

doi:10.3799/dqkx.2011.039

基于地质与重磁数据集成的栾川钼 多金属矿区三维地质建模

王功文¹, 张寿庭¹, 燕长海², 宋要武², 陈天振³, 李冬¹, 马振波^{1,2}

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

2. 河南省地质调查院, 河南郑州 450007

3. 河南省地球物理工程勘察院, 河南郑州 450007

摘要: 三维地质建模是当前国内外矿产资源勘查与评价研究的重要途径和热点。以栾川钼多金属矿区为例, 针对研究区地质背景复杂、成矿地质条件多样性特征, 开展了基于地质(岩性地层及其物性特征、地质体产状数据)与重磁正反演集成技术组合的三维地质模型建模研究, 其研究内容为: (1) 根据研究区地质背景和成矿条件, 确定研究区矿床地质特征以及近地表地质体的空间属性特征; (2) 利用重磁数据, 在定性解译地质信息的基础上, 开展二度半正演方法定量解译研究, 并运用三维位场概率成像方法反演和解译深部地质体; (3) 根据研究区地质与重磁反演解译资料综合分析, 确定晚侏罗世斑岩岩体和控矿构造的时—空—因关系。研究表明, 基于地质岩性属性特征的重磁正反演联合解译, 能够综合利用地质体之间的物性差异、成因关系界定其几何形态, 从而在三维环境中建立它们的时空关系, 即三维地质模型, 为研究区深部找矿、矿体定位预测以及金属矿产资源定量评价提供技术支撑和新途径。

关键词: 地质; 重磁数据; 正演; 概率成像; 地质建模; 栾川多金属矿带。

中图分类号: P631.2

文章编号: 1000-2383(2011)02-0360-07

收稿日期: 2010-07-28

3D Geological Modeling Based on Geological and Gravity-Magnetic Data Integration in the Luanchuan Molybdenum Polymetallic Deposit, China

WANG Gong-wen¹, ZHANG Shou-ting¹, YAN Chang-hai², SONG Yao-wu²,
CHEN Tian-zhen³, LI Dong¹, MA Zhen-bo^{1,2}

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Henan Institute of Geological Survey, Zhengzhou 450007, China

3. Geophysical Engineering Investigation Institute of Henan Province, Zhengzhou 450007, China

Abstract: 3D geological modeling is an important method and frontier of mineral resources exploration and assessment in the world. In this paper, a case study of the Luanchuan molybdenum polymetallic ore belt which has complicated geological setting and diversity metallogenic condition of geology, 3D geological modeling is combined geological knowledge with gravity and magnetic data integration. The research contents, methods, and results are summarized as the following aspects: (1) based on the geological setting and metallogenic conditions to determine the deposit characteristics of the study area and the near-surface geological object features of the spatial properties; (2) on basis of geological information in the qualitative interpretation using gravity and magnetic data, 2.5D forward interpretation and 3D imaging method of potential field inversion and interpretation of the probability of deep geological objects; (3) combination geological data with gravity and magnetic inversion data to determine the space-time-genesis relationship among the Late Jurassic porphyry rock, ore, and ore mineralization favorable geological structures. The research results show that combination the geological characteristics including rock properties with inversion of gravity and magnetic interpretation to define geological object geometries, which is beneficial for geological prospecting, deline-

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 40772157, 40972232); 地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项基金(No. GPMR0941); 河南杜关—云阳地区钼铅锌多金属矿深部找矿示范研究项目(No. 1212010881001); “十二·五”科技支撑项目(No. 2010BAE00281-6)。

作者简介: 王功文(1972—), 男, 博士, 副教授, 主要从事矿产普查与勘探、矿产资源评价的科研和教学工作。E-mail: gwwang@cugb.edu.cn

ation of the quantitative evaluation of prospecting targets.

Key words: geology; gravity and magnetic data; forward interpretation; probability inversion; geological modeling; Luanchuan polymetallic ore belt.

1994年, Houlding 提出三维地学模拟概念, 它是一门综合运用现代空间信息理论来研究地质体及其内部物理、化学属性的信息处理、数据组织、空间建模与数字表达, 并运用科学计算可视化技术对其进行真三维的再现与交互的科学与技术。经过近几年的发展, 以 3DGMS 为主体的三维地质建模, 更注重三维结构和属性建模、空间分析和模拟技术的发展与应用, 已成为地质与信息科学的交叉技术前沿和攻关热点 (Bonham-Carter, 1994; Wu and Xu, 2003; Fallara *et al.*, 2006; Sprague *et al.*, 2006; 潘懋等, 2007; 王功文等, 2007; Zanchi *et al.*, 2009)。在三维地质建模中, 地质数据 (包括地质图、剖面图和钻孔资料) 是近地表三维地质模型建立的基础与保障, 如地质图中的方向性数据 (地层倾向、倾角、走向等) 定量地表达了近地表地质体特征 (Kaufmann and Martin, 2008; Guillen *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2009)。重力、磁测数据在地质方面的应用目标通常是识别成矿有利地层、构造、预测靶区或者描述已知矿床特征 (Fullagar *et al.*, 2000, 2004)。

目前国内外三维地质建模通常是在矿床或矿体范围, 利用矿产勘查或矿山开发中的大量钻孔、剖面资料开展大比例尺三维矿体建模, 开展储量或资源量估算 (Kaufmann and Martin, 2008; Zanchi *et al.*, 2009)。但是, 如何在矿集区或矿带范围内 (钻孔与剖面数据相对比较稀疏、离散) 开展中大比例尺三维建模, 为深部找矿、定位圈定找矿靶区以及定量资源评价提供依据, 有关这方面的国内外研究成果较少并且不系统。本文以栾川钼多金属矿区为例, 针对研究区地质背景复杂、成矿地质条件多样性特征, 提出了基于地质 (包括岩性地层及其物性特征、地质体产状数据以及稀疏剖面) 与重磁正反演集成技术组合的三维地质建模新途径和新认识, 为矿区中大比例尺成矿预测研究和深部找矿提供参考依据。

1 研究区地质特征与矿床成因

河南栾川地区处于华北陆块南缘与秦岭造山带接合部的北侧, 华北陆块自北东向南西左行走滑、推覆在北秦岭褶皱带之上。研究区内总体构造格架为

轴面北东缓倾的斜歪或紧闭褶皱, 以栾川断裂为主界面的上盘逆冲断裂系, 以及沿倒转背斜轴部侵位的花岗岩—花岗斑岩带。研究区范围: 经度为 $111^{\circ}27' \sim 111^{\circ}35' E$, 长度为 17.7 km; 纬度为 $33^{\circ}48'30'' \sim 33^{\circ}54'30'' N$, 宽度为 12 km; 面积约为 212.4 km^2 (图 1)。

根据区域矿产地质资料的系统收集、整理和分析, 利用栾川钼多金属矿区 1:2000 实测地质、地球化学和地球物理综合剖面等多元地学信息 (张寿庭和王功文, 2009. 豫西南杜关—云阳地区钼多金属深部成矿预测研究报告), 综合剖析了研究区成矿地层、构造、岩浆岩和矿床地质特征。

(1) 地层特征。研究区基底地层为太古宙太华岩群, 岩性为一套角闪岩相变质杂岩; 盖层自北而南主要为蓟县系官道口群、栾川群和震旦系陶湾群、宽坪群, 各组段地层均呈近 EW 向条带状展布, 大多数呈断层接触, 中元古界蓟县系官道口群分布于研究区北部, 含 Ag、Pb、Zn 建造, 为一套浅海相含燧石条带碳酸盐岩建造, 岩性主要为含燧石条带白云质大理岩, 厚度约为 2100 m。新元古界蓟县系栾川群分布于研究区中部, 含 Pb、Zn、Ag 建造, 为一套碎屑岩—碳酸盐岩—粗面质火山岩夹基性火山岩建造, 自下而上由三川组、南泥湖组、煤窑沟组、大红口组和鱼库组组成, 厚度约为 3100 m。中—新元古界是研究区铅锌银矿源层, 而蓟县系栾川群三川组、南泥湖和煤窑沟组是研究区铅锌银多金属成矿、赋矿有利层位。震旦系陶湾群是一套陆源碎屑岩—碳酸盐沉积建造, 南界受黑沟—栾川断裂控制, 北界超覆不整合在栾川群或官道口群之上, 该群下部为粗碎屑岩, 中部主要为粘土质岩, 上部位碳酸盐沉积, 自下而上构成一个完整的海进系列, 厚度约为 2100 m (燕长海等, 2009)。

(2) 构造特征。研究区总体构造格架以近 EW 向为主, NNE 向构造叠加其上。断裂构造有区域性的栾川断裂、庙子断裂, 总体呈 NWW 向展布。NNE 向构造与成矿之间的关系密切, 为一系列自北向南推覆的逆冲断裂, 发育黄背岭—南泥湖—马圈断裂带、石宝沟—庄科断裂带等。近 EW 向断裂带或背斜核部与 NNE 向断裂带的交汇部位, 既是高热流渗透的构造薄弱带, 也是含矿斑岩及其驱动的热液

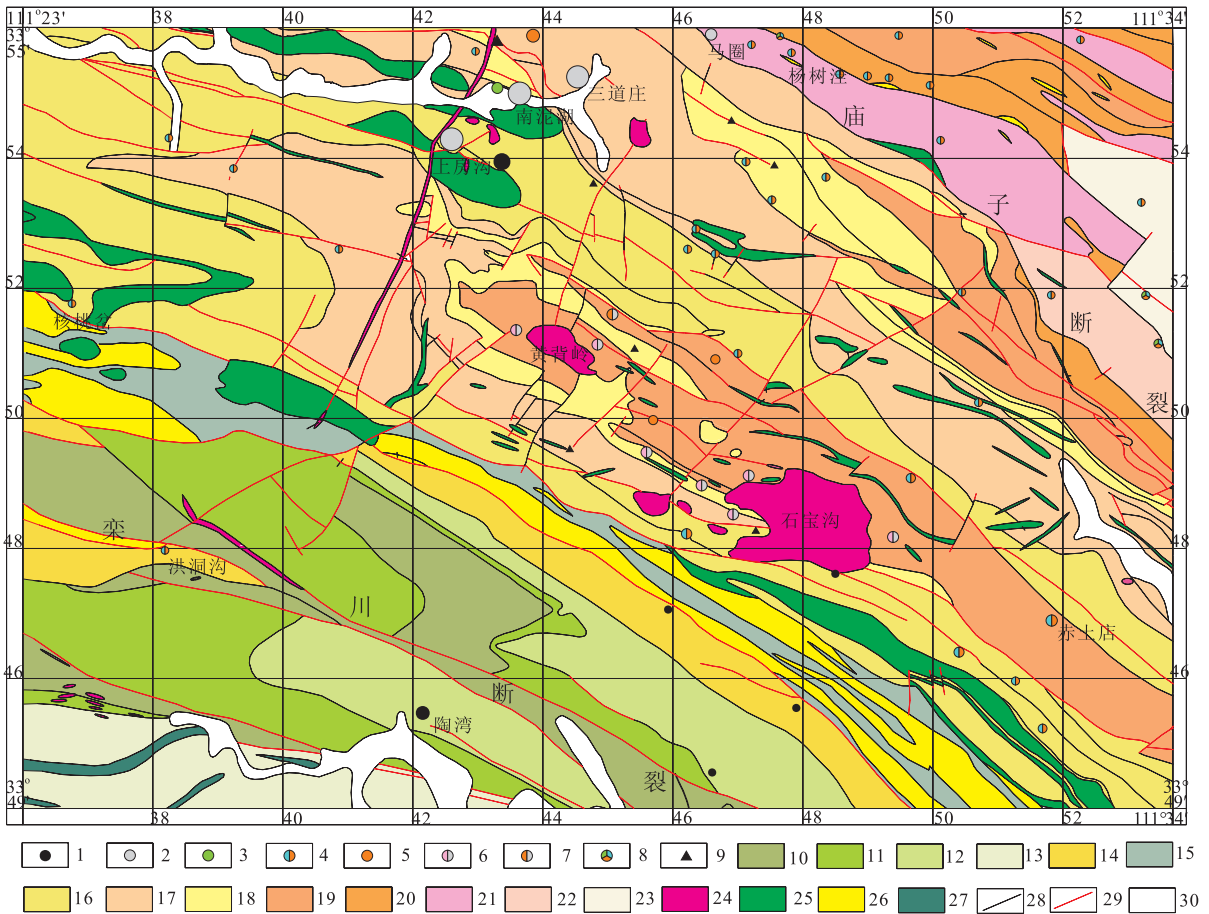


图 1 研究区 1 : 10 000 地质矿产分布

Fig. 1 1 : 10 000 geological and mineral resources map of study area

1. 铁矿; 2. 钼矿; 3. 铜矿; 4. 铅锌矿; 5. 锌矿; 6. 钨钼矿; 7. 钨矿; 8. 铜铅锌矿; 9. 黄铁矿; 10. 震旦系陶湾群秋木沟组; 11. 震旦系陶湾群风脉庙组; 12. 震旦系陶湾群三岔口组; 13. 震旦系宽坪岩群四岔口组; 14. 蓟县系栾川群鱼库组; 15. 蓟县系栾川群大红口组; 16. 蓟县系栾川群煤窑沟组; 17. 蓟县系栾川群南泥湖组; 18. 蓟县系栾川群三川组; 19. 蓟县系管道口群白术沟组; 20. 蓟县系管道口群组冯家湾组; 21. 蓟县系管道口群杜关组; 22. 蓟县系管道口群巡检司组; 23. 蓟县系管道口群龙家园组; 24. 花岗闪长斑岩; 25. (变)辉长岩; 26. 正长斑岩; 27. 斜长角闪岩; 28. 地层界线; 29. 断层; 30. 全新统

成矿系统的定位空间,控制了南泥湖、上房沟、黄背岭、石宝沟等晚侏罗世斑岩体及斑岩—热液成矿系统形成的钼钨及铅锌银矿床的分布。

(3) 岩浆岩特征. 研究区内发育晚元古代碱性火山岩和辉长岩体、侏罗纪花岗斑岩体. 中生代岩浆岩在熊耳山地区广泛分布,是最为重要的岩浆侵入活动,既有花岗岩岩浆的大面积侵入,表现为形成花岗岩类的大岩基,侵入时代主要为早白垩世晚期,如老君山岩体成岩年龄为 116.4 ± 0.4 Ma (黑云母 Ar-Ar, 张宗清等, 2006), 基本不含矿; 又有大量来源深、侵位高的浅成—超浅成相小花岗斑岩和花岗闪长斑岩体以及小斑岩体的大量发育造成区内钼钨金等元素的富集,形成了区内规模巨大的大型—超大型钼矿床,集中出现于栾川断裂北侧,与成矿之间的关系密切. 含矿岩体大多分布于近 EW 向与 NNE

向构造交汇处,出露面积大多小于 1 km^2 ,为复式岩体. 南泥湖岩体、上房沟岩体和石宝沟斑岩岩体的锆石 SHRIMP 年龄分别为 157.1 ± 2.9 Ma、 157.6 ± 2.7 Ma (叶会寿等, 2006) 和 150.3 ± 0.3 Ma (燕长海等, 2009).

(4) 矿化分带与成因特征. 研究区内发育斑岩—矽卡岩型钼(钨)矿床、矽卡岩型多金属硫铁矿床和热液脉型铅锌银矿床,它们围绕斑岩体由里往外呈规律性分布:即在斑岩体接触带发育斑岩型或斑岩—矽卡岩型钼(钨)矿床,外围为热液脉型矿床三道庄—南泥湖以及上房沟矿床;辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄为 141.5 ± 7.8 Ma (叶会寿等, 2006). 由此认为研究区钼钨铅锌银多金属矿床的形成在时间、空间和成因上与晚侏罗世同熔型花岗斑岩密切相关。

2 重磁数据解译

根据研究区 1 : 25 000 重力、磁测数据和物性分析等资料,结合近地表和深部钻孔地质解译信息,开展研究区地质体的重磁定性、定量解译,以界定研究区深部地质体的形态、产状、规模.在此基础上,结合上述研究区矿产地质特征信息,尤其是矿床成因研究资料,进一步确定地质体的时-空-因关系.

2.1 重磁实测与异常信息处理

重力测量采用 LCR-D 型(100#),测点布设采用自由网度,每平方公里 20 个测点,实测点数为 4 211 个,对绘制的布格重力异常等值线平面图进行审核,剔除畸变点后,实际有效重力测点数为 4 073 个,布格重力异常等值线平面图网格化密度取 100 m×100 m,等值线间隔取 $0.5 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.本次高精度磁法与重力测量采用同样的自由测网,并与重力测点同步进行观测,采用仪器为 WCZ-1 型质子磁力仪,该仪器分辨率达 0.1 nT,读数精度 0.5 nT.磁异常等值线平面图网格化密度取 100 m×100 m,等值线间隔取 50 nT,对绘制的磁力异常等值线平面图进行审核,剔除畸变点后,实际有效磁测点数为 4 071 个.

为了深入分析研究区内岩体的分布及埋深情

况,根据研究区地质体物性特征(如中酸性岩体的平均密度为 2.5 g/cm^3 ,与元古界地层(2.7 g/cm^3)密度差为 0.2 g/cm^3 ,与辉长岩体的密度差达 $0.4 \sim 0.5 \text{ g/cm}^3$,辉长岩平均磁化率为 $226.25 \times 10^{-6} \text{ CGSM}$,平均剩磁为 $58.2 \times 10^{-6} \text{ CGSM}$;斜长角闪岩平均磁化率为 $1\,175.73 \times 10^{-6} \text{ CGSM}$,平均剩磁为 $251.65 \times 10^{-6} \text{ CGSM}$;花岗岩平均磁化率为 $(65.2 \sim 3\,831.5) \times 10^{-6} \text{ CGSM}$,平均剩磁为 $(24.65 \sim 288.99) \times 10^{-6} \text{ CGSM}$),进行剩余重力异常和磁测数据的化极处理.在此基础上,利用二度半正演计算解释(图 2)和三维位场概率成像方法进一步定量解译深部地质体.

2.2 二度半正演解释

重磁异常二度半解释软件简单、直观、实用,已形成商业化的软件(如中国地质大学开发的 MASK 软件,加拿大 GEOSOFT 软件公司开发的 OASIS 数据处理软件,以及澳大利亚 EMCOM 公司开发的 ModelVisionPro 软件等).在重磁应用方面比较成熟的定量方法是位场的二度半解释,它主要采用二度半体逼近三度体的校正迭代反演技术与实时正演拟合技术,实现重磁人机联作解释.根据研究区剩余重力异常,选取了 4 条剖面开展研究区的重力二度半正演解释(图 2).

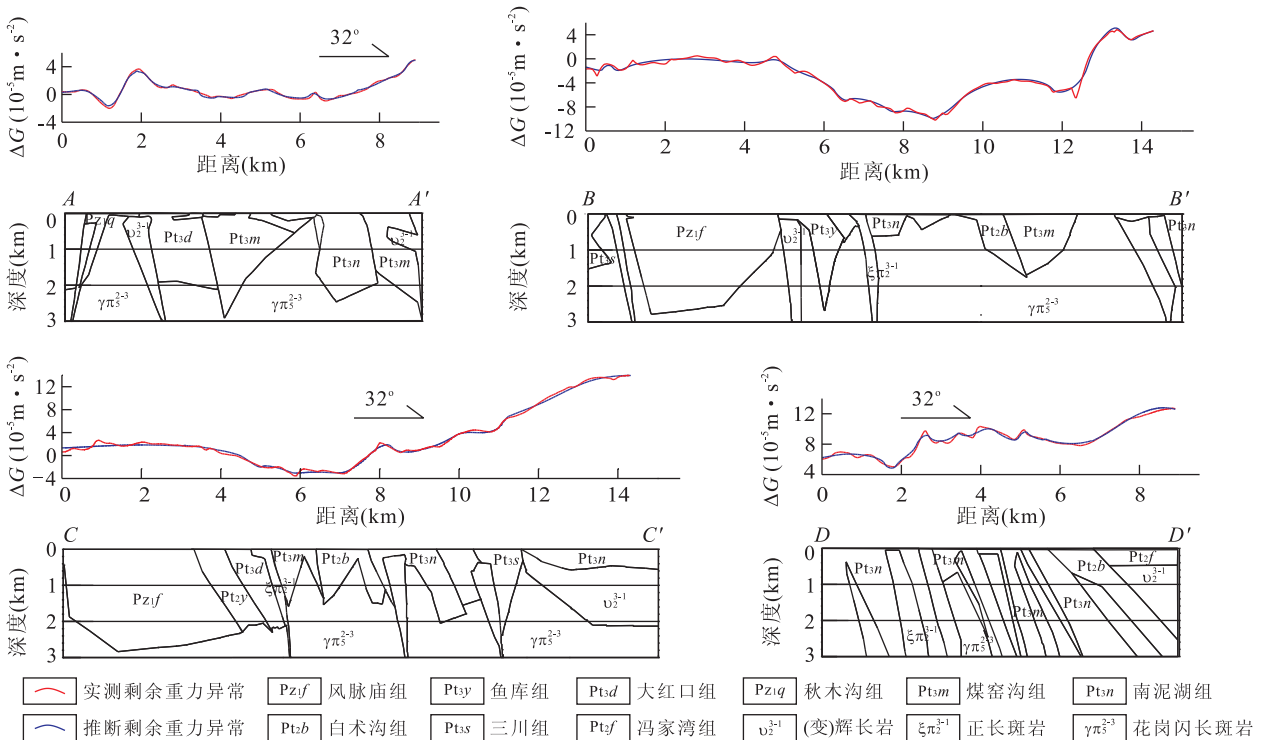


图 2 二度半正演重力场剖面

Fig. 2 2.5D simultaneous inversion of gravity data showing computed gravity field models for the four profiles

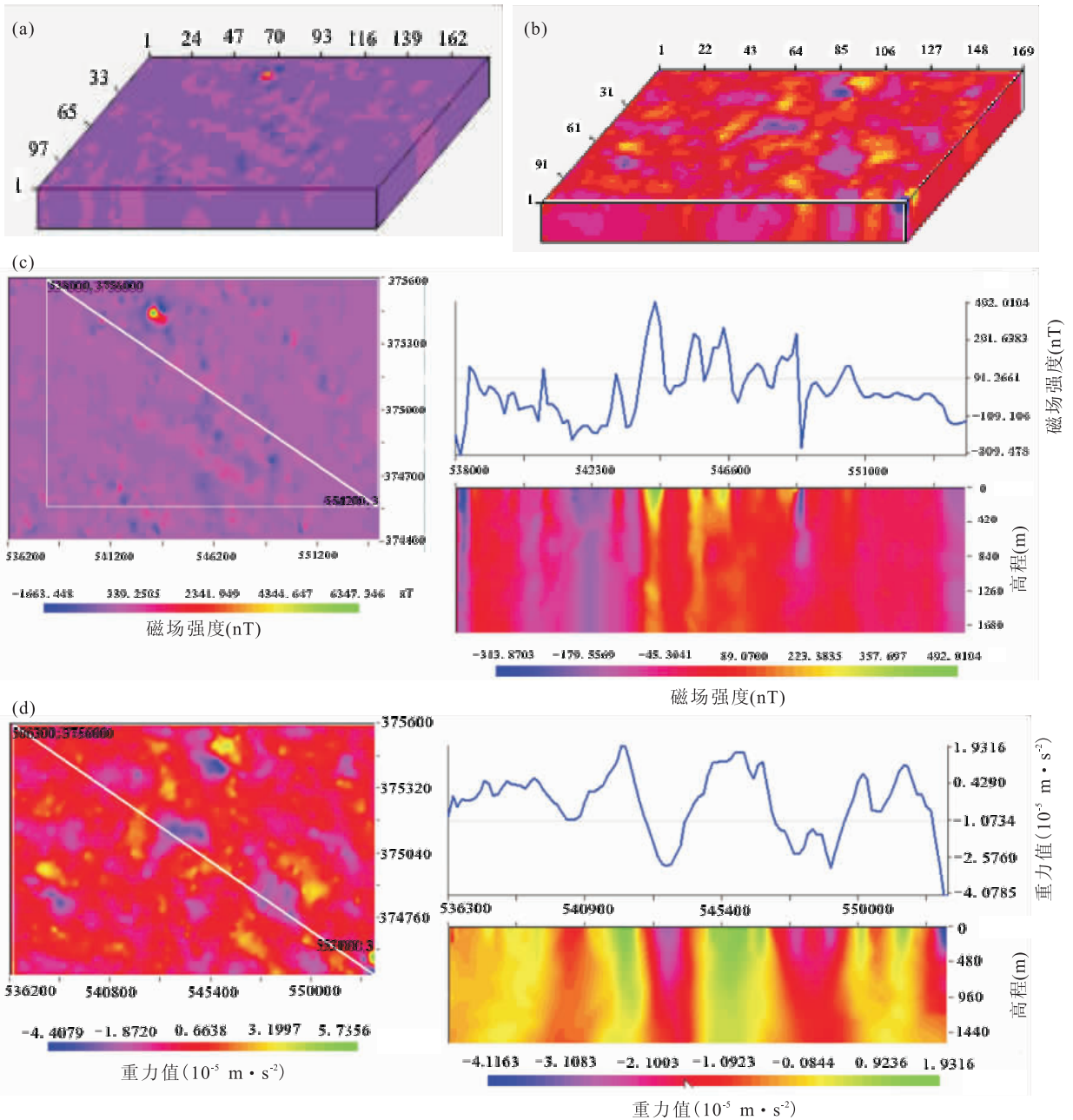


图 3 研究区重磁三维概率成像反演结果

Fig. 3 Gravity and magnetic sets of inversion 3D probability

a. 磁测三维反演概率; b. 重力三维反演概率; c. 磁测三维反演概率剖面分析; d. 重力三维反演概率剖面分析

2.3 三维位场概率成像

概率成像方法由 Domenico P. 于 1997 年首次提出用于自然电场异常的解释,随后推广到大地电磁法(Paolo and Domenico, 1999),又被推广到重磁领域(Iuliano *et al.*, 2002). 该方法是一种重磁场无约束反演方法,它基于观测位场数据,通过定义扫描函数与位场的归一化互相关运算,计算出地下半空间存在场源(质量点源或磁偶极子)的概率值,从而反映地下异常源的空间展布特征. 概率成像方法根

据先验极小值计算有用信息中后验概率值和提取极大值,从叠加异常中提取局部弱异常. 这种方法不依赖异常场源体形状和相关属性等地质先验信息和约束条件,只通过统计学和概率论方法计算出场源三维空间展布特征.

2.3.1 概率成像方法 设位场数据 $F(i)$ 代表沿着地质剖面所有异常 $A(i)$ 和噪声 $N(i)$ 的总和,噪声被看做是整个过程中的一次随机事件,它的平均值是零,离差是 Q ,可用连续值 $F=(F_1, F_2, \dots, F_M)$ 建立一组确

定的概率,这个序列值是特定的异常 $A=A_1, A_2, \dots$, A_M 与噪声 $N=N_1, N_2, \dots, N_M$ 的总和,即:

$$F(i) = A(i) + N(i). \quad (1)$$

公式(1)计算结果是在两个假定统计值 $H1$ 和 $H0$ 之间做一个比较,异常存在则 $H1$ 为真,异常不存在则 $H0$ 为真。

由上面表达式得出,将分离磁异常的任务转化成建立磁场观测值的相关函数,此异常存在和不存在的分布统计值分别用 $P(F/H1)$ 和 $P(F/H0)$ 表示,则概率系数 L_1 是下面一个比率值,即:

$$L_1 = \frac{P(F/H1)}{P(F/H0)}. \quad (2)$$

当 $P(F/H1) > P(F/H0)$ 时, $H1$ 为真. 异常存在情况下,利用阈值和贝叶斯公式可以计算出它的概率系数,即在 $H1$ 和 $H0$ 先验概率相等情况下 ($H1$ 和 $H0, P_1 = P_2 = 0.5$),得到以下公式:

$$P(H1/F) = \frac{(P_1 \cdot P(F/H1)) / (P_0 \cdot P(F/H0))}{(P_1 \cdot P(F/H1)) / (P_0 \cdot P(F/H0)) + 1} \times \frac{L_1}{L_1 + 1}. \quad (3)$$

在公式(3)里得出以下结论:当 $P(H1/F) > 0.5$ 时, $H1$ 是真;当 $P(H1/F) < 0.5$ 时, $H0$ 是真。

概率系数 L_1 由公式(4)计算得出,即:

$$L_1 = \exp\left(-\frac{1}{2Q^2} \cdot \sum_{i=1}^M A(i)^2 + \frac{1}{Q^2} \sum_{i=1}^M (A(i) \cdot F(i))\right). \quad (4)$$

在公式(4)中,权重函数使用异常参数噪声离差 Q^2 归一化实现。

假如特定的异常 A_1, A_2, \dots, A_M 沿着剖面走向飘移,我们可以获得存在概率系数 $L_1(j), j=1, 2, \dots, N$ 的分布, N 是剖面上观测点的数目. 由此,根据公式(3),可以计算出异常存在总的概率数 $P(H1/F)$ 。

2.3.2 三维重磁概率成像反演 本文采用地球物理位场概率成像软件——COSCAD 3Dt(莫斯科国立地质勘探大学开发),开展了研究区三维重磁概率成像反演. 在研究区总磁测异常和剩余重力异常基础上,分别反演了三维磁概率模型和三维重力概率模型,结果见图 3。

根据上述重磁反演结果(图 3),结合研究区地质与矿床特征,认为研究区中心地带深部基底存在着规模较大的晚侏罗世酸性侵入岩. 酸性侵入岩体的平均顶部埋深在 2 000 m,部分岩体隐伏较浅甚至出露。

3 三维地质模型

根据研究区近地表地质、重磁解译,结合实测剖面图和钻孔编录等资料,参照 Micromine 平台及其三维建模方法流程(Kaufmann and Martin, 2008),可以进一步优化和完善研究区三维地质模型。

在三维地质建模过程中,本文侧重于研究区晚侏罗世花岗岩体的解译. 野外晚侏罗世花岗岩体物性试验分析表明其具有低重力和高磁物性特征,而新元古代辉长岩的物性特征则相反. 根据研究区三维重磁反演结果(图 3),可以判别出低重力和较高磁性特征的地质体(花岗岩体)以及与其相反特征的地质体(辉长岩体),由此,进一步判别出介于二者特征之间的正长斑岩体,三者通常呈柱状、近直立特征,这与研究区侵入岩体的空间分布特征基本一致. 在此基础上,辅助研究区地质图(图 1)和二度半正演资料(图 2),进一步推测晚侏罗世花岗岩体的产状以及周边地层、构造时空分布。

4 结论

重磁正反演联合解译是准确判别研究区深部花岗岩体的重要技术支撑,为研究区三维地质建模奠定了基础. 本文利用高精度重磁实测数据,选取重磁正反演技术组合解译了研究区不同地质体时空分布,尤其在三维环境中依次判别出晚侏罗世花岗岩、新元古代辉长岩和正长斑岩以及地层、构造的几何特征,为稀疏、零星或无钻孔资料的地段开展三维地质建模研究提供了重要技术支撑和科学依据。

由此可见,基于地质基础的重磁正反演联合解译深部地质体研究,能够有效地集成近地表地质实测信息与深部或隐伏的重磁地质异常解译信息,从而可以开展矿带或矿集区范围内三维地质建模,这弥补了以往仅依靠一系列规则、连续性强的钻孔或剖面数据三维地质建模方法的不足,拓展了三维地质建模的研究领域和范围,对于深部找矿、靶区圈定和定量资源评价等具有重要的现实意义。

致谢:作者衷心地感谢中国地质大学(北京)洪东明博士给予重磁三维反演研究的建议和指导。

References

- Bonham-Carter, G. F., 1994. Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS. *Computer Methods in the Geosciences*, 13: 414.

- Fallara, F., Legault, M., Rabeau, O., 2006. 3-D integrated geological modeling in the Abitibi Subprovince (Québec, Canada): techniques and applications. *Exploration and Mining Geology*, 15(1-2): 27-43. doi: 10.2113/gsemg.15.1-2.27
- Fullagar, P. K., Hughes, N. A., Paine, J., 2000. Drilling-constrained 3D gravity interpretation. *Exploration Geophysics*, 31(2): 17-23. doi: 10.1071/EG00017
- Fullagar, P. K., Pears, G., Hutton, D., et al., 2004. 3D gravity and aeromagnetic inversion for MVT lead-zinc exploration at Pillara, western Australia. *Exploration Geophysics*, 35(2): 142-146. doi: 10.1071/EG04142
- Guillen, A., Calcagno, P., Courrioux, G., et al., 2008. Geological modelling from field data and geological knowledge: part II. Modeling validation using gravity and magnetic data inversion. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171(1-4): 158-169. doi: 10.1016/j.pepi.2008.06.014
- Houlding, S. W., 1994. 3D geoscience modeling: computer techniques for geological characterization. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Iuliano, T., Mauriello, P., Patella, D., 2002. Looking inside Mount Vesuvius by potential fields integrated probability tomographies. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 113(3-4): 363-378. doi: 10.1016/S0377-0273(01)00271-2
- Kaufmann, O., Martin, T., 2008. 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines. *Computers & Geosciences*, 34(3): 278-290. doi: 10.1016/j.cageo.2007.09.005
- Pan, M., Fang, Y., Qu, H. G., 2007. Discussion on several foundational issues in three-dimensional geological modeling. *Geography and Geo-Information Science*, 23(3): 1-5 (in Chinese with English abstract).
- Paolo, M., Domenico, P., 1999. Principles of probability tomography for natural-source electromagnetic induction fields. *Geophysics*, 64(5): 1403-1417. doi: 10.1190/1.1444645
- Sprague, K., Kemp, E., Wong, W., et al., 2006. Spatial targeting using queries in a 3-D GIS environment with application to mineral exploration. *Computers & Geosciences*, 32(3): 396-418. doi: 10.1016/j.cageo.2005.07.008
- Wang, G. W., Du, Y. S., Cui, G., et al., 2009. Mineral resource prediction based on 3D-GIS and BP network technology: a case of study in Pulang copper deposit, Yunnan Province, China. *Fifth International Conference on Natural Computation (IEEE)*, 3: 382-386.
- Wang, G. W., Guo, Y. S., Du, Y. S., et al., 2007. Three-dimensional metallogenic prediction of Pulang porphyry copper deposit in Yunnan Province by using GIS technology. *Mineral Deposits*, 26(6): 651-658 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Q., Xu, H., 2003. An approach to computer modelling and visualization of geological faults in 3D. *Computers & Geosciences*, 29(4): 503-509. doi: 10.1016/S0098-3004(03)00018-9
- Yan, C. H., Liu, G. Y., Peng, Y., 2009. Pb-Zn-Ag metallogenic rule in southwestern Henan Province. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Ye, H. S., Mao, J. W., Li, Y. F., et al., 2006. Characteristics and metallogenic mechanism of Mo-W and Pb-Zn-Ag deposits in Nannihu ore field, western Henan Province. *Geoscience*, 20(1): 165-174 (in Chinese with English abstract).
- Zanchi, A., Francescac, S., Stefano, Z., et al., 2009. 3D reconstruction of complex geological bodies; examples from the Alps. *Computers & Geosciences*, 35(1): 49-69. doi: 10.1016/j.cageo.2007.09.003
- Zhang, Z. Q., Zhang, G. W., Liu, D. Y., et al., 2006. The isotope chronology of ophiolite, granite, clastic sedimentary rock in the Qinling orogeny belts. Geological Publishing House, Beijing, 190-192 (in Chinese).

附中文参考文献

- 潘懋, 方裕, 屈红刚, 2007. 三维地质建模若干基本问题探讨. *地理与地理信息科学*, 23(3): 1-5.
- 王功文, 郭运生, 杜杨松, 等, 2007. 基于 GIS 的云南普朗斑岩铜矿床三维成矿预测. *矿床地质*, 26(6): 651-658.
- 燕长海, 刘国印, 彭翼, 2009. 豫西南地区铅锌银成矿规律. 北京: 地质出版社.
- 叶会寿, 毛景文, 李永峰, 等, 2006. 豫西南泥湖矿田钨钼及铅锌银矿床地质特征及其成矿机理探讨. *现代地质*, 20(1): 165-174.
- 张宗清, 张国伟, 刘敦一, 等, 2006. 秦岭造山带蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学. 北京: 地质出版社, 190-192.