

# Three-Dimensional Visual Modeling and Location Prediction of Deep Dayingezhuang Gold Deposit in Zhaoyuan, Shandong

Hongkui Li<sup>1,2</sup>, Xiancheng Mao<sup>3</sup>, Lei Tang<sup>4</sup>, Bing Shi<sup>1,2</sup>, Guodong Chen<sup>1,2</sup>, Yubo Zhang<sup>1,2</sup>, Taitao Liang<sup>1,2</sup>, Xuelin Han<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Shandong Geological Sciences Institute, Jinan Shandong

<sup>2</sup>Key Laboratory of Gold Mineralization Processes and Resources Utilization Subordinated to the Ministry of Nature and Resources, Jinan Shandong

<sup>3</sup>School of Geosciences and Information Physics, Central South University, Changsha Hunan

<sup>4</sup>Zhaojin Mining Co., Ltd., Zhaoyuan Shandong

Email: lhklhk126@126.com

Received: Mar. 19<sup>th</sup>, 2020; accepted: Apr. 9<sup>th</sup>, 2020; published: Apr. 16<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

The Dayingezhuang gold deposit in Zhaoyuan Shandong is located in the Zhaoyuan-Pingdu Fault Zone (Zhaoping Fault for short) in the Jiaobei uplift area of the North China Plate. Zhaoping Fault Zone is a NE-trending fault developed along the intrusive contact zone of Linglong granite body and Precambrian crystalline basement rock series and subjected multiphase tectonic superposition. It is not only an ore-controlling structure, but also an ore-conducting and ore-bearing structure. The Dayingezhuang gold deposit is a typical fractured zone altered rock type gold deposit, which mainly occurs in the cataclastic Linglong granite of the Zhaoping fractured footwall and is also distributed in the upper wall basement series. Targeting Dayingezhuang gold field as the research object, this paper introduced the three-dimensional geological modeling (3-DGM) and three-dimensional (3-D) visualization technology, to study and explore the 3-D, quantitative and visualization technology of concealed ore body prediction. Therefore, the key technologies such as 3-D morphological analysis of complex geological bodies, simulation of ore-controlling geological factor field, and 3-D quantitative extraction of metallogenic information have been made breakthrough. Also, the method of 3-D visual prediction of concealed ore body is preliminarily formed. Based on exploration engineering data, contouring specification and ore-forming geological regularity and combined with all kinds of data obtained from the known seismic, gravity, magnetotelluric method as the basic data of the deep geological structure research, the deep mineralization structure was reconstructed in 3-D, and the deep mineralization space and 3-D ore-forming information were analyzed and extracted. Further, the 3-D quantitative ore-forming prediction has been carried out. And on this basis, the 3-D quantitative metallogenic prognosis model is established. Finally, two visualized and stereoscopic prospecting targets I and II are delineated in the Dayingezhuang gold mine, which provided information for the optimal location of deep work in the future.

## Keywords

Deep Mineralization, Three-Dimensional Modeling, Visualization, Oriental Prognosis, Tectonic Reconstruction, Gold Deposit, Dayingezhuang in Zhaoyuan

# 山东招远大尹格庄金矿深部三维可视化建模与定位预测

李洪奎<sup>1,2</sup>, 毛先成<sup>3</sup>, 汤磊<sup>4</sup>, 石冰<sup>1,2</sup>, 陈国栋<sup>1,2</sup>, 张玉波<sup>1,2</sup>, 梁太涛<sup>1,2</sup>, 韩学林<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>山东省地质科学研究所, 山东 济南

<sup>2</sup>自然资源部金矿成矿地质过程与资源利用重点实验室, 山东 济南

<sup>3</sup>中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙

<sup>4</sup>招金矿业股份有限公司, 山东 招远

Email: lhklhk126@126.com

收稿日期: 2020年3月19日; 录用日期: 2020年4月9日; 发布日期: 2020年4月16日

## 摘要

山东招远大尹格庄金矿床位于华北板块之胶北隆起区内的招远-平度断裂带(简称招平断裂)中。招平断裂带是沿玲珑花岗岩体和前寒武纪结晶基底岩系的侵入接触带而发展、承生、并经多期构造叠加的一条北东向断裂, 既属控矿构造, 又是导矿和容矿构造, 大尹格庄金矿床主要产于招平断裂下盘的碎裂状玲珑花岗岩中, 在其上盘的基底岩系中亦有分布, 为一典型的破碎带蚀变岩型金矿床。本文以大尹格庄金矿田为研究对象, 引入三维地质建模(3DGM)及三维可视化技术, 研究探索隐伏矿体预测的三维化、量化及可视化技术, 重点突破了复杂地质体三维形态分析、控矿地质因素场模拟、成矿信息三维定量提取等关键技术, 初步形成了隐伏矿体三维可视化预测的方法。依据勘探工程数据、矿体圈定规范和成矿地质规律并结合已知的地震、重力、大地电磁等方法获得的各类数据作为研究深部地质构造的基本资料, 对深部成矿构造进行了三维重构, 对大尹格庄金矿深部进行了矿化空间分析和三维成矿信息提取, 开展了三维定量成矿预测, 在此基础上建立了三维定量成矿预测模型。在大尹格庄金矿田共圈定了I、II和III号三个可视化立体找矿靶区, 为今后深部工作优选区位提供了方向。

## 关键词

深部成矿, 三维建模, 可视化, 定位预测, 构造重建, 金矿床, 招远大尹格庄

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着计算机技术的强大发展, 三维可视化建模和定位预测目前被地学界广泛应用于矿床深部矿体预测。它具有成型、可随意变换表达形式、按使用者的需求进行矿体模拟形态三维多边形呈像、可以

用三维模型表达自然界中任何物理存在的物体等优点,用计算机或者其它视频设备显示的物体可以是现实世界的实体,也可以是虚构的物体。三维预测技术的发展,得益于计算机技术进行三维数据处理和表达能力的大幅度提高,20世纪90年代以来三维地质建模理论、方法和软件进入实用阶段[1]-[5],将三维数据模型概括为孔数据、图件数据、体元数据和三维网格数据,三维建模通过这些数据为数据源的数据流来表示[2] [5] [6] [7],并形成了三维地质建模的商用矿业软件。三维地质建模(3DGM)技术的实用化,为矿产资源定量评价的三维化和可视化奠定了技术基础。对于胶东金矿由于在我国金矿开采史上具有开采最早、产量最多的特性,也是当今中国最主要的金矿资源和生产基地,为我国输送了巨大的黄金金属量[8]。随着深地资源勘查成为找矿勘探工作的重点,勘查成本随勘探深度增加而大幅涨,对深部矿体的定位预测已成为资源勘查的关键[5] [9],胶东金矿勘查深度越来越深,评价风险及勘查风险也就越来越高,引入三维可视化建模和定位预测是目前经济可行的方案之一。招远大尹格庄金矿利用三维可视化技术和定位预测[9] [10],对-3000 m以浅的矿体存在空间进行预测圈定,指导今后的找矿实践,本文是对大尹格庄金矿进行三维可视化建模和定位预测的工作总结和深化。

## 2. 成矿环境与矿床地质

### 2.1. 成矿构造环境

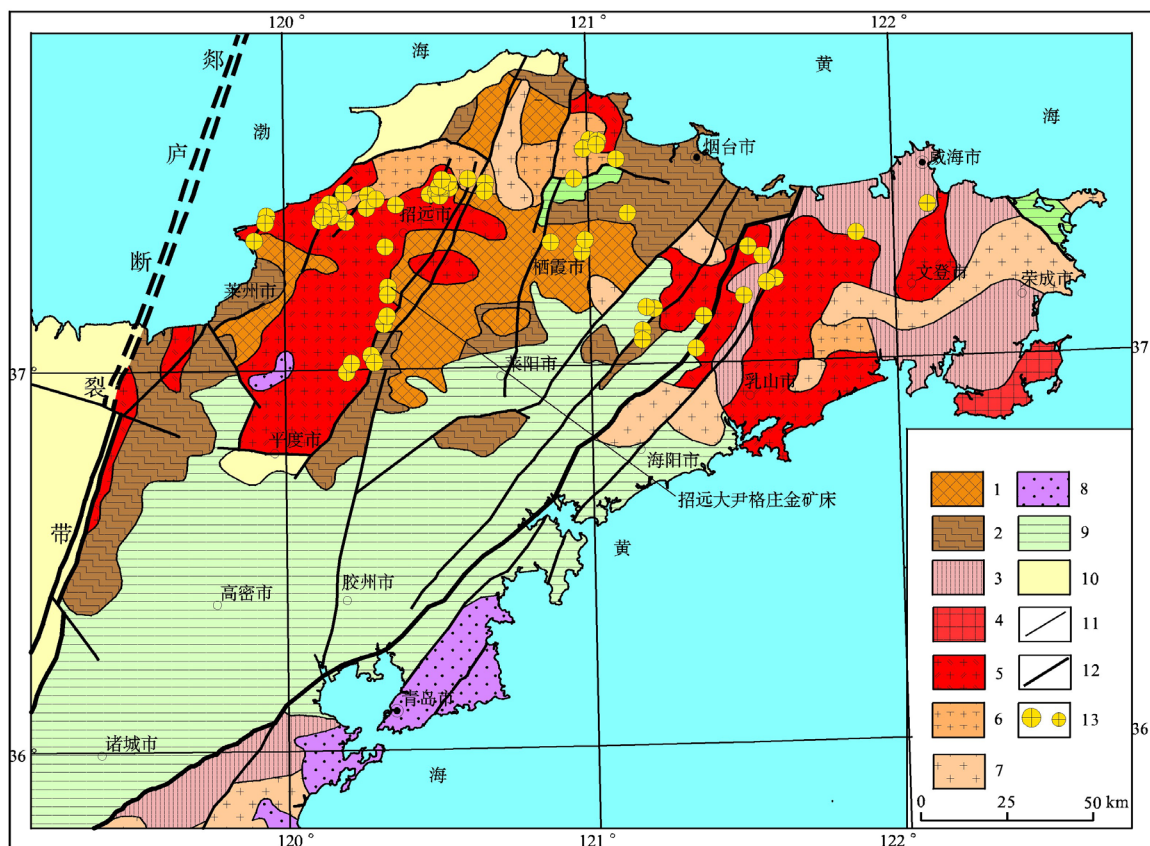
大尹格庄金矿的成矿环境是胶东大地构造环境及演化的缩影。本区太古宙为非均匀古老的成熟过渡型初始地壳,形成有中太古代唐家庄岩群、新太古代胶东岩群火山沉积建造,新太古代晚期出现洋内岛弧并发生大规模的岩浆熔融,形成中基性岩浆侵入和 TTG 质花岗岩系,代表了由不成熟陆壳向成熟陆壳的演化过程并形成花岗-绿岩地体,被认为胶东地区金矿的初始矿源层(岩)。元古宙为伸展型的陆壳碎屑岩、碳酸盐岩、钙镁硅酸岩及硅质岩的沉积,其地层单元为古元古代荆山群、粉子山群和芝罘群,南华-震旦纪蓬莱群,并在古元古代形成华北克拉通化,显示了从岛弧转化为陆内构造演化的特点。

至中生代胶东地区发生了大碰撞、大平移、大爆发的三大重要地质事件。大碰撞是在三叠纪华北板块与扬子板块碰撞造山形成苏鲁高压-超高压碰撞变质带,即中国大地构造层面的秦祁昆造山系;大平移是侏罗纪早期郯庐断裂带的平移拮贴使胶东与鲁西最终形成现在山东的拮图并开始了同构造期演化;大爆发则指晚侏罗世前后构造变形体制发生了重大转折,构造活动从晚侏罗世以前强烈的陆内挤压造山和地壳增厚作用演变到早白垩世以来强烈的陆内伸展和岩石圈减薄作用,是诱发区内成矿的大爆发的内因,故而在胶东形成数量众多的大型、特大型金矿床。在地质实体上表现为沉积-火山沉积作用形成的白垩纪莱阳群、青山群和还王氏群,侵入岩则为中生代燕山早期玲珑序列二长花岗岩、郭家岭序列花岗闪长岩、伟德山序列花岗岩和崂山序列碱性花岗岩,其中玲珑、郭家岭与金矿床形成关系密切(图 1),与之相伴的断裂构造十分发育,以 NNE、NE 为主, NW、EW 向断裂次之[11]-[18]。

### 2.2. 矿床地质

大尹格庄金矿床产于招远-平度断裂带内并严格受构造控制。招平断裂带沿玲珑花岗岩与新太古代栖霞序列 TTG 岩系接触带展布,总体走向 20°,倾向南东,倾角 21°~58°,平均 43°。带宽 56~140 m,由糜棱岩、碎裂岩、碎斑岩及少量断层泥、角砾岩等组成,显示浅层次的脆性构造岩与深层次的韧性构造岩并存,这些不同层次的构造岩共存于断裂带内并出露于地表,显然是早期深层次构造形成后经上升至浅部后再次遭受断裂活动的改造、叠加和破碎的结果。正是由于多期不同层次的构造活动,形成了广泛的以大而连通的弥散空间为前提的交代型金矿的格局。主裂面位于断裂带的上部,南段较平直,为玲珑

序列与栖霞序列的分界面；北段呈蛇曲状，沿倾向略显波状弯曲，穿切玲珑序列。主裂面之下普遍具黄铁绢英岩化蚀变，主裂面之上则具有强烈的碳酸盐化，硅化是其典型特征[15] [16]。



**Figure 1.** Geotectonic location map of Dayingezhuang gold mining area in Zhaoyuan. 1) Archean TTG and supracrustal rocks; 2) Proterozoic supracrustal rocks; 3) Proterozoic syn-collision igneous complex; 4) Triassic igneous complex; 5) Jurassic Linglong orogenic intrusions; 6) Early Cretaceous Guojialing orogenic intrusions; 7) Early Cretaceous Weideshan orogenic intrusions; 8) Early Cretaceous Laoshan orogenic intrusions; 9) Cretaceous sedimentary and volcano-sedimentary rocks; 10) Cenozoic sedimentary and volcano-sedimentary rocks; 11) main geological boundaries; 12) Main faults; 13) Medium and large gold deposit

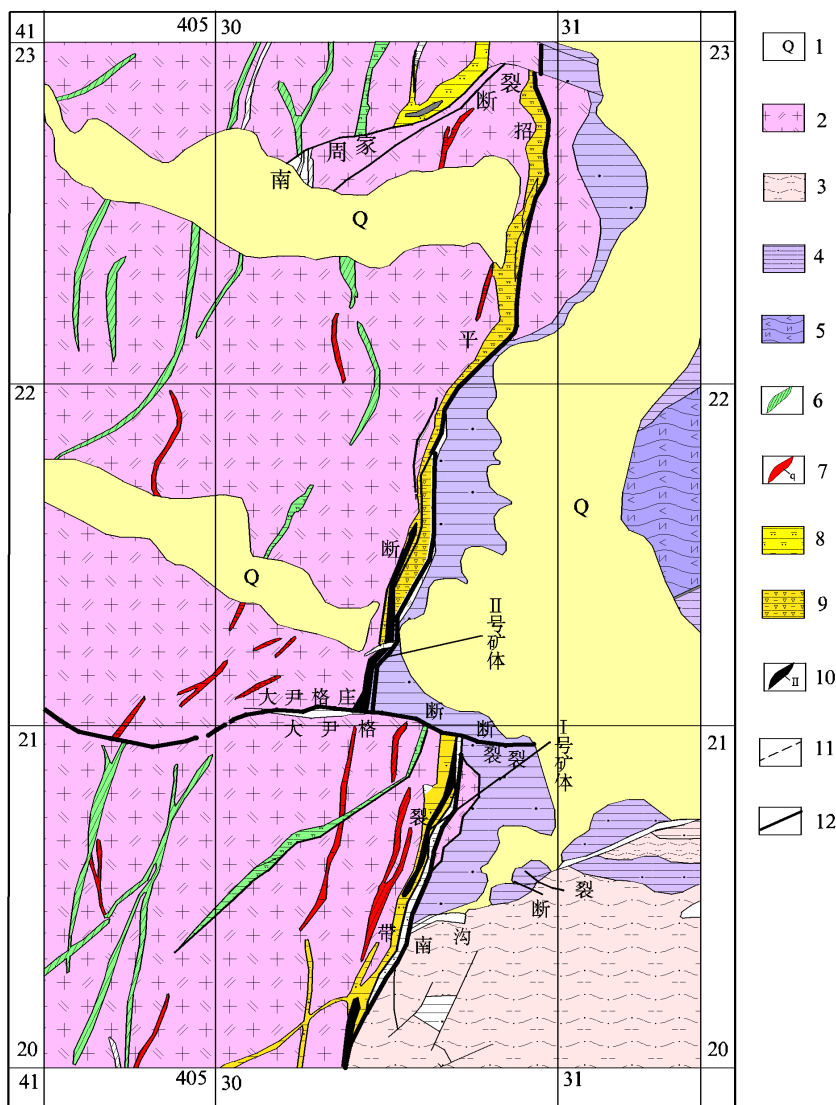
**图 1.** 招远大尹格庄金矿区大地构造位置图。1) 太古宙 TTG+表壳岩；2) 元古宙变质表壳岩；3) 高压/超高压变质带；4) 三叠纪岩浆杂岩；5) 侏罗纪玲珑侵入岩；6) 早白垩世郭家岭侵入岩；7) 早白垩世伟德山侵入岩；8) 早白垩世崂山侵入岩；9) 白垩纪沉积/火山沉积岩系；10) 新生代沉积/火山沉积岩系；11) 主要地质界线；12) 主要断裂；13) 大、中型金矿

矿体主要产于主裂面下盘，少部分在上盘，连续而稳定，总体形态较简单，呈似层状、透镜状、脉状及饼状。以大尹格庄断裂为界分为南北两段，南段属 I 号矿体群，北段属 II 号矿体群(图 2)。两矿体群在在+24 m~ -900 m 的标高范围之内共圈定 92 个工业矿体，矿体一般很少有无矿间隔，只有品位的贫富变化及厚度的差异。矿体长 30~1102 m，厚一般 0.62~52.35 m，倾向延深 60~1607 m，产状与主断裂基本一致，局部有 5°~10°斜交，其倾向延深大于走向延长，深部倾角逐渐变缓，并向 NE 侧伏。

### 3. 数据处理及三维构建

地质体三维建模，即利用计算机对与矿床形成和分布相关的各种地质体的几何形态和空间分布进行三维定量描述[10] [19]。它以各类地质数据为基础，通过将地质数据库转换成三维矿业软件的逻辑模式导入到软件中，建立矿床地质体的三维可视化数字模型[7] [20]。





**Figure 2.** Geological outline map of Dayegezhuang gold deposit. 1) quaternary; 2) late Jurassic granite; 3) paleoproterozoic schist; 4) neoproterozoic black cloud granulite; 5) new archaean amphibolite; 6) diorite porphyrite; 7) quartz vein; 8) sericitic cataclastic rock; 9) yellow iron sericite; 10) gold ore body; 11) presumed fault; 12) measured fault

**图 2.** 大尹格庄金矿床地质略图。1) 第四系; 2) 晚侏罗世花岗岩; 3) 古元古界片岩; 4) 新太古界黑云变粒岩; 5) 新太古界斜长角闪岩; 6) 闪长玢岩; 7) 石英脉; 8) 绢英岩化碎裂岩; 9) 黄铁绢英岩; 10) 金矿体; 11) 推测断层; 12) 实测断层

### 3.1. 数据处理

本次研究收集了大尹格庄金矿区 1:5 万、1:1 万和 1:2 千矿区 and 矿床地质图、勘查线剖面图 33 条, 钻孔柱状图 86 张、二维地震剖面 11 km、大地电磁测深 60 km、重力测量 60 km、可控源音频大地电磁剖面测量 60 km、GDP-II 剖面测量 13 km、广域激电测量 16 km, 以及研究矿体产状、成矿构造、围岩蚀变等地质资料若干。

将收集到的招平断裂带中段与大尹格庄金矿及相邻矿区多年积累的地质、矿产、开采掘进、物探(大地电磁、重力、地震、广域激电等)、化探、钻探资料和生产资料, 根据多元数据融合特点与三维地质建模的需要, 对原始资料进行统一编码和分类, 建立大尹格庄金矿多元地学空间数据库, 作为三维建模的基础。

对于具体的数据结构形式，分为线串模型结构、线框模型结构、块体模型结构，按主裂面、上下盘围岩、蚀变带、矿(化)体等符合 GOCAD 逻辑模式导入到软件中进行建模。

### 3.2. 深部成矿构造三维重建

深部构造的三维重建，主要是根据已知的矿区浅部钻探和开采资料，结合获取的地震、重力、大地电磁、构造化学等多源信息，获取深部地质体的形态、结构及其相互关系等构造信息，以三维地质建模和可视化软件为平台，建立地下不同深度、不同尺度的三维地质模型，实现深部地质构造过程的三维重构。其深部地质构造三维建模工作流程如图 3 所示。

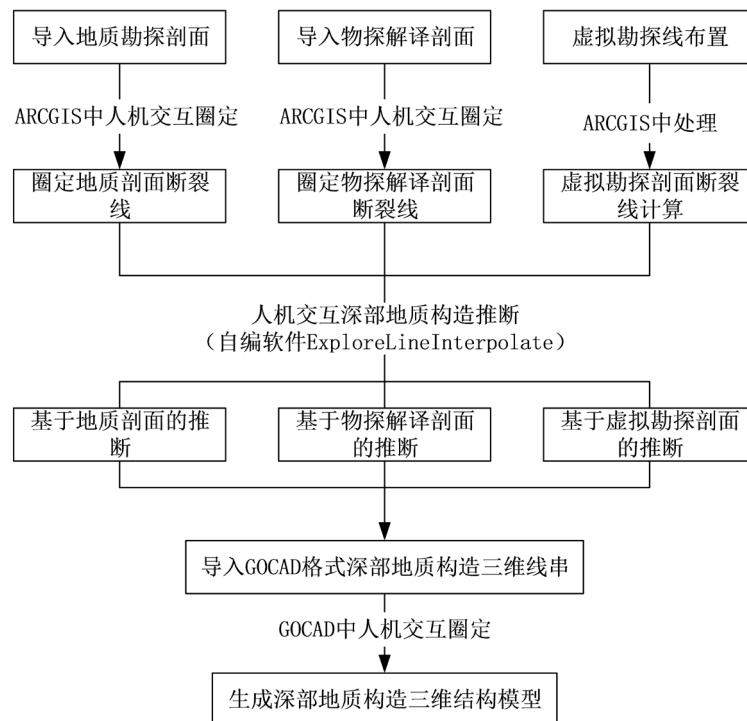


Figure 3. Flow chart of 3D reconstruction of deep geological structure  
图 3. 深部地质构造三维重建流程

#### 3.2.1. 地震勘探数据

利用大尹格庄二维地震勘探资料，将地震数据变成地质语言即地震剖面图或构造图。可以查明区域构造地质特征，推断地下地质构造的特点，详细了解构造的深部变化与分布情况，做出有效的深部构造判别。

#### 3.2.2. 重力勘探数据

招平 1:5 万重力等值线图，结合工作区的地质资料，对重力异常进行定性或定量解释，可推断复盖层以下密度不同的矿体与岩层埋藏情况，研究区域地质构造，查明与成矿有关的构造和岩体，从而找出岩矿体存在的位置和地质构造情况。

#### 3.2.3. 大地电磁测深数据

地电磁勘探数据是通过原始野外观测资料和各种等值线断面进行处理和定性分析，经过反演和地质推断得到的视电阻率剖面图等。根据视电阻率剖面图可以从不同侧面分析测区内地电断面沿水平和垂直方向的地层、构造变化情况，判断岩石结构和物质组成，与地下资源(矿等)密切相关。

上述地震勘探、重力勘探和大地电磁测深都可获取深部地质构造信息，如推测断裂面。利用地震、重力、大地电磁等多源信息进行深部地质构造重建，从基本的地质认识和已有的钻探数据出发，通过浅部数据驱动和深部知识驱动方式构建三维深部地质构造三维结构初始模型。在初始模型的基础上，再结合已有的地震、重力、大地电磁、构造地球化学等资料，推断从区域到矿床(体)的多尺度深部地质构造的三维结构模型。利用地震、重力和大地电磁法，获取深部地质构造格架、三维形态和分布样式。从多种方式获取的深部地质构造三维信息进行多层次、多精度耦合，最终实现深部地质构造的三维模型的最优重建。

### 3.3. 深部地质构造三维重建多源信息耦合处理策略

物化探勘探工程数据为深部地质构造三维重建提供了深部信息，但因不同勘探工程的勘探工作区范围和勘探深度有异，为保证数据的正确有效利用和建模精度，需要对多源信息分析处理，把数据耦合在一起，进行有效综合利用，选择恰当的数据来为三维重建提供建模信息。

基于深部地质构造三维重建的方法，(1) 分别对地震、重力、大地电磁等勘探数据进行定性分析，是否相互矛盾；(2) 对勘探工程地质剖面推断结果、物探工程解译剖面推断结果、虚拟勘探线断裂线插值等初始结果进行两两或综合分析比较；(3) 对分析比较结果进行判断，通过多种数据的耦合，对初始结果进一步处理，得到最终基础的模型构建信息。

### 3.4. 三维模型修复

由于后期构造的影响，现如今被观测的空间已不是成矿时期的原始地质空间，而是成矿后的构造所破坏的空间，因此，在被观测到的空间中获得的地质体空间分布特征和地质场特征，不等同于成矿作用时期的原始特征值。若根据被破坏空间获取的原始特征值来推测区域的成矿分布特征和规律，必然会产生较大的误差，降低预测模型的可靠性。

## 4. 成矿信息提取

对大尹格庄金矿进行三维定量成矿预测首先需要对研究区进行矿化空间分析和三维成矿信息提取，然后在此基础上建立三维定量成矿预测模型，三维建模的具体流程如图4所示。

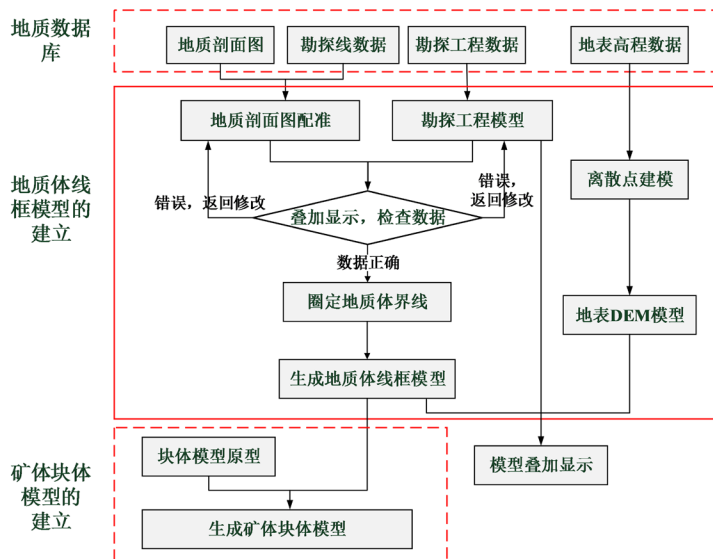


Figure 4. Flow chart of 3D modeling of geological bodies  
图4. 地质体三维建模流程图

## 4.1. 立体单元划分与取值

进行隐伏矿体预测前,需对研究对象赋存的地质空间按一定精度要求进行立体单元划分并赋值。

### 4.1.1. 地质空间

地质空间是在一定的地理空间范围内赋予地质内涵的三维可视化预测研究对象,这个空间是地质成矿条件内由  $x$ 、 $y$ 、 $z$  组成的三维地质空间,是成矿显示的空间,用各种边界条件对立方体空间进行限制获得真正内涵的地质空间,就是地质体产出和地质作用发生的具有成矿现象的地质体。

考虑大尹格庄金矿田已有的地质工作程度,结合本研究的具体目标,取标高 312.5 米至地下深部 -3012.5 米标高水平,为其垂直空间范围,整体垂深为 3000 米。

### 4.1.2. 立体单元划分

采用立体单元,亦称体元、体素、块体或单元。本次研究针对不同的工作属性分别选用两种不同精度来划分地质空间:(1) 精细精度(5 米精度)——立体单元尺寸为  $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 5\text{ m}$ ; (2) 标准精度(25 米精度)——立体单元尺寸为  $25\text{ m} \times 25\text{ m} \times 25\text{ m}$ 。矿体块体模型采用精细精度(5 米精度),除矿体块体模型之外的其它地质体块体建模、成矿地质因素模型、找矿信息指标提取、矿化预测均采用标准精度为 25 m。

### 4.1.3. 立体单元取值

将地质空间划分得到的立体单元进行地质描述等信息赋值,则为立体单元取值,表达这些信息的变量为单元属性。取值后的立体单元实际上是通过块体模型的方式实现了对地质空间各类信息的表达。单元的基本属性主要包括:立体单元的定位信息、单元对应的数字高程信息、单元地质体代码、单元矿化指标信息等,立体单元基本属性定义如表 1 所示。

**Table 1.** Basic properties and extended properties of stereo cells

**表 1.** 立体单元基本属性与扩展属性表

属性名	数据类型	数值范围	含义
x	Double	任意	该单元中心 X 方向绝对坐标
y	Double	任意	该单元中心 Y 方向绝对坐标
z	Double	任意	该单元中心 Z 方向绝对坐标
ix	Integer	以 0 作为起点	该单元 X 方向整数坐标,以左前下角作为原点
jy	Integer	以 0 作为起点	该单元 Y 方向整数坐标,以左前下角作为原点
kz	Integer	以 0 作为起点	该单元 Z 方向整数坐标,以左前下角作为原点
va	Integer	0, 1, 2, 3, 4	0—原始立方体单元; 1—地质空间单元; 2—矿化空间单元,无地质体信息; 3—矿化空间单元,并存在地质体信息; 4—预测空间单元
vt	Integer	不小于 0	单元已知性的属性标识
gcode	Char(20)	任意	该单元所在的地质体的代码
找矿信息指标集 (Au、Aumet)	Double	不小于 0	扩展属性。由成矿信息提取分析获得
预测结果变量集 (PAu、PAumet)	Double	不小于 0	扩展属性。由预测建模获得

### 4.1.4. 矿化信息提取

矿化指标是指元素 Au 的单元平均品位、单元金属量,用单元金属量(AuMet)来表示,用以区分预测的矿与非矿的边界。这一矿化变量是人为划分的,结合矿区的品位变化而自主确定的,不同的矿区有不



同的变量划分标准。三维地质模型的首要条件是对地质数据库的成功构建,对获取的各种地质数据资料,如地质、矿产、物化探、钻孔、坑道、探槽等,构建地质数据库,为三维成矿预测的研究奠定基础。然后按 GOCAD 逻辑要求进行地质统计学方法对预测单元内的信息进行人机计算,构建单元金属量来实现对金矿的三维预测。

具体计算时,采用  $25\text{ m} \times 25\text{ m} \times 25\text{ m}$  的立方体单元,当矿体较薄时,采用  $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 5\text{ m}$  米的单元块体进行输出,然后通过合并成  $25\text{ m} \times 25\text{ m} \times 25\text{ m}$  单元块体来进行计算。其块体合并遵循以下原则:

1)  $25\text{ m} \times 25\text{ m} \times 25\text{ m}$  的单元块体,其最多可以由 125 个  $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 5\text{ m}$  的单元块体构成,而在生成  $25\text{ m} \times 25\text{ m} \times 25\text{ m}$  的单元块体时,只要在其范围内存在任意一个  $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 5\text{ m}$  的单元块体,则输出这个  $25\text{ m} \times 25\text{ m} \times 25\text{ m}$  的单元块体,以保证已知矿体块体数据的完整性。

2) 对于输出的  $25\text{ m} \times 25\text{ m} \times 25\text{ m}$  的块体中金属的品位值,由构成该块体若干个  $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 5\text{ m}$  的块体的品位估计值的平均值来进行表示。

3) 对于输出的  $25\text{ m} \times 25\text{ m} \times 25\text{ m}$  的块体中金属量值,由构成该块体若干个  $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 5\text{ m}$  的块体中金属量的和来进行估计。

经过以上的块体合并,得到了这些单元的金属的品位值和金属量估计值,即 Au, AuMet。

### 4.3. 矿化空间分析

矿体的矿石品位、矿体厚度等各种标志在空间上的是受成矿环境制约的,即成矿空间决定了矿体的形态、规模,造成矿体变化的随机性,因此需进行矿化空间分析,主要是根据成矿规律、成矿条件和控矿构造来确定,对于金矿来说,品位变化的随机性和不确定性则更大,实际上三维预测是将不确定性的随机事件用三维预测变成确定性的理想事件来看待,其概率性不可预测。

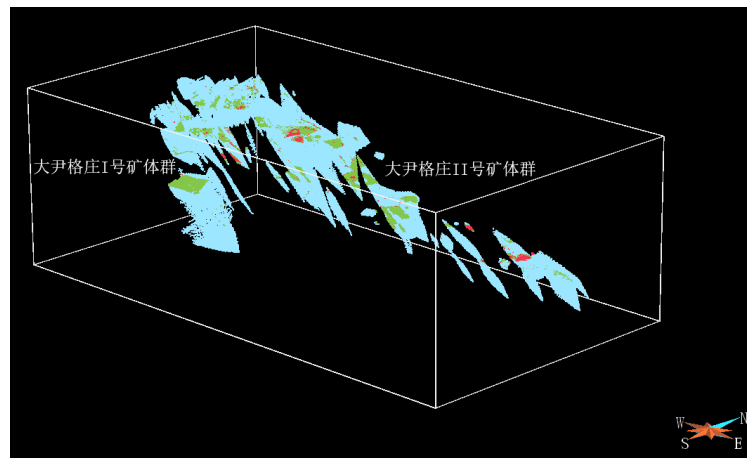
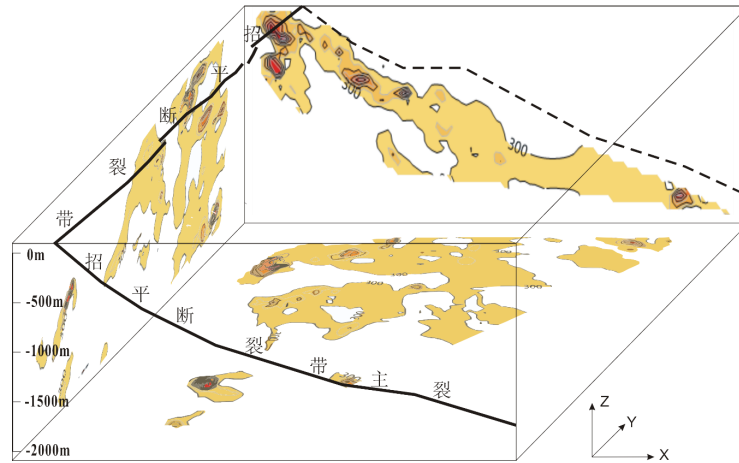


Figure 5. Flow chart of 3D modeling of geological bodies

图 5. 地质体三维建模流程图

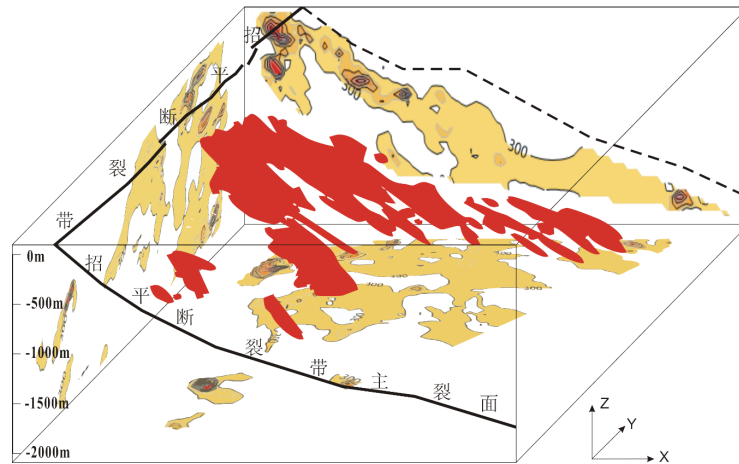
根据地质要求,参与统计的样品数据均应进行预处理,包括样品组合处理和特高品位样品的处理。组合样样长的选取应以最少拆分原始取样长度为原则,通过 Surpac 软件可以对矿区内各矿体群样品数据对样品数量、长度、最大长度、最小长度、均值、标准差和方差等进行统计。大尹格庄金矿床包含 I、II 号两个矿体群,矿体呈隐伏状态分布于招平断裂带的下盘,其形态、产状及分布严格受招平断裂带的控制。矿床中 I 号矿体群包括 19 个矿体,II 号矿体群包括 73 个矿体。将大尹格庄金矿区 I 号矿体群和 II 号矿体群的线框模型转换为规格为  $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 5\text{ m}$  的块体模型,分别利用距离加权平方反比法和克立格

法计算了 I 号矿体群和 II 号矿体群的单元平均品位、单元金属量和总金属量,生成块体模型如图 5 所示。按 I 号矿体群矿石体积质量为  $2.84 \text{ t/m}^3$ 、II 号矿体群矿石体积质量为  $2.76 \text{ t/m}^3$ , 计算 295,938 个 5 米单元的估算块体, 合并成 25 米单元为 23,887 个, 估算总金属量为 172.28 吨。大尹格庄金矿田矿化投影等值线图如图 6 和图 7 所示。



**Figure 6.** Three-dimensional projection isoline map of accumulated metal quantity in Dayingezhuang gold deposit field. (XYZ: metre)

**图 6.** 大尹格庄金矿田累积金属量三维投影等值线图(XYZ: 米)



**Figure 7.** Cumulative metal quantity and three-dimensional projection isoline map of orebody in Dayingezhuang gold deposit field (XYZ: metre)

**图 7.** 大尹格庄金矿田累积金属量和矿体三维投影等值线图(XYZ: 米)

### 4.3. 三维成矿信息提取

大尹格庄金矿矿体定位规律包括: ① 矿化蚀变带均受韧性剪切带或断裂构造的严格控制; ② 矿体的蚀变分带控矿特征, 断裂带蚀变较强且分带明显, 一般由内向外依次为黄铁绢英岩 - 黄铁绢英岩化碎裂岩 - 绢英岩化花岗质碎裂岩 - 花岗质碎裂岩 - 碎裂状花岗岩, 岩石破碎程度越高、蚀变越强、厚度越大、分带越明显, 矿化越好; ③ 早期的韧性剪切有晚期脆性叠加的构造有利于金矿化; ④ 断层泥对矿液起明显的屏障作用。据此确定了断裂面距离场因素(dFV)、断离面趋势-起伏因素(waFV、wbFV)、断裂面坡度因素(gFV)、断裂面陡缓转换部位综合场因素(fP、fV)作为成矿信息定量模型构建的选取因子。

经人机复杂计算,大尹格庄金矿化预测指标峰值出现范围(矿化富集空间)为:① 断裂面距离场因素  $dFV$  为 $-120\sim-80$  m,② 断裂面一级起伏因素  $waFV$  为 $-40\sim50$ m(小起伏),③ 断裂面二级起伏因素  $wbFV$  为 $-45\sim60$  m(小起伏),④ 断裂面坡度因素  $gFV$  为 $20^\circ\sim60^\circ$ ,最佳 $40^\circ$ 左右,⑤ 断裂面由缓变陡转换场因素  $fP$  为 $1.5\sim10.5$ ,⑥ 断裂面由陡变缓转换场因素  $fV$  为 $-30\sim0$ ,最佳 $-5$ ,⑦ 蚀变带蚀变场因素  $fA$  为 $35\sim195$ 。据此提取三维预测信息,开展大尹格庄金矿深部三维成矿预测。

## 5. 三维预测

### 5.1. 预测模型

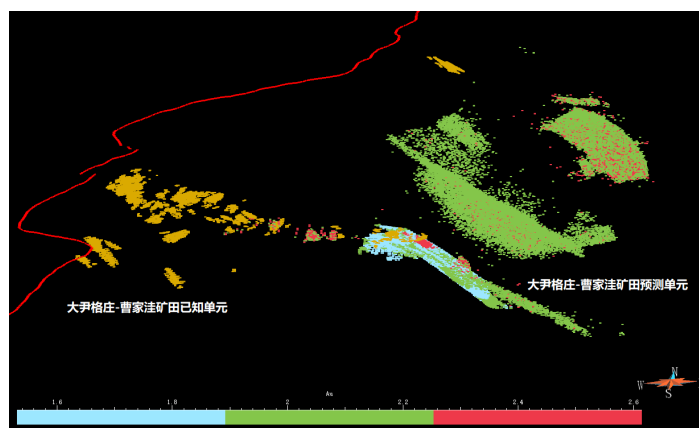
为了对大尹格庄金矿区中建立起的立体单元中的矿化指标进行预测,需将矿化指标与找矿信息指标进行相互关联,建立关联关系模型,这种关系模型称为三维可视化预测模型,通过未知区控矿信息融合进而实现未知区的资源潜力评价,完成三维可视化预测[9] [21]。采用迁移学习算法对模型进行估值并以品位和金属量作为定量表达的预测形式。

大尹格庄金矿田金矿田预测范围长宽均超过 3 Km,而预测深度在 $-3000$  m,所以在构建块体模型时,为了增加区内各类预测要素地质体在三维空间展布的精度,划分已知立体单元( $25\text{ m}\times 25\text{ m}\times 25\text{ m}$ ) 23,887 个,未知单元( $25\text{ m}\times 25\text{ m}\times 25\text{ m}$ )共有 13,725,659 个。

在 13,725,659 个预测立体单元中,根据预测指标峰值,按  $\text{Au}2.0$  ( $\times 10^{-6}$ )为预测单元的矿化指标,大尹格庄金矿田共有立体单元 68,479 个,其中已知含矿单元 4293 个,预测含矿单元 64,186 个。

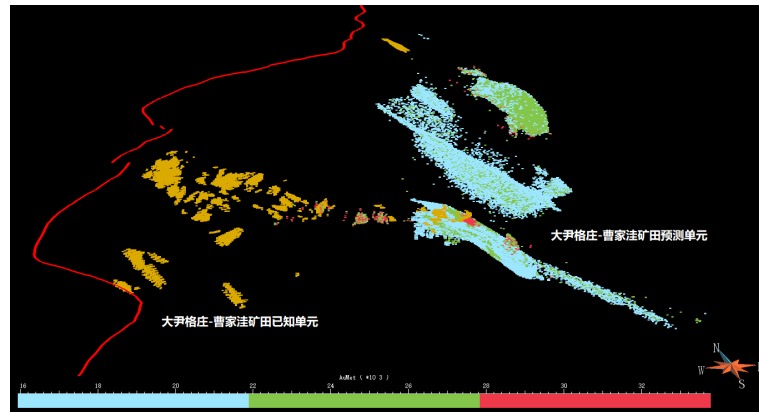
### 5.2. 预测成果

通过对整理的数据分析发现,矿化指标和找矿信息指标之间呈现出线性关系,进而确定大尹格庄金矿区矿体单元中的成矿信息和矿化指标(Au 和 AuMet)的关系,构建找矿信息指标。大尹格庄金矿区用多元线性回归分析方法建立矿化泛函模型的计算结果。表中所示统计检验(F 检验)表明,矿化变量 Au、AuMet 分别与找矿信息指标( $dF\text{-Au}$ ,  $waF\text{-Au}$ ,  $wbF\text{-Au}$ ,  $gF\text{-Au}$ ,  $fV\text{-Au}$ ,  $fA$ )、( $dF\text{-AuMet}$ ,  $waF\text{-AuMet}$ ,  $wbF\text{-AuMet}$ ,  $gF\text{-AuMet}$ ,  $fV\text{-AuMet}$ ,  $fA$ )在统计意义上存在显著的线性函数关系。利用预测模型得到的对单元矿化指标(Au、AuMet)的预测结果,并运用 GOCAD 软件对预测结果进行可视化表达,单元矿化指标 Au、AuMet 预测结果栅格模型的可视化显示效果。大尹格庄金矿田预测数据库中的单元矿化指标(Au、AuMet)的预测估值结果可视化显示效果[22] [23] [24] [25],如图 8 和图 9 所示。



**Figure 8.** Effect drawing of the known unit and prediction unit model of the known unit and prediction unit of the gold grade (Au) in Dayingezhuang gold deposit field

**图 8.** 大尹格庄金矿田金品位(Au)已知单元与预测单元模型效果图

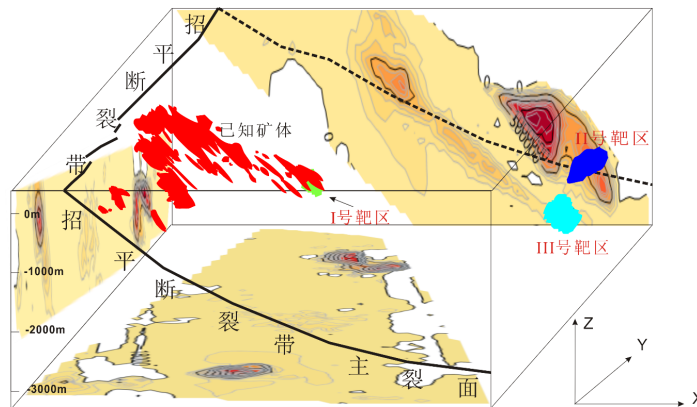


**Figure 9.** Effect diagram of known element and prediction unit model of metal quantity (AuMet) in Dayingezhuang gold deposit field

**图 9.** 大尹格庄金矿田金属量(AuMet)已知单元与预测单元模型效果图

### 5.3. 找矿靶区圈定及潜力分析

利用预测模型圈定的 64,186 个预测含矿单元,按照组合、共集、规模、含矿率、整体性和找矿潜力,在大尹格庄金矿田共圈定了 I、II、III 号三个立体找矿靶区(图 10)。



**Figure 10.** Prediction of accumulated metal content and three-dimensional projection isoline map of orebody in Dayingezhuang gold deposit field (XYZ: metre)

**图 10.** 大尹格庄金矿田预测累积金属量和矿体三维投影等值线图(XYZ: 米)

#### 5.3.1. I 号靶区

I 号靶区预测面积  $0.11 \text{ km}^2$ , 标高范围为  $-1550 \sim -1775 \text{ m}$ 。预测金平均品位约为  $2.24 \times 10^{-6}$ , 预测金金属量  $11.03 \text{ t}$ 。

I 号靶区在大尹格庄矿床 II 号矿体群的下方,从已知矿体侧伏规律来看,具向深部延伸的趋势,而靶区位于已知矿体群深部矿体矿化区的深部由缓变陡的区域、其下部的成矿流体通道延伸位置,可能是成矿流体汇聚的地段,具有良好的找矿潜力。因此该靶区预测 Au 品位较高、成矿信息指标表现出较大的相关性的特征,显示深部地质空间存在隐伏矿体的可能,为优先推荐的靶区。

#### 5.3.2. II 号靶区

II 号靶区预测面积  $0.28 \text{ km}^2$ , 标高范围为  $-1725 \sim -2550 \text{ m}$ , 呈长带状。预测金平均品位约为  $2.71 \times 10^{-6}$ , 预测金金属量  $24.66 \text{ t}$ 。

该靶区位于浅部已知矿体群矿化区的北东延伸方向, 招平断裂带出露产状具有明显的凹字形起伏特征, 该特征与大尹格庄矿区的深部矿体延伸规律极为相似。此外, 靶区的断裂坡度( $\sim 40^\circ$ )和陡缓变化部位较为稳定( $\sim 4^\circ$ ), 该特征对蚀变岩型矿化的赋存具有十分显著的相关性, 可能对成矿流体迁移、矿质沉淀的控制效应最为明显, 靶区的埋深部是第二成矿控矿的可能位置, 因此具有良好的成矿潜力。

### 5.3.3. III号靶区

III号靶区预测面积  $0.18 \text{ km}^2$ , 标高范围为  $-1875 \sim -2850 \text{ m}$ , 预测金平均品位约为  $2.58 \times 10^{-6}$ , 预测金金属量  $16.71 \text{ t}$ 。

该靶区位于已知矿体群矿化区的垂直延伸深部, II号靶区南部, 招平断裂带下盘。该靶区形态呈棱镜状、具有 NE 向侧伏特征。靶区水平投影部位, 招平断裂带具有明显的产状变化, 在深部断裂陡缓变化程度在  $5^\circ$  左右, 具有良好的找矿指标。

## 6. 结论

(1) 利用大尹格庄金矿多年积累的地质、矿产、开采掘进、物探(大地电磁、重力、地震、广域激电等)、化探、钻探资料和生产资料, 根据多元数据融合特点与三维地质建模的需要, 对原始资料进行统一编码和分类, 建立大尹格庄金矿多元地学空间数据库。

(2) 对大尹格庄金矿进行三维定量成矿预测首先需要对研究区进行矿化空间分析和三维成矿信息提取, 然后在此基础上建立三维定量成矿预测模型。

(3) 利用预测模型圈定的 64186 个预测含矿单元, 按照组合、共集、规模、含矿率、整体性和找矿潜力, 在大尹格庄金矿田共圈定了 I、II、III 号三个立体预测靶区, 估算了 I、II、III 号靶区的金金属量分别为  $11.03 \text{ t}$ 、 $24.66 \text{ t}$  和  $16.71 \text{ t}$ , 并对三个找矿靶区进行了潜力分析和勘查施工的建议。

## 基金项目

本文为国家自然科学基金项目山东招远 - 平度断裂带夏甸金矿深部成矿特征研究(41572068)、国家重点研发计划胶东矿集区三维结构与定位预测(2016YFC0600107-5)、部公益性专项胶东招平断裂带深部特征与金矿成矿过程研究(201511029)、山东地质勘查基金项目招平断裂带中段深部金矿成矿理论、找矿方法与成矿预测(2017CXGC1605)、山东省招远 - 莱州地区金矿成矿条件和成矿规律研究(2012003)和山东省泰山学者建设工程专项经费联合资助。

## 参考文献

- [1] Boissonnat, J.D. (1988) Shape Reconstruction from Planar Cross Sections. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, **44**, 1-29. [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(88\)80028-8](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(88)80028-8)
- [2] Houling, S.W. (1994) 3D Geoscience Modeling: Computer Techniques for Geological Characterization. Springer-Verlag, Berlin, 1-309. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-79012-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-79012-6_2)
- [3] Hu, Y., Yu, X.-H. and Li, S.-L. (2014) Improving the Accuracy of Geological Model by Using Seismic forward and Inverse Techniques. *Petroleum Exploration and Development*, **41**, 208-216. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(14\)60024-0](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(14)60024-0)
- [4] Huang, J., Smola, A.J., Gretton, A., et al. (2006) Correcting Sample Selection Bias by Unlabeled Data. In: *Advances in Neural Information Processing Systems 19, Proceedings of the Twentieth Annual Conference on Neural Information Processing Systems*, MIT Press, Cambridge, MA.
- [5] 毛先成. 三维数字矿床与隐伏矿体立体定量预测研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2006: 1-18.
- [6] 叶天竺, 肖克炎, 严光生. 矿床模型综合地质信息预测技术研究[J]. 地学前缘, 2007, 14(5): 11-19.
- [7] 肖克炎, 李楠, 孙莉, 等. 基于三维信息技术大比例尺三维立体矿产预测方法及途径[J]. 地质学报, 2012, 36(3): 229-236.



- [8] 李洪奎, 耿科, 嵇传源, 梁太涛, 等. 胶东金矿构造环境与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 2016: 1-8.
- [9] 毛先成, 邹艳红, 陈进, 等. 隐伏矿体三维可视化预测[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2011: 1-33.
- [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, 14(5): 54-61.
- [11] 李洪奎, 李逸凡, 耿科, 嵇传源. 山东鲁东碰撞造山型金矿成矿作用探讨[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(4): 533-542.
- [12] 李洪奎, 嵇传源, 耿科, 梁太涛. 胶东金矿成矿构造背景探讨[J]. 山东国土资源, 2012, 28(1): 5-13.
- [13] 李洪奎, 李大鹏, 郭宝奎, 耿科, 嵇传源. 胶东地区中生代碰撞后到造山后岩浆活动格架[J]. 岩石学报, 2015, 31(5): 2341-2352.
- [14] 李洪奎, 李逸凡, 耿科, 嵇传源, 梁太涛. 山东鲁东地区中生代构造-岩浆事件与金矿成矿作用[J]. 地球科学前沿, 2013, 3(3): 141-154.
- [15] 李逸凡, 李洪奎. 招远大尹格庄金矿微量元素特征及其意义[J]. 山东国土资源, 2014, 30(11): 13-19.
- [16] 李洪奎, 嵇传源, 单伟. 山东招远-平度断裂带二维地震剖面研究及其地质意义[J]. 地球科学前沿, 2015, 5(1): 12-21.
- [17] 李逸凡, 李洪奎, 汤启云, 嵇传源. 山东旧店金矿黄铁矿标型特征及其地质意义[J]. 黄金科学技术, 2015, 23(2): 45-50.
- [18] 李洪奎, 嵇传源, 单伟, 耿科, 梁太涛. 山东旧店金矿金矿物特征及其意义[J]. 山东国土资源, 2015, 31(5): 1-8.
- [19] 严加永, 吕庆田, 孟贵祥, 等. 三维可视化及物探新技术在矿山接替资源勘查中的应用——以铜陵狮子山矿田为例[J]. 地球学报, 2008, 29(1): 116-120.
- [20] 武强, 徐华. 三维地质建模与可视化方法研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2004, 34(1): 54-60.
- [21] 戴雪灵. 山东招远大尹格庄金矿成岩-成矿机理研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2012: 1-14.
- [22] 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(3): 86-90.
- [23] 刘庚寅, 杨斌, 陈艳, 等. 大尹格庄金矿成矿作用与隐伏矿体找矿标志分析[J]. 矿床地质, 2010, 29(1): 967-968.
- [24] 刘海英. 多种克里格方法在固矿储量估算中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2010: 21-32.
- [25] 徐述平. 招平断裂带金矿勘查模型与成矿预测[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009: 1-22.