

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.326

引用格式: 郭冬, 丁文祥, 兰学毅, 等. 基于重磁电震综合解释的三维地质建模——以南陵—宣城矿集区为例[J]. 中国地质调查, 2024, 11(5): 139–152. (Guo D, Ding W X, Lan X Y, et al. 3D geological modeling based on comprehensive interpretation of gravity, magnetism, electricity and seismicity: A case study of Nanling – Xuancheng ore district [J]. Geological Survey of China, 2024, 11(5): 139–152.)

基于重磁电震综合解释的三维地质建模

——以南陵—宣城矿集区为例

郭冬¹, 丁文祥¹, 兰学毅¹, 陶龙¹, 张媛媛¹, 陆三明²

(1. 安徽省勘查技术院(安徽省地质矿产勘查局能源勘查中心), 安徽 合肥 230031; 2. 安徽省公益性地质调查管理中心, 安徽 合肥 230088)

摘要: 南陵—宣城矿集区近年来逐步发展为长江中下游成矿带内的第八个重要矿集区。由于地表覆盖层较厚, 深部地质结构的研究相对薄弱, 复杂的断裂系统和隐伏岩体尚未得到系统的三维建模与分析, 严重制约了成矿规律的认识和深部找矿工作的推进。为揭示该区深部地质结构, 综合利用重力、磁法、电磁法及地震等多源地球物理数据, 结合钻孔和岩矿石物性等先验信息, 优化隐式三维地质—地球物理建模方法, 通过多源数据的联合反演和综合建模, 建立了南陵—宣城矿集区的三维地质结构模型, 详细刻画了区域内断裂网络、隐伏岩体及控矿地层的空间分布特征。多重先验信息约束和钻孔信息进一步提高了模型的精度和可靠性, 显著提升了对深部地质结构及成矿系统的解析能力。研究结果揭示了该区控矿要素的空间分布规律, 并识别出潜在有利的成矿区段, 分析显示, 南陵—宣城矿集区内深部岩浆活动与主要构造系统之间具有密切的成矿耦合关系, 模型中识别的多个隐伏岩体和控矿地层的接触部位具有良好的找矿潜力, 研究成果可为深部找矿工作提供有效的技术支撑。

关键词: 先验信息; 联合反演; 南陵—宣城矿集区; 三维地质建模; 深部找矿

中图分类号: P631 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095–8706(2024)05–0139–14

0 引言

矿产资源是经济社会发展的重要物质基础, 其分布和储量在很大程度上决定了区域经济的发展潜力。随着浅表矿产资源逐渐枯竭, 矿产勘探逐步向“绿地”及深部区域转移, 如何在深部和隐伏区高效地发现新的矿产资源, 已成为当前矿产勘探领域亟待解决的重大挑战^[1]。长江中下游成矿带作为我国重要的铁、铜资源基地, 因其复杂的地质背景和多期次成矿作用, 深部矿体的识别与定位极具挑战性, 特别是在覆盖层广泛、地表露头较少的区域, 进一步提升深部找矿精度和效率尤为迫切^[2]。

近年来, 随着茶亭斑岩型铜金矿、麻姑山铜钼矿、长山铅锌多金属矿等大中型矿床的相继发现^[3–5], 安徽省宣城地区逐渐发展为长江中下游成矿带的第八个矿集区, 展现出巨大的资源潜力^[6]。然而, 现有研究多集中于单一地球物理手段进行的探测与解释^[7–9], 尽管已有研究在矿床尺度成矿流体的来源及演化机制方面取得了进展^[10–14], 但成矿流体与深部地质结构之间的耦合关系尚未得到系统的揭示, 该区深部结构有待进一步的精确刻画与系统分析。

多源地球物理数据的综合应用为提升深部地质结构刻画精度提供了新思路^[15–16]。基于地球物理数据驱动的三维地质模型通常依赖于二维或三维地震数据及钻孔数据的几何和物性约束, 能够更准确

收稿日期: 2024–09–26; 修订日期: 2024–10–12。

基金项目: 安徽省公益性地质工作“南陵—宣城矿集区三维综合地球物理探测(编号: 2018–g–1–4)”、国家重点研发计划“长江中下游南陵—宣城矿集区三维综合探测与深部成矿预测(编号: 2016YFC0600209)”及安徽省重点研究与开发计划“复杂地质条件下页岩气资源绿色勘查关键技术综合利用研究(编号: 2022n070203)”项目联合资助。

第一作者简介: 郭冬(1986—), 男, 工程师, 主要从事地球物理矿产勘查及研究工作。Email: gordon1203@foxmail.com。

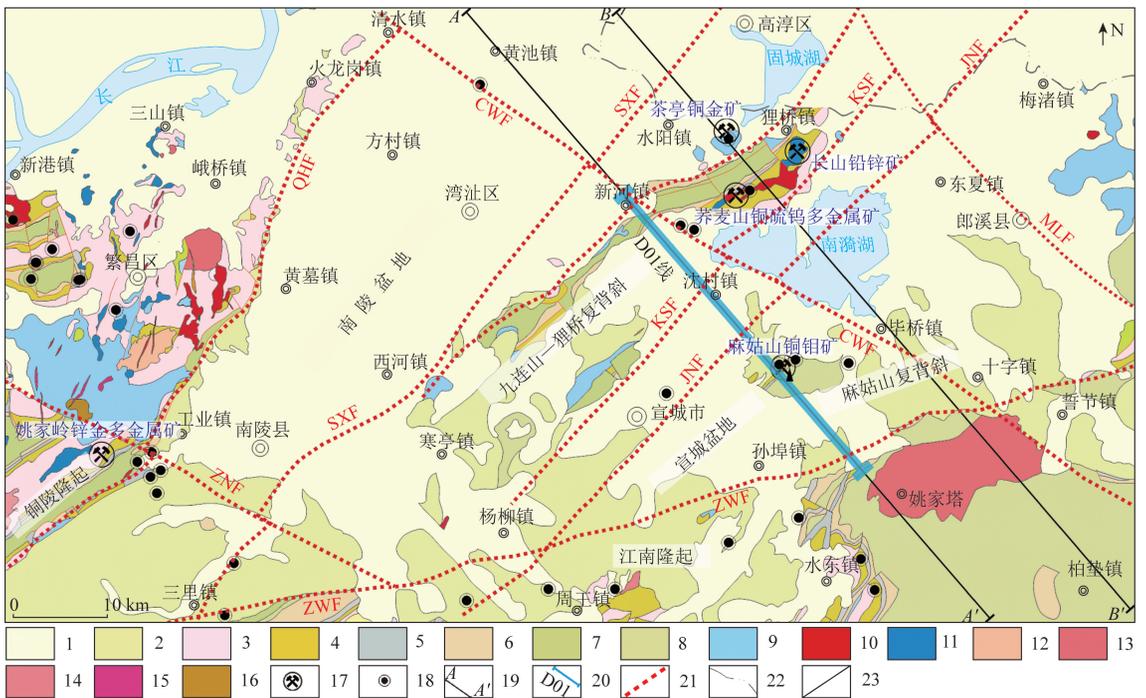
地揭示深部断裂系统、隐伏岩体及赋矿地层的三维空间耦合关系^[17-19]。引入重力、磁法、电磁法等多源数据,能够弥补单一数据源的局限性,从不同尺度和角度揭示深部地质结构及控矿地质体的空间展布特征^[20-21]。基于多源数据的三维地质-地球物理模型不仅能够揭示不同地质单元之间的内在联系,还通过模型耦合分析提升成矿预测的精度和可靠性,为复杂地质背景下的深部找矿提供有效的技术支持。

本文以长江中下游成矿带南陵—宣城矿集区为研究对象,采用重力、磁法、电磁法和地震方法等多种地球物理手段,构建区域三维地质结构模型。通过综合多源数据,系统刻画断裂网络、隐伏岩体及赋矿地层的空间形态,揭示区域深部地质结构与成矿系统的耦合关系,并提出基于多源地球物理数据的三维建模策略。研究旨在提升该区深部成矿预测的精度和可靠性,为区域内深部找矿工作提供科学依据和技术支撑。

1 地质背景

南陵—宣城矿集区位于扬子陆块北缘的江南

过渡带,跨越下扬子拗陷与江南隆起两个次级构造单元^[22],以江南断裂带为界,北侧为控岭—董岭式基底,南侧为江南式基底,两者的对接发生在早震旦世至晚震旦世之间。自中生代以来,矿集区经历了3次重要的构造活动^[23]:第一次发生在印支期—燕山早期,为陆内造山运动,导致NE至NEE向的逆冲断层广泛发育,古生界至三叠系地层发生大规模变形;第二次发生于早白垩世初期,由于古太平洋板块俯冲方向的转变,引发了强烈的逆冲挤压作用,导致前白垩系地层强烈变形;第三次发生在晚白垩世末至古近纪期间,太平洋板块挤压作用引起了盆地的反转。挤压作用结束后,区域进入相对长期的伸展环境,并伴随着强烈的岩浆活动。区内岩浆岩主要为中酸性浅成—超浅成侵入岩及陆相火山喷溢岩,主要分布于麻姑山、昆山推覆体一带,火山岩则零星出露于珩琅山、九连山等区域。矿集区主要受NE向深大断裂控制,断裂网络由NE、NW和EW向断裂构成(图1)。NE向断裂包括清水河—何湾断裂、三里镇—西河镇断裂等;EW向断裂主要为隐伏的周王断裂;NW向断裂则主要切割早期的NE向断裂,形成了复杂的断裂系统。



1. 第四系; 2. 白垩系; 3. 三叠系; 4. 二叠系; 5. 石炭系; 6. 泥盆系; 7. 志留系(下扬子地层); 8. 志留系(江南地层); 9. 火山岩; 10. 花岗(斑)岩; 11. 闪长(玢)岩; 12. 石英二长岩; 13. 钾长花岗岩; 14. 石英闪长(玢)岩; 15. 流纹斑岩; 16. 粗安斑岩; 17. 矿床; 18. 钻孔; 19. 骨干剖面; 20. 地震剖面; 21. 断裂; 22. 省界; 23. 地层界线; QHF. 清水河—何湾断裂; ZNF. 钟鸣—南陵断裂; SXF. 三里镇—西河断裂; JLF. 九连山—狸桥断裂

图1 南陵—宣城矿集区地质矿产简图(据文献[14]修改)

Fig.1 Geological and mineral resources map of Nanling - Xuancheng ore district(modified after reference[14])

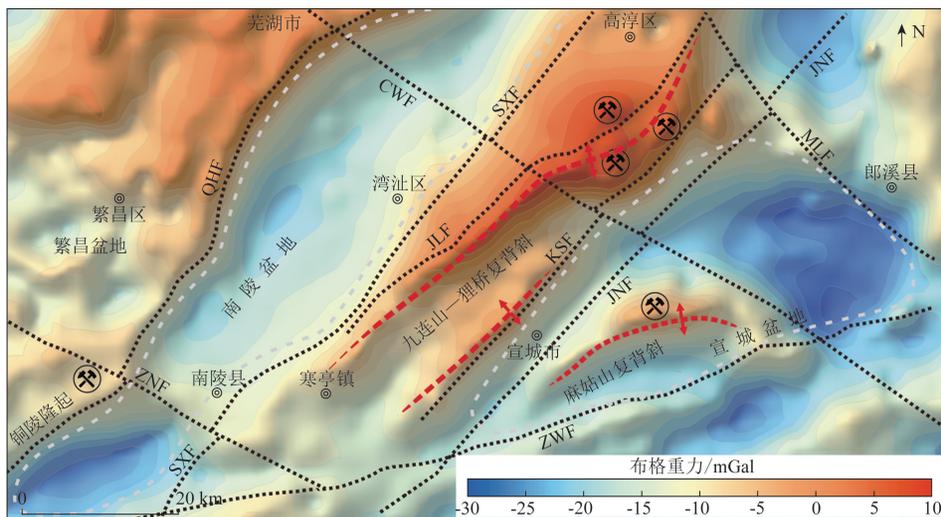
2 地球物理背景

2.1 重磁场特征

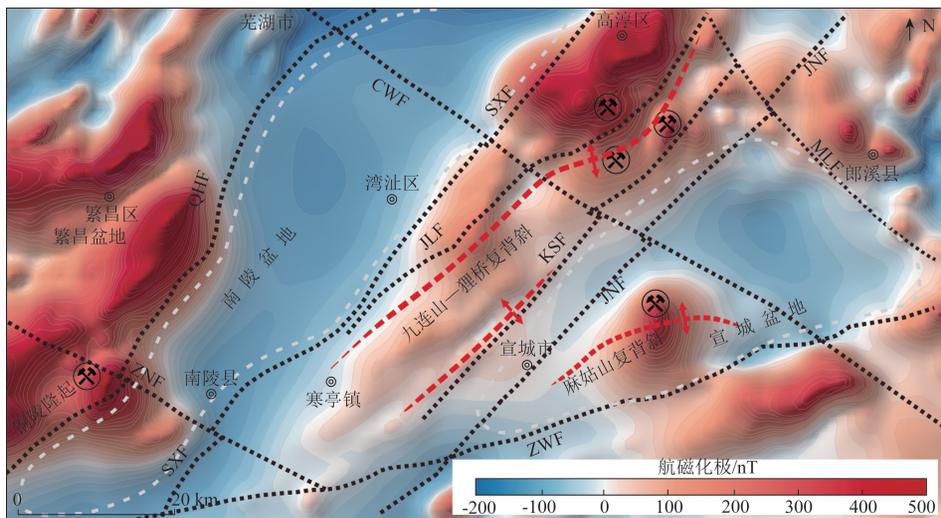
矿集区 1:20 万布格重力异常图(图 2(a))显示,重力场总体呈现 NE 和 NEE 向展布,可划分为 4 个区域:西部的沿江隆起和铜陵隆起的重力高异常区,中部的南陵盆地重力低异常区,狸桥—九连山—寒亭镇重力高异常区,以及南西部的宣城盆地重力低

异常区。这些重力异常区域反映了沿江拗断褶带的构造特征,揭示了研究区隆起与凹陷相间分布的构造格局。

矿集区 1:20 万航磁化极异常图(图 2(b))显示,磁场分布总体沿 NE 方向展布,并局部呈 NNE 走向。依据磁异常分布,可将研究区划分为 4 个磁异常区:芜湖—铜陵高磁异常区、南陵低磁异常区、狸桥—九连山—寒亭镇高磁异常区及东部的无规律高低相间磁异常区。



(a) 布格重力异常



(b) 航磁化极异常

推断断裂
 矿床
 推断背斜轴
 推断盆地

QHF. 清水河—何湾断裂; ZNF. 钟鸣—南陵断裂; SXF. 三里镇—西河断裂; JLF. 九连山—狸桥断裂; KSF. 昆山断裂; JNF. 江南断裂; ZWF. 周王断裂; CWF. 常州—芜湖断裂; MLF. 马鞍山—郎溪断裂

图 2 南陵—宣城矿集区重磁场

Fig. 2 Gravity and magnetic fields of Nanling – Xuancheng area

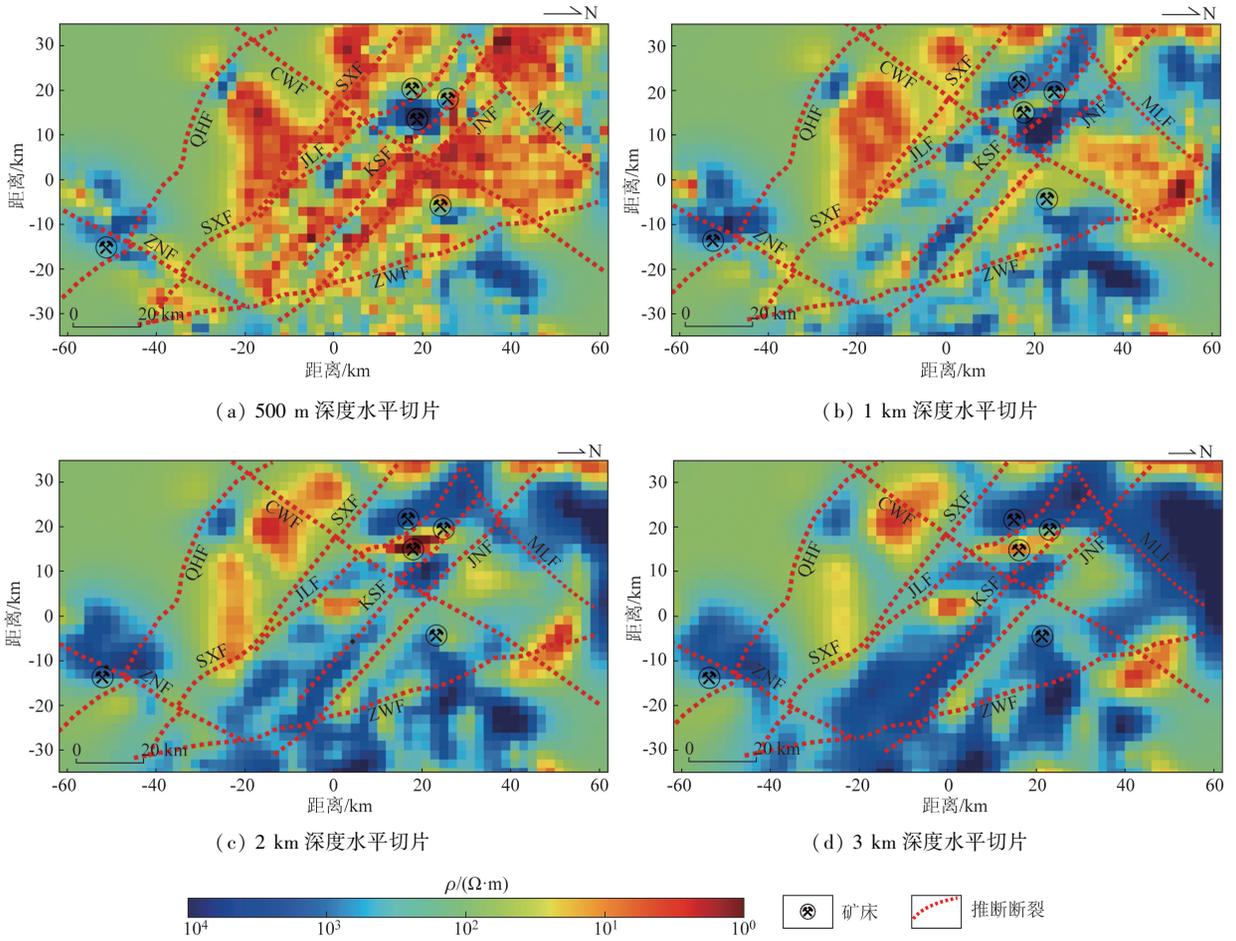
矿集区内主要矿床均分布于重力梯级带上,并与航磁异常密切相关,显示出矿体集中分布于隆起

与凹陷之间的过渡地带。该区域断裂发育、岩浆活动强烈,是成矿的有利场所。

2.2 大地电磁特征

南陵—宣城矿集区的三维电性结构模型展示了1 km、2 km 和 3 km 深度的水平切片分布特征(图3)。在500 m 深度切片(图3(a))中,电阻率分布与区域地表地质信息一致,表现为浅部低电阻率值为主,反映出广泛的覆盖层分布特征。随着深度增加到1 km(图3(b)),低阻区域的范围有所减小,部分区域电阻率逐渐升高,但仍有大面积的低阻区域存在。

2 km 深度(图3(c))显示,高阻特征的分布范围开始扩大,低阻区域进一步缩小并表现为多个不连续低阻体。3 km 深度(图3(d))显示,高阻特征分布更加广泛,而低阻体仅分布于局部区域。南陵凹陷在不同深度的切片中均显示为低阻异常区,表明该沉积盆地内部具有较厚的第四纪覆盖层;而宣城凹陷在3 km 深度则逐渐呈现出高阻特征,反映出深部基底隆升的特征。



QHF. 清水河—何湾断裂; ZNF. 钟鸣—南陵断裂; SXF. 三里镇—西河断裂; JLF. 九连山—狸桥断裂; KSF. 昆山断裂; JNF. 江南断裂; ZWF. 周王断裂; CWF. 常州—芜湖断裂; MLF. 马鞍山—郎溪断裂

图3 南陵—宣城矿集区三维电阻率反演模型水平切片(据文献[24]修改)

Fig. 3 Horizontal slices of the 3D resistivity inversion model in Nanling – Xuancheng ore district (modified after reference[24])

低阻体的边缘与地表断裂位置吻合,揭示了盆地边缘断裂在深部的延伸特征。已知矿床多分布于低阻体的内部或边缘位置,显示了矿床附近典型的低阻电性特征。此外,矿集区南部和东部存在大范围的高阻区域,根据地表岩体的出露特征推测,这些高阻区可能与燕山期中酸性侵入岩体的分布相对应^[25]。

2.3 反射地震特征

反射地震 D01 线(位置见图1)的偏移剖面(图4)揭示了矿集区深部断裂系统的特征。在 CDP350 至 CDP5100 段中,存在一个明显的深断裂,推测为江南断裂(JNF)。该断裂自浅部 0.5 s(双程走时)处向 SE 方向延伸,直达剖面底部,错断了其经过的各个地层,浅部 1~2 s(约 5 km 深度)处的南东部

地层向北西方向发生推覆,呈现出叠瓦状构造。深部2~6 s(5~15 km)处,中地壳两侧的反射特征差异显著:北西侧反射较为平缓,而南东侧反射则呈

现出明显的南东向北西方向推覆的叠瓦状形态。这表明江南断裂两侧基底性质存在差异,深部表现为典型的逆冲构造特征。

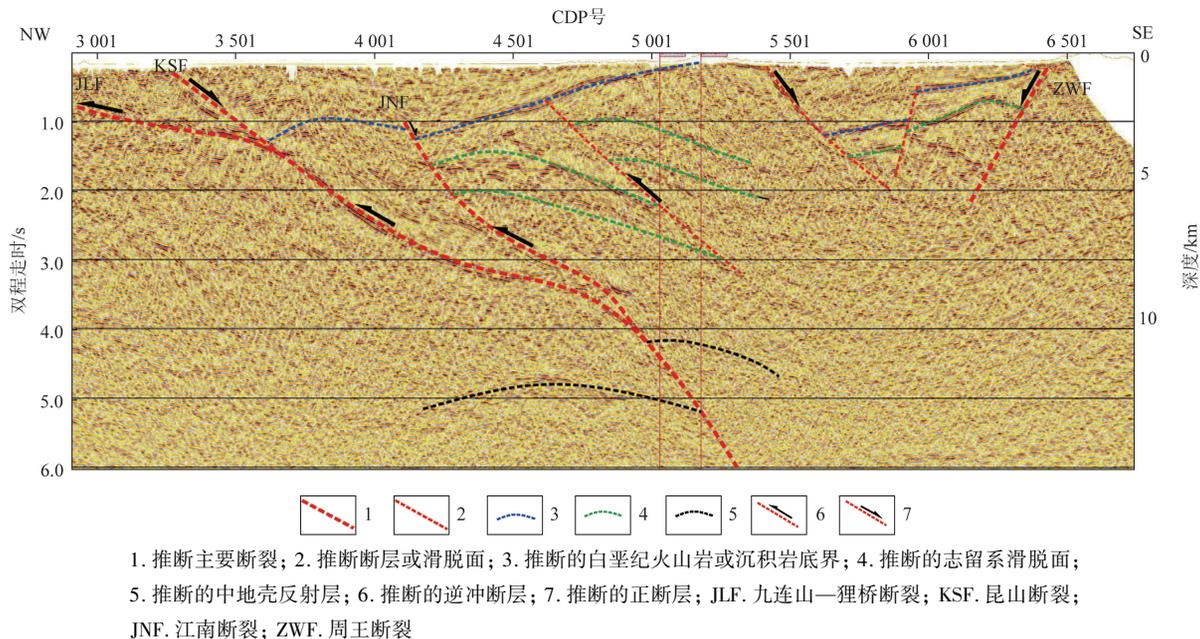


图4 南陵—宣城矿集区 D01 线反射地震剖面及地质解释(据文献[26]修改)

Fig. 4 D01 line reflection seismic profile and geological interpretation in Nanling - Xuancheng ore district (modified after reference[26])

在 JNF 的北西侧地表出露白垩系火山岩地层,其反射特征(CDP3000~CDP5000)清晰勾勒出宣城盆地北断南超的形态,最深处可达1.2 s(约5 km)。盆地北东侧受昆山断裂(KSF)控制,该断裂向北东方向延伸,深度范围约为1.2 s至4 s(约4~12 km)。在该剖面上,最为显著的反射波组出现在1 s至2.5 s的浅部,产状较为陡峭,至深部2.5 s至4 s时,产状变为较缓的斜坡状。反射波组上方显示出推覆的叠瓦状特征,该特征显示了区内活动强烈的推覆界面,推测其为九连山—狸桥断裂(JLF)。

在江南断裂(JNF)的南东侧,可清晰观察到叠瓦状逆冲构造的特征,表明麻姑山复背斜是由逆冲推覆的倒转地层组成。从 CDP5500 至 CDP6500 段,地表出露白垩系,并显示出盆地内部的层状反射特征。盆地南东侧受周王断裂(ZWF)控制,倾向NW。在 CDP5500 至 CDP6500 段的深部(3~6 s),可观察到完全透明的反射特征,且该特征切断了周围反射面。这种透明的无反射区清晰地描绘出了

隐伏岩体的空间展布特征,该岩体形态呈上窄下宽状,上端中心点位于 CDP5200,宽度约2400 m,顶端埋深2780 m,底部宽度15000 m。根据其规模和形状,可将其划分为岩株。由于熔融岩浆的上涌产生了巨大的拱张力,在侵入过程中导致上覆地层发生弯曲变形,因此该岩株可视为底辟构造。在地震剖面上,岩体的反射特征表现为内部无层理或杂乱反射波组。

2.4 矿集区及周边物性特征

岩石物理性质的时空变化反映了地球结构的物理演化过程。岩石物理性质在地质和地球物理研究中极其重要。它们充当地质学和地球物理学之间的纽带。同时,我们也应该认识到,不同类型岩石之间的物理性质可能存在显著的重叠,因此需要结合多种物理性质来区分不同的岩石。

矿集区内各种岩石和主要构造层之间的物理性质存在明显差异。这些差异为本地区地球物理数据的解释以及本文建立物理模拟单元划

分表奠定了基础(表1)。综合物性结果分析,沉积岩的密度值范围相对稳定,特别是碳酸盐岩,呈现出稳定的高值,而火成岩则因其成分、暴露状况、新鲜程度而变化较大。样品磁化率按碳酸

盐岩、酸性火成岩、碎屑岩、中碱性火成岩的顺序增大。下扬子地层带和江南地层带的物性略有差异,特别是志留系,在建模过程中将其分为两个地质单元。

表1 南陵—宣城矿集区建模物性参数表^[26]

Tab.1 Petrophysics parameters for modeling in Nanling – Xuancheng ore deposit^[26]

地质单元	密度/(g · cm ⁻³)	磁化强度/(× 10 ⁻² A · m ⁻¹)	电阻率/(Ω · m)
第四系	1.87	0	0 ~ 10
上白垩统一新近系	2.36	0	500
下白垩统中分村组	2.40 ~ 2.44	20	800
三叠系	2.65 ~ 2.68	0	5 000 ~ 10 000
中—上二叠统	2.40	0	3 000
石炭系—下二叠统	2.69 ~ 2.7	0	15 000
泥盆系—志留系(下扬子分区)	2.52 ~ 2.56	0	10 000
泥盆系—志留系(江南分区)	2.5 ~ 2.52	0	10 000
寒武系—奥陶系	2.72	0	20 000
辉石闪长岩	2.65	120 ~ 150	5 000
辉绿岩	2.63	150	20 000
花岗闪长(斑)岩	2.60 ~ 2.69	120 ~ 150	50 000
花岗斑岩	2.50 ~ 2.54	80 ~ 100	50 000
花岗闪长岩岩基	2.65	250	20 000
(似斑状)花岗正长岩	2.44	70 ~ 150	10 000
石英正长斑岩	2.57 ~ 2.62	146	5 000
闪长(玢)岩	2.58	80 ~ 120	6 000
正长斑岩	2.42	0 ~ 50	8 000
二长花岗岩	2.6	200 ~ 230	2 000
粗安玢岩	2.55	0	2 000
石英(闪长)二长岩	2.57 ~ 2.62	150 ~ 200	2 000
石英闪长(斑)岩	2.57 ~ 2.62	150 ~ 210	3 000

3 三维地质—地球物理建模方法

地质建模使用的数据种类繁多,包括岩石的直接观测数据和间接的地球物理测量数据(图5)。本文基于先验信息及重磁电震联合反演的隐式三维建模方法,能够充分利用多种地质观测和地球物理解译数据,突破了传统建模方法在数据方向、尺度和方位上的局限性。该方法不仅能够融合多尺度、多类型的地质物探信息,还可在少量地质观测数据约束下快速构建三维模型,并具备模型快速更新的功能,能够基于新的钻孔数据或地质理解进行模型的快速重建。

本文采用“先验信息总结—物性约束 2.5D 建模—三维建模及评价修正—找矿信息提取”为总体

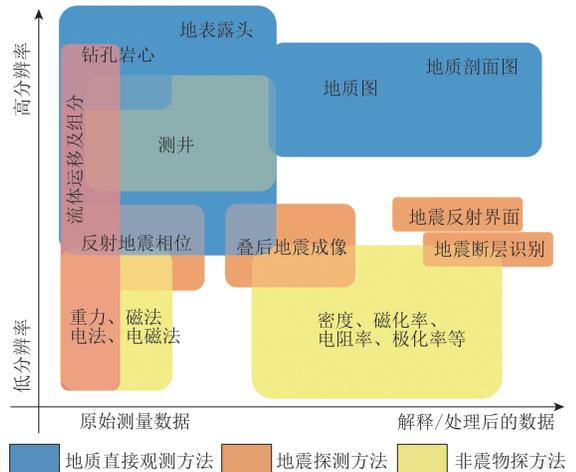


图5 先验信息数据类型及分辨率示意图^[18]

Fig.5 Schematic diagram of prior information data types and resolutions^[18]

思路,利用 Rgis2016、Geomodeller 等软件,以“廊带骨干剖面 2.5D 建模—32 条覆盖全区的 2.5D 剖面建模—矿集区 3D 建模”的工作流程进行三维地质—地球物理隐式建模。主要流程如图 6 所示:①整理先验信息,包括物探、地质、物性等多种数据;②在重点地区选取有地震剖面控制的区域进行骨干剖面 2.5D 建模,并开展综合解释;③

由骨干剖面控制,建立覆盖全区的 32 条剖面的 2.5D 建模,逐条进行综合解释;④基于剖面建模结果,构建隐式三维地质模型,生成断裂、岩体及地层的三维模型;⑤利用钻孔数据及模型重磁正演结果对模型精度进行评价,并进行迭代优化;⑥输出最终模型结果,开展三维模型分析,并提取找矿信息。

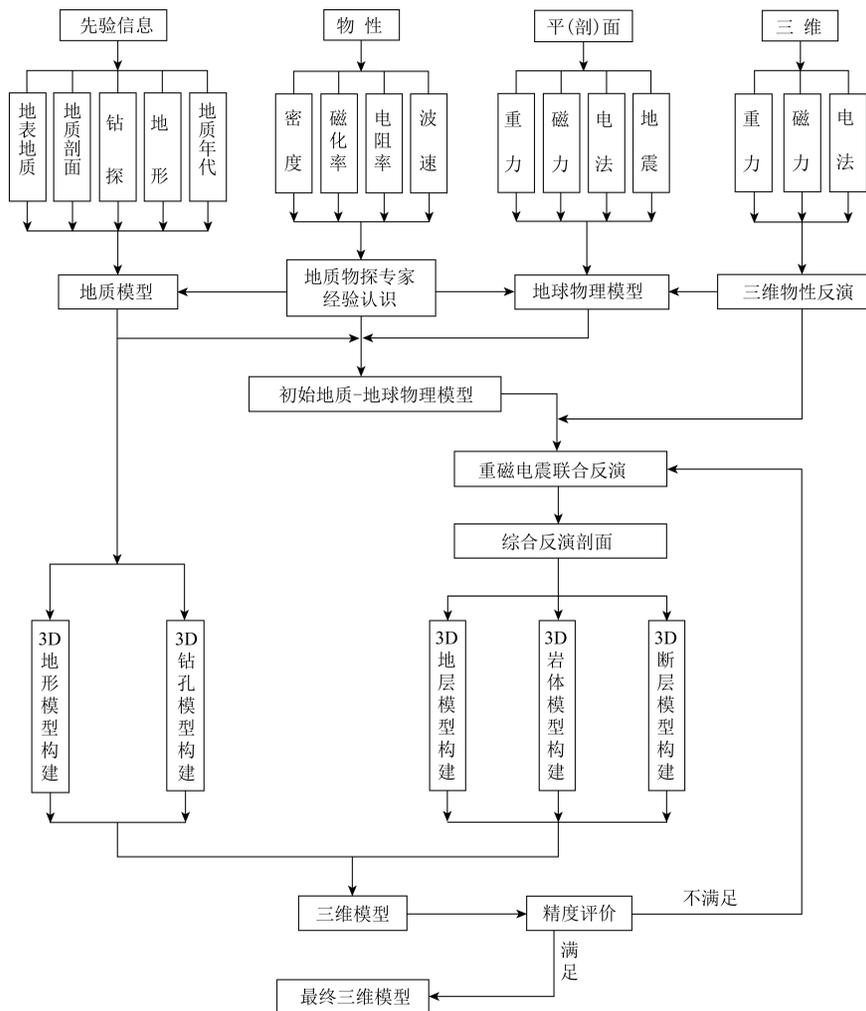


图 6 基于重磁电震综合解释的三维地质—地球物理建模技术路线

Fig. 6 Technical workflow of 3D geological-geophysical modeling based on integrated interpretation of gravity, magnetism, electricity, and seismicity

4 结果及讨论

4.1 2.5D 剖面建模结果

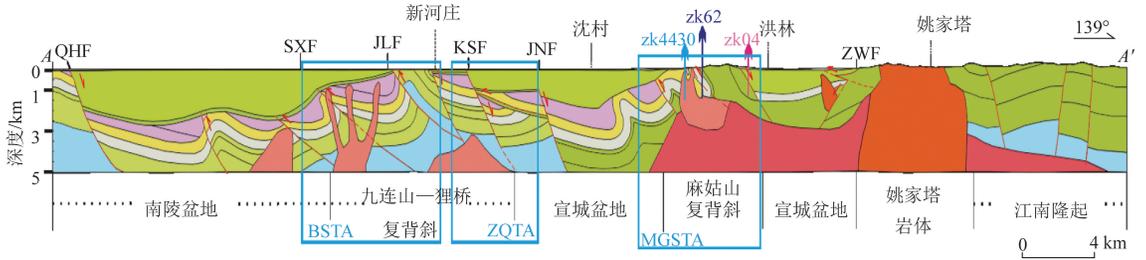
本次研究以穿过矿集区关键成矿单元(茶亭铜金多金属矿、麻姑山多金属矿)的骨干剖面为引领,综合前述重磁电震、地震、物性等先验信息,建立矿

集区内整体构造格架,具体建模过程及结果见文献^[26],本文以覆盖前述地震剖面 D01 的剖面 AA' (图 7(a)) 及穿过茶亭铜金矿的 BB' 剖面(图 7(b)) 为例,介绍骨干剖面所揭示的矿集区结构。

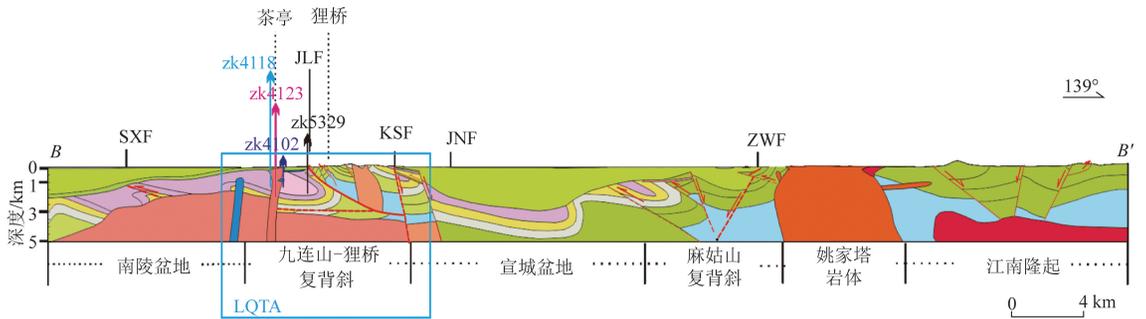
矿集区垂向上呈现 3 层结构,浅层为火山岩,中层为经过强烈挤压变形的古生代地层,下部又发育大规模岩浆岩。3 层结构之间经过 3 期逆冲挤压

推覆活动,发育了由深及浅形成树杈状结构断裂网络,为岩浆上侵创造了通道,各地层之间的滑脱

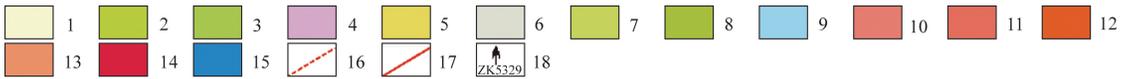
及破碎带,又为含矿流体的赋存,提供了相应的场所。



(a) AA'骨干剖面



(b) BB'骨干剖面



1. 第四系; 2. 上白垩统一古近系; 3. 下白垩统中分村组; 4. 三叠系; 5. 中上二叠统; 6. 石炭系一下二叠统; 7. 泥盆系—志留系(下扬子分区); 8. 泥盆系—志留系(江南分区); 9. 奥陶系—志留系; 10. 花岗闪长岩; 11. 花岗闪长(斑)岩; 12. (似斑状)花岗正长岩; 13. 花岗斑岩; 14. 二长花岗岩; 15. 闪长玢岩; 16. 推冲断层; 17. 断层; 18. 钻孔及编号; BSTA. 包村—石山头砂卡岩型铜多金属矿找矿远景区; ZQTA. 朱桥砂卡岩型铜硫钨多金属找矿远景区; MGSTA. 麻姑山砂卡岩型铜钼矿找矿远景区; LQTA. 狸桥斑岩型—热液型铜金多金属矿找矿远景区; QHF. 清水河—何湾断裂; SXF. 三里镇—西河断裂; JLJ. 九连山—狸桥断裂; KSF. 昆山断裂; JNF. 江南断裂; ZWF. 周王断裂

图7 骨干剖面综合建模结果及找矿远景区划

Fig. 7 Comprehensive modeling results of backbone profiles and zoning of prospecting areas

根据骨干剖面确立的构造格架,按照4 km间隔部署32条反演剖面。覆盖全区的剖面建模结果能够清晰展示出矿集区的整体格架及构造单元,为三维建模工作提供了良好的基础。

4.2 三维建模结果

矿集区的三维地质—地球物理模型面积达7 800 km²、深度达3 km,模型展示了矿集区内岩体分布、断裂系统、重要地层界面的三维形态特征。区内出露最老的地层为志留系,除缺失中下泥盆系外,地层层序齐全,发育较为完整。研究区内地层建模尺度以系为单位,自上而下分别为第四系(Q)、古近系—上白垩统(E—K₂)、下白垩统(K₁)、三叠系(T)、中上二叠统(P₂₋₃)、下二叠统—石炭系(P₁—C)、泥盆系—志留系(D—S)、奥陶系—震旦系(O—Z)。建模岩体以岩性为单位,本次主要建立岩体铜陵和芜湖地区的闪

长岩类、繁昌及溧阳火山岩盆地深部侵入的花岗岩类、姚家塔及浮山地区的正长花岗岩类、宣城茶亭至高淳地区的花岗闪长岩岩基。下面就三维模型所揭示的深部结构讨论矿集区各控矿地质体的分布特征及耦合关系。

4.3 讨论

4.3.1 控矿断裂系统

矿集区内总体呈现三隆两凹、隆凹相间的构造格局,主要以NE—SW向展布,其中,各个构造隆凹格局变化之间以深大断裂相接,综合地球物理探测、地质—地球物理二维反演及三维地质建模揭示矿集区内主要断裂系统的展布、深部形态和性质等(见图8)。主要的断裂系统以NE向展布为主,NW向断裂为次。主要断裂系统包括:NE—SW向断裂5条、NW—SE向断裂1条、SWW—NEE向断裂1条。

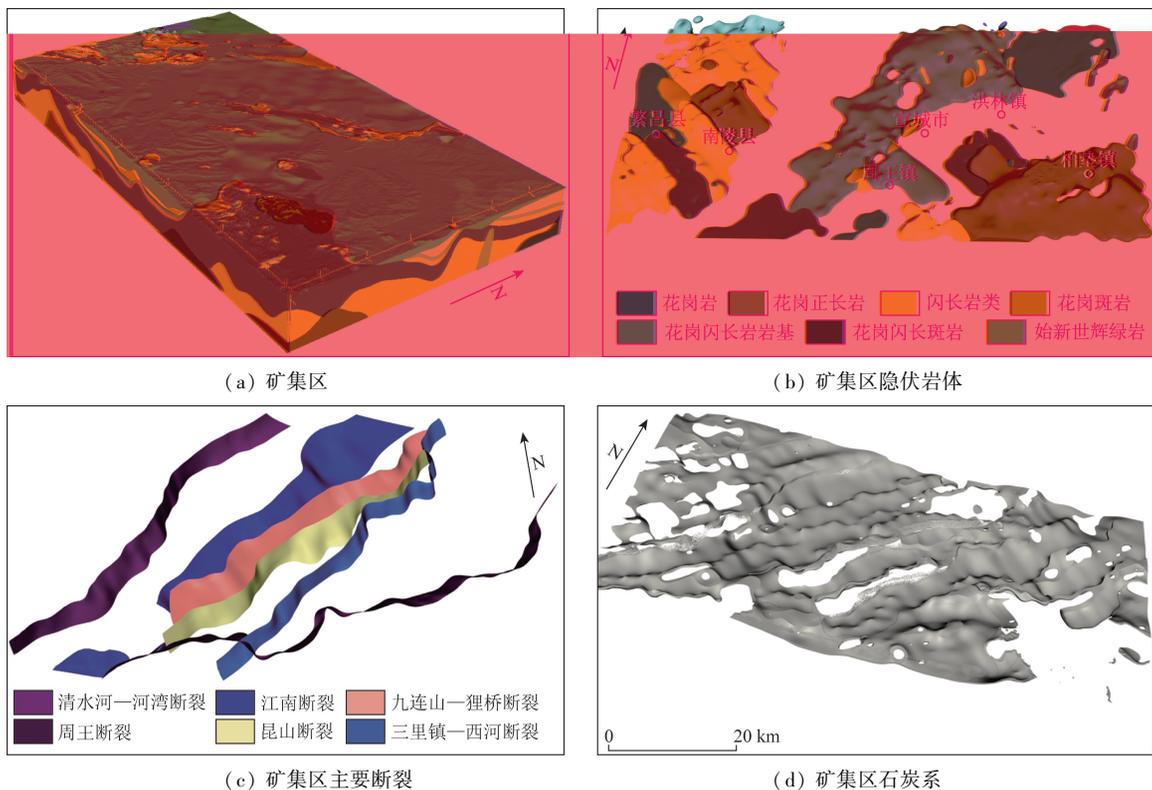


图8 南陵—宣城矿集区三维地质模型及主要地质体

Fig.8 3D geological model and display of major geological bodies in Nanling - Xuancheng ore district

江南断裂(JNF): 本次工作厘定了江南断裂在本区的位置及深部延伸形态, 总体呈 NE—SW 走向, 由宣城东至沈村, 穿过南漪湖向北东延伸至工区外; 空间上向 SE 向斜, 一直向下延伸至中地壳, 断层具多次活动迹象。它控制着南北两区下古生界的岩性、岩相等方面的变化, 使得断裂两侧下古生界密度、反射特征有所差异, 两侧基底不同。

清水河—河湾断裂(QHF): 清水河—河湾断裂既是宁芜和繁昌火山岩盆地及铜陵隆起的东界断裂, 也是溧水盆地和南陵盆地的西界断裂。总体呈 NE—SW 走向, 倾向 SE, 倾角约为 40°, 为一早期逆冲, 后期反转的正断层。该断裂在矿集区在平面上由铜陵何家湾至工山镇经麻桥往北延伸至芜湖清水镇, 为铜陵—芜湖隆起与南陵盆地分界线, 在铜陵地区以东东向展布, 往北至繁昌芜湖地区逐渐转为北东向展布。

三里镇—西河断裂(SXF): 总体呈 NE—SW 走向, 在平面上大致经三里镇至芜湖县向北延伸至高淳县以西, 为南陵凹陷的南东边界断裂, 表现为 SW 向 NE 方向逆冲形成的低角度逆冲断层, 隐伏于南陵凹陷的白垩系沉积物之下。

九连山—狸桥断裂(JLF): 总体呈 NE—SW 走向, 表现为倾向 SE 的逆冲断层, 倾角约为 35°, 向下延深较大, 切割下部早古生代地层。JLF 断层是本区最重要的一条逆冲推覆界面, 北侧出露白垩系中分村组火山岩, 南侧出露志留系, 志留系覆盖在白垩系火山岩地层之上。矿集区内断层的深部及北部止于江南断裂, 南部边界止于周王断裂。

昆山断裂(KSF): 该断裂为走向 NE—SW 走向, 倾向 SE 的高角度正断层, 断层切割了白垩系至寒武系, 断距较大, 形成北侧的古生代褶皱及南侧的白垩系沉积盆地。其深部切穿花岗闪长岩岩基, 同时也控制着邻近岩浆岩的侵入形态。

周王断裂(ZWF): 在矿集区内整体表现为近 EW 走向, 局部呈 NEE 走向, 为倾向北西的正断层。控制了宣城盆地的南边界, 表现为早期逆冲、晚期正断特征, 在 5 km 范围表现为断裂表现为倾向北西的高角度正断层, 但总体为一隐伏断裂, 地表出露被第三次推覆活动所掩盖。

钟鸣—南陵断裂(ZNF): 钟鸣—南陵断裂是一条隐伏断裂, 区内呈 NW—SE 走向, 是铜陵隆起与繁昌火山坳陷的分界, 沿断裂带两侧岩浆作用有着显著的差异。

4.3.2 隐伏岩体空间展布

矿集区内发育多期次、大规模的岩浆侵入喷发活动,除已知出露的较大面积的侵入岩外,区内深部侵入岩大面积发育(图8(b))。岩体按物性参数划分为五类:其一是宣城茶亭至江苏高淳县花岗闪长岩岩基,其二为与姚家塔岩体类似的偏中酸性的正长花岗岩类,其三是铜陵、芜湖地区偏基性的闪长岩类,其四是繁昌、溧阳地区偏酸性的花岗岩类,其五是研究区东部广德地区始新世玄武岩。

闪长岩类主要分布在芜湖、铜陵地区,花岗岩及花岗斑岩主要分布在繁昌火山岩盆地及溧阳火山岩盆地地区,正长花岗岩主要分布在繁昌浮山地区及宣城姚家塔、姚村等地方,花岗闪长岩岩基主要沿宣城—高淳县一带分布。

铜陵—繁昌—芜湖地区岩体活动比较强烈,岩体类型多样,从酸性到基性均有分布且岩体侵位较浅部分已出露至地表,繁昌地区不同于铜陵与芜湖,以偏酸性的花岗岩、花岗斑岩和正长二长岩侵入为主,并有大面积的岩体出露,如滨江花岗岩、浮山正长花岗岩、板石岭石英二长岩等;而在宣城地区,沿珩琅山至固城湖一线,反演结果显示深部为巨大的花岗闪长岩岩基,侵位高度自北西向南东逐渐增高至水阳镇—固城湖处达到最高,为-600 m

左右,局部地区如寒亭镇、九连山、敬亭山、硖石山等处均有较高的侵位,约在-1 km左右,该段岩体出露较少,仅在铜山、荞麦山、昆山、麻姑山处见出露,出露规模相对较小;另在姚家塔处出露年纪相对较新的花岗正长岩,与江南隆起段刘村正长花岗岩深部相连。在广德地区始新世侵入辉绿岩,呈岩柱状侵入在地层中,岩体规模有限,分布范围也有限。矿集区内不同类型的岩体侵入,以及区内复杂的构造运动和地层条件,造就了区内不同的成矿特征。

4.3.3 控矿要素耦合

矿集区内发育多种类型的铜、铁等多金属矿床,各矿床赋矿层位具有相似特征,指示主要控矿层位为三叠系及晚二叠系栖霞组—石炭系。

研究区内铜、铁等多金属矿床赋矿层位相似,主要控矿层位为三叠系和晚二叠系栖霞组—石炭系地层。三维建模结果(图9)显示,三叠系主要分布于向斜区和凹陷区,隆起区和岩体侵入区的三叠系遭受剥蚀。南陵凹陷区三叠系北西侧埋深较大,而南东侧埋深较浅。宣城地区背斜隆起区三叠系被剥蚀,主要分布在背斜翼部。九连山—狸桥一线受逆冲推覆影响,地层加厚,埋深增大。

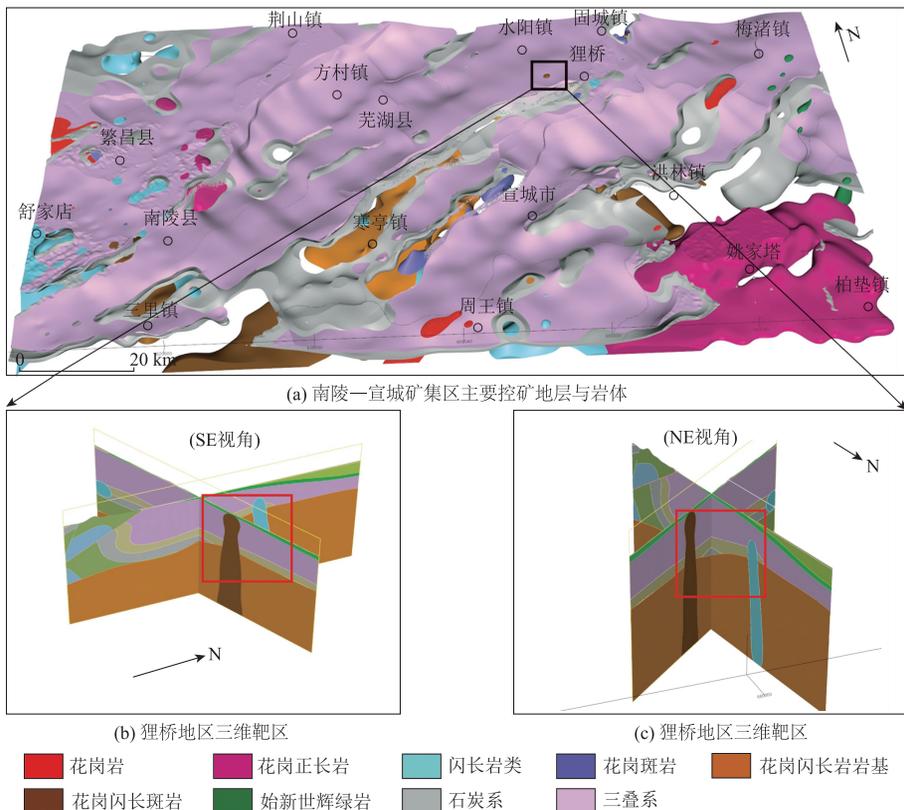


图9 南陵—宣城矿集区重要控矿要素耦合及三维靶区

Fig. 9 Key ore – controlling factors coupling and 3D target area delineation in Nanling – xuancheng ore district

三维建模结果表明(图9),三叠系主要分布于向斜区及凹陷区,部分隆起区和岩体侵入区三叠系遭受剥蚀或破坏。三叠系埋深表现为隆起区浅、凹陷区深,最大埋深位于南陵凹陷方村一带。在铜陵—繁昌—芜湖一线,三叠系除局部出露外,其余区域埋深较浅,但受到岩体侵入影响,局部破坏明显。南陵凹陷区三叠系呈北西侧埋深深、南东侧埋深浅的特征;宣城地区背斜隆起区三叠系已遭受剥蚀,仅在背斜两翼分布,埋深随远离背斜核部而逐渐增加。九连山—狸桥一线受逆冲推覆作用影响,地层重复加厚,埋深增大。此外,周王镇、水东镇、东夏镇等地区三叠系埋深相对较浅,而洪林镇、姚家塔、柏垫镇等地则因志留系出露及岩体侵入导致三叠系缺失。

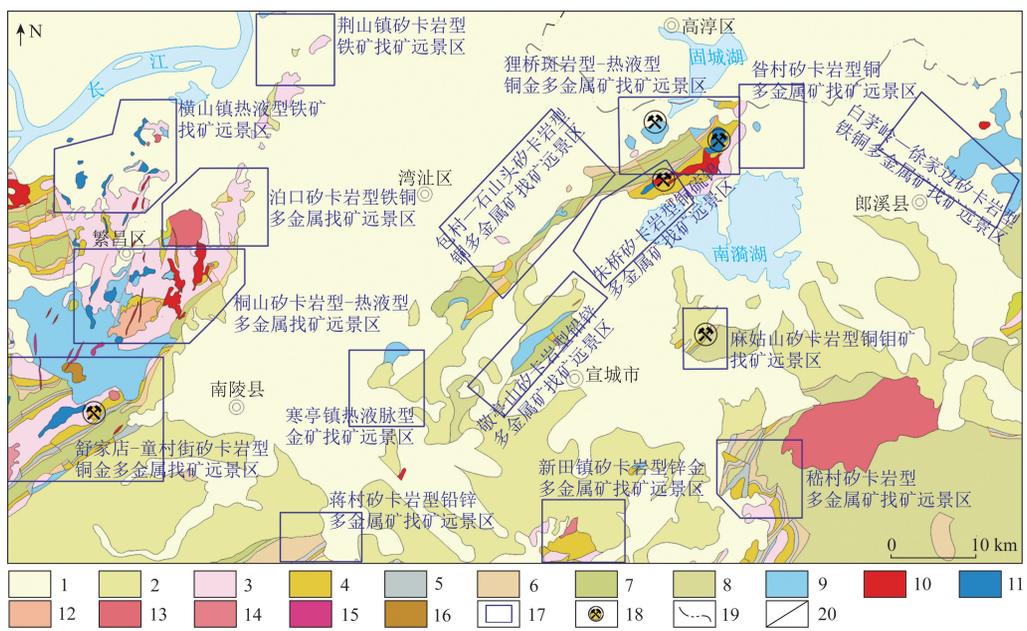
晚二叠—石炭系地层主要出露于隆起区,分布于褶皱两翼,受断裂及晚白垩纪沉积影响,出露不连续。建模结果表明,该套地层除志留系出露区缺失外,其余地区均广泛分布。隆起区埋深普遍小于2 km,凹陷区埋深较深。铜陵—繁昌—芜湖地区埋深普遍小于1.5 km;宣城地区仅在出露区埋深较浅,覆盖区埋深较大。沿珩瑯山—九连山—新河庄—固城镇及寒亭镇—敬亭山—硃石山一线埋深多小于1 km,其余覆盖区则超过2 km。

4.3.4 找矿远景预测

区内主要的铜金、铜钼、铜硫多金属矿床,几乎

无例外地与岩浆岩有密切的时空及成因联系,区内与矿化有关的岩浆岩主要有:茶亭隐伏斑岩体、昆山岩体、马山埠岩体及麻姑山岩体等。因此,寻找隐伏岩体及其接触带是深部找矿的有利部位。区内中上石炭统为重要的容矿层位,其次是下二叠系统栖霞组和下三叠系统各组。其中,中—上石炭统黄龙组、船山组碳酸岩岩层薄、成分不一、易破碎、岩性孔隙度较高、渗透性较好,与矿化最为有利,特别是两种岩性界面附近,由于物理化学性质差异,形成地球化学障,是铜钼硫多金属等储矿最有利部位。此外,背斜构造的核部和翼部,层间假整合面、滑脱构造,接触带构造以及角砾岩筒是深部找矿的有利构造部位。

通过三模模型综合分析控矿要素的耦合关系,从不同角度不同深度来圈定成矿有利部位,根据南陵—宣城矿集区地质和成矿特征,结合三维地质—地球物理模型(图9),通过骨干剖面AA'、BB'所揭示的茶亭与麻姑山矿床的控矿要素及其综合地球物理特征(图7),类推矿集区已知矿床之外的具有重磁高背景场、重低(边)磁高局部异常组合特征的地区为此次寻找隐伏矿体的重要关注地区,隐伏中酸性侵入岩体的圈定为寻找隐伏矿体的重要前提,在本区划定16个找矿远景区(图10),重点区域包括茶亭、麻姑山、包村—石头山、寒亭、咎村等地。



1. 第四系; 2. 白垩系; 3. 三叠系; 4. 二叠系; 5. 石炭系; 6. 泥盆系; 7. 志留系(下扬子地层); 8. 志留系(江南地层); 9. 火山岩; 10. 花岗(斑)岩; 11. 闪长(玢)岩; 12. 石英二长岩; 13. 钾长花岗岩; 14. 石英闪长(玢)岩; 15. 流纹斑岩; 16. 粗安斑岩; 17. 找矿远景区; 18. 矿床; 19. 省界; 20. 地层界线

图10 南陵—宣城矿集区找矿远景区

Fig. 10 Prospecting potential areas in Nanling - Xuancheng ore district

5 结论

(1) 基于 2.5D 反演剖面结果,并结合先验信息,采用重磁电震方法综合解释,构建了矿集区面积约 7 800 km²、深度达 3 km 的三维地质-地球物理模型。该模型揭示了矿集区内关键地层界面、断裂系统、推覆构造和岩体分布的三维结构,为深部找矿信息的提取提供了重要支撑。

(2) 矿集区总体呈现由多级逆冲推覆与褶皱构成的隆起,及中生代凹陷形成的隆凹相间格局,主要构造展布方向为 NE—SW 向。研究区整体构造格架为三隆两凹,垂向上 10 km 范围内展现出三层结构:浅层为火山岩,中层为强烈挤压变形的古生界地层,下层为大规模岩浆岩。这三层结构之间通过三期逆冲挤压推覆作用形成了复杂的断裂网络,为岩浆上侵提供了通道;各地层间的滑脱与破碎带为含矿流体的赋存创造了良好条件。

(3) 通过分析三维控矿地质体的耦合关系,圈定了 16 个成矿远景区,为长江中下游覆盖区的深部找矿工作提供了有力支持。

参考文献 (References):

[1] 陈毓川,毛景文. 加大矿业开发科技投入 国内找矿大有可为[J]. 中国科技产业,2022(8):6-10.
Chen Y C, Mao J W. Increase investment in mining development technology, domestic prospecting promising[J]. Science & Technology Industry of China,2022(8):6-10.

[2] 吕庆田,孟贵祥,严加永,等. 成矿系统的多尺度探测:概念与进展——以长江中下游成矿带为例[J]. 中国地质,2019,46(4):673-689.
Lv Q T, Meng G X, Yan J Y, et al. Multi-scale exploration of mineral system: Concept and progress - a case study in the middle and lower reaches of the Yangtze River Metallogenic Belt[J]. Geology in China,2019,46(4):673-689.

[3] 钱仕龙,杨前国,谢祖军,等. 安徽省宣州区茶亭斑岩型铜(金)矿床地质特征及成矿条件探讨[J]. 安徽地质,2017,27(2):81-86.
Qian S L, Yang Q G, Xie Z J, et al. Geological features and a discussion of ore-forming conditions of the Chating porphyry copper (gold) ore deposit in the Xuanzhou district, Anhui Province[J]. Geology of Anhui,2017,27(2):81-86.

[4] 王静,张达玉,黄家龙,等. 安徽宣城矿集区长山铅锌多金属矿床成矿流体特征及成因[J]. 矿床地质,2023,42(4):791-810.
Wang J, Zhang D Y, Huang J L, et al. Characteristics and genesis

of ore-forming fluid of Changshan Pb-Zn polymetallic deposit in Xuancheng ore district, Anhui Province[J]. Mineral Deposits, 2023,42(4):791-810.

[5] 卞育才. 皖南麻姑山铜铅矿床成因初探[J]. 江苏地质, 1995(1):17-20.
Bian Y C. On the origin of Magushan Cu-Mo deposit in southern Anhui[J]. Geology of Jiangsu,1995(1):17-20.

[6] 周涛发,范裕,王世伟,等. 长江中下游成矿带成矿规律和成矿模式[J]. 岩石学报,2017,33(11):3353-3372.
Zhou T F, Fan Y, Wang S W, et al. Metallogenic regularity and metallogenic model of the Middle-Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt[J]. Acta Petrologica Sinica,2017,33(11):3353-3372.

[7] 陈安国,周涛发,刘东甲,等. 长江中下游成矿带宣城矿集区重磁场特征与找矿启示[J]. 矿床地质,2020,39(5):879-892.
Chen A G, Zhou T F, Liu D J, et al. Gravity and magnetic characteristics of Xuancheng ore concentration area along Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt: implications to ore prospecting[J]. Mineral Deposits,2020,39(5):879-892.

[8] 张昆,吕庆田,满祖辉,等. 长江中下游成矿带岩浆-成矿系统深部背景和过程的电性结构约束[J]. 岩石学报,2022,38(2):573-583.
Zhang K, Lv Q T, Man Z H, et al. Electrical constraints on the deep setting and process of magma-mineral system in the Middle-Lower Reaches of Yangtze Metallogenic Belt[J]. Acta Petrologica Sinica,2022,38(2):573-583.

[9] 洪大军,宋世明,张旭,等. 安徽宣城茶亭铜金矿区外围找矿潜力分析[J]. 中国地质调查,2022,9(3):23-31.
Hong D J, Song S M, Zhang X, et al. Analysis of mineral prospecting potential in the periphery of Chating copper-gold mining area in Xuancheng City of Anhui Province[J]. Geological Survey of China,2022,9(3):23-31.

[10] 胡齐开,杜建国,谢祖军,等. 安徽宣城矿集区控矿构造特征及其深部找矿指示意义[J]. 安徽地质,2024,34(2):97-100,119.
Hu Z Q, Du J G, Xie Z J, et al. Characteristics of ore-controlling structures and their implications for deep ore prospecting in the Xuancheng ore concentration area, Anhui[J]. Geology of Anhui, 2024,34(2):97-100,119.

[11] 徐晓春,金林森,许心悦,等. 长江中下游成矿带南陵—宣城矿集区中生代构造-岩浆-成矿特征及其地质意义[J]. 地质论评,2024,70(5):1639-1659.
Xu X C, Jin L S, Xu X Y, et al. Mesozoic tectonic-magmatic-metallogenic characteristics of the Nanling-Xuancheng ore concentration district, Middle-Lower Yangtze Metallogenic Belt, and their geological significance [J]. Geological Review, 2024, 70(5):1639-1659.

[12] 周宇章,王勇生,曹亮,等. 南陵—宣城地区晚中生代构造应力场及其地质意义[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021,44(5):672-678.

- Zhou Y Z, Wang Y S, Cao L, et al. Tectonic stress field of Late Mesozoic in Nanling – Xuancheng area and its geological significance [J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2021, 44(5): 672 – 678.
- [13] 肖庆玲. 安徽宣城茶亭铜金矿床成矿作用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- Xiao Q L. Mineralization of the Chating Copper and Gold Deposit in Xuancheng Ore District, Anhui [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
- [14] Lu S M, Lan X Y, Zhao L L, et al. A 3D Investigation of geological structure and its relationship to mineralization in the Nanling – Xuancheng ore district, middle – lower Yangtze River Metallogenic Belt, China [J]. *Journal of Earth Science*, 2022, 33(3): 664 – 680.
- [15] 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.
- [16] 周永章, 左仁广, 刘刚, 等. 数学地球科学跨越发展的十年: 大数据、人工智能算法正在改变地质学[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2021, 40(3): 556 – 573, 777.
- Zhou Y Z, Zuo R G, Liu G, et al. The great – leap – forward development of mathematical geoscience during 2010 – 2019: big data and artificial intelligence algorithm are changing mathematical geoscience [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2021, 40(3): 556 – 573, 777.
- [17] 任政勇, 王祥, 汤井田, 等. 融合复杂地质信息的地球物理模型建模技术[J]. *地球物理学报*, 2022, 65(10): 3986 – 3996.
- Ren Z Y, Wang X, Tang J T, et al. A technique for constructing geophysical model from complex geological information [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(10): 3986 – 3996.
- [18] Wellmann F, Caumon G. 3 – D structural geological models: concepts, methods, and uncertainties [M] // Cedric S. *Advances in Geophysics*. Amsterdam: Elsevier, 2018: 1 – 121.
- [19] Mueller C O, Wächter J, Jahnke C, et al. Integrated geological and gravity modelling to improve 3 – D model harmonization – methods and benefits for the Saxony – Anhalt/Brandenburg cross – border region (North German Basin) [J]. *Geophysical Journal International*, 2021, 227(2): 1295 – 1321.
- [20] 周文月, 严加水, 陈昌昕. 多尺度地球物理与成矿系统探测: 现状与进展[J]. *地球物理学进展*, 2021, 36(3): 1208 – 1225.
- Zhou W Y, Yan J Y, Chen C X. Multiscale geophysics and mineral system detection: status and progress [J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(3): 1208 – 1225.
- [21] 吕庆田, 孟贵祥, 严加水, 等. 长江中下游成矿带铁 – 铜成矿系统结构的地球物理探测: 综合分析[J]. *地学前缘*, 2020, 27(2): 232 – 253.
- lv Q T, Meng G X, Yan J Y, et al. The geophysical exploration of Mesozoic iron – copper mineral system in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Metallogenic Belt: a synthesis [J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(2): 232 – 253.
- [22] 常印佛, 李加好, 宋传中. 长江中下游成矿带区域构造格局的新认识[J]. *岩石学报*, 2019, 35(12): 3579 – 3591.
- Chang Y F, Li J H, Song C Z. The regional tectonic framework and some new understandings of the Middle – Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(12): 3579 – 3591.
- [23] 宋传中, 李加好, 李海龙, 等. 再论长江中下游转换构造结——基于结构、属性、过程与动力学的思考[J]. *地质科学*, 2019, 54(3): 645 – 663.
- Song C Z, Li J H, Li H L, et al. Further discuss on the middle and lower reaches of the Yangtze River transitional tectonic node: Thinking based on structures, properties, process and dynamics [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2019, 54(3): 645 – 663.
- [24] You M, Guo D, Lan X Y, et al. 3 – D Magnetotelluric resistivity imaging of Nanling – Xuancheng Ore concentration area [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 68332 – 68342.
- [25] 王莹堂, 汤井田, 张林成, 等. 长江中下游成矿带中段岩石圈电性结构研究[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(12): 4403 – 4414.
- Wang X Y, Tang J T, Zhang L C, et al. Lithospheric electrical structure in the middle and lower reach of Yangtze River metallogenic belt inferred from magnetotelluric sounding [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(12): 4403 – 4414.
- [26] Guo D, Lan X Y, Lu S M, et al. Deep structure of Nanling – Xuancheng ore district, eastern China: insights from integrated geophysical exploration [J]. *Minerals*, 2023, 13(12): 1498.

3D geological modeling based on joint interpretation of gravity, magnetism, electricity and seismicity: A case study of Nanling – Xuancheng ore district

GUO Dong¹, DING Wenxiang¹, LAN Xueyi, TAO Long¹, ZHANG Yuanyuan¹, LU Sanming²

(1. Geological Exploration Technology Institute of Anhui Province (Energy Exploration Center), Anhui Hefei, 230031, China;

2. Public Geological Survey Management Center of Anhui Province, Anhui Hefei 230088, China;)

Abstract: Nanling – Xuancheng ore district has recently emerged as the eighth significant metallogenic district

within the Middle – Lower Yangtze River metallogenic belt. Due to the thick surface cover and relatively insufficient research on the deep geological structure, the complex fault systems and concealed intrusions have not yet been systematically modeled and analyzed in 3D model, which significantly restricts the understanding of metallogenic regularities and the progress of deep mineral exploration. To address this issue, the authors in this paper integrated multi – source geophysical data, including gravity, magnetism, electricity, and seismicity, along with the apriori information of borehole data and rock physical properties. And the implicit 3D geological – geophysical modeling approach was optimized to reveal the deep geological structure and provide effective technical support for deep prospecting. Through joint inversion and comprehensive modeling of multi – source data, this study established a 3D geological model of Nanling – Xuancheng ore district, which delineated the spatial distribution characteristics of fault networks, concealed intrusions, and ore – controlling strata in detail. The incorporation of multiple apriori information constraints and borehole information further improved the model’s precision and reliability, significantly enhancing the interpretation ability of deep geological structures and metallogenic systems. The results revealed the spatial distribution regularities of ore – controlling factors and identified potential favorable mineralization zones. The findings suggest that there is a close metallogenic coupling relationship between deep magmatic activity and the primary fault systems in Nanling – Xuancheng ore district, and that several contact zones between the identified concealed intrusions and ore – controlling strata have promising mineralization potential.

Keywords: apriori information; joint inversion; Nanling – Xuancheng ore district; 3D geological modeling; deep mineral exploration

(责任编辑: 常艳)