

矽卡岩矿床接触带形态复杂度定量评估： 以鄂东南矿集区铜山口矿床为例

武佩佩¹, 刘文浩¹, 高家昊², 崔书墨³, 刘富梅⁴

(1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074; 2. 中国有色桂林矿产地质研究院有限公司, 广西桂林 541004; 3. 中山大学理
学院, 广东深圳 518107; 4. 紫金矿业集团股份有限公司矿产地质勘查院, 福建厦门 361006)

摘要: 以鄂东南矿集区铜山口矿床为例, 探讨建立可便捷应用的地质体三维形态复杂度定量分析流程(目的)。铜山口是一个典型矽卡岩-斑岩复合型矿床, 本文在利用隐式建模方法构建花岗闪长斑岩与碳酸盐岩接触带三维模型的基础上, 应用曲率和法向量夹角余弦值两种参数定量评估接触带形态复杂度, 最后基于评估结果分析接触带控矿规律和深部找矿方向(方法)。研究表明:(1) 基于大量勘查工程约束, 利用隐式建模方法可构建复杂地质体的三维模型, 然后提取模型表面点云数据并开展曲率与法向量夹角余弦值参数计算, 可用于定量评估地质体形态复杂程度, 且高斯曲率对复杂度的表征优于法向量夹角余弦值。(2) 铜山口矿床的矽卡岩型矿体严格受接触带控制, 接触带形态越复杂越有利于成矿, 且矿区接触带形态复杂度存在空间差异性, 接触带 NE-NEE 侧的形态复杂度明显高于 SW 侧(结果), 因此下一步找矿勘查工作应重点关注接触带 NE-NEE 侧深部(结论)。

关键词: 铜山口; 矽卡岩; 隐式建模; 高斯曲率; 法向量夹角

中国分类号: P612

收稿日期: 2025-12-15

Quantitative complexity assessment of contact zones of
skarn deposits: A case study of the Tongshankou deposit in
the southeast Hubei ore concentrated area, eastern China

Wu Peipei¹, Liu Wenhao¹, Gao Jiahao², Cui Shumo³, Liu Fumei⁴

1. School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. China Nonferrous Metals (Guilin) Geology and Mining Co., Ltd., Guilin 541004, China;

3. School of Science, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China;

4. Mineral Exploration Institute, Zijin Mining Group Co., Ltd., Xiamen 361006, China

基金项目: 新一轮找矿突破战略行动科技支撑项目“长江中下游成矿带铜金锦矿床找矿模型与勘查技术”(ZKKJ202425)和中国有色集团科技专项“鄂东南矿集区钨成矿作用及铜山口矿床深部铜、钨找矿潜力研究”(2023KJZX025)。

第一作者简介: 武佩佩(2000—), 硕士研究生, 从事于三维建模与找矿预测研究。E-mail: wuppei@126.com, ORCID: 0009-0009-4101-8294

Abstract: Taking the Tongshankou deposit in the southeastern Hubei ore concentration area in eastern China as a case study, this paper aims to establish a convenient and applicable quantitative analysis workflow for the three-dimensional (3D) morphological complexity of geological bodies. Tongshankou is a typical skarn-porphyry composite deposit. First, a 3D model of the contact zone between granodiorite porphyry and carbonate rocks was constructed using the implicit modeling method. Then, two parameters—curvature and cosine of the normal vector angle—were applied to quantitatively assess the morphological complexity of the contact zone. Finally, based on the assessment results, the ore-controlling rules of the contact zone and directions for deep mineral exploration were analyzed. The results indicate that: (1) Constrained by extensive exploration engineering data, the implicit modeling method enables the construction of 3D models of geological bodies. Subsequent extraction of surface point cloud data from the models and calculation of curvature and cosine of the normal vector angle allow for quantitative evaluation of morphological complexity, with Gaussian curvature showing superior performance in characterizing complexity compared to the cosine of the normal vector angle. (2) The skarn-type orebodies in the Tongshankou deposit are strictly controlled by the contact zone: higher morphological complexity of the contact zone correlates with more favorable mineralization conditions. Additionally, the morphological complexity of the contact zone exhibits spatial heterogeneity within the mining area—the complexity on the NE-NEE side is significantly higher than that on the SW side. Therefore, future mineral exploration work should prioritize the deep sections of the NE-NEE side of the contact zone.

Key words: Tongshankou; skarn; implicit modeling; Gaussian curvature; cosine of the normal vector angle.

引言

复杂地质体的三维建模及三维形态特征提取,是开展深部矿产三维预测的重要研究内容(毛先成等, 2025)。当前隐式建模技术的发展和成熟,使得快速构建复杂地质体的三维模型具备了技术基础(Hillier et al., 2014; Von Harten et al., 2021)。在此基础上,

人们开始对地质体形态特征进行三维空间分析与提取,以此揭示地质体形态控矿规律,指导深部找矿工作(Mao et al., 2016, 2018; Cao et al., 2020; 邓浩等, 2021; 李敏等, 2023; 毛先成等, 2025)。然而,当前大部分商用三维矿业软件中并不具备对三维地质模型直接开展形态特征分析的模块,这使得勘查人员进行地质体形态特征分析时,需要借助外部第三方软件或进行复杂的二次开发,这在一定程度上限制了三维形态分析的应用。在三维形态分析内容中,地质体表面的形态复杂程度是一项重要内容,如矽卡岩型矿床控矿接触带的复杂部位和脉型矿床控矿断裂的产状变化部位,都是有利的矿体产出空间(姚书振, 2025)。毛先成等(2020)将复杂度定义为定量描述地质体三维几何形态不规则程度与内部结构复杂程度的核心指标,常用于刻画岩体、断层、矿化体等的形态分异、表面起伏与空间结构复杂性,并且提出地质体表面法向量夹角等指标可用于定量表征其形态复杂度;此外也有学者利用曲率等参数来评估三维地质体表面复杂度(Cao et al., 2020; Banchoff and Lovett, 2022),但不同的方法之间缺乏有效对比和优选。

鄂东南矿集区铜山口矿床是一个典型的矽卡岩-斑岩复合型矿床,已发现矿体以矽卡岩型为主,斑岩型次之,矿床历经多年开采,目前已经进入危机矿山状态,近年来已开展大量的地质找矿工作,在矿床深部发现了多处含钨矿体(梁学堂等, 2012; 朱乔乔等, 2019; 张征兵等, 2020),表明该矿床深部仍有良好找矿前景。本文系统收集整理已有勘查资料,开展控矿接触带和矿体的三维地质建模,并将隐式三维建模技术和微分几何及欧式距离等理论结合,利用微分几何中的曲率参数和法向量夹角余弦转换值参数来定量评估接触带形态的复杂程度,并对比两种方法的评估效果,以此建立一套独立于特定建模软件且能够便捷广泛应用的地质体三维形态复杂度定量分析流程。在复杂度评估基础上,深入分析接触带控矿规律,探讨深部找矿方向,为铜山口矿床深部找矿工作提供依据。

1 区域地质背景

鄂东南矿集区位于长江中下游成矿带最西侧,北邻秦岭-大别造山带(图 1a)。区内自北向南依次有鄂城、铁山、金山店、灵乡、阳新、殷祖六大侵入岩体和铜绿山、铜山口、龙角山等多个小岩株(图 1b)。区内地层发育较为齐全,仅泥盆系中下统和侏罗系上统地层缺失,而从古生界至新生界地层均有出露。其中三叠系下统、二叠系下统、中石炭系、奥陶系等碳酸盐岩地层与成矿关系最为密切(翟裕生等, 1982)。区内地质构造复杂,褶皱和断裂

多为印支和燕山期构造活动的产物，断裂主要有 NW-NWW 和 NE-NNE 向两组。岩浆活动强烈，岩性主要为石英闪长岩和花岗闪长斑岩（韩庆彬，2018），岩体的分布受构造控制，总体上在 NWW 向呈带状展布、NNE 向呈串状展布（蔡恒安等，2020）。

矿集区内以产出铜铁金矿为主、伴生钨钼矿，其可划分为两个带：北部主要发育与石英闪长岩-二长岩-花岗岩类岩体有关的矽卡岩型铁矿床，代表性矿床如大冶铁矿、程潮铁矿及金山店铁矿田内的张福山矿床等；南部以阳新岩体和殷祖岩体边缘广泛分布的与闪长岩-石英闪长岩及花岗闪长斑岩相关的矽卡岩型、斑岩-矽卡岩型铜、铁、金、钼矿床为特征，典型矿床如铜绿山铜铁金矿床等。近年来区内探明了付家山-龙角山矽卡岩型铜钨钼矿床及阮家湾矽卡岩型钨铜钼矿床，同时在铜山口矿床深部也发现了多处含钨矿体，表明该矿集区仍具有巨大找矿前景。

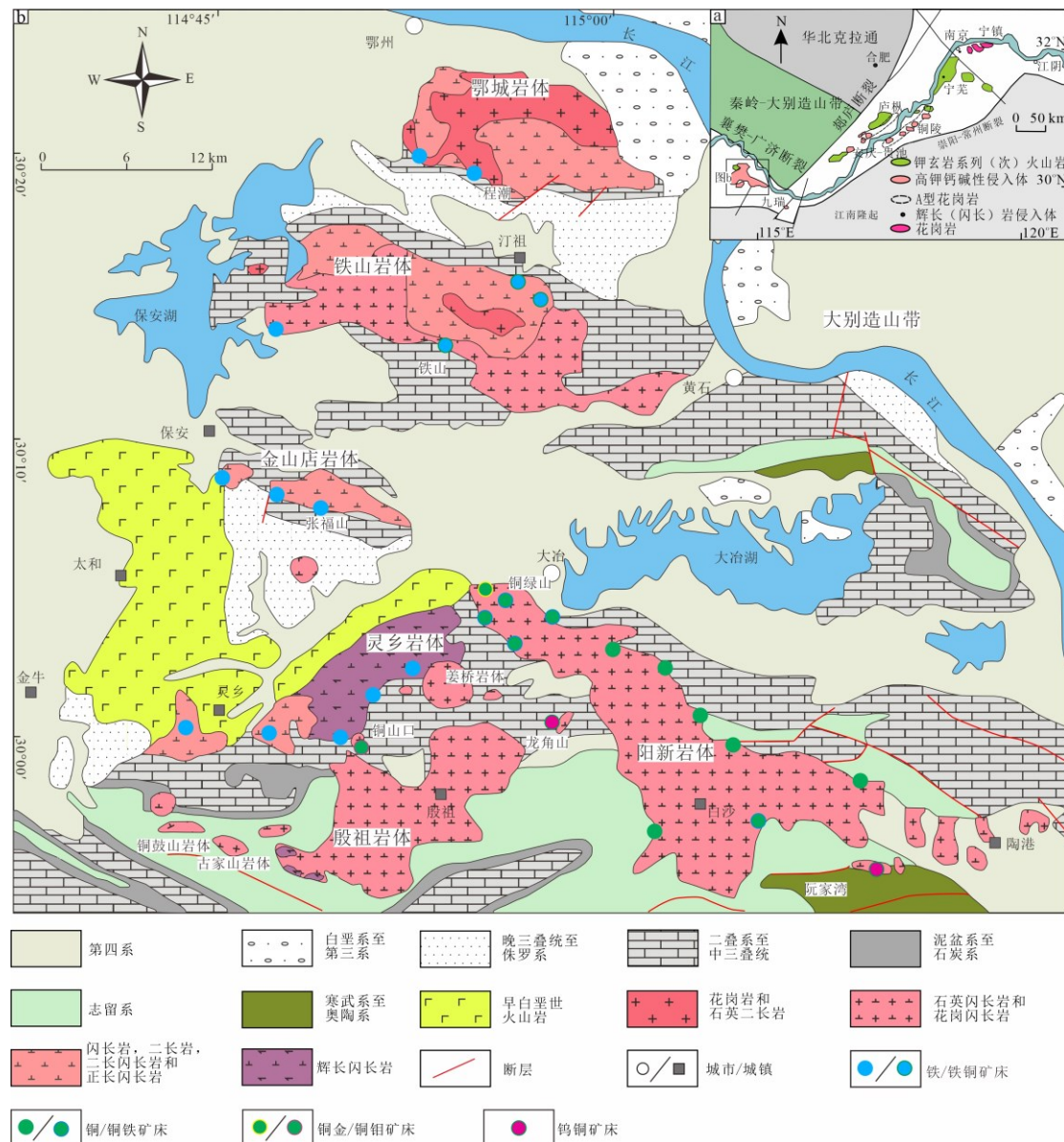


图 1 长江中下游成矿带及鄂东南矿集区地质简图

a-长江中下游成矿带地质构造简图（据 Yan et al., 2015 修改）；b-鄂东南矿集区岩浆岩和矿床分布简图（据 Li et al., 2014 修改）

Figure.1 Geological map of the Middle-Lower Yangtze River Metallogenic Belt and southeastern Hubei Province ore concentration area

a-Geological map of the Middle-Lower Yangtze River Metallogenic Belt; b-Sketch map of magmatic rocks and deposits distribution in southeastern Hubei Province ore concentration area

2 矿床地质特征

铜山口矿床位于殷祖岩体西北外侧、殷祖复式背斜北翼。矿区及周边主要出露有三叠系中-下统嘉陵江组 (T_{1-2j})、三叠系下统大冶组 (T_{1d}) 和二叠系下统栖霞组 (P_{1q}) 等地层 (图 2)。其中嘉陵江组地层是矿区内分布面积最广的地层, 其下部主要岩性为中厚层至薄层白云岩到灰质白云岩, 上部主要岩性为中厚层大理岩与块状白云岩互层。三叠系下统大冶组在地表出露面积相对较小, 但在矿区深部广泛发育, 其岩性主要为薄层泥质条带灰岩、中厚层灰岩。二叠系下统栖霞组地层存在于矿区东南部, 岩性主要为深灰色中厚层含燧石结核夹燧石条带灰岩。铜山口岩体主要岩性为花岗闪长斑岩, 含少量石英二长斑岩, 为多期侵入的复式杂岩体。花岗闪长斑岩与成矿关系最为密切, 其与碳酸盐岩接触带附近形成了矽卡岩型矿体, 岩体内部裂隙中亦形成了细脉浸染状矿体 (图 2)。

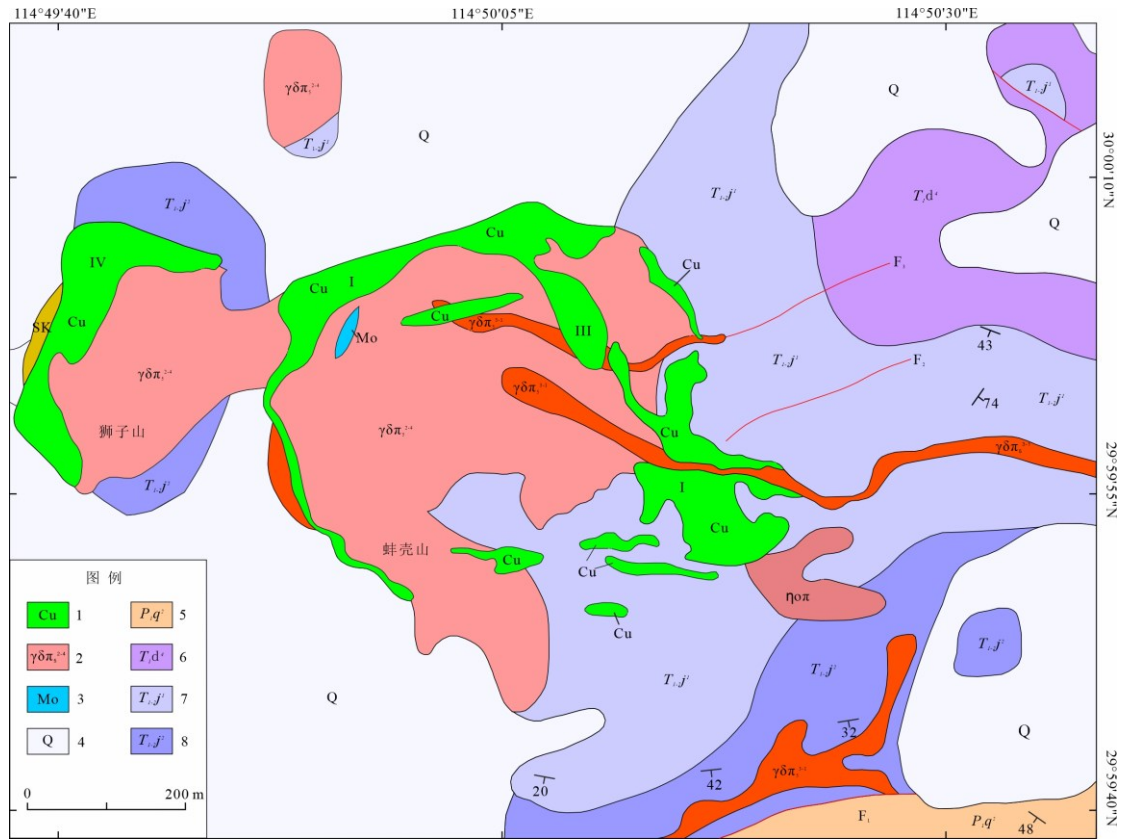


图2 铜山口矿床地形地质图（据张征兵等，2020 修改）

Figure.2 Topographic and Geological map of Tongshankou deposit

1-铜矿体；2-花岗闪长斑岩；3-钼矿体；4-第四系；5-二叠系栖霞组厚-巨厚层含燧石结核灰岩；6-三叠系大冶组四段厚层-巨厚层灰岩；7-三叠系嘉陵江组一段白云岩、角砾状白云岩；8-三叠系嘉陵江组二段白云质灰岩、灰岩

矿体主要赋存于花岗闪长斑岩与三叠系中-下统碳酸盐岩的接触带上，矿体的形态、产状、规模严格受接触带控制，少量赋存于花岗闪长斑岩中和大冶组、嘉陵江组碳酸盐岩层间破碎带中（李洪等，2023）。矿床由规模不等，形态各异、产状多变的6个矿体组成，其中I、II号矿体为主矿体，I号矿体形态受花岗闪长斑岩与碳酸盐岩地层的接触带控制，地表呈环状，立体呈一向南东倾斜的筒状；II号矿体为浅部矿体，产于中-下三叠统嘉陵江组与下三叠统大冶组层间破碎带附近，为层间盲矿体（图3）。

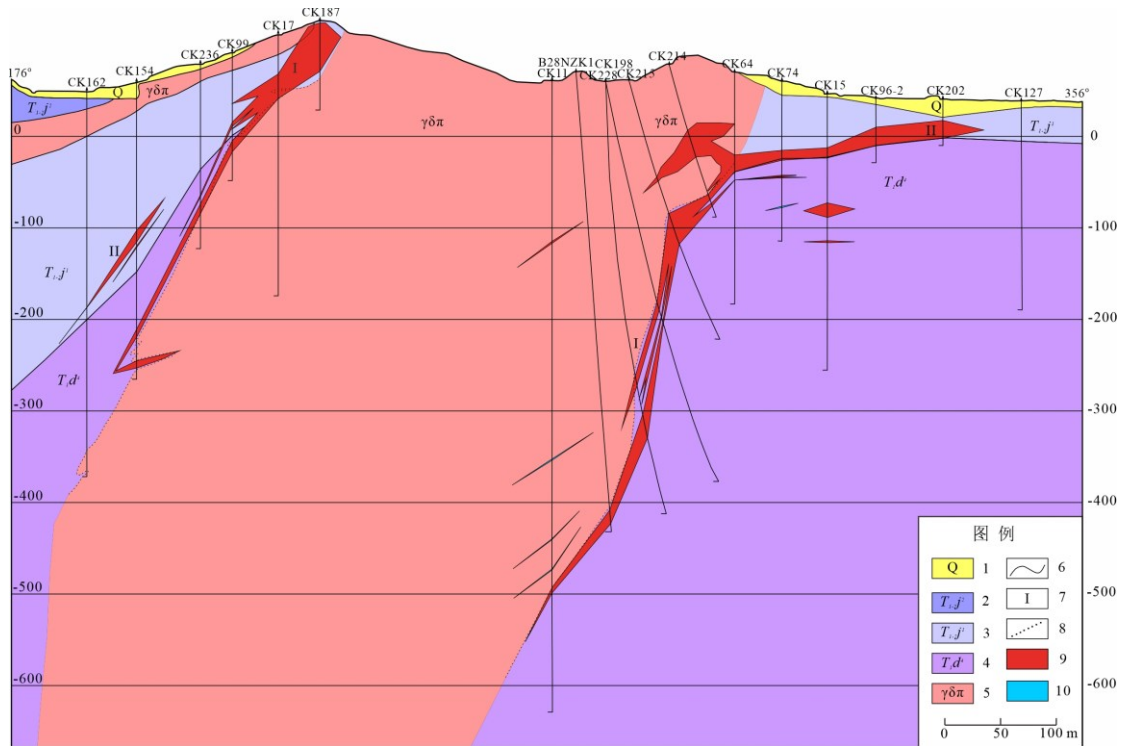


图 3 铜山口矿床 28 号勘探线地质剖面图

Figure.3 Geological section of No.28 exploration line in Tongshankou deposit

1-第四系；2-嘉陵江组第二段；3-嘉陵江组第一段；4-大冶组第四段；5-花岗闪长斑岩；6-地质界线；7-矿体编号；8-接触带界线；9-铜矿体；10-钼矿体

3 三维地质模型构建

铜山口矿床勘查历史悠久，积累了大量勘查资料。本文系统整理了已有钻孔数据库、剖面图等地质勘查资料，然后开展三维地质建模工作，建模重点为接触带和矿体三维模型，建模方法为基于距离函数的隐式建模，其核心思想是将地质界面建模为一个隐式函数，把已知的地质约束条件（如地表界线、钻孔点、断层线等）离散化为点数据，作为插值算法的约束条件，然后基于移动最小二乘法或径向基函数（Radial Basis Function，简称 RBF）等插值算法计算每个点的空间影响范围，最终生成符合地质规律的三维曲面。其中 RBF 插值法是通过使用各个数据点处的径向基函数组合形成三维实体的表达函数，并通过调整参数来实现对未知点处函数值的插值（Buhmann, 2000; Baxter, 2010; 扶金铭等, 2024; 钟德云等, 2025）。因此，隐式建模不同于传统的显式建模，特别适用于岩体、接触带等复杂地质体的三维模型构建（Wang et al., 2018; 姜渝明等, 2025; 陈应显等, 2025）。

3.1 数据准备

(1) 数据库构建：将矿山已有勘查数据库及附件中的钻孔数据整理为四张表：孔口表（collar.csv）、测斜表（survey.csv）、地层岩性表（lithology.csv）、样品分析表（assay.csv）。孔口表主要用于存储钻孔、槽探、巷道工程的孔口坐标、工程类型等信息；测斜表主要包含工程轨迹线的测斜深度和方位角、倾角等信息；地层岩性表包含了钻孔不同深度的岩性信息；样品分析表包含了钻孔的矿石品位等信息。将上述整理好的数据导入三维软件后，可能出现导入错误，结合实际情况进行错误修正，确保所有参与建模的数据准确无误。本次建模系统收集了钻孔 1106 个、品位化验数据 37697 条，所收集的钻孔数据及 Cu、Mo 品位显示如图 4 所示。

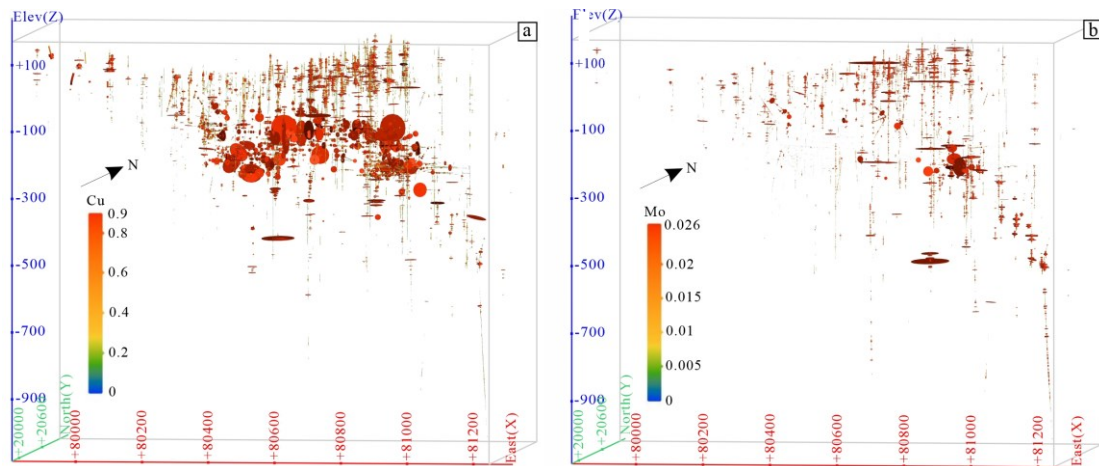


图 4 铜山口矿床中钻孔轨迹及品位空间显示（a-Cu 品位；b-Mo 品位）

（圆柱体半径相对大小代表品位相对高低）

Figure.4 Spatial display of drilling trajectories and grade data of Tongshankou deposit

(2) 图件导入：将 Mapgis、CAD 格式的勘查线剖面图、平面图等进行统一处理，均转为带坐标网的 JPG 格式，然后导入三维模型中进行坐标校正。本次建模共收集了勘查线剖面图 31 张，中段平面图 10 张，地形地质图与勘查线剖面图空间显示如图 5 所示。

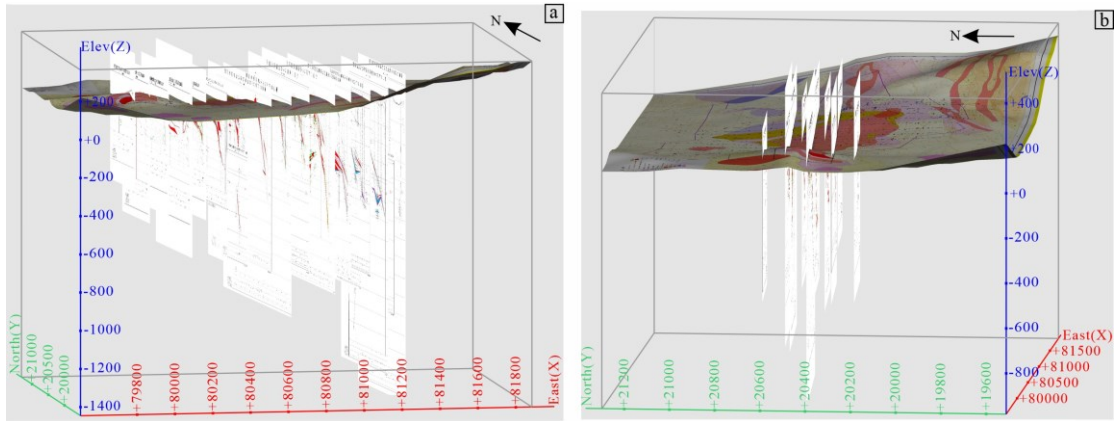


图5 地形地质图与勘查线剖面图空间显示 (a-近 SN 向剖面图; b-近 EW 向剖面图)

Figure.5 Spatial display of topographic geological map and section maps

3.2 矿体三维模型

基于整理完成的钻孔数据,利用软件 RBF 建模功能构建 Cu 和 Mo 矿体的矿体模型。对于 Cu 矿体,按照 Cu 品位 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%不同级别进行矿体模型的构建;对于 Mo 矿体,按照 Mo 品位 0.01%、0.02%、0.03%、0.04%不同级别进行矿体模型的构建,其中 Cu 品位 $>0.4\%$ 及 Mo 品位 $>0.02\%$ 三维矿体模型显示如图 6、7 所示。

需要强调的是,基于品位数据的 RBF 矿体建模当前仍存在一定问题,尤其对于数据较为稀缺的时候,在边部可能会出现“异常”情况,表现为较低的品位和较短的样长对应出现明显偏大的矿体,如图 6a 中的东南角和图 6b 中的东侧深部。这种情况需结合实际地质情况谨慎分析对待,但本文主要是利用矿体模型开展宏观空间定位规律分析,这些异常情况不影响分析过程。

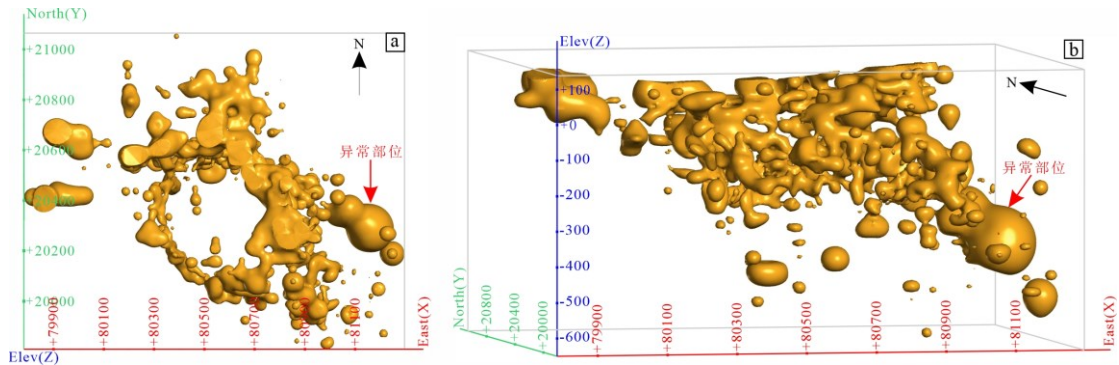


图6 铜山口矿床 Cu 矿体 (Cu 品位 $>0.4\%$) 空间显示 (a-俯视图; b-立体图)

Figure.6 Spatial display of Cu ore body (Cu $> 0.4\%$) of Tongshankou deposit

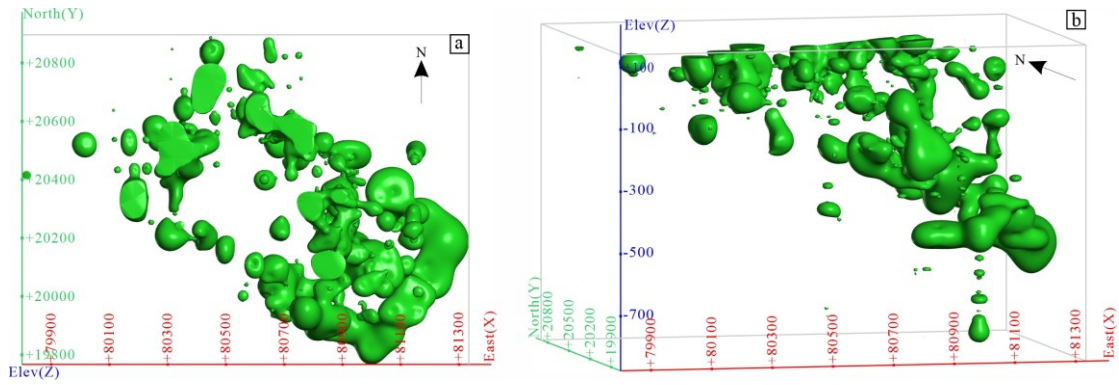


图7 铜山口矿床 Mo 矿体 (Mo 品位>0.02%) 空间显示 (a-俯视图; b-立体图)

Figure.7 Spatial display of Mo ore body (Mo > 0.02%) of Tongshankou deposit

3.3 接触带三维模型

本次三维地质建模空间范围覆盖了矿区采矿权范围，建模深度为地表至-900m 范围，建模内容主要为花岗闪长斑岩地质体，花岗闪长斑岩体的表面即为接触带。建模方法为利用平面地质图和勘查线剖面图勾绘出的已知岩体界线（图 8），然后利用该界线基于隐式建模功能完成建模，建立的接触带三维模型如图 9 所示。由该建模过程可知，所建模型包含了所有平面地质图和勘查线剖面图的已知岩体界线，相当于充分考虑了实际工程控制程度和地质工作者的人工圈定成果，且建模范围仅限于实际工程控制范围，因此所建模型能够有效凸显接触带的三维形态特征，可以支持本文的后续分析讨论。

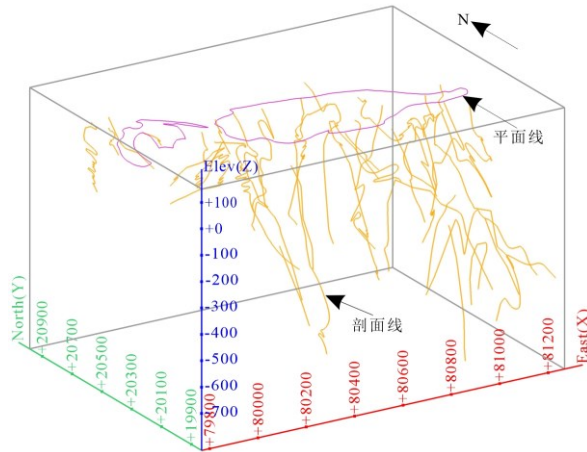


图8 铜山口矿床碳酸盐岩与花岗闪长斑岩接触线空间显示

Figure.8 Spatial display of contact polyline between carbonate rock and granodiorite porphyry of Tongshankou deposit

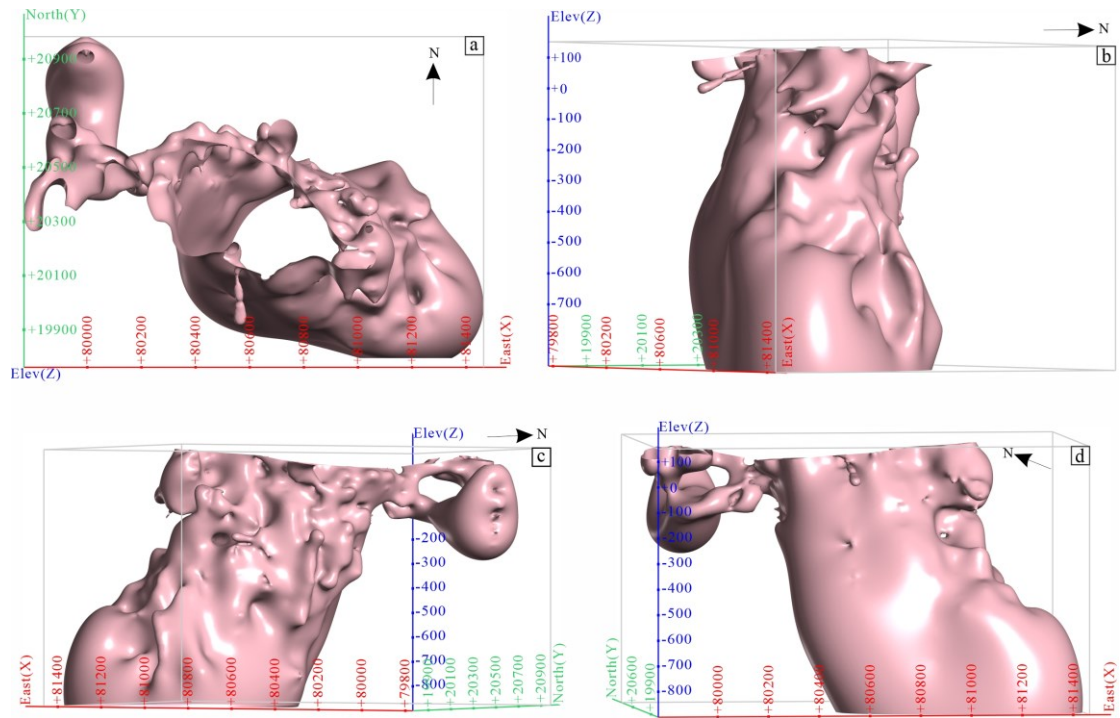


图9 铜山口矿床接触带三维模型(a-俯视图；b-NEE侧图；c-NE侧图；d-SW侧图)

Figure.9 3D model of contact zone of Tongshankou deposit

4 接触带复杂度定量分析

4.1 分析方法

基于隐式建模构建的铜山口矿床接触带三维模型，提取三维点云数据，如图10所示，该功能在大部分三维软件中均可实现，其中任一点可表述为 $P(x, y, z)$ 。该点云数据是后续复杂度定量计算的数据基础。

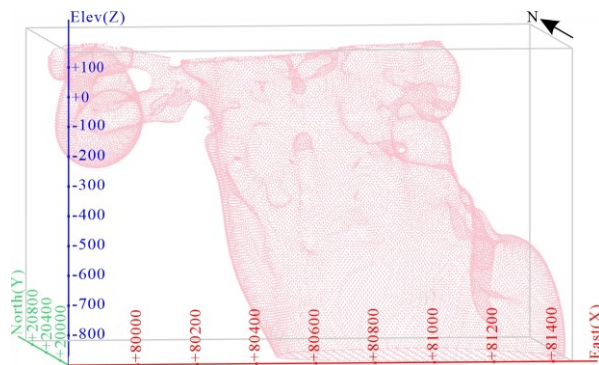


图10 铜山口矿床接触带表面点云数据空间显示

Figure.10 Spatial display of point cloud data for the contact zone surface of Tongshankou deposit

4.1.1 基于曲率参数的复杂度分析

微分几何中，三维曲面的局部弯曲程度，可以用高斯曲率（Gaussian curvature）与平均曲率（mean curvature）这两个几何量来表征。在二维曲面上，某点的两个主曲率（ κ_1 和 κ_2 ）分别表示曲面在该点处沿两个正交方向上最大的和最小的曲率值，用以描述曲面在该点的弯曲程度。高斯曲率定义为两个主曲率的乘积： $K = \kappa_1 \kappa_2$ 。当两个主曲率同号时（即皆为正或皆为负）， $K > 0$ ，表示该点处曲面局部呈球面或椭圆形拱起；当一正一负时， $K < 0$ ，对应马鞍状的结构；若其中一个主曲率为零，则 $K = 0$ ，例如圆柱面（图 11a）。平均曲率衡量曲面在该点的“平均”弯曲程度，定义为主曲率的平均值 $H = (\kappa_1 + \kappa_2)/2$ 。

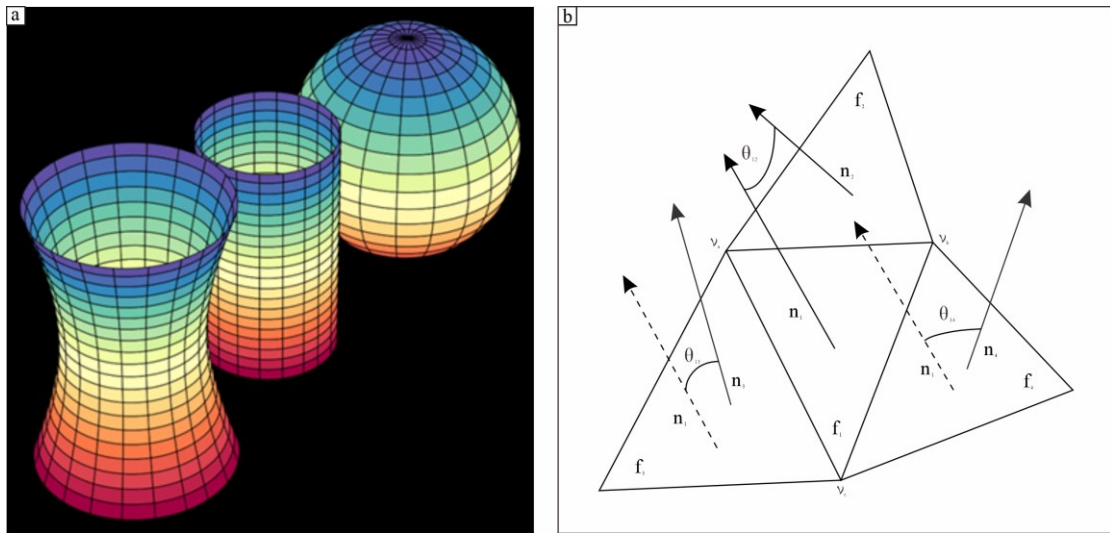


图 11 曲面的 (a) 高斯曲率和 (b) 相邻三角面法向量夹角示意图

图 a 中左为负高斯曲率（双曲面），中为零高斯曲率（圆柱面），右为正高斯曲率（球面）；图 b 中 n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 分别表示三角面 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 的法向量， θ_{12} 、 θ_{13} 、 θ_{14} 分别表示 f_1 和 f_2 、 f_1 和 f_3 、 f_1 和 f_4 之间的夹角。

Figure.11 Schematic diagrams of (a) Gaussian curvature and (b) normal vector angle between adjacent triangular faces of a surface

由于曲面的解析表达式未知，无法直接计算其导数和曲率，但可以在每个点的局部邻域中拟合一个二次曲面来近似原始曲面，再利用该拟合曲面计算曲率。这一思路已在计算几何与形状分析中广泛应用（Meyer et al., 2003; Cohen-Steiner and Morvan, 2003）。本文采取的步骤如下：

- (1) 选择局部邻域：给定一个点 $p_0 = (x_0, y_0, z_0)$ ，根据欧氏距离选取其 n 个最近邻点

构成局部邻域。参数 n 可根据点云密度和期望的平滑程度选取，本文中计算曲率时使用 $n = 20$ 。

(2) 主成分分析 (PCA, Principal Component Analysis)：对邻域点去中心化后，使用 PCA 确定局部切平面和法向量。切平面由 PCA 的前两个主方向构成，法向量则由方差最小的第三个主方向给出。

(3) 建立局部坐标系并投影：将邻域点投影到切平面上，构造局部二维坐标系 (u, v) ，并记录每个点相对于该平面的“高度” w （即在法向方向上的距离），从而将三维点转化为 (u_i, v_i, w_i) 。

(4) 拟合局部二次曲面：在局部坐标系中，以最小二乘法拟合一个二次曲面： $w(u, v) = au^2 + buv + cv^2 + du + ev + f$ ， a, b, c, d, e, f 为曲面表达式常数。

(5) 提取曲率信息：根据微分几何理论，拟合曲面的二阶导数可用于估算原始曲面的曲率。高斯曲率、平均曲率和主曲率分别为：

$$K = 4ac - b^2, H = a + c, \kappa_1 = H + \sqrt{H^2 - K}, \kappa_2 = H - \sqrt{H^2 - K}$$

当地质体表面形态复杂度与其凸起或者凹陷无关，即与高斯曲率的正负无关时，可以以高斯曲率的绝对值来表征最终的复杂度结果。

4.1.2 基于相邻面法向量夹角的复杂度分析

在计算机图形学和几何处理中，常用法向量变化来估计曲面的曲率或粗糙度。当前主流三维建模软件中得到的三维曲面均以最小三角面构成，因此可以利用这些三角面片法向量的变化程度来表征总体面的复杂程度。参照毛先成等的阐述（毛先成等，2020），本文通过计算每个三角面与其 3 个邻接三角面的法向量夹角的余弦值的指数函数平均值（图 11b），来量化该面的局部几何复杂度。这个复杂度参数能够反映地质体表面的局部弯曲程度或不规则性，可用于识别地质结构复杂的区域。具体流程如下：

(1) 确定局部相邻面：给定三角网格模型 $M = (V, F)$ ，其中 V 为顶点集合， F 为三角面片集合。建立面片邻接关系，记录每个面 f_i 的邻接面： $N(f_i) = \{f_j | f_i \cap f_j \neq \emptyset\}$ 。

(2) 计算面片法向量：每个三角面片 f_i ，由其面上三个顶点， v_a, v_b, v_c 计算归一化法向量：

$$n_i = \frac{(v_b - v_a) \times (v_c - v_a)}{\|(v_b - v_a) \times (v_c - v_a)\|}$$

(3) 计算局部法向量差异：对于面 f_i 与其邻接面 f_j ，计算法向量夹角 θ_{ij} 的余弦值：

$$\cos\theta_{ij} = n_i \cdot n_j.$$

当夹角余弦为 1 时，表示两面平行，地质界面平缓；当夹角余弦为 0，表示两面垂直。

(4) 量化地质体复杂度：由于夹角余弦是周期性三角函数，不便于直接定量分析界面复杂程度，为提高对于构造突变区域敏感性，采用指数函数放大角度差异：

$$c_{ij} = \exp(1 - \cos\theta_{ij}).$$

其中 c 表示归一化法向量夹角余弦转换量，该函数为单调函数， c 为 1 时，表示两面平行，当法向量角度差异增大， c 单调增加。

(5) 计算局部平均复杂度：对于每个 f_i ，存在多个邻接面，对于判断某个面上的复杂度，我们使用 f_i 与所有邻接面复杂度的均值衡量：

$$C_i = \frac{1}{|N(f_i)|} \sum_{f_j \in N(f_i)} c_{ij}.$$

其中 $N(f_i)$ 表示 f_i 的邻接面数量，三角网时则 N 为 3。

4.2 分析结果

基于铜山口矿床接触带的三维点云数据，参照上述计算方法，在 MATLAB 软件中编程进行曲率和法向量夹角余弦转换值的计算，然后再将结果导入三维建模软件中，实现接触带形态复杂度计算结果的三维空间显示，计算结果如图 12 所示。两种分析方法所得结果总体相似，均指示铜山口矿床接触带的 NE-NEE 侧多为高复杂度区域，其中 NE 侧高值区域可延伸至 -800m 左右，NEE 侧高值区域可延伸至 -600m 左右；接触带 SW 侧总体为复杂度低值区域，浅部存在少量高值区域。同时，两者方法计算结果也存在一定差异，在后文将详细论述。

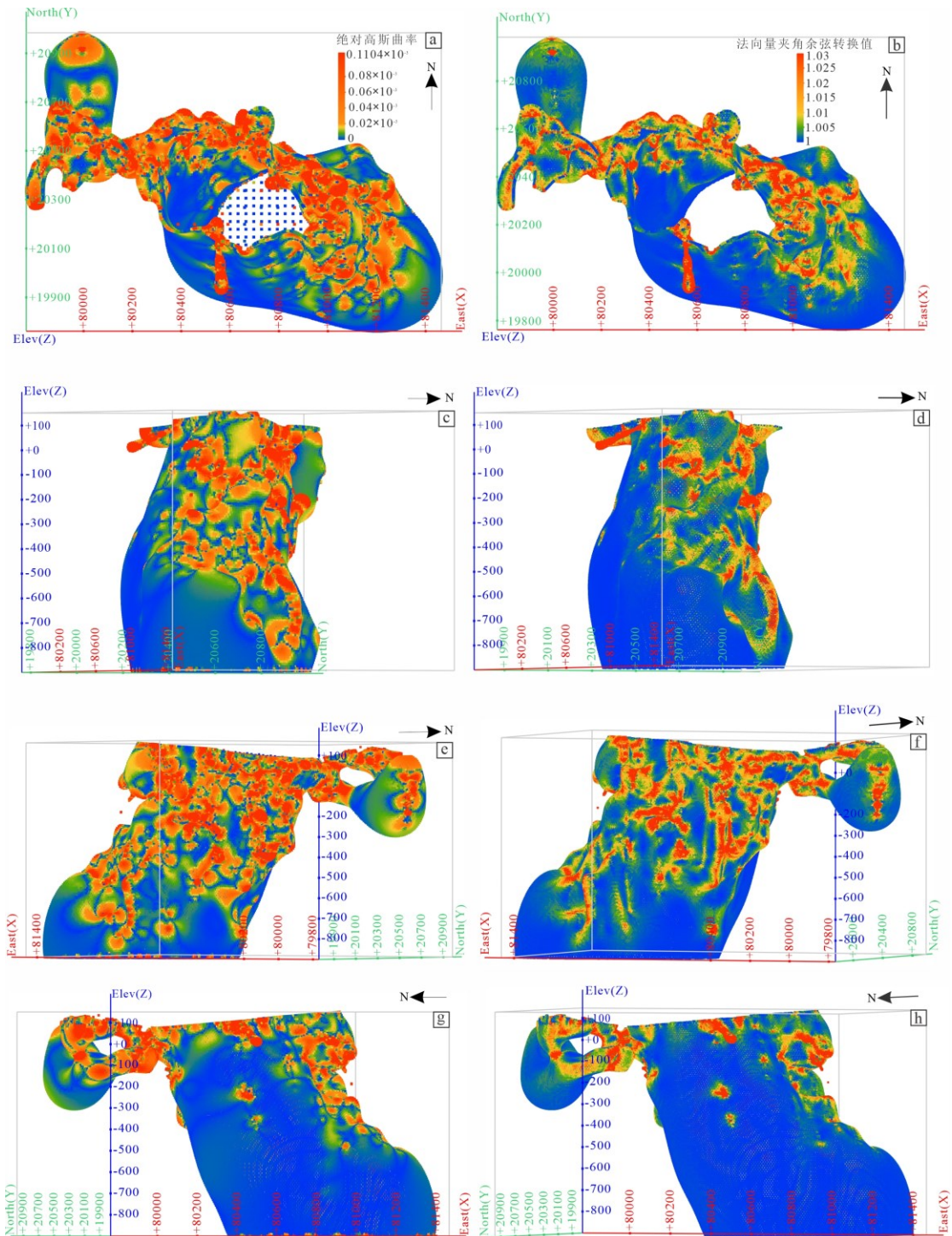


图 12 铜山口矿床接触带三维形态高斯曲率绝对值及法向量夹角余弦转换值计算结果空间显示对比
a-b 为俯视图；c- d 为 NEE 侧图；e-f 为 NE 侧图；g-h 为 SW 侧图；左列为高斯曲率绝对值结果，右列为
法向量夹角余弦转换值结果

Figure.12 Spatial visualization comparison of calculated absolute Gaussian curvature and cosine-transformed normal vector angle for the 3D contact zone morphology of Tongshankou deposit

5 讨论

5.1 接触带复杂度定量分析方法效果及对比

基于铜山口接触带的三维模型（图 9），可看出接触带 NE 及 NEE 侧的形态明显相比 SW 侧更为复杂，表现为 NE-NEE 侧接触带总体具有凹凸不平的特征，而 SW 侧接触带总体较为平滑简单，因此可定性判断接触带 NE-NEE 侧相比接触带 SW 侧，其形态更为复杂。该认识与基于高斯曲率和相邻面法向量夹角余弦转换值的定量评估结果基本一致，说明这两种数学方法的评估结果总体与地质事实相符。

然而，两种分析方法虽然是基于相同的数据，但结果在细节上仍然存在较明显的差异。如图 12 所示，高斯曲率绝对值的高值区域对接触带中连续发育的凹陷及凸起等复杂细节部位表征较为全面，而法向量夹角余弦转换值则明显对接触带表面的脊状隆起等形态剧烈变化部位更为敏感，结果导致高斯曲率绝对值表征的高复杂度区域更为全面和圆滑（图 12c、e、g），而法向量夹角余弦转换值表征的高复杂度区域则较为局限且倾向于呈线条状展布（图 12d、f、h）。将这些结果和实际的三维模型对比（图 9），可看出高斯曲率绝对值的总体表征效果优于法向量夹角余弦转换值。

从方法原理来看，高斯曲率是一个内蕴几何量，由曲面的第一基本形式决定，其计算依赖于两个主曲率的乘积（ $K = \kappa_1 \kappa_2$ ），因此对曲面在三维空间中的具体嵌入方式（如整体的旋转、平移）不敏感，能更稳定地反映曲面本身的弯曲特性（Banchoff and Lovett, 2022）。其次，从主曲率（ κ_1, κ_2 ）这一基础出发，可以系统性地派生出包括高斯曲率（ K ）、平均曲率（ $H = (\kappa_1 + \kappa_2)/2$ ）在内的一系列曲率参数，为多维度、精细化描述曲面几何形态（如凹凸性、弯曲强度）提供了丰富的参数体系（Pressley, 2010）。相比之下，法向量夹角余弦转换值作为一种外蕴几何量，其计算结果高度依赖于局部法向量的估算。在基于离散网格（如三角网）的三维地质模型中进行计算时，法向量对网格的划分密度、质量以及相邻面片之间的夹角异常敏感（OuYang and Feng, 2005）。这种敏感性导致该参数值容易随着网格划分大小的变化而产生显著波动，从而影响了量化结果的一致性和可比性。

综上，本文选择高斯曲率绝对值来表征铜山口矿床接触带复杂度，由此开展后续讨论分析。

5.2 矿化分带性及接触带控矿规律

根据建立的铜山口矿床岩体及接触带三维模型可知，花岗闪长斑岩为一岩株，自 SE 向 NW 方向侵位，且浅部向 NE 方向超覆；岩体向深部未封闭，具有继续延伸趋势（图 9）。围绕花岗闪长斑岩的接触带，其平面形态相应地也呈 NW-SE 向、直径 500-600m 的“环状”，立体形态似一向 SE 倾斜的“花瓶”（图 9），且接触带形态较为复杂，产状变化较大。

将接触带三维模型与矿体模型联合显示可以看出，矿体一般产于花岗闪长斑岩与碳酸盐岩接触部位，整体呈环状分布，其空间产出主要受接触带形态控制（图 13）。Cu 矿体主要分布于-300m 标高以上，在接触带 NE-NEE 侧埋藏较深，在接触带 SW 侧分布于浅部；Mo 矿体则主要分布于-500m 标高以上，在接触带两侧分布情况与 Cu 矿体分布情况类似。总体上钼矿体具有分布深度大于铜矿体的趋势，体现出上铜下钼的分带性。另外，钻探工程在 SE 侧深部揭露多个隐伏的钼钨矿体（-600m 至-900m），说明铜山口矿床矿体垂向上具有上铜钼下钼钨的分带规律。

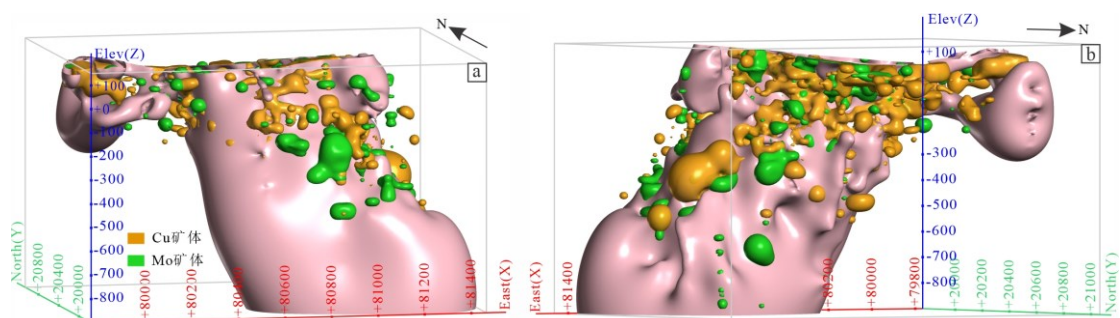


图 13 Cu 矿体和 Mo 矿体模型与接触带三维模型空间显示（a-SW 侧图；b-NE 侧图）

Figure.13 Spatial display of Cu and Mo ore body and contact zone 3D model

接触带的形态对于矽卡岩型矿床的产出具有重要的控制作用，接触带越复杂的部位越有利于成矿，此外岩体超覆于地层之上的接触带也更有利于成矿（翟裕生，1984；张爱奎等，2013；图 14）。这是由于复杂的侵入体形态为交代作用发生提供了更广泛的空间，有利于矿质沉淀（Chang et al., 2019；Meinert et al., 2005）；接触带形态复杂的区域容易出现应力集中及岩石破裂，使该处成为最明显的扩容区域，扩容空间是流体汇聚的有利场所（刘亮明等，2008；赵义来和刘亮明，2011）。本文利用高斯曲率参数定量评估了铜山口矿床岩体与地层接触带三维形态的复杂程度，结合三维地质模型与高斯曲率计算结果可以看出，接触带形态复杂度存在空间差异性：接触带 NE-NEE 侧为高斯曲率高值区域，表明该区域为接触带形态复杂区域，且往深部有继续延伸的趋势；接触带 SW 侧深部的高斯曲率值明显偏低，表明接触带 SW 侧深部形态趋于简单（图 12）。

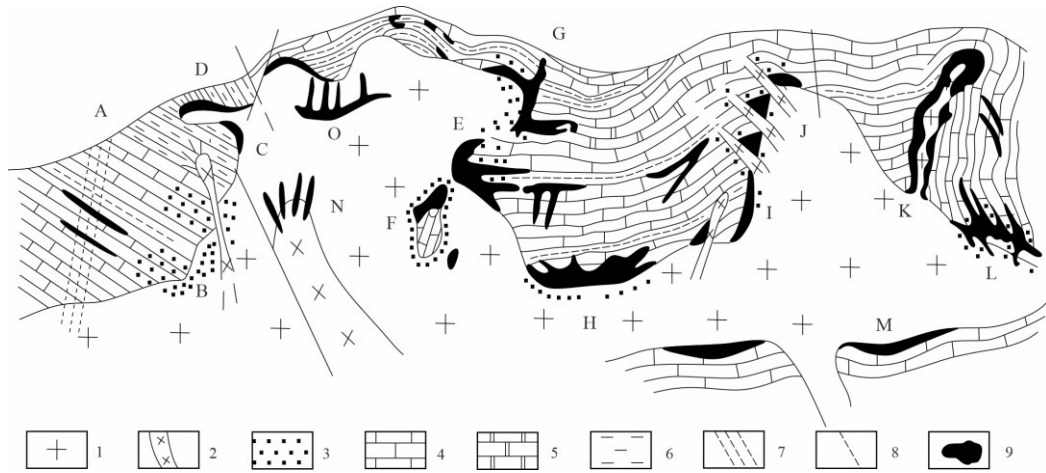


图 14 经典矽卡岩矿床模型 (翟裕生, 1984)

Figure.14 Classic skarn deposit model

1-侵入岩; 2-后期侵入岩及脉岩; 3-矽卡岩及其他蚀变岩; 4-石灰岩; 5-白云质灰岩; 6-页岩; 7-裂隙带; 8-断层; 9-矿体 (图内符号代表构造类型, 与文字对应): A-裂隙带附近矿体; B-热液蚀变接触带中的矿体; C-岩舌下矿体; D-岩体顶部矿体; E-岩体超覆部位矿体; F-捕虏体内矿体; G-接触断裂带中矿体; H-岩体凹部矿体; I-陡接触带矿体; J-岩体与岩脉交叉部位矿体; K-背斜轴部矿体; L-接触-层间破碎带矿体; M-底部接触带矿体; N-再度侵入岩体伴生的矿体; O-岩体原生裂隙中的矿体

将铜山口矿体三维模型与接触带形态高斯曲率计算结果联合显示 (图 15), 可明显看出已有矿体分布与本文计算的高斯曲率高值区域基本吻合。接触带 NE-NEE 侧整体为高斯曲率高值区域, 相应的该侧的矿体在垂向上分布范围明显更大, 而接触带 SW 侧总体为高斯曲率低值区域, 对应的矿体的分布也相对较少, 已有矿体也主要产于浅部的高斯曲率高值区域。这从定量分析角度说明接触带形态复杂度对矿体的产出具有明显的控制作用, 接触带形态越复杂越有利于成矿。

综上, 可将铜山口矿床的矿化分带性及接触带带控矿规律总结为: 铜山口矿床的矿体就位宏观上受花岗闪长斑岩与碳酸盐岩接触带控制, 矿体垂向上具有上铜钼下钨钨的分带性, 矿体具体产出与接触带形态复杂部位密切相关, 接触带形态越复杂越有利于成矿。

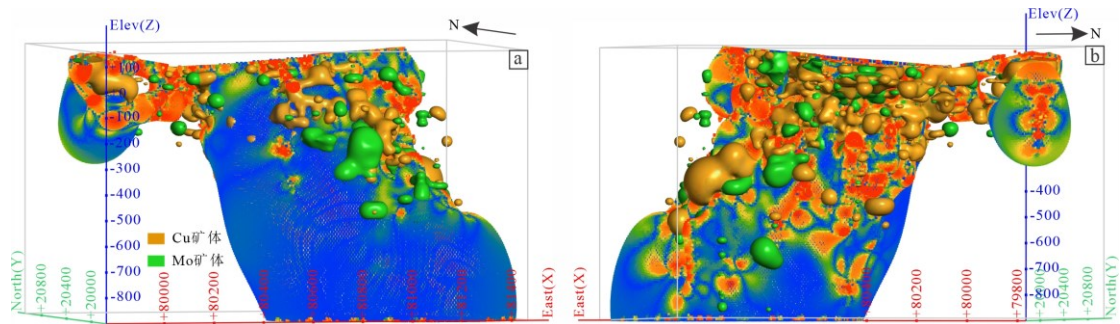


图 15 铜山口矿床 Cu、Mo 矿体与接触带形态高斯曲率计算结果空间显示 (a-SW 侧图; b-NE 侧图)

Figure.15 Spatial display of Cu and Mo ore body and Gaussian curvature calculation results of contact zone morphology of Tongshankou deposit

5.3 深部找矿方向

近年来,鄂东南矿集区已发现付家山-龙角山大型铜钨钼矿及阮家湾大型钨铜钼矿床,这两个矿床与铜山口铜钼矿床均位于矿集区南部(图 1),说明该矿集区南部具有进一步寻找钨钼矿床的良好前景。本文所构建的铜山口矿体三维模型及已有深部钻孔揭露,铜山口矿床矿体垂向上存在上铜钼下钨钼的分布模式,说明深部具有进一步寻找钨钼矿体的良好前景,与区域成矿特征一致。

铜山口矿床矽卡岩型矿体主要受接触带控制,本文通过三维建模及接触带形态复杂度定量分析发现,接触带形态复杂度存在空间差异性,且接触带形态复杂度与成矿强度具有正相关性。接触带 NE-NEE 侧形态总体较为复杂,其中接触带 NE 侧高斯曲率高值区域可延伸至-800m 左右,而 NEE 侧高值区域可延伸至-600m 左右,且具有进一步向深部稳定延伸趋势(图 12),这说明接触带 NE-NEE 侧是开展下一步找矿工作的重点方向及位置,具体深部找矿潜力区域如图 16 所示。

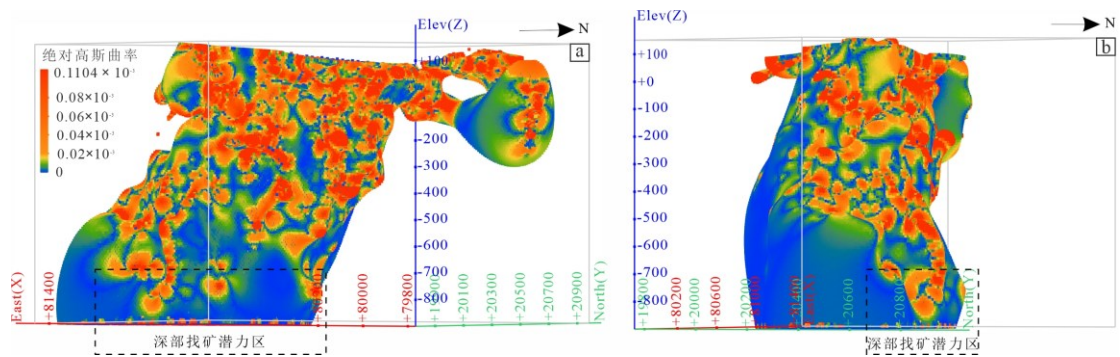


图 16 铜山口矿床深部找矿潜力区域空间位置 (a-NE 侧图; b-NEE 侧图)

Figure.16 Spatial display of deep prospecting potential zones of Tongshankou deposit

6 结论

(1) 在基于大量勘查工程约束的基础上, 利用隐式建模方法可构建复杂地质体的三维模型, 然后提取模型表面的三维点云数据并用之计算高斯曲率与法向量夹角余弦值等参数, 可用于定量评估地质体形态复杂程度, 为分析地质体形态的控矿作用提供量化支撑。上述分析流程, 可广泛应用于其他类型地质体的三维形态复杂度定量分析研究。

(2) 针对铜山口矿床接触带开展的不同复杂度计算方法对比研究, 指示高斯曲率参数相比法向量夹角余弦转换值参数, 能更加全面和详细表征接触带的形态复杂部位。

(3) 铜山口矿床矿体分布与接触带形态密切相关, 接触带形态越复杂越有利于成矿, 且接触带形态复杂度存在空间差异性, 接触带 NE-NEE 侧形态更为复杂, 由此指出铜山口矿区下一步找矿工作应重点关注接触带 NE-NEE 侧深部。

致谢

野外工作得到大冶有色金属有限责任公司、湖北省地质局第一地质大队的热情帮助, 审稿专家对论文提出了宝贵的修改意见, 在此一并致以衷心感谢!

References

- Buhmann, M. D., 2000. Radial Basis Functions. *Acta numerica*, 9:1-38.
<https://doi.org/10.1017/S0962492900000015>.
- Baxter, B. J. C., 2010. The Interpolation Theory of Radial Basis Functions (Dissertation). University of Cambridge, UK.
- Banchoff, T. F., Lovett, S., 2022. Differential Geometry of Curves and Surfaces. Helsinki, Chapman and Hall/CRC, 65-207.
- Cohen-Steiner, D., Morvan, J. M., 2003. Restricted Delaunay Triangulations and Normal Cycle. *Proceedings of the nineteenth annual symposium on Computational geometry*, 312-321.
<https://doi.org/10.1145/777792.777839>.
- Chang, Z. S., Shu, Q. H., Meinert, L. D., 2019. Skarn Deposits of China. SEG Special Publications, 22: 189-234. <https://doi.org/10.5382/SP.22.06>.
- Cai, H. A., Xu, J. Y., Chen, S. L., et al., 2020. Deep Prospecting Progress and Next Prospecting Thoughts of Southeast Hubei Mining Area. *Resources Environment & Engineering*, 34(4): 501-505 (in Chinese with English abstract).
- Cao, W., Liu, L. M., Liu, H. S., et al., 2020. Investigating The Irregular localization of Skarn Orebodies By Computational Modeling in the Fenghuangshan Ore Field, Tongling District,

- Anhui Province, China. *Natural Resources Research*, 29(5): 2967-2988.
- Chen, Y.X., Fu, J.P., Ma, H.R., 2025. Research on Fault-Inclusive 3d Geological Implicit Modeling Method and Its Application. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 1-12 (in Chinese with English abstract).
- Deng, H., Wei, Y.F., Chen, J., et al., 2021. Three-dimensional Prospectivity Mapping and Quantitative Analysis of Structural Ore-controlling Factors in Jiaojia Au Ore-belt with Attention Convolutional Neural Networks. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 52(09):3003-3014 (in Chinese with English abstract).
- Fu, J.M., Hu, M.S., Fang, F., et al., 2024. Complex Orebody 3D Modeling Using Radial Basis Function Surface Incorporating Stacking Integration Strategy. *Earth Science*, 49(03):1165-1176 (in Chinese with English abstract).
- Hillier, M.J., Schetselaar, E.M., De Kemp, E.A., et al., 2014. Three-Dimensional Modelling of Geological Surfaces Using Generalized Interpolation with Radial Basis Functions. *Mathematical geosciences*, 46(8):931-953. <https://doi.org/10.1007/s11004-014-9540-3>.
- Han, Q.B., 2018. Analysis of Geological Characteristics and Ore-Forming Mechanism of Tongshankou Cu-Mo Deposit, Southeast Hubei Mining Area. *China Science & Technology Overview*, (05):172-173 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L.M., Shu, Z.M., Zhao, C.B., et al., 2008. The Controlling Mechanism of Ore Formation Due to Flow-focusing dilation Spaces in Skarn Ore Deposits and Its Significance for Deep-Ore Exploration: Examples from the Tongling-Anqing District. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8):1848-1856 (in Chinese with English abstract).
- Liang, X.T., Quan, H.L., Ma, X.L., et al., 2012. Geophysical Deep Ore-Prospecting Model for Tongshankou Area of Daye, Hubei Province. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 36(04):697-704 (in Chinese with English abstract).
- Li, J.W., Vasconcelos, P.M., Zhou, M.F., et al., 2014. Longevity of Magmatic-Hydrothermal Systems in the Daye Cu-Fe-Au District, Eastern China with Implications for Mineral Exploration. *Ore Geology Reviews*, 57:375-392. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.08.002>.
- Li, H., Song, Y.L., Li, B.C., et al., 2023. Research On The Metallogenic Law and Prospecting Prediction of Copper Molybdenum Deposits in the Tongshankou Area of Daye, Hubei Province. *World Nonferrous Metals*, (15): 169-171 (in Chinese with English abstract).
- Li, M., Zhang, Z.S., Zhao, Z.H., et al., 2023. Three-dimensional Geological Modeling and Deep Ore Prospecting Prediction of the Xiagalaiyaoihe Lead-Zinc Polymetallic Deposit in Heilongjiang Province. *Gold*, 44(07):37-47 (in Chinese with English abstract).
- Lou, Y.M., Kang, X., Lai, Y.P., et al., 2025. Application of Implicit Modeling and Machine Learning Algorithm to 3D Metallogenic Prediction of the Julong Porphyry Copper-Molybdenum Deposit. *Earth Science Frontiers*, 32(5): 440-455 (in Chinese with English abstract).

- Meyer, M., Desbrun, M., Schröder, P., et al., 2003. Discrete Differential–Geometry Operators for Triangulated 2-manifolds. Visualization and mathematics III. Springer Berlin Heidelberg, 35–57. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05105-4_2.
- Meinert, L.D., Dipple, G.M., Nicolescu, S., 2005. World Skarn Deposits. Economic Geology 100th Anniversary Volume, 299 – 336. <https://doi.org/10.5382/AV100.11>.
- Mao, X.C., Zhang, B., Deng, H., et al., 2016. Three-Dimensional Morphological Analysis Method for Geologic Bodies and Its Parallel Implementation. *Computers & Geosciences*, 96:11–22. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.07.004>.
- Mao, X.C., Zhao, Y., Deng, H., et al., 2018. Quantitative Analysis of Intrusive Body Morphology and Its Relationship with Skarn Mineralization—A Case Study of Fenghuangshan Copper Deposit, Tongling, Anhui, China. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 28(1):151–162. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(18\)64648-5](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(18)64648-5).
- Mao, X.C., Deng, H., Zhang, B., 2020. Three-Dimensional Morphological Analysis of Geological Bodies. Science Press, Beijing, 1–70 (in Chinese with English abstract).
- Mao, X.C., Duan, X.M., Deng, H., et al., 2025. Intelligent 3D Prediction of Deep Mineral Resources: Theory, Methods, and Challenges. *Earth Science*, 1–34 (in Chinese with English abstract).
- OuYang, D., Feng, H.Y., 2005. On the Normal Vector Estimation for Point Cloud Data from Smooth Surfaces. *Computer-Aided Design*, 37(10):1071–1079. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2004.11.005>.
- Pressley, A., 2010. Gaussian, Mean and Principal Curvatures. Elementary Differential Geometry. London: Springer London:179–213. https://doi.org/10.1007/978-1-84882-891-9_8.
- Von Harten, J., De la Varga, M., Hillier, M., et al., 2021. Informed Local Smoothing in 3D Implicit Geological Modeling. *Minerals*, 11(11):1281. <https://doi.org/10.3390/min11111281>.
- Wang, J.M., Zhao, H., Bi, L., et al., 2018. Implicit 3D Modeling of Ore Body from Geological Boreholes Data Using Hermite Radial Basis Functions. *Minerals*, 8(10):443. <https://doi.org/10.3390/min8100443>.
- Yan, J., Liu, J.M., Li, Q.Z., et al., 2015. In Situ Zircon Hf–O Isotopic Analyses of Late Mesozoic Magmatic Rocks in the Lower Yangtze River Belt, Central Eastern China: Implications for Petrogenesis and Geodynamic evolution. *Lithos*, 227:57–76. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.03.013>.
- Yao, S.Z., 2025. Mining field structural geology tutorial. China University of Geosciences Press, Wuhan, 16–135 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, Y.S., Shi, Z.L., Lin, X.D., et al., 1982. Genesis of “Daye Type” Iron Ore Deposits in Eastern Hubei, China. *Earth Science—Journal of Wuhan College of Geology*, (3):239–251 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, Y.S., 1984. An introduction Toore Field Structure. Metallurgical Industry Press,

Beijing, 1-360 (in Chinese with English abstract).

Zhao, Y.L., Liu, L.M., 2011. 3D-numerical Modeling of Coupled Geodynamic Processes and Mineralization at the Contact Zones of Complex Plutons: Example from the Anqing Deposit, Anhui Province China. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(1): 128-136 (in Chinese with English abstract).

Zhang, A.K., Liu, G.L., Feng, C.Y., et al., 2013. Geochemical Characteristics and Ore-controlling Factors of Hutouya Polymetallic Deposit, Qinghai Province. *Mineral Deposits*, 32(1):94-108 (in Chinese with English abstract).

Zhu, Q.Q., Xie, G.Q., Han, Y.X., 2019. Characteristics of Tungsten Mineralization from the Tongshankou Skarn-Porphyry Cu (Mo) Deposit in Daye, Hubei Province, and Its Geological Implications. *Earth Science*, 44(2): 441-455 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Z.B., Huang, W., Wang, G., et al., 2020. Geological Characteristics and Prospecting Direction of Tungsten Deposit in Tongshankou Mining Area. *China Mine Engineering*, 49(06):10-14 (in Chinese with English abstract).

Zhong, D.Y., Wang, L.G., Xu, X.L., et al., 2025. Implicit Automatic Modeling Method for Geological Bodies based on Generalized Radial Basis Functions Interpolation. *Journal of China Coal Society*, 1-22 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

蔡恒安, 徐江嫵, 陈松林, 等, 2020. 鄂东南矿集区深部找矿进展及下步找矿思路. 资源环境与工程, 34(4): 501-505.

陈应显, 富颢鹏, 马慧茹, 等, 2025. 含断层三维地质隐式建模方法及其应用研究. 吉林大学学报(地球科学版), 1-12.

邓浩, 魏运凤, 陈进, 等, 2021. 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. 中南大学学报(自然科学版), 52(09): 3003-3014.

扶金铭, 胡茂胜, 方芳, 等, 2024. Stacking集成策略下的径向基函数曲面复杂矿体三维建模方法. 地球科学, 49(03): 1165-1176.

韩庆彬, 2018. 鄂东南铜山口铜-钼矿床地质特征及成矿机制分析, 中国科技纵横, (05): 172-173.

刘亮明, 疏志明, 赵崇斌, 等, 2008. 矽卡岩矿床的汇流扩容空间控矿机制及其对深部找矿的意义: 以铜陵—安庆地区为例. 岩石学报, 24(8): 1848-1856.

梁学堂, 全浩理, 马玄龙, 等, 2012. 湖北大冶铜山口地区地球物理深部找矿模式. 物探与化探, 36(04): 697-704.

李洪, 宋玉龙, 李柏村, 等, 2023. 湖北大冶铜山口地区铜钼矿成矿规律研究及找矿预测. 世界有色金属, (15): 169-171.

李敏, 张子实, 赵忠海, 等, 2023. 黑龙江省下嘎来奥伊河铅锌多金属矿床三维地质建模及深部找矿预测. 黄金, 44(07): 37-47.

姜渝明, 康旭, 赖渊平, 等, 2025. 隐式建模和机器学习算法在西藏巨龙斑岩型铜钼矿床三维成矿预测中的应用研究. 地学前缘, 32(05): 440-455.

- 毛先成, 邓浩, 张彬, 2020. 地质体三维形态分析. 北京: 科学出版社, 1-70.
- 毛先成, 段新明, 邓浩, 等, 2025. 深部矿产三维智能预测理论、方法与挑战. 地球科学, 1-34.
- 姚书振, 2025. 矿田构造学教程. 武汉: 中国地质大学出版社, 16-135.
- 翟裕生, 石准立, 林新多, 等, 1982. 鄂东大冶式铁矿成因的若干问题. 地球科学-武汉地质学院学报, (3): 239-251.
- 翟裕生, 1984. 矿田构造学概论. 北京: 冶金工业出版社, 1-360.
- 赵义来, 刘亮明, 2011. 复杂形态岩体接触带成矿耦合动力学三维数值模拟: 以安庆铜矿为例. 大地构造与成矿学, 35(1): 128-136.
- 张爱奎, 刘光莲, 丰成友, 等, 2013. 青海虎头崖多金属矿床地球化学特征及成矿-控矿因素研究. 矿床地质, 32(1): 94-108.
- 朱乔乔, 谢桂青, 韩颖霄, 2019. 湖北大冶铜山口铜(钼)矿床中钨矿化特征及其地质意义. 地球科学, 44(2): 441-455.
- 张征兵, 黄婉, 王刚, 等, 2020. 铜山口矿区钨矿地质特征及下步找矿方向. 中国矿山工程, 49(06): 10-14.
- 钟德云, 王李管, 许兴亮, 等, 2025. 基于广义径向基函数插值的地质体隐式自动建模方法. 煤炭学报, 1-22.