doi: 10.11720/wtyht.2026.1299
黄凯, 农观海, 邓耀辉, 等. 基于地物化多元勘查要素的隐式三维建模与深部成矿预测——以黔西北某铅锌矿区为例[J]. 物探与化探, 2026, 50(5): 846-855. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1299
Huang K, Nong G H, Deng Y H, et al. Implicit 3D modeling and deep mineralization prediction based on geological-geophysical-geochemical exploration data: A case study of a lead-zinc deposit in the northwestern Guizhou region, China[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(5): 846-855. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1299

基于地物化多元勘查要素的隐式三维建模与深部成矿预测
——以黔西北某铅锌矿区为例

黄凯, 农观海, 邓耀辉, 卢卯
(贵州省有色金属和核工业地质勘查局 地质矿产勘查院, 贵州 贵阳 550005)

摘 要: 滇东北—黔西北地区是我国重要的铅锌多金属矿产区, 在本地区发现了多个大型、超大型铅锌多金属矿床, 深部展现了良好的找矿前景。针对深部找矿投入大、风险高、难度大的特点, 以黔西北某矿区为研究对象, 融合地质、物探和化探资料进行隐式三维建模, 并对该矿区深部进行成矿预测。方法如下: ①利用地球物理反演技术和空间插值方法对音频大地电磁测深和激电测深进行三维建模, 获得电阻率和极化率模型; ②根据钻孔数据和成矿地质特征, 利用机器学习 K-means 聚类构建地层模型, 根据断层的地表产状, 并结合音频大地电磁测深构建断层模型; ③基于电阻率模型、地层模型和断层模型, 利用成矿条件分析法进行三维成矿预测, 圈定深部找矿靶区, 指导深部钻孔布设。经钻孔工程验证, 所圈定靶区切实可靠。基于地物化的隐式三维建模可充分利用已知数据预测未知区域, 为隐式三维建模提供充足的样本, 有利于在现有工作条件下构建更高精度的地质模型, 进而为覆盖区找矿和老矿山深边部增储找矿预测提供参考。

关键词: 地物化; 隐式三维建模; 深部成矿预测; 黔西北
中图分类号: P631; P632 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)05-0846-10

0 引言

滇东北—黔西北地区位于小江断裂带、垭都—蟒东断裂带和师宗—弥勒断裂带这三大断裂带围成的三角区域内[1], 该区域地质环境复杂, 构造呈多期叠加特征, 成矿动力学机制复杂, 成矿地质条件优越, 目前发现了多个大型、超大型铅锌多金属矿床。矿体主要受断层和地层控制, 在倾向上具有尖灭—再现特征[2-6]。随着浅部矿产开采殆尽, 老矿山的深边部是否存在新的矿体? 覆盖区下能不能发现新的矿体? 这些问题引起了新的研究热潮。前人总结了本区的“多层赋矿”特点: 基于蚀变碳酸盐岩+碎屑岩建造的岩石组合规律、有利的配矿构造与容矿构造复合部位, 以及发育黄铁矿化、方解石化和白云石化蚀变区有利的成矿标志, 并据此开展深部找矿预测[7], 也有通过地质+地球物理资料的方法进行深部找矿预测[8], 均取得了一定的效果。但是, 基于二维资料的成矿预测因受限于前期工作程度, 预测精度有限。

20 世纪 90 年代, Houlding[9] 依托于计算机技术提出了地质三维建模, 将地层和构造的空间分布、结构及其相互关系以三维形式展现。经过不断的理论更新以及计算机技术的进步, 如今三维建模已发展出显示建模和隐藏式建模, 能够模拟地质体的表面

收稿日期: 2025-08-22; **修回日期**: 2025-12-15
基金项目: 贵州省找矿突破战略行动重大协同创新项目(黔科合战略找矿 [2022]ZD004); 贵州省有色金属和核工业地质勘查局科研项目(GZYSKY2024-44); 贵州省科技重大专项(黔科合重大 [2026]004)
第一作者: 黄凯(1992-), 男, 高级工程师, 主要从事地球物理勘查与研究工作。Email: 568156220@qq.com
通讯作者: 农观海(1985-), 男, 高级工程师, 从事地球物理勘查与研究工作。Email: 328568371@qq.com

构造及其内部物性特征[10-13], 在资源评估、矿床预测等方面提供了更可靠的依据, 提高了勘探开发的效益和成功率[14-15]。

本文收集了黔西北某矿区的地物化资料, 构建了电阻率、地层和断层等多个三维模型, 利用成矿分析法圈定深部找矿靶区, 指导深部钻孔布设。经钻孔工程验证, 所圈定靶区可靠。

1　地质背景

研究区位于贵州省毕节市赫章县, 大地构造位于扬子陆块西南缘、特提斯—喜马拉雅构造域与滨太平洋构造域两大构造单元结合部位, 鄂湘渝黔前陆褶断冲断带六盘水裂陷槽内。在区域上位于丫都蟒洞断裂带中段, 在综合地层划归上属于上扬子地层分区中的黔西北地层小区, 碳酸盐岩建造为区内主要含矿岩系的岩石建造[16-18]。

研究区地层(图 1)从老到新有志留系韩家店组(S_1h), 泥盆系望城坡组(D_3w)、尧梭组(D_3y), 石炭系旧司组(C_1j)、上司组(C_1s)、摆佐组(C_1b)、黄龙组(C_2h)、马平组(C_2m), 二叠系梁山组(P_2l)、栖霞组(P_2q)、茅口组(P_2m)、峨眉山玄武岩组($P_{2\text{-}3}em$)及第四系(Q)。S_1h 地层岩性主要为泥岩、粉砂质泥岩和石英砂岩, D_3w 地层岩性主要为细晶白云岩和白云质灰岩, D_3y 地层岩性主要为粗晶白云岩和白云质灰岩, C_1j 地层岩性主要为泥晶灰岩, C_1s 地层岩性主要为灰岩, C_1b 地层岩性主要为粗晶白云岩, C_2h 地层岩性主要为灰岩和白云质灰岩, C_2m 地层岩性主要为灰岩, P_2l 地层岩性主要为黏土岩、炭质页岩和石英砂岩, P_2q 地层岩性主要为生物碎屑灰岩和泥晶灰岩, P_2m 地层岩性主要为燧石灰岩, $P_{2\text{-}3}em$ 岩组岩性为玄武岩。区内构造主要为 NW 向断裂带(图 1), 其次为一系列 NE 向和 SN 向的横断层。丫都—蟒洞断裂带在区内由一系列走向 NW、倾向 SW 的叠瓦状冲断层及其间强烈变形的推覆体构成复杂的逆冲推覆构造组成, 其中与区内铅锌矿成矿密切相关的断层主要是 F_1、F_2, 矿体主要分布于 NW 向断裂及其次级构造破碎带内。主要赋矿围岩为中二叠统栖霞组中的生物灰岩与泥晶灰岩, 次要围岩为下石炭统摆佐组的粗晶白云岩以及泥盆系望城坡组—尧梭组白云岩、白云质灰岩[19-20]。

2　多元勘查要素隐式三维地质建模

2.1　建模方法与步骤

在三维显示建模的基础上发展起来的三维隐式建模, 除了可以充分利用已知区域的地质资料, 还可以融入物探、化探和遥感等数据, 加入多元的地学信

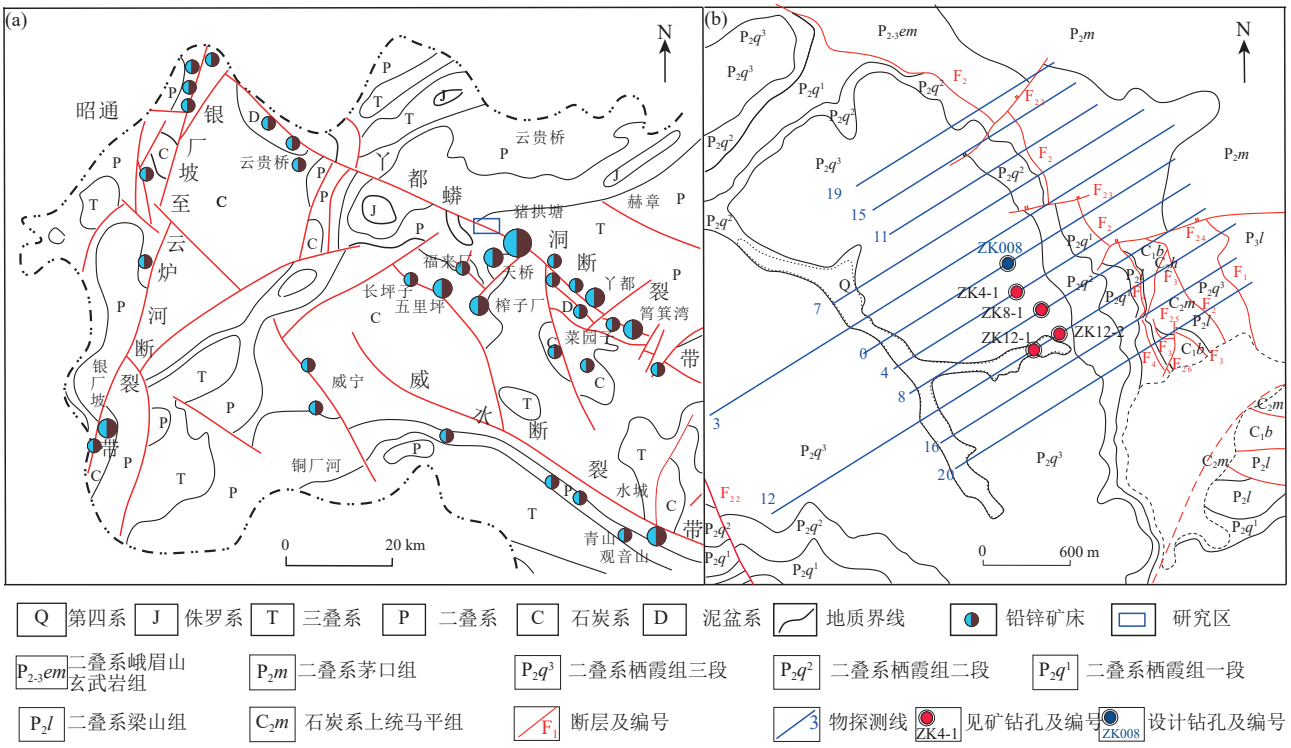


图 1　研究区区域地质简图(a)及测线布置(b)

Fig. 1　Geological of the study area (a) and schematic layout of survey lines (b)

息，其基于空间插值计算方法的三维地质建模可以用来开展研究区的找矿评价和深部预测工作，而且，随着勘查工作或研究程度的不断加深，还能够快速重建三维地质模型。

该区以往的深部矿产勘查主要以二维方式进行，但以单一的地质、物探或化探为基础指导矿区深部找矿的工作方法已无法满足复杂地质情况的需要。本次工作融合了地质、物探、化探等信息，基于电阻率模型、地层模型和断层模型，利用成矿条件分析法进行三维成矿预测，圈定深部找矿靶区，指导深部钻孔布设。

在隐式三维地质建模过程中，空间插值方法是非常关键的技术。本文利用 K-means 聚类构建地层模型，主要是根据样本之间的距离来判断样本间的相似度，距离越小相似度越大，聚为一类的可能性就越大。欧式距离常用来判断样本的相似度 [21-23]，从而区分不同地质体 [24]。

通过多年的发展，国内外都有很多可以开展三维建模的软件，如 GeoModeller、GeoIPAS 和北京浩拓地球物理软件等，其中，GeoModeller 软件可以基于多种数据源进行隐式三维地质建模 [25-26]。本文基于该软件开展了不同地学信息的三维地质建模，步骤如下：①利用地球物理反演技术和空间插值方法，对音频大地电磁测深和激电测深结果进行三维建模，获得电阻率和极化率模型；②根据钻孔数据和成矿地质特征，利用机器学习 K-means 聚类构建地层模型[11,27]，根据断层的地表产状并结合音频大地电磁测深结果构建断层模型；③基于电阻率模型、地层模型和断层模型，利用成矿条件分析法进行三维成矿预测，圈定深部找矿靶区，指导深部钻孔布设。

2.2 地球物理建模

2.2.1 矿区岩矿（石）电性特征

采集了研究区主要的岩矿石标本进行电阻率（ρ）和极化率（η）测量，结果见表 1。岩矿石电阻率由高到低依次为：灰岩（白云岩、石英砂岩）、玄武岩、黄铁矿、炭质页岩和硫化铅锌矿，表明硫化铅锌矿与围岩（灰岩、白云岩）电阻率物性差异明显。而黄铁矿和硫化铅锌矿的极化率值均较高（25.5%、18.92%），其他岩石的极化率均为 1% 左右或低于 1%，玄武岩的极化率最低，平均值为 0.44%。硫化铅锌矿与黄铁矿极化率特征基本相似，但电阻率相差一个数量级。

表 1 研究区岩矿石电性参数统计

Table 1 Statisticals of electrical parameters of rock and ore in the study area

层位	岩（矿）石	标本数	η/%		ρ/(Ω·m)	
			变化范围	均值	变化范围	均值
C_1b	白云岩	15	0.44～1.85	0.97	7 550～38 103	20 744
C_2m	灰岩	30	0.21～1.60	0.69	2 944～80 294	26 835
P_2l	石英砂岩	17	0.24～2.30	1.09	821～126 724	21 955
P_2l	炭质页岩	29	0.34～3.40	1.23	404～4 953	1 554
P_2q+m	灰岩	16	0.19～3.23	0.59	2 500～733 855	69 121
$P_{2-3}em$	玄武岩	31	0.20～1.30	0.44	1 433～19 123	5 634
	硫化铅锌矿	19	0.21～36.75	18.92	15～772	205
	黄铁矿	12	14.97～35.76	25.50	606～3 803	2 130

综上所述，本矿区岩矿石的电性差异很明显，对于寻找隐伏的金属硫化物矿体，选用电磁感应类和激电类物探方法能获得较好的找矿效果。

2.2.2 音频大地电磁法结果建模

研究区布置了音频大地电磁测深测线 11 条，测点 782 个，为开展三维电阻率建模打下了良好基础。将 11 条剖面逐条反演，获得 11 条反演电阻率剖面，以此为基础，构建电阻率三维切片模型（图 2a），再通过空间插值的方法获得电阻率三维模型（图 2b）。从该模型中可以看到电阻率值从浅到深具有明显的分界，浅部主要表现为高阻特征，深部的低阻通道比较明显，展示了深部断裂的空间形态。

2.2.3 激电测深法结果建模

激电测量作为直接找矿方法，在金属勘查中具有很好的找矿效果，特别是在金属矿产勘查中应用广泛[28-30]。本区布设了 8 条激电测深剖面，完成测点 111 个，反演后构建了极化率剖面（图 3a）及三维可视化模型（图 3b）。可以看到极化率值从浅到深具有明显的分界，浅部主要表现为低极化特征，深部的高极化率体元比较明显，展示了与矿体有关的地质体深部的特征。

2.2.4 地球化学建模

川滇黔铅锌矿矿集区是中国重要的铅锌产地，吸引了众多学者在此开展研究，特别是对铅锌矿地

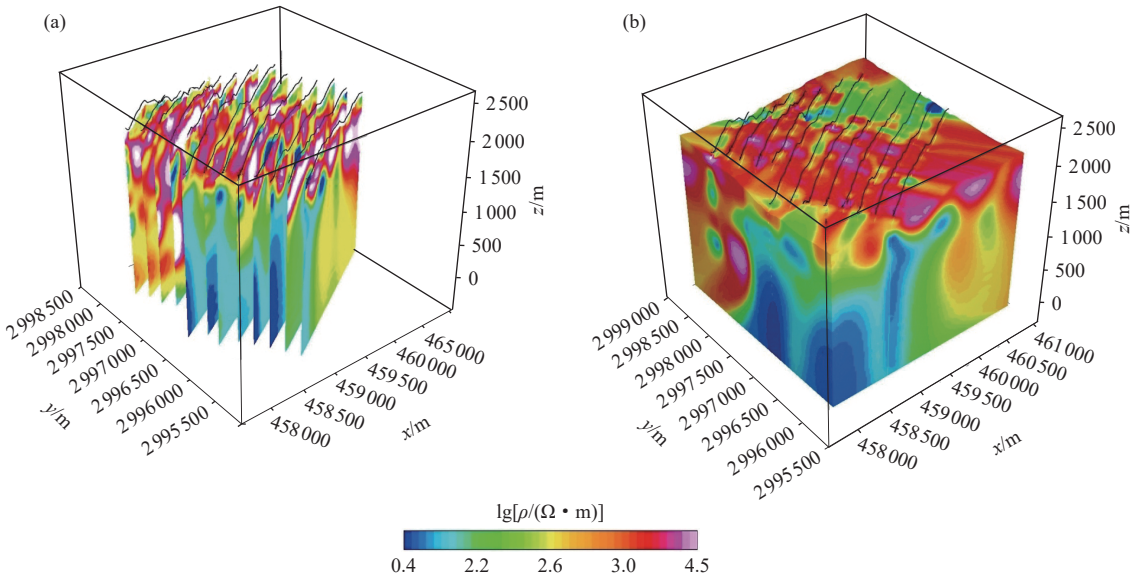


图 2　研究区 AMT 反演电阻率剖面(a)及三维可视化(b)

Fig. 2　AMT inversion resistivity profile (a) and 3D visualization (b) of the study area

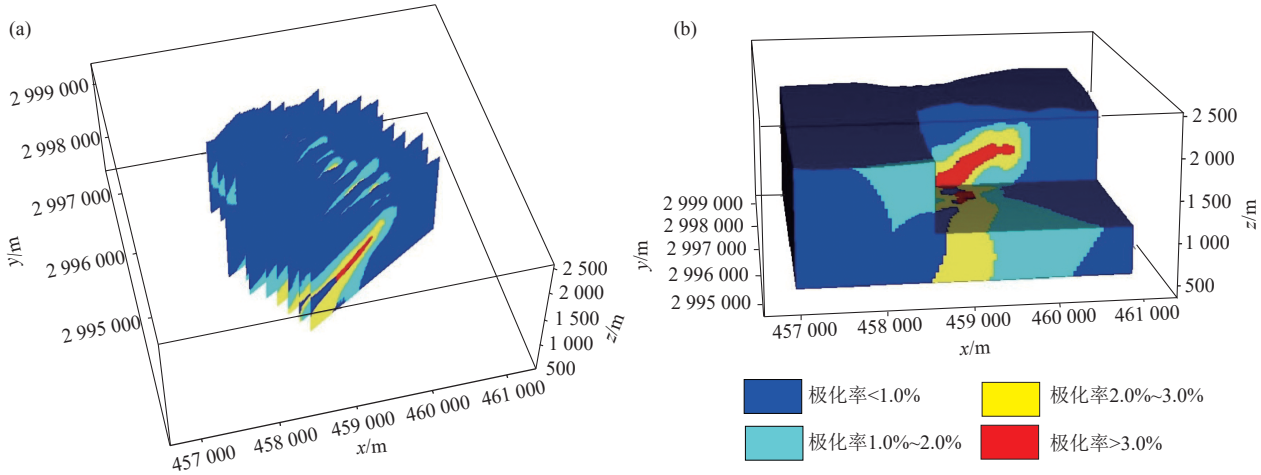


图 3　研究区激电测量极化率剖面(a)及三维椅切图(b)

Fig. 3　Polarization profile (a) and 3D oriented slice (b) of the study area

球化学成因的研究。前人的研究成果表明[5-7], 黔西北地区铅锌矿矿物质的主要来源具有多元性。Pb 和 Zn 以壳源为主, 其次为造山带, 所以, 推测其下伏基底、峨眉玄武岩和不同时期的碳酸盐岩地层均提供了成矿物源; S 的来源相对比较单一, 推测其主要来源于海水。这些富含金属元素的热卤水在构造应力的驱动下沿着断层和裂隙运移, 当进入碳酸盐岩地层后遇到上覆地层碎屑岩隔档, 其中的 Pb 和 Zn 与 S 结合后以硫化物形式沉淀富集, 形成具有经济价值的铅锌矿床。

土壤有机烃和金属活动肽是两种“深穿透”地球化学方法, 可以通过其测量结果获得深部矿化信息和构造信息[18,20,31]。本区开展了土壤有机烃和金属活动肽测量, 结果表明(图 4), 该区的地球化学异常主要呈双峰异常, 在断层出露的地方异常明显, 同时在矿体上方也出现了双峰异常特征, 在其邻近的小号点也出现了稍弱的双峰异常, 推测该范围内深部为有利的成矿靶区。

2.2.5　地质建模

三维地质模型的建立能立体展示深部矿体以及各个控矿因素的空间分布特征以及它们之间的相互关系, 最重要的是可以直观地对找矿标志和成矿条件等信息进行综合分析与解译, 有助于把握成矿规律, 为深部找矿工作提供参考。本次研究利用了已经施工的 4 号线 ZK4-1、8 号线 ZK8-1、12 号线的 ZK12-1 和 ZK2-2 的钻孔资料、11 条剖面地质资料和 1∶10 000 的平面地质图, 利用机器学习 K-means 聚类构建地层模型, 根据断层的地表产状, 结合音频大地电磁测深结果构建断层模型(图 5)。

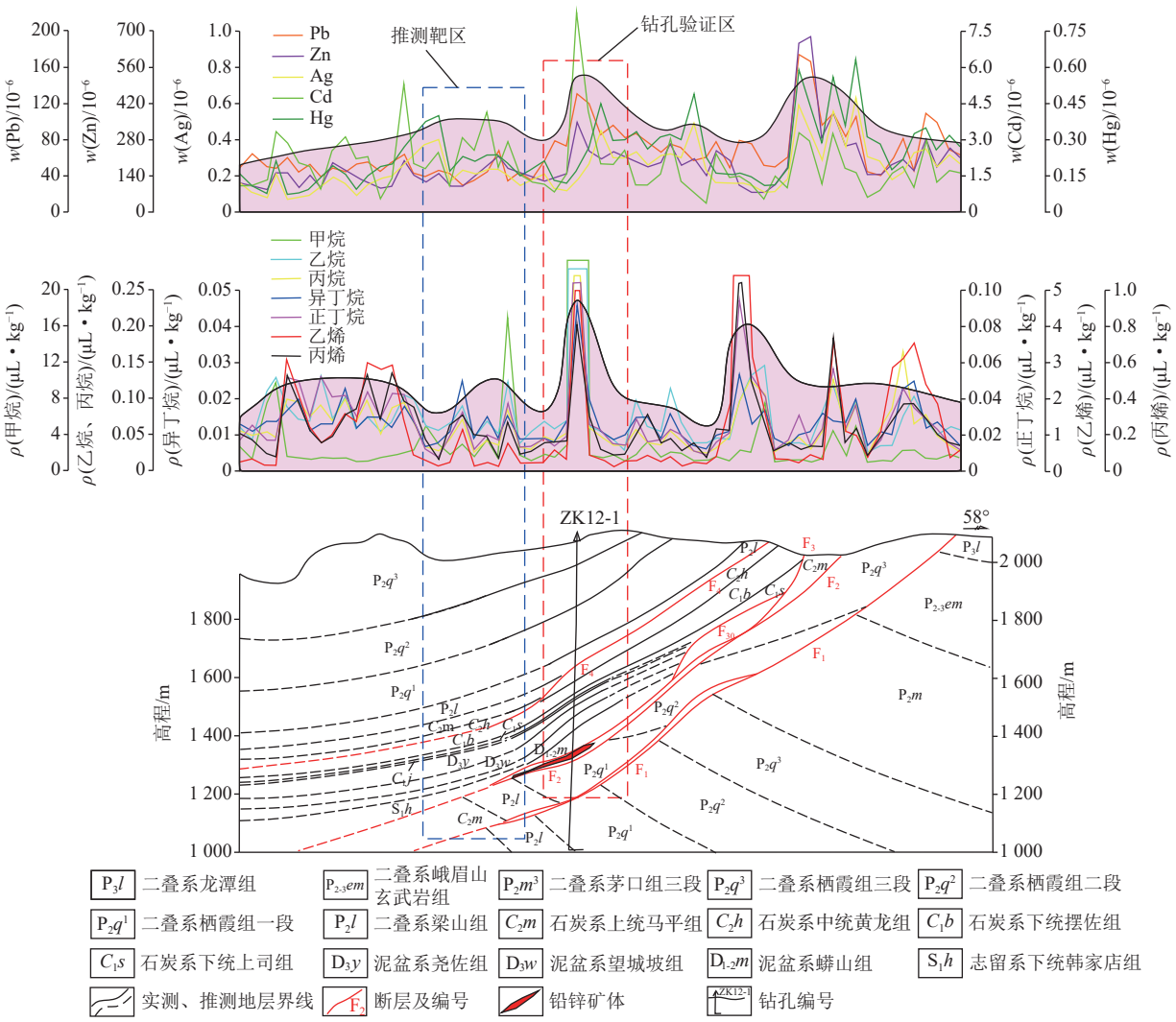


图 4　地球化学测量综合剖面

Fig. 4　Composite geochemical cross-section

3　三维成矿预测

3.1　找矿标志

研究区位于丫都—蟒洞断裂带中部，区内出露地层主要是志留系、泥盆系、石炭系、二叠系和峨眉山玄武岩组，在泥盆系、石炭系和二叠系的碳酸盐岩中均发现矿体[18-20]，其中石炭系和二叠系中的矿体规模大，泥盆系中的矿体规模小，主要的控矿断层为NW 向展布的 F_1 和 F_2，矿体沿构造呈透镜状、脉状产出。前人的研究成果显示，黔西北地区矿致异常呈高极化低阻特征[8,28]，深穿透化学显示为双峰异常。综合以上找矿新信息，对研究区找矿标志进行总结分析，结果见表 2。

3.2　深部三维成矿模型构建与靶区预测

前文中总结了黔西北地区 5 个主要的找矿标志（地层、岩性、构造、物探和化探）。要构建研究区的深部成矿模型，需要基于这 5 个标志：地层、岩性标志为石炭系和二叠系的碳酸盐岩；物探标志为 lg ρ< 2.0 Ω·m 以及 η>2%；化探呈双峰异常；在断层 F_1、F_2 附近。同时满足这 5 个标志的区域是最佳成矿区。基于此构建本研究区的深部三维成矿模型，推测了深部有利成矿靶区（图 6）。

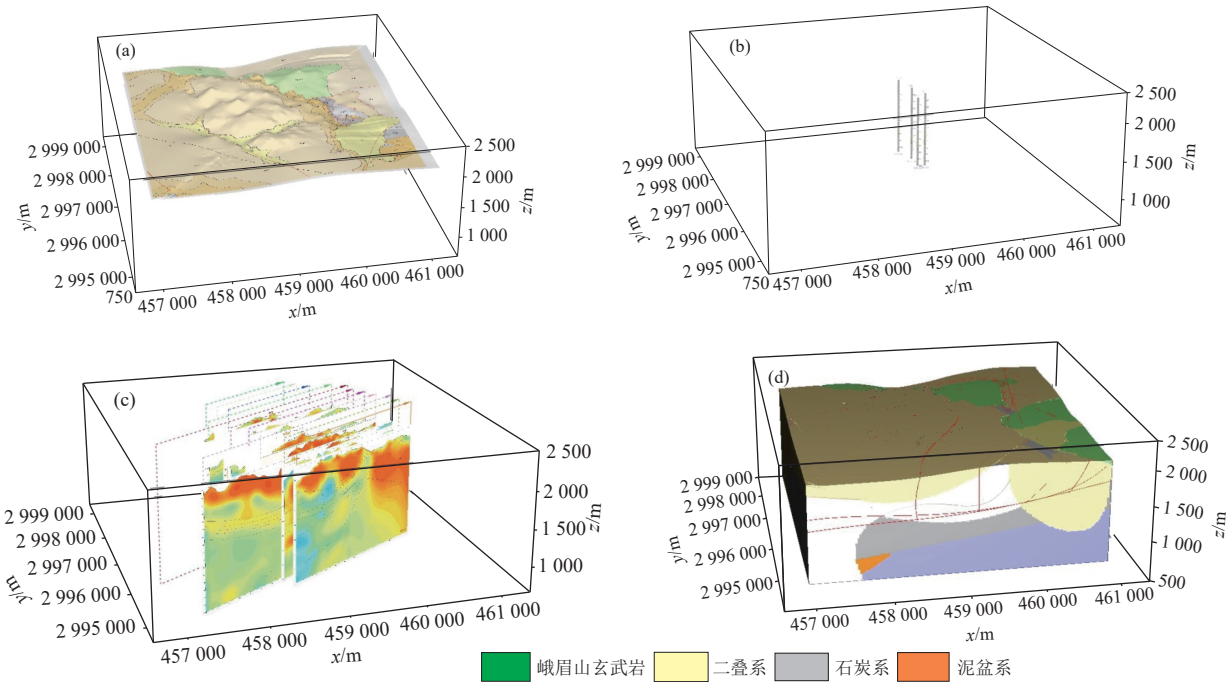
3.3　靶区验证效果

为了进一步验证预测靶区的效果，在 0 号线布设钻孔 ZK008（图 1）进行验证。结果显示在 F_2 破碎带中揭露一层铅锌矿体，厚 1.8 m，Zn+Pb 的品位大于 10%。此结果与 12 线、8 线和 4 线揭露矿体基本一致，推测为该矿体的走向延伸。

4　讨论

4.1　三维地质模型与多方法协同勘查

在地质找矿的过程中，针对不同的问题选择不



a—地质平面; b—钻孔; c—AMT 推测地质剖面; d—地质三维图

a—geological plan; b—borehole location; c—interpreted geological cross-section based on AMT data; d—3D geological model

图 5　研究区断层模型

Fig. 5　Fault model in the study area

表 2　黔西北地区铅锌矿床找矿标志

Table 2　Ore exploration indicators for Pb-Zn deposits in northwestern Guizhou

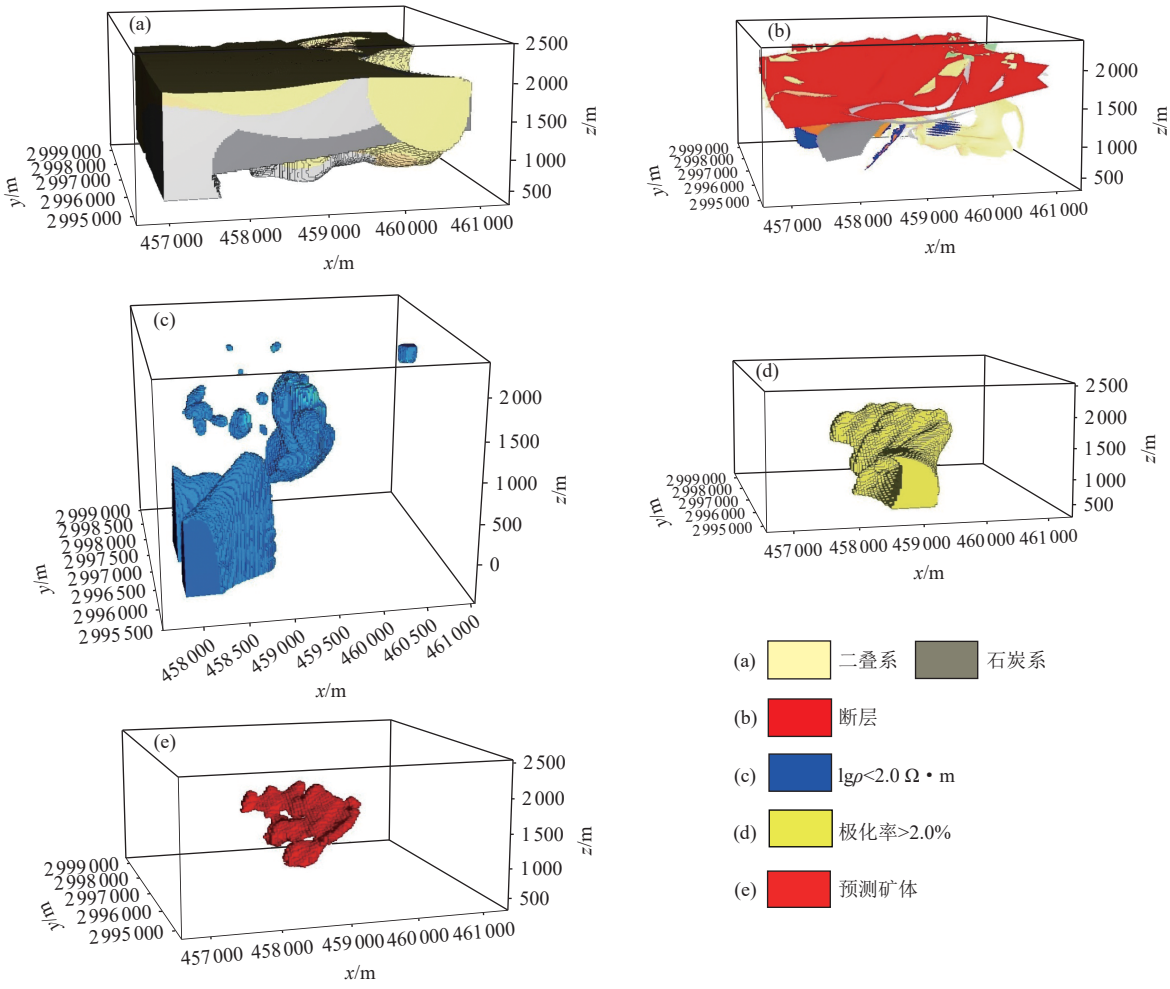
标志	特征
地层标志	泥盆系望城坡—尧梭组, 石炭系摆佐组, 二叠系栖霞—茅口组
岩性标志	泥灰岩、灰岩、白云岩、白云质灰岩
构造标志	NW向展布的 F_1、F_2及其旁侧的次级断裂是主要的控矿构造, 特别是其中破碎带和次级断裂发育部位是重要的矿化富集场所
物探标志	1)AMT测量结果圈定的低阻区域反映了矿体组合异常特征, 低阻异常反映了矿体及大致的空间分布; 2)激电测量高极化区域指示矿体的大致分布区
化探标志[19,21]	1)Pb、Zn、Ag 等元素组合异常与土壤地球化学 Au、As、Sb、Hg 元素异常; 2)金属活动态剖面上, Pb、Zn 同步共振异常峰以及土壤有机烃剖面上甲烷、乙烯等同步共振异常峰指示热液活动的断层, 同时剖面上的双峰式异常一定程度指示了矿体的分布区域

同的勘查手段。随着地质找矿走向覆盖区和深边部, 采用组合勘探方法成为必然[32-33]。但目前地物化多种方法在工作部署和解释上常分开进行, 没有作到互相融合、协同勘查。而三维隐式建模可以融合多元地物化信息, 可以在数据层面实现多元方法一体化勘查。

4.2　三维成矿预测的复杂性问题

三维成矿预测是基于地物化多元信息构建的三维模型, 预测的准确性依赖于数据量的大小、数据的准确性、地质环境的复杂程度、矿体规模和建模人员的经验等因素, 其中影响程度最大的是建模人员的经验。这里说的经验指的是建模人员的工作认真程度、知识结构、对研究区地物化的掌握程度及物化探资料的应用能力。所以, 不同人员创建的模型可能无法复制重现。

本次三维隐式建模利用协调克里格插值法进行模型的快速构建, 由于研究区数据量偏少(如化探剖面仅有 1 条, 激电测深范围受限、测点少), 还存在如下问题: 一是研究区构造复杂, 局部地层倒转, 难于精细构建; 二是激电测深数据少, 对于无数据地段, 只能通过插值方法进行无限外推, 不够精细; 三是三维地质模型对于数据有最低要求, 数据越丰富, 模型准确性越高。在覆盖区及深边部找矿, 物探是必不可少的手段, 随着物探新方法、新仪器的发展[34-36], 直接使用物探成果进行地质三维建模将成为未来发展的趋势。



a—地层; b—断层; c—电阻率; d—极化率; e—预测矿体

a—stratum; b—fault; c—resistivity; d—polarizability; e—predict the ore body

图 6　研究区三维成矿预测结果

Fig. 6　Three-dimensional mineralization prediction results of the study area

5　结论

本文选取黔西北某铅锌矿区为研究对象，开展三维隐式建模，在此基础上开展了三维成矿预测，得出结论如下：

1）隐式三维建模采用插值方法，能快速构建三维地质模型，减少人机交互部分环节，大大减少了建模时间；融入地物化多元勘查要素，大大提高了三维建模的准确性。三维地质模型能够清晰展示地下地质体之间的空间耦合关系。

2）对研究区基于地物化多种资料的二、三维资料研究显示，本区矿体在走向上和倾向上都有一定规模的延伸，这为下一步找矿指明了方向。

3）成矿预测显示在断层 F_1 和 F_2 深部具有良好的找矿空间，并据此圈定了找矿靶区。经钻探，成功揭露了深部矿体。

参考文献（References）：

[1] 成功. 滇东北毛坪铅锌矿床“多层位”赋矿机理及深部找矿方向[D]. 昆明：昆明理工大学，2023.
Cheng G. The 'lti-horizon' re-bearing mechanism and deep prospecting direction of maoping lead-zinc deposit in northeastern Yunnan[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2023.

[2] 张艳，韩润生，胡体才，等. 构造—流体—成矿耦合机制——以会泽超大型富锗铅锌矿床为例 [J]. 大地构造与成矿学，2023，47(5)：969-983.
Zhang Y, Han R S, Hu T C, et al. Tectonic-fluid-mineralization coupling Mechanism: A case study of the huize super-large germanium-rich lead-zinc deposit[J]. Tectonics and Metallogeny, 2023, 47(5): 969-983.

[3] 吴建标，韩润生，周高明，等. 滇东北毛坪富锗铅锌矿床构造控矿作用及深部找矿方向 [J]. 大地构造与成矿学，2023，47(5)：984-1001.
Wu J B, Han R S, Zhou G M, et al. Structural ore-controlling and deep prospecting direction of the maoping lead-zinc deposit in northeastern Yunnan, China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2023,

47(5): 984−1001.

[4] 蔡京辰, 吴大文, 王军, 等. 黔西北猪拱塘矿区北西向断裂构造演化与控矿 [J]. 矿产勘查, 2021, 12(8): 1743−1749.
Cai J C, Wu D W, Wang J, et al. Structural evolution of NW direction faults in Zhugongtang ore district, Northwest Guizhou Province, China[J]. Mineral Exploration, 2021, 12(8): 1743−1749.

[5] 叶太平, 叶霖, 许英奎, 等. 黔西北地区铅锌矿床成因类型——来自硫化物中微量元素证据 [J]. 东华理工大学学报:自然科学版, 2023, 46(6): 608−620.
Ye T P, Ye L, Xu Y K, et al. Genetic types of lead-zinc deposits in the Northwest of Guizhou Province: Evidence from trace elements in sulfides[J]. Journal of East China University of Technology:Natural Science Edition, 2023, 46(6): 608−620.

[6] 金中国, 黄智龙, 郑明泓, 等. 贵州碳酸盐岩型铅锌矿床地质特征与容矿机理 [J]. 矿物学报, 2020, 40(4): 346−355.
Jin Z G, Huang Z L, Zheng M H, et al. Geological characteristics and ore-bearing mechanism of Carbonate-type lead-zinc deposits in Guizhou[J]. Acta Mineralica Sinica, 2020, 40(4): 346−355.

[7] 王磊, 韩润生, 张艳, 等. 滇东北毛坪铅锌矿床矿体空间结构及深部矿体预测 [J]. 矿床地质, 2022, 41(2): 207−224.
Wang L, Han R S, Zhang Y, et al. Spatial structure of orebodies and prediction of deep orebodies of Maoping lead-zinc deposit, northeastern Yunnan Province[J]. Mineral Deposits, 2022, 41(2): 207−224.

[8] 农观海, 黄凯, 邓耀辉, 等. 黔西北大坪子铅锌矿区电法组合异常特征及找矿潜力分析 [J]. 矿物学报, 2023, 43(6): 903−911.
Nong G H, Huang K, Deng Y H, et al. Characteristics of electrical method combination and prospecting potential of the Dapingzi lead-zinc deposit in the northwestern Guizhou[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2023, 43(6): 903−911.

[9] Houlding S W. 3D geoscience modeling: Computer techniques for geological characterization[M]. London: Springer, 1994.

[10] 王统荣, 纪旭波, 王江波, 等. 基于机器学习的隐式三维地质建模: 以牟乳成矿带腊子沟金矿为例 [J]. 地球科学, 2025, 50(8): 3167−3181.
Wang T R, Ji X B, Wang J B, et al. Implicit 3D geological modeling based on machine learning: A case study of lazigou gold deposit in Muping-Rushan metallogenic belt[J]. Earth Science, 2025, 50(8): 3167−3181.

[11] 高猛, 王功文, 唐冬梅. 新疆喀拉通克铜镍矿集区三维成矿预测与不确定性评价 [J]. 地学前缘, 2026, 33(5): 64−83.
Gao M, Wang G W, Tang D M. Three-dimensional mineral prospectivity mapping and uncertainty evalua-tion in the Kalatongke copper-nickel district, Xinjiang, China[J]. Earth Science Frontiers, 2026, 33(5): 64−83.

[12] Li X H, Xue C, Chen Y H, et al. 3D convolutional neural Network-based 3D mineral prospectivity modeling for targeting concealed mineralization within Chating area, middle-lower Yangtze River metallogenic Belt, China[J]. Ore Geology Reviews, 2023, 157: 105444.

[13] 郭东宝, 袁廷鲁, 李海亮, 等. 甘肃洛坝铅锌矿数字化矿体三维建模及成矿预测 [J]. 矿产勘查, 2024, 15(S2): 533−547.
Guo D B, Yuan T L, Li H L, et al. Three-dimensional geological modeling and mineralization prediction in the Luoba lead-zinc deposit, Gansu Province[J]. Mineral Exploration, 2024, 15(S2): 533−547.

[14] 王权, 邹艳红. 基于轮廓线层间形态插值的三维地质隐式曲面重构 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(5): 293−300.
Wang Q, Zou Y H. Three-dimensional geological implicit surface reconstruction based on intermediate contour morphological interpolation[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5): 293−300.

[15] 谷浩, 杨泽强, 高猛, 等. 河南围山城金银矿集区三维地质建模与成矿预测 [J]. 地学前缘, 2024, 31(3): 245−259.
Gu H, Yang Z Q, Gao M, et al. Three-dimensional geological modeling and mineral prospectivity mapping in the Weishancheng gold-silver district, Henan, China[J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(3): 245−259.

[16] 蔡国盛, 李堂英, 鲜绍军, 等. 贵州纳雍县小梁山铅锌矿地质特征及找矿前景 [J]. 矿产勘查, 2020, 11(11): 2391−2397.
Cai G S, Li T Y, Xian S J, et al. Geological characteristics and prospecting potential of the Xiaoliangshan Pb-Zn deposit in Nayong County, Guizhou Province[J]. Mineral Exploration, 2020, 11(11): 2391−2397.

[17] 何志威, 李泽琴, 陈军, 等. 黔西北铅锌矿床成矿岩性组合与构造控矿样式 [J]. 矿物学报, 2020, 40(4): 367−375.
He Z W, Li Z Q, Chen J, et al. Metallogenic lithological assemblage and structural ore-controlling patterns of lead-zinc deposits in northwest Guizhou[J]. Acta Mineralica Sinica, 2020, 40(4): 367−375.

[18] 阮伟玲, 杜蔺, 郑明泓, 等. 黔西北铅锌矿勘查技术方法试验与找矿模型构建——以猪拱塘铅锌矿为例 [J]. 矿物学报, 2023, 43(6): 894−902.
Ruan W L, Du L, Zheng M H, et al. Tests of prospecting technical methods and construction of prospecting model for lead zinc deposits in the Northwestern Guizhou: A case study of the Zhugongtang lead-zinc deposit[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2023, 43(6): 894−902.

[19] 何良伦, 赵锋, 柏光辉, 等. 贵州省猪拱塘超大型铅锌矿床的发现及其找矿意义 [J]. 中国地质调查, 2019, 6(3): 29−36.
He L L, Zhao F, Bai G H, et al. Discovery and prospecting significance of Zhugongtang super-large Pb-Zn deposit in Guizhou Province[J]. Geological Survey of China, 2019, 6(3): 29−36.

[20] 郑明泓, 金中国, 刘玲, 等. 深穿透地球化学在黔西北隐伏铅锌矿找矿中的应用 [J]. 矿物学报, 2020, 40(4): 510−517.
Zheng M H, Jin Z G, Liu L, et al. An application of the deep penetration geochemistry for prospecting concealed lead-zinc orebodies in the northwestern Guizhou Province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2020, 40(4): 510−517.

[21] Saroj, Kavita. Review: study on simple k mean and modified K mean clustering technique[J]. International Journal of Computer Science Engineering and Technology, 2016, 6(7): 279−281.

[22] Cui M Y. Introduction to the K-means clustering algorithm based on the elbow method[J]. Accounting, Auditing and Finance, 2020(1): 5−8.

[23] 杨俊闯, 赵超. K-Means 聚类算法研究综述 [J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(23): 7−14, 63.

Yang J C, Zhao C. Survey on K-means clustering algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(23): 7−14, 63.

[24] Gao M, Wang G W. A framework for identifying metallogenic intrusions from 2D to 3D based on geological-geophysical datasets in the Wulonggou gold district, Qinghai Province, China[C]//International Workshop on Gravity, Electrical & Magnetic Methods and Their Applications, Shenzhen, China, May 19–22, 2024. Society of Exploration Geophysicists and Chinese Geophysical Society, 2024: 36-40.

[25] 吴晓贵, 秦纪华, 胡林朝, 等. 基于 GeoModeller 的新疆阿舍勒铜锌矿三维地质模型及地质空间信息解译 [J]. 矿产与地质, 2020, 34(4): 826−831.
Wu X G, Qin J H, Hu L C, et al. 3D geological model and geospatial information interpretation on the basisof GeoModeller for Ashele Cu-Zn deposit, Xinjiang[J]. Mineral Resources and Geology, 2020, 34(4): 826−831.

[26] 丁文祥. 基于多源地学信息约束的繁昌盆地重磁联合反演及三维地质建模研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
Ding W X. Combined gravity and magnetic inversion and 3D geological modeling research of Fanchang Basin based on multi-source geoscience constraint information[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.

[27] 谭添文, 王佳俊, 吕明明, 等. 高亏格坝基地质体 Kmeans-ERT 自动建模研究 [J]. 水力发电学报, 2023, 42(9): 112−124.
Tan T W, Wang J J, Lyu M M, et al. Automatic modeling of high genus geological bodies at dam foundation based on Kmeans-ERT[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(9): 112−124.

[28] 卢卯, 黄凯, 蒋海民, 等. 激发极化法在黔西北洗线沟铅锌矿床找矿中的应用 [J]. 矿物学报, 2020(4): 502−509.
Lu M, Huang K, Jiang H M, et al. Application of the induced polarization method in mineral prospecting of the Xixiangou lead-zinc deposit in the northwestern Guizhou, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2020(4): 502−509.

[29] 肖坤林, 李绍波. 大功率 IP 在某铅锌矿预查中使用水平切片方法的应用研究 [J]. 地质找矿论丛, 2025, 40(1): 135−140.
Xiao K L, Li S B. Study on the application of horizontal slicing method of high-power IP pre-survey to a Pb-Zn deposit[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2025, 40(1): 135−140.

[30] 张西君, 李家斌, 蒙应华, 等. 激电法在贵州大厂锑矿勘查中的应用 [J]. 中国地质调查, 2018, 5(1): 16−22.
Zhang X J, Li J B, Meng Y H, et al. Application of induced polarization method in antimony ore exploration of Dachang in Guizhou[J]. Geological Survey of China, 2018, 5(1): 16−22.

[31] 肖宪国, 衮民汕, 郑明泓, 等. 有机烃地球化学测量在隐伏 MVT 铅锌矿床找矿勘查中的应用——以贵州牛角塘铅锌矿床为例 [J]. 矿物学报, 2022, 42(5): 570−578.
Xiao X G, Gun M S, Zheng M H, et al. Application of organic hydrocarbon geochemical survey in the exploration of concealed orebodies of the MVT-type lead-zinc deposit—A case study of the Niujiaotang lead-zinc deposit in Guizhou Province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2022, 42(5): 570−578.

[32] 娄元林, 钱建利, 朱志平, 等. 物化遥综合找矿方法在西藏隆子县拉九地区的应用 [J]. 黄金科学技术, 2024, 32(2): 241−257.
Lou Y L, Qian J L, Zhu Z P, et al. Application of integrated geophysical, geochemical and remote sensing prospecting methods in lajiu area, Longzi County, Tibet[J]. Gold Science and Technology, 2024, 32(2): 241−257.

[33] 李梦婵. 综合地质、地球物理及地球化学信息在庐江矾母山地区矿产勘查中的应用 [J]. 安徽地质, 2025, 35(1): 28−32, 37.
Li M C. Application of integrated geological, geophysical and geochemical information to mineral exploration in the Fanmushan area, Lujiang County[J]. Geology of Anhui, 2025, 35(1): 28−32, 37.

[34] 廖凤初, 刘桂元, 周杰, 等. 扩频激电法(SSIP)找矿效果分析——以湖南省永州市零陵区东湘桥锰矿床勘查为例 [J]. 矿产勘查, 2024, 15(9): 1691−1699.
Liao F C, Liu G Y, Zhou J, et al. Analysis of exploration effect of spread spectrum induced polarization(SSIP)method: Taking the exploration of Dongxiangqiao manganese deposit in Lingling district, Yongzhou City, Hunan Province as an example[J]. Mineral Exploration, 2024, 15(9): 1691−1699.

[35] 蒋永芳, 李欢, 颜晓华, 等. 广域电磁法对深部岩体的识别及在找矿中的应用: 以胶东龙口—土堆金矿区为例 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2025, 56(3): 966−978.
Jiang Y F, Li H, Yan X H, et al. Identification and prospecting application of wide filed electromagnetic method to deep pluton: Take the Longkou-Tudui gold deposit in Jiaodong as an example[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2025, 56(3): 966−978.

[36] 薛国强, 武欣, 陈卫营, 等. 接地源短偏移瞬变电磁法理论及其在深部矿产勘探中的应用 [J]. 中国科学: 地球科学, 2025, 55(2): 642−654.
Xue G Q, Wu X, Chen W Y, et al. Theory of short offset transient electromagnetic method of grounding source and its application in deep mineral exploration[J]. Scientia Sinica: Terrae, 2025, 55(2): 642−654.

Implicit 3D modeling and deep mineralization prediction based on geological-geophysical-geochemical exploration data: A case study of a lead-zinc deposit in the northwestern Guizhou region, China

HUANG Kai, NONG Guan-Hai, DENG Yao-Hui, LU Mao

(*Geological and Mineral Exploration Institute, Guizhou Provincial Non-ferrous Metals and Nuclear Industry Geology and Mineral Resources Exploration Bureau, Guiyang* 550005, *China*)

Abstract: The northeastern Yunnan - northwestern Guizhou region represents a significant lead-zinc polymetallic mineral province in China, where multiple large and super-large lead-zinc polymetallic deposits have been discovered, demonstrating considerable potential for deep mineral prospecting. However, deep mineral prospecting faces challenges, such as high costs, significant risks, and technical difficulties. Hence, by integrating the geological-geophysical-geochemical exploration data, this study conducted implicit 3D modeling of a deposit in the northwestern Guizhou region, followed by deep mineralization prediction of this deposit. The specific methodology is as follows. First, the 3D resistivity and polarizability models are generated through geophysical inversion and spatial interpolation of the audio-frequency magnetotelluric (AMT) and induced polarization (IP) sounding data. Second, based on borehole data and mineralization-related geological characteristics, a stratigraphic model is established using the K-means clustering algorithm in machine learning; a fault model is developed by integrating surface fault occurrences and AMT interpretations. Third, based on the resistivity, stratigraphic, and fault models, 3D mineralization prediction is conducted using the mineralization condition analysis method. Finally, the deep mineral prospecting targets can be delineated to guide the deep borehole arrangement. Drilling verification confirms the high reliability of the targets delineated using the above methodology. Overall, the implicit 3D modeling based on the geological-geophysical-geochemical exploration data can effectively predict unknown areas using known information. This approach provides sufficient samples for implicit 3D modeling, thereby assisting in constructing more accurate geological models under available conditions and providing a reference for mineral exploration in covered areas and in deep and marginal zones of old mines.

Key words: geological-geophysical-geochemical exploration; implicit 3D modeling; deep mineralization prediction; northwestern Guizhou

（本文编辑: 王萌, 沈效群）