赵忠海,崔晓梦,孙景贵,等.基于三维地质-地球物理建模的深部成矿预测:以黑河地区永新金矿床为例.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(2):498-515.doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20210124.
Zhao Zhonghai,Cui Xiaomeng,Sun Jinggui,et al. Deep Metallogenic Prediction Based on 3D Geological-Geophysical Model: A Case Study of Yongxin Gold Deposit in Heihe Area. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2024,54(2):498-515.doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20210124.

基于三维地质-地球物理建模的深部成矿预测——以黑河地区永新金矿床为例

赵忠海[1],崔晓梦[1],孙景贵[2],陈 俊[1],乔 锴[1],梁杉杉[1],Manirambona Alain Jospin[1]

1.辽宁工程技术大学矿业学院,辽宁 阜新 123000
2.吉林大学地球科学学院,长春 130061

摘要:黑龙江省永新金矿床位于兴蒙造山带东段的兴安地块和松嫩地块交会拼合部位,是近几年新发现的大型金矿床。为了深入探讨永新金矿床外围及深部的成矿潜力,首先在典型矿床分析和音频大地电磁测深以及重磁联合剖面基础上,利用三维地质建模软件Creatar XModeling构建了区域和矿床三维地质模型,刻画了主要控矿地质体三维形态,揭示了区内深部构造地质特征、矿体空间分布特点及与各地质要素之间的关系。然后,采用立方体预测模型找矿方法,依据证据权法对研究区地质、地球物理等多源信息进行融合,圈定了8处深部找矿预测靶区。部分深部靶区钻孔发现了多处矿化信息,验证了本次深部预测的准确性和可靠性,指示研究区深部仍具有较大的成矿空间和潜力。

关键词:三维地质建模;地质-地球物理模型;深部成矿预测;永新金矿床
doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20210124 **中图分类号**:P612;P618.51 **文献标志码**:A

Deep Metallogenic Prediction Based on 3D Geological-Geophysical Model: A Case Study of Yongxin Gold Deposit in Heihe Area

Zhao Zhonghai[1], Cui Xiaomeng[1], Sun Jinggui[2], Chen Jun[1], Qiao Kai[1], Liang Shanshan[1], Manirambona Alain Jospin[1]

1. *College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin* 123000, *Liaoning, China*
2. *College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun* 130061, *China*

收稿日期:2023-04-18

作者简介:赵忠海(1984—),男,副教授,博士生导师,主要从事区域地质调查及矿床学方面的研究,E-mail:zhaozhonghai@lntu.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0601306);国家自然科学基金项目(42372108);辽宁省教育厅科学研究经费项目(LJ2020JCL010);辽宁工程技术大学学科创新团队资助项目(LNTU20TD-14)
Supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFC0601306), the Natural Science Foundation of China (42372108), the Scientific Research Fund Project of the Educational Department of Liaoning Provincial (LJ2020JCL010) and the Project Supported by Discipline Innovation Team of Liaoning Technical University (LNTU20TD-14)

Abstract: Heilongjiang Yongxin gold deposit is located at the intersection of the Xing'an and Songnen blocks in the eastern section of the Xingmeng orogenic belt. It is a large-scale gold deposit newly discovered. In order to in-depth explore the metallogenic potential of the periphery and depth of the Yongxin gold deposit, based on the analysis of typical deposits, audio-frequency magnetotelluric sounding and combined gravity and magnetic profiles, the three-dimensional geological modeling software Creatar XModeling was used to construct three geological model models of the region and the deposit. The three-dimensional morphology of the main ore-controlling geological bodies was depicted, and the deep structural geological characteristics of the area, the spatial distribution characteristics of the ore bodies, and the relationship with geological elements were revealed. Then, using the cube prediction model prospecting method, according to the weight of evidence method, multi-source information such as geology and geophysics of the study area was fused, eight deep prospecting prediction targets were delineated. The drilling verification of some of these deep targets area obtained multiple mineralization information, which verified the accuracy and reliability of this deep prediction, indicating significant metallogenic potential in the deep part of the study area.

Key words: 3D geological modeling; geological-geophysical model; deep metallogenic prediction; Yongxin gold deposit

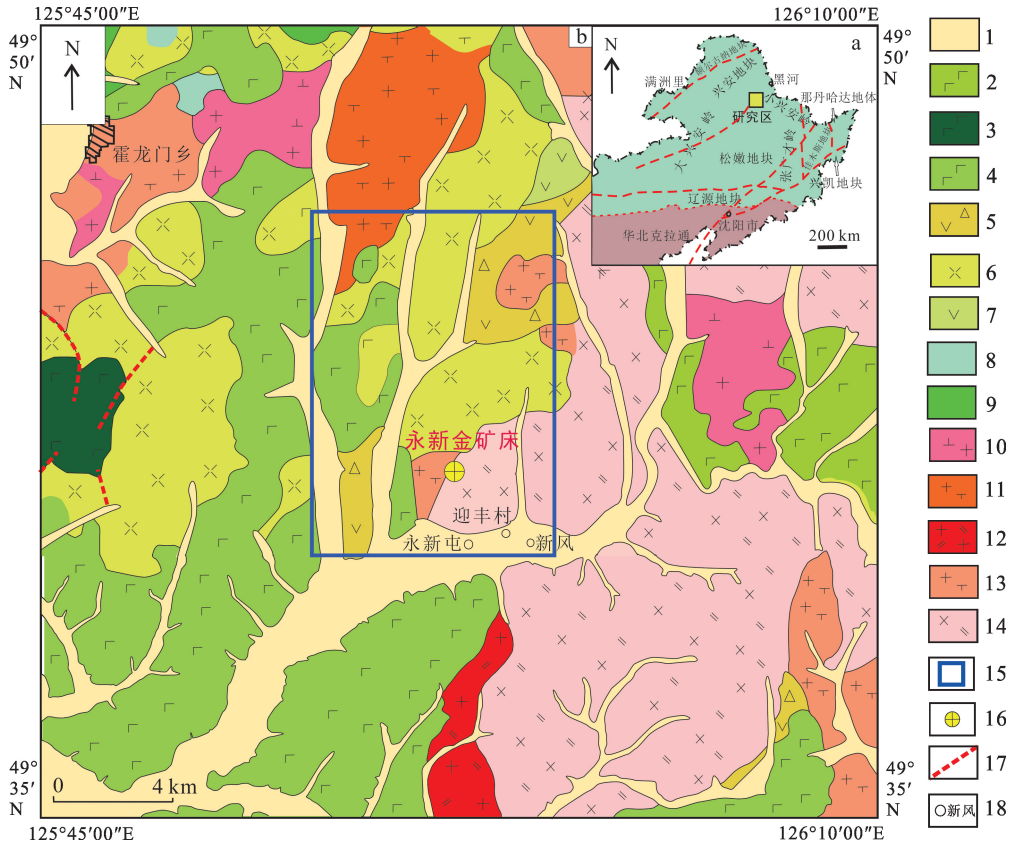
0　引言

伴随社会进程的快速发展，人类对矿产资源的需求量与日俱增，但地表矿、浅部矿因大量开发而日益枯竭，人类未来矿产勘查的重要目标和重点研究方向已转向对隐伏矿、深部矿的预测和寻找[1-3]。目前，基于计算机技术及三维空间数据处理技术的不断深入发展，采用三维地质模型进行隐伏矿、深部矿的寻找已经成为矿产勘查领域的难点和热点，国内外学者相继开展了大量研究工作[4-5]。如国外学者 Payne 等[6]通过对地质、地球物理等资料综合分析，借助 GOCAD 软件建立了 Taupo 地区的三维地质模型，对该区热液型金矿床进行了成矿预测评价，证实了该区深部具有较大的找矿潜力；Hamedani 等[7]根据已知信息建立了西澳大利亚 Broken Hill 矿床的三维预测模型，并将该模型用于锌、铅硫化物矿床的成矿预测，取得了良好的找矿效果；Bellefleur 等[8]依据对 Rouyn-Noranda 地区建立的三维地质模型，结合地震成像数据，分析了深层火山硫化物(VMS)矿床的成矿特征和深部矿体展布状态。国内学者肖克炎等[9]提出了大比例尺三维预测工作流程，结合成矿理论建立了立方体预测模型，并进行了矿体定位定量预测；毛先成等[10]提出“地质信息集成-成矿信息定量提取-立体定量预测”预测流程，并以广西大厂锡多金属矿床为例，完成了对隐伏矿体的立体定量预测；陈建平等[11]利用三维可视化技术，结合找矿信息量法确定了云南个旧锡矿床的深部有利成矿靶区，表明了应用三维可视化技术进行隐伏矿体三维定量、定位和定概率的有效性。以上研究表明，三维地质建模与深部找矿预测理论在众多研究项目中取得了显著成果并得到了广泛的应用。

本次研究以永新金矿床为例，选用三维地质建模技术，结合区域成矿特征及深部物探工作，建立了研究区三维地质-地球物理模型。基于典型矿床的研究成果，采用立方体预测模型找矿方法，对研究区开展了深部找矿预测靶区圈定，并通过靶区验证，有效识别了多处矿致异常信息，验证了本次深部预测的准确性和可行性，表明了研究区深部仍具有较大的成矿空间和潜力。

1　地质背景

研究区位于黑龙江省小兴安岭西北部，大地构造位于兴蒙造山带东段的兴安地块和松嫩地块交会拼合部位[12-15](图 1a)。区域出露的地层主要有古生代多宝山组和裸河组。其中：多宝山组岩性主要为蚀变安山岩、安山质凝灰岩及英安岩；裸河组为一套互层的砂板岩。中生代火山岩主要为早白垩世龙江组、光华组、甘河组的流纹岩、安山岩、玄武岩及火山碎屑岩等；新生代地层主要为分布在测区东部呈北西向展布的大熊山玄武岩。区内侵入岩比较发育，主要形成于早石炭世、晚石炭世和中侏罗世。早



1. 第四系;2. 大熊山玄武岩;3. 西山玄武岩;4. 甘河组;5. 九峰山组;6. 光华组;7. 龙江组;8. 裸河组;9. 多宝山组;10. 中侏罗世花岗闪长岩;11. 早石炭世正长花岗岩;12. 晚石炭世二长花岗岩;13. 晚石炭世正长花岗岩;14. 晚石炭世花岗质糜棱岩;15. 研究区范围;16. 永新金矿床;17. 推测断层;18. 地名。

图1 研究区大地构造位置图(a)及地质简图(b)

Fig.1 Tectonic map (a) and geological sketch map (b) of the study area

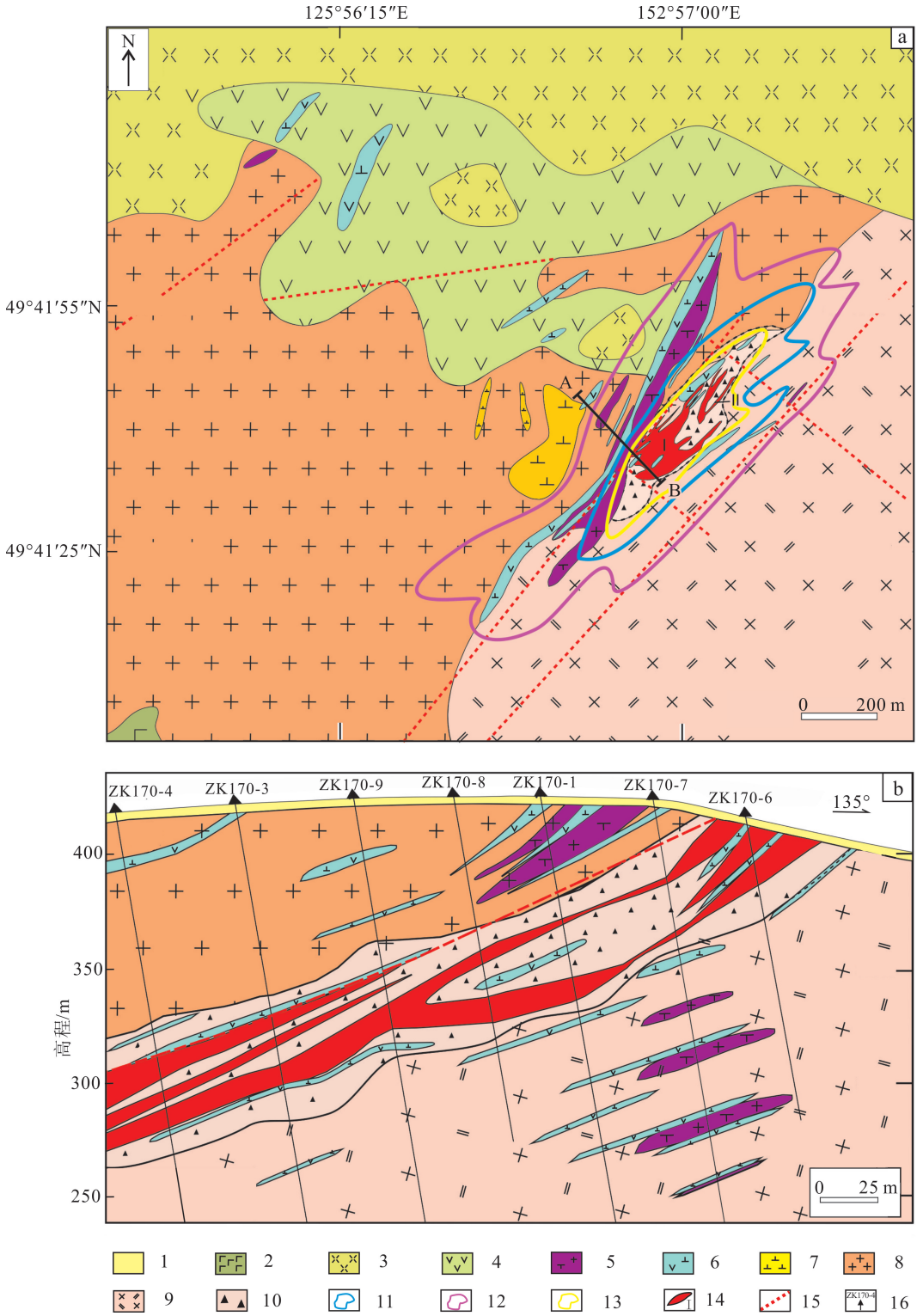
石炭世正长花岗岩分布在研究区域的北部;晚石炭世侵入岩分布广泛,划分为晚石炭世正长花岗岩、晚石炭世二长花岗岩和花岗质糜棱岩;中侏罗世花岗闪长岩出露面积较小,零星分布于研究区附近的西北部和东部(图1b)。区内断裂构造以北东向和北西向为主,其中北东向深大断裂构造是区内主要的控岩、控矿构造,为地质体的空间展布、岩浆的侵入就位及含矿热液运移的主要通道,北西向次级断裂是金及多金属矿产的主要容矿和导矿构造,矿(化)体、蚀变带多沿北东向、北西向裂隙分布[16-18]。

2 矿床地质特征

永新金矿床位于嫩江县东北方向70 km,大地构造位置处于中亚造山带东段、多宝山岛弧带中,为东乌珠穆沁旗—嫩江铜钼铅锌金钨锡铬成矿带的北段,属于大兴安岭中段北东向铁钨银金钼铜成矿带的一部分,是最近几年发现的又一浅成低温热液型金矿床[19-21]。截至目前已探明金资源储量近20 t,已达到大型,矿床平均品位4.10 g/t。

矿区地层出露较为简单,从下到上依次为龙江组、光华组和甘河组。龙江组岩性主要有安山岩、粗面岩、英安岩和流纹岩等;光华组岩性主要为英安岩、流纹岩和流纹质凝灰岩等;甘河组少量出露,岩性以安山玄武岩和气孔状玄武岩为主。这些早白垩世火山岩喷发不整合覆盖在矿区正长花岗岩、花岗质糜棱岩及花岗闪长岩之上,其中永新金矿床所在地区处在早白垩世火山盆地边缘地带区域内。环状火山机构发育良好,呈环带状围绕火山中心分布。该矿床与早白垩世出露的中—酸性火山岩-次火山岩,特别是呈脉状产出的闪长玢岩、花岗斑岩等岩脉有密切的成因和空间关系(图2)。

永新金矿床共划分了2条金矿体,金矿体受控于北东向张性断裂带,主要赋存在晚石炭世正长花岗岩与花岗质糜棱岩接触部位。矿体总体呈北东向



1. 第四系；2. 下白垩统甘河组；3. 下白垩统光华组；4. 下白垩统龙江组；5. 早白垩世花岗斑岩；6. 早白垩世闪长玢岩；7. 中侏罗世花岗闪长岩；8. 晚石炭世正长花岗岩；9. 晚石炭世花岗质糜棱岩；10. 热液角砾岩带；11. 硅化蚀变带；12. 绢云母化蚀变带；13. 钾化蚀变带；14. 矿体及编号；15. 断裂；16. 钻孔及孔号。

图 2　永新金矿床地质简图(a)和永新金矿床 170 勘探线剖面图(b)

Fig.2　Geological map of Yongxin gold deposit (a) and profile of 170 exploration line of Yongxin gold deposit (b)

展布,平面上2条金矿体大体平行排列,剖面上矿体呈舒缓波状产出,局部矿体呈尖灭再现(图2)。主要矿石类型以热液胶结角砾岩型为主,其次为石英脉型和蚀变岩型(地表氧化矿),偶见有少量糜棱岩型。矿石矿物主要包括黄铁矿、闪锌矿、方铅矿和少量自然金;脉石矿物主要包括石英、钾长石、方解石、绢云母、绿泥石、绿帘石和少量冰长石等。围岩蚀变类型主要包括钾长石化、硅化、绢云母化、高岭石化、碳酸盐化、绿泥石化和局部冰长石化等,其中硅化与金矿化关系最为密切。成矿过程划分为无矿石英-钾长石阶段(Ⅰ)、灰色石英-黄铁矿阶段(Ⅱ)、灰黑色石英-多金属硫化物阶段(Ⅲ)和石英-方解石(Ⅳ)4个成矿阶段[22-24]。

3 物性特征

岩石物性可作为地球物理结果解释的重要依据。本次采集及测定密度参数岩石样本284块、电性参数岩石样本305块以及磁性参数岩石样本200块。研究区的物性参数(表1)显示矿区地层与岩体之间电阻率、密度、磁性差异明显,岩体电阻率在1 437.60~6 641.00 Ω·m之间。侵入岩中以花岗闪长岩和晚石炭世花岗质糜棱岩电阻率较高,分别为5 251.90 Ω·m和4 095.20 Ω·m。中生代光华组、九峰山组主体为安山岩,总体表现为低阻,平均值较低。

表1 研究区岩石物性参数

Table 1 Rock physical parameters in the study area

	岩性	电阻率/(Ω·m)	磁化率平均值/(10^{-6}SI)	密度平均值/(g/cm^3)
侵入岩	正长花岗岩	1 437.60	3 597.70	2.53
	花岗闪长岩	5 251.90	5 463.40	2.58
	花岗质糜棱岩	4 095.20	2 933.10	2.57
	闪长玢岩	6 641.00	1 369.20	2.75
	碱性花岗岩	1 749.80	2 773.60	2.57
	花岗斑岩	1 883.00	3 071.40	2.47
	闪长岩	6 118.20	1 031.20	2.70
火山岩	气孔状玄武岩	208.80	2 186.40	2.36
	致密状玄武岩	803.90	11 268.20	2.60
	安山岩	154.70	7 869.30	2.63
	英安岩	335.30	11 301.30	2.55
	流纹质凝灰岩	173.20	3 629.90	2.42
	块状玄武岩	621.30	6 087.40	2.53
	英安质凝灰岩	352.70	4 637.20	2.66
沉积岩	砂岩	4 206.10	88.20	2.49

火山岩地层磁性变化明显,以甘河组、龙江组和光华组磁性最强,英安岩平均磁化率可达11 301.30×10^{-6}SI。侵入岩中以花岗闪长岩磁性最强,石炭纪正长花岗岩磁性次之。

侵入岩中基性岩类密度较高,正长花岗岩平均密度为2.53 g/cm^3。研究区内侵入岩总体表现为高阻、偏弱磁性,火山岩总体表现为低阻、偏强磁性,两者在电阻率、密度和磁化率方面存在明显的差异,为研究区岩体识别提供了重要依据。

4 三维地质建模

三维地质模型是三维成矿预测的重要载体,可实现深部地质体的可视化和透明化,能够直观揭示区域深部地质的空间几何形态和构造样式。现阶段,随深部成矿理论和建模软硬件的蓬勃发展,在研究程度较高的地区,三维实体建模可满足成矿预测精度的要求[25-28]。

本次三维地质建模软件采用北京超维创想信息技术有限公司自主研发的地学三维应用软件平台Creatar XModeling[29],该软件具备强大的空间信息管理、空间分析与预测能力以及处理各种复杂地质构造的建模能力,能够实现多源建模方法融合和多种方式数据输出,在找矿预测和靶区圈定方面表现出良好的效果[30]。同时,运用Creatar XModeling矿产预测模块将证据权法应用于建模自动计算过程中,通过人机交互式操作,可实现快速、准确、有意义的区域三维地质建模。本次建模构建了研究区地层、构造、岩体和已知矿体的三维实体模型,为分析地质体空间分布规律及成矿有利信息的提取提供了模型基础。

4.1 三维地质-地球物理建模流程

本文根据研究区复杂的地质构造环境,建模方法选用复杂式交互建模,该方法的建模流程大致如下(图3):①建立三维地质勘探工程数据库。即充分收集研究区地质图、勘探线剖面图、钻孔柱状图、音频大地电磁测深(AMT)剖面等数据资料,然后对资料进行属性分类和数据准确性、可靠性分析,将其导入到工程数据库中进行管理。②实现数据格式标准化。将原始剖面数据输入MapGIS,利用MapGIS软件将原始数据转换为MapGIS数据格式和坐标,

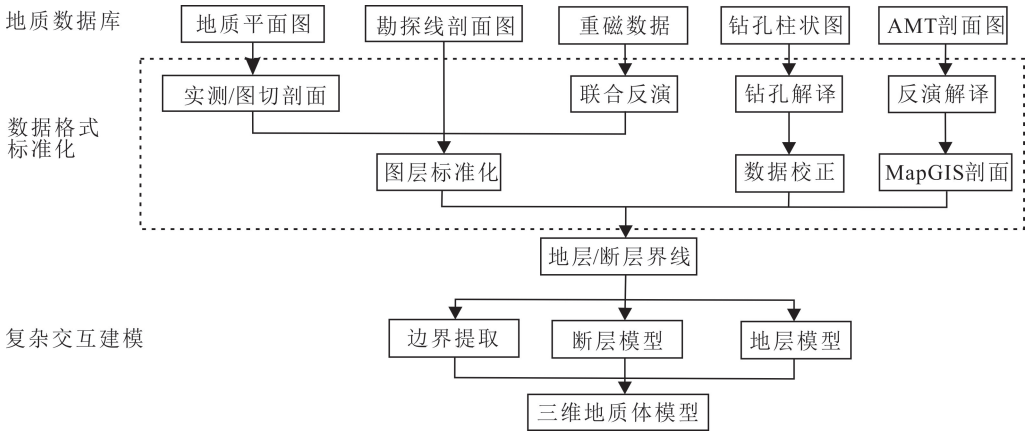


图 3　三维地质-地球物理建模流程图

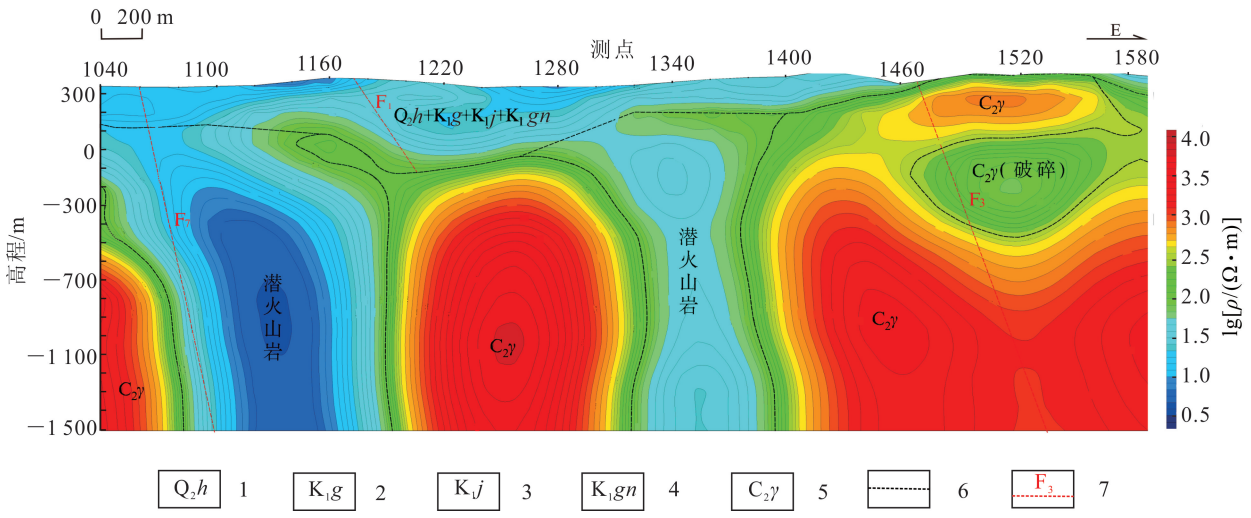
Fig.3　Flow chart of 3D geological-geophysical modeling

依次完成图层标准化和坐标系转换；表格数据按照 Creatar XModeling 软件要求制作标准属性表、属性表字段设计，解决数据格式一致性问题，实现数据格式标准化。③完成复杂交互建模。以点-线-面-体为思路，提取 MapGIS 剖面里的地层、断层界线，建立地质边界模型；根据断层边界信息，增加走向、倾向约束，生成断层面，之后利用插值技术生成被断层错动的地层面；将地层面封闭成相应的地层体，完成地质体建模。

4.2　三维地质体建模

三维地质体建模是在三维环境下，采用适当的数据结构，运用现代空间信息理论和计算机技术，将空间信息管理、地质解译、空间分析和预测、地学统计、实体内容分析以及图形可视化等工具结合起来，研究地质体几何结构及其内部物理特性等地质信息的技术[31-32]。

三维地质建模中，所需的深部地质信息是传统的地质勘查方法很难获得的，为了探究研究区的深部成矿地质特征，本次研究开展了 25 条 AMT 剖面，剖面范围为 100 km^2，深度为 1 500 m，呈东西走向，网度为 500 m×200 m。AMT 剖面数据处理与反演结果显示，视电阻率断面存在明显的高低阻差异(500 Ω·m 为高阻和低阻的分界线)，以 715 线为例(图4)：715线在近地表形成低阻层，电阻率为



1. 第四系；2. 甘河组；3. 九峰山组；4. 光华组；5. 晚石炭世花岗质糜棱岩；6. 推测地质界线；7. 推测断裂及编号。

图 4　715 线音频大地电磁测深反演解译图

Fig.4　715 Line audio magnetotelluric sounding inversion interpretation diagram

25～500 Ω·m。1040—1180点和1300—1380点形成由断层底部到地表的直立低阻带,与1220—1300点和1400—1580点断面下部存在的完整高阻层形成明显界限。根据地层出露情况推测,近地表低阻层由低河漫滩堆积层、岩石风化壳、中生代火山岩引起。1040—1180点低阻带与两侧剖面线并无对应关系,因此推测此处低阻可能由潜火山岩所引起或为甘河期火山喷发通道。1300—1380点直立低阻带与地表甘河组分布对应,推断可能为甘河期潜火山岩;1220—1300点和1400—1580点被直立低阻带分离成两个独立的高阻体,最高电阻率分别为25 119和7 943 Ω·m,由于电阻率较高,同时考虑与地表地层分布的对应可能性,推测二者可能由花岗质糜棱岩引起。采用相同的方法,对每个剖面的物性特征及电阻率反演断面的特征进行综合分析,初步解译反演了各地质体界线。

使用多源数据约束可以明显减少反演的多解性,更精确完整地认识深部地质结构[33],为提取更为精确的各类地质界线提供依据。本次建模采用以AMT剖面解译成果为主,同时开展1∶5万区域重力调查以及重磁联合剖面测量工作,采用钻孔数据、重磁联合剖面等多源数据融合方法,对各剖面数据进行解译和反演处理[34-35]。以765线为例(图5):首先依据RGIS软件强大的反演模拟计算功能,将实测勘探数据导入RGIS软件中生成实测线,以AMT稳定可靠的反演结果作为重磁反演的参考模型,推断岩体的初始形态;然后以地质条件、岩石物性特征、钻孔数据等作为约束条件,对初始模型进一步优化,为模型产生的理论异常与实测异常进行拟合提供最优参数,使模拟结果的均方差达到目标要求,均方差越小,表示模拟结果越好,越能反映地质体的宏观分布特征;最后对所提供模型物性特征、几何参数的空间分布以及研究区勘查所获取的钻探、探槽等各类数据进行对比、校正、集成分析和处理,去粗取精,去伪存真,完成各AMT剖面地质界线的提取。

在获得剖面地质界线的基础上,将解译得到的25条AMT剖面在MapGIS软件中进行矢量化。首先对已有的MapGIS格式剖面文件进行拓扑错误检查和去除,并在区要素中添加地层属性,生成区文件;再读取每条剖面的起始终止经纬度坐标和高程,确定不少于2个控制点,以此为依据在XModeling中进行剖面三维转换;然后在转换后的三维剖面上将各类地质界线按属性要求连接成体,并逐一对所构建出来的地层体进行校验,清除零厚度位置的地层体,以此最大程度提高建模的准确性,保证三维地质-地球物理模型的精度,最终完成模型的构建(图6)。主要地质单元及地质体三维结构如图7所示。三维地质-地球物理模型的建立,实现了在三维空间上对地质体单元的分布、形态的复制和三维多源数据的一体化表达,为构建预测模型和开展深部成矿预测提供模型基础。

4.3 永新金矿床地质及矿体建模

永新金矿床矿体模型主要根据矿区内控制矿体的主要勘探线剖面图、地表槽探和钻孔数据等资料建立。建模深度约为490 m,面积约为1.0 km^2。建模方法与研究区三维地质建模方法一致,区别在于系统自动识别矿体及围岩时可能存在偏差,需要将原始钻孔数据和勘探剖面对矿体轮廓线进行校正和提取,根据剖面情况连接属性相同的矿体,生成矿体模型,并为确保矿体模型的精确度,将矿体两侧外推尖灭,完成矿体建模(图8)。对矿体、岩体、钻孔等模型进行叠合,立体再现了矿体赋存的空间分布特征,更加直观地显示了矿体与围岩间的相互关系,为隐伏矿体推断提供了线索,为有利因子的提取提供参考。

5 三维成矿预测

三维成矿预测是在典型矿床研究成果的基础上,总结有利成矿条件,借助立方体预测模型找矿方法对各成矿有利条件进行三维立方体提取;采用证据权法实现深部矿体的三维成矿条件分析,进而确定成矿有利区间,圈定找矿靶区,实现深部找矿预测[36-37]。

5.1 典型矿床研究

在前人研究的基础上,对永新金矿床成矿地质体、成矿结构面以及成矿作用特征标志综合分析,并结合该区物探异常等特征,总结了永新金矿"三位一体"综合找矿预测模型(表2)。

5.2 立方体预测模型找矿方法

立方体预测模型找矿方法是借助已有数学地质、成矿预测理论为指导,采用计算机三维地质建模的新方法、新手段,实现了传统的二维找矿向三维空间的新突破[38-39]。众多学者对立方体预测模型隐

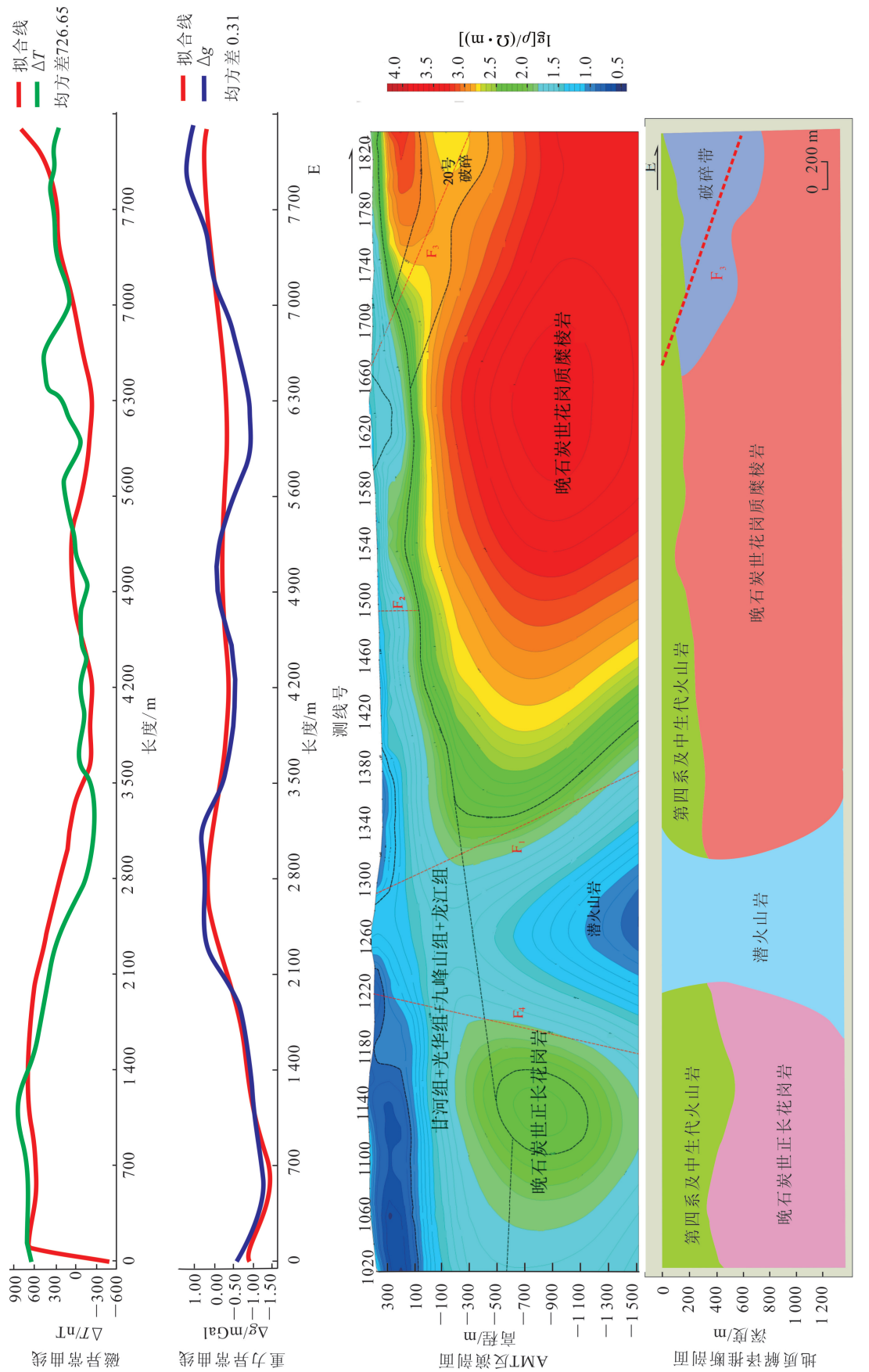
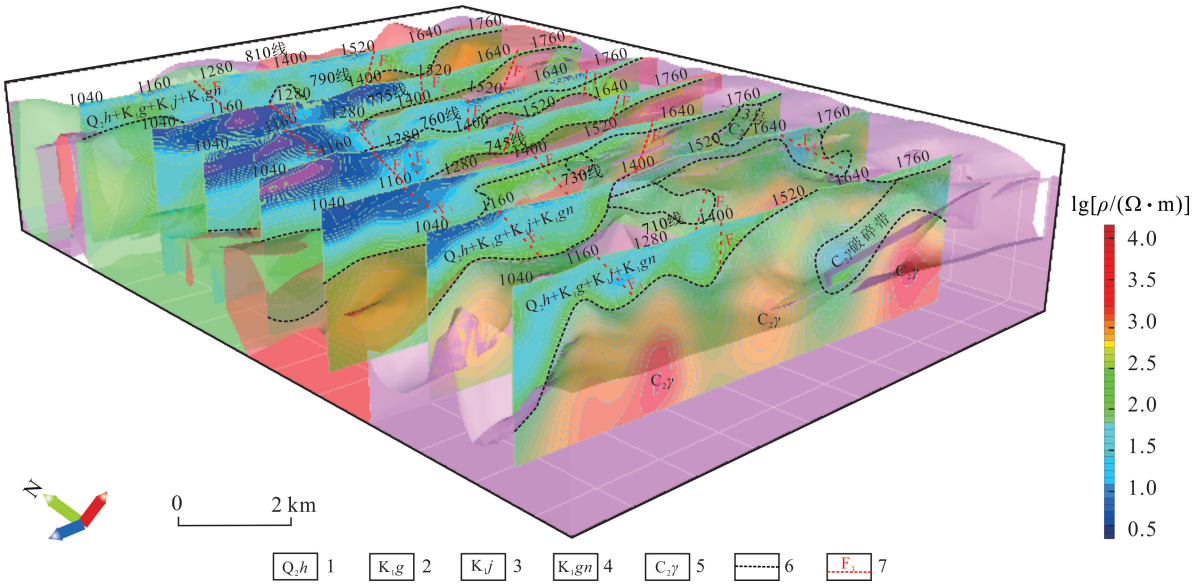


图 5　研究区 765 线重磁联合反演断面图

Fig.5　Cross-sectional view of gravity and magnetic joint inversion of Line 765 in the study area



1. 第四系;2. 甘河组;3. 九峰山组;4. 光华组;5. 晚石炭世花岗质糜棱岩;6. 推断地质界线;7. 推测断裂及编号。

图6 研究区三维地质-地球物理模型示意图

Fig.6 Schematic diagram of the 3D geological-geophysical model of the study area

伏矿体预测方法开展了深入研究。如向杰等[40]在对安徽铜陵矿集区的三维成矿预测中,依据已有的数据资料建立了三维地质模型,应用立方体预测模型提取成矿有利信息,最终圈定了15个找矿靶区。张权平等[41]利用立方体预测模型找矿方法,结合实际地质构造条件与矿体产出特征,对贵州烂泥沟金矿床进行三维定量预测研究,圈定了5处找矿靶区,为下一步工作确定了研究方向。史蕊等[42]通过构建立方体预测模型,在山东焦家金矿床圈定了13个找矿远景区,并获得了842.88 t的资源预测量。目前立方体预测模型找矿方法已基本成熟,在隐伏矿体勘查工作中发挥了重要作用。因此,本次研究采用立方体预测模型找矿方法圈定深部找矿靶区,为深部成矿预测提供指导。

5.3 三维成矿预测

构建三维预测模型是区域隐伏矿体三维成矿预测的基础和指引。本文将三维预测模型所划分的立方体单元作为预测目标,依据相似类比理论和地质异常找矿理论[43-44],结合典型矿床的研究成果,对立方体单元进行各种地学统计分析,从而实现三维成矿有利条件的提取和深部成矿预测。立方体预测模型单元块大小的确定是根据已知矿点的密度、研究区范围大小、资料的详细程度和工程间距等方面的综合考虑,选取合适的预测单元,使总预测单元数不能过多也不会太少。基于单元块体积过大不能反映特征变量的变化趋势,无法保证预测精度,而过小则影响计算机运行效率的考虑,本次研究单元块体大小确定为100 m×100 m×100 m,全区共划分单元块体总数223 703块,其中包含已知矿体单元数442块。

在三维可视化地质模型和典型矿床研究成果的基础上,结合物探工作、成矿条件及矿体赋存状态等特征,对研究区预测因子进行综合分析,筛选了光华组火山断陷盆地边缘,正长花岗岩与花岗质糜棱岩北东向接触带,光华组与北西向、北东断层交会处,正长花岗岩、花岗质糜棱岩与光华组三者交会处,潜火山岩(次火山岩),断面缓冲带,AMT物探解译有利成矿带等7个特征变量作为成矿预测因子进行统计计算。为了探究预测因子与研究区之间的最优空间关联信息,对7个特征变量进行成矿有利因子提取(图9)。以光华组与北西向、北东向断层交会处为例,由典型矿床研究成果可知,矿体多赋存于北西向、北东向断层交会处,且伴有中生代火山岩存在,这说明金矿的赋存与其有着密切的空间关系。对该成矿有利因子进行三维空间缓冲距离分析[45],通过分析已知矿块数等因素与该成矿有利因子缓冲距离的关系,当缓冲距离500 m时,其单元内含矿比例达到最高,因此设定缓冲区范围为500 m,作为成矿

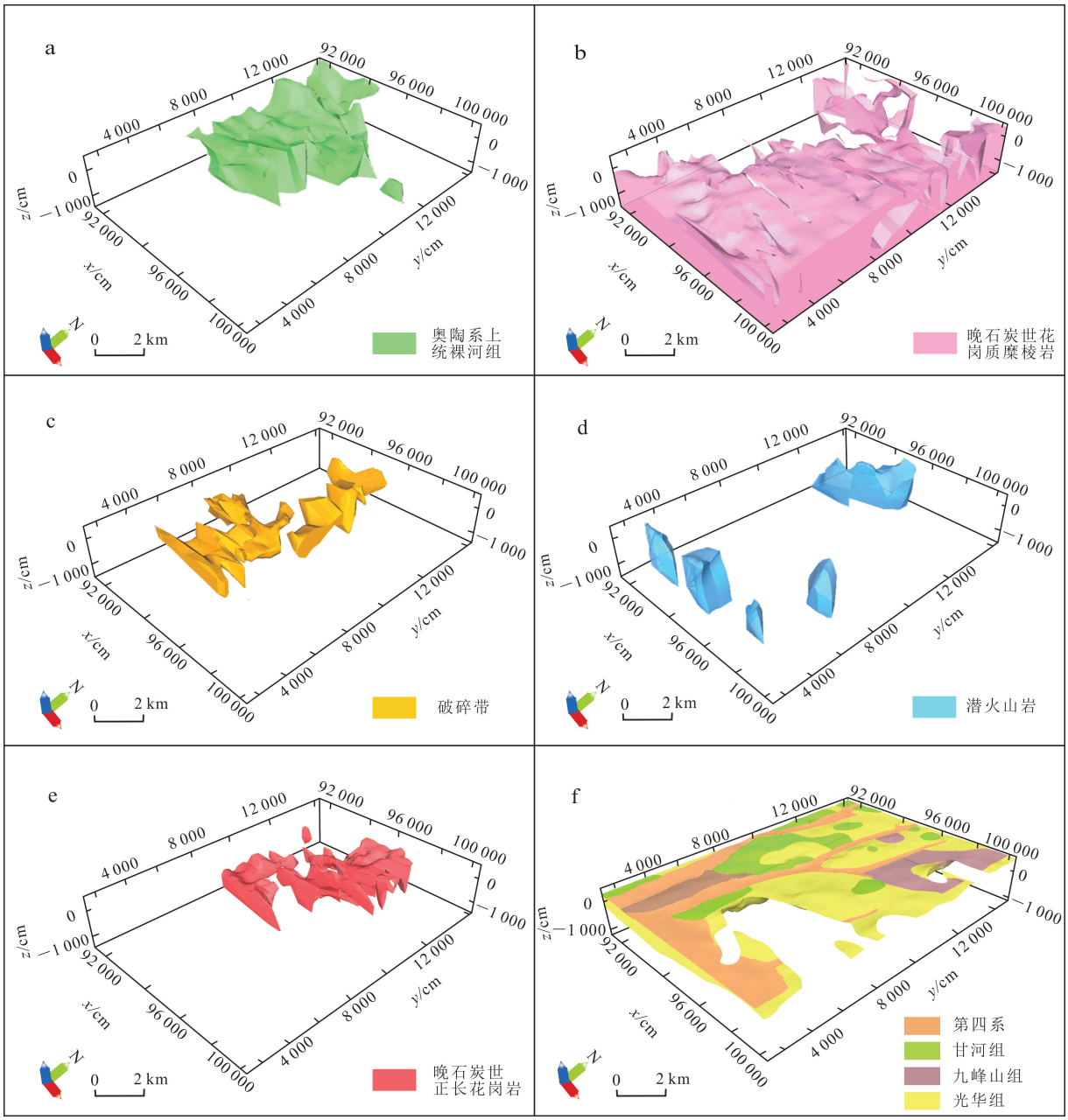


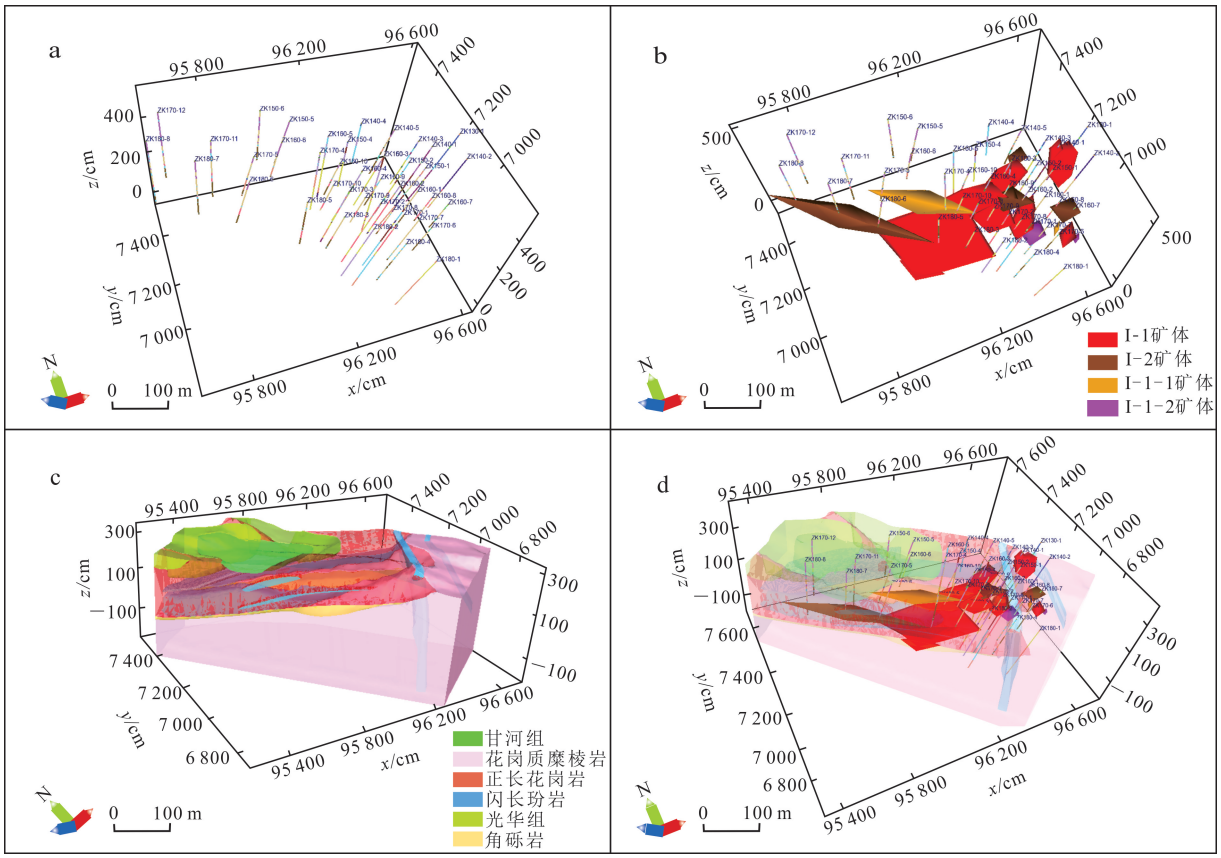
图 7　研究区主要地质单元及地质体三维模型

Fig.7　3D models of main geological units and geological bodies in the study area

有利区间。其余成矿有利因子特征值设定范围见表 3。

在已构建的各成矿有利因子模型的基础上，以证据权法作为理论基础，计算各成矿有利因子的权重。权重通过先验概率计算获得，先验概率是根据研究区划分的单元总数及所含矿体单元数，计算出不同证据因子在研究区内的成矿概率。权重包括正权重、负权重以及综合权重，其中综合权重的高低表示该证据因子对成矿预测贡献的大小，综合权重越高，对后验概率的贡献越大，成矿越有利。各证据因子的权重见表 4。

如表 4 所示，所提取的证据因子正权重均为正值，说明了各证据因子选取的有效性。其中综合权重最高的为 AMT 物探解译有利成矿带，其综合权重大于 3.3，且已知永新金矿床位于该有利成矿带上，印证了该证据因子是研究区重要的找矿标志，这与原有研究结果相吻合。此外，光华组火山断陷盆地边缘、光华组与北西向和北东向断层交会处、潜火



a. 钻孔三维模型;b. 钻孔及矿体叠合三维模型;c. 岩体三维模型;d. 全区叠合三维模型。

图8 永新金矿床三维地质模型

Fig.8 3D geological model of Yongxin gold deposit

山岩证据因子的综合权重都大于2.5,说明这三者证据因子与金矿体成矿有密切的空间关系(表4)。

5.4 深部找矿预测靶区圈定

圈定成矿远景区,首先利用先验概率与各成矿有利因子的权重分别计算每个基本立方体单元的后验概率,绘制得到研究区的后验概率分布图,然后通过综合对比和优选,确定整个研究范围内临界值的大小,其后验概率大于临界值的地区即为预测的找矿远景区。本次研究根据特征变量和计算获得的权重,以及区内不同证据因子的有利成矿后验概率的大小及分布,结合证据权重单元频数曲线求拐点的方法[46],将研究区后验概率的临界值确定为0.70。

依据上面所述,将后验概率大于0.70的成矿有利因子结合对深部地质条件、物探异常等成矿有利背景的分析和对比,圈定了8处深部找矿预测靶区(图10)。通过成矿地质条件分析和对比,确定靶区G为最优靶区,靶区H为次级靶区,靶区C、D为三级靶区,靶区A、B、E、F为四级靶区,各深部找矿预测靶区综合信息见表5。

6 靶区评价及验证

6.1 深部靶区评价

本次在研究区内圈定了8处深部找矿预测靶区,其中已知的永新金矿床位于本次圈定的最优靶区G区范围内,实际见矿深度和预测深度基本吻合,证明本次对成矿有利因子的提取及预测结果可靠有效。同时,从8处靶区来看,最优靶区G区与已知矿体重叠,而全区次一级靶区H区位于G区的西南方向,预测深度较G区接近深200 m范围,这一现象说明永新金矿床西南方向具有发现厚大隐伏金矿体的可能。本次预测得到了后续找矿勘查验证,基本与预测结果吻合,验证了本次预测的准确性,能够很好的指导下一步勘查部署,同时显示工作区圈定的深部找矿预测靶区具有一定的找矿潜力。

6.2 深部靶区验证

本次圈定的8处深部找矿预测靶区大致呈北东

方向展布，而且具有越往北东方向靶区深度逐渐加深的规律。这一规律与前文深部物探解译特征基本一致，指示了越往北东方向越具有找寻深部矿体的可能性。基于上述分析和典型矿床研究的成果，通过对 8 处靶区综合评价，发现永新金矿床深部与靶区 C 区在地质及物探等成矿背景较为一致，虽地表未发现任何矿化信息，但推测其深部具有成矿可能。为此，本次选择在靶区 C 区开展深部钻探验证工作，布设施工钻孔 ZK790－1，深度为 1 001.01 m。结果显示，钻孔中陆续见到不同厚度的矿化体，尤其在 750.00～766.00 m 处发现 15 m 厚的金矿化体，其金平均品位达 0.90 g/t，而本次三维地质建模预测深度为 780.00 m，与钻孔验证结果基本吻合（表 3），表明了本次预测的准确性和可靠性。所以本次圈定的其他几个地表尚未发现金矿体的靶区均是下一步深部找矿勘查的重点区域，本次研究成果可为研究区下一步深部找矿提供理论依据和部署建议。

表 2　永新金矿床“三位一体”综合找矿预测模型

Table 2　“Trinity” comprehensive prospecting forecast model for Yongxin gold deposit

找矿模式要素	主要标志	特征描述
成矿地质背景	大地构造背景	位于黑龙江省小兴安岭西北部，地处兴蒙造山带东端，大兴安岭弧盆系之扎兰屯—多宝山岛弧带
成矿地质体	岩体类型	早白垩世龙江组和光华组中酸性火山-次火山岩，如安山岩、英安岩、花岗斑岩和闪长玢岩等
	围岩	晚石炭世正长花岗岩与花岗质糜棱岩
	与矿体空间关系	作为矿体的上下盘，并与矿体伴生平行产出
	深大断裂	北东向深大断裂控制着本区地质体分布形式、展布方向
成矿构造及成矿结构面	接触带控矿构造	晚石炭世正长花岗岩与花岗质糜棱岩的接触带构造控制含矿角砾岩体以及（超）浅成岩脉的分布，是矿区主要的成矿结构面
	火山机构断裂	位于白垩纪火山盆地边缘地带，受控于区域性断裂构造、火山机构及其派生的环状、线状构造及次级断裂构造
成矿作用特征标志	矿体特征	主要为热液角砾岩和石英脉状
	蚀变类型	钾化、硅化、绢云母化、绿泥石化、绢英岩化和碳酸盐化等
	主要矿石矿物	自然金、黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿
	主要脉石矿物	石英、钾长石、玉髓、冰长石、方解石和绢云母
找矿标志	地质特征	灰白色石英脉、灰色硅质胶结角砾岩和强硅化蚀变岩（由于氧化作用，地表可见到“红化”现象）
		围岩蚀变类型主要有硅化、绿泥石化、绢云母化、碳酸盐化、黏土化、青磐岩化等，其中硅化和绢云母化与矿化关系密切
		晚石炭世正长花岗岩与花岗质糜棱岩的接触带是主要成矿位置
		矿体主要位于早白垩纪火山盆地边缘地带，且发育大量中酸性次火山岩体和超浅成岩脉
	地球物理特征	矿体位于中、高电阻率（1 200～2 800 Ω·m）之间的梯度带上
		矿体位于低磁异常背景区域，磁感应强度一般小于 160 nT（最佳介于－200～500 nT 之间）
矿床成因	浅成低温热液型金矿床	

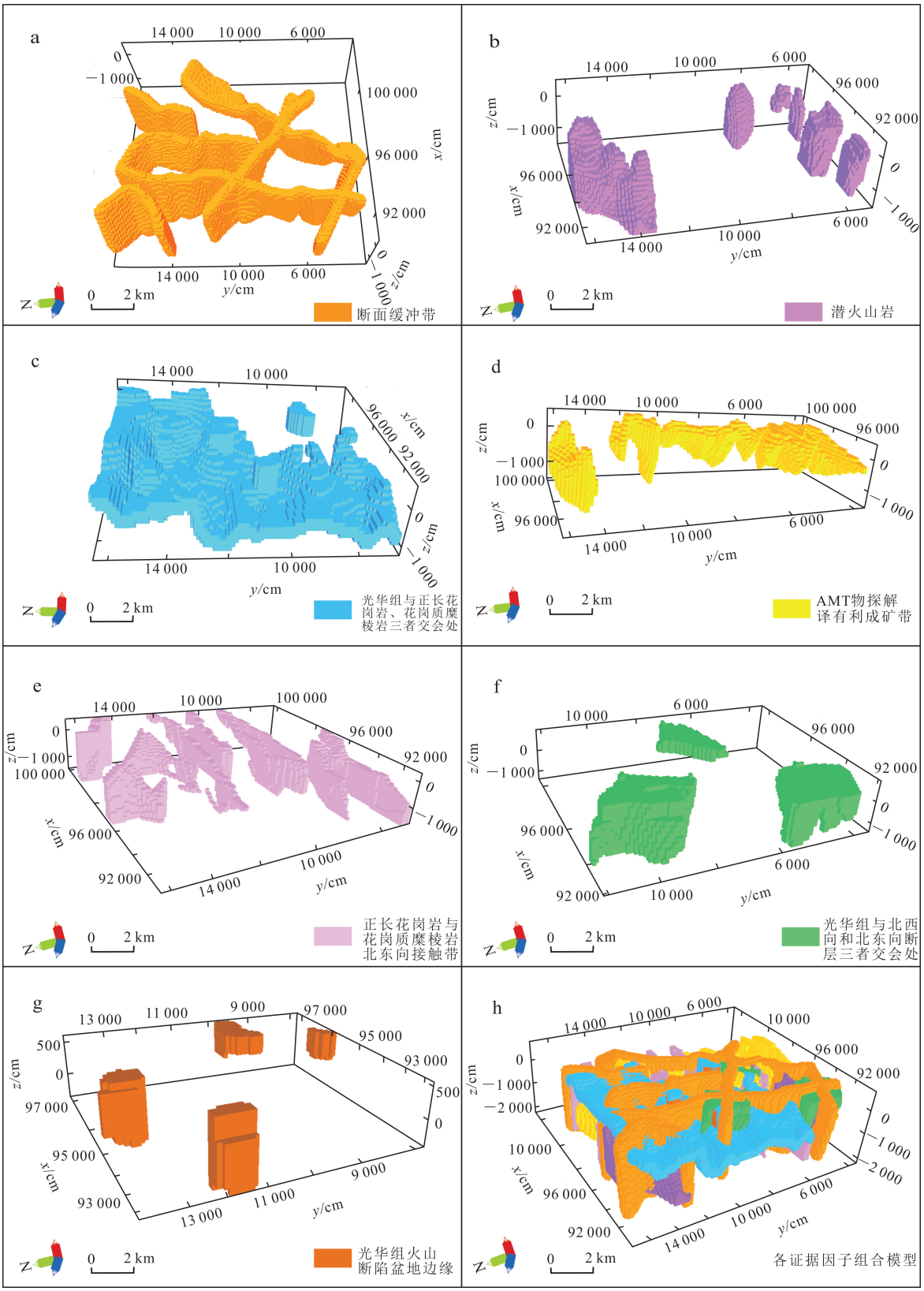


图 9 研究区三维成矿有利信息提取模型

Fig.9 3D favorable information extraction model of mineralization in the study area

表 3　研究区三维块体综合预测模型

Table 3　Comprehensive prediction model of three-dimensional block in the study area

矿床类模型	控矿地质条件	成矿预测因子	特征变量	特征值
浅成低温热液型金矿床	地层	有利成矿地层	光华组火山断陷盆地边缘	缓冲区 200 m
			光华组与北西向、北东断层交会处	缓冲区 500 m
			正长花岗岩、花岗质糜棱岩与光华组三者交会处	缓冲区 300 m
			潜火山岩(次火山岩)	直接利用实体
			正长花岗岩与花岗质糜棱岩北东向接触带	缓冲区 300 m
	构造	有利成矿构造	断面缓冲带	缓冲区 300 m
	地球物理	有利成矿地球物理特征	AMT 物探解译有利成矿带	有利成矿带(破碎带)直接利用实体

表 4　研究区各证据因子权重

Table 4　Weights of each evidence factors in the study area

证据因子	正权重	负权重	综合权重
光华组火山断陷盆地边缘	2.78	−0.08	2.85
光华组与北西向、北东向断层交会处	2.37	−0.38	2.75
光华组与正长花岗岩、花岗质糜棱岩三者交会处	0.68	−0.11	0.79
潜火山岩(次火山岩体)	2.18	−0.73	2.90
正长花岗岩与花岗质糜棱岩北东向接触带	1.33	−0.22	1.54
断面缓冲带(北东和北西向断面接触部位)	0.70	−0.16	0.86
AMT 物探解译有利成矿带	2.46	−2.92	5.38

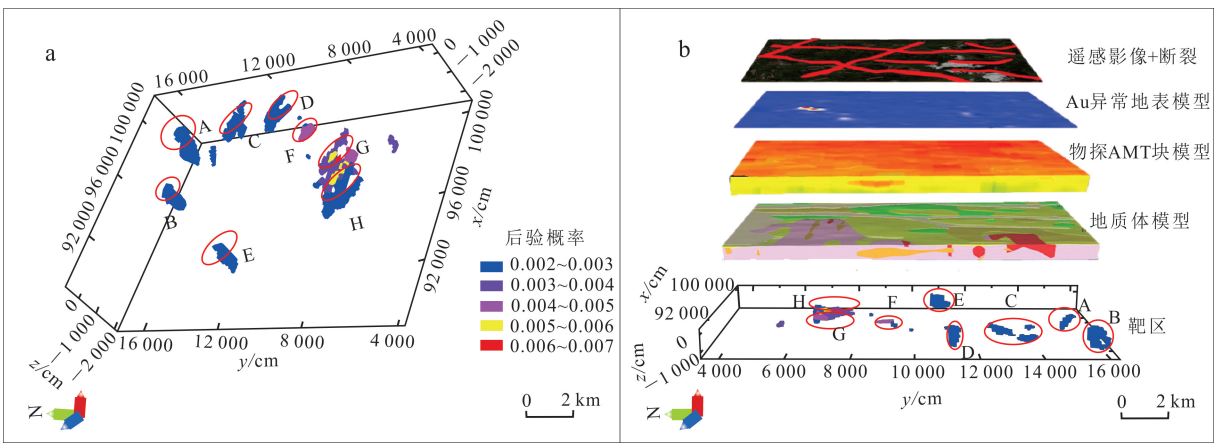


图 10　研究区靶区预测图 (a)和研究区靶区综合信息对比图 (b)

Fig.10　Prediction diagram of deep target area (a) and comparative map of comprehensive information of target area (b)

表5 研究区找矿预测靶区综合信息表

Table 5 Comprehensive information table of prospecting prediction target area in the study area

靶区	坐标		埋深/m	标高/m	体积/km³	地质情况
	x/m	y/m				
A	280 277.1	5 519 694.3	801	−385	0.09	断层、破碎带交界处
B	282 875.1	5 520 075.4	964	−483	0.34	断层、破碎带、岩体三者交接部位
C	283 275.0	5 517 870.5	780	−338	0.14	破碎带、岩体交接部位
D	283 132.0	5 515 571.3	423	17	0.29	断层、破碎带、岩体交接部位
E	276 975.2	5 515 512.3	534	−81	0.12	火山-次火山岩、断层
F	281 764.9	5 513 530.3	169	268	0.01	火山-次火山岩、断层、破碎带、岩体交接部位
G	280 050.2	5 511 675.0	220	219	0.54	火山-次火山岩、断层、破碎带、岩体交接部位
H	279 118.2	5 511 395.2	406	−33	0.49	破碎带、岩体交接部位

7 结论

1)通过构建三维地质-地球物理模型,实现了研究区三维可视化,并对模型综合分析可知,矿区内深部断裂发育,已知矿体与物探异常均严格受北东向断裂控制,矿体赋存在晚石炭世正长花岗岩和花岗质糜棱岩接触带内,且与早白垩世火山-次火山岩(闪长玢岩、花岗斑岩)关系密切。

2)采用立方体预测模型找矿方法,根据证据权法对研究区地质、地球物理等多源信息进行融合,最终圈定8处深部找矿预测靶区,并开展了深部靶区钻孔验证,发现了多处矿化信息,见矿深度和预测深度基本吻合,验证了本次深部预测的准确性和可行性,同时证明在研究区深部及外围仍然具有较大的成矿潜力和找矿空间。

3)基于三维可视化技术,利用三维建模+多源数据融合的方法,为找矿预测研究领域提供了新方向,具有十分广阔的应用前景,尤其对于重点矿集区及老矿山深部及外围找矿具有一定的指导意义。

参考文献(References):

[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):56-64.
Chen Jianping, Lü Peng, Wu Wen, et al. A 3D Method for Predicting Blind Orebodies, Based on a 3D Visualization Model and Its Application[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(5): 56-64.

[2] 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-杭成矿带庞西垌地区下园垌铅锌矿区为例[J].岩石学报,2017,33(3):767-778.
Gao Le, Lu Yutong, Yu Pengpeng, et al. Three-Dimensional Visualization and Quantitative Prediction for Mine: A Case Study in Xiayuandong Pb-Zn Ore Deposits, Pangxidong Region, Southern Part of Qin-Hang Metallogenic Belt, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(3): 767-778.

[3] 刘静,陈建平. 我国三维成矿预测的研究现状及发展趋势[J].地质学刊,2017,41(3):441-447.
Liu Jing, Chen Jianping. Research Status and Development Trend of 3D Metallogenic Prediction in China[J]. Journal of Geology, 2017, 41(3): 441-447.

[4] 向杰,肖克炎,陈建平,等. 基于成矿系统的三维定量预测研究:以四川拉拉铜矿为例[J].地球学报,2020,41(2):135-143.
Xiang Jie, Xiao Keyan, Chen Jianping, et al. 3D Metallogenic Prediction Based on Metallogenic System Analysis: A Case Study in the Lala Copper Mine of Sichuan Province[J]. Journal of Earth, 2020, 41(2): 135-143.

[5] 陈建平,于萍萍,史蕊,等. 区域隐伏矿体三维定量预测评价方法研究[J].地学前缘,2014,21(5):211-220.
Chen Jianping, Yu Pingping, Shi Rui, et al. Research on Three-Dimensional Quantitative Prediction and Evaluation Methods of Regional Concealed[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(5): 211-220.

[6] Payne C E, Cunningham F, Peters K J, et al. From 2D to 3D: Prospectivity Modelling in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 71(Sup.1): 558-577.

[7] Hamedani M L, Xu C. Orebody Modelling for Exploration: The Western Mineralisation, Broken Hill, NSW[J]. Natural Resources Research, 2012, 21(3): 325-345.

[8] Bellefleur G, Kemp E D, Goutier J, et al. Seismic Imaging of the Geologic Framework and Structures Related to Volcanogenic Massive Sulfide Deposits in the Archean Rouyn-Noranda District, Quebec, Canada[J]. Economic Geology, 2014, 109(1): 103 - 119.

[9] 肖克炎，李楠，孙莉，等. 基于三维信息技术大比例尺三维立体矿产预测方法及途径[J].地质学刊，2012，36(3)：229 - 236.
Xiao Keyan, Li Nan, Sun Li, et al. Large Scale 3D Mineral Prediction Methods and Channels Based on 3D Information Technology[J]. Journal of Geology, 2012, 36(3): 229 - 236.

[10] 毛先成，戴塔根，吴湘滨，等. 危机矿山深边部隐伏矿体立体定量预测研究：以广西大厂锡多金属矿床为例[J].中国地质，2009，36(2)：424 - 435.
Mao Xiancheng, Dai Tagen, Wu Xiangbin, et al. The Stereoscopic Quantitative Prediction of Concealed Ore Bodies in the Deep and Marginal Parts of Crisis Mines: A Case Study of the Dachang Tin Polymetallic Ore Deposit in Guangxi[J]. Geology in China, 2009, 36(2): 424 - 435.

[11] 陈建平，尚北川，吕鹏，等. 云南个旧矿区某隐伏矿床大比例尺三维预测[J].地质科学，2009，44(1)：324 - 337.
Chen Jianping, Shang Beichuan, Lü Peng, et al. Large-Scale 3D Metallogenic Prediction of Concealed Orebody in Gejiu, Yunnan Province [J]. Chinese Journal of Geology, 2009, 44(1): 324 - 337.

[12] 赵忠海. 小兴安岭西北部永新大型金矿成因、成矿地质模式与深部三维成矿预测[D].长春：吉林大学，2019.
Zhao Zhonghai. Ore Genesis, Metallogenic Geological Mode and Deep Metallogenic Prediction of the Yongxin Large Au Deposit Based on 3D Digital Model in the Northwestern Lesser Xing' an Range [D]. Changchun: Jilin University, 2019.

[13] Safonova I Y, Seltmann R, Kröner A, et al. A New Concept of Continental Construction in the Central Asian Orogenic Belt: Compared to Actualistic Examples from the Western Pacific [J]. Episodes, 2011, 34(2): 1 - 10.

[14] Hong D, Zhang J, Wang T, et al. Continental Crustal Growth and the Supercontinental Cycle: Evidence from the Central Asian Orogenic Belt[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 23(5): 799 - 813.

[15] Zhou J B, Wilde S A. The Crustal Accretion History and Tectonic Evolution of the NE China Segment of the Central Asian Orogenic Belt [J]. Gondwana Research, 2013, 23(4): 1365 - 1377.

[16] 李成禄，徐文喜，于援帮，等. 小兴安岭西北部与永新金矿有关岩浆岩的年代学和地球化学及成矿构造环境[J].现代地质，2017，31(6)：1114 - 1130.
Li Chenglu, Xu Wenxi, Yu Yuanbang, et al. Geochronology and Geochemistry of the Ore-Related Magmatic Rocks from the Yongxin Gold Deposit, Northwest Xiao Hinggan Mountains and Their Ore-Forming Tectonic Implication[J]. Geoscience, 2017, 31(6): 1114 - 1130.

[17] 赵忠海，郑卫政，曲晖，等. 黑龙江多宝山地区铜金成矿作用及成矿规律[J].矿床地质，2012，31(3)：601 - 614.
Zhao Zhonghai, Zheng Weizheng, Qu Hui, et al. Cu - Au Mineralization and Metallogenic Regularity of Duobaoshan Area, Heilongjiang Province[J]. Mineral Deposits, 2012, 31(3): 601 - 614.

[18] 袁茂文，曾勇杰，李成禄，等. 黑龙江省嫩江—黑河构造混杂岩区永新金矿热液蚀变与矿化关系定量及定位研究[J].现代地质，2017，31(2)：278 - 289.
Yuan Maowen, Zeng Yongjie, Li Chenglu, et al. Quantitative and Positioning Study on the Hydrothermal Alteration and Mineralization Relationship of the Yongxin Gold Deposit in the Nenjiang-Heihe Mélange Zone, Heilongjiang Province [J]. Geoscience, 2017, 31(2): 278 - 289.

[19] Zhao Z H, Sun J G, Li G H, et al. Age of the Yongxin Au Deposit in the Lesser Xing' an Range: Implications for an Early Cretaceous Geodynamic Setting for Gold Mineralization in NE China [J]. Geological Journal, 2019, 54(4): 2525 - 2544.

[20] Zhao Z H, Sun J G, Li G H, et al. Early Cretaceous Gold Mineralization in the Lesser Xing' an Range of NE China: The Yongxin Example[J]. International Geology Review, 2019, 61(12): 1522 - 1549.

[21] Zhao Z H, Sun J G, Li G H, et al. Zircon U - Pb Geochronology and Sr - Nd - Pb - Hf Isotopic Constraints on the Timing and Origin of the Early Cretaceous Igneous Rocks in the Yongxin Gold Deposit in the Lesser Xing' an Range, NE China[J]. Geological Journal, 2020, 55(4): 2684 - 2703.

[22] 曲晖，赵忠海，李成禄，等. 黑龙江永新金矿地质特征及成因[J].地质与资源，2014，23(6)：520 - 524.
Qu Hui, Zhao Zhonghai, Li Chenglu, et al. Geology

and Genesis of the Yongxin Gold Deposit in Heilongjiang Province[J]. Geology and Resources, 2014, 23(6): 520-524.

[23] 梁科伟,赵忠海,郭艳.原生晕在深部成矿预测中的应用:以黑河地区永新金矿为例[J].地质与资源,2019,28(6):512-518.
Liang Kewei, Zhao Zhonghai, Guo Yan. Application of Primary Halo in Deep Metallogenic Prediction: A Case Study of Yongxin Gold Deposit in Heihe Area [J]. Geology and Resources, 2019, 28(6): 512-518.

[24] 李成禄,于援帮,袁茂文,等.大兴安岭东北部永新金矿床金银系列矿物和碲化物的发现及其意义[J].地学前缘,2020,27(4):244-254.
Li Chenglu, Yu Yuanbang, Yuan Maowen, et al. Discovery and Geological Significance of Gold-Silver Bearing Minerals and Tellurides in the Yongxin Gold Deposit in the Northeastern Great Xing'an Range [J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(4): 244-254.

[25] 张宝一,杨莉,陈笑扬,等.基于图切地质剖面的区域成矿地质体三维建模与资源评价:以桂西南地区锰矿为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2017,47(3):933-948.
Zhang Baoyi, Yang Li, Chen Xiaoyang, et al. Regional Metallogenic Geo-Bodies 3D Modeling and Mineral Resource Assessment Based on Geologic Map Cut Cross-Sections: A Case Study of Manganese Deposits in Southwestern Guangxi, China[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2017, 47(3): 933-948.

[26] 于萍萍,陈建平,王勤.西藏铁格隆南铜(金)矿床三维模型分析与深部预测[J].岩石学报,2019,35(3):897-912.
Yu Pingping, Chen Jianping, Wang Qin. Three-Dimensional Mineral Prospectivity Modelling and Deep Metallogenic Prediction of the Tiegelongnan Copper-Gold Deposit in Tibet, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(3): 897-912.

[27] 李陈.基于剖面的三维复杂地质体建模技术研究[D].成都:成都理工大学,2018.
Li Chen. Research on 3D Complex Geophysical Modeling Technology Based on Section[D].Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.

[28] 陈振振.基于多元地学信息的三维地质建模及综合演示系统[D].长春:吉林大学,2016.
Chen Zhenzhen. Three-Dimensional Geological Modeling and Integrated Demonstration System Based on Multi-Dimensional Geo-Information [D]. Changchun: Jilin University, 2016.

[29] 殷骏.基于Creatar固体矿产资源预测系统研发与应用[D].北京:中国地质大学(北京),2016.
Yin Jun. Development and Application of Solid Mineral Resources Prediction System Based on Creatar[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.

[30] 郝明,牛瑞卿,张建龙,等.高原盆地三维地质建模及可视化系统:以羌塘盆地及半岛湖区块为例[J].桂林理工大学学报,2018,38(3):451-458.
Hao Ming, Niu Ruiqing, Zhang Jianlong, et al. 3D Geological Modeling and Visualization System of Plateau Basin: A Study from the Qiangtang Basin and the Bandaohu Region[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2018, 38(3): 451-458.

[31] 刘琳琳,贾德龙,李永玲.三维地质建模技术在矿产勘查中的应用[J].矿床地质,2014,33(增刊1):721-722.
Liu Linlin, Jia Delong, Li Yongling. Application of 3D Geological Modeling Technology in Mineral Exploration[J]. Mineral Deposits, 2014, 33(Sup.1): 721-722.

[32] 向中林,顾雪祥,董树义,等.三维地质建模及可视化在危机矿山找矿中的应用研究:以沂南金矿为例[J].地球与环境,2009,37(2):136-141.
Xiang Zhonglin, Gu Xuexiang, Dong Shuyi, et al. Research on and Application of 3D Geological Modeling and Visualization in Ore Prospecting in Crisis Mines as Exemplified by Yinan Gold Mine[J]. Earth and Environment, 2009, 37(2): 136-141.

[33] 许加田,薛东剑,李阳.综合多源数据的矿床三维地质建模:以四川某铅锌矿为例[J].地质通报,2023,42(7):1203-1210.
Xue Jiatian, Xue Dongjian, Li Yang. Three-Dimensional Geological Model of Deposits with the Integration of Data of Multi-Sources: A Case Study of Lead-Zinc Deposit, Sichuan Province[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(7): 1203-1210.

[34] 李键,何新建,黄逯.重力密度反演的自适应异常权函数法及其对东海钓北凹陷地层结构划分[J].吉林大学学报(地球科学版),2022,52(1):229-237.
Li Jian, He Xinjian, Huang Jun. Adaptive Weight Density Inversion Method for Gravity Anomaly and Mesozoic Divisionof Diaobei Sag in East China Sea [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(1): 229-237.

[35] 鲁宝亮，苏子旺，赵志刚，等. 基于卫星重力异常的南海南部中生界反演[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2023，53(1)：261－273.
Lu Baoliang, Su Ziwang, Zhao Zhigang, et al. Mesozoic Distribution Derived from Satellite Gravity Anomaly in the Southern South China Sea[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2023, 53(1): 261－273.

[36] 李伟，陈建平，贾玉乐，等. 甘肃早子沟金矿三维建模与综合成矿预测[J]. 地球学报，2020，41(2)：144－156.
Li Wei, Chen Jianping, Jia Yule, et al. Three-Dimensional Modeling and Comprehensive Metallogenic Prediction of the Zaozigou Gold Deposit, Gansu Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2020, 41(2): 144－156.

[37] 刘小杨，方洪宾，薛林福. 西藏日喀则地区证据权重法金矿远景预测[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2012，42(增刊 2)：198－204.
Liu Xiaoyang, Fang Hongbin, Xue Linfu. Gold Prediction Using Method of Weights of Evidence in the Rigaze Area, Tibet[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(Sup.2): 198－204.

[38] 吕鹏. 基于立方体预测模型的隐伏矿体三维预测和系统开发[D]. 北京：中国地质大学(北京)，2007.
Lü Peng. Cube Predicting Model Based 3D Predicting Methods of Blind Orebody and Software Development [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2007.

[39] 刘畅，陈建平，张权平. 山西浑源张旺地区金多金属矿体三维成矿预测与评价[J]. 地质学刊，2019，43(3)：400－407.
Liu Chang, Chen Jianping, Zhang Quanping. Three-Dimensional Metallogenic Prediction and Evaluation of Gold Polymetallic Ore Bodies in Zhangwang Area, Hunyuan County, Shanxi Province[J]. Journal of Geology, 2019, 43(3): 400－407.

[40] 向杰，陈建平，胡彬，等. 基于三维地质-地球物理模型的三维成矿预测：以安徽铜陵矿集区为例[J]. 地球科学进展，2016，31(6)：603－614.
Xiang Jie, Chen Jianping, Hu Bin, et al. 3D Metallogenic Prediction Based on 3D Geological-Geophysical Model: A Case Study in Tongling Mineral District of Anhui[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(6): 603－614.

[41] 张权平，陈建平，陈雪薇，等. 贵州烂泥沟金矿三维定量预测[J]. 地球学报，2020，41(2)：193－206.
Zhang Quanping, Chen Jianping, Chen Xuewei, et al. 3D Quantitative Prediction in the Lannigou Gold Deposit, Guizhou Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2020, 41(2): 193－206.

[42] 史蕊，陈建平，刘汉栋，等. 山东焦家金成矿带三维预测模型及靶区优选[J]. 现代地质，2014，28(4)：743－750.
Shi Rui, Chen Jianping, Liu Handong, et al. The 3D Prediction Model and Division of Targets in Jiaojia Gold Ore Belt, Shandong Province[J]. Geoscience, 2014, 28(4): 743－750.

[43] 向中林，顾雪祥，章永梅，等. 基于三维地质建模及可视化的大比例尺深部找矿预测研究及应用：以内蒙古柳坝沟矿区为例[J]. 地学前缘，2014，21(5)：227－235.
Xiang Zhonglin, Gu Xuexiang, Zhang Yongmei, et al. Research and Application of Large Scale Deep Mineral Prospecting Prediction Based on 3D Geological Modeling and Visualization: A Case from Liubagou Gold Field, Inner Mongolia[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(5): 227－235.

[44] 赵鹏大，池顺都. 初论地质异常[J]. 地球科学：中国地质大学学报，1991，50(3)：241－248.
Zhao Pengda, Chi Shundu. A Preliminary View on Geological Anomaly[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 1991, 50(3): 241－248.

[45] 徐彬，陈建平，相轩. 焦家金成矿带三维成矿条件分析与成矿预测[J]. 金属矿山，2015，20(9)：90－94.
Xu Bin, Chen Jianping, Xiang Xuan. Metallogenic Prediction and Analysis of the Three-Dimensional Metallogenic Conditions of Jiaojia Gold Ore Belt[J]. Metal Mine, 2015, 20(9): 90－94.

[46] 严冰. 四川宁南地区铅锌成矿规律及证据权法成矿预测[D]. 成都：成都理工大学，2006.
Yan Bing. The Law of Lead-Zinc Mineralization in Ningnan Area of Sichuan and the Mineralization Prediction of the Evidence-Based Method [D]. Chengdou: Chengdu University of Technology, 2006.