矿产勘查、大数据、三维建模。E-mail: yz198849@126.com

* **通信作者:**徐韶辉(1978-),男,高级工程师,从事地质矿产勘查工作。E-mail: xushaohui78@163.com

enrichment areas. The analysis shows that the mineralization enrichment area is consistent with the fault dip angle change position, and the ore body is mainly concentrated in the lower dip angle position. It is considered that deep prospecting should pay attention to the analysis of the 3D spatial variation of fault structure and the application of ladder model.

Key words: 3D model; ore-host regularity; Jiaojia gold deposit; Big data

早在 20 世纪 60 年代, 山东地质六队在焦家成矿带浅部揭露并探获了焦家金矿床, 并相继发现了新城、马塘、东季、河东等金矿床^[1]。2006 年以来, 通过深部找矿于 500~1000 m 深度探获了寺庄深部、焦家深部、朱郭李家等特大—超大型金矿床^[2-5], 并证实深部存在第二矿化富集段。在此基础上, 众多学者开展了大量的成矿、赋矿规律研究^[6-16], 总结矿体和构造赋存形式, 并形象地提出“阶梯式成矿模式”^[17-21]。

近些年, 随着勘查技术不断提高, 该区找矿深度已突破 2000 m, 累计查明金金属量 1300 余吨, 并已形成了系统的网格化钻探工程, 获取了大量地质勘查数据^[22-25]。以往对该区的研究, 主要基于单个矿区勘查数据或-1000 m 以浅勘查数据, 数据不够全面, 不能窥得全貌^[26]。对赋矿规律的研究利用的是传统的二维图(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), 描述的地质现象实际上是三维地质现象在二维平面上投影的简化, 表达过程中掩盖了地质现象内或不同地质体之间的地质细节变化, 无法满足更高精度的地质调查和资源勘查需求^[27-34]。本文在系统处理研究区大量矿产勘查数据的基础上, 在三维空间上重新圈定矿体, 搭建矿床三维地质模型, 实现了对金矿床的多尺度、多元异构数据集成、展示和研究, 更客观、更形象地反映了地质体的三维特征。通过网格提取地质体、矿体、构造、蚀变带等属性数据, 分析不同属性数据之间的关系, 探讨构造-蚀变-矿化耦合关系, 总结矿体富集规律, 为进一步开展深部找矿和矿床研究提供了重要依据。

1 地质概况

研究区位于胶东半岛西北部莱州市境内, 其南侧距莱州城区约 28 km。矿区附近区域主要有新太古界变质岩系、侏罗纪

玲珑序列花岗岩、早白垩世郭家岭序列花岗岩闪长岩等地质体, 沿海一带多被第四系松散沉积物覆盖(图 1)。区内断裂构造发育, 焦家断裂为胶东地区金矿最密集成矿构造带之一, 断裂平均走向 30°, 倾向北西, 总体沿变质岩系与玲珑花岗岩的接触带分布, 有的地段穿切玲珑花岗岩和郭家岭花岗岩。

研究区位于焦家成矿带中段, 为典型的破碎蚀变岩型金矿床。目前, 已在焦家断裂中段探获了焦家、马塘、寺庄、后赵北、焦家深部、朱郭李家、南吕—欣木、纱岭、前陈等大型—超大型金矿床。各矿床之间无缝连接, 勘查程度均达到详查—勘探程度, 已施工钻孔 500 个, 工程间距 60~240 m, 形成了网格化工程控制^[35-44]。

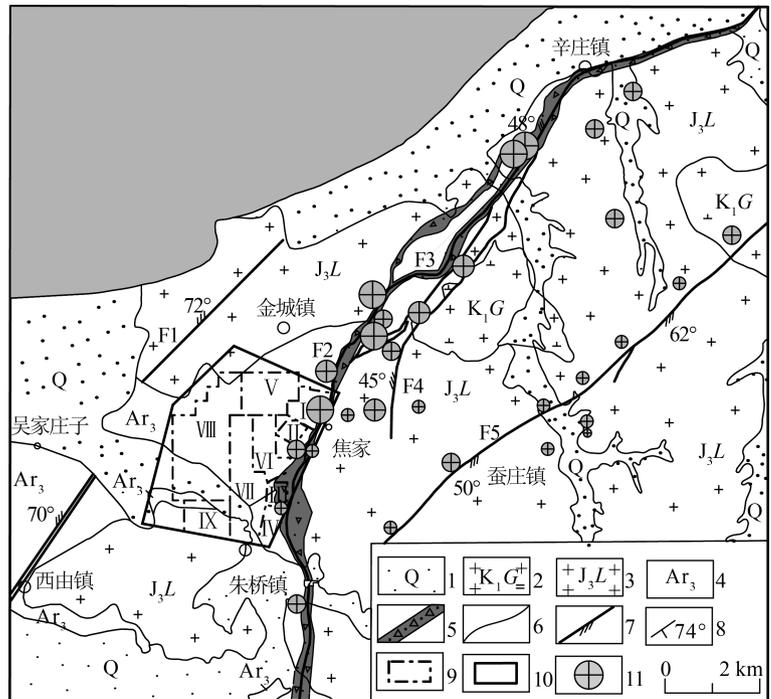


图 1 焦家金矿床区域地质图^[13]

Fig. 1 Regional geological map of Jiaojia gold Field

1—第四系; 2—早白垩世郭家岭序列花岗岩闪长岩; 3—侏罗纪玲珑序列花岗岩; 4—新太古界变质岩系; 5—蚀变带; 6—地质界线; 7—断裂; 8—断裂产状; 9—焦家金矿床探获各矿段位置; 10—建模范围; 11—已探明金矿床位置(符号大小代表规模); F1—西由断裂; F2—焦家断裂; F3—侯家断裂; F4—望儿山断裂; F5—灵北断裂; I—焦家; II—马塘; III—寺庄; IV—后赵北; V—焦家深部; VI—朱郭李家; VII—南吕—欣木; VIII—纱岭; IX—前陈

2 矿床三维地质模型构建方法

模型构建采用北京超维创想信息技术有限公司 Creatar XModeling 软件。利用基于多源数据的三维地质体复杂交互建模方式构建三维地质模型。从可利用的剖面、平面数据(含钻探、坑探工程等)提取和解译单个地质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;然后将建立好的各个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。三维矿体模型是基于矿体表面建模方法构建的,建模顺序从轮廓线提取—矿体表面生成—矿体^[45-51]。

2.1 建模数据

矿床三维建模范围为焦家成矿带中段,平面面积 21.95 km²。采用的建模资料为焦家、马塘、寺庄和寺庄深部、后赵、焦家深部、朱郭李家、南吕—欣木、纱岭、前陈等 11 个以往勘查矿区的 21 套勘查成果资料,包括勘查线剖面图 124 张、钻孔柱状图 500 张、中段图 33 张,1:1 万金矿床地形地质图 30 km²,数字高程数据 1 份。

2.2 建模流程 and 数据处理

本次三维地质模型建设以 1:1 万平面基岩地质图为基础数据,结合勘查线剖面图,比例尺为 1:2000,明确精度:水平控制网度为 60 m×60 m,地质体最小厚度为 0.1 m。确定建模深度范围为地表到-2200 m 标高。建模流程和数据处理如下。

首先,对已有资料进行同化处理,包括统一坐标系统,统一语义命名标准和地质单位,建立地层层序。在此基础上,根据勘查线剖面图、中段地质图,刻画建模区构造、地层、侵入岩、蚀变带、矿体等三维地质体的形态,完成体元、面元三维地质模型构建。其次,依据钻孔数据建立三维钻孔模型,包括钻孔井位模型、钻孔孔迹线模型、钻孔岩性模型及样品分析测试结果模型 4 种。最后,对建成的体元三维地质模型进行网格剖分,建成基于规则或不规则格网的三维地质体模型,并利用空间插值算法,以地质体边界为边界约束条件,基于钻孔数据中的分析测试数据,进行建模区每个格网属性的插值或赋值。

3 矿区三维地质结构和矿床三维分析

建立了包括地质体、矿化蚀变带和矿体、断裂

构造在内的焦家矿床三维地质模型(图 2),模型体积为 73.23 km³。

3.1 地质体三维结构

第四系:呈薄层状分布于模型表面,西南部延伸至模型之外,下伏地质体为新元古界变质岩和玲珑序列花岗岩。厚度一般为 5~20 m,最大 38 m,体积 0.13 km³,占模型体积的 0.18%(图 2、图 3-b)。

新元古界变质岩:分布于三维模型上部,南、西、北 3 个方向延伸至模型外部,顶面大部分出露于地表,局部被第四系覆盖。该地质体顶部剥蚀面平缓,底部与玲珑序列花岗岩呈侵入接触或被焦家断裂蚀变带截切,底界面凹凸不平(图 3-c、d)。空间位置位于焦家断裂带上盘,模型区内东西宽 4.4 km,南北长 5.4 km,最大厚度为 2 km,向 NE55°方向厚度逐渐减小(图 3-a、c)。体积 13.25 km³,占模型总体积的 18.09%。

玲珑序列花岗岩:为三维模型的主体,被焦家断裂带分割成上、下两部分。上部的玲珑序列花岗岩体多隐伏于新太古界变质岩之下,两者呈侵入接触,接触面极不规则;花岗岩体的下表面与焦家断裂蚀变带直接接触。岩体的厚度中间薄,向南、北两侧逐渐增厚。下部的玲珑花岗岩体位于焦家断裂蚀变带之下,于三维模型东侧出露地表,建模范围内未揭露底界。总体积 49.25 km³,占模型区总体积的 67.25%(图 3-a、e、f)。

3.2 焦家断裂和蚀变带三维结构

3.2.1 焦家断裂三维结构

焦家断裂为区内主要的控矿断裂,断裂面起伏变化明显。断裂的浅部倾角较陡,向深部逐渐变缓,沿倾斜方向呈铲式阶梯状分布,大致划分为 3 个倾角变化台阶(图 4-a)。第一台阶,位于三维模型北西侧、地表至-400 m 标高,断裂倾角由近 70°渐变为 30°左右,区内的浅部金矿均赋存于该台阶内;第二台阶,位于三维模型体的-700~-1000 m 标高,断裂倾角由 30°左右渐变为 15°左右,焦家深部矿段、朱郭李家矿段富矿地段均位于该台阶内;第三台阶,位于三维模型的-1000~-1600 m 标高,断裂倾角由 39°渐变为 19°,纱岭矿段、前陈矿段富矿地段均位于该台阶内。断裂沿走向波状舒缓现象明显,波动起伏较大,且往往在倾向上倾角陡倾变化地段走向起伏波动较大(图 4-b)。

从整个断裂三维模型表面特征看,其南东和

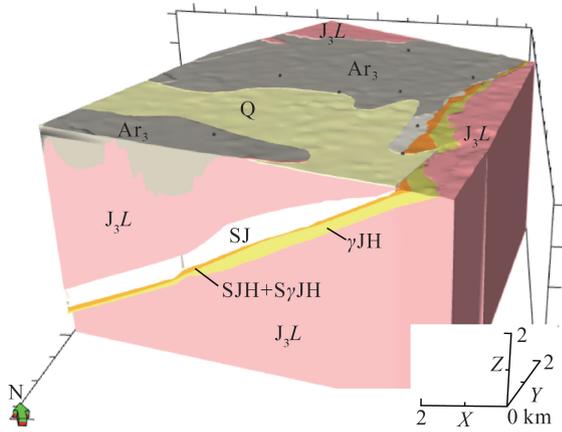


图 2 焦家超巨型金矿床三维地质模型

Fig. 2 3D geological model of Jiaojia super giant gold deposit
Q—第四系;J₃L—侏罗纪玲珑序列花岗岩;Ar₃—新太古界变质岩系;SJ—上盘蚀变带;SJH+S₇JH—黄铁绢英岩化碎裂岩+黄铁绢英岩化花岗岩质碎裂岩;γJH—黄铁绢英岩化花岗岩

北西侧是相对陡的陡倾面,中间为构造凹陷区,凹陷区整体走向 NE55°左右,与新太古界变质岩厚度减薄方向一致。凹陷区内断裂倾角整体较缓,涵盖了“三个台阶”中的缓倾段,是金矿的主要富集地段。

3.2.2 断裂蚀变带三维结构

焦家断裂带上盘的蚀变带厚度变化较大,在三维模型区的北部厚度大于南部。蚀变带的浅部多与新太古界变质岩直接接触,深部切入玲珑序列花岗岩中。新太古界变质岩与玲珑序列花岗岩接触地段上盘蚀变带厚大(图 3-g、h)。蚀变带体积 5.96 km³,占模型体积的 8.14%。

位于焦家断裂下盘的蚀变带沿走向、倾向均呈薄—厚相间变化,在焦家断裂倾角变缓地段蚀变带厚度增厚(图 3-g、i)。蚀变带体积 1.52 km³,占模型体积的 2.07%。

3.3 矿体三维结构

通过三维地质建模,对前人划分的各矿床的矿体进行了重新圈定,发现以往探明的多个浅部金矿床的主矿体向深部与近年探明的深部矿区主矿体相连,构成 3 个规模巨大的矿体,编号为 I-1、I-13、II-13(图 5)。这 3 个矿体沿走向和倾向相互叠合,实际为同一个金矿床,即前人划分的多个矿床应为同一矿床——焦家矿床。

I-1 号矿体,由原焦家、焦家深部、纱岭、马塘

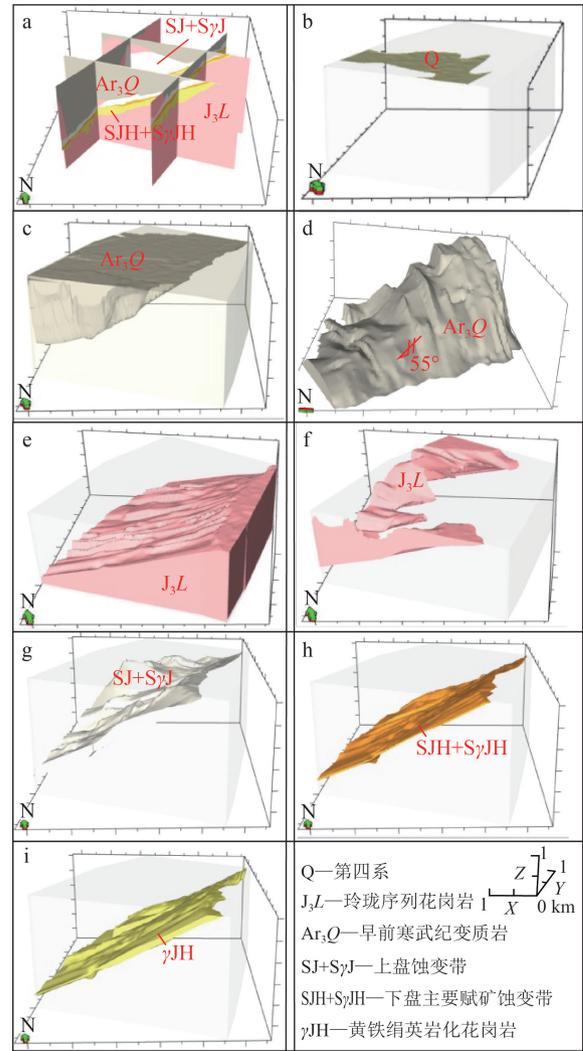


图 3 三维地质体结构模型

Fig. 3 3D model of geological structure

a—三维地质模型栅栏图;b—地层三维地质模型;c—新元古界变质岩三维模型(正面);d—新元古界变质岩三维模型(反面);e—玲珑序列花岗岩三维模型(下盘);f—玲珑序列花岗岩三维模型(上盘);g—蚀变带三维模型(上盘);h—蚀变带三维模型(下盘,主矿体赋存位置);i—蚀变带三维模型(下盘,Ⅲ号矿体群赋存位置)

4 个矿段 I-1 号矿体和朱郭李家矿段 I-12 号矿体组成,分属 I 号矿体群,位于三维模型北部的地表至-1478 m 标高范围内,紧贴焦家断裂主裂面下盘分布,在断裂倾角由陡变缓的台阶处矿体厚度明显变大。矿体呈似层状,最大走向长 2445 m,最大倾斜长 3493 m。矿体浅部倾角较陡,向深部逐渐变缓,与焦家断裂产状基本一致(图 5-b)。矿体体积 23599486 m³,占矿床总体积的 21.12%。

I-2 号矿体,由原纱岭矿段 I-2 号矿体、朱郭

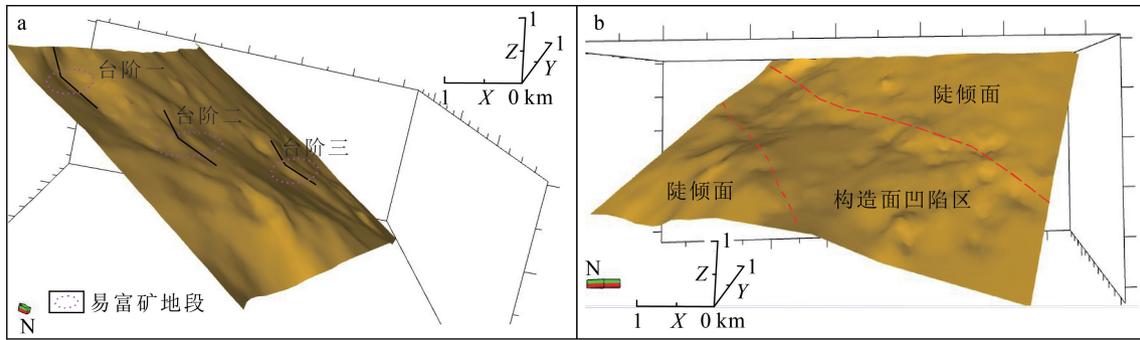


图4 三维构造模型

Fig. 4 3D model of structure

a—三维构造模型沿倾斜方向呈阶梯式变化;b—三维构造模型中部呈现明显凹陷

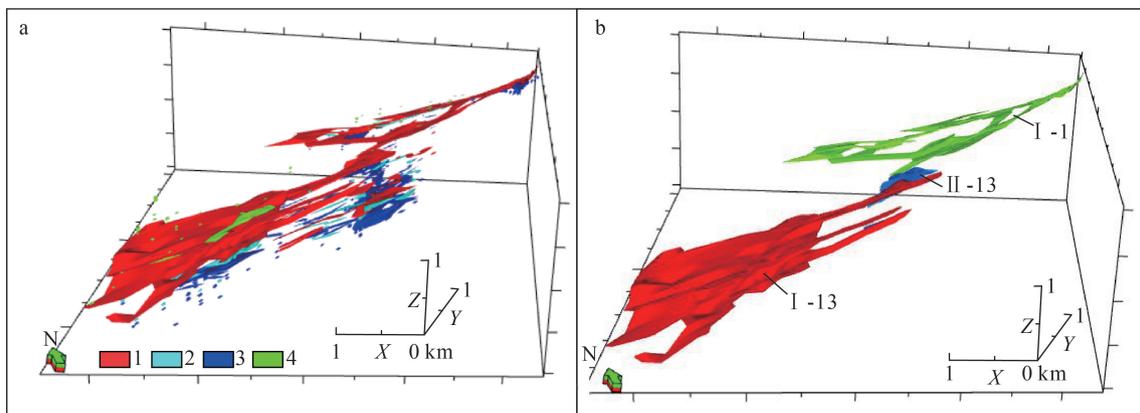


图5 三维矿体模型

Fig. 5 3D model of ore deposit

a—矿体三维模型;b—矿体内主矿体三维模型;1—I号矿体群矿体;2—II号矿体群矿体;3—III号矿体群矿体;4—IV号矿体群矿体

李家矿段 I-1 号矿体、南昌-欣木矿段 I-1 号矿体、前陈矿段 I-2 号矿体组成, 分属 I 号矿体群。位于三维模型中北部-308~-2041 m 标高范围。矿体最大走向长 2211 m, 最大倾斜长 3634 m。矿体整体呈脉状, 浅部矿体呈枝杈状分散, 深部矿体较完整、连续性好, 在-1000~-1400 m 标高、断裂倾角由陡变缓的台阶处矿体厚度明显变大(图 5-b)。矿体体积 57220010 m³, 占矿床总体积的 51.21%, 为金矿床内规模最大的矿体。

II-13 号矿体, 由原朱郭李家矿段 II-1 号矿体和纱岭矿段 II-8 号矿体组成, 分属 II 号矿体群。位于三维模型中北部-555~-1389 m 标高范围内, 矿体均位于主裂面下盘。矿体最大走向长 1798 m, 最大倾斜长 1866 m。矿体呈似层状, 平面形态呈“Z”形, 产状与焦家断裂带基本一致。矿体中间厚度

大, 向外围逐渐降低(图 5-b)。矿体体积 15005246 m³, 占矿床总体积的 13.43%。

3.4 矿体群品位和厚度

通过矿床三维建模, 累计圈定矿体 579 个, 矿体成群产出。沿用以往矿体群划分方式, 将矿床划分为 4 个矿体群。I、II、IV 号矿体群内矿体特征相似, 与焦家断裂带中的赋矿位置相对应, 将其作为一个整体进行研究; 而 III 号矿体群赋存在断裂下盘远离主裂面的黄铁绢英岩化花岗岩内, 受焦家主干断裂下盘的陡倾角次级裂隙控制^[4,6], 与主矿体呈斜交排列, 作为独立矿体群进行分析。

3.4.1 I+II+IV 号矿体群

在三维模型中, 按 60 m×60 m 均匀网格提取了 1459 个矿体厚度和品位数据。厚度范围为 1.00~122.92 m, 主要集中在 1.00~30.00 m(图 6-a), 平均

8.81 m, 局部厚度明显偏大, 厚度变化系数 135.12%, 属厚度不稳定型矿体。在厚度分布等值线图(图 7-a)中, 出现多处厚度较大区域, 矿体在走向和倾向上呈厚—薄相间变化, 无矿、弱矿间隔现象明显。

矿体群 Au 品位分布区间 1.00~19.96 g/t, 平均 1.99 g/t, Au 品位变化系数 72.04%, 属有用组分分布均匀型矿体, 品位数据分布均匀, 变化小(图 6-b)。在品位分布等值线图(图 7-b)中, 品位分布均匀, 局部形成品位较高的富集区。

矿体群矿化强度(用矿体品位×厚度指示)等值线图(图 7-c)与厚度分布等值线形态基本一致, 沿矿体走向和倾向也呈现强—弱相间变化, 无矿、弱矿间隔现象明显。矿体具明显的 SW235°侧伏。比较而言, 厚度较大区域, 品位较高。对品位、厚度进行相关性分析, 两者相关系数为 0.337, 呈正相关。

矿化强度反映了矿化富集情况, 其值越大指示矿化越富集。3 个矿体群的矿化强度范围为 1.00~589.03 m·g/t, 平均 25.00 m·g/t, 标准差 44.86, 数据分布均匀。在矿产勘查中常将平均品位的 6~8 倍作为特高品位, 本文以特高品位的一半, 即矿化强度值的 4 倍(100.00 m·g/t)作为金矿床矿体富集区, 共提取矿化富集区 4 处(图 8), 编号分别为 I、II、III、IV。

矿化富集区 I 位于三维模型北东侧、断裂面第一台阶中由陡变缓地段; 矿化富集区 II、III 位于三维模型中部, 断裂面第二台阶陡缓交替中相对缓倾地段; 矿化富集区 IV 位于三维模型南西侧, 断裂面第三台阶中的相对缓倾地段。4 个矿化富集区均位于构造凹陷区范围内, 且沿矿体的走向、倾向呈近等距分布。沿走向可划分为 3 条矿化富集带, 矿化富集部位向北西向侧伏, 富集带和弱矿带间距约 1.5 km; 在倾向方向的 3 个成矿台阶中, 富集带和弱矿

带间距约 1.8 km(图 8)。

3.4.2 III 号矿体群

在三维模型中按 60 m×60 m 均匀网格化提取了 731 个矿体厚度和品位数据。厚度范围为 1.00~65.38 g/t, 平均 7.10 g/t, 数据分布均匀(图 9-a)。在厚度三维分布图中, 高值分布较集中, 沿高值区域向外围厚度逐渐变小(图 10-a)。

Au 品位分布范围为 1.00~16.11 g/t, 平均 2.29 g/t, 数据分布均匀, 表面起伏不明显(图 9-b、图 10-b)。

对 III 号矿体群厚度、品位进行相关性分析, 两者相关性为 0.262, 为正相关。

矿化强度为 1.00~296.13 g/t, 平均 23.22 g/t, 数据分布均匀(图 10-c)。提取的矿化富集区域较分散, 矿化富集区的空间位置在平面上与 I+II+IV 号矿体群相吻合(图 11)。

4 讨论

4.1 焦家超巨型金矿床的规模

焦家超巨型金矿床是中国著名的焦家式破碎带蚀变岩型金矿的典型产地, 自 20 世纪 60 年代发现以来, 经过近 40 年的勘查、开采, 累计探明金资源量超过 100 t, 并在其周边探明了多个大中型金矿床。这些矿床的赋矿深度主要位于 400 m 以浅, 总计查明金资源量 300 余吨。在这一深度范围内各矿区的主要矿体相互不连接, 长期以来地质工作者一直将其作为若干个独立的矿床勘查、开采和研究^[35-42]。21 世纪以来, 在该区 500~2200 m 深度范围进行了深部金矿勘查, 陆续探明了多个资源量大于 100 t 的金矿床, 尤其是探明的莱州纱岭矿区金资源量达 389 t。这些深部矿区的勘查边界已经相互接合, 但由于行政授予探矿权的限制, 各个矿区

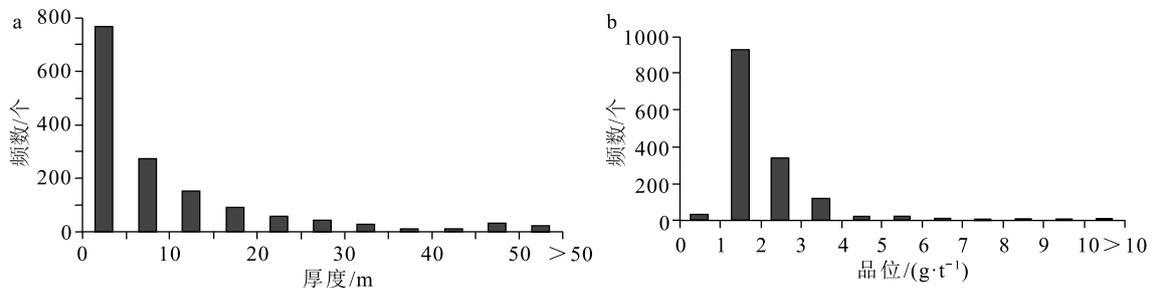


图 6 I+II+IV 号矿体群厚度(a)和品位(b)分布直方图

Fig. 6 Distribution histogram of thickness(a) and grade(b) of No. I+II+IV ore body group

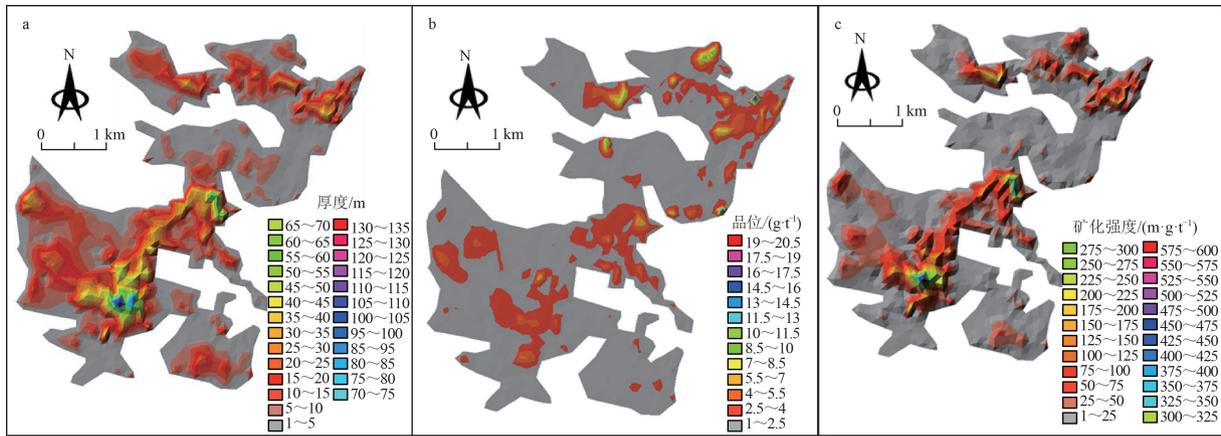


图 7 I + II + IV 号矿体群厚度 (a)、品位 (b) 和矿化强度 (c) 等值线图

Fig. 7 Thickness (a), grade (b) and mineralization intensity (c) contour maps of No. I + II + IV ore body group

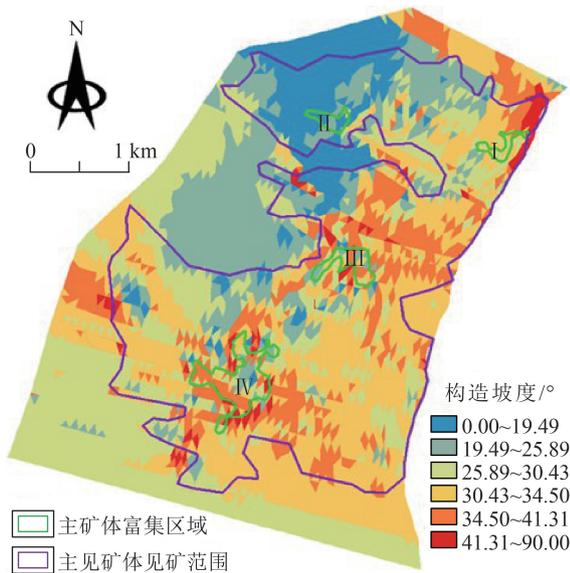


图 8 I + II + IV 号矿体群矿化富集区分布图

Fig. 8 Distribution map of mineralization enrichment area of No. I + II + IV ore body group

分别勘查和研究, 缺乏对各相邻矿区矿体相互关系的整体认识。

以往通过对焦家超巨型金矿床主要矿区矿体分布的研究, 提出该矿田实际为一个金资源量超千吨的超巨型金矿床^[43]。本文通过三维建模对各矿区矿体的三维结构分析发现, 以往探明的焦家、马塘、寺庄金矿均赋存于-400 m 深度以浅的焦家断裂第一台阶中, 三者的主要矿体在走向上互不连接, 存在 500~1000 m 的间隔; 3 个矿区的矿体向深部延深, 其规模逐渐扩大, 并与深部矿区的矿体相互连接, 形成 3 个巨大矿体。在-700~-1000 m 深度的焦家断裂第二台阶, 3 个矿体相互叠合。其中, I-1 号和 I-13 号矿体均位于焦家断裂主断面之下的 I 号矿体群, 二者之间没有连接; II-13 号矿体属于稍远离焦家断裂主断面、位于 I 号矿体群之下的 II 号矿体群, 该矿体的北东段叠合于 I-1 号矿体之下, 南西段叠合于 I-13 号矿体之下。三维模型显示, 3 个

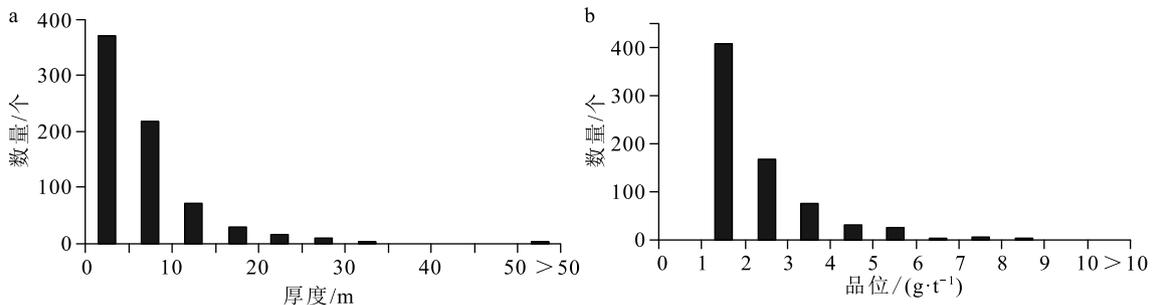


图 9 III 号矿体群厚度 (a) 和品位 (b) 分布直方图

Fig. 9 Distribution histogram of thickness (a) and grade (b) of No. III ore body group

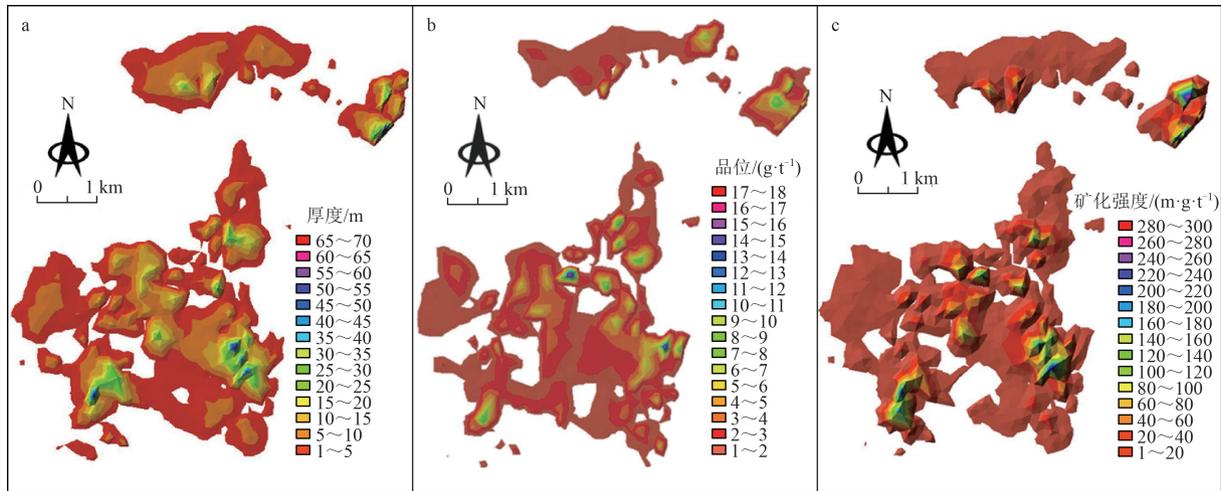


图 10 III号矿体群厚度(a)、品位(b)和矿化强度(c)等值线图

Fig. 10 Thickness(a), grade(b) and mineralization intensity(c) contour maps of No. III ore body group

矿体均位于焦家断裂下盘的蚀变破碎带中,且相互叠合,说明三者应属于同一矿床,即研究区以往认为的多个金矿床应为同一个金矿床的组成部分,为资源量超千吨的巨型金矿床。

4.2 矿床空间赋存规律及其找矿意义

矿床分布规律的研究对于指导找矿和成矿理论研究具有重要作用。以往主要基于浅部找矿成

果,有关学者对焦家断裂成矿带的金矿分布规律进行了较详细的研究,提出了矿床等间距分布、断裂拐弯或交会部位赋矿、矿体尖灭再现和分枝复合、矿体以 45°~60°侧伏角向南西侧伏、矿体斜列和叠瓦分布等矿床(体)分布规律^[3, 7-8, 11, 15]。

深部找矿揭示了新的矿床(体)空间赋存规律,以往通过对矿体与赋矿断裂耦合关系的研究提出了阶梯成矿规律^[21],认为深部金矿体主要赋存于断裂倾角陡、缓转折变化的较缓段。矿床三维模型清楚地揭示了焦家断裂的三维形态及断裂形态与金矿体的空间关系。焦家断裂由浅部至深部形成 3 个倾角陡缓转折变化的台阶,且在中部沿 55°方向形成一个“槽状”凹陷区。凹陷地段底部较平缓,压差小,热液流速慢,槽底和槽壁交汇地段为构造转折地段,为扩容空间,易于矿体富集。所以矿体主要富集在槽壁与槽底交汇地段和槽底构造平缓地段。在倾向上表现为构造转折端和缓倾地段控矿,基本符合阶梯式成矿模式。在走向上(由南西→北东)向右偏转地段为富矿地段,主要原因是成矿期构造具右行张扭活动特征^[44],走向向右偏转地段为构造转折张开地段,利于矿体富集(图 12-a)。

金矿体主要分布于断裂缓倾角的台阶位置,矿化富集地段均位于构造表面凹陷区域,断裂产状变化与矿体耦合关系规律对于深部找矿具有很强的指导意义。以往在胶东地区开展的浅部金矿找矿主要是基于金矿床中含有较多硫化物的特点,采用

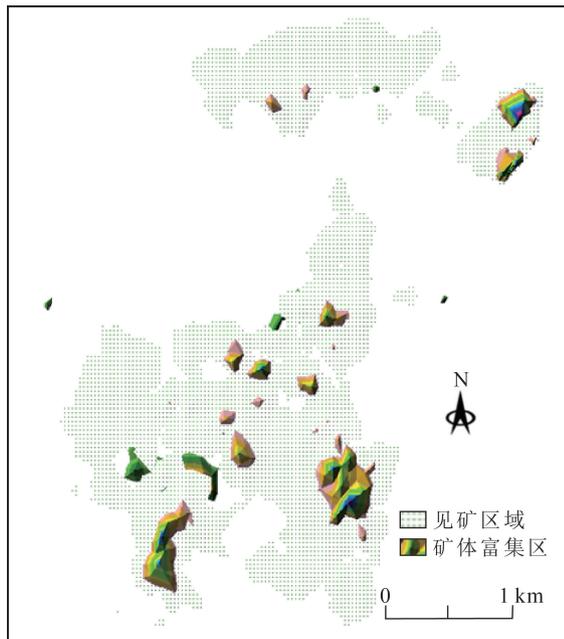


图 11 III号矿体群矿化富集区分布图

Fig. 11 Distribution map of mineralization enrichment area of No. III ore body group

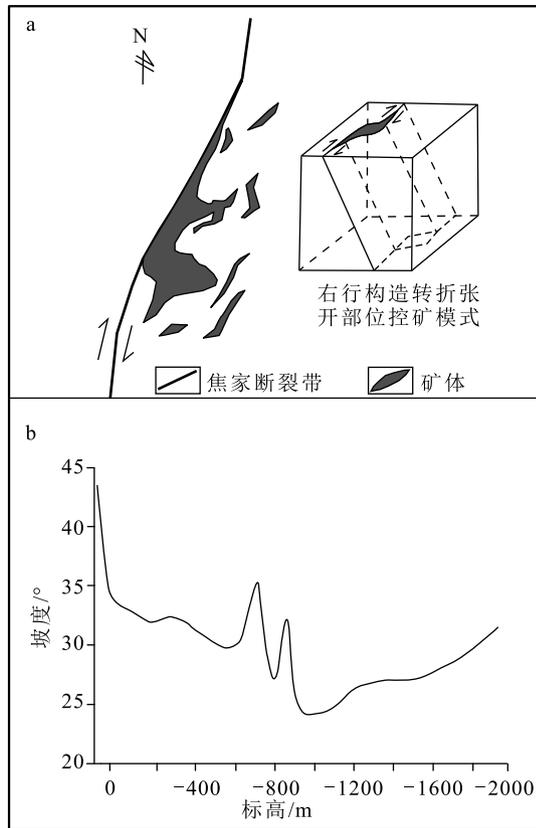


图 12 沿走向构造控矿模式(a)和沿倾向由浅到深构造分布曲线(b)

Fig. 12 Ore control model along strike(a) and structure distribution curve from shallow to deep along dip(b)

激电方法圈定由硫化物富集引起的激电异常,然后围绕异常进行工程验证。随着矿床深度的加大,硫化物异常信息渐趋微弱,常规的激电方法已经很难探测到深度大于 500 m 的硫化物富集体。由于胶东金矿的赋矿断裂规模大,且常沿新太古界变质岩与中生代花岗岩 2 种不同物性特征岩层的界面展布,因而成为深部找矿的主要目标体,断裂带中有利赋矿位置的识别成为深部找矿的关键问题。本文通过三维数据分析确定的断裂与金矿体的空间关系,有效地解决了这一问题,在今后的深部找矿中要将赋矿断裂的倾角变化区作为重要识别目标,阶梯成矿规律需要在深部找矿中予以重点关注和应用。

对焦家断裂带每 20 m 标高范围提取表面坡度值,分别计算各标高区段坡度的平均值并制作焦家断裂带由浅到深构造表面坡度变化折线图(图 12-b)。图中折线整体呈右倾,说明焦家断裂带由浅部

向深部表面坡度有降低趋势。由浅向深,构造呈陡-缓-陡-缓-陡阶梯式变化,出现两处“台阶”,为构造面由陡变缓部位,第一处位于地表至-700 m 标高,其中地表至-40 m 标高为陡倾段,-40~-700 m 标高为缓倾段,缓倾段的上部分与矿化富集区 I 赋存标高位置对应;第二处位于-740~-1600 m 标高,含 2 个陡倾交替段,第一段位于-740~-840 m,与矿化富集区 II、III 赋存标高位置对应,第二段位于-920~-1600 m,与矿化富集区 IV 赋存标高对应。陡缓交替中缓倾段与矿体矿化富集段对应,可以看出构造表面形态变化与成矿、富矿关系极密切。而且第二处“台阶”规模大,赋含 3 个矿化富集区,“台阶”规模大小可能影响矿体富集程度,“台阶”规模越大,形成的矿体可能越富。从焦家断裂带由浅到深构造表面坡度变化趋势看,-1600~-2020 m 标高,构造表面坡度逐渐变陡,-2000~-3000 m 标高可能形成第 3 个台阶,即在-2000~-3000 m 标高可能形成另一富矿段。

5 结 论

(1) 基于 500 个钻孔数据建立了平面面积 21.95 km²、深度约 3 km 的山东莱州焦家超巨型金矿床三维地质模型,清晰刻画了金矿床及与矿床有关地质体的三维空间特征。其中赋矿的焦家断裂在浅部倾角较陡,向深部逐渐变缓,沿倾斜方向呈铲式阶梯状分布,形成 3 个倾角变化的台阶。沿矿体倾伏方向形成一个“槽状”凹陷区。

(2) 通过三维透明化分析发现,以往作为独立金矿床勘查、开采的多个浅部矿区,其主要矿体向深部连为一体,构成资源量超过 1000 t 的同一个超巨型金矿床——焦家超巨型金矿床。在三维空间上,矿床主要由 3 个矿体组成,三者相互平行和叠合分布。

(3) 对矿化富集程度与断裂形态的分析表明,矿体沿走向和倾向厚度呈现厚—薄相间变化,矿体矿化强度的三维分布显示有 4 处矿化富集区,矿化富集区与断裂倾角变化部位吻合,且矿体主要富集在构造转折和倾角较缓部位。深部找矿应重视对断裂构造三维空间变化的分析及阶梯模式的应用。

(4) 通过金矿床控矿构造由浅到深坡度分布曲线,推测-2000~-3000 m 标高可能形成第 3 个台阶,可能存在另一富矿段。

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: 1-423.
- [2] 鲍中义, 钮涛, 高书剑, 等. 焦家金矿床深部矿体地质特征及深部成矿预测[J]. 山东国土资源, 2010, 26(1): 6-10.
- [3] 宋国政, 李山, 闫春明, 等. 焦家金矿田 I 号主矿体地质特征及找矿方向[J]. 地质与勘探, 2018, 54(2): 219-229.
- [4] 杨真亮, 解天赐, 刘天鹏, 等. 焦家成矿带 III 号矿体群成矿特征浅析及其找矿意义[J]. 山东国土资源, 2017, 33(9): 14-18.
- [5] 宋明春, 崔书雪, 杨之利, 等. 山东焦家金矿带深部找矿的重大突破及其意义[J]. 地质与勘探, 2008, 44(1): 1-8.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 李树统. 胶西北金矿集中区成矿规律研究[J]. 科技资讯, 2013, (7): 152.
- [10] 唐泽伟, 郭广军, 王恩敬, 等. 山东焦家金矿中深部矿体成矿规律及成矿预测[J]. 黄金科学技术, 2012, 20(6): 51-55.
- [11] 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.
- [12] 吕古贤, 孙之夫, 赵海, 等. 胶东焦家金矿田地质特征、成矿规律与深部预测[J]. 矿物学报, 2011, 31(S1): 969-970.
- [13] 宋明春, 宋英昕, 崔书学, 等. 胶东焦家特大型金矿床深、浅部矿体特征对比[J]. 矿床地质, 2011, 30(5): 923-932.
- [14] 杨承海, 石玉臣, 刘长春, 等. 山东省焦家金成矿带大比例尺成矿预测中地质模型的研究与应用[J]. 山东国土资源, 2006, (5): 34-37.
- [15] 崔书学, 袁文花. 莱州市寺庄金矿区第二金矿富集带成矿规律[J]. 地质调查与研究, 2008, (3): 186-191.
- [16] 吕古贤, 郭涛, 舒斌, 等. 胶东金矿集中区构造体系多层次控矿规律研究[J]. 大地构造与成矿学, 2007, (2): 193-204.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 宋明春, 宋英昕, 李杰, 等. 深部矿阶式找矿方法: 以胶东金矿集区深部找矿为例[J]. 中国地质, 2021, (10): 1-14.
- [20] 宋明春, 伊丕厚, 崔书学, 等. 胶东金矿“热隆-伸展”成矿理论及其找矿意义[J]. 山东国土资源, 2013, 29(7): 1-12.
- [21] 宋明春, 伊丕厚, 徐军祥, 等. 胶西北金矿阶式成矿模式[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(7): 992-1000.
- [22] 宋国政, 闫春明, 曹佳, 等. 胶东焦家成矿带超千米深部金矿勘查突破及意义——以纱岭矿区为例[J]. 黄金科学技术, 2017, 25(3): 19-27.
- [23] 宋国政, 杨真亮, 李瑞翔, 等. 莱州市纱岭矿区金矿地质特征及其找矿前景[J]. 山东国土资源, 2016, 32(10): 1-4.
- [24] 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.
- [25] 于学峰, 杨德平, 李大鹏, 等. 胶东焦家金矿带 3000m 深部成矿特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2019, 35(9): 2893-2910.
- [26] 史蕊, 陈建平, 刘汉栋, 等. 山东焦家金成矿带三维预测模型及靶区优选[J]. 现代地质, 2014, 28(4): 743-750.
- [27] 徐静. 某多金属矿三维地质建模及储量估算[J]. 现代矿业, 2019, 35(11): 98-101, 105.
- [28] 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.
- [29] 王洋, 赵雅诗, 王锐柯, 等. 三维地质建模技术的发展现状[J]. 化工设计通讯, 2019, 45(8): 243-244.
- [30] 刘晓芳, 田兰芬. 三维地质建模技术发展现状及建模实例[J]. 科技创新导报, 2017, 14(29): 126-127.
- [31] 王亚静. 三维地质建模技术发展现状及建模实例研究[J]. 石化技术, 2016, 23(1): 120.
- [32] 刘彦奎, 王欣然, 李建, 等. 基于 3DMine 的胶东上庄金矿体三维建模及其应用[J]. 山东国土资源, 2020, 36(12): 53-59.
- [33] 孙久虎. 数字矿山三维动态监管关键技术研究与应用[J]. 山东国土资源, 2015, 31(9): 63-66.
- [34] 王志亮, 胡子建, 陈昆明. 基于 Surpac 软件的王家村金矿体三维建模研究与应用[J]. 山东国土资源, 2015, 31(4): 75-78.
- [35] 汪浩, 杨立强, 王德瑞, 等. 胶西北寺庄金矿床红化蚀变过程及其对金成矿贡献[J]. 岩石学报, 2020, 36(5): 1515-1528.
- [36] 霍光, 宋国政, 闫春明, 等. 胶东纱岭金矿床构造叠加晕特征及深部找矿预测[J]. 山东国土资源, 2019, 35(9): 16-22.
- [37] 齐立平, 宋国政, 杨志全. 焦家断裂带寺庄金矿构造热液活动、蚀变矿化与成矿作用研究[J]. 世界有色金属, 2019, (11): 170-178.
- [38] 潘能海, 陈远荣, 徐建东, 等. 山东焦家金矿地球化学找矿模型研究[J]. 矿产与地质, 2017, 31(1): 143-149.
- [39] 杨真亮, 宋国政, 高书剑, 等. 焦家带①号分支蚀变带的研究及其地质特征浅析[J]. 山东国土资源, 2017, 33(1): 35-38.
- [40] 王瑜. 焦家金矿地质特征及成因分析[J]. 山东工业技术, 2016(3): 84.
- [41] 高书剑, 孙瑞刚. 焦家金矿床浅深部矿体地质特征对比[J]. 甘肃科技, 2010, 26(16): 54-57.
- [42] 袁文花, 王化江. 胶西北地区“焦家式”典型金矿床深部与浅部矿体特征对比研究[J]. 山东国土资源, 2009, 25(5): 20-29.
- [43] 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.
- [44] 郭林楠. 胶东型金矿床成矿机理[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2016.
- [45] 吴冲龙, 何珍文, 翁正平, 等. 地质数据三维可视化的属性、分类和关键技术[J]. 地质通报, 2011, 30(5): 642-649.
- [46] 王波, 雷传扬, 刘兆鑫, 等. 三维地质建模过程中综合地质剖面构建方法研究[J]. 沉积与特提斯地质, 2021, 41(1): 112-120.
- [47] 王方里. 三维地质建模技术在地勘找矿中的应用[J]. 世界有色金属, 2020, (14): 145-146.
- [48] 刘振, 吴耕宇, 杨博, 等. 基于 Crear XModeling 的地应力场模拟自动化系统研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(15): 19-25.
- [49] 刘同文, 于广婷. 大数据时代地矿数据资源服务的关键技术探讨[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(4): 148-150.
- [50] 于广婷, 曹宏伟, 刘同文, 等. 地质大数据支持下的智慧地矿业务支撑平台构建[J]. 测绘通报, 2020, (12): 128-131, 163.
- [51] 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.