

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. 地球物理学报, 2012, 55(12): 4194-4206, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.031.

Qi G, Lü Q T, Yan J Y, et al. Geologic constrained 3D gravity and magnetic modeling of Nihe deposit—A case study. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 4194-4206, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.031.

## 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

祁 光<sup>1</sup>, 吕庆田<sup>1,2</sup>, 严加永<sup>2</sup>, 吴明安<sup>3</sup>, 刘 彦<sup>2</sup>

1 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026

2 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037

3 安徽省地质调查院, 合肥 230088

**摘 要** 安徽泥河铁(硫)矿床是近年发现的大深度隐伏矿床, 它的发现再次引发了庐枞地区深部找矿的热潮. 建立矿区的三维精细地质模型, 对寻找深、边部隐伏矿体, 深入认识深部成矿、控矿规律意义重大. 本文以泥河矿区为实例, 开展先验地质信息约束的三维重磁建模研究, 获得了矿区面积  $5.6 \text{ km}^2$  ( $2.8 \text{ km} \times 2.0 \text{ km}$ )、深度  $1.2 \text{ km}$  内的三维地质模型. 在三维可视化平台上对该模型进行了地质解释, 全面分析了矿体、地层与次火山岩之间的空间分布及对应关系, 发现铁矿主要赋存于闪长玢岩与砖桥组火山岩之间, 且在玢岩穹窿地段矿体厚大, 这对认识“玢岩型”铁矿的成矿模式具有重要的实际意义; 三维模型的重磁正演响应基本拟合了实际重磁异常, 说明在建模区域内已没有新的矿体; 本文提出的三维地质建模流程可为其它地区开展类似工作提供借鉴, 同时研究表明地质信息约束下的三维重磁建模研究在深、边部找矿和重磁异常的精细解剖等方面具有潜在的价值和广阔的应用前景.

**关键词** 泥河铁矿, 3D 地质建模, 交互反演, 深部找矿

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.031

中图分类号 P631

收稿日期 2012-07-10, 2012-10-10 收修定稿

### Geologic constrained 3D gravity and magnetic modeling of Nihe deposit —A case study

QI Guang<sup>1</sup>, LÜ Qing-Tian<sup>1,2</sup>, YAN Jia-Yong<sup>2</sup>, Wu Minan<sup>3</sup>, LIU Yan<sup>2</sup>

1 College of Geoprospection Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

2 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources,  
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

3 Anhui Geological Survey, Hefei 230088, China

**Abstract** Nihe ore deposit, located in Anhui Province, is deep hidden ore deposit which was discovered in recent years, this finding is the major driving force of deep mineral exploration work in Luzong. Building 3D elaborate geological model has the important significance for prospecting to deep or surround in this area, and can help us better understand the metallogenic law and ore-controlling regularity. This article takes the Nihe iron ore district as an example, a physical property model of the study area has been built by using geologically constrained gravity and

**基金项目** 国家科技专项深部矿产资源立体探测技术与试验(SinoProbe-03)、国家自然科学基金项目(41104061, 40930418)、“十一五”科技支撑计划课题“玢岩型”铁(硫)矿深部勘查技术与找矿示范研究(2009BAB43B02)和地质大调查项目“长江中下游地区地壳精细结构与控矿研究”(1212010813052)联合资助.

**作者简介** 祁光, 1985 生, 男, 博士研究生, 主要从事重磁勘探及反演方法研究. E-mail: qiguang\_china@163.com

magnetic interactive inversion, covering an area of  $2.8 \times 2.0$  km to depths of 1.2 km, and displayed by using 3D visualization software. The detailed knowledge of the spatial distribution of ore-related and ore-bearing strata has been analyzed in the round, which has important practical significance for understanding the metallogenic model of porphyry iron deposit; The results of modeling adequately reproduce the gravity and magnetic field observations, which indicated that there is no ore body in this area. The flow work in this paper provide reference for similar work in other areas; this study shows that the research of geologic constrained 3D gravity and magnetic modeling has potential value and broad application prospect in the aspects of prospecting to deep or surround and the delicate analysis of gravity and magnetic field response.

**Keywords** Nihe iron ore, 3D geological modeling, Interactive inversion, Deep mineral exploration

## 1 引言

从区域三维建模(简称:3D建模)应用于深部成矿预测,到矿区三维建模应用于矿山开发设计及储量计算,三维建模在矿产勘探、开发的不同阶段都具有十分重要的意义。随着浅地表矿床发现的难度越来越大,资源勘查的深度越来越深,3D建模技术在深部找矿中作用更加明显。近年来,随着建模技术日益成熟及3D建模软件功能日益强大,3D建模已经广泛应用于深部成矿预测和矿体形态的精细结构刻画,并取得了很好的应用效果,如 Martin 等(2007)使用多学科的数据构建出加拿大 Noranda 矿区 3D 地质模型,并基于矿床模型建立了一系列定性和定量预测准则,在 3D 模型空间中预测深部找矿目标,经钻探验证,获得了厚 52.7 m、Cu 品位 3.57% 的矿体(West Ansil 矿体),被认为是加拿大近 25 年来最重要的找矿发现。Malehmir 等(2009)通过集成地质、岩石物性数据、反射地震和位场数据,建立了瑞典 Kristineberg 矿区 3D 地质模型,全面评价了该区金矿的成矿潜力。Wang 等(2011)在河南栾川矿集区,通过地质、构造、钻孔和重磁数据建立了该区的 3D 地质模型,结合分形和神经网络成矿预测技术,定量预测了斑岩-矽卡岩型 Mo 矿、热液脉型 Pb-Zn-Ag 矿的区域成矿潜力。

重、磁反演模拟是获得地下结构的有效方法,然而,由于重磁反演的多解性,不加约束的反演很难获得与实际地质情况一致的 3D 模型<sup>[1]</sup>。为了减少反演过程的多解性,通常的作法是在反演过程中尽可能加入先验地质、构造、岩石物性、钻孔数据和其它地球物理解释信息。反演理论和建模实例都表明,在大量先验信息的约束下,重、磁反演可以获得可靠

的、与地质情况相符的 3D 地质模型<sup>[1-4]</sup>。为了减少反演的多解性,有学者还尝试同时使用重力和磁力数据进行反演建模<sup>[5-7]</sup>,取得很好的地质效果。

泥河铁矿位于安徽省庐枞矿集区北西侧,是近年发现的深度大于 700 m 的大型“玢岩型”铁(硫)矿床。正是由于泥河铁矿、罗河深部矿体的发现,庐枞地区的深部找矿工作再次引起大家的关注,并被列为国家重点勘查区之一。庐枞矿集区深部寻找“玢岩型”铁(硫)矿床,当前急需解决两个关键问题,一是如何区分矿体与非矿体重磁异常;二是深化对“玢岩型”铁矿的成矿与控矿模式的认识。地质约束下的重、磁反演实际上提供了一种深化认识异常性质、精细解剖异常的重要手段,同时还给出矿体与围岩的 3D 空间关系。因此,建立典型“玢岩型”铁(硫)的 3D 结构模型无论对于矿区深部(外围)和区域找矿,还是对研究“玢岩型”铁矿的成矿模式都有重要的意义。本文以泥河铁矿为例,给出了在先验地质、物性和钻孔数据约束下的建模流程和建模结果,并对结果的地质和深部找矿意义进行了讨论。

## 2 地质概况

### 2.1 区域地质

庐枞矿集区位于长江中下游成矿带的中部,主体为庐枞火山岩盆地,是我国东部重要的铁、硫、铜多金属资源基地。构造上,庐枞盆地位于长江中下游断拗带内,华北板块和扬子板块对接带的大别造山带东侧,西邻郯庐断裂带,是长江中下游最重要的中生代火山岩盆地(图 1)<sup>[8-12]</sup>。盆地地层属于下扬子地层分区,出露地层主要有第四系、白垩系、侏罗系、三叠系、二叠系、石炭系、泥盆系和志留系,总厚度在 6000 m 以上。

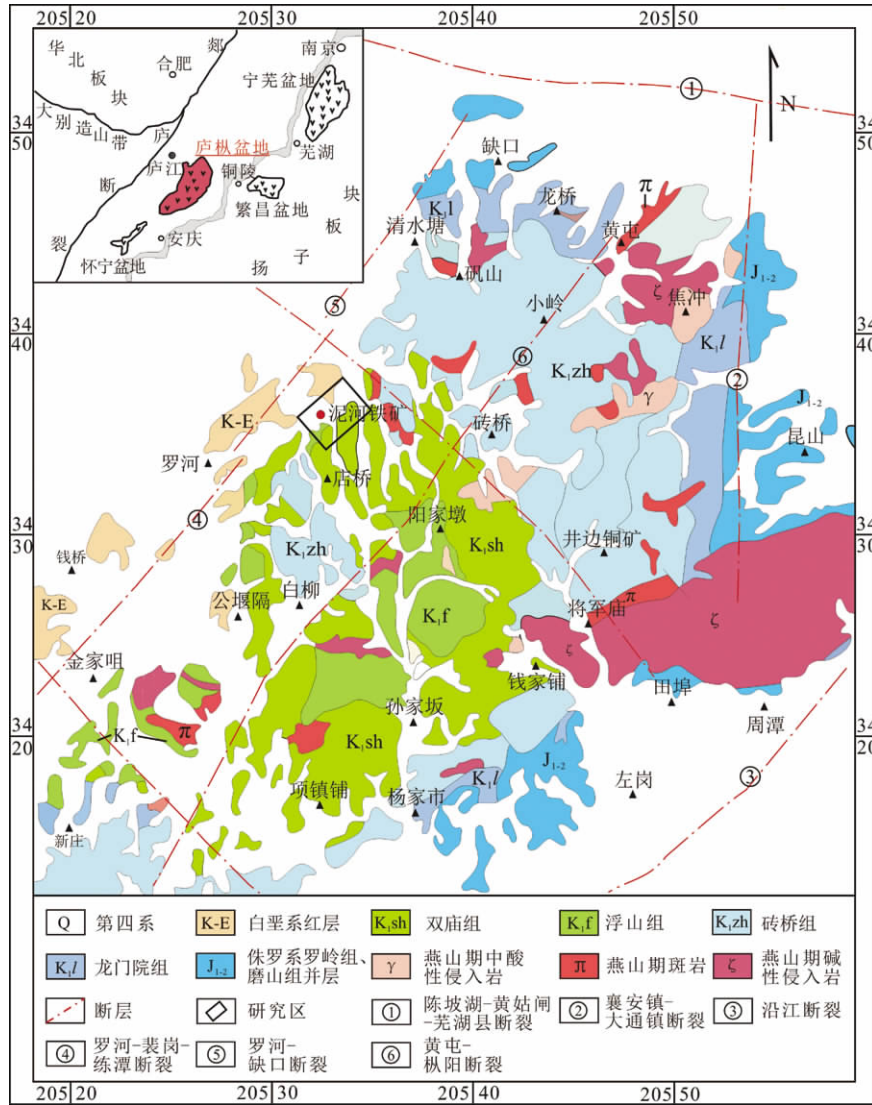


图 1 庐枞矿集区地质简图及泥河铁矿区位置(据安徽地调院<sup>[1]</sup> 2010 修编)

Fig. 1 Simplified geologic map of Luzong Ore District with the location of NiheOre Deposit(after Anhui geological survey, 2010)

庐枞矿集区中生代发生了剧烈的构造岩浆活动,形成了大量以中酸性岩石为主的侵入体和陆相火山岩系. 火山岩自下而上可分为龙门院旋回、砖桥旋回、双庙旋回和浮山旋回. 在空间上 4 个旋回大致呈同心环状分布,由老到新从盆地北部、东部和南部向盆地西部及中心地区依次分布. 各旋回之间均为喷发不整合接触. 火山岩类由熔岩、碎屑熔岩、火山碎屑岩及次火山岩组成,但各个旋回之间略有差别,其中龙门院旋回以玄武粗安岩为主,伴有少量粗面玄武岩、粗安岩和安山岩. 砖桥旋回主要以粗安岩、玄武粗安岩为主,伴有少量粗面岩. 双庙旋回则以粗

面玄武岩为主,同时出现少量玄武粗安岩和粗面岩. 浮山旋回主要为粗面岩类,上部出现少量碱性粗面岩和含似长石碱玄武岩<sup>[12]</sup>. 庐枞盆地内有大量侵入岩体,其形成过程与该区域内的火山喷发、岩浆侵入活动有着密切的联系. 侵入活动大体上分为以闪长玢岩为主的燕山早期和以正长玢岩为主的燕山晚期这两个阶段. 侵入岩按不同源区来源可分为两个岩浆系列:

(1)与火山岩来源一致的源自地幔属于橄榄玄(安)粗岩系的次火山岩或侵入岩系列;

(2)源自玄武质下地壳的具有埃达克质特征的钙碱性侵入岩系列<sup>[13]</sup>.

按照岩体岩性主要分为三种:

(1)二长岩体,主要分布在盆地的北部,出露面

1) 吴明安等. 泥河矿区勘探报告. 2010.

积较大的岩体有巴家滩岩体、龙桥岩体和罗岭岩体等;

(2) 正长岩体, 出露面积较大的岩体有土地山岩体、凤凰山岩体等;

(3) 花岗岩, 出露面积较大的岩体有城山岩体、花山岩体和黄梅尖岩体等。庐枞地区的火山岩-次火山岩-侵入岩系列与成矿关系密切<sup>[12-15]</sup>。

庐枞矿集区矿产资源丰富, 是一个由铁、铜、铀、硫、铅、锌、金和明矾石等多种矿床构成的矿集区。盆地内矿床类型主要有:

(1) 与龙门院旋回有关的次火山热液型 Pb、Zn 矿床;

(2) 与砖桥旋回有关的玢岩型铁矿床和中温热液型铜金矿床;

(3) 与正长岩类侵入岩有关的铁氧化物-铜-金(铀)矿床。主要矿床有: 包括罗河、龙桥和泥河等大型铁矿床、岳山中型铅锌银矿床、井边石门庵、天头山和拔茅山等小型铜金矿床以及矾山等大型明矾石矿床。此外还有马口、杨桥、吴桥和 3440、34 等铁-铜-金-铀多金属矿床(点)<sup>[16-17]</sup>。

庐枞盆地构造主要为断裂构造, 控制边界深大断裂由北侧起顺时针依次为陈坡湖—黄姑闸—芜湖县断裂(NW 向)、襄安镇—大通镇断裂近(SN 向)、沿江深大断裂(NEE 向)、罗河—裴岗—练潭断裂(NNE 向)<sup>[14]</sup>。盆地内的断裂构造是发育与边界断裂一致的深大断裂和近东西向、南北向 2 组共轭断裂, 构成独特的网络状断裂构造体系。北东向断裂构造是盆地的主干断裂, 控制了火山岩拗陷区的形成、演化和基底的性质。火山岩区西侧边界断裂罗河—缺口断裂和中央的黄屯—枞阳断裂是两条最重要的断裂, 罗河—缺口断裂不仅是火山拗陷岩区的西部边界断裂, 还可能控制拗陷区形态、岩浆喷发顺序及演化格局; 黄屯—枞阳断裂控制基底的分布形态, 并对晚期的岩浆活动和成矿作用具有重要控制作用<sup>[18]</sup>。

## 2.2 矿床地质

泥河矿区位于庐枞矿集区西北部, 罗河—黄屯成矿带上, 罗河铁矿东北侧 3.5 km 处, 如图 1 和 2 中黑线框所示。矿区地表主要被第四系所覆盖(图 2), 钻孔钻遇的地层为下白垩统砖桥组、下白垩统双庙组以及杨湾组。地表地层产状平缓, 走向北东 20~40°, 向北西倾斜, 倾角 10~15°, 往深部地层产状有起伏变化。砖桥组岩性主要为含角砾凝灰岩、沉角砾凝灰岩、沉火山碎屑岩、凝灰质粉砂岩、黑云母粗安岩和辉石粗安岩等, 常发育不同程度的硅化、黄

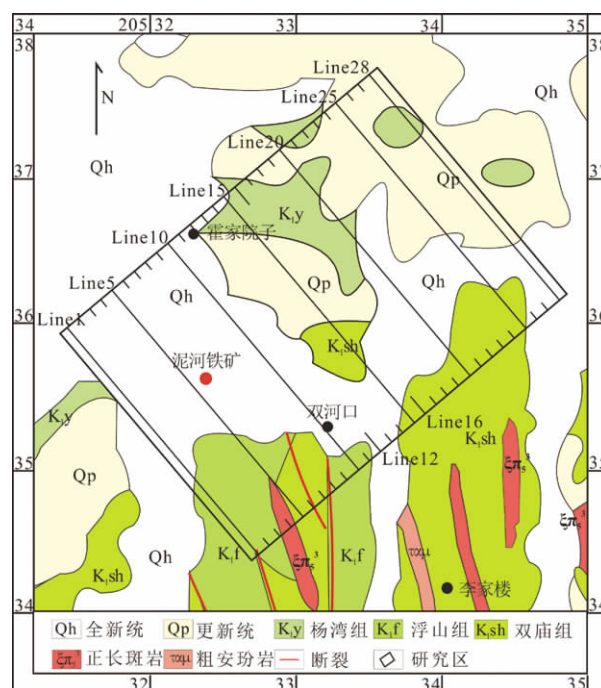


图 2 泥河铁矿区地质简图

Fig. 2 Simplified geological map of Nihe Ore Deposit

铁矿化和硬石膏化。双庙组分为上下两个岩性段: 下段均为火山碎屑岩及沉火山碎屑岩, 呈喷发不整合覆盖在砖桥组层位之上; 上段以熔岩为主, 夹少量火山碎屑岩。杨湾组主要岩性为砂砾岩, 与下伏双庙组火山岩地层呈沉积不整合接触<sup>[10]</sup>。

根据钻孔资料, 矿区褶皱不发育, 总体构成一个向北西倾斜的单斜构造。断裂、裂隙发育, 产状较陡, 倾角一般在 40~70°之间, 区域性罗河—缺口断裂从矿区西部穿过。矿床由 2 部分组成, 南西部分主体为磁铁矿体, 总体呈厚层状、透镜状产出, 由多层矿体上下迭置而成, 走向呈北东向展布, 倾向北西, 倾角 15~30°; 北东部分主体为黄铁矿, 由多层矿体组成, 向南东倾斜。矿体总长度约 900 m, 宽度达 400 m, 矿体埋藏深度在 655~1065 m 之间。矿体赋存于闪长玢岩的顶部, 闪长玢岩侵入于砖桥组火山岩内, 形成向上突起的穹隆, 矿体在穹隆处相对厚大, 品位也较高。矿体主要矿物为磁铁矿、黄铁矿<sup>[19]</sup>。

## 3 三维反演建模

### 3.1 建模工作流程

建立三维模型需要集成大量地质、钻孔、岩性和其它地球物理资料, 合理的建模流程可以取得事半功倍的效果, 并可以供他人借鉴, 或应用到其它地区的建模中。已有很多学者提出过地质信息约束下的

3D 建模流程<sup>[6,20]</sup>,虽然不同学者提出的建模流程细节上各有差别,但基本上都包括三个部分,即初始模型的构建、2D/3D 重磁反演模拟和 3D 显示与地质解释.其中,2D/3D 重磁模拟在建模过程中起着至关重要的作用,它是对初始模型的进一步优化,并最终提供模型的物性和几何参数的空间分布.原理上,联合使用重、磁数据进行反演可以明显减少反演的多解性,Williams(2008)通过实际例子验证了联合使用地表、地下地质和地球物理约束可以获得可靠的反演结果.

目前,2D/3D 重磁反演模拟主要有离散体(Discrete)、表面体(Surface)和网格(Voxels)反演模拟法,每一种方法有其自身的优势和劣势<sup>[21-27]</sup>.方法的选择取决于建模的目标和现有地质约束的类型.网格反演(或称广义物性反演)方法很容易获得模型的物性分布,而且模型产生的理论异常与实测异常的细节吻合也较好,但是很难加入地质构造方面的先验约束,模拟结果仅能反映地质体的宏观分布,细节上与实际差距较大;表面体模拟方法可以很好模拟地质体的构造信息,但位场拟合误差较大;离散体模拟方法可以给出上述两种方法的“折衷”结果,既可以很好反映地质信息,又可使观测场与理论场的拟合误差较小.该方法的重大优势是可以方便地加入先验地质、构造等信息,如地层倾向、断层和矿化体等<sup>[23]</sup>,还可以最大限度发挥地质学家的经验和对区域地质的理解.

本文使用离散体模拟方法,总体思路是用 2.5D 的剖面地质体拼合构建 3D 模型.本方法可最大限度地利用物性数据和钻孔地质信息,使用的建模流程如图 2,主要包括建模区域定义、先验地质信息处

理、2D 地质模型构建、2.5D/3D 反演模拟、可视化与解释等步骤<sup>[6,28-29]</sup>.

### 3.1.1 建模区域定义

根据研究目标,首先要确定建模区域的范围(水平范围和深度),然后确定 2D 剖面的间距,一般情况下 2D 剖面间距与矿区勘探剖面间距相同.

### 3.1.2 先验地质信息处理

主要包括对地表岩性单元或地质单元进行简化,钻孔数据、年代学数据收集,岩石物性测量,岩性与物性对应关系分析,重磁数据预处理(如编辑、网格化、滤波和局部场分离等)和地震剖面解释等.对构造地质、岩性变化复杂的地区对岩性单元进行适当简化尤其重要,可以降低反演模拟的难度.钻孔信息提供深部主要地层单元的边界深度,一般在重磁反演中作为重要的约束,保持不变.区域场和局部异常分离在这个环节中非常重要,分离出的局部异常将作为考量模型是否合理的依据.

### 3.1.3 2D 地质模型构建

根据步骤(1)确定的剖面间距,通过对已有地质、钻孔资料分析的基础上,依次推断、绘制建模区域的所有 2D 地质剖面.每条 2D 剖面由若干紧密关联的模型体(地质体)构成,大致反映对剖面穿过区域的地层、构造、岩体和矿体空间分布的认识.对矿区熟悉的地质学家的认识和对区域地质的理解在创建 2D 地质剖面时十分重要,随后的反演模拟实际上是对初始模型的修正和完善.

### 3.1.4 2.5D/3D 反演模拟

本步骤主要包括 2.5D 和 3D 重磁反演模拟.2.5D 重磁模拟的初始模型来自步骤(3)的 2D 地质模型,假设每个模型体沿走向足够长(长度由沿走向

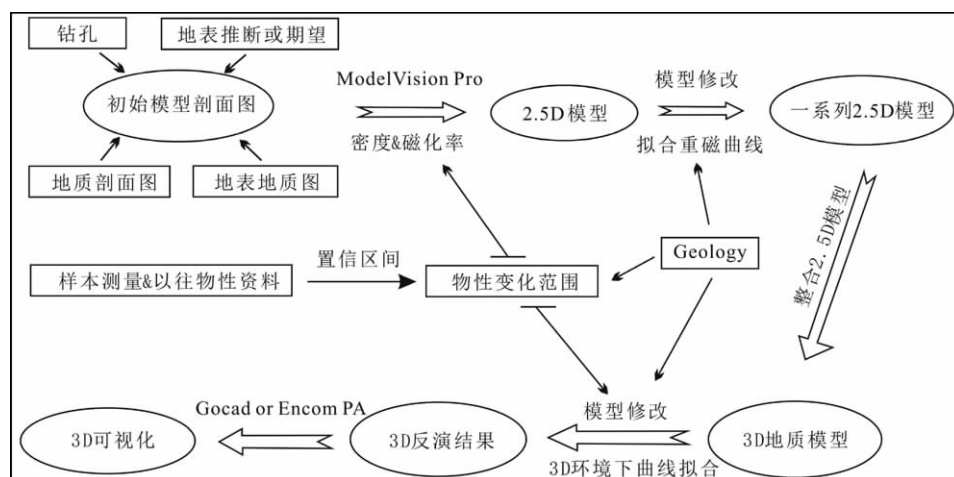


图 3 三维地质建模工作流程

Fig. 3 The work flow for constructing the 3D geological model



的坐标  $y_1$  和  $y_2$  定义),截面为任意形态的多面体,且满足 2.5D 重磁异常计算的近似条件.然后,对每一个模型体赋予初始密度和磁化率强度,使用人机交互“试错法(trial-and-error)”对 2D 剖面上的模型进行修改,直到获得合理的地质模型和满意的数据拟合为止<sup>[21]</sup>.模型体的物性和空间形态的修改范围由物性数据和地质合理性决定.按照上述方法完成建模区所有 2D 剖面的重磁模拟,然后将每条 2D 剖面的模型走向长度  $y_1$  和  $y_2$  缩短为剖面间距,按照剖面的空间顺序依次将 2.5D 模型拼合成 3D 模型.最后,计算 3D 模型的理论异常,并与实际异常对比,拟合误差较大的地方,返回到 2D 剖面进行修改.此时,虽然是在 2D 剖面上进行模型修改,但计算的异常是所有 3D 模型的异常.对所有拟合误差较大的地方进行模型修改,直到获得满意的结果为止.在整个模拟过程中,物性与岩性的对应关系保持不变.

### 3.1.5 可视化与解释

最后一步是将 3D 模型输出到 3D 可视化平台(如,Encom PA<sup>TM</sup>)开展空间分析.如果是区域 3D 建模,可以提取深部成矿信息,结合成矿模型开展深部成矿预测.如果是矿区 3D 建模,可以全面分析控矿地层、矿体和岩体的空间关系,建立成矿模式;还可以进行储量计算、矿山设计和预测深部或边部矿体等.

## 3.2 位场数据处理和物性研究

### 3.2.1 位场数据处理

重力数据使用 1:5 万高精度数据,对数据进行 20 m×20 m 的网格化和圆滑处理.磁法数据为 1:1 万地面实测数据,并对数据进行了 25 m×25 m 的网格化和化极及圆滑处理.反演使用的实测数据应该是反映建模空间区域内地质体的局部异常,位场分离十分重要.位场分离的方法有很多<sup>[30-34]</sup>,如上下延拓、非线性滤波、匹配滤波、趋势分析<sup>[23,30]</sup>和 3D 反演分离法<sup>[30]</sup>,但还没有哪一种方法适应所有地区和位场特点.在实际应用中,一般要考虑异常的频谱特征和空间分布特征,选择多种方法进行试验,如果两种或两种以上方法获得相近的结果,则认为分离较为合理.本研究中重力异常具有很强的区域异常,建模区域总体位于区域梯度带上,经反复试验,使用二阶趋势法分离区域与局部异常.由于火山岩盆地的基底为无磁性的海相沉积,磁异常主要为矿体和火山岩地层引起,区域异常不明显,因此不需要进行位场分离,只对异常进行了高频去噪处理.根据钻孔

岩性,泥河铁矿体深度在 700 m 以上.为了重点拟合矿体异常,减少浅部火山岩体的干扰,在进行位场分离后,分别将重力异常延拓 100 m、磁异常延拓 150 m 的结果作为实际异常进行模拟(如图 6a、b),拟合误差也分别用相应高度的理论与实际异常的均方差来评估.

### 3.2.2 物性测量与统计分析

对泥河矿区 19 个钻孔进行了系统采样,共计进行了 882 件岩矿样品的密度和磁化率测量工作.密度测量由本研究完成,磁性测量由中国地质大学古地磁实验室完成.定性分析矿区钻孔物性可以看出矿区地层与矿体之间密度差异明显,密度差异在 2.50 g/cm<sup>3</sup>到 2.70 g/cm<sup>3</sup>之间(图 4a、b),地层密度变化较小.火山岩地层磁化率变化明显,双庙组上段地层磁化率相对较高,均值在 0.0284(SI)左右(图 4a、b),双庙组上段以熔岩为主,磁性主要由安山岩引起.深度超过 600 m 后,密度明显增大,异常值集中在 700~1100 m 之间,最大值可达 4.92 g/cm<sup>3</sup>,平均密度为 3.08 g/cm<sup>3</sup>.磁化率也显著增加,矿体重、磁物性呈正相关,同高现象明显(图 4c).矿体附近的围岩密度、磁化率也相对较大,存在一定程度的蚀变和矿化.

为了定量研究岩矿石的物性,我们对物性测量值按照岩性进行了统计分析,求取每一种岩性的物性均值和变化范围,以便反演模拟中使用.采用求取置信区间的方法来确定地层及岩矿体模型的物性参数变化范围,根据样本数量分为两种情况进行计算:

(1)样本较多时,在可信度上的置信区间为

$$\bar{x} \pm Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (n \geq 30), \quad (1)$$

(2)样本较少时,则计算置信度为密度变化范围公式为

$$\bar{x} \pm t_{(n-1), \alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (n < 30), \quad (2)$$

其中为  $\bar{x}$  样品均值; $\sigma$  为样本标准误差; $n$  为样本数; $Z_{\alpha/2}$  为标准正态分布的侧分位点; $t_{(n-1), \alpha/2}$  是  $t$  分布中自由度为且单侧值为的  $t$  值.

利用公式(1)、(2)求取置信度为 98%时的样本置信区间,作为反演时模型体密度、磁化率的变化范围,结果如表 1 所示.

## 3.3 泥河矿区 3D 建模

首先定义建模区域,并将其划分为一系列的地质剖面.根据研究目标,确定建模区域地表面积 5.6 km<sup>2</sup> (2.8 km×2.0 km),深度范围地下 0 m~1200 m.将

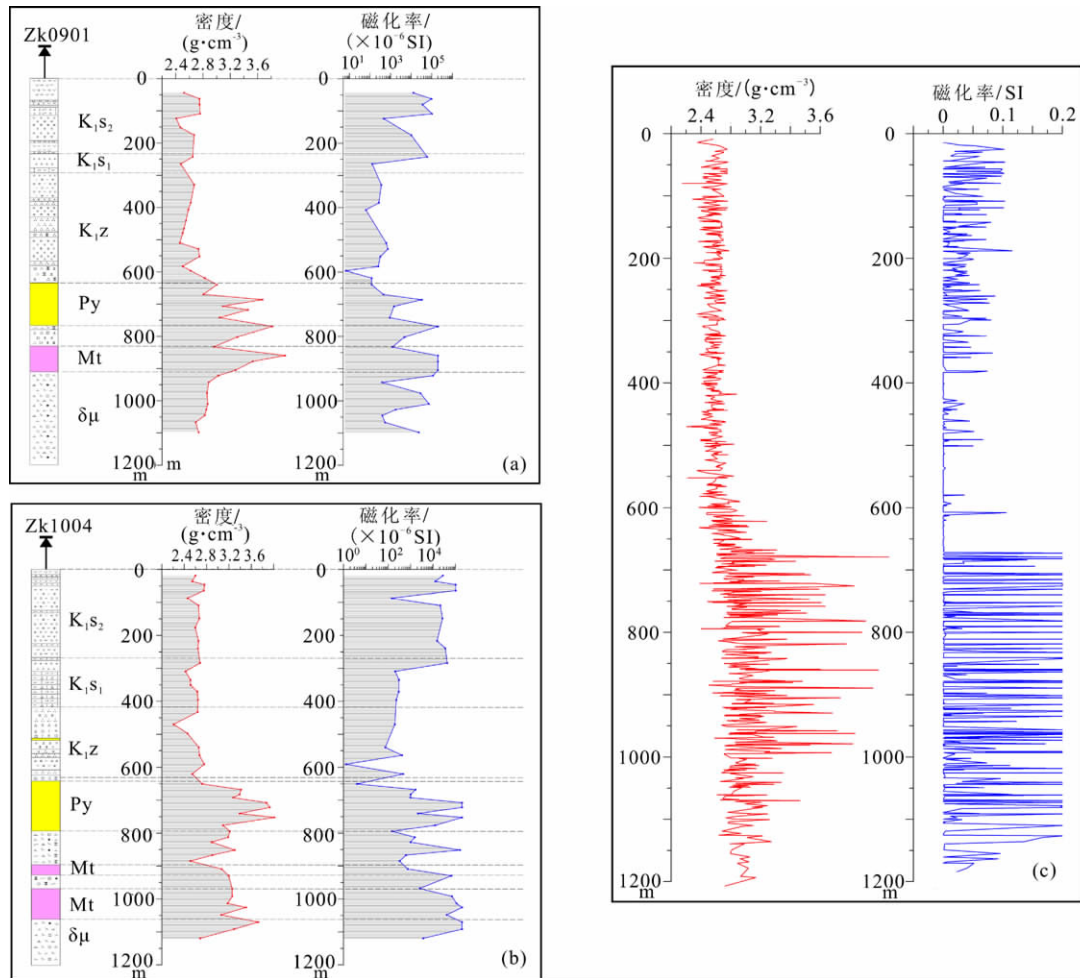


图 4 钻孔取样密度、磁化率随深度变化图

(a) 钻孔 ZK0901 物性-深度变化图; (b) 钻孔 ZK1004 物性-深度变化图; (c) 全部样本物性-深度变化图.

Fig. 4 The density and magnetic susceptibility variation with depth

(a,b) Physical properties of boreholes (ZK0901 and ZK1004) variation with depth; (c) Physical properties of all samples variation with depth.

表 1 泥河矿区岩矿石物性表

Table 1 Rock and Ore physical properties of the study area

名称	符号	岩性	密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	磁化率(SI)	样本数
杨湾组地层	$K_1y$	砂砾岩	2.12~2.56	0~0.00023	4
双庙组上段	$K_2sh$	粗安岩、辉石粗安岩、辉石安山岩、凝灰质粉砂岩	2.57~2.61	0.02292~0.03383	179
双庙组下段	$K_1sh$	沉火山角砾岩、辉石安山岩、火山角砾岩、凝灰质粉砂岩、杂色细角砾岩、正长斑岩	2.51~2.60	0.00507~0.01959	83
砖桥组地层	$K_1zh$	含角砾凝灰岩、辉石粗安岩、角砾岩、凝灰质粉砂岩、凝灰岩、黑云母粗安岩、沉角砾凝灰岩	2.61~2.69	0.00134~0.00594	229
闪长玢岩	$\delta\mu$	—	2.85~2.95	0.00643~0.01590	179
黄铁矿	Py	—	3.17~3.51	0.00068~0.51000	34
磁铁矿	Mt	—	3.34~3.61	0.12250~0.20000	79
石膏矿	Ah	—	2.80~3.10	0~0.00004	11

研究区划分为 28 条平行的地质剖面,剖面间距 100 m,方向北偏西 40°(图 2). 然后根据地表地质图和钻孔信息建立二维地质剖面. 由于研究区地表大部分被

第四系覆盖,地表地质图所提供的地质信息有限,二维剖面的建立主要依据由安徽地调院提供的钻孔资料. 在研究区布置的 28 条剖面中,有 8 条剖面拥有

钻孔资料,钻孔深度均大于 1000 m,为确定地质体倾向、地层界面和岩(矿)体几何形态,提供了重要依据。根据钻孔信息,将此 8 条剖面作为基准剖面,建立较为精细的 2D 初始模型。其它地质信息相对较少的剖面则以此为基础,结合地质专家对于该区域的地质认知加以推断获得。

2.5D/3D 重磁模拟使用软件 Encom ModelVision Pro™(MV),该软件使用离散体建模方法,利用不同的模型体表示不同的地质单元,每个模型体都有其固定的密度和磁化率值,对于不同区域物性差异较大的地质单元,则可将其划分为多个相连的模型体,并分别赋予相应物性值。本研究的场模拟分为两个步骤:

(1) 对所建立的 28 条剖面分别进行单剖面的 2.5D 重磁模拟。参照所建立的剖面分别为每条剖面建立 2.5D 初始地质模型,并根据表 1 对地层和矿

体赋予相应密度值(即将初始模型转化为密度模型),反复调节剖面模型的几何形态和密度值(在表 1 所限定的范围内调整密度),直到模型正演重力曲线与实测重力曲线形态吻合。再将密度模型赋予相应磁化率,同时参考重力和磁法曲线进行模型修改,直到拟合均方误差均达到要求(图 5)。在修改过程中,由钻孔和地质资料确定的地质体深度范围作为约束条件,不得改变。为降低边界影响,沿垂直走向方向将 2.5D 模型向两侧各延伸 2 km,扩大建模范围。

(2) 3D 重磁模拟。按照上述方法完成各条剖面的模型建立及修改工作,然后将所有模型走向长度调整为测线距离 100 m,最后将所有模型整理合并(如图 7a),作为 3D 建模的初始模型,并进行三维环境下的正演模拟。对误差明显的剖面做进一步精细调节,此时对任何一个模型体的修改都将影响到全

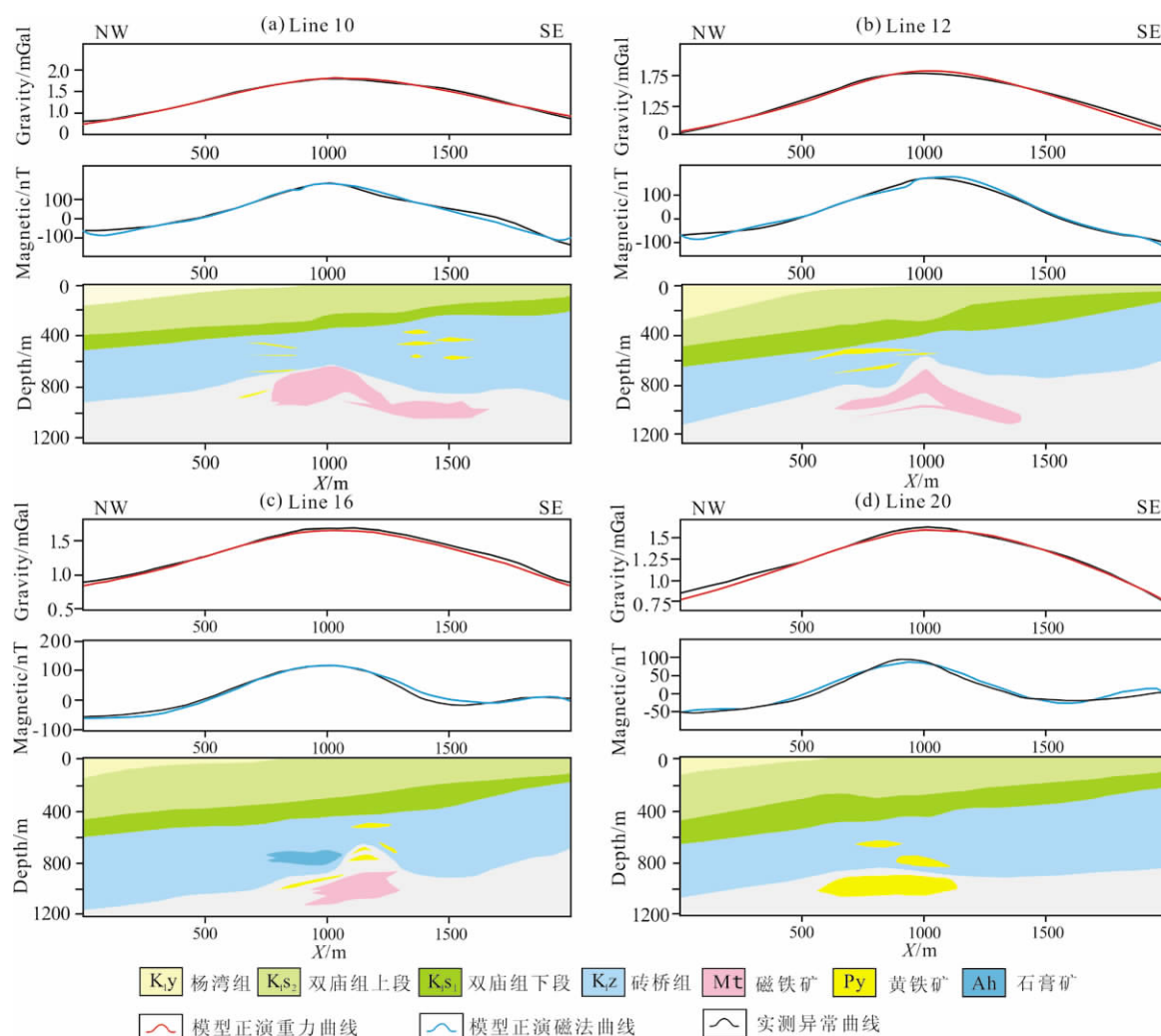


图 5 部分 2.5D 剖面(图 2 中 Line10、Line12、Line16 和 Line20)重磁位场拟合图

Fig. 5 Selected profiles (10, 12, 16 and 20 in Fig. 2) showing the 2.5D joint gravity and magnetic modeling



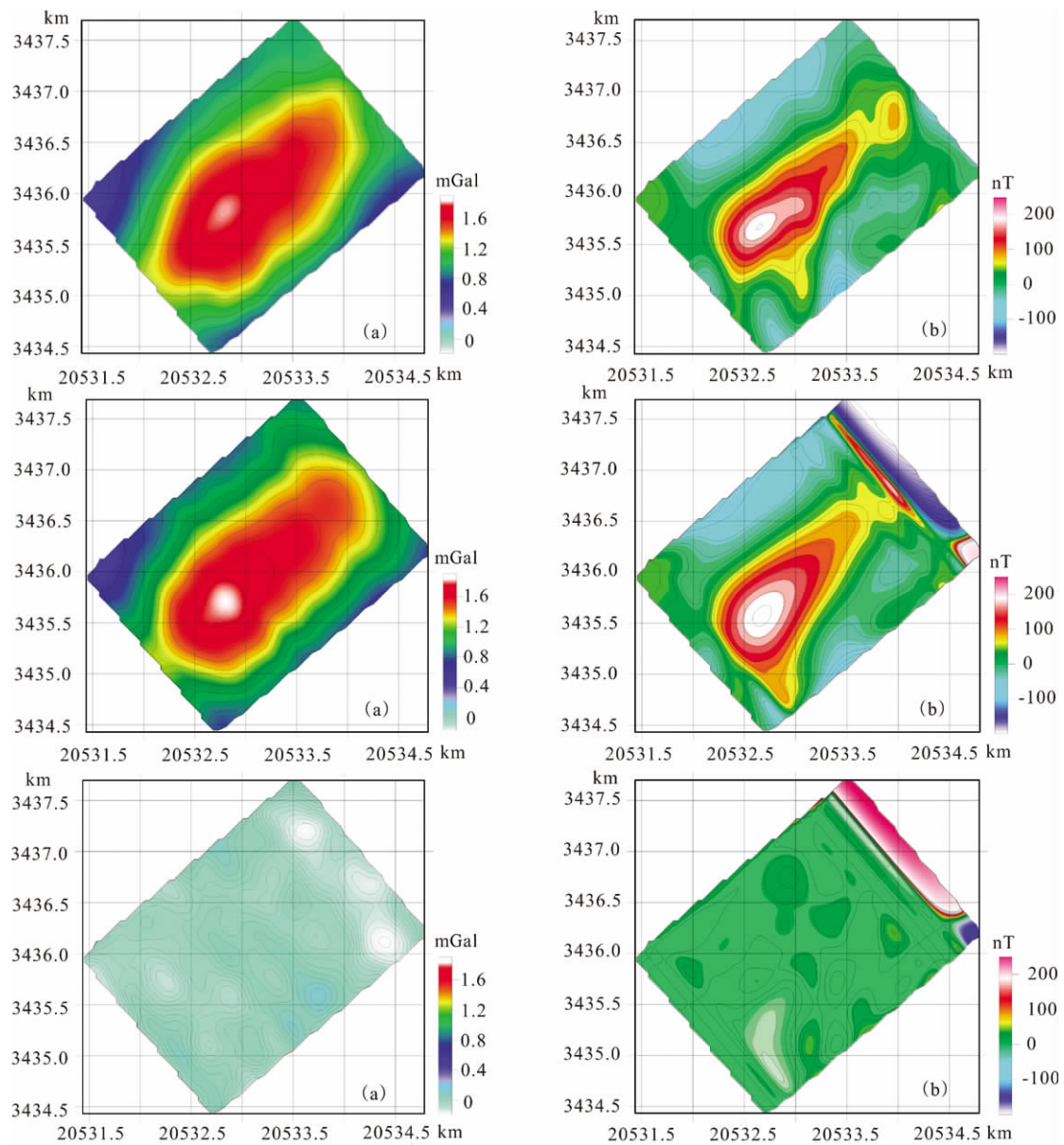


图6 位场模拟对比图

(a)、(b)为观测重磁异常;(c)、(d)为模型正演重磁异常;(e)和(f)分别为模型正演重磁异常和观测异常的差值。

Fig. 6 Comparison between the observed and calculate field responses from the 3D forward modeling

(a)、(b)are the observed gravity and magnetic anomaly; (c)、(d)are the calculated gravity and magnetic anomaly;

(e)and(f)are the data differences between observed and calculated 3D gravity and magnetic responses respectively.

区任意一点的模型正演理论值。反复调节,完成3D重磁模拟。最终三维模型正演计算异常和实测重磁异常普遍拟合较好。重力拟合均方误差为0.044 mGal,远小于观测误差(图6e),磁法拟合误差18.49 nT,略大于观测误差,从图6f中可以看出部分区域磁测异常拟合程度相对较差,主要原因是研究区为火山岩地层,侵入岩以辉石闪长玢岩和脉岩为主,受矿化和蚀变作用改造,很多岩体都具有一定的磁性,且分布较为复杂,而建模使用的是物性均匀分布的平滑模型体,这对该区域的磁法解释造成了一定的困难。

### 3.4 模型可视化

模型建立完成后,将建模结果使用三维可视化软件显示,可以全方位展示建模细节,有针对性的从不同角度观测模型,了解所关注地质体的形态、空间位置以及其与周围地层或者岩体之间的关系。

按照以上工作流程得到了既符合地质认知又可以拟合实测地球物理数据的3D模型体。尽管存在一定的局限性,但是该结果已经充分展示了该方法可行性。它在解决地质问题方面的有效性和能力是其它方法无法达到的。

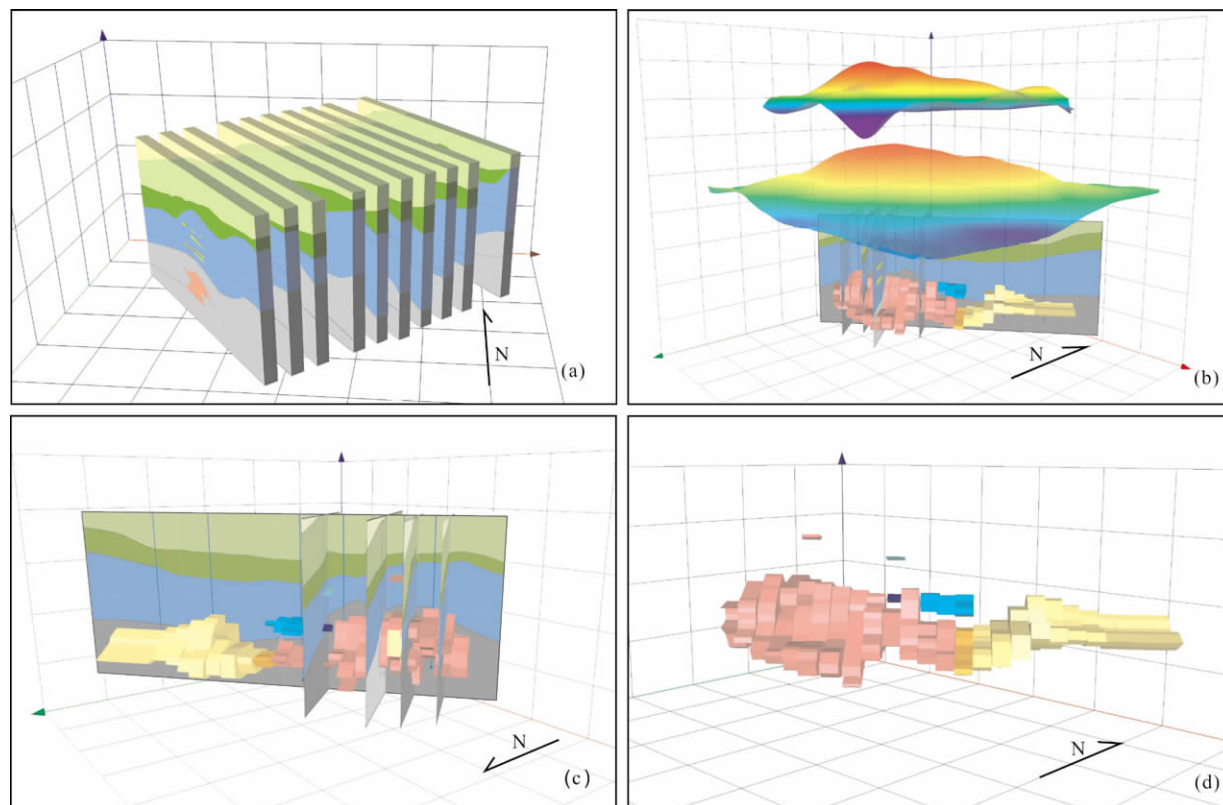


图7 (a) 整体模型(抽稀后);(b)矿体模型以及重力(中)和磁法(上)异常图;(c)、(d)矿体与地层俯视、平视图  
粉红色表示为主要成分为磁铁矿的矿体,浅黄色部分为主要成分为黄铁矿的矿体,淡蓝色为石膏矿。

Fig. 7 (a) The final 3D geological model(sparse slices); (b) The final 3D geologic model consisting of sparse slices with magnetic (top) and gravity (middle) anomalies. (c)、(d) The bird view of 3D geologic model, showing major ore and strata. The light yellow is iron pyrite, The pink is magnetite iron ore.

## 4 模型解释与地质意义

### 4.1 地质模型刻画的矿体三维形态和展布特征

泥河矿区内主要矿体为磁铁矿、黄铁矿以及石膏矿。从模型可以看出矿体整体呈北东向展布,总体变化较为平缓,延伸至东北部时矿体稍有抬升。磁铁矿以及黄铁矿的含量较高,石膏矿含量较少,其中磁铁矿主要位于研究区的西南部,黄铁矿主要集中在矿区的东北部,中部少量的石膏矿,黄铁矿和石膏矿埋深相对于磁铁矿较浅。西南部除了在相对较浅处含有少量似层状黄铁矿外,主要为规模较大的透镜状矿体,其主要成分为磁铁矿,其中有小块的黄铁矿矿体包含于磁铁矿中。透镜状矿体赋存深度大致在地下 600~1100 m 范围内,中部主要为石膏矿,也含有似层状或透镜状黄铁矿,或者磁铁矿及黄铁矿共生矿体。研究区东北部矿体以垂直方向上的两层黄铁矿为主,上层矿体体积较小,呈层状分布,矿体西南部宽度较小,东北部较大,平均宽度约为 245 m,

埋深约为 600 m,平均厚度 40 m。下层矿体体积较大,呈透镜状,埋深在 800~1050 m,最大宽度约为 680 m。

### 4.2 三维模型揭示的控矿特征

研究区内地层由上至下主要为第四系盖层(Q)、白垩统杨湾组( $K_1y$ )、白垩统双庙组( $K_1sh$ )和统砖桥组( $K_1zh$ )。较浅层的黄铁矿和石膏矿多位于砖桥组上段地层中,体积较小,多呈层状似层状分布,特征较为复杂。主要矿体集中在砖桥组下段侵入岩中,侵入岩主要为辉石闪长玢岩和脉岩,辉石闪长玢岩体侵位于砖桥组下段火山岩地层中。侵入体顶面形成隆起,矿区南西部呈钟状隆起,在矿区东北部呈宽缓隆起<sup>[13]</sup>。从 3D 模型可以看出矿体走向与隆起的长轴方向近似一致,磁铁矿体主要分布在西南部钟状隆起的顶部和上部,且其形态变化特征也与其围岩(闪长玢岩)的隆起及变化特征相一致,硫铁矿体主要分布于东北部的宽缓隆起部分,在深度上位于侵入岩体与地层边界附近。

### 4.3 分析得出新认识

通过以上的分析发现:

(1) 泥河铁矿铁矿体主要赋存于闪长玢岩顶部和砖桥组下段的火山岩中, 只有小部分黄铁矿赋存于砖桥组上段, 多为层状分布, 没有显著的成矿构造特征。因此, 砖桥组下段是寻找矿体的地层标志。

(2) 泥河矿体的主要成矿母岩及赋矿围岩是闪长玢岩, 其侵入于地层中, 在侵入岩顶面形成穹状隆起, 而矿体走向与隆起的长轴方向是一致的, 说明矿体与辉石闪长玢岩类次火山岩关系密切。结合成矿规律可知, 矿体受接触带的这种穹状隆起构造控制, 因此闪长玢岩穹状构造是矿区最重要的控矿构造, 也是找矿的重要构造标志。

(3) 对比模型正演理论异常和实测异常, 可知重力和磁法的拟合程度均良好 (图 6), 尤其重力异常拟合误差仅为 0.044 mGal。根据模型实验, 假设在研究区内存在一个中心深度 1500 m, 走向长 500 m, 宽度 500 m, 深度范围 300 m 的板状体, 其密度和磁化率与区内磁铁矿体近似, 对模型体正演, 其理论重力异常高值可达 0.20 mGal, 理论磁异常高值为 29 nT, 均远大于建模拟合误差。因此推断研究区边部不存在新的矿体, 深部 2000 m 范围内存在新矿体的可能性极低。

## 5 结论与讨论

本研究采用重磁三维反演建模技术, 在地质、钻孔数据的约束下建立了安徽泥河铁矿区的 3D 精细地质结构模型。通过对模型的分析, 可以得到以下结论和认识:

(1) 通过对建模结果的分析, 深化了对该研究区 0~1200 m 深度范围内的 3D 地质结构的认识, 进一步了解了泥河地区矿体的形态及其与地层和围岩之间的空间关系, 并以此为依据给出了泥河地区找矿的地层标志和构造标志, 这对认识“玢岩型”铁矿的成矿模式和在长江中下游地区寻找“玢岩型铁矿”的工作具有重要参考和指导意义。

(2) 模型重磁模拟结果与实测重磁异常基本拟合, 说明了该研究区内已经没有盲矿体存在, 为进一步的找矿工作提供指导借鉴。这对该矿区或者类似矿区的深、边部找矿工作意义重大, 具有广阔的应用前景。

(3) 泥河矿区 3D 地质模型的给出, 说明了文中应用的反演方法和提出的流程可以在精细剖析重磁异常的同时, 充分利用已知地质信息, 得到可靠性较高的 3D 地质模型, 这为其它地区开展类似工作提

供参考借鉴。

(4) 该建模方法利用局部重磁异常数据作为衡量模型可靠性的重要指标, 因此, 位场分离结果对于模型的建立具有一定影响, 但目前还没有有效的位场分离手段, 需要进一步加强研究。

(5) 在反演过程中需要人为引导反演, 因此研究人员对于地质信息的认识和推断能力具有不可忽视的作用, 对于模型的合理性以及反演时间都有一定的影响。

致谢 安徽地调院提供了泥河矿区重磁实测数据、勘探线剖面 and 钻孔资料, 为模型建立奠定了基础。磁性测量由中国地质大学 (北京) 古地磁实验室完成, 研究期间得深部探测中心的大力支持和帮助, 两位匿名审稿人提出了富有建设性的意见, 在此表示衷心的感谢。

## 参考文献 (References)

- [1] Williams N C. Geologically-constrained UBC-GIF gravity and magnetic inversions with examples from the agnew-wiluna greenstone belt, western Australia [Doctor's thesis]. Canada: The university of british Columbia, 2008.
- [2] Fullagar P K, Hughes N A, Paine J. Drilling-constrained 3D gravity interpretation. *Exploration Geophysics*, 2000, 31: 17-23.
- [3] Fullagar P K, Pears G A. Towards geologically realistic inversion, in B. Milkereit, ed., *Exploration in the new millennium. Proceedings of the Fifth Decennial Conference on Mineral Exploration*, 2007, 445-460.
- [4] 于鹏, 戴明刚, 王家林等. 密度和速度随机分布共网格模型的重力与地震联合反演. *地球物理学报*, 2008, 51(3): 845-852.  
Yu P, Dai M G, Wang J L, et al. Joint inversion of gravity and seismic data based on common gridded model with random density and velocity distributions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(3): 845-852.
- [5] Bosch M, McGaughey J. Joint inversion of gravity and magnetic data under lithologic constraints. *The Leading Edge*, 2001, 8: 877-881.
- [6] Lu Q T, Qi G, Yan J Y, et al. 3D geologic model of Shizishan ore field constrained by gravity and magnetic interactive modeling: A case history. *Geophysics*, 2013, 78(1): 1-11.
- [7] 徐亚, 郝天珧, 黄松等. 渤海湾地区壳幔结构重磁综合研究. *地球物理学报*, 2011, 54(12): 3344-3351.  
Xu Y, Hao T Y, Huang S, et al. Crustal and mantle structure of the Bohai bay area based on the gravity and magnetic data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(12): 3344-3351.
- [8] 常印佛, 刘湘培, 吴言昌等. 长江中下游铜铁成矿带. 北京: 地

- 质出版社,1991:1-56.
- Chang Y F, Liu X P, Wu Y C, et al. Middle and Lower Reaches of the Yangtze Metallogenic Belt (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House,1991:1-56.
- [9] 翟裕生,姚书振,林新多等. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律. 北京:地质出版社,1992:12-35.
- Zhai Y S, Yao S Z, Lin X D, et al. Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Iron Copper (Gold) Metallogenic Regularities (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1992:12-35.
- [10] 赵文广,吴明安,张宜勇等. 安徽省庐江县泥河铁硫矿床地质特征及成因初步分析. 地质学报,2011,85(5):789-801.
- Zhao W G, Wu M A, Zhang Y Y, et al. Geological characteristics and genesis of the Nihe Fe-S deposit Lujiang country Anhui province. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2011,85(5):789-801.
- [11] 吕庆田,史大年,汤井田等. 长江中下游成矿带及典型矿集区深部结构探测. 地球学报,2011,32(3):257-268.
- Lü Q T, Shi D N, Tang J T, et al. Probing on deep structure of middle and lower reaches of the Yangtze metallogenic belt and typical ore concentration area. *Acta Geoscientica Sinica* (in Chinese), 2011,32(3):257-268.
- [12] 江永宏. 安徽庐枞地区铁-铜矿成矿规律与找矿. 世界地质, 2010,29(3):372-382.
- Jiang Y H. Metallogenic regularity and prospecting of Fe-Cu deposit in Lujiang-Zongyang area of Anhui. *Global Geology* (in Chinese), 2010,29(3):372-382.
- [13] 吴礼彬,陈芳,杜建国等. 安徽庐枞地区铁矿成矿条件和综合信息标志. 地质通报,2010,29(10):1572-1578.
- Wu L B, Chen F, Du J G, et al. Analysis on metallogenic conditions and integrated information signs of iron deposits in Lujiang-Zongyang area Anhui China. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 2010,29(10):1572-1578.
- [14] 覃永军,曾键年,曾勇等. 安徽南部庐枞盆地罗河-泥河铁矿田含矿辉石粗安玢岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义. 地质通报,2010,29(6):851-862.
- Tan Y J, Zeng J N, Zeng Y, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of ore-bearing pyroxene-trachyandesite porphyry and its geological significance in Luohe-Nihe iron ore field in Luzong basin southern Anhui China. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 2010,29(6):851-862.
- [15] 周涛发,范裕,袁峰等. 庐枞盆地侵入岩的时空格架和对成矿制约. 岩石学报, 2010,26(9):2694-2714.
- Zhou T F, Fan Y, Yuan F, et al. Temporal spatial framework of magmatic intrusions in Luzong volcanic basin in East China and their constrain to mineralizations. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2010,26(9):2694-2714.
- [16] 周涛发,范裕,袁峰等. 长江中下游成矿带火山岩盆地的成岩成矿作用. 地质学报,2011,85(5):712-730.
- Zhou T F, Fan Y, Yuan F, et al. Petrogenesis and metallogeny study of the volcanic basins in the middle and lower yangtze metallogenic belt. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2011, 85(5):712-730.
- [17] 周涛发,王彪,范裕等. 庐枞盆地与 A 型花岗岩有关的磁铁矿-阳起石-磷灰石矿床——以马口铁矿床为例. 岩石学报, 2012,28(10):3087-3098.
- Zhou T F, Wang B, Fan Y, et al. Apatite-actinolite-magnetite deposit related to A-type granite in Luzong basin: Evidence from Makou iron deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 2012,28 (10):3087-3098.
- [18] 吴明安,张千明,汪祥云等. 安徽庐江龙桥铁矿. 北京:地质出版社,1996,172.
- Wu M A, Zhang Q M, Wang X Y, et al. Anhui Longqiao iron ore deposit. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese), 1996,172.
- [19] 吴明安,汪青松,郑光文等. 安徽庐江泥河铁矿的发现意义. 地质学报,2011,85(5):802-809.
- Wu M A, Wang Q S, Zheng G W, et al. Discovery of the Nihe Iron Deposit in Lujiang, Anhui, and its Exploration Significance. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2011,85 (5):802-809.
- [20] Malehmir A H. Thunehed and A. Tryggvason. The paleoproterozoic Kristineberg mining area, northern Sweden: Results from integrated 3D geophysical and geologic modeling, and implication for targeting ore deposits. *Geophysics*, 2009, 74, no. 1: B9-B22.
- [21] Li Y, Oldenburg D W. 3D inversion of magnetic data. *Geophysics*, 1996, 61:394-408.
- [22] Li Y, Oldenburg D W. 3D inversion of gravity data. *Geophysics*, 1998, 63:109-119.
- [23] Jessell M. Three-dimensional geological modelling of potential-field data. *Computers & Geosciences*, 2001, 27: 455-465.
- [24] 于鹏,王家林,吴健生. 二度半长方体组合模型的重力模拟退火反演. 地球物理学报,2007,50(3):882-889.
- Yu P, Wang J L, Wu J S. An inversion of gravity anomalies by using a 215 dimensional rectangle gridded model and the simulated annealing algorithm. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007,50(3):882-889.
- [25] 孟小红,刘国峰,陈召曦等. 基于剩余异常相关成像的重磁性反演方法. 地球物理学报,2012,55(1):304-309.
- Meng X H, Liu G F, Chen S Y, et al. 3D gravity and magnetic inversion for physical properties based on residual anomaly correlation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007,55(1):304-309.
- [26] 姚长利. 重磁遗传算法三维反演中高速计算及有效存储方法技术. 地球物理学报, 2003,46(2):252-258.
- Yao C L. High-speed computation and efficient storage in 3D gravity and magnetic inversion based on genetic algorithms. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003,46(2):252-258.
- [27] 陈召曦,孟小红,郭良辉. 重磁数据三维物性反演方法进展. 地球物理学进展, 2012,27(2):503-511.
- Chen Z X, Meng X H, Guo L H. Review of 3D property inversion of gravity and magnetic data. *Chinese J. Geophys.*

- (in Chinese), 2012, 27(2): 503-511.
- [28] 徐岩, 舒萍, 纪学雁. 松辽盆地徐深气田火山岩气藏地质约束-测井地震建模方法探讨. 地球物理学报, 2011, 54(2): 336-342.
- Xu Y, Shu P, Ji X Y. A research on object-control geology modeling of volcano reservoir with seismic and logging data in Xushen gas field. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(2): 336-342.
- [29] 王新胜, 方剑, 许厚泽等. 华北克拉通岩石圈三维密度结构. 地球物理学报, 2012, 55(4): 1154-1160.
- Wang X S, Fang J, Xu H Z, et al. Density structure of the lithosphere beneath North China Craton. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(4): 1154-1160.
- [30] Keating, P., and N. Pinet. Use of non-linear filtering for the regional-residual separation of potential field data. *Journal of Applied Geophysics*, 2011a, 73: 315-322.
- [31] 徐世浙. 迭代法与 FFT 法位场向下延拓效果的比较. 地球物理学报, 2007, 50(1): 285-289.
- Xu S Z. A comparison of effects between the iteration method and FFT for downward continuation of potential fields. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(1): 285-289.
- [32] 曾琴琴, 刘天佑. 重、磁异常的经验模态分解及其在鄂东张福山铁矿勘探中的应用. 地球物理学进展, 2011, 26(4): 1409-1411.
- Zeng Q Q, Liu T Y. EMD of gravity and magnetic anomalies and its application for iron deposit exploration in Zhangfushan, Eastern Hubei. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 26(4): 1409-1414.
- [33] 杨文采, 施志群, 侯遵泽等. 离散小波变换与重力异常多重分解. 地球物理学报, 2001, 44(04): 534-541.
- Yang W C, Shi Z Q, Hou Z Z, et al. Discrete wavelet transform for multiple decomposition of gravity anomalies. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2001, 44(04): 534-541.
- [34] 徐世浙, 余海龙, 李海侠等. 基于位场分离与延拓的视密度反演. 地球物理学报, 2009, 52(6): 1592-1598.
- Xu S Z, Yu H L, Li H X, et al. The inversion of apparent density based on the separation and continuation of potential field. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(6): 1592-1598.

(本文编辑 刘少华)