

# 山东齐河—禹城地区三维重磁建模与找矿预测

吕婧祎<sup>1</sup>, 宁振国<sup>2</sup>, 祁光<sup>3</sup>, 朱学强<sup>4</sup>, 胡雪平<sup>4</sup>, 余京瑾<sup>3</sup>, 周强<sup>5</sup>

(1. 中国交通信息科技集团有限公司, 北京 100088;

2. 山东省地质科学研究所, 济南 250013;

3. 中国地质科学院, 北京 100037;

4. 山东省地质调查院, 济南 250014;

5. 山东正元建设工程有限责任公司济南分公司, 济南 250101)

**摘要:** 山东省齐河—禹城矿集区是近年来发现的富铁矿矿集区, 矿石品位高、储量大, 有望成为中国重要的富铁矿基地。在成岩成矿时代、控矿构造、赋矿层位和找矿规律等矿床学研究方面开展了大量工作, 并取得了很多成果。但由于该区处于第四系厚覆盖层区, 深部异常信息难以获取, 对矿区深部构造样式、隐伏岩体空间形态及规模、主要控矿地层的空间展布等问题还没有得到有效解决, 严重制约了矿床规模的进一步扩大。利用重磁约束的三维地质建模技术已成为深部找矿的重要手段, 它利用先验信息进行约束反演弥补重磁纵向分辨力的不足, 对成矿异常的空间性质进行判断或追踪已知矿带的深部延伸, 从而实现找矿预测。笔者基于齐河—禹城地区 1:50 000 重力数据和 1:25 000 航磁数据, 进行位场分离获得反演基础数据, 在地质、钻孔和物性资料的约束下, 完成了 19 条剖面的交互式反演, 利用剖面反演结果建立了研究区三维地质模型, 获取了地下约 3 km 深度的地层、岩体、构造的空间信息, 并以此为基础结合成矿规律和控矿因素提出 5 处找矿新靶区。

**关键词:** 齐河—禹城; 三维地质建模; 重磁反演; 矽卡岩铁矿

**中图分类号:** P631 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.05.09

## 0 引言

山东齐河—禹城矿集区矽卡岩型富铁矿的发现是近年来中国铁矿重要找矿突破, 区内共发现大中型矿床 3 处, 其中李屯矿区是我国罕见的厚层高品位富铁矿, 全铁(TFe)最高品位为 69%, 单孔见矿厚度 58 m~120 m, 预测该矿集区总资源量可达 3.4 亿吨, 平均品位 55.21%, 拥有广阔的找矿前景。研究资料表明齐河—禹城地区成矿地质条件优越, 在

晚燕山期, 岩浆在侵入过程中与古生代奥陶系地层发生接触交代作用, 为矽卡岩型矿床的形成提供了有利条件<sup>[1-6]</sup>, 但由于该区为第四系巨厚覆盖区, 地表基本没有可以借鉴的地质信息, 限制了对该区域深部地质结构的认识, 为开展进一步的普查、详查工作带来困难。

三维地质建模是利用计算机技术将相关数据转化为可视化的三维地质结构模型的过程, 它以地质、地球物理、钻孔、物性等信息为基础, 构建地下半空间一定深度范围内的地层、岩体、断裂等地质单元的

收稿日期: 2023-03-16

基金项目: 中国地质科学院基本科研业务费项目(JKYZD202303); 山东省地勘项目(鲁勘字[2021]1号, [2020]63号)

第一作者: 吕婧祎(1995—), 女, 硕士, 主要从事应用数学研究, E-mail: waterluluy@126.com。

通信作者: 祁光(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事地球物理研究, E-mail: qiguang\_cags@126.com。

三维形态模型,近年来,在深部矿产资源勘探中发挥着十分重要的作用。通过三维地质模型了解控矿、示矿地质单元的空间展布规律或是判断重要成矿异常的性质,为深部资源勘探工作提供技术支撑<sup>[7]</sup>。

传统的三维地质建模工作主要以钻孔信息作为基础,再结合研究人员的地质认知来完成,其结果的可信度主要取决于钻孔的密度,如在钻探程度低的找矿勘查阶段,研究区通常钻孔稀疏且分散,仅依靠钻孔和地表地质图等信息,所构建的三维地质模型难以反映实际地质情况,模型可靠程度无法验证,进而为后续勘探工作带来极大的困难<sup>[8]</sup>。为了克服传统建模方法的缺点,在钻孔稀疏地区结合重磁反演以弥补缺失信息,利用人机交互建模技术得到最佳的地下半空间密度、磁化率参数解,并转换为地质建模参数,可极大改善三维地质建模的可靠性。吕庆田、严加永、祁光、邓震等在长江中下游成矿带的铜

陵狮子山、赣东北矿集区、庐枞矿集区、九瑞矿集区等地区开展带约束的重磁三维反演建模工作,获得了 3 000 m 以浅的深部地质结构模型,并利用可视化平台实现了模型的三维空间展示,极大地提高了三维地质建模的准确性和可靠程度,是深部找矿预测的有效方法之一<sup>[9-12]</sup>。

齐河—禹城矿集区内控矿地层、闪长岩存在较明显物性差异(明显密度差异和弱磁性差异),为参数分辨能力和地质模型转换可行性提供了物性基础。笔者收集了该区域的 1:50 000 地面重力数据和 1:25 000 航磁数据,结合基岩地质图和钻孔等资料,采用间距 2 km 的平行剖面作为建模基础剖面,建立了覆盖矿集区的地表面积约 870 km<sup>2</sup> 的三维地质模型,初步实现了齐河—禹城矿集区“透明化”。通过对三维模型可视化和分析,结合地质信息,进行了找矿靶区预测。

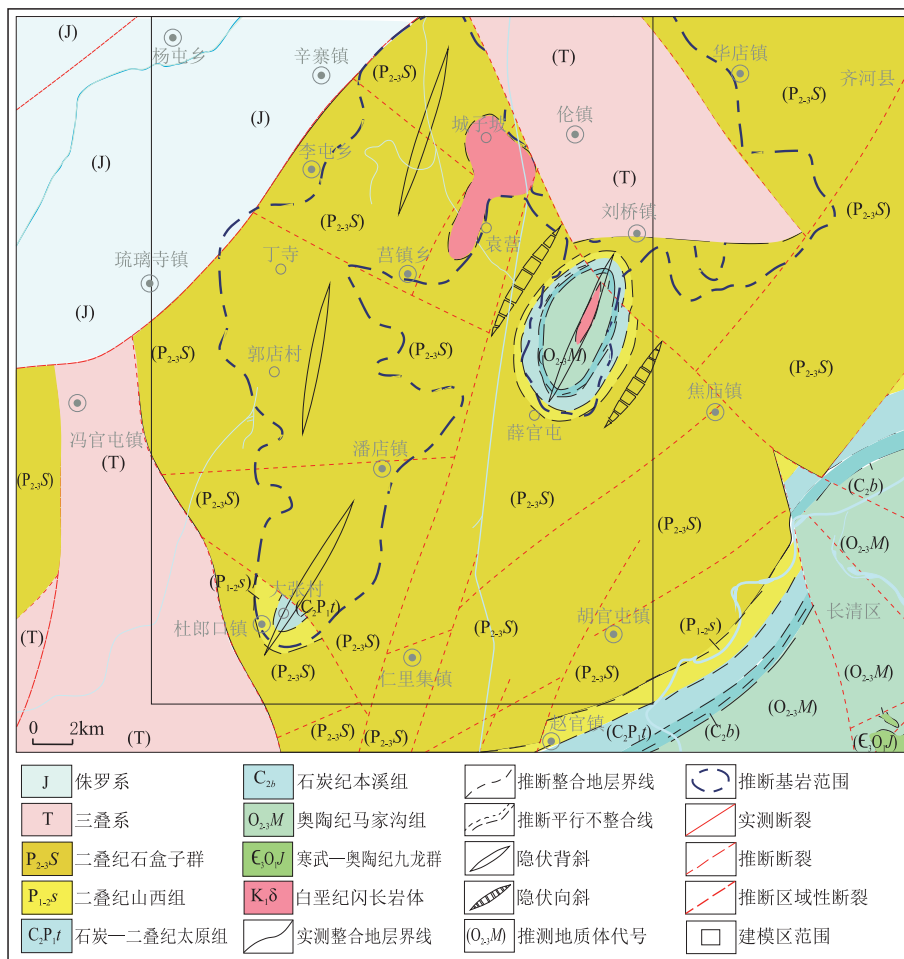


图 1 齐河—禹城地区基岩地质图

Fig. 1 Geological map of bedrock in the Qihe-Yucheng area

## 1 地质背景

齐河—禹城矿集区行政区划隶属德州市的齐河县、禹城市,聊城市的茌平区、高唐县管辖,属于华北克拉通东南部中生代环太平洋金属成矿带一部分的鲁西北地区。大地构造位置为华北板块鲁西隆起区的西北边缘,处于华北拗陷区与鲁西隆起区的连接部位。受区域大地构造运动的影响,该区断裂、褶皱等构造较为发育<sup>[13]</sup>。

研究区为深覆盖区,地表主要为第四系,仅在研究区南东见少量基岩露头,为寒武—奥陶纪碳酸盐岩地层(图1)。根据勘查工作和钻孔揭露,结合区域地质资料,研究区内地层由老至新为寒武系、奥陶系九龙群、长青群、石炭系—二叠系月门沟群、石盒子群、新近系及第四系。区域岩浆岩有太古代岩浆岩和中生代岩浆岩。太古代岩浆岩分布于研究区东南,中生代岩浆岩出露于研究区以东。研究区内中生代燕山晚期侵入岩为隐伏岩体,分布局限,以中性闪长岩为主,并有少量的酸性侵入岩分布。研究区内断裂构造发育,主要为NW-NNW向、NE-NNE向和近EW向三组,其中前两组断裂更为发育,区内断裂构造相互切割,形态复杂。

齐河—禹城矿集区内目前发现铁矿的区域主要包括大张、潘店和李屯地区,为典型的矽卡岩型铁矿,成矿环境主要为中基性岩浆侵入到古生代奥陶纪碳酸盐岩地层中发生成矿作用<sup>[3]</sup>。成矿相关岩体主要为闪长岩,其次为辉石闪长岩。矿体多呈层状、似层状、囊状、脉状和不规则状产出,矿体埋深潘店>李屯>大张,其中潘店矿体赋存标高在海拔-1 417.94 m~-1 515.47 m之间,矿体平均厚度约为40 m,全铁平均品位为51.82%,磁铁平均品位为47.20%。李屯铁矿体赋存标高在海拔-1 123.50 m~-1 259.33 m之间,矿体平均厚度约为70 m,全铁平均品位56.75%,磁铁平均品位51.70%。大张铁矿体赋存标高在海拔-800.26 m~-825.71 m之间,矿体平均厚度约为8 m,全铁平均品位61.92%,磁铁平均品位57.06%<sup>[14]</sup>。

## 2 三维地质建模

### 2.1 基于重磁反演的三维地质建模方法

这里的建模方法如图2所示,总体思路是利用重磁数据结合地质、钻井、物性资料等先验信息进行

2.5D人机交互反演修改校正地质剖面,并在此基础上构建三维地质模型,再进一步利用重磁3D反演继续修改模型,直至重磁响应与实测异常的拟合差满足精度要求。主要可分为5个步骤:确定建模区域、先验信息处理、2D地质模型构建、2.5D/3D反演模拟、可视化与解释<sup>[11]</sup>。

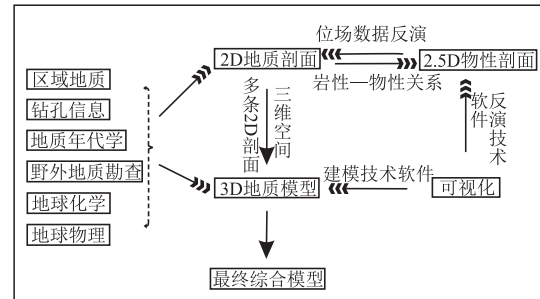


图2 基于重磁反演的三维地质建模技术流程(据 Qi<sup>[10]</sup>修改)

Fig. 2 Workflow of 3D modelling constrained by gravity and magnetic inversion

1)确定建模区域:首先应确定三维地质建模的空间范围,然后根据已有资料确定2D剖面的位置(走向、长度和间距等),为了充分利用已有资料,通常2D剖面应尽可能多的与研究区内勘探线剖面重合。

2)先验信息及处理:主要包括对区内地质单元进行简化,地球物理数据处理分析,地质图及钻孔数据的收集整理,岩石物性测量及对应关系分析等。对重磁数据需提取建模区域的局部异常作为考量模型合理性的依据,其所涉及的位场分离处理是研究重要环节之一;如研究区内地质构造、岩性变化复杂,对地质单元适当简化将尤为重要,可有效减少建模时间,降低反演难度;钻孔资料作为可靠程度极高的已知信息,在反演建模过程中其所涉及的约束信息应保持不变。

3)2D地质模型构建:确定剖面间距后,根据地质、钻孔等资料,绘制区内各剖面的2D地质剖面。每条剖面应大致反映所过区域的构造、地层、岩体的空间信息,作为后续重磁人机交互反演的初始模型。

4)2.5D/3D反演模拟:进行2.5D和3D相结合的人机交互反演,首先进行各剖面的2.5D人机交互反演,利用其修正的地质剖面构建3D地质模型,并转化为3D物性模型,再进一步对物性模型进行3D反演并计算拟合误差,对于拟合误差较大的区域,可对所在位置的剖面进行局部反演修正,重复以

上步骤直到 3D 反演的拟合差满足期望。

5) 可视化与解释: 将模型输入到三维可视化平台, 进一步提取深部成矿信息, 了解成矿相关地质体的三维空间形态, 结合成矿背景和成矿模式进行靶区预测、资源潜力评价等工作。

## 2.2 重磁场数据

### 2.2.1 重力数据

1:50 000 面积性重力测量测网为 500 m×500 m, 在分析布格重力异常值与地形的相关性的基础上, 选择受高程变化最小对应的密度值 2.60 g/cm<sup>3</sup> 为中间层改正密度。通过地形改正、中间层改正和高度改正, 得到覆盖齐河—禹城矿集区及邻区 2 260 km<sup>2</sup> 的布格重力异常, 异常形态如图 3(b) 所示, 因重力数据为保密数据, 故图中未给出实际公里网坐标, 该区布格重力异常总精度为  $\pm 0.16 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ , 主要有两个明显的异常区, 一个沿大张、王官屯、李屯南北向分布, 其中有两个局部高异常; 另外一个为研究区东南胡官屯一带高重力异常。经过钻探等工作确定, 前者主要岩体和磁铁矿引起, 后者可能为基底隆起引起。

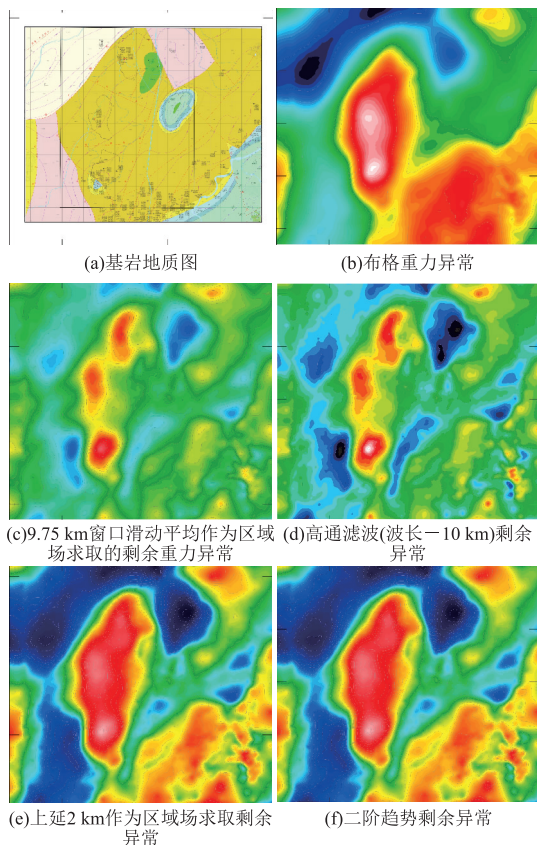


图 3 不同方法求取的重力剩余异常与地质图的对比

Fig. 3 Comparison of gravity residual anomalies obtained by different methods and geological maps

重力场是地下密度不均匀体的综合反映, 需要进行区域场与背景场分离, 以提取三维建模目标区域的局部重力异常。笔者对比最小二乘拟合、滑动平均、向上延拓和匹配滤四种位场分离方法后, 选择滑动窗口平均法作为位场分离手段, 得到了适宜三维建模的局部重力异常(图 3(c)), 它与基岩地质图反映的北东向构造、隐伏岩体形态的重力异常特征吻合且更细致, 可以此为拟合目标进行重力人机交互反演。

### 2.2.2 航磁数据

1:25 000 航磁网格间距为 250 m×250 m。齐河—禹城航磁异常如图 4(a) 所示。为消除斜磁化对异常形态的影响, 首先对航磁数据进行化极处理, 然后进行解析延拓及各类导数计算以提取深部有用信息。本研究区的地磁倾角为 55.2°, 磁偏角为 -6.2°, 正常场 52 900 nT, 按此参数进行了化极处理, 结果如图 4(b) 所示。由于齐河—禹城地区为厚覆盖区, 化极磁异常基本代表了目标深度磁性体的磁场响应。因此, 无需再开展区域场与剩余场的分离, 即航磁化极异常可作为三维磁法人机交互反演的拟合目标。

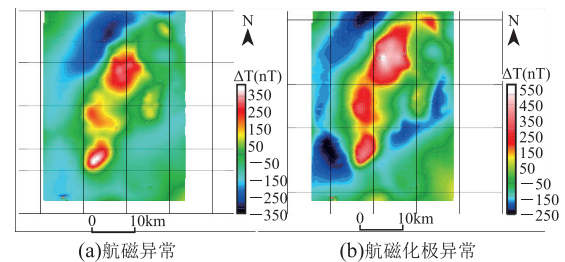


图 4 齐河—禹城地区航磁异常和航磁化极异常

Fig. 4 Aeromagnetic anomalies and reduce to the pole aeromagnetic anomalies in Qihe-Yucheng area

## 2.3 岩矿物性和建模单元划分

物性是地球物理异常地质解释的基础, 是联系地球物理异常与地质体(地层、构造、侵入岩、矿化体)之间的纽带, 考虑到不同地球物理探测方法的探测深度和分辨率差异、探测异常的体积测量和叠加效应, 不同部位的物性—异常—地质体之间的关联性须结合实际地质情况具体分析, 齐河—禹城地区物性特征如表 1 所示。

本次研究主要目标是了解研究区地层和岩体等地质单元深部的展布规律, 据此确定本次建模立体空间范围为: 东西向长度 25.6 km; 南北向长度为 34.0 km, 高度海拔 100 m 至 -3 000 m, 覆盖地表

面积约 870.40 km<sup>2</sup>。建模剖面垂直重磁异常走向,方向为东西向,剖面间距为 2 km,有效建模深度为 3.1 km。根据地质特征,参考物性差异,确定建模

涉及地质单元 16 个(如表 2 所示),同时确定地质单元的年代顺序和它们之间的接触关系,主要包括接触(onlap)和侵入(Erode)。

















表 1 齐河—禹城矿集区物性统计表

Tab. 1 Physical property statistics table of Qihe-Yucheng iron deposit

| 建模单元 | 代号      | 厚度/m                           | 磁化率/( $\times 10^{-6}$ CGSM) |         | 密度/(g/cm <sup>3</sup> ) |            |           |           |
|------|---------|--------------------------------|------------------------------|---------|-------------------------|------------|-----------|-----------|
|      |         |                                | 均值                           | 范围      | 均值                      | 范围         |           |           |
| 地层   | 第四系/新近系 | Q+N                            | 260—1 300                    | 0       | 微弱                      | 1.85       | 1.55—2.18 |           |
|      | 古近系     | E                              | 0—1 370                      | 0       | 微弱                      | 2.44       | 2.36—2.64 |           |
|      | 侏罗系     | J                              | 0—188                        | 0       | 微弱                      | 2.54       | 2.24—2.63 |           |
|      | 三叠系     | T                              | 0—436                        | 0       | 微弱                      | 2.58       | 2.55—2.6  |           |
|      | 二叠系石盒子群 | P <sub>2-3s</sub>              | 130—435                      | 165     | 2—766                   | 2.61       | 2.38—2.73 |           |
|      | 石炭系—二叠系 | C <sub>2</sub> P <sub>2y</sub> | 180—400                      | 268     | 3.8—659                 | 2.62       | 2.26—2.98 |           |
|      | 奥陶系     | O                              | 50—860                       | 0       | 1.4—157                 | 2.71       | 2.65—2.86 |           |
|      | 寒武系     | Є                              | 500—820                      | 0       | 微弱                      | 2.70       | 2.46—2.84 |           |
|      | 花岗质片麻岩  | Ar <sub>3</sub>                | >1 000                       | 1 110   | 42.8—2 112              | 2.83       | 2.57—2.88 |           |
|      | 花岗岩     | $\eta\gamma$                   | 210                          | 1 356.6 | 34—2 648                | 2.60       | 2.48—2.63 |           |
|      | 蚀变闪长岩   | Ad                             | 0—157                        | 494     | 75—1 109                | 2.68       | 2.61—2.77 |           |
|      | 闪长岩     | K <sub>1</sub> $\delta$        | 0—1 500                      | 3 156   | 52.2—5 815              | 2.77       | 2.70—2.99 |           |
|      | 岩矿体     | 辉石闪长岩                          | K <sub>1</sub> v $\delta$    | 岩体分异    | 2 816                   | 240—16 500 | 2.79      | 2.74—2.81 |
|      |         | 闪长玢岩                           | K <sub>1</sub> $\delta\mu$   | 0—140   | 496                     | 0—2 788    | 2.43      | 2.23—2.86 |
| 砂卡岩  |         | SK                             | 0—30                         | 364     | 209—985                 | 3.07       | 2.79—3.35 |           |
| 磁铁矿  |         | Mt                             | 0—119                        | 79 719  | 1 819—219 809           | 4.12       | 3.46—4.44 |           |

表 2 建模地质单元分类表

Tab. 2 Classification table of modeling units

| 名称      | 符号                             | 色标  | 与周边底层主要关系 | 名称     | 符号                         | 色标  | 与周边底层主要关系 |
|---------|--------------------------------|---|-----------|--------|----------------------------|---|-----------|
| 第四系/新近系 | Q+N                            |  | onlap     | 花岗质片麻岩 | Ar <sub>3</sub>            |  | onlap     |
| 古近系     | E                              |  | onlap     | 二长花岗岩  | $\eta\gamma$               |  | Erode     |
| 侏罗系     | J                              |  | onlap     | 蚀变闪长岩  | Ad                         |  | Erode     |
| 三叠系     | T                              |  | onlap     | 闪长岩    | K <sub>1</sub> $\delta$    |  | Erode     |
| 二叠系石盒子群 | P <sub>2-3s</sub>              |  | onlap     | 辉石闪长岩  | K <sub>1</sub> v $\delta$  |  | Erode     |
| 石炭系—二叠系 | C <sub>2</sub> P <sub>2y</sub> |  | onlap     | 闪长玢岩   | K <sub>1</sub> $\delta\mu$ |  | Erode     |
| 奥陶系     | O                              |  | onlap     | 砂卡岩    | SK                         |  | Erode     |
| 寒武系     | Є                              |  | onlap     | 磁铁矿    | Mt                         |  | Erode     |

## 2.4 重磁人机交互反演与三维地质模型构建

### 2.4.1 建立初始地质模型

在 1:50 000 基岩地质图修编的基础上,通过针对性实测地质剖面和野外路线地质调查,查明了研究区内重要地层的岩性、成分、结构构造、沉积特征、基本层序、厚度、横向变化等特征。在此基础上,结合地表地质图和钻孔资料,系统地梳理研究区涉及的地质单元、确定各地质单元间年代顺序、空间位置及它们之间的接触关系等信息。本次研究共构建

了 19 条地质剖面作为重磁反演的初始地质模型剖面。

### 2.4.2 人机交互反演

采用重磁约束下的 2.5D 反演方法修改初始剖面;在三维环境中根据地质剖面中各地质单元形态,建立走向长度(垂直剖面方向)15 km 的模型体,同时沿剖面方向两侧各延长 10 km,以减少边缘效应影响。然后参照物性信息表赋予各个模型单元密度和磁化率,正演重磁曲线并与实测数据对比,反复修

改模型形态(可根据情况适当增减地质单元),最终获得既符合实际地质情况又符合地球物理实测的约束模型结果(图 5),地表信息和钻孔信息作为重要约束,其约束范围内所涉及的地质单元在修改过程

中应保持不变。相同地质单元物性存在较大物性差异时,应划分为多个部分单独建立模型,使物性变化符合实际测量情况,提高反演模型的精度。2.5D 模型最终拟合情况如图 6 所示。

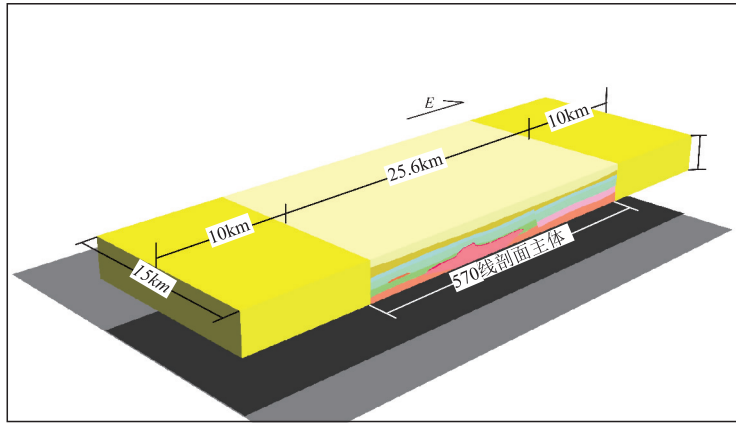
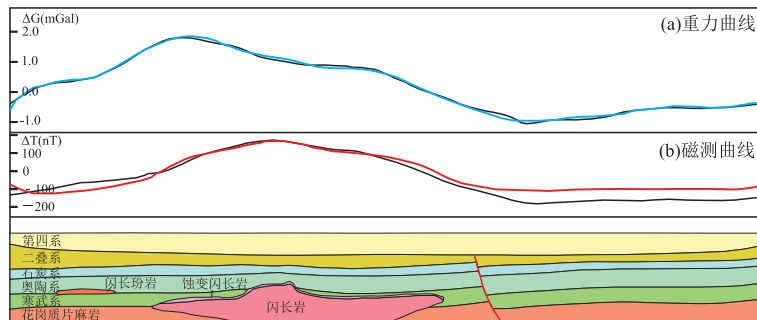


图 5 2.5D 反演模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of 2.5D inversion model



自上至下:重力实测与拟合曲线,航磁实测与拟合曲线,地质模型—图例如表 2 所示

图 6 570 线剖面 2.5D 拟合情况图

Fig. 6 Line 570 showing the 2.5D joint gravity and magnetic modeling

#### 2.4.3 3D 反演模拟

将每条剖面的 2.5D 模型走向长度缩短为剖面间距,在三维空间内拼合成三维模型(图 7),并计算 3D 模型的正演重磁异常,并与实测异常对比,从拟合误差大的区域开始修改模型,直到最终的拟合精度达到目标范围为止。本次反演结束,

所得三维模型的正演异常、实测重磁异常及它们的拟合差如图 8 所示。最终模型正演响应与实测重力、航磁异常基本吻合,主要异常形态和幅值均十分相近,仅在局部地方存在细节差异,重力拟合均方误差小于观测误差,说明笔者建立的三维地质模型可信度较高。

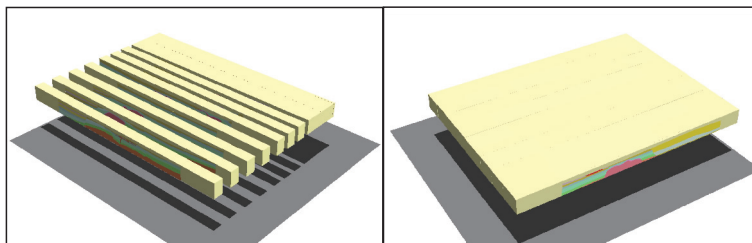


图 7 2.5D 剖面拼合为 3D 模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram shown 2.5D section stitched into 3D model

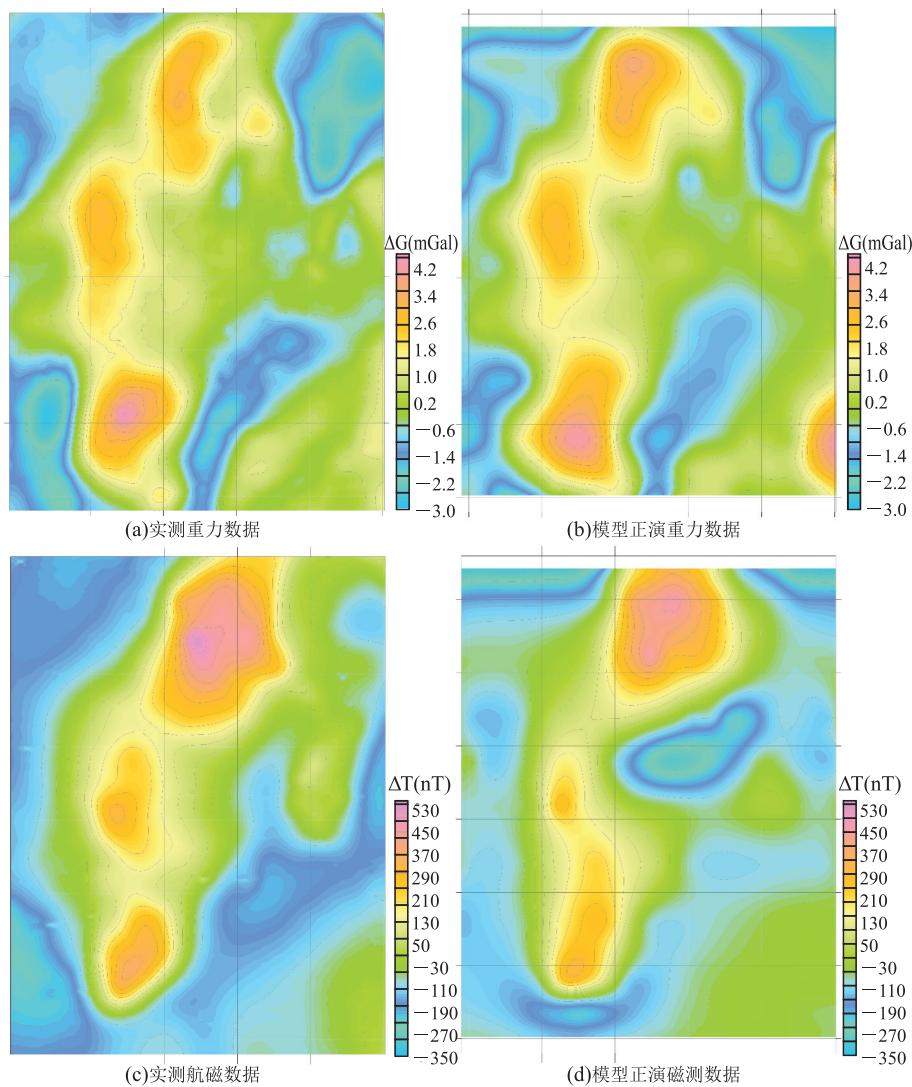


图8 模型正演异常与实测异常等值线对比图

Fig. 8 Comparison of contour lines between model forward anomalies and measured anomalies

### 2.5 齐河—禹城矿集区三维地质模型

以三维重磁模拟后所获得的成果剖面作为基础,数字化地质体边界至专业建模软件 GeoModeller,并通过插值方法形成三维模型,进一步优化了研究区三维地质模型。模型直观地刻画了齐河—禹城矿集区及邻区地层(图9)、岩体等地质体的三维空间形态和相互关系。

## 3 找矿启示

### 3.1 三维模型与成矿特征分析

研究区内见矿位置主要有李屯、潘店和大张三个区域(图10中红框),三个区域的岩体形态、埋深以及断裂、接触地层等地质情况各有特点,与成矿关

系总体类似,同时,也有不同之处。

李屯地区见矿钻孔为 ZK7/ZK6/ZK1,见矿位置部分位于闪长岩体顶界面与奥陶系地层接触带,部分位于闪长岩体与石炭系地层接触带,岩体隆起向凹陷过度的坡面位置,附近多条断裂构造,部分区域有砂卡岩存在。潘店地区见矿钻孔为 ZK401 和 PZK1,为闪长岩顶界面和奥陶系地层接触面,三维模型显示该区域见矿位置为岩体凹陷区域,深度较大,部分区域见砂卡岩,附近断裂构造不发育。大张地区见矿钻孔为 DZK1/ZK001/ZK002/ZK003,位于北西向断裂构造边缘,闪长岩体顶界面,奥陶系地层接触带,属闪长岩体隆起处南北两侧的向下坡面位置。

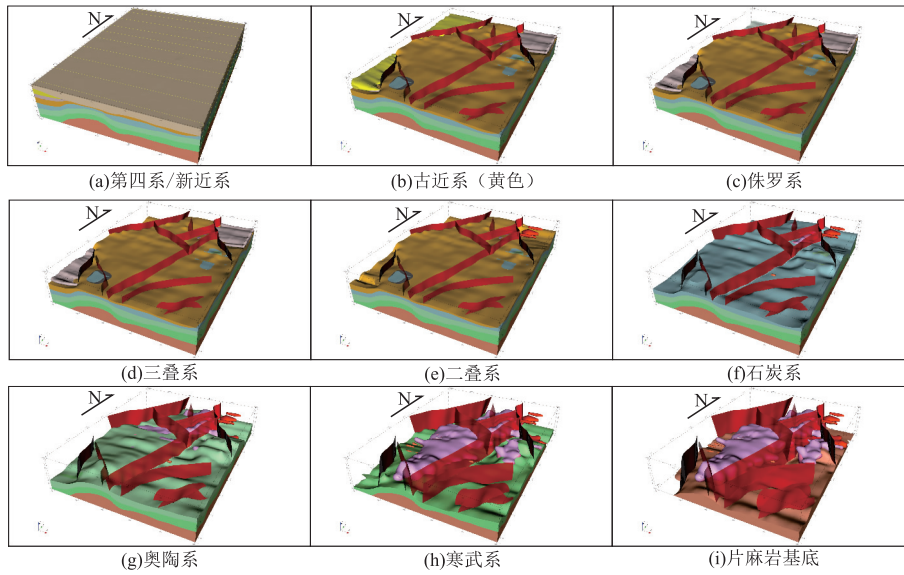


图 9 地层与断层三维形态图

Fig. 9 Three-dimensional morphology of the strata and faults

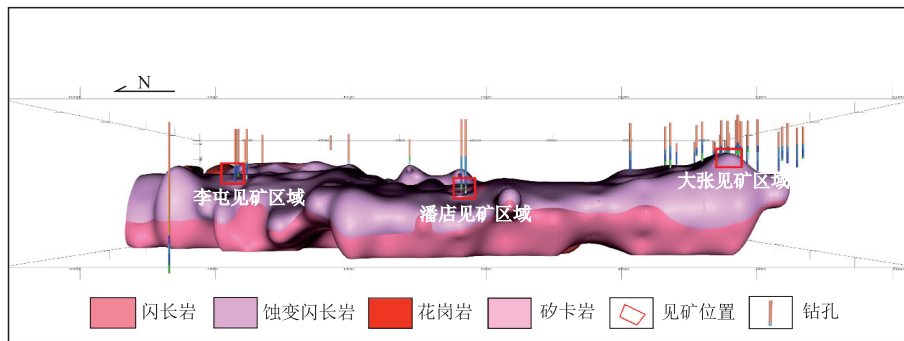


图 10 岩体侧视图(视角一自西向东看)

Fig. 10 Side view of the intrusions (perspective view from west to east)

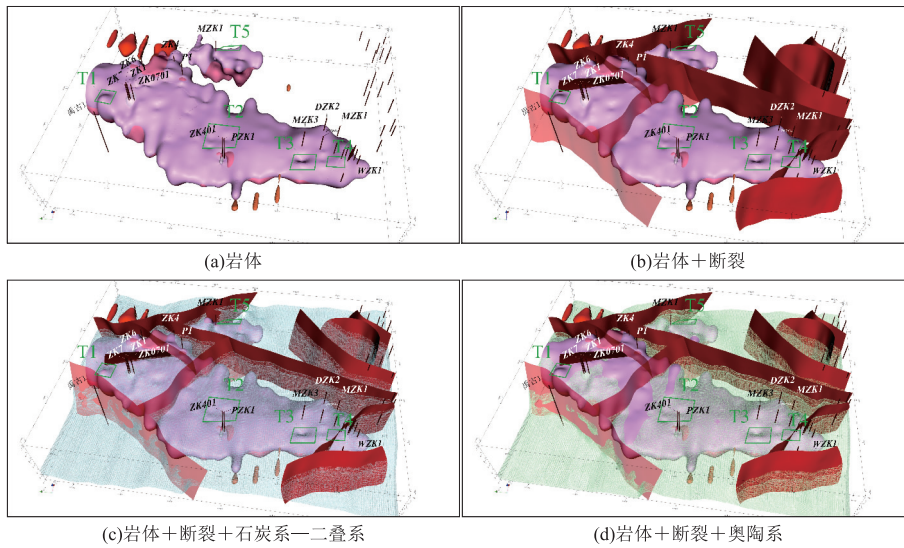


图 11 齐河—禹城全区三维模型与找矿靶区分布图

Fig. 11 3D model of Qihe-Yucheng region and distribution of prospecting targets

### 3.2 找矿靶区预测

结合三维地质模型、钻孔和地球物理资料,预测找矿靶区 5 处,分别为 T1—石庄靶区、T2—王官屯东靶区、T3—潘店西靶区、T4—大张北靶区和 T5—薛官屯北靶区,空间位置如图 11 所示。

#### 1) T1—石庄靶区

位于石庄一带,三维模型显示,该区域为岩体隆起及向东侧凹陷过渡区域,为与石炭系地层接触带区域,东西两侧邻近断裂构造,重力和磁测高值异常北西侧梯度带位置(图 3~图 4),齐河禹城地区找矿有利地段应该基本围限于高值异常区。其中李屯地区在李楼村附近实施的钻孔已经见到磁铁矿体,与该高值区对应,在石庄一带也存在了类似李楼的整装高值区。

#### 2) T2—王官屯东靶区

位于王官屯东北,莒县断裂南侧,重力高值异常向东南侧凸起位置,高值磁异常区内偏东位置,三维模型显示该区域为蚀变闪长岩顶部与奥陶系接触位置,岩体上界面呈凹陷形态,与钻孔 ZK401 和 PZK1 所处位置类似。

#### 3) T3—潘店西靶区

位于潘店西南侧,王官屯南侧,重力和磁测高值异常区域西北侧梯度带位置,西南侧邻近断裂构造,三维模型显示该区域岩体向上凸起,东侧向下凹陷,顶界面与奥陶系接触位置有利成矿。

#### 4) T4—大张北靶区

位于大张北部,重力高值异常区域,高磁异常西侧等值线梯度带区域,同样该区域南侧见矿钻孔一样处于交叉梯度法获得的高值异常区域,三维模型显示为岩体凸起向北侧延伸区域,该区域西南角位置有断裂经过,岩体和奥陶系地层接触带为有利成矿区域。

#### 5) T5—薛官屯北靶区

位于薛官屯东北部,朱庄南侧,重力高值异常等值线向北凸起位置,局部相对高磁异常区域,三维模型显示为岩体凸起向南侧凹陷区域,为闪长岩与奥陶组地层接触面,该区域东西两侧均有断裂经过,为成矿创造了有利条件。

## 4 结论

本研究以重数据为基础,结合基岩地质图、钻孔等信息,构建地质剖面 19 条,并完成了所有剖面的重磁三维反演。通过这 19 条剖面建立了覆盖齐河

—禹城矿集区地表面积 870.4 km<sup>2</sup>,有效深度 3.1 km 的三维地质模型,获取了研究区深部岩体、地层、构造的空间形态。

以三维地质模型揭示的闪长岩岩体、碳酸盐岩地层空间位置关系为主,综合分析重力、磁力异常和钻孔信息,预测了石庄、王官屯东、潘店西、大张北、薛官屯北等五个找矿有利靶区,为齐河—禹城矿集区钻孔部署和找矿增储提供了三维信息。

基于本方法结合接触交代型铁矿地质特征、成矿控制因素和成矿作用分析,初步提出 5 个新的有利靶区,我国华北克拉通中部、鄂东南、闽南—粤东、东秦岭和青海西部也是矽卡岩型铁矿富集区,笔者的方法和经验可为这些地区的新一轮找矿突破提供技术参考。

### 参考文献:

- [1] 郝兴中,郭延明,李英平,等. 山东齐河—禹城矿集区矽卡岩型铁矿成矿规律[J]. 地质学刊, 2019, 43(4): 566—572.  
HAO X Z, GUO Y M, LI Y P, et al. Metallogeny of the skarn-type iron deposits in Qihe-Yucheng ore district, Shandong Province [J]. Journal of Geology, 2019, 43(4): 566—572. (In Chinese)
- [2] 郝兴中,郑金明,刘伟,等. 山东省齐河—禹城地区矽卡岩型铁矿成矿预测[J]. 地球学报, 2020, 41(2): 293—302.  
HAO X Z, ZHENG J M, LIU W, et al. Metallogenic prognosis of skarn-type iron ore deposits in qihe-Yucheng area, Shandong Province [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2020, 41(2): 293—302. (In Chinese)
- [3] 郝兴中. 山东省齐河地区接触交代型铁矿成矿要素耦合分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(33): 13552—13558.  
HAO X Z. Analysis of the coupling of ore-forming factors of contact metasomatic iron ore in Qihe Area, Shandong Province [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(33): 13552—13558. (In Chinese)
- [4] 陈晓曼,王娟,王继国,等. 山东省齐河大张铁矿地质特征及找矿前景[J]. 山东国土资源, 2017, 33(12): 24—29.  
CHEN X M, WANG J, WANG J G, et al. Geological characteristics and prospecting potential of dazhang iron deposit in Qihe County of Shandong Province [J]. Shandong Land and Resources, 2017, 33(12): 24—29. (In Chinese)
- [5] 郭延明,郝兴中,钟伟杰,等. 地面高精度磁测在隐伏铁矿勘查中的应用:以山东省禹城市李屯地区铁矿

- 为例[J]. 山东国土资源, 2017, 33(10): 52—56.
- GUO Y M, HAO X Z, ZHONG W J, et al. Application of high-precision magnetic measurement in exploration of hidden iron deposit—Setting iron deposits in litun area of Yucheng city in Shandong Province as an example[J]. Shandong Land and Resources, 2017, 33(10): 52—56. (In Chinese)
- [6] 王润生, 郝兴中, 刘洪波, 等. 鲁西齐河地区矽卡岩型铁矿重磁方法找矿规律研究[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(2): 664—677.
- WANG R S, HAO X Z, LIU H B, et al. Study on prospecting law of skarn type iron deposit by gravity and magnetic method in Qihe Area of western Shandong[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(2): 664—677. (In Chinese)
- [7] 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.
- CHEN J P, YU M, YU P P, et al. Method and practice of 3D geological modeling at key metallogenic belt with large and medium scale[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(6): 1187—1195. (In Chinese)
- [8] 严加永, 孟贵祥, 吕庆田, 等. 综合地球物理在荒漠覆盖区隐伏矿床预测与定位中的应用: 以新疆拉克勒克铜多金属矿床为例[J]. 地球物理学报, 2021, 64(11): 4117—4133.
- YAN J Y, MENG G X, LV Q T, et al. Prediction and location of concealed deposits in desertgobi coverage areas using integrated geophysics: An example of the Layikeleke copper polymetallic deposit in Xinjiang, Northwest China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(11): 4117—4133. (In Chinese)
- [9] 邓震, 吕庆田, 严加永, 等. 九江—瑞昌矿集区的3D结构及对区域找矿的启示[J]. 地球物理学报, 2012, 55(12): 4169—4180.
- DENG Z, LV Q T, YAN J Y, et al. The three-dimension structure and the enlightenment to the regional prospecting of the Jiujiang-Ruichang district[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(12): 4169—4180. (In Chinese)
- [10] 祁光, 吕庆田, 严加永, 等. 先验地质信息约束下的三维重磁反演建模研究: 以安徽泥河铁矿为例[J]. 地球物理学报, 2012, 55(12): 4194—4206.
- QI G, LV Q T, YAN J Y, et al. Geologic constrained 3D gravity and magnetic modeling of Nihe deposit—a case study[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(12): 4194—4206. (In Chinese)
- [11] LV Q T, QI G, YAN J Y. 3D geologic model of Shizishan ore field constrained by gravity and magnetic interactive modeling: A case history[J]. Geophysics, 2013, 78(1): B25—B35.
- [12] YAN J Y, LV Q T, QI G, et al. A 3D geological model constrained by gravity and magnetic inversion and its exploration implications for the world-class Zhuxitongsten deposit, South China[J]. Acta Geologica Sinica—English Edition, 2020, 94(6): 1940—1959.
- [13] 周明磊, 汝亮, 朱裕振, 等. 山东齐河—禹城地区重磁场特征及找矿预测[J]. 物探与化探, 2021, 45(2): 301—307.
- ZHOU M L, RU L, ZHU Y Z, et al. Magnetic field characteristics and ore prediction in Qihe-Yucheng Area of Shandong Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(2): 301—307. (In Chinese)
- [14] 王怀洪, 李秀章, 沈立军, 等. 山东齐河—禹城地区“禹城式”富铁矿地质特征与成矿模式[J]. 山东国土资源, 2021, 37(9): 26—35.
- WANG H H, LI X Z, SHEN L J, et al. Geological characteristics and metallogenic model of “Yucheng type” rich iron deposit in Qihe Yucheng Area in Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 2021, 37(9): 26—35. (In Chinese)
- [15] LI Y G, OLDENBURG D W. 3-D inversion of magnetic data[J]. Geophysics, 1996, 61(2): 394—408.
- [16] LI Y G, OLDENBURG D W. 3-D inversion of gravity data[J]. Geophysics, 1998, 63(1): 109—119.

### 3D Gravity and magnetic modelling and prospecting in Qihe-Yucheng Area, Shandong Provinces

LV Jingyi<sup>1</sup>, NING Zhenguo<sup>2</sup>, QI Guang<sup>3</sup>, ZHU Xueqiang<sup>4</sup>, HU Xueping<sup>4</sup>, SHE Jingjin<sup>3</sup>, ZHOU Qiang<sup>5</sup>

(1. China Communications Information Technology Group Co., Ltd., Beijing 100088, China;

2. Shandong Institute of Geological Sciences, Jinan 250013, China;

3. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

4. Shandong Institute of Geological Surveying Jinan 250014, China;

5. Shandong Zhengyuan Construction Engineer Co., Ltd. Jinan Branch, Jinan 250101, China)

**Abstract:** The iron-rich ore area discovered in recent years in the Qihe-Yucheng ore concentration area of Shandong Province has high ore grades and large reserves, and is expected to become an important iron-rich ore base in China. A lot of work has been done in the study of ore deposits, such as diagenetic and metallogenic times, ore-controlling structures, ore-bearing horizons, and ore-prospecting laws, and many achievements and understandings have been obtained. However, because the area is located in the Quaternary thick overburden area, it is difficult to obtain deep anomaly information. The deep structural style of the mining area, the spatial form and scale of the hidden rock mass, and the spatial distribution of the main ore-controlling strata have not been effectively solved. Seriously restrict the further expansion of the scale of the deposit. Three-dimensional geological modeling technology with gravity and magnetic constraints has become an important means of deep ore prospecting. It uses prior information for three-dimensional inversion to improve vertical resolution of gravity and magnetic data. It can be used to track the deep extension of known ore belts, or to judge the nature of important metallogenic anomalies, so as to achieve ore prospecting prediction. In this paper, the latest measurement is used to obtain 1:50,000 gravity data and 1:25,000 aeromagnetic data. First, the potential field separation is carried out to obtain anomalous data for gravity and magnetic inversion. Then, under the constraints of surface geology, borehole data and physical properties, the human-computer interaction gravity and magnetic inversion of 19 profiles was completed. Finally, based on the inversion results of these 19 sections, a three-dimensional geological model of the study area was established, and the spatial form of the rock mass and strata at a depth of 3 km underground was obtained. On the basis of analyzing the geophysical and geological characteristics of the main ore deposits in the Qihe-Yucheng ore concentration area, 5 new prospecting target areas are predicted based on the characteristics of the ore-controlling geological bodies revealed by the three-dimensional geological model.

**Keywords:** Qihe-Yucheng; 3D geological model; gravity and magnetic inversion; skarn iron deposit