

DOI: 10.12401/j.nwg.2023108

顾及构造改造的胶西北大尹格庄金矿床三维成矿预测

毛先成^{1,2}, 王春钺^{1,2}, 刘占坤^{1,2,*}, 陈进^{1,2}, 邓浩^{1,2}, 王金利^{1,2}

(1. 中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南 长沙 410083; 2. 中南大学有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410083)

摘要: 矿床在形成后常被构造改造, 但现有三维成矿预测中对其关注较少。笔者选择胶东半岛大尹格庄构造蚀变岩型金矿为研究对象, 采用基于不规则三角网 (TIN) 的构造复原方法还原被断裂错断的矿体与控矿断裂的三维结构, 开展复原前后的矿化空间/控矿因素对比分析并实现深边部三维成矿预测。结果表明, 构造复原方法消除了断裂和矿体被错断产生的空间距离及倾角变化; 复原后的矿化分布具有更强的空间自相关性, 被错断区域的矿化分布由分散变为连续。此外, 相同参数下, 复原后的预测模型比复原前模型具有更高的性能, 说明对复原后的矿化分布和控矿指标之间的关联关系表达更加显著。因此, 顾及构造改造的三维成矿预测有利于预测结果的准确性, 可为大尹格庄矿床深部找矿工作提供可靠参考。

关键词: 不规则三角网; 构造复原; 三维成矿预测; 大尹格庄金矿床

中图分类号: P628

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)05-0072-13

Three-Dimensional Metallogenic Prediction with Integration of Structural Reconstruction at the Dayingezhuang Gold Deposit, Northwestern Jiaodong Peninsula

MAO Xiancheng^{1,2}, WANG Chuntan^{1,2}, LIU Zhankun^{1,2,*}, CHEN Jin^{1,2}, DENG Hao^{1,2}, WANG Jinli^{1,2}

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring Ministry of Education, School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2. Key Laboratory of Non-Ferrous Resources and Geological Hazard Detection, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: Mineral deposits are often deformed after mineralization, which is, however, less concerned in the current three-dimensional (3D) prospectivity modeling. This paper selected the Dayingezhuang structural altered rock type gold deposit as a case study and used a structural restoration method based on triangular irregular network (TIN) to reconstruct 3D orebody and ore-controlling fault, analyzed and compared the mineralization structure and ore-controlling factors before and after restoration and finally completed the 3D mineral prospectivity at depth. The results show that the structural restoration method can eliminate the variation of spatial distance and dip angle of fault and orebody caused by deformation. The reconstructed mineralization distribution has a stronger spatial autocorrelation feature that is shown as the change of scattered mineralization distribution to spatially continuous at the offset parts. In addition, the reconstructed prediction model has higher performance than that without restoration under the same parameters, indicating that the correlation between the

收稿日期: 2023-02-23; 修回日期: 2023-06-02; 责任编辑: 姜寒冰

基金项目: 国家自然科学基金重点项目“矿床时空结构定量表征与智能理解”(42030809)资助。

作者简介: 毛先成 (1963-), 男, 教授, 长期从事三维成矿预测研究。E-mail: mxc@csu.edu.cn。

* 通讯作者: 刘占坤 (1992-), 男, 讲师, 主要从事成矿系统与三维成矿预测研究。E-mail: zkliu0322@csu.edu.cn。

mineralization distribution and ore control factors is more significant. Therefore, the three-dimensional metallogenic prediction modeling with integration of structural reconstruction has improved the prospectivity accuracy and can provide a reliable reference for deep prospecting in the Dayingezhuang deposit.

Keywords: TIN; structural reconstruction; 3D prospectivity modeling; Dayingezhuang gold deposit

随着浅部矿产资源的消耗和枯竭,资源勘查工作向“第二成矿空间”发展,深部三维成矿预测已成为当前找矿工作的重点领域(Liu et al., 2005; 赵鹏大, 2007)。近年来,大量学者在前期研究的基础上整合并建立了矿产资源三维成矿预测的理论方法,可抽象为三维地质模型构建-成矿信息定量提取-三维预测模型构建3个基本过程(陈建平等, 2007; 肖克炎等, 2012; Mao et al., 2019; 陈进等, 2020a; 邓浩等, 2021),定量表征矿化分布、成矿信息及二者的关联关系,实现深部矿产资源勘查的立体化、量化、透明化,为深部找矿提供重要参考。

矿床的形成、改造和保存明显受构造控制,成矿构造对矿床和矿体的分布具有显著的控制和指示作用(Huston et al., 2012; Bray et al., 2014; Lu et al., 2016; Lebrun et al., 2017; Liu et al., 2021a)。因此,成矿构造等相关地质体的三维建模是三维成矿预测的重要前提,为开展三维结构分析、成矿信息提取、预测模型构建提供重要的模型数据支撑(Mao et al., 2019; Liu et al., 2021b; Wang et al., 2022; Chen et al., 2022; 邱芹军等, 2022)。但由于地质演化的复杂性,矿床形成后常出现构造改造活动,这些改造作用往往破坏了原始矿化空间结构与构造控矿信息(Deng et al., 2019; Hronsky, 2019),使得在当前成矿空间分析获得的矿化规律存在偏差,提取的成矿信息可能是扭曲的、混杂的,进而严重影响深部矿产预测的有效性和可靠性。因此,开展矿产资源三维成矿预测,需要顾及成矿后的构造改造作用,以准确查明构造改造前深部成矿构造对矿化空间定位的控制机制,从而保证深部矿产资源定量预测的可靠性。

胶东半岛是中国最大的金成矿省,其中85%以上的金资源赋存于胶西北招远-莱州成矿带3条NE-NNE走向区域断层(招平断裂、焦家断裂、三山岛断裂)内,具有典型的构造控矿特征(宋明春等, 2018; 毛先成等, 2020)。大尹格庄热液型金矿床是胶西北金矿集区主要的超大型矿床之一,其主要的控矿、导矿及储矿构造为招平断裂,且在成矿后期,招平断裂被矿区内的尹格庄断裂错断(徐述平等, 2010;

Yang et al., 2014; Liu et al., 2021a)。近年来,大尹格庄矿床已经开展了一系列三维成矿预测研究并取得了良好的效果(陈进等, 2020a, 2020b; 邓浩等, 2020),然而当前大多数成矿预测研究都是基于现存空间的招平断裂三维模型开展的(陈进等, 2020a, 2020b; 邓浩等, 2020),未能考虑大尹格庄断裂对矿床的错断作用对预测模型及结果的影响。因此,在大尹格庄矿床成矿预测中顾及构造改造作用,有利于将成矿构造、地质体、矿化及空间均恢复到成矿期的状态,建立更加有效三维成矿预测模型,从而降低深部找矿工作的风险和不确定性。

笔者在大尹格庄金矿床开展顾及构造改造的三维成矿预测,采用基于不规则三角网(TIN)的被错断断层复原建模方法,对成矿构造三维模型及成矿空间进行复原,在复原前后的三维模型的基础上,分别进行矿化空间和控矿因素分析,并利用支持向量机和局部加权回归构建三维预测模型,探讨成矿构造复原对三维成矿预测的准确性的影响,为大尹格庄矿床的深部矿产资源预测工作提供定量、可靠的信息指导。

1 地质背景与概念模型

胶东半岛位于华北克拉通东南缘(图1),以五莲-烟台断裂为界,西北为胶北地体,东南为苏鲁造山带(Song et al., 2015; Yu et al., 2018)。胶西北大尹格庄金矿位于胶北地体,出露地层主要为前寒武纪变质结晶基底,包括新太古代胶东群、古元古代荆山群/粉子山群和新元古代蓬莱群,其中胶东群由英云闪长-奥长花岗岩-花岗闪长质岩(TTG)、片麻岩、斜长角闪岩和变粒岩组成(Xie et al., 2014; Jiang et al., 2016)。中生代大规模的构造-岩浆活动产出了广泛展布的中生代花岗岩,主要有晚侏罗世玲珑、栾家河花岗岩,早白垩世郭家岭、艾山、韦德山花岗岩和一系列镁铁质-长英质岩脉。

胶东半岛断裂构造发育,NNE-NE向断裂为主要的控矿构造,目前已发现的超大型金矿均产于胶东半岛西北部的NNE-NE向的招平断裂带、焦家断裂带

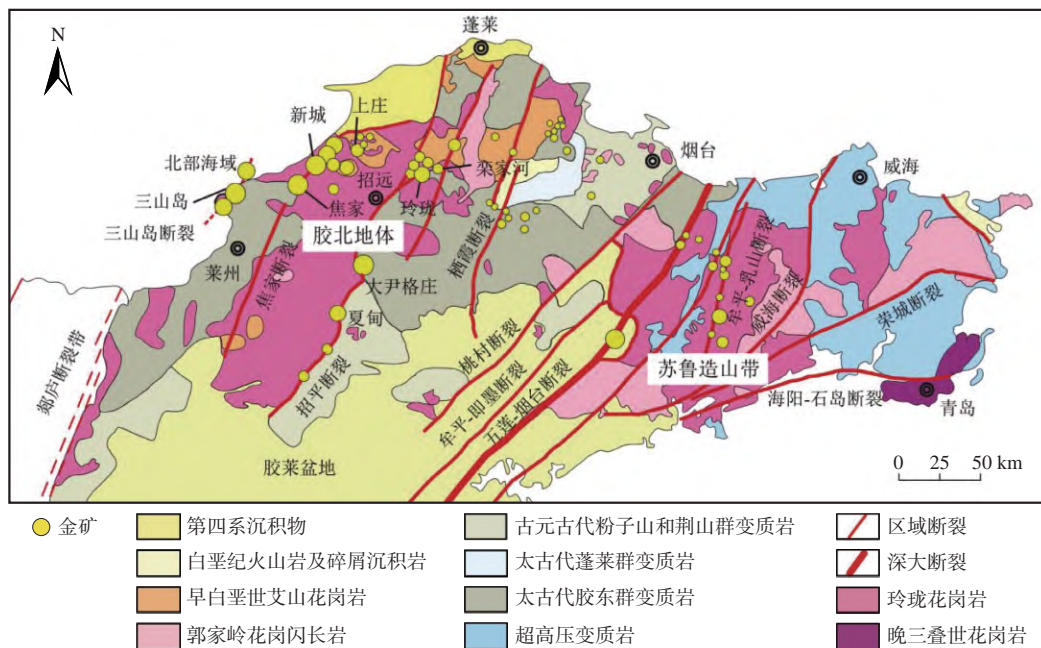


图1 胶东半岛区域地质图(修改自杨立强等, 2014)

Fig. 1 Simplified geological map for the Jiaodong Peninsula

和三山岛断裂带;EW-NEE向断裂主要表现为弧形褶皱带和断裂构造带,形成时间跨度较大,多被后期断裂构造改造;NW向断裂发育规模较小,活动时间晚于金成矿时间(120 Ma),部分截切 NNE-NE 向断裂(图1)。

大尹格庄金矿床位于招平断裂带中段(图2),是典型的破碎蚀变岩型金矿。矿区内招平断裂带走向 NE-NNE,倾向 SE,倾角约为 40°,宽度为 40~80 m,上盘为胶东群变质岩,下盘为玲珑花岗岩,断裂面附近发育典型的糜棱岩、碎裂岩,反映出脆性-韧性变形特点。区内发育近 EW 向的大尹格庄断裂,为成矿期后构造(图3),倾向 NNE,倾角为 43°~60°,宽度为 1~5 m,将招平断裂带及大尹格庄金矿床错断为两部分,但形态上并未发生扭曲(图3)。

大尹格庄金矿体绝大多数产于断裂面下盘的绢英岩化花岗岩和绢英岩化花岗质碎裂岩,矿化连续稳定,与断裂面具有一致的空间变化规律,呈舒缓波状展布。矿石以蚀变岩型矿石为主,也有少量石英-硫化物脉型矿石。蚀变岩型矿石主要呈细脉浸染状和网脉浸染状产出主断裂面附近,金品位通常 <7 g/t。石英脉型矿石多以脉状、网脉状产出次级断裂或区域断层远端,金品位较高,大多为 7~207 g/t(李洪奎等, 2017)。大尹格庄金矿床中两种矿化呈穿插/胶结或伴生关系。矿石中的主要载金矿物为银金矿,以独

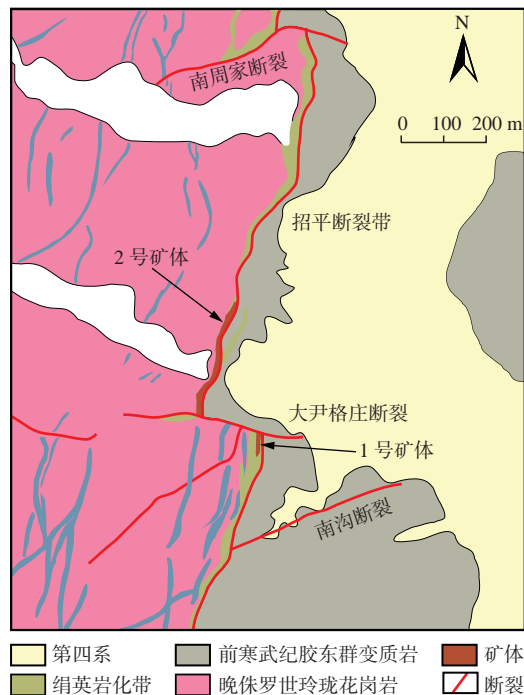


图2 大尹格庄矿床地质简图(Yang et al., 2016)

Fig. 2 Geological map of the Dayingezhuang deposit

立矿物或与多金属硫化物、碲/铋矿物共生形式出现(Yang et al., 2016; Liu et al., 2021a)。

为定量表达构造形态特征及其控矿影响,发现全面、客观、深层次的控矿规律,结合大尹格庄金矿床与招平断裂带紧密的空间关系,总结归纳大尹格庄金

矿的矿体预测概念模型(表 1)。

2 研究方法

在建立的招平断裂面三维模型、大尹格庄矿体三维结构模型和矿体定位概念模型的基础上,恢复断裂面和矿体的原始形态,通过对几何结构和物质三维结构的深入分析,查明深部成矿构造对矿化空间定位的制约,定量提取有利成矿信息,进行大尹格庄深部资源预测及对比,具体流程如图 4 所示。

2.1 基于 TIN 模型的成矿构造复原方法

构造复原方法关注成矿期后构造活动的改造影响,是恢复被构造改造或破坏的地质体原始形态、复

原打乱的矿化信息、得到地质体原始模型的有效手段。成矿构造初始模型是根据断裂信息进行三维地质建模得到的断裂面三角网(TIN)模型,构造复原的实质是将组成主裂面 TIN 模型的所有三角形顶点的坐标进行复原。在三维初始模型的基础上,提取相交的两条断裂面的相交线为标志线,将标志线进行微分与复原;根据待复原点距标志线的距离设定衰减系数与衰减函数,得到任意待复原点的复原后坐标。

(1)提取与微分标志线

对被错断的主裂面 T_m 和切割面 T_c 进行求交运算,得到 2 条被错断断层的复原标志线 $L_i, i = 1, 2$,如公式(1)所示。设标志线与勘探剖面图的交点为特征点 Q (图 5a)。

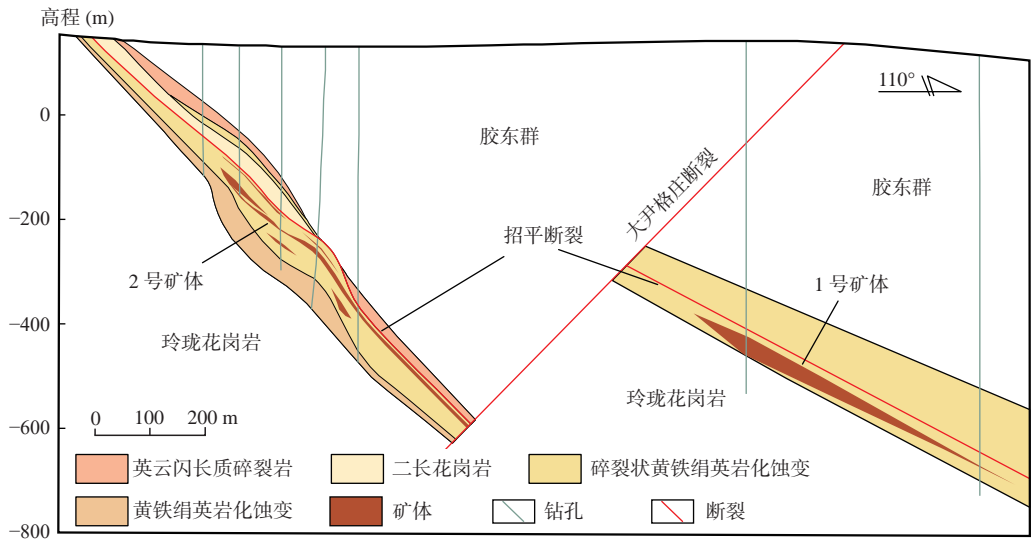


图 3 大尹格庄矿床 70 号勘探线剖面图
Fig. 3 No.70 section of the Dayingezhuang deposit

表 1 大尹格庄金矿矿体预测概念模型表

Tab. 1 Conceptual model for gold prediction of the Dayingezhuang gold deposit

地质体	控矿地质因素	地质意义	表达形式
矿化分布	自身空间分布 (JOre)	反映金的品位 (Au) 和金属量 (AuMet) 的空间结构。	建模: 克立格法等 表达: 栅格模型 指标: JOre
	距离场 (dF)	反映成矿流体从断裂面向两侧的流动程度。	建模: 距离分析 表达: 栅格模型 指标: dF
招平主断裂面	形态起伏 (waF、wbF)	反映断裂面形态起伏变化对矿化的控制作用。	建模: 形态分析 表达: 栅格模型 指标: waF、wbF
	坡度分析 (gF)	反映断裂面对含矿流体的圈闭和矿质沉淀的控制作用。	建模: 形态分析 表达: 栅格模型 指标: gF
	陡缓变化 (cF)	反映断裂面由陡变缓/由缓变陡部位对矿化的控制作用	建模: 形态分析 表达: 栅格模型 指标: cF

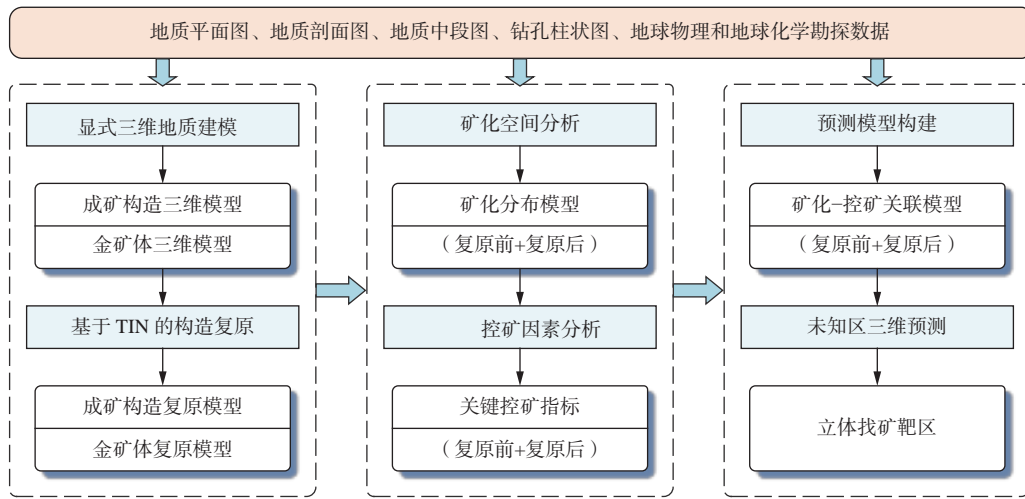


图4 顾及构造改造的大尹格庄金矿三维成矿预测流程图

Fig. 4 Three-dimensional mineral prospectivity modeling flowchart of the Dayingezhuang gold deposit with structural reconstruction

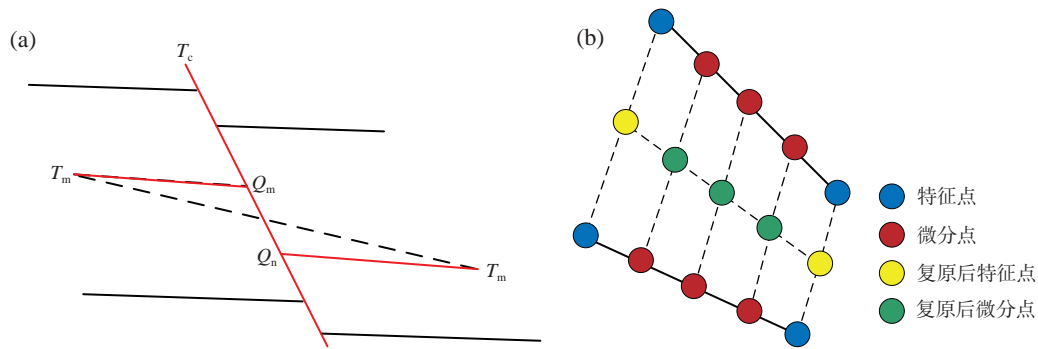


图5 断层被错断的剖面表现形式(a)和复原向量计算示意图(b)

Fig. 5 (a) Profile showing the offset fault and (b) schematic diagram of recovery vectors

所有特征点可构成两两配对的特征点集合 A_1, A_2 , 如公式(2)所示。

$$L_i = T_m \cap T_c \quad (1)$$

$$A_1 = \{Q_m | m = 0, 1, 2, \dots, M\},$$

$$A_2 = \{Q_n | n = 0, 1, 2, \dots, M\} \quad (2)$$

式中: M 为标志线段数; m 和 n 为特征点序号。

对标志线进行微分, 将每段标志线微分成 N 段, 得到微分点集合 B_1, B_2 , 如公式(3)所示。

$$B_1 = \{P_{1k} | k = 0, 1, 2, \dots, MN\},$$

$$B_2 = \{P_{2k} | k = 0, 1, 2, \dots, MN\} \quad (3)$$

式中: B_1 和 B_2 为微分点集合; N 为每段标志线微分段数; k 为微分点序号。

(2) 微分点的复原向量计算

微分点需要向一定的方向平移一段距离进行复原(复原向量, 如图 5b 所示)。由于微分点是两两配对的, 假设 P_{1k}, P_{2k} 为一对配对点, 即断裂被错断前的同一点, 则 P_{1k} 的复原向量应为 $(P_{2k} - P_{1k})/2$, P_{2k} 的复原向量应为 $(P_{1k} - P_{2k})/2$ 。微分点复原后的坐标可由公

式(4)得出, C_{1k2k} 和 C_{2k1k} 分别表示 P_{1k} 和 P_{2k} 平移后的坐标。

$$C_{1k2k} = P_{1k} + (P_{2k} - P_{1k})/2$$

$$C_{2k1k} = P_{2k} + (P_{1k} - P_{2k})/2 \quad (4)$$

(3) 待复原点复原向量计算

设定搜索半径 r , 求得搜索半径 r 范围内所有标志线微分点的复原向量, 对微分点的复原向量进行距离平方反比加权, 得到主裂面 TIN 模型的任意待复原点的复原向量 \bar{R} 。

$$\bar{R} = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{d_i^2} / \sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2} \quad (5)$$

式中: d_i 为待复原点到微分点的欧氏距离; R_i 为微分点的复原向量。

(4) 待复原点复原后坐标的计算

由于不同位置切割面给断裂面造成的影响不同, 所以复原向量相同的两个待复原点, 平移幅度可能是不同的: 距标志线较近的待复原点, 复原时平移的幅

度较大,距标志线较远的待复原点,切割面给断裂面带来的影响较小,复原时平移幅度也较小。因此在计算待复原点复原坐标时,引入待衰减距离 d_w 和距离衰减系数 w 以表达不同位置处待复原点的平移程度,其中待衰减距离 d_w 的计算见公式(6),距离衰减系数 w 的计算见公式(7),复原后坐标 C_1 的计算见公式(8)。

$$d_w = \sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i} / \sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2} \quad (6)$$

式中: d_i 为待复原点到标志线微分点的欧氏距离。

$$w = \exp\left(-\frac{d_w^2}{d_r^2}\right) \quad (7)$$

式中: d_r 为衰减半径; d_w 为待衰减距离。

$$C_1 = w \bar{R} + C_0 \quad (8)$$

式中: C_0 为待复原点的复原前坐标; w 为距离衰减系数; \bar{R} 为公式(5)求得的复原向量。

2.2 矿化空间及控矿因素分析方法

(1) 矿化空间分析

矿化空间分析是根据勘探工程数据、钻孔采样数据和矿体三维模型等信息进行矿化分析,建立矿化空间分布模型,即,通过矿化空间变异结构建模与分析,对已知区中各个块体(立体单元)的矿化指标(Au品位和金属量 AuMet)进行估值,定量表征矿化的空间分布。

(2) 控矿因素分析

控矿因素分析是以大尹格庄金矿床矿体定位概念模型为知识驱动,采用三维空间分析手段对距离场、倾角、陡缓转换、形态起伏等成矿构造三维形态特征进行提取的过程。

距离场分析:获取矿化块体单元到控矿主裂面的距离分布函数,表征断裂面对该块体单元矿化的影响程度。在三维空间中距离(dF)定义为立体单元到断裂面的最小欧式距离,并规定位于断裂面上盘的单元距离为正,位于断裂面下盘的单元距离为负。

断裂面形态起伏分析:揭示波状起伏的断裂面形态对金的控矿作用。选择不同尺度的搜索半径对主断裂面进行多级形态滤波,得到多级趋势面(一般包括一级和二级)。将断裂面中点(x, y)的高程值分解为趋势面高程值 $T(x, y)$ 和剩余趋势面 $R(x, y)$,则 $Z(x, y) = T(x, y) + R(x, y)$ 。剩余趋势面的值 R 表示点(x, y)处的波动,大于零则该点位于断裂面的下凹部分,反之位于上凸部分。

坡度分析:表达控矿断裂的产状特征,反映断裂

产状对成矿的影响。本文建立的断裂面模型为 TIN 模型, TIN 模型的任意 $\triangle ABC$ 的方程可表示为 $z = ax + by + c$, 坡度 $gF = \arccos \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}}$ 。

断裂面陡缓转换分析:反映断裂面由陡变缓/由缓变陡部位对成矿流体运移和矿质沉淀的影响。通过给定距离缓冲区内 TIN 模型的陡缓转换点对陡缓转换程度(cF)进行计算: $cF = \sum_{i=1}^m \frac{iV_i}{dV_i^2} / \sum_{i=1}^m \frac{1}{dV_i^2}$ 。其中 m 为缓冲区内陡缓转换点的个数, i 为转换点的点号, iV_i 为转换点的强度, dV_i 为矿化体元到陡缓转换点的欧氏距离。

2.3 三维预测模型构建方法

预测模型构建的过程实际上是寻求控矿因素到矿化分布的关联关系的过程,即构建控矿变量到矿化变量非线性映射的数学模型。借助构建的预测模型和已有的地质模型,可以开展矿床深边部的矿产资源预测研究(Yu et al., 2022)。本研究利用支持向量机(Support Vector Machine, SVM)和局部加权线性回归(Locally weighted linear regression, LWR)2种方法分别构建大尹格庄矿床的分类预测模型和回归预测模型。

(1) 支持向量机分类

SVM 是按监督学习方式对数据进行二元分类的广义线性分类器,它实现了基于结构风险最小化原则的全局优化(Zuo et al., 2011)。支持向量机的分类边界是通过训练样本求解的最大距超平面(图 6)。

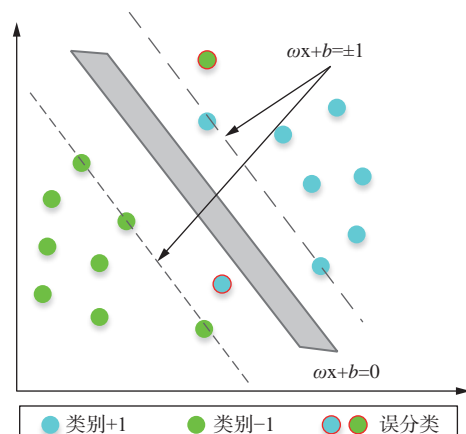


图6 支持向量机分类示意图

Fig. 6 Diagram of support vector machine classification

$$y_i(\omega \mathbf{x}_i + b) \geq 1, i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

式中: $(\mathbf{x}_i, y_i)_{i=1,2,\dots,n}$ 代表控矿变量和矿化分类变量数据集。

(2) 局部加权线性回归

LWR 是一种非参数学习算法,与线性回归(Linear regression, LR)这种参数学习算法的不同之处在于:参数学习算法的参数 θ 一旦确定就不会改变且不需要保留训练样本,而非参数学习算法每进行一次预测就需要重新学习一组参数 θ , θ 是变化的且需要保留训练样本。LWR 的数学原理是,给定训练集 $(\mathbf{x}_i, y_i)_{i=1,2,\dots,n}$,对于每一个需要预测的 \mathbf{x} ,都需要找到合适的 θ 使得式 10 的值达到最小。

$$\min_{\theta} \sum_i^n W_i (y_i - \theta^T \mathbf{x}_i)^2 \quad (10)$$

式中: W_i 为权重值并受窗宽 h 控制。

$$W_i = \exp\left(-\frac{(\mathbf{x}_i - \mathbf{x})^2}{2h^2}\right) \quad (11)$$

不难看出,LWR 相比 LR 多了权重值 W_i ,并且距离 \mathbf{x} 近的样本点权重值大,反之权重值则越小,可以理解为 LWR 是在每个预测样本处进行局部的线性回归。

3 结果与讨论

3.1 顾及构造改造的三维地质模型

笔者收集大尹格庄矿区的地质平面图、勘探线剖面图、钻孔柱状图及地球物理数据,采用显式三维地质建模技术,建立招平主断裂、大尹格庄断裂三维线框模型及金矿体块体模型。现有勘探工程揭露,大尹格庄的构造-矿化-蚀变带平均厚度超过 50 m,金品位在空间具有平缓变化的特点,偶见高品位矿化。考虑到该特征和数据计算量,选择 5 m^3 的矿体块体单元,该尺寸大小能兼顾矿化的整体性和异质性(图 7)。

大尹格庄三维模型显示,招平断裂带在倾向和走向上均呈波状起伏(图 7a),大尹格庄矿化带形态近平行于断裂带,多产于断裂带下盘(图 7b)。倾向为 NE 向的大尹格庄断裂对招平断裂带及大尹格庄进行了错断,在矿区浅部发生了 200~500 m 的位移,对矿区的主要矿化富集带具有显著的改造作用,在大尹格庄断裂附近出现了明显的错断和无矿化带(图 7b)。此外,大尹格庄 1 号矿体及其邻近的招平断裂面位于大尹格庄断裂的下盘,向上进行位移,2 号矿体及其邻近的招平断裂面位于大尹格庄断裂的下盘,向下进行位移,导致目前的断裂面及矿体的倾角均比被错断前大。

通过提取与微分招平断裂与大尹格庄断裂的相交线,结合大尹格庄断裂对招平断裂的错断作用,确定

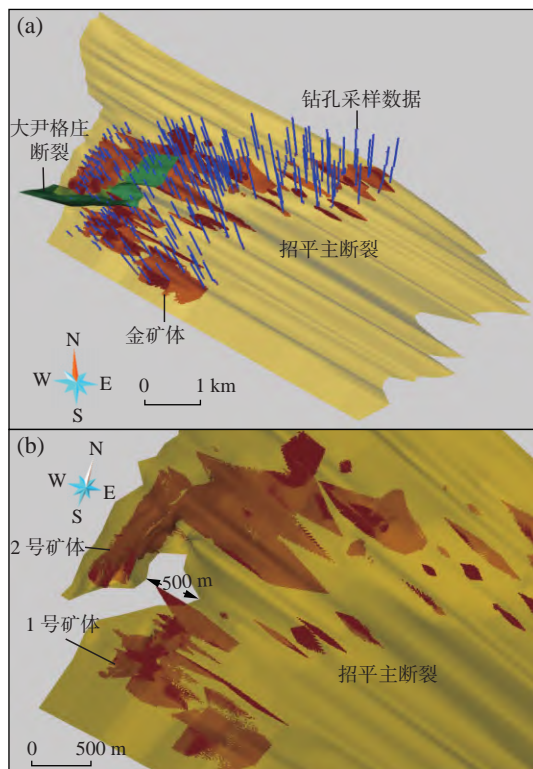


图 7 大尹格庄金矿区三维模型(a)和被错断的招平主断裂面及金矿体图(b)

Fig. 7 (a) Three-dimensional models of the Dayingezhuang gold deposit and (b) local models showing the offset Zhaoping fault and gold orebodies

了招平断裂及附近金矿体错断范围($X=40\ 529\ 300\sim 40\ 536\ 000$, $Y=4\ 118\ 000\sim 4\ 124\ 000$, $Z=-61\ 800\sim 200$)。大尹格庄矿床的构造复原算法首先提取被错断范围内的招平断裂 TIN 模型数据,并结合地质经验知识设置相关参数(衰减半径 $d_r=300 \text{ m}$, 搜索半径 $r=500 \text{ m}$),将组成断裂面 TIN 模型的所有三角形顶点的坐标进行复原,得到新的断裂面 TIN 模型。在此基础上,采用待复原点复原向量与坐标计算方法,对矿体块体模型及钻孔采样数据进行复原,得到原始的矿体模型及样品数据。复原后的地质空间图显示:构造复原方法消除了招平主断裂面及大尹格庄 1 号矿体、2 号矿体间被错断的空间距离(图 8),恢复了被错断区域较陡的倾角,使大尹格庄金矿区重新成为一个整体,基本呈现大尹格庄金矿体的原始分布特征。

3.2 矿化空间及控矿因素分析

(1) 矿化空间分析

笔者对复原前后的大尹格庄金矿块体模型和钻孔采样数据分别进行样品组合等预处理,通过 Surpac 进行变异函数的计算与拟合,构建矿化的变异函数球

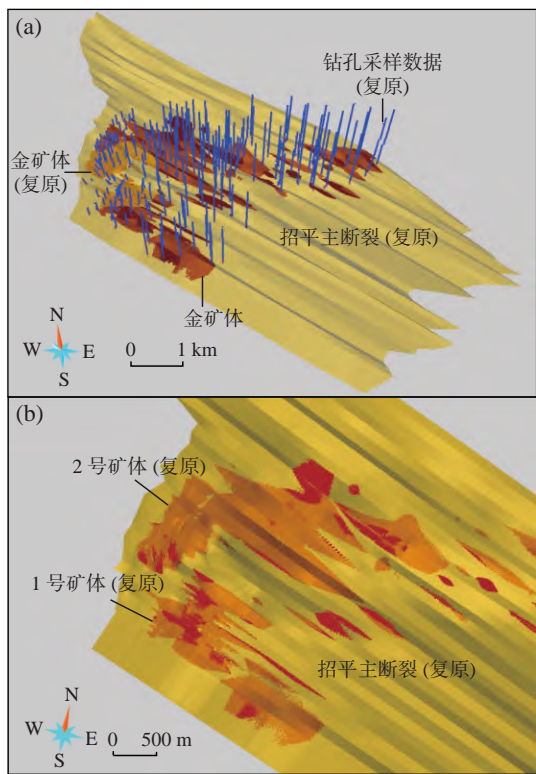


图 8 复原后的大尹格庄矿区三维模型(a)和复原后的招平主断裂面及金矿体图(b)

Fig. 8 (a) The reconstructed models of the Dayingezhuang gold deposit and (b) models of the Zhaoping fault and gold orebodies after reconstruction

状模型。之后,采用克立格法对复原前后的金块体的 Au 品位进行插值,计算各个块体的金属量(AuMet),得到复原前后成矿空间的矿化指标。

由表 2 可知,复原后的成矿空间具有较小的空间相关度(C_0/C_0+C),说明复原后的成矿空间矿体具有更强的空间自相关性,而复原后的变程 a 增大,说明金品位的空间自相关的距离值域增大。因此,大尹格庄金矿床的复原优化了金矿体的矿化空间结构。变异椭球体的空间方位与矿体的整体空间展布规律相似,由于部分矿体的复原并没有改变矿体总体的产状,所以复原前后创建的变异椭球体参数差异不大(表 3)。

由复原前后金品位 XOY 投影等值线图(图 9)可

表 2 复原前后变异函数拟合参数表

Tab. 2 Parameters for fitting the variance function before/after the reconstruction

成矿空间	块金值 C_0	基台值C	空间相关度 C_0/C_0+C	变程a(m)
复原前	0.38	0.63	0.38	113.82
复原后	0.28	0.75	0.27	122.86

表 3 复原前后各向异性椭球体参数表

Tab. 3 Anisotropic ellipsoidal parameters before/after the reconstruction

成矿空间	方位(°)	倾伏角(°)	倾角(°)	主轴/次主轴	主轴/次轴
复原前	209.64	-5.93	39.67	1.47	3.26
复原后	201.02	-3.22	35.03	1.37	3.07

知,由于大尹格庄断裂的错断作用,被错断区域复原前的矿化分布较为分散,品位在断裂两侧各自存在独立的高值区。复原后的矿体,品位高值区规则地向外发散,矿化分布更为连续,消除了被断层错断而产生的矿化空白区。

(2)控矿因素分析

通过三维空间分析方法,定量提取复原前后大尹格庄金矿区的控矿因素(dF , waF , wbF , gF , cF),如图 10 所示。

大尹格庄矿床复原前后的控矿指标分布如图 10a 所示,显示出相似的控矿规律。距离分析结果表明,矿床高矿化的距离指标分布在(-250, 75)区间内,即金矿化富集在招平断裂带上盘 75 m 至下盘 250 m 范围内(图 10b);起伏分析结果显示,招平断裂带的起伏范围主要为-50~50 m(图 10c~图 10d),且主要的矿化体元主要集中在下凹的断裂面部位($waF<0$, $wbF<0$);倾角和陡缓分析表明,金与断裂倾角没有明显的规律性变化,但多数的矿化体元与倾角 20°~55°的断裂面相关(图 10e),倾角变化(陡缓转换)在大尹格庄矿床大多小于 3e-3°/m,显示出平缓的起伏变化。此外,对比复原前后的大尹格庄矿床的矿化-控矿指标散点图显示(图 10),复原后的金品位的平均水平降低,且复原后的控矿指标相比复原前分布更加集中,离散的数据点分布变少,说明复原后的矿化分布更加集中且控矿断裂的形态特征更加稳定。

3.3 预测模型构建与对比分析

三维预测建模可以直观反映控矿变量和矿化变量之间的关联关系,通过对比构造复原前后的预测模型则可以分析构造复原带来的影响。在进行预测模型构建时,考虑到空间尺度及计算效率,将块体模型规则化为 25m×25m×25 m 的块体单元,共得到 24 757 个(复原前)和 24 977 个(复原后)立体单元数据。对数据集进行 8 : 2 的比例进行分层采样,分别得到训练集和验证集以开展分类和回归预测建模。

(1)分类预测模型

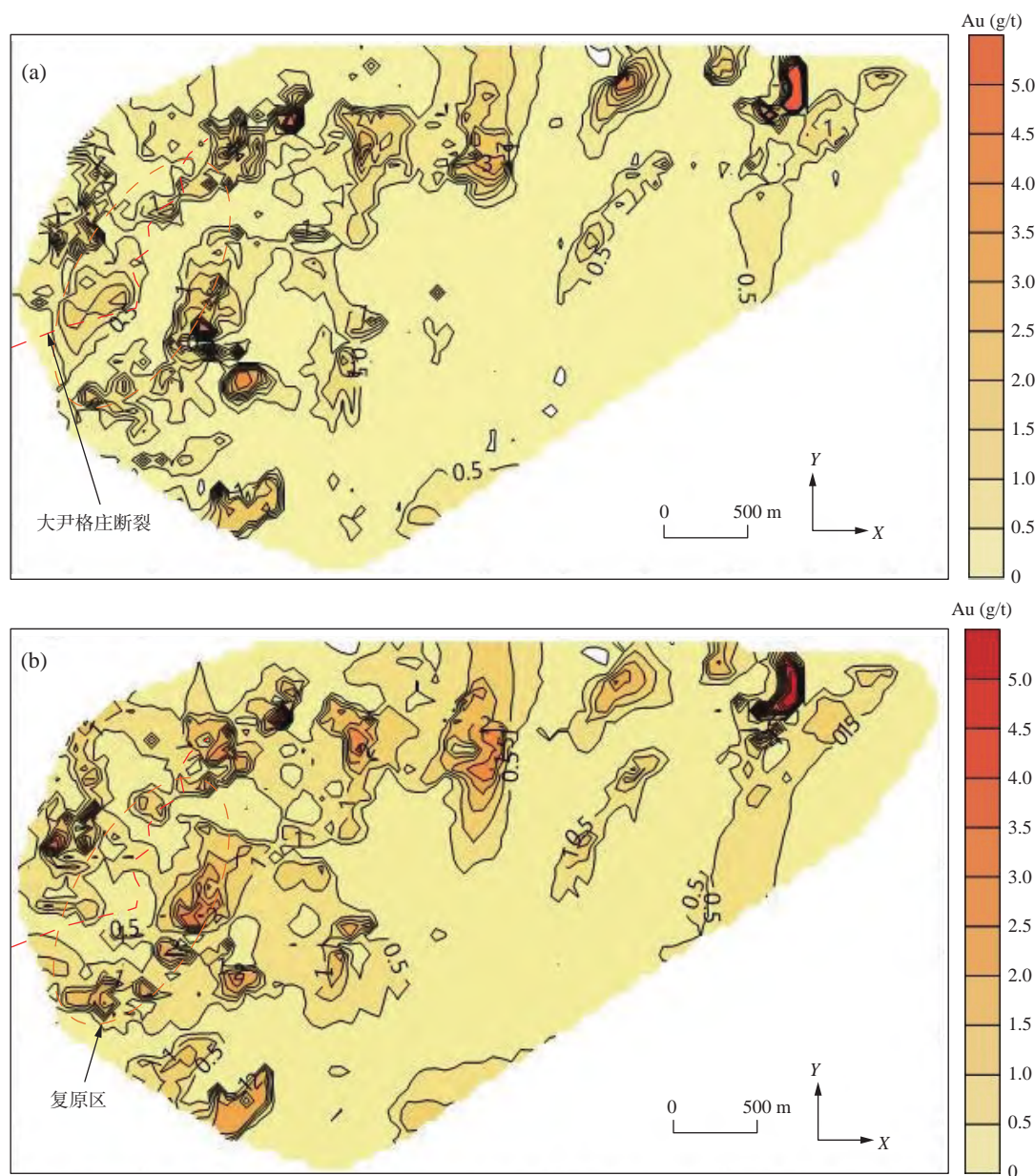


图9 复原前(a)和复原后(b)金品位平均值XOY投影等值线图

Fig. 9 XOY projection contour map of the mean gold grade (a) without and (b) with the reconstruction

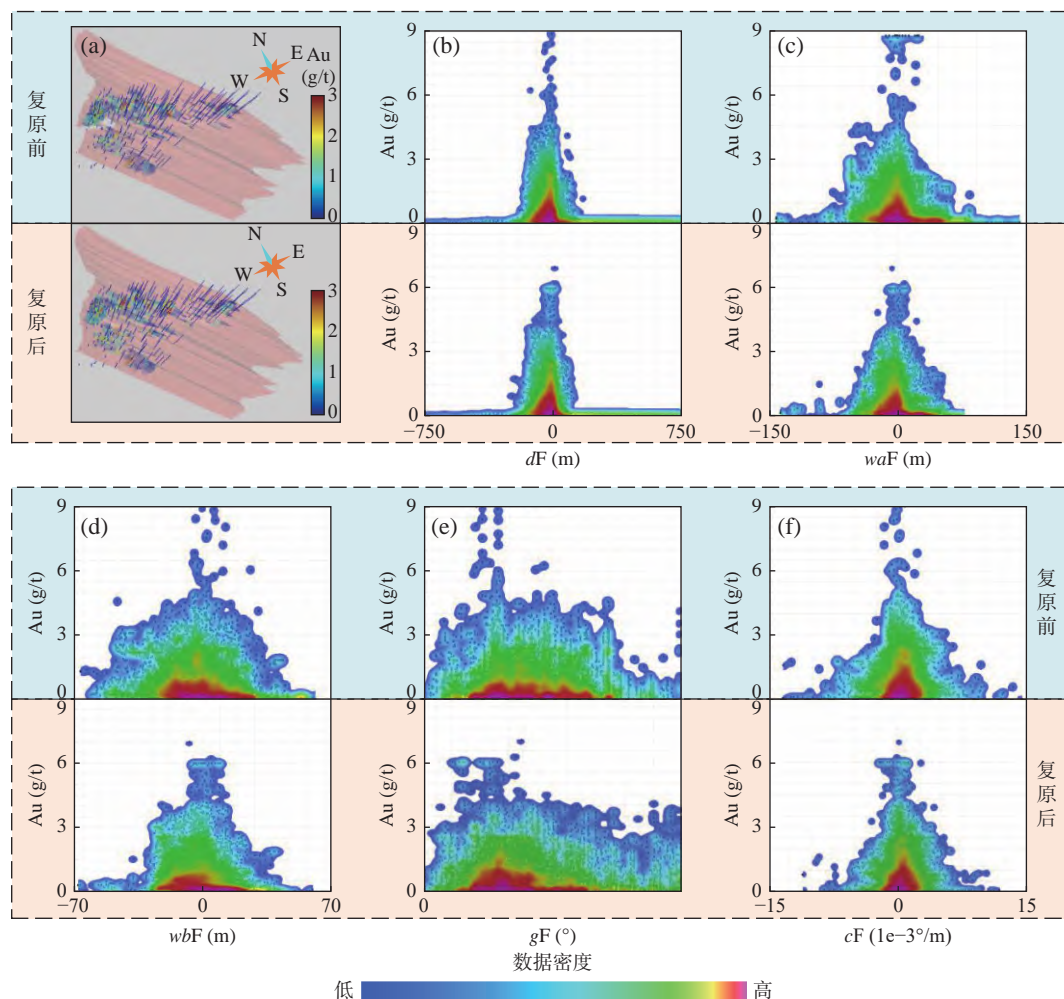
根据矿体定位概念模型(表1),将数据集标记为含矿单元($I_{\text{Ore}} = 1$)和非含矿单元($I_{\text{Ore}} = 0$),利用训练集开展复原前后的预测模型构建,并利用验证集进行验证。为了确保预测模型主要体现数据本身的关联程度,在利用SVM建立复原前后预测模型时,均采用高斯核函数,标准化训练集变量,并使用交叉验证使模型达到最佳性能。此外,笔者选取多个分类评价指标对复原前后的预测模型的性能进行对比,如图11所示。

(2) 回归预测模型

回归预测建模以金品位作为标签,利用LWR分

别构建大尹格庄矿床复原前和复原后的回归预测模型。与分类预测建模相同,为了确保预测模型能反映复原前后数据集本身的关联程度,采用相同的建模策略。控矿指标进行标准化,并采用相同窗宽($h = 0.1$)控制拟合度,由此得到复原前后金品位(Au)的预测模型,并利用验证集进行验证。通过分析验证集的预测值和标签的拟合程度判断回归模型的性能优劣,如图12所示。

不难看出,无论是分类预测结果还是回归预测结果,复原后的预测模型(含矿性分类模型、金品位回归模型)的性能都明显优于复原前的预测模型。预测模



a. 控矿指标分布; b. 距离场 dF ; c. 一级起伏 waF ; d. 二级起伏 wbF ; e. 坡度 gF ; f. 陡缓转换 cF

图 10 复原前后大尹格庄矿床控矿指标图

Fig. 10 Ore-controlling indicators of the Dayingezhuang gold deposit with and without reconstruction

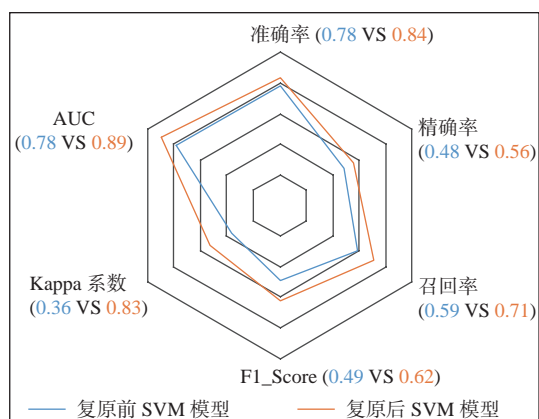


图 11 大尹格庄矿床复原前后预测模型分类性能对比

Fig. 11 Comparisons of classification performance of predictive models with and without reconstruction at the Dayingezhuang deposit

型的性能表征了矿化变量与控矿指标关联关系的显著程度,在采用相同预测建模方法和相同参数的同时,复原后预测模型的性能越高,表明数据内在的矿化-控矿规律越显著,即构造复原消除了大尹格庄断裂的错断对矿化分布和控矿因素的干扰,使得二者之间的关联性更加显著,更有利于准确表征控矿指标到矿化分布的映射规律。

3.4 找矿靶区圈定

根据构造复原后的三维预测模型,在大尹格庄深边部开展三维成矿预测,并依据找矿靶区的“最小空间、最大含矿率”的圈定原则,圈定了I号靶区和II号靶区2个找矿靶区(图13)。靶区均位于已知矿区深部断裂面形态起伏较为平稳部位,整体呈现出NE向、间隔式分布特征,与北部2号矿体NE向侧伏规律一致,暗示大尹格庄金矿存在一条隐伏矿化带。

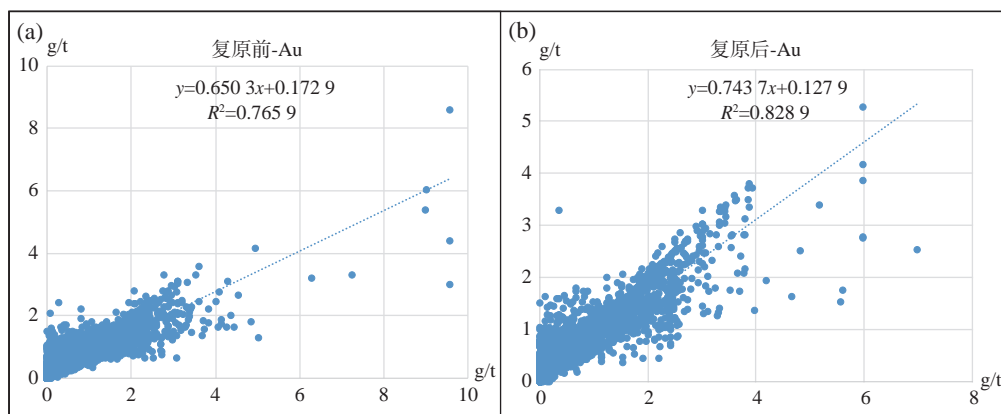


图 12 大尹格庄矿床复原前(a)和复原后(b)的金品位回归预测模型拟合度对比
Fig. 12 Comparisons of the fit of the gold grade regression prediction model (a) before and (b) after reconstruction of the Dayingezhuang deposit

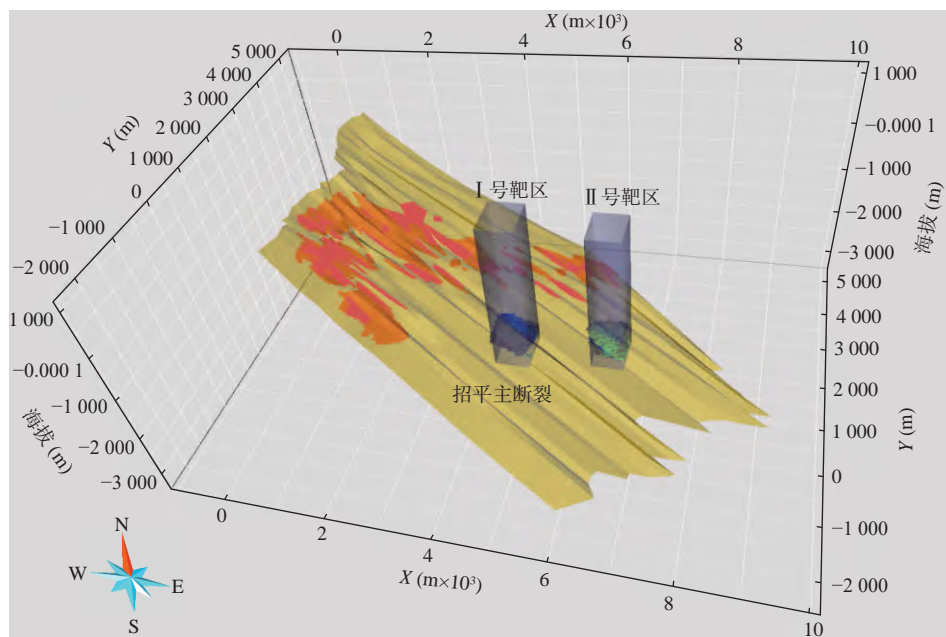


图 13 大尹格庄金矿床立体找矿靶区空间分布图

Fig. 13 Spatial distribution of three-dimensional targets of the Dayingezhuang gold deposit

4 结论

(1)构造复原消除了构造改造对大尹格庄金矿区的错断影响,恢复了大尹格庄矿床及控矿断裂被改造前的原始形态,为开展三维成矿预测提供可靠的模型支撑。

(2)复原后的大尹格庄金矿区矿化分布更为连续,提取到的控矿指标更为集中,说明复原优化了矿化分布的空间结构,使控矿断裂形态特征及控矿因素更加稳定。

(3)复原后的预测模型能够更显著地表征矿化分布和控矿指标之间的关联关系,预测准确性更高。大尹格庄矿体深部存在两个成矿潜力区,下一步找矿工作可重点关注。

致谢:感谢招金股份有限公司矿业公司汤磊、史启发、郭永超等在资料收集和地质调查中的大力支持。

参考文献(References):

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, 2020a, 44(02): 231–241.
- CHEN Jin, MAO Xiancheng, LIU Zhankun, et al. Three-dimensional Metallogenic Prediction Based on Random Forest Classification Algorithm for the Dayingezhuang Gold Deposit[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2020a, 44(02): 231–241.
- 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, 2020b, 41(02): 179–191.
- CHEN Jin, MAO Xiancheng, DENG Hao. 3D Quantitative Mineral Prediction in the Depth of the Dayingezhuang Gold Deposit, Shandong Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2020b, 41(02): 179–191.
- 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): 054–062.
- CHEN Jianping, LV Peng, WU Wen, et al. A 3D method for predicting blind orebodies, based on a 3D visualization model and its application[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(5): 054–062.
- 邓浩, 郑扬, 陈进, 等. 基于深度学习的山东大尹格庄金矿床深部三维预测模型[J]. 地球学报, 2020, 41(02): 157–165.
- DENG Hao, ZHENG Yang, CHEN Jin, et al. Deep Learning-based 3D Prediction Model for the Dayingezhuang Gold Deposit, Shandong Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2020, 41(02): 157–165.
- 邓浩, 魏运凤, 陈进, 等. 基于注意力卷积神经网络的焦家金矿带三维成矿预测及构造控矿因素定量分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(09): 3003–3014.
- DENG Hao, WEI Yunfeng, CHEN Jin, et al. Three-dimensional prospectivity mapping and quantitative analysis of structural ore-controlling factors in Jiaojia Au ore-belt with attention convolutional neural networks[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2021, 52(09): 3003–3014.
- 李洪奎, 嵯传源, 耿科, 等. 郯-庐断裂带陆内伸展构造: 以沂沭断裂带的表现特征为例[J]. 地学前缘, 2017, 24(02): 73–84.
- LI Hongkui, ZHOU Chuanyuan, GENG Ke, et al. Intra-continental extensional tectonics of the Tan-Lu fault zone: an example from the appearance characteristics of the Yishu fault zone[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(02): 73–84.
- 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(02): 166–178.
- MAO Xiancheng, WANG Qi, CHEN Jin, et al. Three-dimensional Modeling of Deep Metallogenic Structure in Northwestern Jiaodong Peninsula and Its Gold Prospecting Significance[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2020, 41(02): 166–178.
- 邱芹军, 马凯, 朱恒华, 等. 基于BERT的三维地质建模约束信息抽取方法及意义[J]. 西北地质, 2022, 55(4): 124–132.
- QIU Qinjun, MA Kai, ZHU Henghua, et al. BERT-based Method and Significance of Constraint Information Extraction for 3D Geological Modelling[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(4): 124–132.
- 宋明春, 李杰, 李世勇, 等. 鲁东晚中生代热隆-伸展构造及其动力学背景[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, 48(04): 941–964.
- SONG Mingchun, LI Jie, LI Shiyong, et al. Late Mesozoic Thermal Upwelling-Extension Structure and Its Dynamics Background in Eastern Shandong Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2018, 48(04): 941–964.
- 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]. 地质学刊, 2012, 36(03): 229–236.
- XIAO Keyan, LI Nan, SUN Li, et al. Large scale 3D mineral prediction methods and channels based on 3D information technology[J]. *Journal of Geology*, 2012, 36(03): 229–236.
- 徐述平, 杨立强, 张蜀冀, 等. 胶东招平断裂带金矿成矿指示元素特征及找矿应用[J]. 黄金科学技术, 2010, 18(05): 7–11.
- XU Shuping, YANG Liqiang, ZHANG Shuji, et al. Metallogenic Indication Element Characteristics and Application of Gold Deposit in Zhaoyuan-Pingdu Fault Zone[J]. *Gold Science and Technology*, 2010, 18(05): 7–11.
- 杨立强, 邓军, 王中亮, 等. 胶东中生代金成矿系统[J]. 岩石学报, 2014, 30(9): 2447–2467.
- YANG Liqiang, DENG Jun, WANG Zhongliang, et al. Mesozoic gold metallogenic system of the Jiaodong gold province, eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(9): 2447–2467.
- 赵鹏大. 成矿定量预测与深部找矿[J]. 地学前缘, 2007, 14(05): 1–10.
- ZHAO Pengda. Quantitative mineral prediction and deep mineral exploration[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(05): 1–10.
- Bray E, John D, Cousens B. Petrologic, tectonic, and metallogenic evolution of the southern segment of the ancestral Cascades magmatic arc, California and Nevada[J]. *Geosphere*, 2014, 10(1): 1–39.
- Chen J, Jiang L, Peng C, et al. Quantitative resource assessment of hydrothermal gold deposits based on 3D geological modeling and improved volume method: Application in the Jiaodong gold Province, Eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2022: 105282.
- Deng J, Yang L, Li R, et al. Regional structural control on the distribution of world-class gold deposits: An overview from the Giant Jiaodong Gold Province, China[J]. *Geological Journal*, 2019, 54: 378–391.
- Hronsky J M A. Deposit-scale structural controls on orogenic gold deposits: an integrated, physical process-based hypothesis and practical targeting implications[J]. *Mineralium Deposita*, 2019,

- 55(2): 197–216.
- Huston D L, Blewett R S, Champion D C. Australia through time: A summary of its tectonic and metallogenic evolution[J]. *Episodes*, 2012, 35(1): 23–43.
- Jiang N, Guo J, Fan W, et al. Archean TTGs and sanukitoids from the Jiaobei terrain, North China craton: Insights into crustal growth and mantle metasomatism[J]. *Precambrian Research*, 2016, 281: 656–672.
- Lebrun E, Miller J, Thebaud N, et al. Structural Controls on an Orogenic Gold System: The World-Class Siguiri Gold District, Siguiri Basin, Guinea, West Africa[J]. *Economic Geology*, 2017, 112(1): 73–89.
- Liu L M, Peng S L. Key strategies for predictive exploration in mature environment: model innovation, exploration technology optimization and information integration[J]. *Journal of Central South University of Technology (English Edition)*, 2005, (02): 186–191.
- Liu Z K, Mao X C, Wang F Y, et al. Deciphering anomalous Ag enrichment recorded by galena in Dayingezhuang Au (-Ag) deposit, Jiaodong Peninsula, Eastern China[J]. *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*, 2021a, 31(12): 3831–3846.
- Liu Z K, Chen J, Mao X C, et al. Spatial Association Between Orogenic Gold Mineralization and Structures Revealed by 3D Prospectivity Modeling: A Case Study of the Xiadian Gold Deposit, Jiaodong Peninsula, China[J]. *Natural Resources Research*, 2021b, 30: 3987–4007.
- Lu Y, Liu L, Xu G. Constraints of deep crustal structures on large deposits in the Cloncurry district, Australia: Evidence from spatial analysis[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 79: 316–331.
- Mao X, Ren J, Liu Z, et al. Three-dimensional prospectivity modeling of the Jiaojia-type gold deposit, Jiaodong Peninsula, Eastern China: A case study of the Dayingezhuang deposit[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, 203: 27–44.
- Song M, Li S, Santosh M, et al. Types, characteristics and metallogenesis of gold deposits in the Jiaodong Peninsula, Eastern North China Craton[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65: 612–625.
- Wang J, Mao X, Peng C, et al. Three-Dimensional Refined Modeling of Deep Structures by Using the Level Set Method: Application to the Zhaoping Detachment Fault, Jiaodong Peninsula, China[J]. *Mathematical Geosciences*, 2022, 55(2): 229–262.
- Xie S, Xie H, Wang S, et al. Ca. 2.9 Ga granitoid magmatism in eastern Shandong, North China Craton: Zircon dating, Hf-in-zircon isotopic analysis and whole-rock geochemistry[J]. *Precambrian Research*, 2014, 255: 538–562.
- Yang L Q, Deng J, Goldfarb R J, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints on the formation of the Dayingezhuang gold deposit: New implications for timing and duration of hydrothermal activity in the Jiaodong gold province, China[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(4): 1469–1483.
- Yang L Q, Deng J, Wang Z L, et al. Relationships between gold and pyrite at the Xincheng gold deposit, Jiaodong Peninsula, China: Implications for gold source and deposition in a brittle epizonal environment[J]. *Economic Geology*, 2016, 111: 105–126.
- Yu S Y, Deng H, Liu Z K, et al. Identifying multivariate geochemical anomalies via tensor dictionary learning over spatial-elemental dimensionalities[J]. *Computers & Geosciences*, 2022, 165: 105153.
- Yu X, Shan W, Xiong Y, et al. Deep structural framework and genetic analysis of gold concentration areas in the Northwestern Jiaodong Peninsula, China: A new understanding based on high-resolution reflective seismic survey[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2018, 92(5): 1823–1840.
- Zuo R, Carranza E. Support vector machine: A tool for mapping mineral prospectivity[J]. *Computers & Geosciences*, 2011, 37(12): 1967–1975.