

基于成矿过程数值模拟与机器学习的三维 找矿预测：以内蒙古毛登矿床为例

孙会玲^{1,2}, 唐瑞^{3,4,*}, 李杨^{1,2}, 赵静^{1,2}, 张彤^{1,2}, 肖克炎^{3,4}, 陈江均^{1,2},
赵婧^{1,2}, 李耀永^{1,2}, 闫瑞花^{1,2}, 佟卉^{1,2}, 安艳丽^{1,2}, 白立兵^{1,2}

1. 内蒙古自治区岩浆活动成矿与找矿重点实验室, 呼和浩特, 010020
2. 内蒙古自治区地质调查研究院, 呼和浩特, 010020
3. 成都理工大学数学地质四川省重点实验室, 成都 610059;
4. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

摘要: 针对深部矿体预测困难的问题, 本研究以内蒙古毛登铜锡矿床为例, 旨在建立一套融合成矿过程数值模拟与机器学习的三维矿产预测方法。本研究采用 FLAC3D 进行成矿过程的数值模拟, 获取了控矿的物理场参数, 如应力、温度和流体压力等; 随后, 结合这些物理结果与地质数据, 利用 XGBoost 机器学习模型进行三维定量矿产预测。结果表明: 该方法成功模拟了矿区的应力场、温度场和流体运移过程, XGBoost 模型的 AUC 值达到了 99.26%, 表现出卓越的预测能力; 通过 SHAP 分析, 发现剪切应力、孔隙压力和温度是影响矿体分布的主要因素; 预测结果与已知矿体高度重合, 为矿体预测提供了可靠的依据, 最终圈定出两处找矿靶区。研究证明, 结合成矿过程数值模拟与机器学习的预测方法可以有效提高深部矿产资源的预测精度, 为类似地区的矿产资源评估提供了新的技术思路。

关键词: 成矿过程数值模拟; 机器学习; 毛登矿区; 三维成矿预测

中图分类号: P632 收稿日期: 2025-12-06

The Three-Dimensional Mineral Prospectivity Prediction Based on Mineralization Process Numerical Simulation and Machine Learning: A Case Study of the Maodeng Deposit in Inner Mongolia

Sun Huiling^{1,2}, Tang Rui^{3,4,*}, Li Yang^{1,2}, Zhao Jing^{1,2}, Zhang Tong^{1,2}, Xiao Keyan^{3,4},
Chen Jiangjun^{1,2}, Zhao Jing^{1,2}, Li Yaoyong^{1,2}, Yan Ruihua^{1,2}, Tong Hui^{1,2}, An Yanli^{1,2}, Bai
Libing^{1,2}

1. Inner Mongolia Key Laboratory of Magmatic Mineralization and Ore-prospecting, Hohhot, 010020, China;
2. Geological Survey Institute of Inner Mongolia, Hohhot, 010020, China;
3. Geomathematics Key Laboratory of Sichuan Province (Chengdu University of Technology), Chengdu, 610059, China;
4. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract: [Objective] This study aims to establish a three-dimensional mineral prospectivity prediction method that integrates mineralization process numerical simulation and machine learning, using the Maodeng copper-tin deposit in Inner Mongolia as a case study, to address the challenges of deep mineral body prediction. [Methods] The study uses Flac^{3D} for numerical simulation of the mineralization process

基金项目: 资助项目: 2025 年度内蒙古自治区自然资源厅综合项目“内蒙古基础地质工作程度更新与重要成矿区带关键矿产资源潜力评价及勘查部署研究”; 大数据驱动的智能化矿产资源预测关键技术的研发与示范应用, 项目编号: 2025KJTW0020。

作者简介: 孙会玲 (1986—), 女, 工程硕士, 高级工程师, 主要从事物化探、地质信息化及矿产预测等综合研究工作。ORCID: 0009-0009-6670-4186. E-mail: sunhuilingwang@126.com

*通讯作者简介: 唐瑞 (1995—), 男, 博士研究生, 地质学专业。ORCID: 0009-0009-3543-3555. E-mail: tangrui0223@163.com

to obtain key physical field parameters that control mineralization, such as stress, temperature, and fluid pressure. These physical results, combined with geological data, are then used in the XGBoost machine learning model for three-dimensional quantitative mineral prospectivity prediction. **[Results]** The results demonstrate that this method successfully simulated the stress field, temperature field, and fluid migration process of the mining area. The AUC value of the XGBoost model reached 99.26%, showing excellent predictive ability. SHAP analysis revealed that shear stress, pore pressure, and temperature are the main factors affecting the distribution of mineral bodies. The predicted results highly correlated with the known mineral bodies, providing a reliable basis for mineral body prediction and ultimately identifying two mineral prospecting target areas. **[Conclusion]** The study demonstrates that the combination of mineralization process numerical simulation and machine learning prediction methods can effectively improve the accuracy of deep mineral resource predictions, offering new technical insights for mineral resource assessment in similar regions.

Keywords: Mineralization process numerical simulation; Machine learning; Maodeng mining area; Three-dimensional mineral prediction

0 引言

矿产资源是国家安全与经济发展的物质基石。铜、锡等战略性关键金属矿产在新能源、高端制造等领域的地位日益凸显,但我国主要大宗紧缺矿产的对外依存度长期居高不下,资源安全形势严峻(翟明国等,2019)。经过多年的高强度开发,地表及浅部易识别矿床已近枯竭,向第二深度空间(500~2000m)进军已成为当前地质勘查工作的核心战略方向(滕吉文等,2022)。然而,深部找矿面临着“看不见、摸不着”的巨大挑战,成矿信息的提取难度呈几何级数增加。如何突破传统方法的局限,从成矿动力学机制出发,实现深部盲矿体的精准定位与定量预测,是当前矿床学与数学地质领域亟待解决的关键科学问题。

随着信息技术的飞速发展,矿产资源预测正逐步从二维定性分析向三维定量预测跨越,相关的理论框架与技术流程已日趋成熟。目前,国内外学者在三维成矿预测领域已形成了多个具有代表性的学术流派与方法体系。例如,以“三位一体”勘查区找矿预测理论为指导,学者们系统构建了以成矿地质体、成矿构造与成矿结构面及成矿作用特征为核心的预测模型(叶天竺等,2007;叶天竺,2013);针对隐伏矿体的立体定位难题,学界提出了结合地质建模与多元统计分析的“三维定量预测流程”与“四步式”预测方法,在地质异常提取及资源量估算方面取得了显著进展(肖克炎等,2012,2013;毛先成等,2016,2025;袁峰等,2014,2018,2019,2024);此外,基于“立方体预测模型”的综合集成方法,通过融合地质、物探、化探及遥感多源信息,有效实现了深部找矿靶区的圈定与概率分析(陈建平等,2007,2012a,2012b,2012c,2014)。这些研究成果极大地推动了矿产勘查工作向科学化、定量化和精细化方向发展。

尽管现有的三维预测体系已较为完善,但目前的主流模型多侧重于挖掘“现今”地质要素与矿化位置之间的空间几何关联(如计算断裂缓冲区、岩体欧氏距离等)。这种基于静态几何特征的预测方法,本质上属于“类比”预测,难以定量刻画成矿过程中复杂的动力学机制(袁峰等,2019)。在复杂的构造-岩浆热液体系中,并非所有的断裂都控矿,只有处于特定应力状态下的扩容部位才有利于成矿流体的充填与沉淀(Ord et al., 2002)。如果仅仅依靠几何位置信息,而忽略了构造应力驱动、流体运移聚集等“成矿过程”对矿体定位的本质控制,往往会导致预测结果存在多解性,限制了其在深部隐伏矿体预测中的准确性与物理可解释性。

针对这一科学难题,计算地球科学领域的数值模拟技术提供了一种从“过程”视角解析成矿机制的有效手段。该方法能够在三维地质模型的基础上,通过赋予地质体岩石力学与热

物理参数，利用物理控制方程重构矿期的构造应力场、温度场及流体运移轨迹，将抽象的地质成矿机制转化为定量的物理力学参数（如体积应变、剪切应力集中区、孔隙压力等），从而实现从“静态几何分析”向“动态过程还原”的跨越（Hu et al., 2020; Oliver et al., 2006; 周洁 等, 2025; Xiao et al., 2024）。

然而, 数值模拟虽然能揭示成矿机理, 但其产生的海量多物理场数据具有高度的非线性与复杂性, 传统的数据叠加分析方法难以充分挖掘其蕴含的找矿信息。近年来, 深度学习与机器学习算法在地球科学领域发展迅速, 为处理高维、非线性地质数据提供了新范式 (Zuo, 2017; Carranza, 2017)。国际上已有研究尝试将地质大数据与智能算法结合, 在矿产预测不确定性分析及深部靶区识别方面取得了重要进展 (Zhou G et al., 2024; Zhang Q et al., 2022; Zhang Z et al., 2024)。将数值模拟获取的“成矿动力学参数”作为具有明确物理意义的预测变量, 融入机器学习算法中, 构建“物理机制+数据驱动”的耦合预测模型, 不仅能弥补传统纯数据驱动方法(“黑箱”模型)缺乏地质解释性的短板, 更能有效提升在复杂地质背景下的找矿预测精度。

基于此,本文以内蒙古毛登热液型铜锡矿床为例,拟在构建精细化三维地质模型的基础上,采用 Flac^{3D} 软件进行成矿动力学数值模拟,获取控矿物理场参数;并将其与地质勘查数据深度融合,利用 XGBoost 机器学习算法开展三维定量预测研究。本文旨在探索一套融合地质过程复原与智能算法挖掘的深部找矿预测新方法,为该区及类似热液型矿床的深部资源评价提供科学依据和技术支撑。

1 地质概况与成矿模式

1.1 大地构造背景

大兴安岭南段位于中亚造山东部的兴蒙造山带内(图1),是中国北部最重要的锡-铜-银多金属成矿带之一(姚磊等,2017)。在中生代以前,研究区属于中亚—蒙古洋南侧的华北板块大陆边缘。

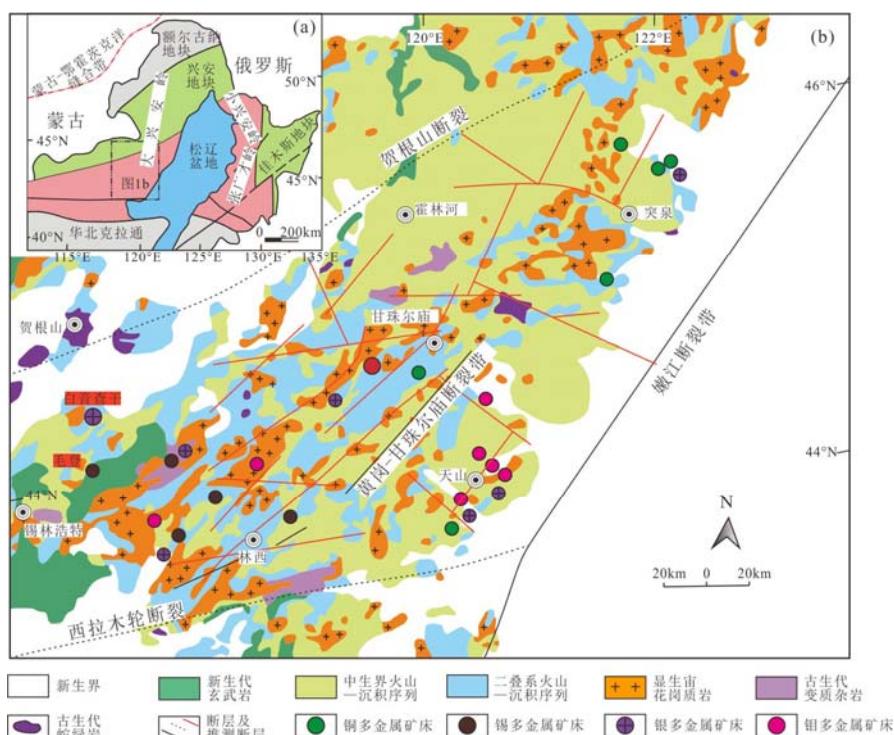


图 1 大兴安岭南段地质简图及矿床分布图 (据文献 (Li et al., 2024))

Figure 1: Geological Sketch of the Southern Great Hinggan Mountains and Distribution Map

中生代以后,研究区的成矿作用受到中亚—蒙古洋闭合前及闭合过程形成的构造影响,同时也受滨太平洋构造域的作用。自亚洲洋闭合以来,大兴安岭南段主要受到蒙古-鄂霍茨克洋构造体制和古太平洋构造体制的双重影响(Chen et al., 2021)。特别是早白垩世期间,该区发生了大规模的成岩成矿作用(刘瑞麟等,2018;欧阳荷根等,2016)。中国北方中生代的大规模成矿作用主要集中在三个时期:后碰撞造山过程(200~160 Ma)、构造体制大转折过程(约 140 Ma)和岩石圈大规模快速减薄过程(约 120 Ma)(毛景文等,2005)。这种复杂的构造演化使得东西向断层转变为剪切性的转换断层,不同历史时期、不同方向构造场的交织与叠加,为毛登矿床的形成提供了独特且有利的构造动力学背景。

1.2 矿区地质特征

内蒙古毛登矿床位于大兴安岭南段成矿带中段,属于典型的浅成热液多金属矿床。(1)地层:矿区出露地层主要为中下二叠统的大石寨组、下侏罗统的红旗组和下白垩统的白音高老组。其中,大石寨组是矿区主要的赋矿地层,岩性包括凝灰质粉砂岩、细砂岩、流纹岩、火山角砾岩、安山岩等。钻孔揭示,火山角砾岩、含火山角砾熔岩以及变质粉砂岩因其物理性质脆性较强,是矿体主要的赋存围岩。红旗组分布在矿区北部,以砂岩、砂砾岩和泥岩为主;白音高老组位于西北部,主要由酸性熔岩、凝灰岩等组成。第四系松散沉积物广泛覆盖于矿区地表及低洼处(图 2)。(2)构造:矿区北西向断裂是区内主要容矿构造,严格控制着矿体的分布位置和形态。区内主要发育 FI-2、FII-35、FII-46 三条断裂,总体走向 315°~335°,倾向 NE,倾角 60°~85°。(3)岩浆岩:矿区地表及浅部主要出露花岗斑岩,呈斑状结构,斑晶主要由斜长石、钾长石、石英、角闪石和辉石组成,粒度一般 0.2~5.0mm。(4)矿体特征:矿区已知规模最大的为 I-2 号锡铜矿体,该矿体呈陡倾斜的板状延伸,略带舒缓波状,主要赋存在由火山角砾岩夹变质粉砂岩层充填的北西向张扭性断裂(先压后张性质)中。矿体走向 315°~330°,倾向北东,倾角 65°~85°,在走向上具有膨胀、尖灭再现及分枝复合的特点。本文的建模范围主要为图 2 的蓝色方框区域,该区域受 FI-2 断裂严格控制,且钻孔数据充足,是研究成矿规律的理想对象。

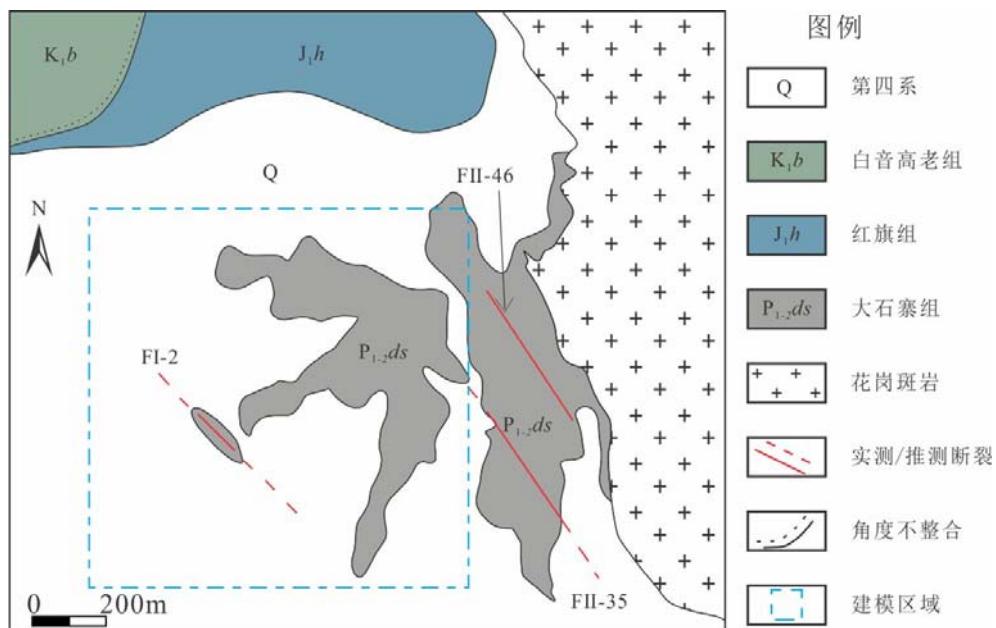


图 2 毛登 Sn-Cu 矿床地质简图(据(季根源等,2021b)修改)

Fig. 2 Geological Simplified Map of the Maodeng Sn-Cu Deposit

1.3 成矿概念模型

基于区域演化与矿区地质特征,本研究构建了毛登矿床的“构造-岩浆-热液”成矿概念模型(图3)。约139 Ma(早白垩世),毛登矿床处于构造体制大转折时期。由于古太平洋板块的北西向俯冲与蒙古-鄂霍次克造山带垮塌联合作用,引发了强烈的造山后伸展环境。深部岩浆上涌导致的升温作用使得中上部地壳中的钙碱性岩石发生低压熔融,形成了深部隐伏的阿鲁包格山高分异花岗质岩浆房。阿鲁包格山岩体分异程度较高,岩浆主要集中于岩体的边部和顶部,首先形成了地表可见的花岗斑岩,而中心岩体形成较晚,经过充分结晶形成了似斑状花岗岩。在这一成岩过程中,富含挥发分的岩浆热液流体在构造薄弱部位(如北西向断裂)运移,形成了热液脉型矿化(赵胜金等,2025;郭硕等,2019;季根源等,2021a,2021b;张雪旋等,2025)。具体的成矿机制为:高温高盐度的岩浆热液流体在构造应力驱动下沿断裂上升,当运移至浅部时,由于减压作用,流体发生多次沸腾,导致物理化学条件突变,促使矿质在火山角砾岩及断裂破碎带中卸载沉淀,最终形成了毛登锡铜锌矿床。

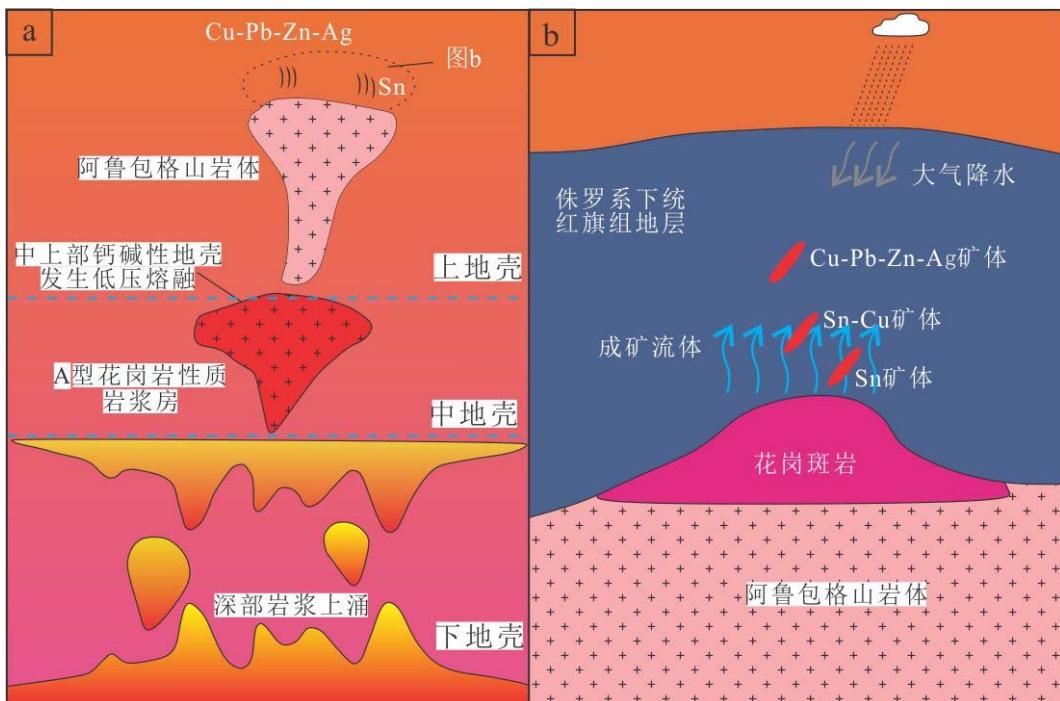


图3 毛登锡铜矿床成矿模式图(据内蒙古自治区地质调查研究院内部资料)(图a: 成矿流体上升过程示意图; 图b: 流体成矿示意图)

Fig. 3 Mineralization Model of the Maodeng Tin-Copper Deposit (a. Schematic Diagram of the Mineralizing Fluid Ascending Process; b. Schematic Diagram of Fluid Mineralization)

2 数据与方法

2.1 数据准备

本研究主要利用了研究区内的24口钻孔数据,涵盖了钻孔位置、钻孔测斜、钻孔样品和钻孔岩性四个方面的信息。钻孔位置表记录了钻孔的开口坐标、编号及深度;钻孔测斜表提供了每个钻孔段的倾角和方位角;钻孔样品表则列出了钻孔内测量的元素信息,主要为Sn和Cu元素;钻孔岩性表描述了各钻孔的岩性特征。此外,剖面数据是基于钻孔数据生成的,经过地质专家的深度分析,将同一勘探线上的钻孔连接成剖面图。剖面数据明确了矿体、岩体和地层的分布,为三维地质建模提供了重要的辅助支持。

表 1 毛登矿区数值模拟相关物性参数表

Table 1 Physical Property Parameters for Numerical Simulation in the Maodeng Mining Area

参数类型	岩石物性参数	断裂带	火山角砾岩	变质粉砂岩	覆盖层
力学性质	密度 (kg/m ³)	2500	2750	2680	1900
	体积模量 (GPa)	5	16.7	20	0.05
	剪切模量 (GPa)	3	10	12	0.02
	粘聚力 (MPa)	1	16	12	0.02
	内摩擦角 (°)	25	42	35	25
流体性质	抗张强度 (MPa)	0.1	5.4	4	0
	孔隙度 (%)	0.15	0.08	0.03	0.35
	渗透率 (m ²)	5×10^{-13}	1×10^{-15}	5×10^{-17}	1×10^{-12}
热学性质	导热系数 (W/m/K)	2	2.5	2.8	1.2
	比热容 (J/kg/K)	1300	900	850	1200
热膨胀系数 (10 ⁻⁶ m/K)	12	9	8	15	

除了钻孔数据, 本研究还整理了相关的物性参数。针对研究区内地质体的岩石物性参数设置, 研究基于《岩石与矿物的物理性质》专著 (Y. S. Touloukian, 1990) 中的岩石物理实验手册及 Flac^{3D} 应用手册, 同时参考了毛登地区前人的相关地质报告。通过这些文献和数据, 本研究对地质体的物性参数进行了合理设定, 并将其应用于本次模拟实验中。具体的岩石物性参数信息见表 1。

2.2 成矿过程数值模拟

成矿过程数值模拟本质上是通过设定初始条件和边界条件, 求解一系列微分方程组的计算过程, 主要涉及地质概念模型、数理模型和模拟模型的构建。

地质概念模型, 也称为找矿模型, 是在研究区地质背景和成矿规律的基础上构建的, 旨在概括和总结成矿作用及其条件。数理模型则通过量化成矿条件, 建立各控制因素和影响因子之间的定量关系。通过控制方程 (如流体流动方程、岩石变形方程、热传递偏微分方程和能量守恒方程等), 模拟流体在时间和空间中的流速、流向、压力和温度分布。模拟模型结合了研究区的实测地质资料和物理化学实验数据, 利用构造模型对地质模型中的地层、岩体、断裂等地质要素进行赋值, 并根据初始条件和边界条件进行设置。三者关系的详细描述可参考相关文献 (安文通 等, 2021)。

2.3 XGBoost 模型

XGBoost (Extreme Gradient Boosting) 是由 Guestrin 于 2016 年提出的一种高效、灵活且可扩展的机器学习算法, 基于梯度提升决策树 (GBDT) (李占山 等, 2019)。该算法通过深度优化传统 GBDT, 解决了计算速度和过拟合控制的瓶颈, 因其卓越的预测精度和计算效率, 在数据科学竞赛和实际应用中广泛表现出色。

由于其卓越的性能, XGBoost 已广泛应用于矿产资源预测领域。例如, 周锦涛在研究中国含铝岩系稀土元素预测时, 结合 RF (随机森林) 与 XGBoost 的混合算法提高了预测精度 (周锦涛 等, 2025); 高猛在对新疆喀拉通克铜镍矿进行三维预测时, 比较了 XGBoost 与随机森林、支持向量机等模型, 认为 XGBoost 具有最佳性能, 并基于此进行了靶区划分 (高猛 等, 2025)。这些研究表明, XGBoost 在处理高维、非线性地质数据时, 凭借其强大的学习能力、内置正则化机制和高效计算, 成为了当前最有效的找矿预测工具之一。

此外, 作为集成模型, XGBoost 天然具备良好的模型可解释性。与一般的“黑箱”模型不同, XGBoost 能够提供变量的重要性排序和变量间的偏依赖关系, 有助于识别关键预测因子

并进行解释，这在矿产资源预测中具有重要应用价值。

3 结果及讨论

3.1 三维地质建模结果

在构建研究区三维地质模型之前，已对研究区数据进行归纳总结，主要包括：24 口钻孔数据、11 张勘探线剖面、地形地质图一张，因此可以通过平面与剖面的数据联合，完成研究区的三维地质模型构建。考虑到本研究需要进行成矿过程的数值模拟，模型的高度范围设定为 0-1300m，而钻孔的最大深度为标高 900m。三维模型在垂向深度上延伸至标高 0m（对应深度约 1300m），主要是考虑到深部热液活动的延续性与模拟计算的稳定性。向下延伸足够的深度可以为热液的运移和热交换提供充分的计算空间，有效减小底部边界条件对主要成矿区域预测结果的影响，从而提高模拟精度。

3.1.1 钻孔/地形模型

为保证三维模型的精确性，依据地形地质图来构建三维地形模型。地形模型主要用于控制三维地质体模型的边界，图 4 显示，毛登矿区地形总体起伏较为平缓。将钻孔数据与地形模型叠加后可以看出，矿区地层分布具有明显的分带特征：火山角砾岩主要分布于研究区东部，西部则以变质粉砂岩为主，地表广泛覆盖第四系沉积物，岩性空间展布规律清晰。

3.1.2 矿体模型

本研究基于收集整理的钻孔和地质勘探数据，利用 Micromine 三维矿业软件平台，采用显式建模技术对研究区锡矿体进行了三维重构。首先，在建立严格的钻孔数据库基础上，依据矿床地质特征，进行勘探剖面的精细人机交互解译，圈定矿体边界线串。随后，运用三角网格化和线框连接算法，将二维矿体轮廓在三维空间中进行拓扑重建，最终构建了封闭、光滑且符合地质规律的锡矿体三维实体模型。该模型精确刻画了 I 矿脉带的空间几何形态，包含 89 个锡矿体，主要为锡石-硫化物石英型矿脉，以 I-2 号大脉型矿体为主，并伴有细网脉型矿体。矿体在平面上呈平行脉状分布，剖面上呈斜列式分布，矿脉带产状走向为 315°~330°，向北东倾斜，倾角为 65°~85°（图 4b）。

3.1.3 地层模型

地层模型则是基于隐式建模的核心算法，利用 Leapfrog Geo 软件构建了研究区的三维地层格架模型。该方法通过对钻孔及地表地质数据的径向基函数（RBF）插值，快速生成了光滑且封闭的地质界面。模型准确重现了矿区东西分带的地层分布特征：东部主要为大石寨组火山角砾岩，构成了矿区的主要赋矿围岩；西部则以变质粉砂岩为主；地表广泛分布第四系覆盖层（图 4c）。通过设置地层层序与侵蚀关系，模型不仅还原了地质体的空间几何形态，也为后续的属性赋值与数值模拟提供了精确的体积约束。

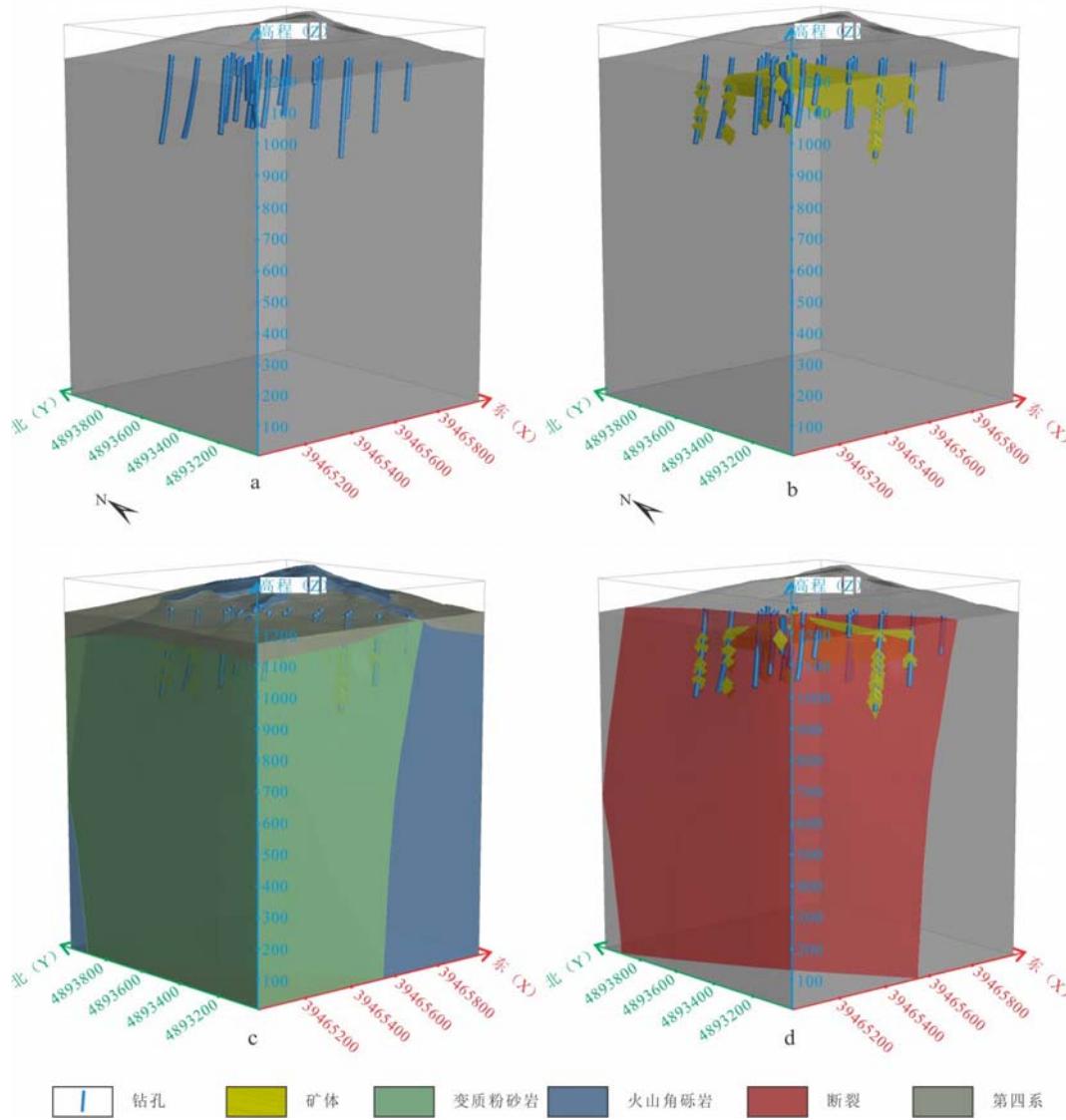


图 4 毛登矿区三维地质模型图 (a. 三维钻孔模型; b. 三维矿体模型; c. 三维地层模型; d. 三维断裂模型)

Fig. 4 Three-Dimensional Geological Model of the Maodeng Mining Area (a. Three-Dimensional Borehole Model; b. Three-Dimensional Ore Body Model; c. Three-Dimensional Stratigraphic Model; d. Three-Dimensional Fault Model)

3.1.4 断裂模型

依据地质图 (图 2) 揭示的构造格架, 研究区西南部发育一条 NW 走向的控岩断裂 FI-2。本研究借助 Leapfrog Geo 软件的隐式建模技术, 在整合地表露头与勘探剖面产状数据的基础上, 利用径向基函数 (RBF) 算法对该断裂进行了三维几何重构。最终建立的 FI-2 断裂模型 (图 4d) 呈现为光滑连续的构造曲面, 精确刻画了其在深部的延伸趋势。该断裂模型在空间上起到了关键的构造格架作用, 作为明显的岩性分界面, 将西部的变质粉砂岩与东部的火山杂砾岩截然分开。

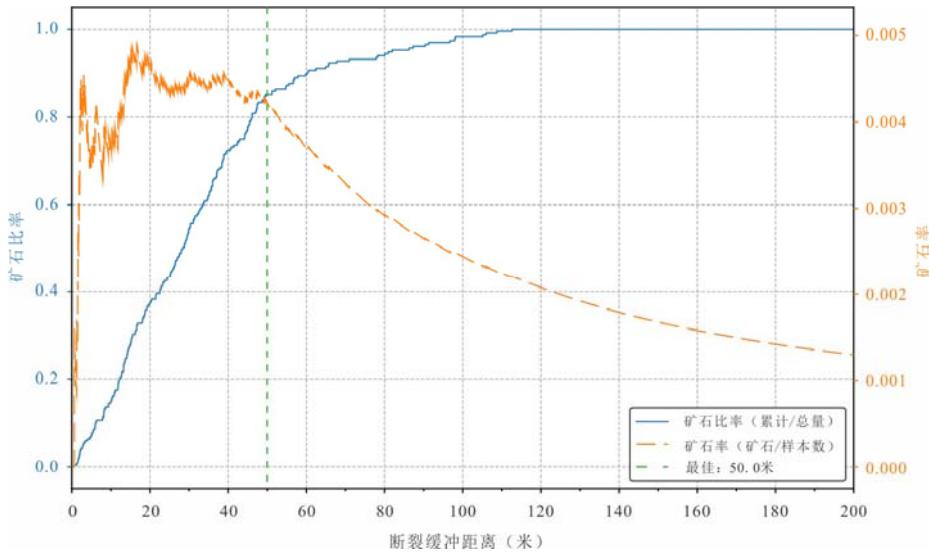


图 5 FI-2 断裂最佳缓冲距离

Fig. 5 Optimal Buffer Distance for Fault FI-2

考虑到后续热液成矿数值模拟不仅需要分析应力, 还需模拟流体在断裂中的运移过程, 单纯的面属性断裂模型无法满足需求。因此, 必须将 FI-2 断裂从“零厚度”的几何平面转化为具有特定物理-力学属性的“断裂破碎带”实体。

基于对矿区控矿断裂与矿体空间分布关系的统计分析, 本研究以 FI-2 断裂面为中心, 向两侧各缓冲 50m (总厚度 100m) 作为断裂影响带的几何范围 (图 5)。这一缓冲距离是根据断裂影响范围与主要矿体的空间占比关系计算得出的。通过此方法, 将断裂转化为具有高渗透率和低力学强度属性的三维实体单元, 使其在数值模拟中成为热液运移的“优势通道”。最终形成的研究区三维地质模型如图 6 所示。总体模型范围为 X (39465000, 39466000), Y (4893000, 4894000), Z (0, 1300)。

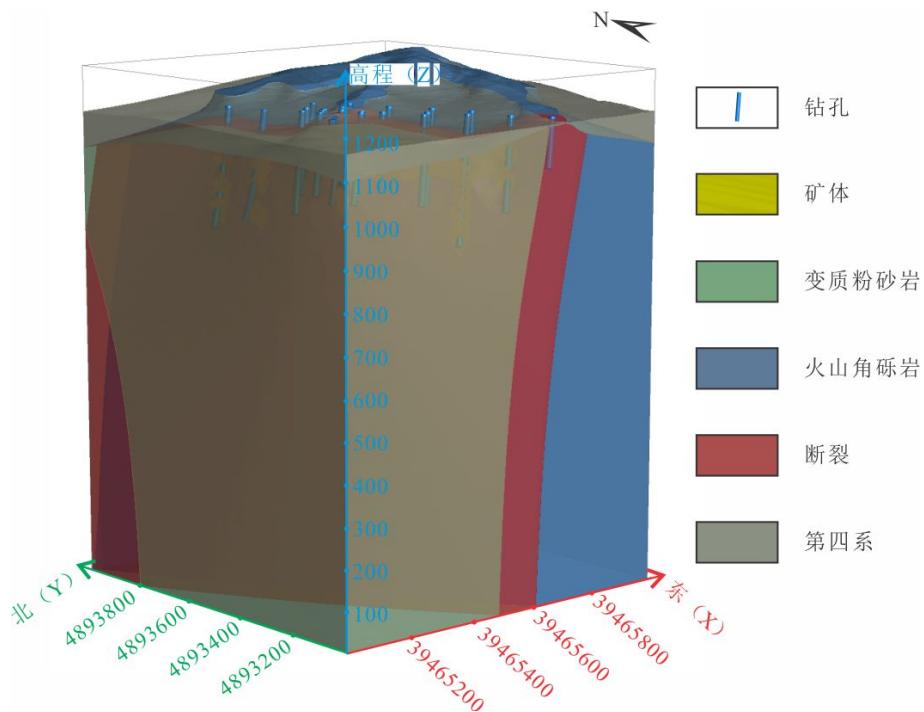


图 6 研究区三维地质模型

Fig. 6 Three-Dimensional Geological Model of the Study Area

3.2 成矿过程数值模拟结果

3.2.1 数学模型构建

本研究采用 Flac^{3D} 软件内置的热-流-固 (THM) 耦合模块进行模拟。该模型基于 Biot 多孔介质理论, 假设岩石为各向同性的多孔弹性介质, 流体服从达西定律 (Hu et al., 2020; Li et al., 2019)。成矿过程中的多物理场演化由以下控制方程组描述:

(1) 流体运移与质量守恒方程: 流体在多孔介质中的运移遵循达西定律, 结合流体质量守恒方程, 描述了流体速度与孔隙压力梯度的关系:

$$q^w = -k \nabla(P - \rho_w g \cdot x)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -q_{i,i} + q_v^w$$

式中, q^w 为流体渗流速度向量; k 为渗透系数张量; P 为孔隙流体压力; ρ_w 为流体密度; g 为重力加速度; ξ 为流体容量变化, $q_{i,i}$ 为 x 轴方向上流体渗流速度分量, q_v^w 为体积流体来源。该方程控制了深部热液在压力驱动下的渗流过程。

(2) 热传递与能量守恒方程: 热场演化遵循能量守恒定律, 综合考虑了热传导 (傅里叶定律) 与热对流效应:

$$q^T = -k^T \nabla T$$

$$C^T \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla q^T + \rho_0 c_w q^w \cdot \nabla T - q_v^T = 0$$

式中, q^T 为热通量; k^T 为有效热传导率; T 为温度; C^T 为多孔介质的有效比热容; ρ_0 为参考密度; c_w 为流体比热容; q_v^T 为体积热源强度。方程中 $\rho_0 c_w q^w \cdot \nabla T$ 项体现了流体流动对热量的对流输运作用。

(3) 力学平衡与变形方程: 岩石骨架的力学变形遵循动量守恒方程 (静力平衡条件):

$$\rho \frac{d v_i}{d t} = \sigma_{i,j,j} + \rho g_i$$

式中, v_i 为 x 轴速度分量, ρ 为多孔介质密度, $\sigma_{i,j,j}$ 为应力张量, g_i 为重力加速度 x 轴分量, $\frac{d v_i}{d t}$ 为加速度项 (在准静态模拟中通常忽略惯性项)。

(4) 热-流-固耦合本构关系: 为实现多物理场耦合, 引入 Biot 耦合理论描述孔隙压力、温度对岩石应力状态的影响。首先, 温度变化引起岩石的热膨胀或收缩 (热-力耦合):

$$\frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial t} = \alpha_t \frac{\partial T}{\partial t} \delta_{ij}$$

其次, 孔隙压力的演化不仅取决于流体容量变化, 还受体积变形和温度变化的共同控制 (流-固-热全耦合):

$$\frac{\partial P}{\partial t} = M \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} - \alpha \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \beta \frac{\partial T}{\partial t} \right)$$

其中, ε_{ij} 为热应变张量, T 为温度, α_t 为线性热膨胀系数, δ_{ij} 为克罗内克算符, ξ 为流体容量变化, M 为 Biot 模量, α 为 Biot 系数, β 为多孔介质体积热膨胀系数。

3.2.2 数值模拟模型构建

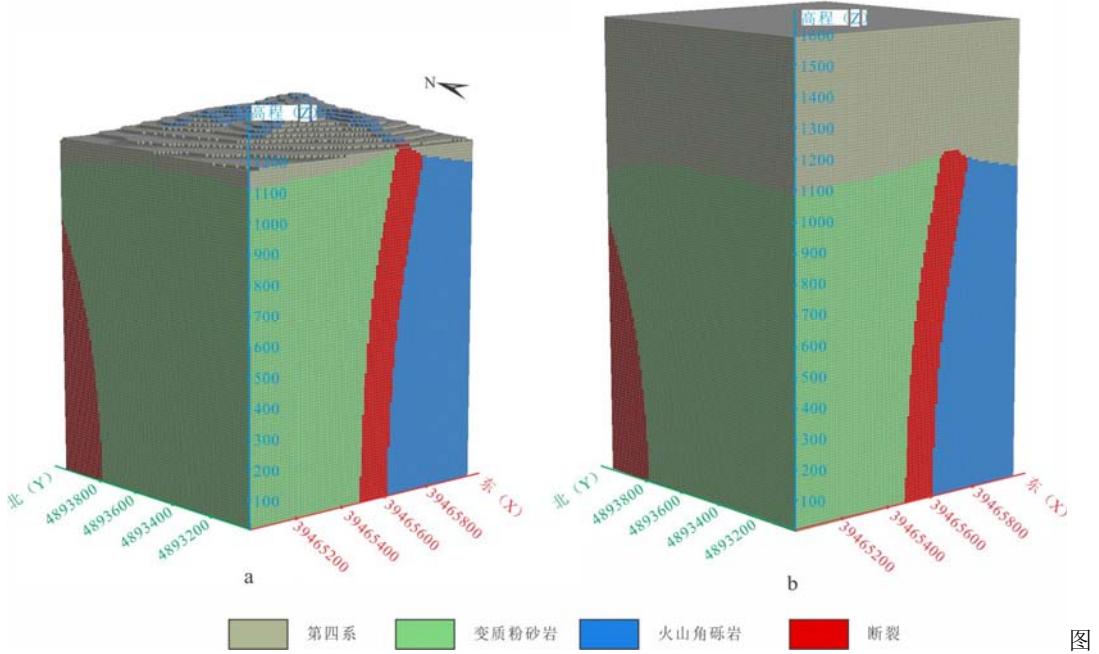
毛登矿床数值模拟环境条件设置分为以下四个部分:

(1) 恢复剥蚀地层

成矿过程数值模拟旨在重现岩浆上侵及热液活动时的古地质环境。毛登矿区现今的地表是成矿后经历长期构造抬升与风化剥蚀的结果, 导致较老的地质单元 (如火山杂砾岩、变质粉砂岩) 出露地表。在岩浆上侵与铜锡成矿时期, 现今地表之上应覆盖有一定厚度的上覆地层。这部分已被剥蚀的地层厚度, 对于恢复成矿时的古围压、古地温梯度以及 (最关键的)

古静岩压力状态至关重要, 它直接控制了成矿流体的沸腾深度与沉淀机制。

为了准确定量此剥蚀厚度, 本研究借鉴了研究区所在构造单元的区域古构造恢复研究成果。相关研究综合利用了天文米氏旋回地层学方法, 结合区域年代地层、生物地层、构造演化以及大量钻井测井数据, 对赛汉塔拉组沉积末期以来的构造抬升与剥蚀量进行了高精度定量计算(邓已寻, 2013)。基于上述区域剥蚀背景, 并结合研究区砂岩回弹特征与古压力状态的综合分析, 本研究确定了模拟所需恢复的上覆地层剥蚀厚度约为300m。在Flac^{3D}模型构建中, 这300m将作为一组虚拟的“顶板”单元叠加在现代地表模型之上, 用以施加正确的成矿期古静岩载荷。



7 毛登矿区 Flac^{3D} 六面体模型 (a, 原始三维立方格模型; b, 恢复剥蚀地层后的三维立方格模型)

Fig. 7 Flac^{3D} Hexahedral Model of the Maodeng Mining Area (a. Original Three-Dimensional Cubic Grid Model; b. Three-Dimensional Cubic Grid Model After Restoring Eroded Strata)

(2) 初始应力场

在本文的数值模拟中, 初始阶段假设岩体处于停止上侵后的冷却过程, 并且岩体内部已经达到稳定的平衡状态。为了构建毛登矿床中岩体的初始应力场平衡, 采用了快速应力边界法。根据大量研究(李仲奎 等, 2009; Hu et al., 2020), 初始状态下整个三维模型所受到的垂向主应力被设定为静岩压力。由于上覆地层较厚, 模拟中不考虑静水压力的影响。考虑到高温高压环境下, 岩石的泊松比对应力场的影响可以近似忽略。在初始平衡态计算过程中, 模型内部的不平衡力设置为 10^{-5} , 即当内部不平衡力小于 10^{-5} 时, 认为模型已达到平衡状态, 初始平衡态计算终止。

(3) 初始温度场

在本模拟中, 初始温度场设置基于不同地质区域的需求。温度场的分布方式如下:首先, 在顶部区域, 温度设置为20°C, 并沿z轴方向以0.025°C/m的梯度递增。其次, 对于断层区域, 温度设置底部为500°C, 并在z轴方向以0.02°C/m的梯度向上递减。此初始温度场设置能够有效反映地下热流的变化, 并为后续的热-力-流耦合计算提供合理的起始条件。

(4) 初始边界条件

在本模拟中, 边界条件主要包括温度、孔隙压力和机械边界条件。温度边界条件已在上一步进行定义。对于孔隙压力, 在火山角砾岩、变质粉砂岩、第四系等区域中, 孔隙压力初始化为3.85e7 Pa, 并在z方向以-1.0e4 Pa/m的梯度递减; 而在断层区域, 孔隙压力初始化

为 $7.70e7 \text{ Pa}$ ，并且同样在 z 方向递减。机械边界条件方面，在东、西、南、北边界上，设置了零法向速度条件，模拟边界的固定性。同时，底部区域则施加了零位移边界条件，确保模型底部不发生位移。通过这些初始边界条件，模型能够在热-力-流耦合的框架下进行稳定的数值模拟。

3.2.3 数值模拟结果分析

依据前文建立的三维地质模型，通过分析热-力-流耦合下的各种参数结果，以探索成矿热液富集成矿的影响。本次模拟设置一个大循环为：力学 50 次、热学 20 次以及流体 12 次，通过计算内部不平衡力小于 10^{-5} ，认为经过 80 个大循环达到求解条件。

（1）力学部分：

位移结果：主要包含 XYZ 三个方向的位移图（图 8abc）。图中表明：红色区域表明在断裂与变质粉砂岩相交的部位，由于较软岩石的变形能力较强，水平方向的位移较大；而蓝色区域则表示 断裂与火山角砾岩接触的部分，由于火山角砾岩的较高刚性，水平方向的变形较小；Y 方向的位移图与 X 的有相似的结果，这是因为断裂是 NW 向展布的，对 XY 两个方向都有对应的影响；但是 Z 方向的位移图基本无明显变化，主要是因为模拟区域内主要的变形是由水平应力（如沿断裂的剪切力）引起的，同时控制流中设置了底部边界固定，限制了垂直方向的变形，这也比较符合研究区的地质条件。

正应力结果：主要包含 XYZ 三个方向的正应力结果图（图 8def）。根据三个方向的正应力分布图，可以看出模型中存在明显的应力集中，尤其是在断裂带和不同岩性接触区域。图 8d 显示沿 X 方向的正应力分布，反映了岩石在压缩作用下的应力集中，特别是在变质粉砂岩和火山角砾岩交界处。图 8e 显示了 Y 方向的压缩应力，特别是在断裂带附近，表明该区域承受较大的水平方向压缩；而 Z 方向的正应力（图 8f），尤其在断裂带附近，表明该区域受到较大的垂直压缩。整体而言，这些应力分布图揭示了模型中的应力集中区域，尤其是断裂带附近，可能是热液流动、构造活动或其他动力学过程的热点区域，推动了局部的应力和变形。

剪切应力结果：主要包含 XYZ 三个不同平面的剪切应力结果图（图 8ghi）。根据三个方向的剪切应力分布图，断裂带和岩性交界处表现出显著的应力集中 XY 平面上的剪切应力，揭示了断裂带区域的强烈剪切作用，可能与断裂活动和地质构造的动力学过程相关；而 YZ 平面和 XZ 平面上的剪切应力，显示了在断裂带和岩性变化区的强烈剪切作用，表明这些区域受到了较大剪切力的影响，可能与断裂带的滑动和热液流动等因素相关。整体来看，这些应力分布揭示了断裂带及其周围区域的应力集中，可能与热液流动、构造变形及断裂带的活动密切相关。

体积应变增量：这张图展示了体积应变增量的分布，红色区域表示较大的体积变形，主要集中在断裂带和岩性交界处，说明这些区域发生了显著的变形（图 8j）。蓝色区域则表示体积变形较小，通常出现在较坚硬或应力较低的区域——如断裂通道整体为蓝色。整体来看，图中的体积应变增量反映了断裂带周围的强烈变形，可能与应力集中或流体活动有关。

（2）流体部分：

孔隙压力的图显示，断裂带区域的孔隙压力相对较低，而断裂两侧的火山角砾岩和变质粉砂岩区域的孔隙压力较高（图 8k）。这种分布表明，断裂带作为流体的通道，使得流体容易通过断裂带流动或逸出，从而导致该区域的孔隙压力较低。而在断裂两侧，由于这些区域的渗透率较低，流体流动受限，导致流体在孔隙中积聚，孔隙压力较高。尽管变质粉砂岩的孔隙度较低，但是其极低的渗透率 ($5.0e-17$) 使得流体几乎无法在其中流动和积聚，从而不利于成矿作用的发生，火山角砾岩则具有更高的孔隙度和较适中的渗透率 ($1.0e-15$)。虽然火山角砾岩的渗透率仍低于断裂区域，但相对较高的孔隙度使得流体能够在其中流动并积聚，促进了孔隙压力的增加。这种压力积聚有利于矿物质的迁移和沉淀。因此，成矿更容易

发生在火山角砾岩区域，因为其提供了较好的流体流动性和孔隙压力积聚条件。

(3) 热学部分：

图 81 显示，温度场主要受到深部持续热源的影响，虽然地温梯度对整体温度场的影响较小，但不同地质体类型中温度差异显著。模拟结果表明，围岩保持初期地温梯度，温度变化主要由深部热液流动驱动，特别是在断裂带区域。随着模拟的进行，热源逐渐以断裂带为中心向周围扩散，温度分布趋于均匀，但断裂带周围的温度显著升高，反映了深部热液流动的影响。这一过程可能促进围岩蚀变和矿体富集。总体而言，温度场的演化与应力场相互耦合，推动了热液流体的迁移和矿化过程，尤其是在断裂带周围的矿化富集现象。

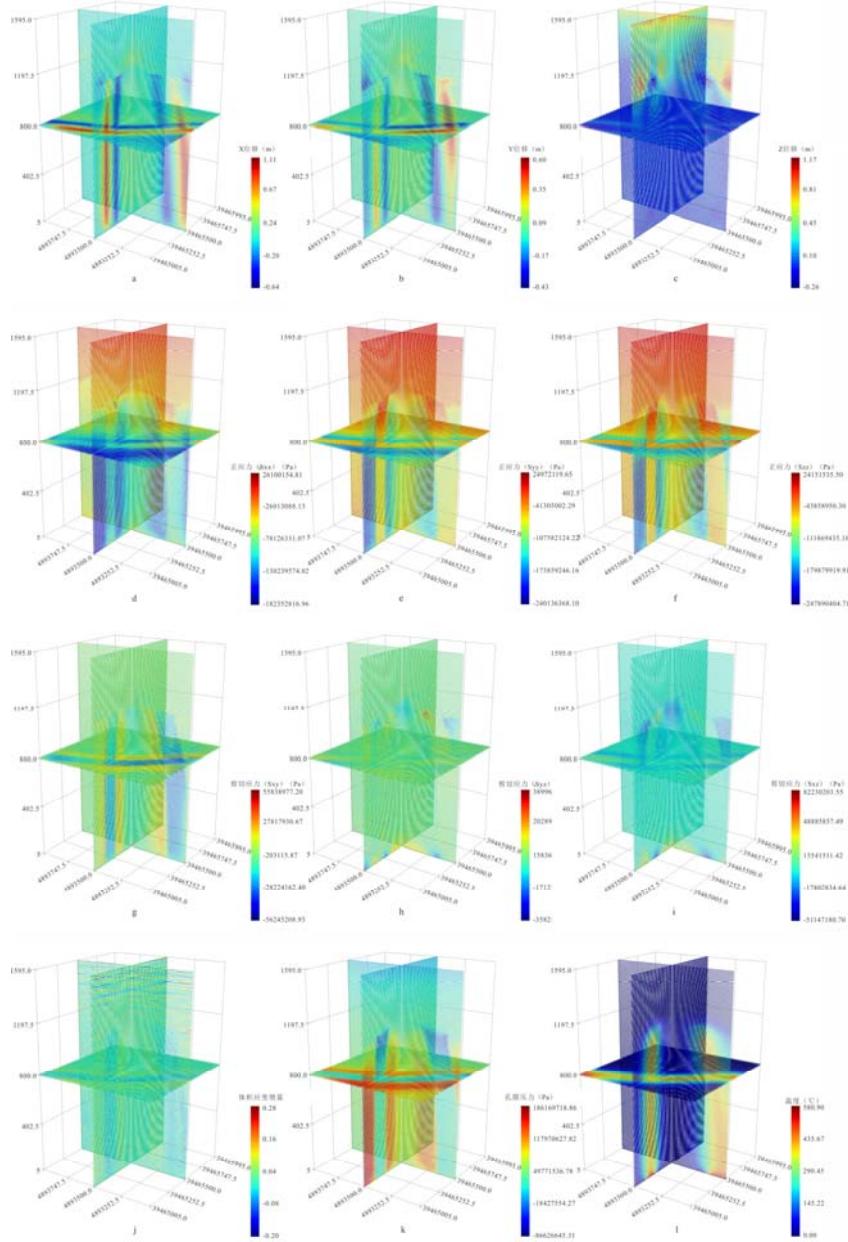


图 8 Flac^{3D} 模拟结果各条件三维可视化图 (a-l 分别为 X 位移、Y 位移、Z 位移、正应力 Sxx、正应力 Syy、正应力 Szz、剪切应力 Sxy、剪切应力 Syz、剪切应力 Sxz、体积应变增量、孔隙压力、温度)

Fig. 8 Three-Dimensional Visualization of Flac3D Simulation Results for Various Conditions (a-l represent X displacement, Y displacement, Z displacement, normal stress Sxx, normal stress Syy, normal stress Szz, shear

stress Sxy, shear stress Syz, shear stress Sxz, volumetric strain increment, pore pressure, and temperature)

3.3 成矿预测结果

3.3.1 预测信息提取

通过对研究区成矿地质条件、成矿数值模拟的分析，结合“三位一体”成矿预测理论（叶天竺 等, 2007; 叶天竺, 2013），笔者提出基于数值模拟的研究区找矿预测模型（表 2）。

表 2 毛登矿区铜锡矿“三位一体”找矿预测模型

Table 2 "Three-in-One" Mineral Prospecting Prediction Model for the Maodeng Copper-Tin Deposit

矿床 类型	三位一体	特征变量
	成矿地质体	火山角砾岩
	成矿构造和成矿结构面	断裂 F1
	热学	温度
热液		体积应变增量
型		位移三个方向分量
型	成矿作用特征标志	正应力三个方向分量
		剪切应力三个方向分量
	力学	
		孔隙压力、孔隙度
	流体	

除此以外，通过将研究区划分为 $10 \times 10 \times 10$ 的立方网格，共计网格单元为 160 万。根据显式建模结果，将矿体作为正样本（203 个），距离矿体 500m 外随机选择负样本（203 个）。

3.3.2 XGBoost 预测结果

在本研究中，使用 XGBoost 模型进行成矿预测，并通过优化超参数来提高模型的性能。经过调参，找到的最佳超参数组合为：`colsample_bytree = 0.7`、`gamma = 0.1`、`learning_rate = 0.05`、`max_depth = 2`、`n_estimators = 500` 和 `subsample = 0.8`。这些超参数的选择能够有效平衡模型的偏差和方差，从而提升预测的准确性。

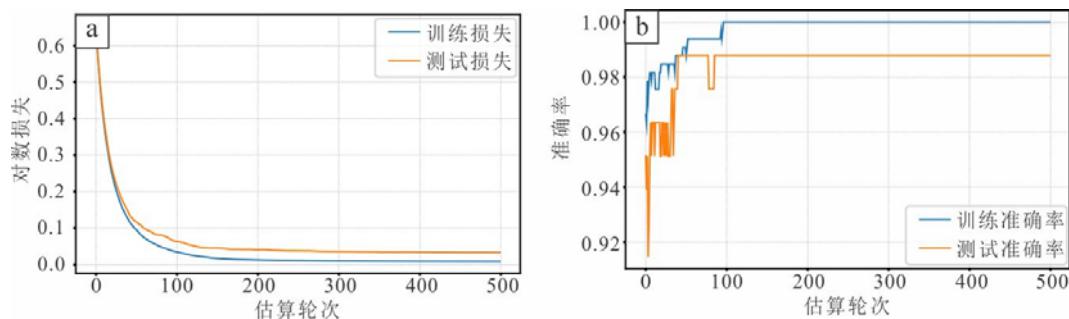


图 9 模型精确度和损失率曲线图 (a, 精确度曲线图; b, 损失率曲线图)

Fig. 9 Accuracy and Loss Rate Curves of the Model (a. Accuracy Curve; b. Loss Rate Curve)

根据损失函数图和精确度图（图 9），XGBoost 模型在训练过程中表现出显著的收敛趋势。在前 100 轮训练中，训练损失和测试损失快速下降，并在 100-200 轮之间趋于平稳，表示模型已经在这段时间内有效地学习到数据的特征，并开始稳定其性能。训练精度和测试精度也在前 100 轮内显著提高，最终在 200 轮后达到接近 100% 的精度，表明模型基本完成了学习过程，并且精度保持稳定。根据模型的曲线下面积（AUC）评估，最终模型在测试集上的 AUC 值达到了 99.26%，表明该模型具有极高的分类准确性和良好的泛化能力。

3.3.3 可解释性分析

SHAP (SHapley Additive exPlanations) 的核心思想确实源自于合作博弈论中的 Shapley 值。在合作博弈论中，Shapley 值被用来衡量每个参与者在合作中的贡献，从而确保收益的

公平分配。SHAP 将这种概念巧妙地引入到机器学习模型的解释中，用于量化每个特征对模型预测结果的贡献。通过 SHAP，我们能够为 XGBoost 中的每个预测提供一个精确的解释，展示每个特征对于预测结果的贡献程度。

根据 SHAP 值的分析结果，蜂窝图和条形图显示了各个特征对模型预测的影响程度（图 10）。在蜂窝图中，点的颜色代表特征值的高低，剪切应力 S_{xy} 、孔隙压力和温度是影响模型预测结果最重要的特征，其 SHAP 值分布广泛且较大，表明它们对成矿预测结果的影响最为显著。相较之下，渗透率、孔隙度和正应力 S_{zz} 等特征的 SHAP 值较小，表明它们对模型的贡献较低。

从条形图可以看出，剪切应力 S_{xy} 、孔隙压力和温度排名前列，具有最高的 SHAP 特征重要性，表明这些变量对模型的预测结果有较大影响。其他特征如 Z 位移、剪切应力 S_{xz} 和剪切应力 S_{yz} 在模型中也起到了一定的作用，但其影响力低于前三个特征。

总体而言，剪切应力 S_{xy} 、孔隙压力和温度是影响锡矿成矿预测的关键特征。这些特征与热液成矿过程密切相关，尤其是在火山角砾岩区域，较高的孔隙度和相对较低的渗透率有利于流体的积聚和孔隙压力的增加，为矿物的沉淀提供了理想条件。相比之下，虽然变质粉砂岩区域具有较高的孔隙度，但由于其极低的渗透率，流体流动受限，成矿作用较弱。总体来看，剪切应力 S_{xy} 、孔隙压力和温度在火山角砾岩区域的变化为锡矿富集提供了有利的成矿条件。

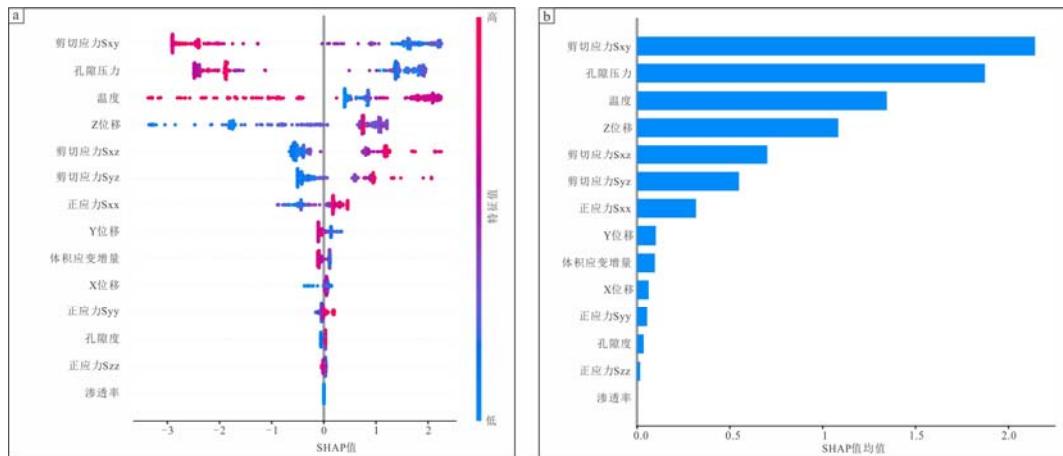


图 10 SHAP 解释图 (a, 蜂窝图; b, 条形图)

Fig. 10 SHAP Interpretation Plots (a. Hive Plot; b. Bar Plot)

3.3.4 预测靶区圈定

通过三维可视化结果，得到成矿概率图（图 11），结果显示，红色高概率区基本与断裂带的分布一致，并且该高概率区可以延伸至深部约 600 米左右。这表明，断裂带在成矿过程中起到了重要作用，流体可能沿断裂带迁移并富集矿物。同时，通过显示成矿概率在 95% 以上的范围，并将其与已知矿体（图 12）叠加，可以更直观地观察到成矿概率的空间分布。高概率区与已知矿体的重合情况良好，进一步验证了模型预测的可靠性和准确性。由此，圈定出两处靶区。为方便读者阅读，将靶区所在剖面进行切割展示，具体如图 13。

靶区I：该靶区位于 ZK16 和 ZK37 下方，钻孔最大深度为标高 1000m，而成矿概率图中的高概率区延伸至约标高 700m 深度（图 13a）。该区域的温度范围为 200°C 至 300°C，这为锡矿的热液成矿过程提供了理想的温度条件。靶区I的孔隙压力在 50 MPa 至 100 MPa 之间，流体在这些区域的积聚有助于矿物的沉淀。力学方面，靶区I的剪切应力约为 20 MPa，而体积应变增量为 0.05，表明该区域经历了较强的构造变形，可能促进了流体的上升和矿物质的沉淀。此外，靶区I内火山角砾岩区域的渗透率为 1.0×10^{-12} ，孔隙度为 0.15，这些值表明该区域具备较好的流体流动性和矿物质积聚条件。综合来看，靶区I在 700m 深度以内的成矿条

件非常有利，特别是断裂带附近的高孔隙压力和温度环境，使其成为成矿的优先靶区。

靶区II：该靶区位于ZK52下方，钻孔最大深度为标高1000m，而成矿概率图中的高概率区约为标高700m深度，位于研究区的最南部（图13b）。该区域的温度范围为180°C至270°C，虽然略低于靶区I，但仍处于锡矿热液成矿的适宜温度范围。靶区II的孔隙压力在40 MPa至90 MPa之间，流体积聚条件较为有利，特别是在靠近断裂带的区域。此外，靶区II的剪切应力约为15 MPa，应变增量为0.04，表明该区域存在一定的构造变形，可能促进了流体的上升和矿物质的沉淀。靶区II的火山角砾岩区域渗透率为5.0e-13，孔隙度为0.18，这些值说明该区域流体流动性较好，且能够支持成矿过程的流体迁移。综合来看，尽管靶区II位于研究区南部，但其适宜的温度、较高的孔隙压力和渗透率使其成为一个潜力较大的成矿靶区，尤其是在700m深度以内。

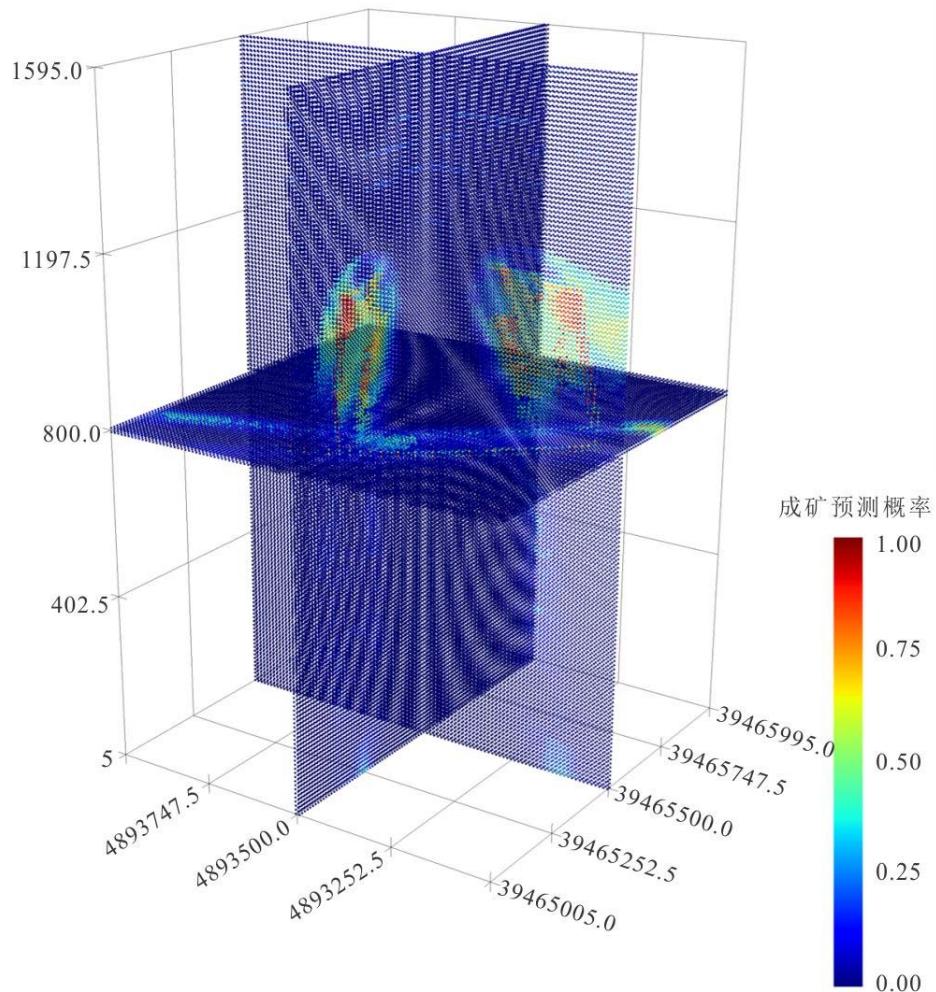


图 11 毛登矿区成矿概率图

Fig. 11 Mineralization Probability Map of the Maodeng Mining Area

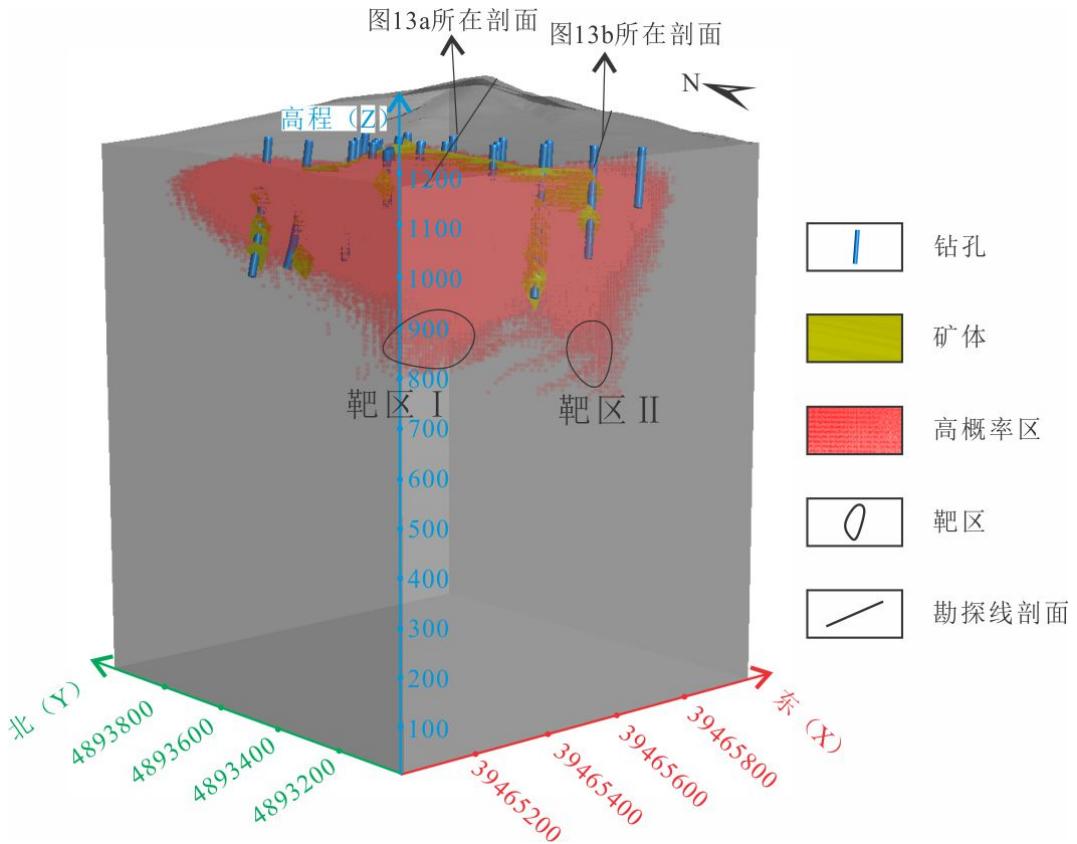


图 12 靶区划分图

Fig. 12 Target Area Division Map

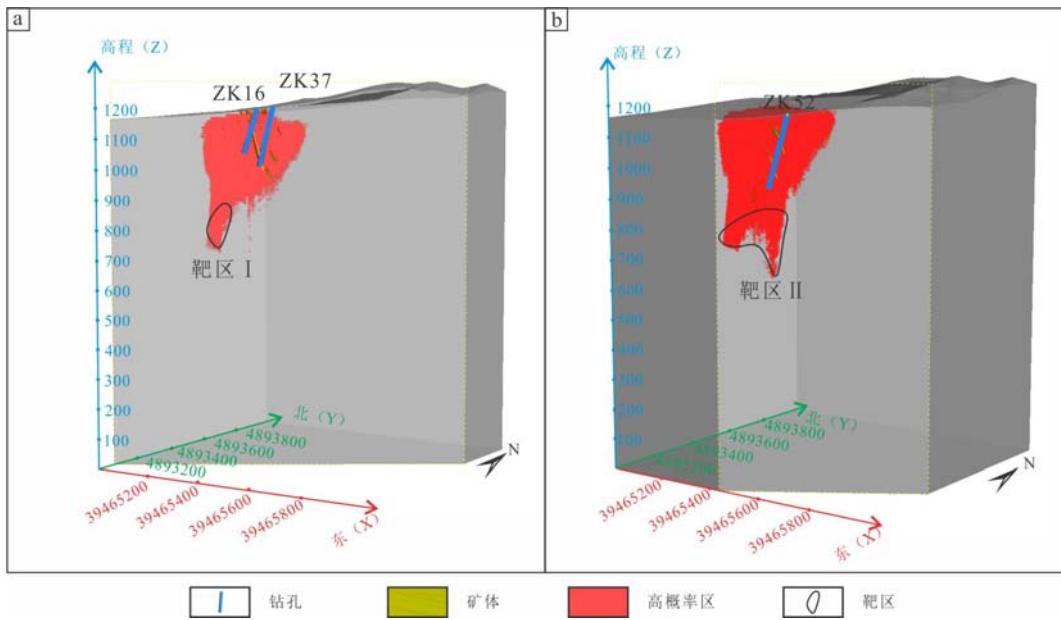


图 13 剖面靶区示意图 (a, 靶区 I 所在剖面; b, 靶区 II 所在剖面)

Fig. 13 Profile Target Area Schematic (a. Profile of Target Area I; b. Profile of Target Area II)

本文主要研究I号矿体的成矿预测，并结合季根源等（2022）的研究结果验证预测的可靠性。季根源在论文中表示，在毛登矿区的II号矿体上，218号勘探线剖面显示，700m以下的深度主要为花岗岩层，该花岗岩层被认为是主要的成矿热液来源（图 14）。由于II号矿体和I号矿体水平距离约为800m（图 2），因此可以推断，I号矿体下方的花岗岩层大致也位于

700m 深度, 成为潜在的热源。此外, 本文的成矿预测结果显示, I号矿体的高概率区正好位于 700m 标高处, 这与 II 号矿体的热源深度一致, 进一步支持了 700m 深度作为热源的位置。因此, 通过这种推断和对比, 本文的成矿预测结果具有较高的可靠性。

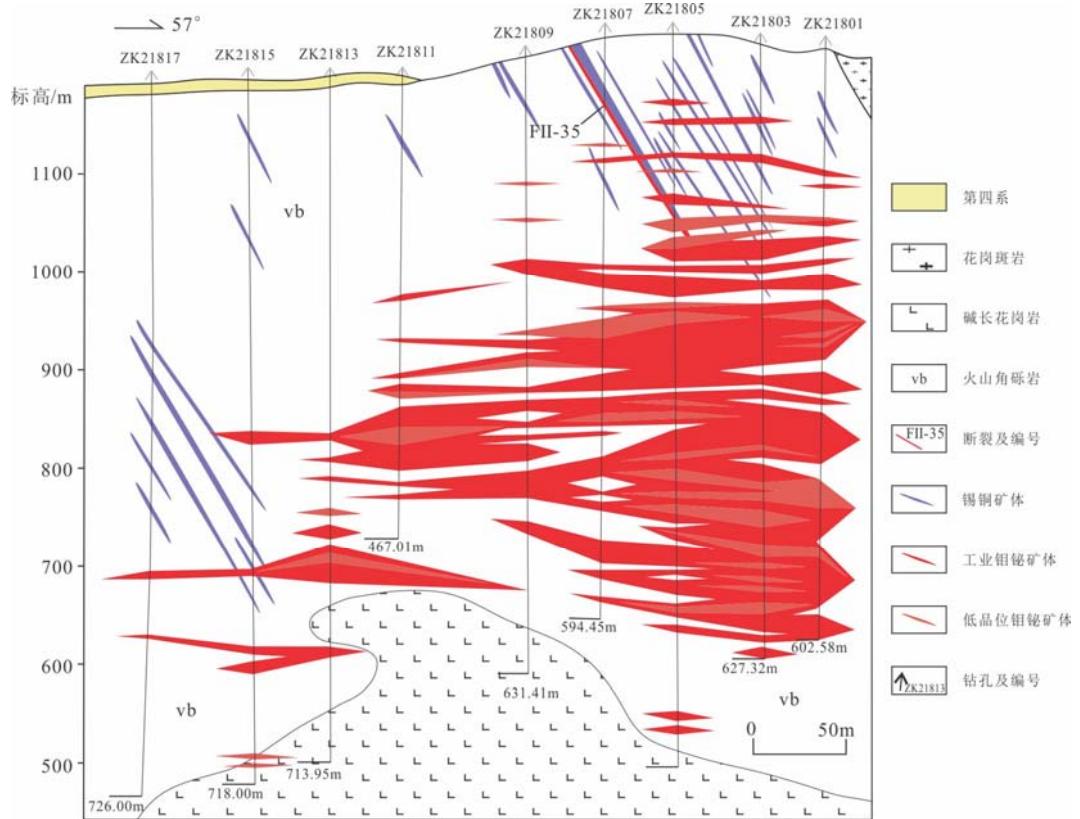


图 14 毛登矿床 218 号勘探线剖面图 (据 (季根源 等, 2022) 修改)

Fig. 14 Profile of Exploration Line 218 of the Maodeng Deposit

4 结论

本文基于显式建模与隐式建模相结合建立毛登矿区三维地质模型, 并利用数值模拟技术进行成矿模拟, 最后结合 XGBoost 模型在研究区开展了靶区优选工作, 取得了以下结论。

(1) 本研究基于显式与隐式建模融合技术, 构建了毛登矿区的高精度三维地质模型。该模型不仅精确复原了矿体、赋矿地层及控矿断裂的三维几何形态, 更深刻揭示了深部隐伏岩浆岩 (源)、北西向断裂系统 (运) 与脆性围岩 (储) 之间的空间耦合关系。这一精细的地质格架为后续开展成矿动力学数值模拟提供了精确的几何约束与物理边界基础。

(2) 物理场与成矿的耦合机制研究表明, 剪切应力、孔隙压力和温度在空间上的特定组合指示了有利的成矿环境: 断裂带的剪切应力集中诱发了岩石扩容, 为成矿提供了运移通道与储矿空间; 高孔隙压力梯度揭示了流体向低压区运移的驱动机制; 而模拟显示的 200~300°C 温度分布区与高成矿概率区在空间上高度重合, 这一物理特征与该类型矿床成矿所需的热力学背景相一致。SHAP 分析证实, 这些反映成矿动力学过程的物理参数对预测模型具有显著贡献, 验证了“物理驱动”预测的有效性。

(3) 本研究成功将成矿过程的数值模拟与机器学习算法 (XGBoost) 结合, 获得了更高的预测准确性, 特别是在深部矿体的预测方面。通过模拟矿区的应力、温度和流体运移过程, 结合 XGBoost 模型, AUC 值达到 99.26%, 显示出优异的预测性能, 最终圈定出两处找矿靶区。

总体而言, 本文的研究方法通过结合三维地质建模、成矿过程数值模拟和机器学习, 显

著提高了矿体预测的精度和深度，为类似成矿条件的矿区提供了新的思路和技术支持。

附加材料：附表/附图由作者提供，数据真实性由作者负责。

利益冲突声明：本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

作者贡献声明：孙会玲负责论文的研究方法、软件应用、原创写作和资助；唐瑞参与了研究方法、软件应用、原创写作、论文修改以及绘图；肖克炎负责了论文指导；李杨参与了软件应用和论文修改；赵静参与了软件应用；张彤负责了研究方法和论文指导；赵婧、李耀永、陈江均、闫瑞花、佟卉、安艳丽和白立兵参与了论文的修改及绘图工作。所有作者均已阅读并同意最终稿件的提交。

5 参考文献

- An, W.T., Chen, J.P., Zhu, P.F. 2021. A two-way forecasting method based on numerical simulation of mineralization process for the prediction of concealed ore deposits. *Earth Science Frontiers*, 28(3): 97-111 (in Chinese with English abstract).
- Carranza, E.J.M., 2017. Natural resources research publications on geochemical anomaly and mineral potential mapping, and introduction to the special issue of papers in these fields. *Natural Resources Research*, 26(4): 379-410.
- Chen G, Wu G, Li T, et al., 2021. Mineralization of the Daolundaba Cu-Sn-W-Ag deposit in the southern Great Xing'an Range, China: Constraints from geochronology, geochemistry, and Hf isotope. *Ore Geology Reviews*, 133: 104117.
- Chen, J.P., Lv, P., Wu, W., et al., 2007. A 3D method for predicting blind orebodies, based on a 3D visualization model and its application. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 054-062 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J.P., Shi, R., Wang, L.M., et al., 2012a. 3D metallogenic prediction for western section of Q8 gold deposit in Tongguan County of Shaanxi based on digital mineral deposit model. *Journal of Geology*, 36(3): 237-242 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J.P., Wang, C.N., Shang, B.C., et al., 2012b. Three-Dimensional Metallogenic Prediction in Yongmei Region Based on Digital Ore Deposit Model. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 29(6): 14-20 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J.P., Yan, Q., Shang, B.C., et al., 2012c. On 3D prediction of lead-zinc deposit in Huangshaping ore district in Hunan. *Journal of Geology*, 36(3): 243-249 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J.P., Yu, P.P., Shi, R., et al., 2014. Research on three dimensional quantitative prediction and evaluation methods of regional concealed ore bodies. *Earth Science Frontiers*, 21(5): 211-220 (in Chinese with English abstract).
- Deng, Y.X., 2013. Study on Hydrocarbon Generation Mechanism and Its Controlling Factor on Hydrocarbon Accumulation in Baiyinchagan Depression, Erlian Basin (Dissertation). Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Gao, M., Wang, G.W., Tang, D.M., 2025. Three-dimensional mineral prospectivity mapping and uncertainty evaluation in the Kalatongke copper-nickel district, Xinjiang, China. *Earth Science Frontiers* (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2025.4.2>.
- Guo, S., He, P., Zhang, X.B., et al., 2019. Geochronology and geochemistry of Maodeng-Xiaogushan tin-polymetallic ore-field in southern Da Hinggan Mountains and their geological significances. *Mineral Deposits*, 38(3): 509-525 (in Chinese with English abstract).
- Hu, X., Li, X., Yuan, F., et al., 2020. Numerical modeling of ore-forming processes within the Chating Cu-Au porphyry-type deposit, China: Implications for the longevity of hydrothermal systems and potential uses in mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 116(000): 16.
- Ji, G.Y., Jiang, S.H., Li, G.F., et al., 2021a. Metallogenetic Control of Magmatism on the Maodeng Sn-Cu Deposit in the Southern Great Xing'an Range: Evidence from Geochronology, Geochemistry, and Sr-Nd-Pb Isotopes. *Geotectonica et Metallogenica*, 45(4): 681-704 (in Chinese with English abstract).
- Ji, G.Y., Jiang, S.H., Zhang, L.S., et al., 2021b. Petrogenic and metallogenic significance of Alubaogeshan granite in Maodeng deposit of southern Da Hinggan Mountains: Evidence from mineralogy of zircon, amphibole and biotite. *Mineral Deposits*, 40(3): 449-474 (in Chinese with English abstract).
- Ji, G.Y., Jiang, S.H., Zhang, L.S., et al., 2022. Chronology and geochemical characteristics of the highly fractionated alkali feldspar granite from the Maodeng deposit in the southern Great Xing'an Range. *Acta Petrologica Sinica*, 38(3): 855-882 (in Chinese with English abstract).
- Li C, Xiao K, Sun L, et al., 2024. CNN-Transformers for mineral prospectivity mapping in the Maodeng-Baiyinchagan area, Southern Great Xing'an Range. *Ore Geology Reviews*, 167: 106007.
- Li X C, Zhou M F, Williams-Jones A, et al., 2019. Timing and genesis of Cu-(Au) mineralization in the Khetri Copper Belt, northwestern India: constraints from in situ U-Pb ages and Sm-Nd isotopes of monazite-(Ce). *Mineralium Deposita*, 54(4): 553-568.
- Li, Z.K., Zhou, Z., Tang, X.F., et al., 2009. stability analysis and considerations of underground powerhouse caverns group of jinping I hydropower station. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28(11): 2167-2175 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z.S., Liu, Z.G., 2019. Feature selection algorithm based on XGBoost. *Journal on Communications*, 40(10): 101-108 (in Chinese with English abstract).
- Liu, R.L., Wu, G., Li, T.G., et al., 2018. LA-ICP-MS cassiterite and zircon U-Pb ages of the Weilasituo tin-polymetallic deposit in the southern Great Xing'an Range and their geological significance. *Earth Science Frontiers*, 25(5): 183-201 (in Chinese with English abstract).

- Mao, J.W., Xie, G.Q., Zhang, Z.H., et al., 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 169-188 (in Chinese with English abstract).
- Mao, X.C., 2006. Research on 3D Digital Deposit and Stereo Quantitative Prediction of Concealed Ore Body (Dissertation). Changsha: Central South University (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 Challenge. *Earth Science*. <https://link.cnki.net/urlid/42.1874.p.20251106.1507.005> (in Chinese with English abstract).
- Mao, X.C., Zhang, M.M., Deng, H., et al., 2016. Three-dimensional visualization prediction method for concealed ore bodies in deep mining areas. *Journal of Geology*, 40(3): 363-371 (in Chinese with English abstract).
- Oliver, N.H.S., McLellan, J.G., Hobbs, B.E., et al., 2006. 100th Anniversary Special Paper: Numerical models of extensional deformation, heat transfer, and fluid flow across a basement-cover interface during basin-related mineralization. *Economic Geology*, 101(1): 1-31.
- Ord, A., Hobbs, B.E., Zhang, Y., et al., 2015. Geodynamic modelling of the Century deposit, Mt Isa Province, Queensland. *Journal of the Geological Society of Australia*, 49(6): 1011-1039. DOI:10.1046/j.1440-0952.2002.00968.x.
- Ouyang H.G., Li, R.H., Zhou, Z.H., 2016. The Jurassic Mineralization of the Shuangjianzisha Ag-polymetallic Deposit and its Significance in Prospecting: Evidence from Geochronology. *Acta Geologica Sinica*, 90(8): 1835-1845 (in Chinese with English abstract).
- Teng, J.W., Xue, G.Q., Song, M.C., 2022. Theory on exploring mineral resources in the second deep space and practices with electromagnetic method. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(10): 3975-3985 (in Chinese with English abstract).
- Xiao F., Chen X., Cheng Q., 2024. Combining numerical modeling and machine learning to predict mineral prospectivity: A case study from the Fankou Pb-Zn deposit, southern China. *Applied Geochemistry*, 160: 105857.
- Xiao, K.Y., Li, N., Sun, L., et al., 2012. Large scale 3D mineral prediction methods and channels based on 3D information technology. *Journal of Geology*, 36(3): 229-236 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, K.Y., Lou, D.B., Sun, L., et al., 2012. Some Progresses of Mineral Prediction Theory and Method in Important Mineral Resource Potential Assessment of China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(4): 1073-1082 (in Chinese with English abstract).
- Y. S. Touloukian, 1990. Physical Properties of Rocks and Minerals. Beijing: Petroleum industry press (in Chinese).
- Yao, L., Lv, Z.C., Ye, T.Z., et al., 2017. Zircon U-Pb age, geochemical and Nd-Hf isotopic characteristics of quartz porphyry in the Baiyinchagan Sn polymetallic deposit, Inner Mongolia, southern Great Xing'an Range, China. *Acta Petrologica Sinica*, 33(10): 3183-3199 (in Chinese with English abstract).
- Ye, T.Z., 2013. Theoretical Framework of Methodology of Deposit Modeling and Integrated Geological Information for Mineral Resource Potential Assessment. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(4): 1053-1072 (in Chinese with English abstract).
- Ye, T.Z., Xiao, K.Y., Yan, G.S., 2007. Methodology of deposit modeling and mineral resource potential assessment using integrated geological information. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 11-19 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, F., Li, X.F., Tian, W.D., et al., 2024. Key issues in three-dimensional predictive modeling of mineral prospectivity. *EarthScience Frontiers*, 31(4): 119-128 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, F., Li, X.F., Zhang, M.M., et al., 2014. research progress of 3d prospectivity modeling. *Gansu Geology*, 27(1): 32-36 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, F., Li, X.F., Zhang, M.M., et al., 2014. Three Dimension Prospectivity Modelling Based on Integrated Geoinformation for Prediction of Buried Orebodies. *Acta Geologica Sinica*, 88(4): 630-643 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, F., Zhang, M.M., Li, X.F., et al., 2019. Prospectivity modeling: From two-dimension to three-dimension. *Acta Petrologica Sinica*, 35(12): 3863-3874 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M.G., Wu, F.Y., Hu, R.Z., et al., 2019. Critical metal mineral resources: current research status and scientific issues. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 33(2): 106-111 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q., Chen J., Xu H., et al., 2022. Three-Dimensional Mineral Prospectivity Mapping by XGBoost Modeling: A Case Study of the Lannigou Gold Deposit, China. *Natural Resources Research*, 31(3): 1135-1156.
- Zhang, X.N., Zhang, Y.F., Peng, R., et al., 2025. Whole-rock Geochemistry, Zircon U-Pb Ages, and Hf Isotopic Characteristics of Ore-related Intrusions of the Tin Polymetallic Deposits in the Southern Great Xing'an Range and Their Geological Significance: Case Studies of the Bianjiadayuan, Maodeng, and Baogaigou Deposit. *Acta Geoscientica Sinica*, 46(2): 343-360 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z., Wang G., Carranza E J M., et al., 2024. An Uncertainty-Quantification Machine Learning Framework for Data-Driven Three-Dimensional Mineral Prospectivity Mapping. *Natural Resources Research*, 33(4): 1393-1411.
- Zhao, J.S., Cao, Y., Zhang, J., et al., 2025. Polymetallic mineralization model of copper and tin in the Maodeng area of the Daxing'anling metallogenic belt. *Geological Review*, 71(S1): 121-123 (in Chinese with English abstract).
- Zhou G., Chen J., An W., et al., 2024. Three-dimensional mineral prospectivity mapping based on natural language processing and random forests: A case study of the Xiyu diamond deposit, China. *Ore Geology Reviews*, 169: 106082.
- Zhou, J.T., Yu, W.C., Du, Y.S., et al., 2025. Occurrence forms of rare earth elements in aluminum-bearing rock series in China: ensemble machine learning analysis driven by major element data. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 27(2): 307-320 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J., Mu, K.D., Zhang, Y.F., et al., 2025. Inversion of hydrogeological parameters of landslides in water-richcoal-bearing strata based on numerical simulation. *Earth Science*. <https://link.cnki.net/urlid/42.1874.P.20251111.1413.013> (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 安文通, 陈建平, 朱鹏飞, 2021. 基于成矿过程数值模拟的隐伏矿双向预测研究. 地学前缘, 28(3): 97-111.
- 陈建平, 吕鹏, 吴文, 等, 2007. 基于三维可视化技术的隐伏矿体预测. 地学前缘, 14(5): 54-62.
- 陈建平, 史蕊, 王丽梅, 等, 2012a. 基于数字矿床模型的陕西潼关县 Q8 号金矿脉西段三维成矿预测. 地质学刊, 36(3): 237-242.
- 陈建平, 王春女, 尚北川, 等, 2012b. 基于数字矿床模型的福建永梅地区隐伏矿三维成矿预测. 国土资源科技管理, 29(6): 14-20.
- 陈建平, 严琼, 尚北川, 等, 2012c. 湖南黄沙坪地区铅锌矿床三维预测研究. 地质学刊, 36(3): 243-249.
- 陈建平, 于萍萍, 史蕊, 等, 2014. 区域隐伏矿体三维定量预测评价方法研究. 地学前缘, 21(5): 211-220.
- 邓已寻, 2013. 二连盆地白音查干凹陷成烃机理及其对成藏控制作用的研究(博士学位论文). 北京: 中国地质大学(北京).
- 高猛, 王功文, 唐冬梅, 2025. 新疆喀拉通克铜镍矿集区三维成矿预测与不确定性评价. 地学前缘. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2025.4.2>.
- 郭硕, 何鹏, 张学斌, 等, 2019. 大兴安岭南段毛登-小孤山锡多金属矿田年代学、地球化学特征及其地质意义. 矿床地质, 38(3): 509-525.
- 季根源, 江思宏, 李高峰, 等, 2021a. 大兴安岭南段毛登 Sn-Cu 矿床岩浆作用对成矿制约: 年代学、地球化学及 Sr-Nd-Pb 同位素证据. 大地构造与成矿学, 45(4): 681-704.
- 季根源, 江思宏, 张龙升, 等, 2021b. 大兴安岭南段毛登矿区阿鲁包格山岩体成岩成矿意义——锆石、角闪石和黑云母矿物学证据. 矿床地质, 40(3): 449-474.
- 季根源, 江思宏, 张龙升, 等, 2022. 大兴安岭南段毛登高分异碱长花岗岩成岩时代与地球化学特征. 岩石学报, 38(3): 855-882.
- 李占山, 刘兆庚, 2019. 基于 XGBoost 的特征选择算法. 通信学报, 40(10): 101-108.
- 李仲奎, 周钟, 汤雪峰, 等, 2009. 锦屏一级水电站地下厂房洞室群稳定性分析与思考. 岩石力学与工程学报, 28(11): 2167-2175.
- 刘瑞麟, 武广, 李铁刚, 等, 2018. 大兴安岭南段维拉斯托锡多金属矿床 LA-ICP-MS 锆石和锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地学前缘, 25(5): 183-201.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等, 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景. 岩石学报, 21(1): 169-188.
- 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. <https://link.cnki.net/urlid/42.1874.p.20251106.1507.005>.
- 毛先成, 张苗苗, 邓浩, 等, 2016. 矿区深部隐伏矿体三维可视化预测方法. 地质学刊, 40(3): 363-371.
- 欧阳荷根, 李睿华, 周振华, 2016. 内蒙古双尖子山银多金属矿床侏罗纪成矿的年代学证据及其找矿意义. 地质学报, 90(8): 1835-1845.
- 滕吉文, 薛国强, 宋明春, 2022. 第二深度空间矿产资源探查理念与电磁法找矿实践. 地球物理学报, 65(10): 3975-3985.
- 周洁, 穆康帝, 张玉芳, 等, 2025. 基于数值模拟的富水煤系地层滑坡水文地质参数反演. 地球科学. <https://link.cnki.net/urlid/42.1874.P.20251111.1413.013>.
- 肖克炎, 李楠, 孙莉, 等, 2012. 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. 地质学刊, 36(3): 229-236.
- 肖克炎, 娄德波, 孙莉, 等, 2013. 全国重要矿产资源潜力评价一些基本预测理论方法的进展. 吉林大学学报(地球科学版), 43(4): 1073-1082.
- 姚磊, 吕志成, 叶天竺, 等, 2017. 大兴安岭南段内蒙古白音查干 Sn 多金属矿床石英斑岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学和 Nd-Hf 同位素特征及地质意义. 岩石学报, 33(10): 3183-3199.
- 叶天竺, 2013. 矿床模型综合地质信息预测技术方法理论框架. 吉林大学学报(地球科学版), 43(4): 1053-1072.
- 叶天竺, 肖克炎, 严光生, 2007. 矿床模型综合地质信息预测技术研究. 地学前缘, 14(5): 11-19.
- Y. S. Touloukian, 1990. 岩石与矿物的物理性质[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 袁峰, 李晓晖, 田卫东, 等, 2024. 三维成矿预测关键问题. 地学前缘, 31(4): 119-128.
- 袁峰, 李晓晖, 张明明, 等, 2014. 隐伏矿体三维综合信息成矿预测方法. 地质学报, 88(4): 630-643.
- 袁峰, 李晓晖, 张明明, 等, 2018. 三维成矿预测研究进展. 甘肃地质, 27(1): 32-36.
- 袁峰, 张明明, 李晓晖, 等, 2019. 成矿预测: 从二维到三维. 岩石学报, 35(12): 3863-3874.

- 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 等. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题. 中国科学基金, 2019, 33(2): 106-111.
- 张雪旎, 张宇飞, 彭蓉, 等, 2025. 大兴安岭南段锡多金属矿床成矿岩体全岩地球化学、锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义——以边家大院、毛登、宝盖沟矿床为例. 地球学报, 46(2): 343-360.
- 赵胜金, 曹毅, 张璟, 等, 2025. 大兴安岭成矿带毛登地区铜锡多金属成矿模式. 地质论评, 71(S1): 121-123.
- 周锦涛, 余文超, 杜远生, 等, 2025. 中国含铝岩系中稀土元素的赋存形式: 主量元素数据驱动的集成机器学习分析. 古地理学报, 27(2): 307-320.