

· 非主题来稿 ·

西藏甲玛矿区三维地质建模与层状矽卡岩靶区预测

王素芬¹, 屈挺², 贺日政¹, 丁毅^{3*}, 刘建利², 陈小龙², 李冰², 卢晓²

WANG Sufen¹, QU Ting², HE Rizheng¹, DING Yi^{3*}, LIU Jianli², CHEN Xiaolong², LI Bing²,
LU Xiao²

1. 中国地质科学院地球深部探测中心, 北京 100037;

2. 陕西地矿物化探队有限公司, 陕西 西安 710043;

3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

1. Sinoprobe Center, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. Shaanxi Geology and Mining Geophysical and Geochemical Exploration Team Co.Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China;

3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

摘要: 西藏甲玛矿区是冈底斯成矿带非常典型的多金属矿床, 理论预测研究认为, 在矿集区深部发育隐伏的斑岩-矽卡岩矿体, 而基于矿区钻孔覆盖的勘查模型对外围区潜在靶区预测程度较低。以甲玛矿区 45 口钻孔岩心的密度、磁性、电阻率、极化率等物性资料为基础, 分析了覆盖甲玛矿集区及外围的大地电磁测深三维数据体, 基于 GOCAD 软件平台, 通过离散光滑插值法与随机模拟算法, 构建了甲玛矿区的地层岩性-地球物理三维可视一体化模型; 结合大地电磁测深 11 条剖面的二维地质解译成果, 精细刻划了 3000 m 以浅的三维矽卡岩体发育特征, 并通过使用未参与建模的甲玛科学深钻 JMKZ-1 进行验证, 结果显示三维地质模型具有较好的一致性; 基于构建的矽卡岩成矿模型, 结合甲玛矿区及邻区岩(矿)石电性参数特征分析和三维矽卡岩的电性结构, 预测了甲玛矿区的层状矽卡岩靶区, 为深部资源潜力评价及矿集区增储目标提供三维建模技术示范。

关键词: 甲玛矿区; GOCAD 软件; 三维地质建模; 层状矽卡岩; 靶区预测

中图分类号: P62 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)12-2110-13

Wang S F, Qu T, He R Z, Ding Y, Liu J L, Chen X L, Li B, Lu X. 3D geological modeling and stratified skarn target prediction in the Jiama deposit, Tibet. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(12): 2110-2122

Abstract: The Jiama deposit in Tibet is a very typical polymetallic deposit in the Gangdise metallogenic belt. Through theoretical prediction and research, it is believed that concealed porphyry-skarn ore bodies are developed in the deep part of the ore-concentrated area. However, the exploration model based on the borehole coverage of the mining area has a low degree of prediction of the potential target in the peripheral area. Based on the density, magnetic properties, resistivity, and polarizability data of 45 borehole cores in the Jiama deposit, the three-dimensional magnetotelluric sounding data covering the Jiama deposit and its periphery were analyzed. Based on GOCAD software, the stratum lithology-geophysical three-dimensional visualization integrated model of the Jiama deposit was constructed through discrete smooth interpolation and stochastic simulation algorithms. Combined with the results of 2D geological

收稿日期: 2021-04-28; **修订日期:** 2021-06-09

资助项目: 国家重点研发计划课题《典型矿集区深部地球物理探测技术示范》(编号: 2018YFC0604102) 和中国地质调查局项目《冈底斯构造带关键地区深部地质调查》(编号: DD20190015)

作者简介: 王素芬(1981-), 女, 博士, 助理研究员, 从事油气与矿产三维地质建模研究。E-mail: wangsuafen@cags.ac.cn

*** 通信作者:** 丁毅(1979-), 男, 博士, 高级工程师, 从事三维建模与可视化研究。E-mail: dingyi@cags.ac.cn

interpretation of 11 magnetotelluric (MT) profiles, the development characteristics of 3D skarn bodies below 3000 m were finely depicted and verified with the Jiama Scientific Deep Drill JMKZ-1 which was not involved in the modeling. The results show a consistency agreement. Besides, based on the skarn metallogenic model, combined with the analysis of the electrical parameters of the Jiama deposit and adjacent areas, as well as the electrical characteristics of the three-dimensional skarn, the favorable target area of stratified skarn in Jiama deposit is predicted. The results can provide a demonstration of 3D modeling technology for the evaluation of deep resource potential and reserves increasing in the mining area.

Key words: Jiama deposit; GOCAD software; three-dimensional geological modeling; stratified skarn; target prediction

深部矿产成矿理论模型分析、靶区预测与评价一直是矿产资源评价的难点与热点。在传统矿产勘查领域,主要通过对二维地质资料分析开展矿体预测与评价,在关键信息提取、多元信息融合分析等方面存在不足,很难将分散的二维地质和矿产剖面进行展示,往往造成成矿靶区预测准确度差和精度低,不能满足深部地质体表达与成矿预测^[1-3]。近年,伴随三维可视化技术的发展,三维地球物理、地质建模以其形象、直观、可视化效果好等优点,在深部矿产特征评价、储量评价等方面发挥了重要的作用,并能通过模型生成一系列专题图件^[1,4-5],通过三维建模修正二维解译的结果,为精准分析矿产空间分布特征、指导矿产勘探等提供丰富的资料和分析途径^[6]。在寻找深部矿体方面,基于三维可视化-定量预测技术的三维地质建模技术是基础^[1],关系到预测结果的可靠性^[7]。三维地质建模技术既可以将现有的二维剖面 and 三维数据进行融合集成,又可以检验二维剖面解译的地质认识,更能突出展示目标层位的三维空间展布特征。

位于冈底斯成矿带东段的甲玛铜多金属矿,自2008年以来,找矿勘查工作取得了重大突破,矿床规模迅速扩大,并建立了“四位一体”的找矿勘查模式^[8-9]。矿床内的矽卡岩层是整个甲玛矿床中最重要的、储量最大的含矿部位^[10-13]。现有的西藏甲玛矿区成矿理论认为,在矿集区深部发育隐伏的斑岩-矽卡岩体^[8,13-16]。而甲玛矿区外围是否存在隐伏矿体,尚未被揭示^[13]。为揭示深部矿床发育特征,本文以甲玛矿区为研究对象,在现有的钻孔资料、岩石物性模型^[17]及大地电磁(MT)三维反演数据的基础上,利用GOCAD软件,通过离散光滑插值方法与随机模拟算法,构建了甲玛矿区三维透明化地球物理勘探模型,通过提取目标体的三维空间属性信息,预测甲玛矿区3000 m以浅的层状矽卡岩矿床三维空间展布特征,为深部资源潜力评价及矿集区增储提供参考。

1 地质背景

1.1 地质构造

西藏甲玛铜多金属矿床位于冈底斯成矿带的东段、南拉萨地体之上(图1-a),是一个典型的大型“碰撞型”斑岩-矽卡岩型矿床^[18]。冈底斯成矿带在大地构造上位于雅鲁藏布江缝合带(YZS)和班公湖-怒江缝合带(BNS)之间,是一条矿产资源潜力巨大的铜多金属成矿带^[8,19-23]。甲玛多金属矿床是冈底斯成矿带东段与新生代中酸性岩浆活动密切相关的矽卡岩、角岩和斑岩型矿石四位一体^[8-9]的铜多金属矿床。

1.2 地层岩性

甲玛矿区及邻近区域地层主要为岛弧及被动陆缘火山沉积岩系,甲玛矿区出露的地层由北向南依次为楚木龙组(K_1c)、林布宗组(K_1l)、多底沟组(J_3d)和叶巴组($J_{2-3}y$),其中,上侏罗统多底沟组为灰白色大理岩、结晶灰岩、夹泥灰岩、灰黑色砾屑灰岩、砾屑泥晶灰岩;下白垩统林布宗组上部为岩屑砂岩、石英砂岩、岩屑石英粉砂岩与炭质板岩互层,下部为炭质板岩、炭质页岩夹粉细砂岩(图1-b)。

1.3 矿体与储量特征

矽卡岩型铜多金属矿体为甲玛铜多金属矿床的主要矿体组成,甲玛斑岩矿体为隐伏矿体,赋存于海拔标高4600 m以下,其中斑岩矿体一般位于地表以下200 m^[8-9]。矿体走向NW—SE向,约300°,延长约800 m,倾向NE,近直立,已查明矿体延伸深度大于350 m,还未探明其深部底界。围绕斑岩体与多底沟组大理岩接触带常产出厚度超过200 m的巨厚矽卡岩矿体。2010年在北边试探性施工的ZK5220钻孔及2011年施工的ZK6430钻孔都见到了矽卡岩铜矿体,主要为石榴子石矽卡岩,石榴子石以钙铝榴石为主。2014年,中金国际公布了甲玛铜矿探明及控制资源量约为 1.48×10^8 t,证实其铜储量约为 4.41×10^8 t,铜含量为 613.8×10^4 t,甲玛项目

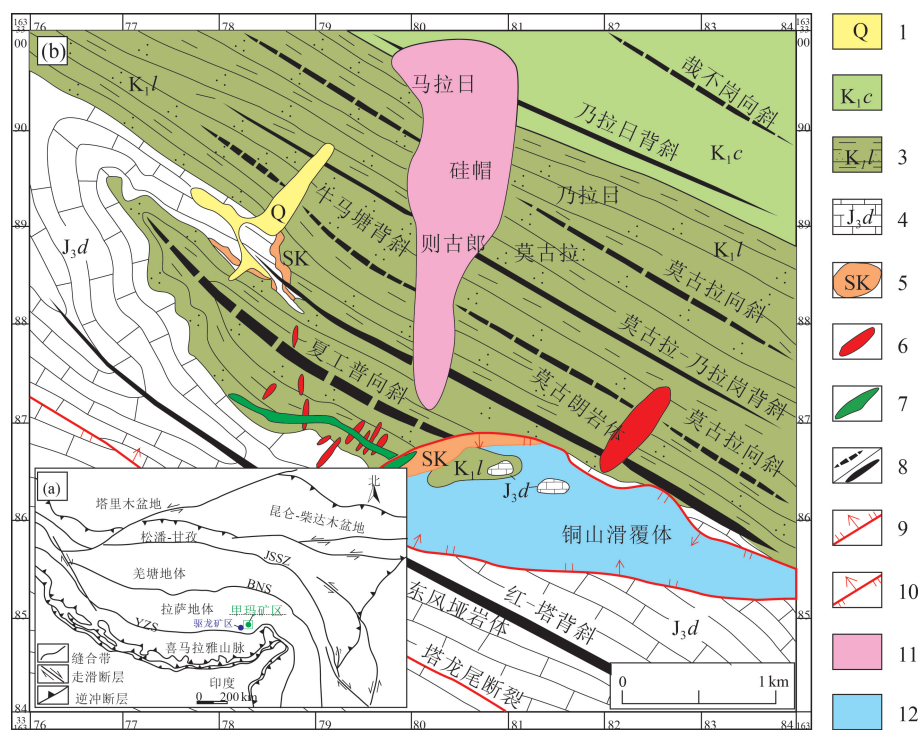
图1 西藏甲玛矿区构造纲要图^[13, 15]

Fig. 1 Tectonic outline map of the Jiama mining area, Tibet

1—第四系;2—楚木龙组;3—林布宗组砂岩与板岩互层;4—多底沟组灰岩;5—砂卡岩;6—侵入岩;
7—矿体;8—向斜/背斜;9—正断层;10—逆断层;11—硅帽;12—铜山滑覆体

露天矿可采年限持续至2039年,地下矿可采年限至2049年。2020年10月,中国地质科学院矿产资源研究所在甲玛铜多金属矿区内完成了3003.33 m的科学深钻JMZK-1,揭示了3000 m以浅地层的蚀变与矿化信息,揭露到厚达234.34 m的角岩型铜钼矿体和厚度超过298 m的砂卡岩型铜钼金银矿体,其中铜品位大于0.7%的富铜砂卡岩矿体厚度达44.12 m,铜平均品位1.17%,钼平均品位0.04%,伴生金平均品位0.63 g/t,伴生银平均品位20.12 g/t^①。

2 三维地质建模方法

三维地质模型是多种信息数据的集合体,是地质体数字化的表达过程。三维地质分析软件能够将区块(区域)地质、地球化学、地球物理、钻探等多学科数据进行集成,常用的三维地质建模软件主要有GOCAD、Petrel、Creatar XModeling、3DMine等^[7, 24-27]。通过三维地质建模,对每项数据独立进行数据分析,构建三维立体可视化、数字化的矿床模型,并结合已建立的地质找矿预测模型,对获取矿床的所有信息进行三维可视化分析,为深部矿体

定量预测提供基础。

2.1 GOACD 三维建模平台

本次建模使用GOCAD (Geological Object Computer Aided Design) 软件,其前身是由法国Nancy大学开发的主要应用于地质领域的三维可视化建模软件,具有强大的三维地质建模、分析及解译功能,已在矿产、石油勘探、地球物理勘查、地质工程等领域进行了广泛应用,并在国内外深部矿体三维地质建模与预测中成功应用,如秦岭西部的大水金矿床3D地球化学建模^[6],青藏高原东部岩石圈构造三维模型^[28]。

GOCAD软件可以进行表面建模和实体建模,同时可以设计空间几何对象和空间属性分布,在建模和空间属性计算方面,该软件提供了4种常用的算法,分别为常数法(Constant)、基于给定某些属性的脚本算法(Script)、插值算法(Interpolation)和随机模拟算法(Simulation)。

2.2 三维建模流程

常用的三维地质建模方法主要有基于钻孔建模法^[29]、基于平行剖面建模法^[30]、基于多源数据建

模法^[31-32]等。本次建模主要包含地质模型和地球物理模型两大部分,其中地质模型主要为基于研究区地质钻孔数据建立的岩性模型,地球物理模型主要为基于大地电磁测深(MT)数据反演结果建立的三维电性模型。

建模流程主要分为 5 个步骤(图 2):①数据准备,主要包括钻孔坐标、钻孔岩性、录井、岩石物性参数等数据;②建立地层模型框架,基于钻孔及 MT 测点,分别建立大比例尺、小比例尺等不同地层模型框架;③建立地球物理模型,基于 MT 测点获得的电阻率数据体和以离散光滑插值法(DSI)构建的三维电性模型,为小比例尺三维模型;④建立岩性模型,分析岩体之间的接触关系,通过钻孔间离散光滑插值法与随机模拟算法,构建三维岩性模型,为大比例尺模型;⑤预测矿产靶区,通过三维电性模型,生成用于二维剖面解译的地质剖面,并解释和精细刻画矽卡岩分布范围,形成矽卡岩体分布特征,预测有利靶区。

3 甲玛矿区三维地质模型

在西藏甲玛矿区野外地质调查、地质构造、地层岩性、地球物理勘探、地质钻探等资料分析的基础上,

基于上述 GOCAD 软件三维地质建模方法,分别建立了甲玛矿区的地层模型框架、地球物理模型和岩性模型。

3.1 三维地质建模数据

三维地质建模的数据主要包含地形地貌、地质钻孔、地球物理、岩性参数等数据。

(1) 地形地貌资料

地形地貌模型的建立直观清晰地表达地表的高低起伏状态,本次三维地质建模,采用钻孔孔口高程、地球物理勘探实测坐标和高程值,生成三维表面模型。

(2) 钻孔资料

钻孔数据库模型是构建三维地质模型的重要数据,钻孔数据主要来源于地质钻探。本次三维地质建模,收集了甲玛矿区 46 口地质钻孔的资料(图 3)。用于建模的 45 口钻孔数据主要有钻孔编号、坐标、孔深、岩性参数等数据;1 口未参与建模的甲玛科学深钻(JMZK-1),其最大钻探深度达 3003.33 m。

(3) 地球物理资料

中国地质科学院对甲玛矿区开展了大地电磁测深(MT)测量和可控源音频大地电磁(CSAMT)等地球物理测量,其中 MT 测量共 180 个测点,点距 250 m,局部加密。本文对 180 个 MT 测点进行梳理,组成了 AF、GH 等 11 条剖面(图 3),通过三维反演处理形成三维电阻率数据体,可以较好地分析矿体的三维电性空间结构。

3.2 地层模型框架

在属性模型建立前,以地层框架(图 4)为基础,构建岩性模型、三维电性模型等多属性模型。由于甲玛矿区内侵入岩较发育,存在穿层现象,导致地层成层性较差。地层模型通常需要给出地层的顶面与底面。本文在地表模型下推 2000 m 作为下一层面的顶面,地层底面深度约为高程 2000 m,地层框架深度约为 3000 m,建立了钻孔区域的大比例尺地质网格,平面为 20 m 的网格间距,垂向为 2 m 的网格间距,建立了 236(X 方向)×228(Y 方向)×297(Z 方向)的三维立体网格,共约 1598 万个网格,可以满足甲玛矿区精细地层格架分析的需要;而对于三维电性模型的小比例尺网格,以 50 m 的间距平面剖分和 10 m 间距的垂向剖分,建立了包含 173(X 方向)×169(Y 方向)×626(Z 方向)的空间地层网

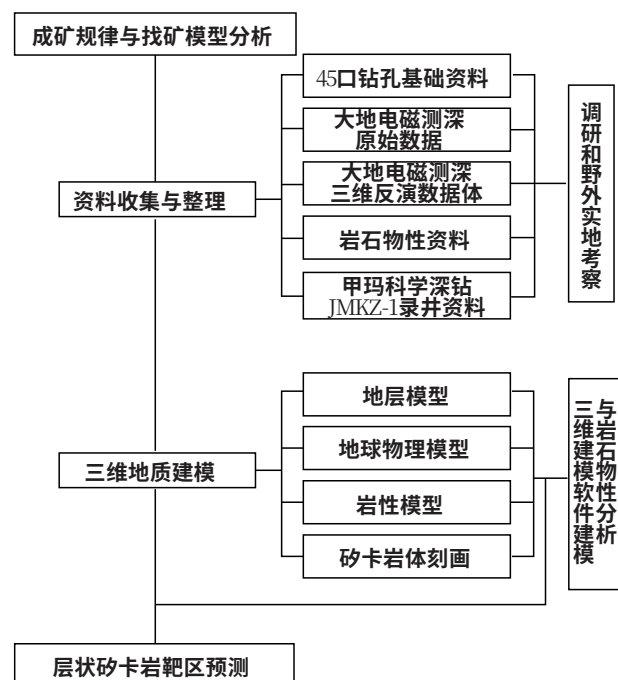


图 2 基于 GOCAD 软件平台的深部矿体三维建模流程

Fig. 2 Flow chart of 3D modeling of deep orebody based on GOCAD software

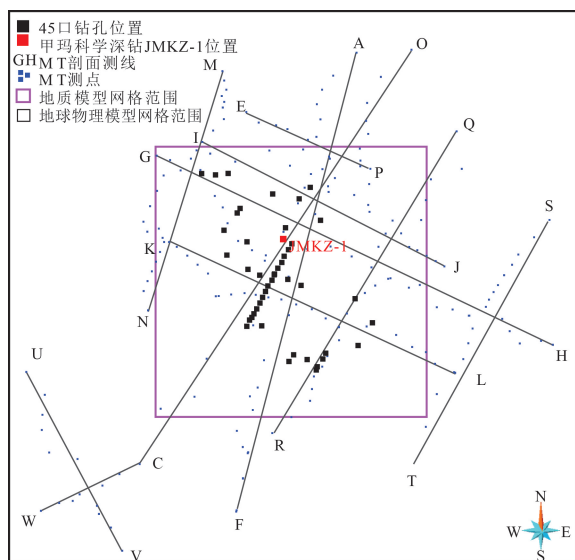


图3 甲玛矿区钻孔与MT剖面分布

Fig. 3 Distribution of boreholes and MT profile in the Jiama mining area

格模型,约1830万个三维网格。

3.3 地球物理模型

(1) 大地电磁测深数据

参与甲玛矿区三维地质建模反演的大地电磁测深MT测点共180个(图3),对MT全阻抗的振幅与相位数据进行三维反演处理。在地层框架基础上,三维反演电性数据体以多种算法呈现,本次主要采用非线性共轭梯度法。MT三维反演的电性数据体,为取对数的电阻率,分布在 $-2.76 \sim 5.24$ 之

间(图5)。

(2) 三维地球物理模型

在反演基础上建立三维地球物理模型建模的过程中,本次应用GOCAD软件插值算法中的离散光滑(DSI)插值法和克里金(Kriging)插值法。DSI算法是目前地质几何模型建模的主流技术,属于全局插值法,通过定义一个被称为全局粗糙度的目标优化函数,并在满足已知点及其他约束条件下,使全局粗糙度达到最小,从而建立线性方程并迭代求解^[33]。而克里金插值法是光滑内插法,可以得到光滑而美观的等值线或三维电性图,但其中被光滑掉的局部异常值可能具有物理意义,故失去了真实性。分析表明,与利用克里金插值法的结果(图6-b)相比,用离散光滑插值法计算出来的地球物理模型(图6-a)更合理,基于克里金插值算法的三维地质模型明显光滑掉了顶面的一些蓝色低值及侧面的一些高值(图6-b),而这些信息对于矿体的预测分析具有重要的意义。

(3) 甲玛矿区电性空间结构特征

从大地电磁测深MT三维反演结果可以看出,甲玛矿区地表电性不均匀特征明显(图5、图7),越往深部电阻率越高;高阻异常主要分布在矿区西南部,反映了南部多个岩体及多底沟组灰岩、大理岩的中高阻电性特征;向北东方向延伸的高阻体反映了侵入林布宗组的中酸性侵入岩的空间分布,中低阻异常主要分布在中部—东北部,主要反映了林布宗组的电性特征,局部低阻异常推测为板岩。整体

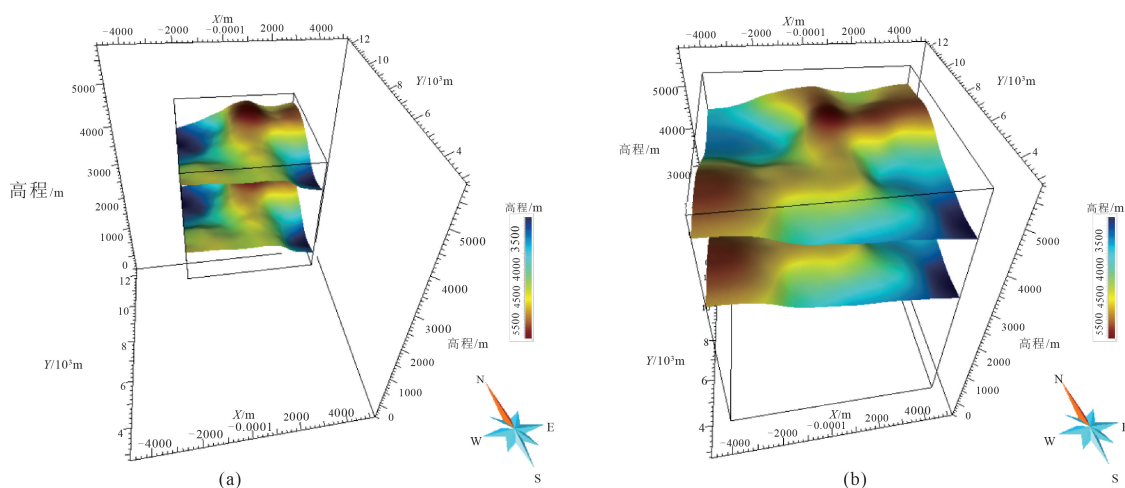


图4 甲玛矿区地层模型框架图

Fig. 4 Frame diagrams of stratum model in the Jiama mining area

a—基于钻孔的大比例尺地层框架;b—基于三维电性模型约束的小比例尺地层框架

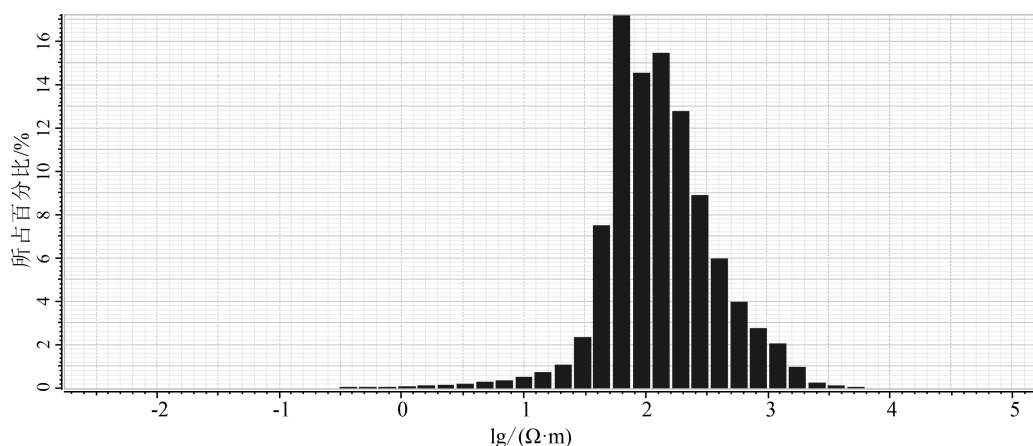


图 5 基于 MT 三维反演的电性数据体电阻率值分布统计图

Fig. 5 Statistical graph of resistivity distribution of electrical data volume based on MT three-dimensional inversion

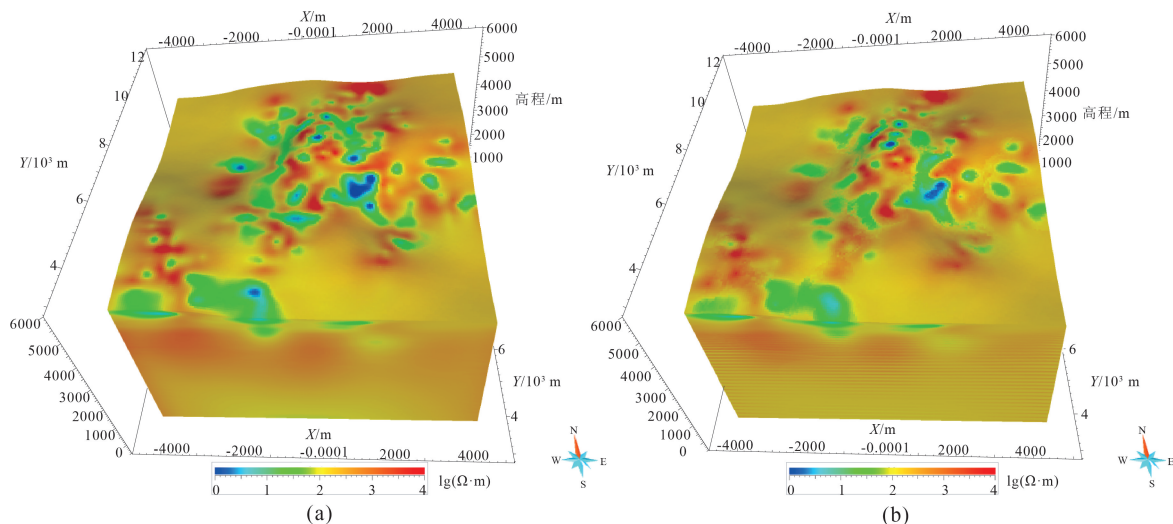


图 6 利用离散光滑插值法 DSI(a)与克里金插值法 Kriging(b)算法得到的 MT 三维电性模型数据体

Fig. 6 MT three-dimensional inversion data volume obtained by DSI(a) and Kriging algorithm(b)

电性特征呈南高北低,多个出露的岩体部位高阻异常特征明显,反映矿区主要构造走向为北西向,整体由东北向西南方向呈逆冲推覆构造。

3.4 岩性模型

在地层框架基础上,根据 45 口钻孔的录井资料,利用随机算法与钻孔间离散光滑插值法,分别建立了岩性地层模型。以随机模拟算法算出的岩性模型图(图 8),可以分析各个岩性之间的接触关系;而离散光滑插值算法,主要依据井的离散数据,可以小范围分析主要岩性的分布状况。

综合随机算法和钻孔间离散光滑插值法建立

岩性地层模型的优势,可以从不同角度分析矿区的岩性分布特征。从图 8、图 9 可以看出,甲玛矿区的花岗闪长斑岩、花岗闪长岩,主要分布在矿区以南及以东区域;角岩集中分布在矿区中部;矽卡岩主要分布在矿区北部,纵向以层状、似层状分布,与矽卡岩成矿模式^[12-13]分析认识一致。

4 基于三维地质建模的成矿靶区预测

4.1 甲玛矿床成因模式

关于甲玛矿床的成因曾存在争议,主要有喷流沉积成因、斑岩-矽卡岩型等观点^[34-36]。应立娟

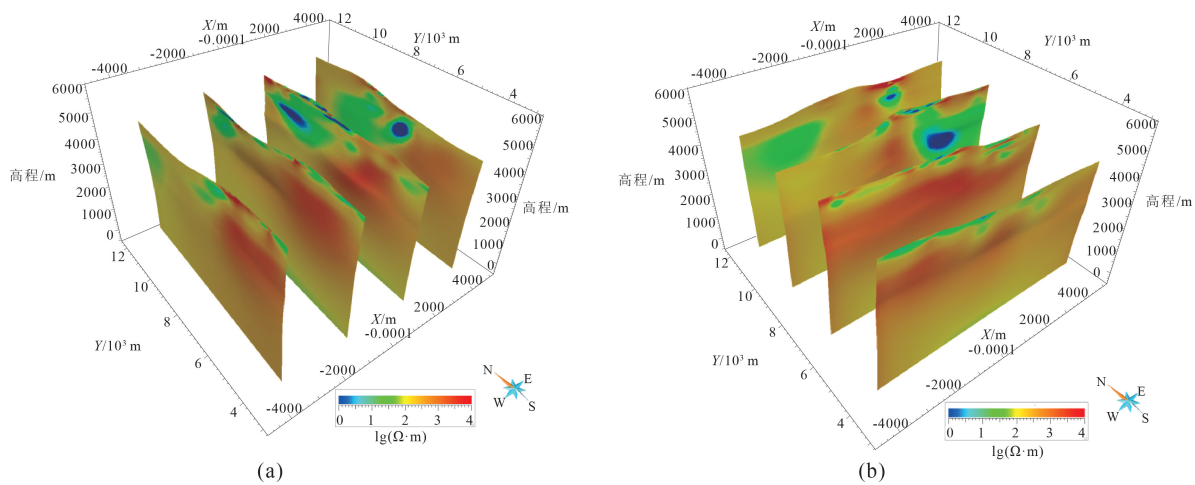


图 7 沿甲玛矿区南北(a)和东西向(b)电阻率模型截面切片

Fig. 7 Sectional slices of the resistivity model along the north-south(a) and east-west(b) directions of the Jiamma mining area

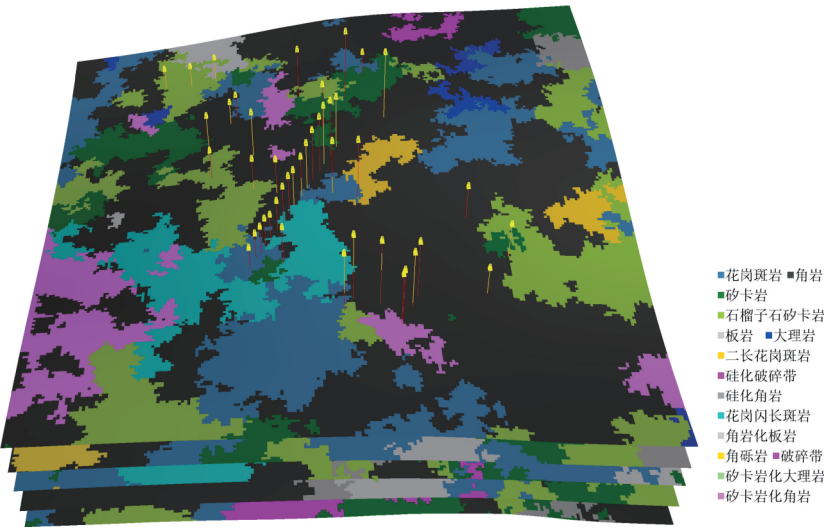


图 8 随机模拟算法建立的岩性体水平切片

Fig. 8 The horizontal slice of the lithological body established by the stochastic simulation algorithm

等^[37]研究了甲玛矿区的石榴子石空间结构特征及其成因,认为甲玛大理岩中的石榴子石主要集中于砂卡岩化强的部位,进一步佐证了甲玛矿床为斑岩-砂卡岩型的观点。

砂卡岩成矿模式是在岩浆热动力和构造应力的驱动下,含矿热液沿先存的林布宗组和多底沟组层间构造带运移且发生侧向逃逸,热液流体顺层选择性交代多底沟组大理岩和灰岩及林布宗组板岩和角岩,导致部分蚀变和矿化呈褶皱形态和条带状构造,在层间滑脱空间形成甲玛层状、似层状砂卡

岩和砂卡岩型铜多金属主矿体^[8, 12-13](图 10)。甲玛矿区的典型特征之一为含矿流体容易在林布宗组砂质板岩、角岩与多底沟组大理岩、灰岩间存在层间滑脱带或褶皱转折端的构造虚脱空间就位,形成砂卡岩型铜多金属主矿体^[9, 13]。

根据上述成矿模式,结合地质钻孔及大地电磁(MT)测量数据体,以及甲玛矿区的成矿地质背景、成矿模式及找矿标志,建立了基于三维地质模型的找矿模型(表 1),主要表现在岩体与地球物理异常 2 个方面。

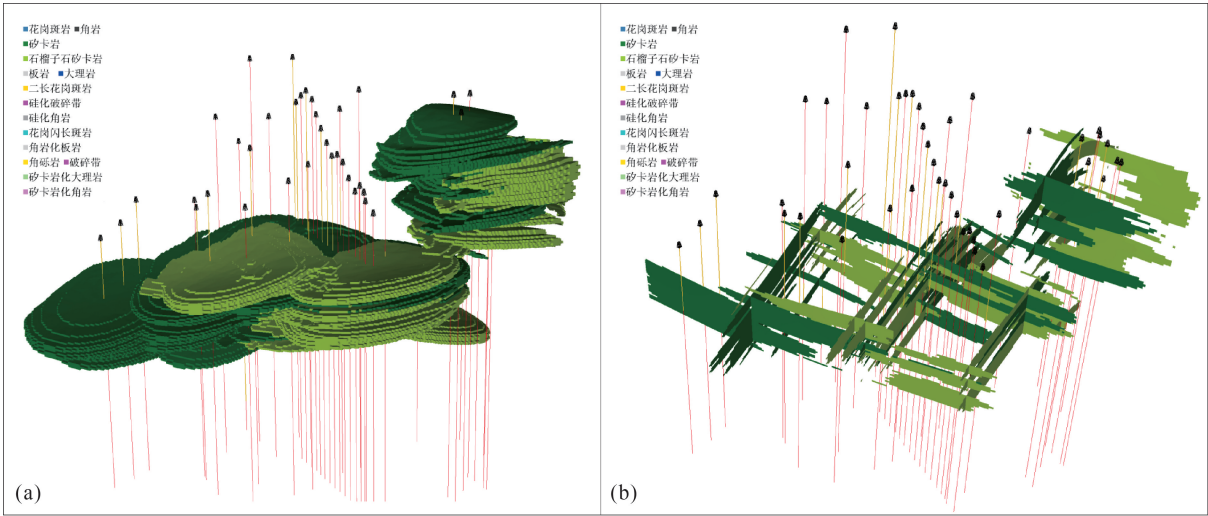


图 9 基于插值算法建立的矽卡岩岩性三维空间结构图

Fig. 9 Three-dimensional spatial structure diagrams of skarn lithology based on interpolation algorithm

a—矽卡岩岩性分布图;b—矽卡岩岩性栅状图

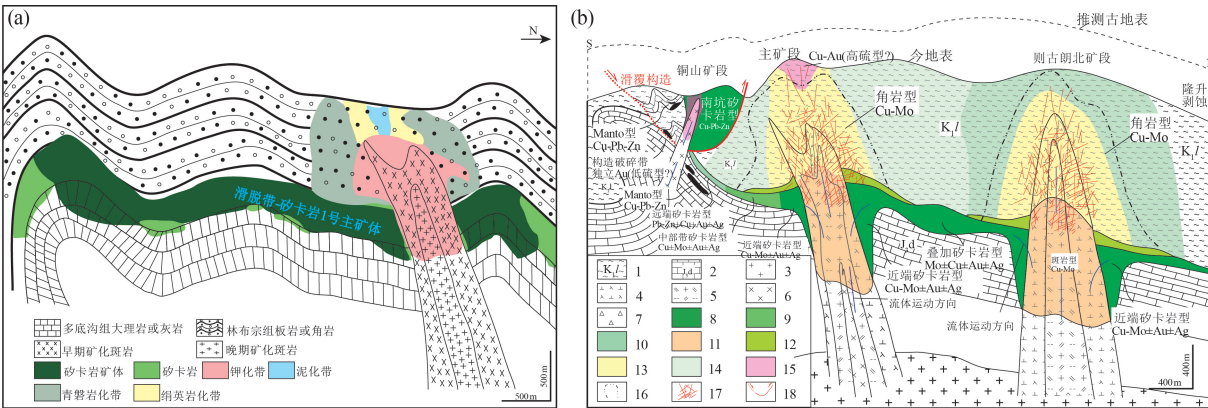


图 10 甲玛矿区矽卡岩成矿模式图

Fig. 10 Skarn metallogenic model in the Jiama mining area

a—甲玛滑脱带矿体模型^[12];b—矽卡岩成矿理论模型^[13,38]

1—林布宗组砂、板岩;2—多底沟组灰岩、大理岩;3—浅部岩浆房;4—花岗闪长斑岩;5—二长花岗斑岩;6—花岗斑岩;7—角砾岩;8—近端矽卡岩;9—中部矽卡岩;10—远端矽卡岩;11—钾硅酸盐岩化;12—绿泥石、绿帘石化;13—绢英岩化、弱泥化;14—角岩化;15—强硅化;16—角岩矿体界线;17—裂隙系统;18—滑覆构造

表 1 甲玛矿区找矿模型

Table 1 Prospecting model of the Jiama mining area

控矿要素	特征描述	变量类型	定量描述
岩体	含矿岩体	成矿有利岩体 影响范围	含矿性较好
地球物理探测	地球物理特征异常	电阻率异常区	电阻率异常值分析

4.2 矽卡岩成矿区预测方法

依据矽卡岩成矿模型,将 MT 二维反演解译结果(图 11-b)与可控源音频大地电磁(CSAMT)二维反演电阻率剖面(图 11-c)进行对比,两者反演的结果较相似。基于三维电性反演的结果(图 6-a),以及二维剖面的地质解译,识别出三维的矽卡岩体(图 12)。屈挺等^[17]根据岩心标本物性测定成果及以往的物性资料(表 2),综合建立甲玛矿区岩石-地质地球物理模型(图 13),岩石-地质地球物理模型

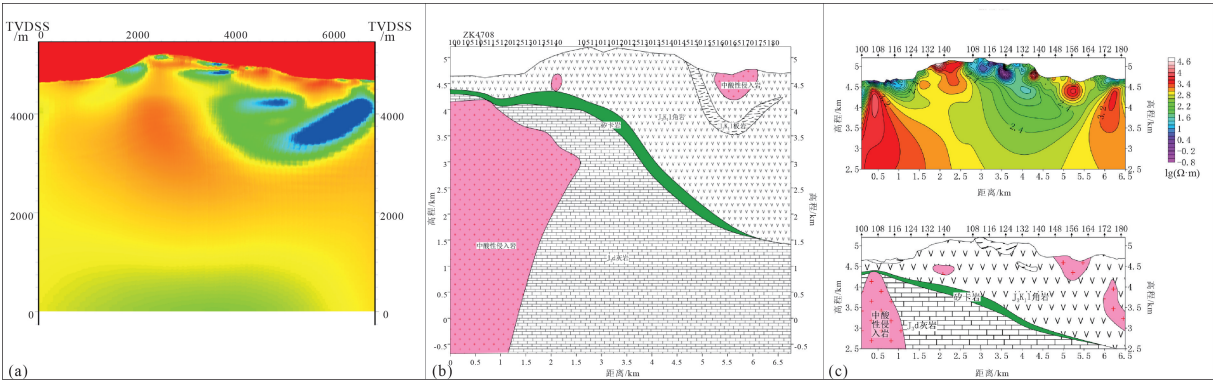


图 11 GH 剖面 MT 三维反演、GH 剖面二维地质解译与 CSAMT 二维反演地质解释图

Fig. 11 MT three-dimensional inversion of GH section, two-dimensional geological interpretation of GH section, and two-dimensional inversion geological interpretation map of CSAMT
a—GH 剖面 MT 三维反演结果; b—GH 剖面 MT 二维反演地质解译结果; c—GH 剖面基于 CSAMT 反演结果(上图为二维反演剖面图;下图为地质解译结果)

能够清晰地反映矿区的主要岩石电阻率、极化率、密度及磁化率特征。

从甲玛矿区岩(矿)石电性参数统计结果(表 3)及岩石-地质地球物理模型(图 13)可见,原岩电阻率较高,蚀变或矿化后的岩石电阻率明显降低,磁黄铁矿及铅多金属矿的电阻率最低。

4.3 矽卡岩成矿潜在靶区

根据上述的岩(矿)石电性特征,在岩性三维模型中,提取电阻率(取对数)属性值范围, $-2.1 \sim 2.6 \lg(\Omega \cdot m)$, 较接近矽卡岩的电性特征,是形成该属

性值的岩性体(图 14)。从图 14 分析,该岩性体主要分布在甲玛矿区的西北部与东部。刻划的矽卡岩体位于该岩性体中东部,将电性特征投到矽卡岩体中,发现岩体的东部有低阻区(图 14)。利用未参与建模的 2020 年完成钻探的甲玛科学深钻 JMKZ-1 的录井资料进行对比验证分析(图 15),其中电性标定显示与岩石地质地球物理模型一致,并将其与刻划的矽卡岩体进行验证,发现与该钻的矽卡岩层吻合(图 12、图 16)。

表 2 甲玛矿区以往岩石物性标本磁性与电性参数统计^[17]
Table 2 Statistics of magnetic and electrical parameters of previous rock samples in the Jiama mining area

岩石 名称	标本 数	$\kappa/(10^{-6} \times 4\pi \cdot SI)$		$J_r/(10^{-3} A/m)$		$\rho/(\Omega \cdot m)$		
		变化		变化		变化		
		范围	平均 值	范围	平均 值	范围	平均 值	离散 值
板岩	30	110~369	248	71~343	194	71~343	102	29.7
角岩	30	518~909	680	74~298	183	71~343	288	64.3
大理岩	30	22~163	91	63~232	155	71~343	1135	56.5
矽卡岩	30	507~969	680	114~535	269	71~343	650	80.8
铜矿体	30	66~361	104	137~321	168	71~343	411	32.6
斑岩	30	244~849	597	63~1361	350	71~343	393	51.3
灰岩	30	44~220	124	34~154	86	71~343	192	33.7

表 3 甲玛-驱龙矿区岩(矿)石电性参数
Table 3 Statistics of electrical parameters of rocks(ores) in the Jiama-Qulong mining area

岩性	样品数量	电阻率/ $(\Omega \cdot m)$
大理岩	7	11888.64
蚀变大理岩	5	3657.07
矽卡岩	6	9952.31
黑云母花岗闪长岩	4	1358.56
黄铁矿化炭质板岩	11	1252.41
钾化花岗斑岩	8	2584.71
凝灰岩(含浸染状黄铁矿)	2	3960.75
凝灰质砂岩(含黄铁矿)	1	22943.72
褐铁矿	3	2271.29
致密块状磁黄铁矿	2	0.45
铅多金属矿	6	4.59

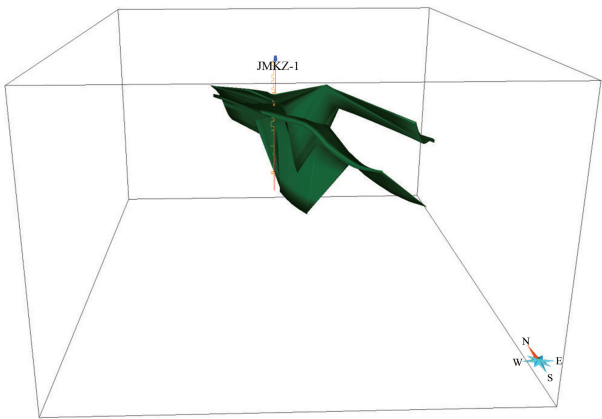


图 12 通过二维地质解译刻划的三维矽卡岩体
Fig. 12 The three-dimensional skarn body portrayed by two-dimensional geological interpretation

因此,本次通过 GOCAD 软件建成的三维地球物理模型、地质建模与地质调查认识具有较好的一致性,将三维模型中矽卡岩的电性特征与岩(矿)石电性、岩石-地质地球物理模型相关联,预测有利成矿带主要分布在矽卡岩的西北部与东部(图 16)。

5 结 论

(1)利用 GOCAD 三维建模软件,以甲玛矿区 45 口钻孔、录井资料及大地电磁三维反演数据体为主要数据载体,通过插值算法中的离散光滑插值法与随机模拟算法,构建了三维地层和地球物理一体可视化模型。通过该模型,精确厘定了甲玛矿区宏观电性特征、岩性展布与构造特征,表明本文建立的基于钻孔、录井及地球物理数据的建模方法正确。

岩性	电阻率/($\Omega\cdot\text{m}$)		岩石-矿(化)体极化率/%		密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^3$)			磁化率/ 10^{-3}SI		物性特征
	8	10	20	40	2.4	2.6	2.8	1	2	
炭质板岩										炭质板岩: 低电阻, 高极化低密度, 无磁性
角岩										角岩: 中低电阻, 中高极化中低密度, 无磁性
硅化角岩										
矽卡岩										矽卡岩: 低电阻, 高极化高密度, 无-弱磁性
灰岩										灰岩: 高电阻, 高极化中高密度, 无磁性
二长花岗斑岩										中酸性侵入岩: 高电阻, 低极化 中低密度, 弱磁性
石英闪长玢岩										
花岗闪长斑岩										

图 13 甲玛矿区岩石地质地球物理模型^[17]
Fig. 13 Geological and geophysical model of the Jiama mining area

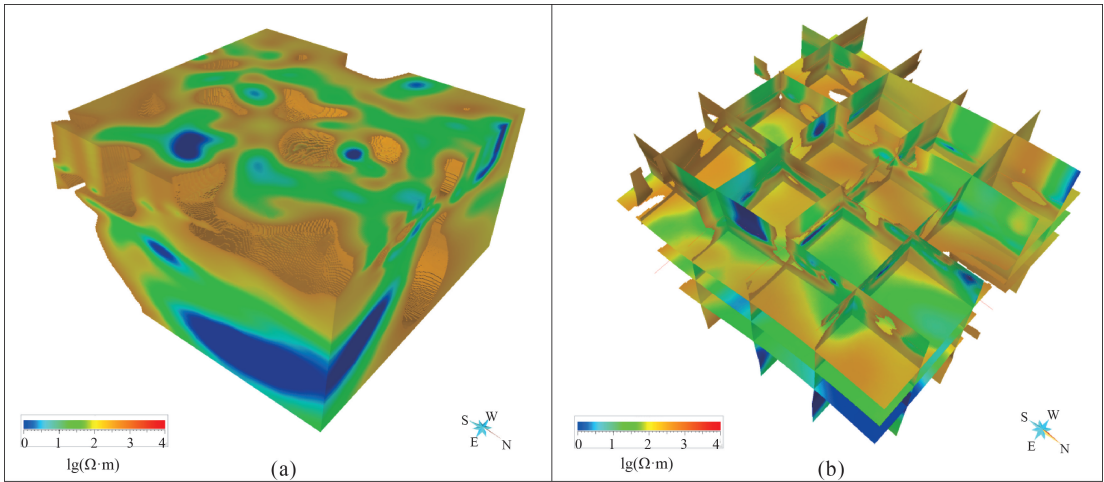


图 14 基于三维地质建模提取属性的岩性体电性三维数据体(a)和栅状分布图(b)
Fig. 14 Electricity distribution of lithology body based on 3D geological modeling extraction attributes(a) and fence diagram(b)

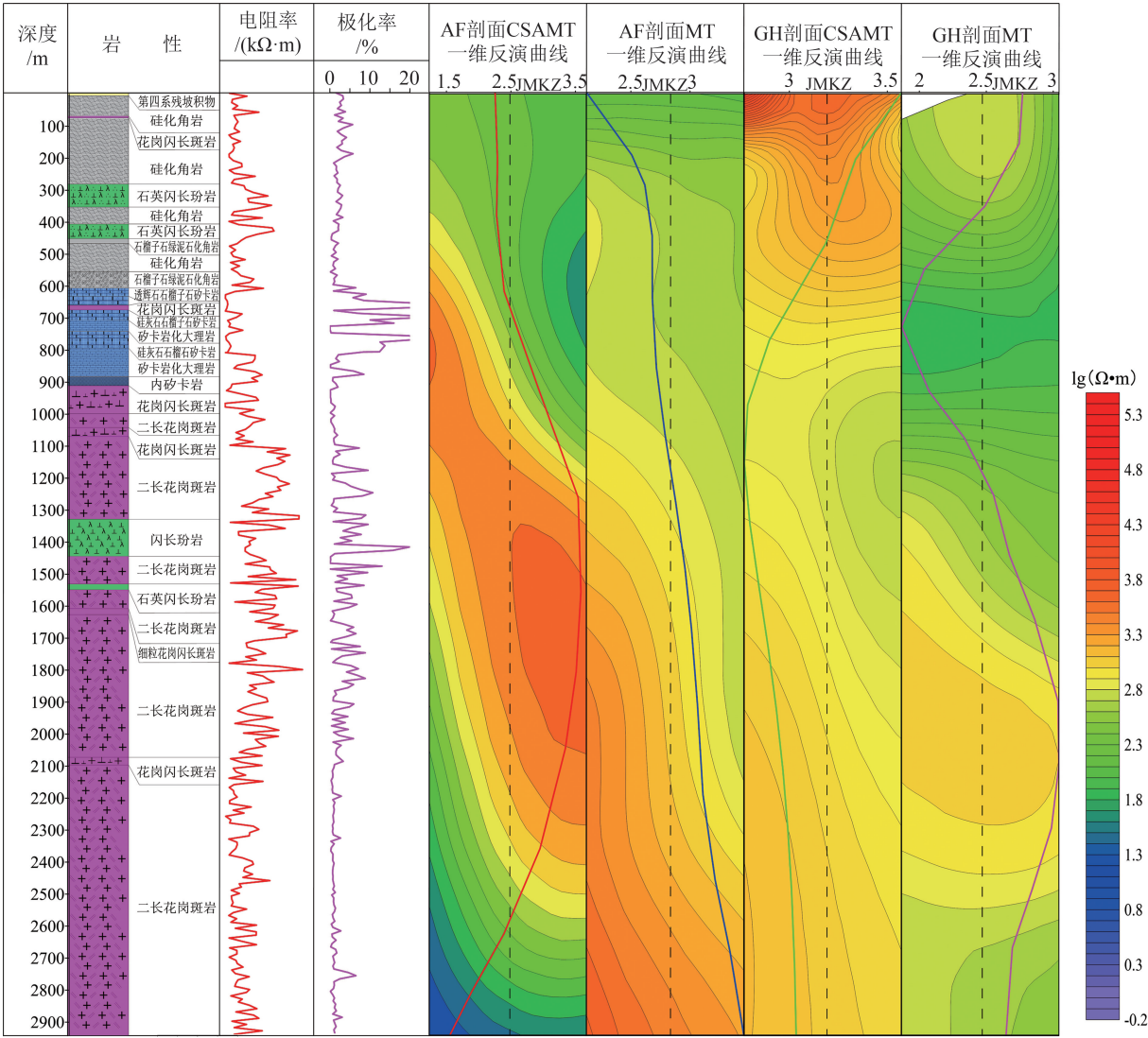


图 15 甲玛科学深钻岩性与电性关系

Fig.15 The relationship between lithology and electrical properties of the JMKZ-1

(2)本文提出了基于随机算法与钻孔间插值法建立的岩性模型,从随机模拟算法分析各个岩性之间的接触关系;通过插值算法和钻孔间离散数据,可以清晰地分析主要岩性的分布特征,是适用于复杂矿集区岩性分布特征的一种交叉分析方法。

(3)在岩性模型中,已知钻孔矽卡岩分布范围的电性主要为中高阻特征。在三维地质模型中,结合矽卡岩成矿模式,刻划出 3000 m 以浅的矽卡岩展布特征。用未参与建模的甲玛深 3000 m 的 JMKZ-1 钻孔资料进行岩性地层和电性验证,结果显示吻合度较好,证实了本次地质建模的正确性和有效性。

(4)通过已有钻孔的岩(矿)石标本的电阻率值与岩石-地质地球物理模型分析认为,矽卡岩的电阻率主要为中低阻,原岩电阻率较高,蚀变或矿化后的岩石电阻率明显降低,磁黄铁矿及铅多金属矿的电阻率最低。

(5)通过建立的三维地质找矿模型,提取电阻率属性($-2.1\sim 2.6\lg(\Omega\cdot m)$)岩性体与预测的矽卡岩电性展布,与岩(矿)石电性特征相关联,预测有利成矿区位于矽卡岩体的西北部 and 东部。

致谢:本文三维建模得到帕拉代姆技术(北京)有限公司马瑞伦和李菊红高级工程师的帮助和支持。

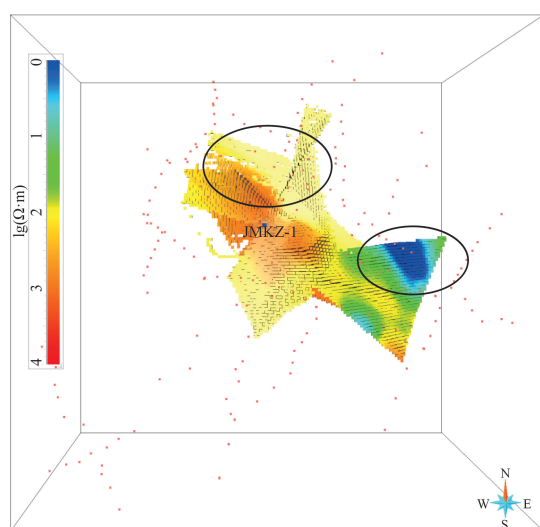


图 16 预测的矽卡岩体电性特征图

Fig.16 The electrical characteristics map of the predicted skarn body

参考文献

- [1] 陈建平,吕鹏,吴文,等.基于三维可视化技术的隐伏矿体预测[J].地学前缘,2007,14(5): 54-62.
- [2] De Kemp E A, Monecke T, Sheshpart M. 3D GIS as a support for mineral discovery[J]. Geochemist. Explor. Environ. Anal., 2011, 11(2): 117-128.
- [3] Rossi M E, Deutsch C V. Mineral Resource Estimation[M]. Springer Science Business Media Dordrecht, 2014: 29-50.
- [4] 陈建平,于森,于萍萍,等.重点成矿带大中比例尺三维地质建模方法与实践[J].地质学报,2014,88(6): 1187-1195.
- [5] 张世辉,陈建国.山东焦家金矿三维地质地球物理建模与深部预测[C]//2018年中国地球科学联合学术年会论文集(四十三).2018.
- [6] Wang C, Wang G W, Liu J J, et al. 3D geochemical modeling for subsurface targets of Dashui Au deposit in Western Qinling(China)[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2019, 203(8): 59-77.
- [7] 耿瑞瑞,范洪海,孙远强,等.基于 GOCAD 软件的沙子江铀矿床三维定量预测[J].矿床地质,2020,39(6): 1078-1090.
- [8] 唐菊兴,邓世林,郑文宝,等.西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿床勘查模型[J].矿床地质,2011,30(2): 179-196.
- [9] 唐菊兴,郑文宝,陈毓川,等.西藏甲玛铜多金属矿床深部斑岩矿体找矿突破及其意义[J].吉林大学学报(地球科学版),2013,43(4): 1100-1108.
- [10] 冷秋锋.西藏甲玛斑岩成矿系统地质特及矽卡岩型厚大富矿体控矿因素研究[D].成都理工大学硕士学位论文,2013.
- [11] 李波,胡道功,林广奇,等.西藏甲玛矿区侵入岩成岩成矿年龄[J].现代地质,2016,30(6): 1234-1242.
- [12] 马士委.藏南甲玛铜多金属矿床构造格架与成矿的关系[D].中国地质科学院博士学位论文,2017.
- [13] Tang J X, Yang H H, Song Y, et al. The copper polymetallic deposits and resource potential in the Tibet Plateau[J]. China Geology, 2021, 4(1): 1-16.
- [14] 郑文宝,陈毓川,唐菊兴,等.西藏墨竹工卡县甲玛矿区筒状矿体的发现及其地质意义[J].矿床地质,2011,30(2): 207-217.
- [15] 宋磊,汪雄武,唐菊兴,等.从喷流成因到斑岩-矽卡岩成矿系统:甲玛铜多金属矿床成功勘查的几点启示[J].矿床地质,2011,30(2): 220-228.
- [16] 王立强,陈伟,林鑫,等.冈底斯成矿带斑岩-矽卡岩矿化之耦合关系——以邦铺矿床为例[J].矿物学报,2013,(S2): 838-839.
- [17] 屈挺,贺日政,鱼鹏亮,等.西藏甲玛矿区岩石物性统计及应用[J].物探与化探,2021,45(3): 1-8.
- [18] 唐菊兴,王登红,汪雄武,等.西藏甲玛铜多金属矿床地质特征及其矿床模型[J].地球学报,2010,31(4): 495-506.
- [19] 曲晓明,侯增谦,黄卫.冈底斯斑岩铜矿(化)带: 西藏第二条“玉龙”铜矿带? [J].矿床地质,2001,(4): 355-366.
- [20] 郑有业,王保生,樊子珩,等.西藏冈底斯东段构造演化及铜金多金属成矿潜力分析[J].地质科技情报,2002,(2): 55-60.
- [21] 李光明,刘波,余宏全,等.西藏冈底斯成矿带南缘喜马拉雅早期成矿作用——来自冲木达铜金矿床的 Re-Os 同位素年龄证据[J].地质通报,2006,35(12): 1481-1486.
- [22] 宋扬,唐菊兴,曲晓明,等.西藏班公湖-怒江成矿带研究进展及一些新认识[J].地球科学进展,2014,29(7): 795-809.
- [23] 李宝龙,彭勃,秦广洲,等.班-怒结合带西段革吉地区帕阿岩基的成因: 元素地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素约束[J].岩石学报,2019,35(3): 687-704.
- [24] 何紫兰,朱鹏飞,马恒,等.基于多源数据融合的相山火山盆地三维地质建模[J].地质与勘探,2018,54(2): 404-414.
- [25] 高乐,卢宇彤,虞鹏鹏,等.成矿区三维可视化与立体定量预测——以钦-杭成矿带庞西洞地区下园洞铅锌矿区为例[J].岩石学报,2017,33(3): 767-778.
- [26] 孙岳,王功文,方同辉,等.新疆红海块状硫化物矿床三维地质建模及勘探应用[J].地质与勘探,2013,49(1): 179-184.
- [27] 杨志华,兰恒星,张永双.基于 GIS-GOCAD 耦合技术的三维地质建模[J].地理与地理信息科学,2012,28(5): 16-20.
- [28] Lu R Q, Liu Y D, Xu X W, et al. Three - Dimensional Model of the Lithospheric Structure Under the Eastern Tibetan Plateau: Implications for the Active Tectonics and Seismic Hazards [J]. Tectonics, 2019, 38(3/4): 1292-1307.
- [29] Lemon A M, Jones N L. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections[J]. Computers & Geosciences, 2003, 29(5): 547-555.
- [30] 屈红刚,潘懋,王勇.基于含拓剖剖面的三维地质建模[J].北京大学学报(自然科学版),2006,42(6): 717-723.

- [31] Kaufmann O, Martin T. 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines [J]. Computers & Geosciences, 2008, 34 (3): 278-290.
- [32] Wu Q, Xu H, Zou X K. An effective method for 3Dgeological modeling with multi-source data integration [J]. Computers & Geosciences, 2005, 31 (1): 35-43.
- [33] 吴胜利. 储层表征与建模[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013.
- [34] 杜光树, 姚鹏, 潘凤雏, 等. 喷流成因砂卡岩与成矿——以西藏甲马铜多金属矿床为例[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1998: 82-113.
- [35] Hou Z Q, Yang Z M, Qu X M, et al. The Miocene Gangdese porphyry copper belt generated during post-collisional extension in the Tibetan Orogen[J]. Ore Geology Reviews, 2009, 36(1/3): 25-51.
- [36] 唐菊兴, 陈毓川, 多吉, 等. 西藏冈底斯成矿带东段主要矿床类型、成矿规律和找矿评价[J]. 矿物学报, 2009, 29(S1): 476-478.
- [37] 应立娟, 唐菊兴, 王登红, 等. 西藏甲玛超大型铜矿石榴子石特征及成因意义[J]. 地质学报, 2012, 86(11): 1735-1747.
- [38] 林彬, 唐菊兴, 唐攀, 等. 斑岩成矿系统多中心复合成矿作用模型——以西藏甲玛超大型矿床为例[J]. 矿床地质, 2019, 38(6): 1204-1222.
- ①唐菊兴, 王立强. 青藏高原首个固体矿产勘查领域 3000 米科学深钻胜利竣工. 中国地质调查局, 2020.

《地质通报》第 41 卷第 1 期要目预告

非洲大陆构造单元划分	胡鹏等
非洲大陆岩石圈演化与成矿关系	邱瑞照等
赞比亚东北部陇都地区首次发现中元古代辉长岩: 哥伦比亚超大陆裂解在班韦乌卢地块的响应	古阿雷等
EZEKIAH Chikambwe EVARISTO Kasumba 东北非造山型金矿床与中国同类矿床的对比	曾国平等
南部非洲锰矿成矿规律与资源潜力	孙宏伟等
利比里亚金矿成矿地质背景与资源潜力	陈冲等
西非金矿床类型及时空分布规律	姜军胜等
东北非地区地层区划及其地层格架与对比	王成刚等
东北非重要铜金矿产资源分布及赋存形式	李福林等
东北非地区 VMS 矿床地质特征与研究进展	向文帅等
几内亚优势金属矿产地质特征、成矿作用及开发现状	张海坤等
刚果(金)矿产资源与矿业投资环境	卢宜冠等
尼日利亚矿产资源开发现状及投资环境	曹亮等
莫桑比克矿产资源特征及投资环境	董津蒙等