

文章编号:1671-4814(2015)02-123-07

安徽运漕地区隐伏地质体三维模型构建及应用^{*}

陈忠良,童劲松,吴雪峰,陈永宁,包海玲,王小莺

(安徽省地质调查院,合肥 230001)

摘要:以安徽运漕地区为例,从地层与岩体特征入手,结合地质—地球物理信息,开展浅覆盖区隐伏地质体三维建模研究。介绍了划分建模单元及建立地质—地球物理模型和构建最终地质体模型的过程,针对区内侵入岩、浅成侵入岩发育情况,提出采用地层与岩体并行建模的思路,通过“先分后合”的方式构建地质体三维模型。最终的成果模型反映了研究区隐伏地质体的主要物性层(建模单元)、主要断裂与褶皱构造、岩浆隆起构造的空间展布特征,模型将区域重磁、断层展布、已知矿点与闪长岩类及三叠世周冲村组叠加显示,以三维可视化的方式标识了成矿有利地段的空间位置。

关键词:三维地质模型;浅覆盖区;地层;岩体;运漕

中图分类号:P628⁺³;P534.63

文献标识码:A

1815 年,威廉·史密斯已经非常重视地质图的平面及三维表达。等厚线图曾经以平面方式展示了地层单位的厚度变化。随着交叉剖面技术越来越精细,诸如栅栏图、连续剖面图和剖析图等成为表现地质体三维结构的重要形式^[1]。但是,地质体三维结构本质上是三维乃至四维的概念,需要通过三维可视化方式表达其空间分布情况。在距威廉·史密斯编绘出第一张彩色英格兰和威尔土地质图两百年后的今天,各国地质调查机构均开展了众多三维地质填图和三维地质模型构建工作。例如,加拿大主要在尼曼托巴省开展三维地质填图。美国 1997 年完成了首张三维地质图。英国地质调查局(BGS)建立了全国性的三维地质模型 LithoFrame 和栅栏图 GB3D^[2]。

我国上世纪 80 年代相继开展了安徽省铜陵地区大比例尺立体调查和立体预测、湖北大冶铜绿山矿田等三维地质调查和成矿预测工作^[3]。2008 年开始,在长江中下游重点成矿区带九瑞、宁芜等地区开展了 1:5 万综合地质—地球物理立体填图试验。在九江—瑞昌矿集区,通过运用区域重力、航磁数据,经过多种分析获得了地层结构及岩浆岩三维空间形态^[4]。在庐枞矿集区,在地质信息和先验信息约束下运用重磁反演构建了三维地质结构模型^[5]。笔者在地质图和隐伏地层分布图的约束下,利用钻孔数据,建立了运漕幅第四系宏观地层格架模型^[6]。然而,如何综合使用钻探、重、磁、电、震等数据,建立

能够表达地层组合、地层接触关系、地层空间形态和岩体侵位机制等要素,特别是断层要素的三维地质结构模型(立体地质图),仍存在诸多挑战。

1 区域地质背景

运漕地区位于长江中下游铜—铁—硫多金属成矿带沿江铜—铁—硫—金—多金属成矿亚带中的宁芜矿集区西南部,其西南与庐枞矿集区和铜陵矿集区毗邻(图 1)。地层区划属扬子地层区下扬子地层分区之巢湖—安庆地层小区^①。全区被第四纪地层覆盖,厚度

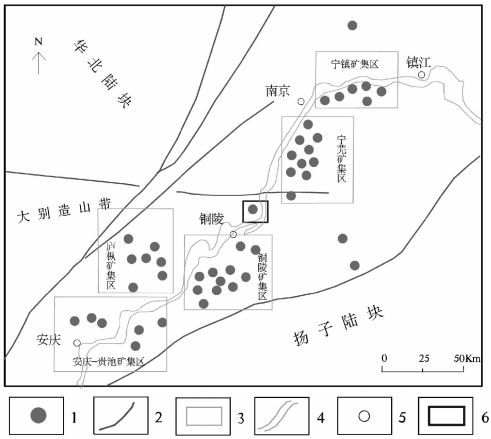


图 1 运漕地区在长江中下游成矿带中的位置^[7]
Fig. 1 Location of Yuncao area in the Middle-Lower Yangtze metallogenic belt
1-矿床点;2-断裂;3-矿集区;4-长江;5-城市;6-工作区

^{*} 收稿日期:2014-10-12 改回日期:2014-12-15 责任编辑:谭桂丽
基金项目:中国地质调查局地质调查项目“1:5 万和县等五幅区调(立体地质填图示范)”(项目编号:1212011120847)资助。
第一作者简介:陈忠良,1984 年生,男,工程师,主要从事地质调查与地质信息化研究。

一般为 30~70 m,少数>100 m,为典型的浅覆盖区(图 2)。区内隐伏地层主要为新近系(N)、古近系(E)、晚白垩世赤山组(K_2c)、早白垩世大王山组(K_1d)、早侏罗世钟山组(J_1z)、中三叠世黄马青组(T_2h)和周冲村组(T_2z)。隐伏侵入体以闪长岩类为主,另有少量花岗岩类。研究区在大地构造上位于扬子陆块区下扬子地块的中部,属沿江隆凹褶断带^①。区内发育盆地构造(无为盆地)和岩浆隆起构造(三叠系—岩浆隆起带)。在三叠系—岩浆隆起带,由矿区勘探和综合物探分析显示区内还发育褶皱构造、多组断裂构造和盐丘底辟构造等。燕山期富钠岩浆岩和中三叠世周冲村组接触带

为有利的成矿部位。

研究区经历了基底形成、陆缘盖层形成、滨太平洋大陆边缘活动带三个地史演化阶段^[8]。区内未见沉积基底,南华纪至三叠纪为盖层发展期,地壳运动以频繁振荡为主,至印支运动表现为强烈的造山运动,因此本阶段是研究区海相盖层形成和造陆、造山重要时期。印支运动结束了海相盖层发育历史,形成了一套次稳定型复陆屑—火山—蒸发式建造组合,岩浆活动强烈。断块造盆、造山运动居主导地位,逆冲推覆构造、对冲断裂构造更具特色。北北东向及近东西向两组断裂构造控制盆地形成和发展^②。

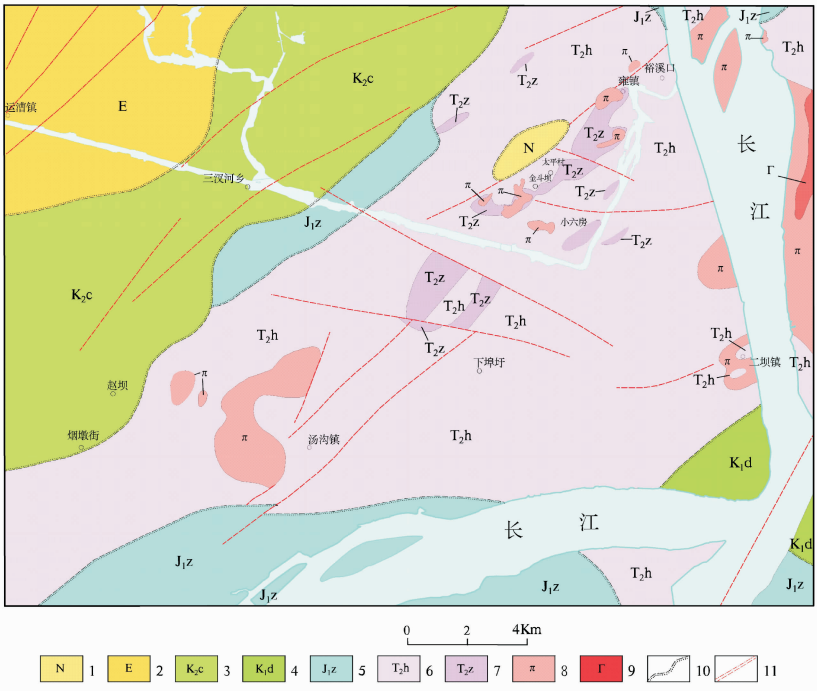


图 2 运漕地区基岩地质简图(据文献^[9]修改)

Fig. 2 Geological sketch map of bed rocks in the Yuncao area

1-古近纪地层;2-新近纪地层;3-晚白垩世赤山组;4-早白垩世大王山组;5-早侏罗世钟山组;6-中三叠世黄马青组;7-中三叠世周冲村组;8-闪长岩类;9-花岗岩类;10-推测角度不整合;11-隐伏断层、推测断层

2 建模流程

模型构建分为划分建模单元及建立地质—地球物理模型和最终地质体模型两个阶段。完整的隐伏地质体三维模型构建流程如图 3。

第一阶段:划分建模单元及建立地质—地球物理模型。将区域重、磁资料和地球物理剖面进行相互比对和印证,以钻孔资料加以约束,划分区域三维地质体建模单元,建立研究区地质—地球物理模型,并进行正演计算,以获得运漕地区地下 2000 m 内的地质解释成果剖面。

第二阶段:建立地质体模型。以综合地质—地球物理模型为基础,结合区域地质背景、区域重、磁解释和矿区勘探资料,借助三维可视化手段,首先构建反映研究区断裂分布的区域构造格架模型。然后依据综合地

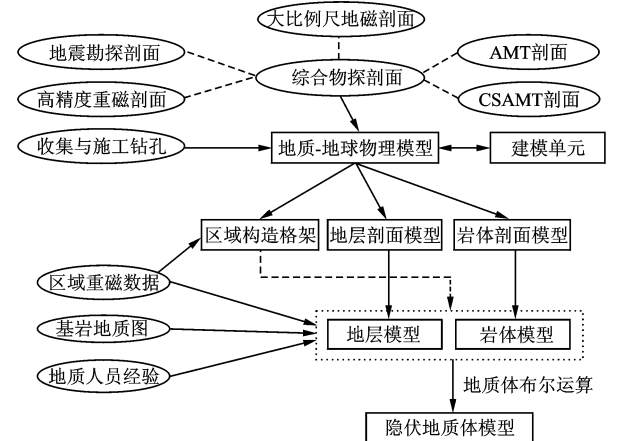


图 3 浅覆盖区隐伏地质体三维地质建模工作流程

Fig. 3 Modeling scheme for constructing 3D geological model in shallow-covered area

质-地球物理剖面,添加辅助剖面,采用交叉剖面建模方法构建地质体模型。由于隐伏地质体较为复杂,在剖面交互拼接前,宜采用岩层与岩体并行建模的思路。该思路将地质剖面分离为地层剖面与岩体剖面,并导入三维可视化环境之中,形成地层剖面模型和岩体剖面模型。根据钻孔数据,结合基岩地质图和区域重磁解释成果构建地层与岩体模型。待地层与岩体模型并行构建完成后,将岩体模型与地层模型进行地质体布尔运算,得到最终需要的地层模型。将其与岩体模型融合后即形成完整的隐伏地质体模型。

3 地质体模型构建

3.1 物性研究与建模单元的构建

通过分析矿区资料、钻孔资料(钻孔岩心物性见表 1,钻孔位置见图 4)并结合周边地区地层岩石物性参数(图 5),将研究区地层分为 9 个主要物性层(即地层建模单元)。

(1)古一新近纪地层(E-N)为低密度层,密度为 2.0~2.5 g/cm³ 间,平均 2.24 g/cm³,含双塔寺组和照明山组。其中,双塔寺组为整合于照明山组之下的浅黄、灰白、紫红色砾岩、砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩互层。照明山组岩石类型为砾岩、砂岩、泥质粉砂岩等,显示非旋回性基本层序,岩石显紫红、灰紫色等颜色。

(2)晚白垩世赤山组(K₂c)为低密度层,平均密度 2.28 g/cm³,为一套紫红、棕红色砾岩—砂岩—粉砂岩的陆相冲积扇—湖相沉积,与下伏地层呈角度不整合接触。

(3)早白垩世大王山组(K₁d)。为中密度层区内具有低缓背景特征的磁场,可能是由较弱的水平磁性层引起,推断其为大王山组(K₁d,)中基层火山岩。火山岩密度平均 2.52 g/cm³。大王山组为火山爆发—喷溢相沉积。

(4)早侏罗世钟山组(J₁z)为低密度层,平均值 2.40 g/cm³。主要岩性为灰白色厚层石英砂岩和长

石石英砂岩。

(5)中三叠世黄马青组(T₂h)为中等密度层,因受岩浆侵入热蚀变影响,密度变化区间较大,在 2.54~2.83 g/cm³ 间,多数在 2.6~2.7 g/cm³ 间。黄马青组下部主要岩石类型为钙质细砂岩、钙质粉砂岩,为海陆交互相的前三角洲席状砂体沉积;中、上部岩石类型为粉砂岩夹含砾粉砂岩,为三角洲前缘—三角洲前缘斜坡相沉积。

(6)早中三叠世地层(T₂z-T₁)为高密度物性层。为周冲村组、南陵湖组灰岩、白云岩等碳酸盐岩类(密度为 2.70 g/cm³ 以上)。硬石膏、岩盐电阻率最高。

(7)二叠纪地层(P)为低密度层,平均约 2.39 g/cm³。主要是硅质岩、碳质页岩、泥质粉砂岩。该层电阻率也较低。

(8)石炭纪地层(C)为高密度层,平均 2.72 g/cm³。主要是石炭纪沉积的一套碳酸盐岩地层。该层电阻率也较高。

(9)泥盆纪地层(D)中等密度物性层,平均 2.58 g/cm³,为一套砂岩为主的地层。依据物性差异,将岩体划分为花岗岩类和闪长岩类两大类。

(1)花岗岩类(Γ):含花岗岩(γ)、花岗斑岩(γπ)、二长斑岩(ηπ)和花岗闪长斑岩。该类岩石基本无磁性,且密度相对闪长岩类要低,约 2.55~2.65 g/cm³。

(2)闪长岩类(π):含闪长岩(δ)、石英闪长岩(δo)、闪长玢岩(δμ 以及石英二长闪长岩(δηo)等。该类岩石具有较高的磁化率和平均值为 2.67 g/cm³左右的中等密度,磁化率平均 2085~2439 (10⁻⁶ * 4πSI)。

3.2 地质-地球物理模型

根据物性研究和剖面附近的钻孔资料,利用钻孔揭示的地质体及深度作为控制条件,结合地震剖面解释和电阻率二维结构图(AMT、CSAMT 电阻率异常),对实测重、磁场求取剩余异常后再进行二

表 1 钻孔岩心物性特征统计
Table 1 Statistics of the physical properties about rocks from boreholes

岩石名称	钻孔	块数	密度	密度	磁化率	磁化率	剩磁	剩磁
			平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值	变化范围
			g/cm ³		10 ⁻⁶ * 4πSI		10 ⁻³ A/M	
砂岩(K ₂ c)	ZK3	30	2.23	2.02~2.51	20	5~60	7	2~27
粉砂岩、泥质粉砂岩(T ₂ h)	ZK4	124	2.70	2.54~2.83	61	14~265	27	7~66
	ZK3							
(含膏)白云岩(T ₂ z)	ZK2	36	2.42	2.22~2.59	21	1~114	17	5~40
灰岩(T ₁)	ZK2	33	2.70	2.68~2.72	38	8~95	14	1~57
二长斑岩(ηπ)	ZK1	30	2.60	2.49~2.66	156	13~884	72	16~607
闪长(玢)岩(δ)	ZK1	30	2.62	2.51~2.70	2085	98~5580	551	102~3985
黄铁矿化石英闪长岩(δo)	ZK5	35	2.75	2.67~2.83	2439	59~4910	487	66~4809
硬石膏(T ₂ z)	ZK2	30	2.94	2.89~2.98	43	11~118	16	6~66

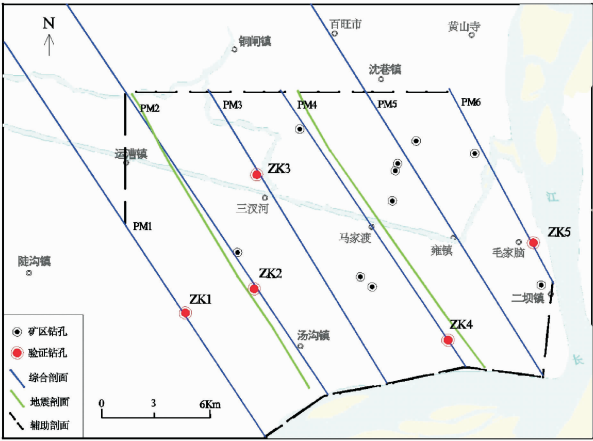


图 4 运漕地区三维模型建模数据示意图

Fig. 4 Schematic diagram of geologic data for constructing three-dimensional model in Yuncao area

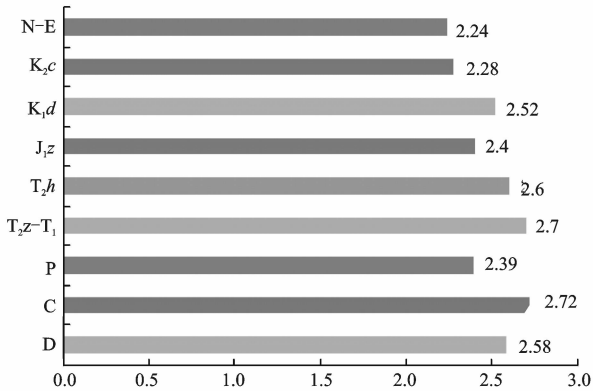


图 5 运漕地区地层(系)密度统计柱状图

Fig. 5 Statistical histogram of stratigraphic density in Yuncao area

维约束反演。由给定的初始地质体模型,计算其理论重、磁场,并与实际观测场进行对比,修正模型及地质体参数,重新计算理论曲线进行再次对比,反复多次直至修改后的模型体符合实际地质情况并且与

研究区的岩石物性特征相符、与区域解译成果一致为止。以此计算模型作为浅覆盖层之下主要建模单元的地质-地球物理模型。

3.3 区域构造格架推断

图 6(a)为研究区三维可视化剖面模型,其中北西部(i 和 ii)属无为盆地的南东部分,盆地是在沿江前陆盆地基础上继承演化的产物,属燕山晚期断陷盆地。盆地充填物主要为晚白垩世、古近纪及新近纪地层。三叠系—岩浆隆起带(iii 和 iv)的褶皱构造主要为裕汤复背斜。图 6(b)展现了根据物探和部分钻探资料推测的部分断层构造。区内断层构造可划分为北东向、北北东向和北西—北西西向等三组。区内燕山晚期的岩浆活动主要沿背斜核部上侵,形成北东向的岩浆侵入隆起带,主要分布于裕溪口—太平村—下埠圩一线。

3.4 地质体模型构建

本次地质体模型构建采用交叉剖面建模法,需建立辅助剖面以形成封闭的建模单元格。首先对二维剖面进行对比分析,对每条剖面中的断层、岩层、岩体进行编号,结合区域重磁解释成果,找出相对应剖面中相同编号的地质体,分析其成因、展布及尖灭方式等;其次添加辅助剖面,形成交叉剖面(图 4 可见辅助剖面布置)。分析获得断层、地层、岩体的成因、展布及尖灭方式信息后,添加四周边界剖面,延伸已有剖面,形成交叉剖面。

由于地层模型规则性较强,而岩体属于典型的不规则体,为避免岩体与地层模型同时构建引起地层面拓扑结构上错误,将地质剖面分离为地层剖面与岩体剖面。图 7 展示了地层与岩体模型并行构建流程。图中 I 阶段,是将解释剖面分离为岩层和岩体两类剖面。岩体剖面制作较为简单,而岩层剖面则需要考虑假设岩体未侵入前的形态,或延伸岩层需要顾及区域褶皱和断层的分布。在 II 阶段,分别

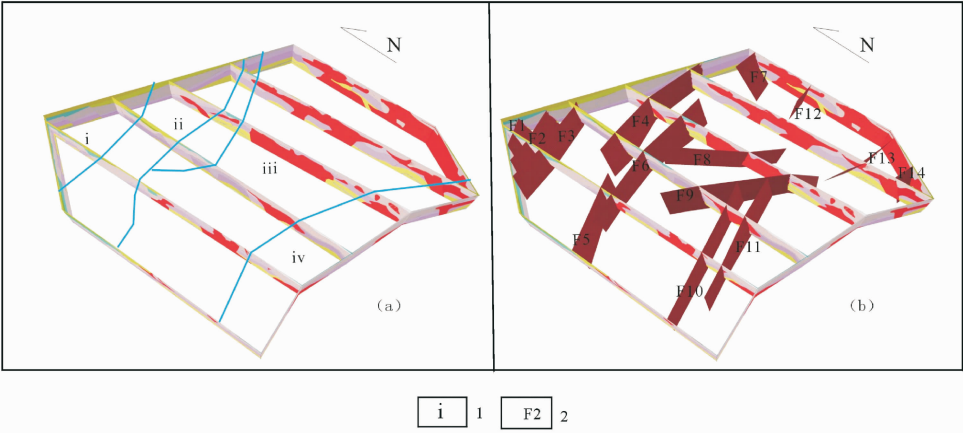


图 6 剖面三维可视化及断层分布展示

Fig. 6 3D visualization of sections and distribution of the faults

1-构造分区编号;2-断层编号

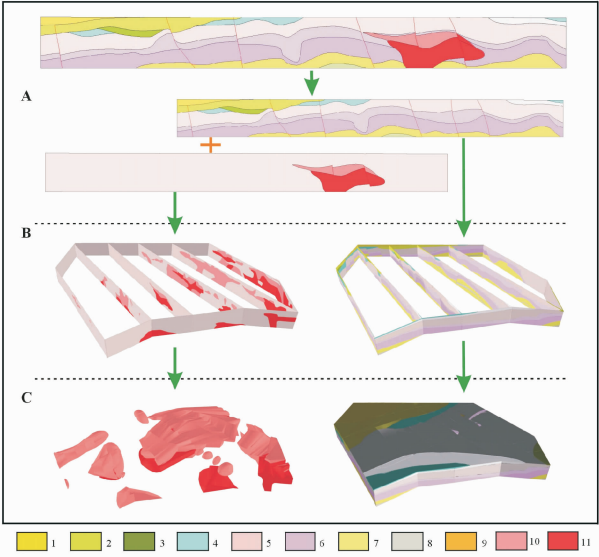


图 7 地层与岩体模型并行构建流程示意图
Fig. 7 Schematic diagram showing the parallel model of strata and intrusions

1-古-新近纪地层(E-N);2-晚白垩世赤山组(K_2c);3-早白垩世大王山组(K_1d);4-早侏罗世钟山组(J_1z);5-中三叠世黄马青组(T_2h);6-中三叠世周冲村组-早三叠世地层(T_2z-T_1);7-二叠纪地层(P);8-石炭纪地层(C);9-泥盆纪地层(D);10-闪长岩类(π);11-花岗岩类(Γ)

将岩层和岩体剖面导入三维可视化环境之中,构建封闭的单元格。通过交互拼接每个单元格可形成岩体和岩层的单元格地质结构模型。需要特别注意的是对地质面和地质体属性的处理。为便于快速识别

不同地质面和地质体,一定需要将岩层和岩体的代码标记于属性之中,在单元格地质体合并时,已存属性的地质体可以根据属性合并岩层和岩体地质体。III 阶段为最终构建的地层模型和岩体模型。通过地层模型与岩体模型的并行构建,可以减少建模人员在拼接地质面时的考虑因素,提高建模效率。

最终的地质体模型需要对地层模型与岩体模型进行地质体布尔运算。假定岩体模型为 A,岩体中的花岗岩类体模型为 B,地层体模型为 C,则最终的地质体模型 $S=(C-A)\cup(A-B)\cup B$ 。

4 讨论

4.1 地质体空间展布

对生成的地质体模型进行横向和纵向的栅格剖面切割,并分别选取 -200 m、-600 m、-1000 m、-1500 m 进行水平切割(图 8)。图中 1 区基本为有序的沉积凹陷区,区内盆地充填物以古近纪、白垩纪和侏罗纪地层为主,为沉陷盆地中心。2 区和 4 区也基本为沉积地层分布区,基底(三叠纪及下伏地层)隆起,2 区可能主要为密度较大的三叠纪灰岩分布区,局部地段有构造交汇并伴有岩浆活动。3 区和 5 区基本为岩浆岩分布区。3 区推断是岩浆上侵的中心区域,局部浅部以沉积碎屑岩为主,一些较大的已知铁矿床主要分布该区,且散布在磁异常边缘部位或规模较小的弱磁异常区,反映了岩体与围岩的热液成矿作用。5 区主要为中酸性侵入岩。

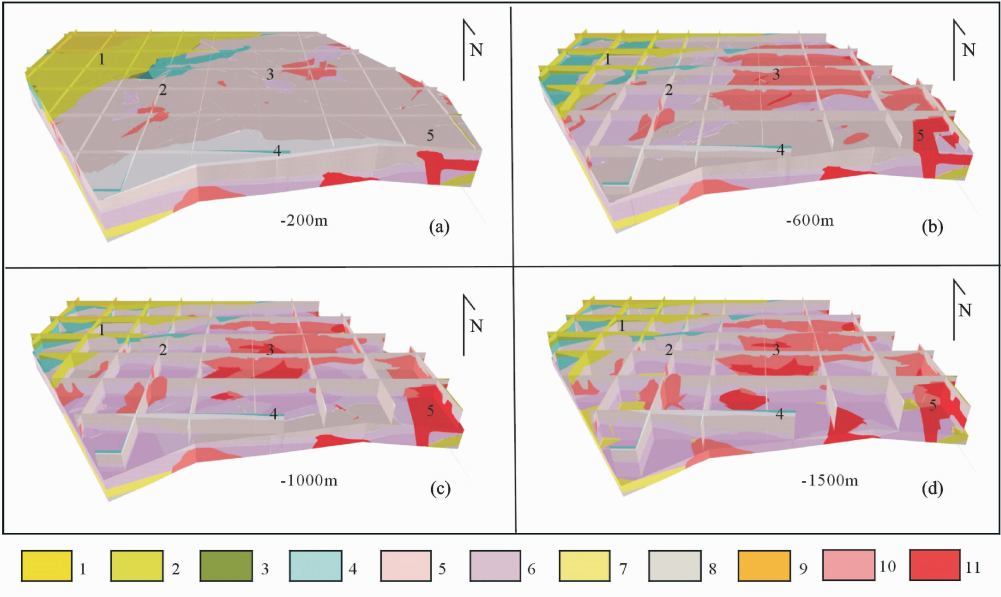


图 8 模型不同深度水平地质切片及栅格图

Fig. 8 Horizontal sections in different depths and raster maps of the model

1-古-新近纪地层(E-N);2-晚白垩世赤山组(K_2c);3-早白垩世大王山组(K_1d);4-早侏罗世钟山组(J_1z);5-中三叠世黄马青组(T_2h);6-中三叠世周冲村组-早三叠世地层(T_2z-T_1);7-二叠纪地层(P);8-石炭纪地层(C);9-泥盆纪地层(D);10-闪长岩类(π);11-花岗岩类(Γ)

4.2 找矿预测

区内铁矿床成矿母岩为中三叠世周冲村组,侵入岩体多为闪长岩类,其岩石物理特征表现为具有较高的密度和磁性。已知矿产地多分布在区域磁异常边缘部位,因此构造单元边界断裂部位的重磁异常是较好的成矿地带^①。图 9(a)为 1 : 5 万航磁化极异常图叠加断层和已知矿点(表 2)后的三维可视化效果图。图 9(b)为在(a)图基础上叠加闪长岩类和中三叠世周冲村组的三维可视化效果图。

表 2 矿点一览表
Table 2 List of the deposits

矿点编号	矿种及产地	坐标	成因类型	规模
Fe1	后堡铁矿	118°08′17″~31°20′49″	中温热液	矿点
Fe2	四房墩铁矿	118°08′24″~31°21′37″	中温热液	矿点
Fe3	下埠圩铁矿床	118°12′55″~31°21′02″	中温热液	小型矿床
Fe4	小王家铁矿床	118°13′40″~31°22′20″	中温热液	小型矿床
Fe5	东埂铁矿床	118°14′45″~31°23′36″	中温热液	中型矿床
Fe6	金-龙铁矿床	118°15′02″~31°24′06″	中温热液	大型矿床
Fe7	夏家庄铁矿床	118°18′58″~31°21′21″	中温热液	中型矿床

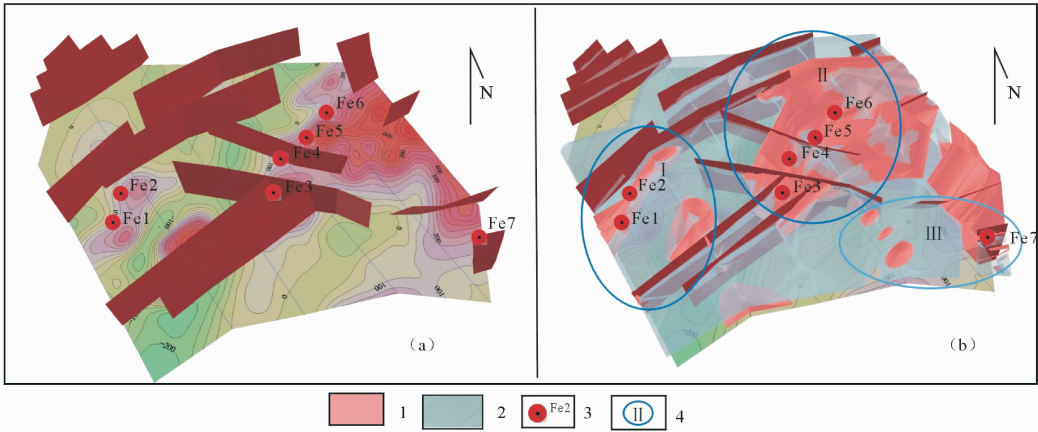


图 9 成矿有利地段三维空间示意图

Fig. 9 Three-dimensional space sketch map of mineralization favourable areas
1-闪长岩类;2-中三叠世周冲村组(透明显示);3-已知矿点及编号;4-成矿有利地段

5 结论

对于浅覆盖区,应先分析区域内的主要物性层(建模单元),而后据重、磁、电、震等物探数据,在钻孔数据的约束下,建立地质—地球物理模型。在此基础上,结合区域重、磁解译和矿区勘探和区域地质背景资料,借助三维可视化手段,构建地质体模型。隐伏地质体较为复杂,且含有岩体等不规则地质体,应采用地层与岩体并行建模的思路,最终的地质体模型由地层模型与岩体模型进行地质体布尔运算生

结合实测资料分析,可预测图 9(b)中存在三处有利成矿地段。深部钻探除了验证物探异常外,还有多处矿化和矿体发现,如 ZK1(位于预测区 I)发现了薄层磁铁矿,ZK2(位于预测区 I)发现了厚层硬石膏矿,ZK4(位于预测区 III 中)中也有多层黄铁矿化、黄铅矿化现象。另外,在本次预测区 III 开展了无为县夏家庄—钱村铁矿普查,有望新增 1 处达千万吨级的中型铁矿^[10]。

成。

致谢:感谢安徽省地质调查院周存亭教授级高工,储东如、陈秀其高工的指导和帮助,感谢项目组同事提供的论文素材。

注释

①周存亭,杜森官,柳丙全,等. 安徽省成矿地质背景研究成果报告(内部资料). 2013.

②童劲松,吴雪峰,陈永宁,等. 运漕地区深部立体地质填图工作报告(内部资料). 2013.

参考文献

[1] Holger Kessler, Stephen Mathers. The Past, Present and Future of 3d Geology in Bgs[J]. Journal Open University Geological Society,2006,27(2):13-15.

[2] Richard C, Berg, Stephen J. *et al.* Synopsis of Current Three-dimensional Geological Mapping and Modeling in Geological Survey Organizations [R/OL]. Champaign: Illinois State Geological Survey. [2014-05-06]<http://library.isgs.uiuc.edu/Pubs/pdfs/circulars/c578.pdf>.

[3] 陈克强,高振家,李龙. 有关深部地质填图和立体地质填图的几个问题[J]. 地质通报,2003(21):984-990.

[4] 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(12):4169-4180.

[5] 祁光,吕庆田,严加永,等. 基于先验信息约束的三维地质建模:以庐枞矿集区为例[J]. 地质学报,2014(4):466-477.

[6] 陈忠良,童劲松,包海玲. 浅覆盖区第四系三维地质结构模型快速构建——以运漕幅为例[J]. 安徽地质,2013(2):42-46.

[7] 翟裕生,姚书振,林新多,等. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律[M]. 北京:地质出版社,1992.

[8] 常印佛,吴言昌. 长江中下游铜铁成矿带[M]. 北京:地质出版社,1991.

[9] 安徽省地质调查院. 中华人民共和国区域地质调查报告 1:5 万和县幅、当涂县幅、运漕幅、无为县幅、姚沟幅[R]. 合肥:安徽省地质调查院,2013.

[10] 杨军义. 安徽局 322 队探获千万吨级铁矿[J]. 中国矿山工程,2014,43(4):80.

Construction and application of 3D hidden geological model in Yuncao area, Anhui Province

CHEN Zhong-liang, TONG Jin-song, WU Xue-feng, CHEN Yong-ning,
BAO Hai-ling, WANG Xiao-ying
(*Geological Survey of Anhui Province, Hefei 230001, China*)

Abstract: On the basis of the information of geology and geophysics, by studying on the characteristics of strata and rock mass, a 3D hidden geological model in shallow-covered areas is constructed taking Yuncao area in Anhui Province as an example. It introduces how to divide the modeling units and how to construct geological-geophysical model and 3D geological model, and a parallel model of strata and intrusions and a thinking of “first in separation and then in combination” are pointed out to build the final 3D hidden geological model considering the developmental conditions of intrusion and shallow intrusive rocks in this area. It is found that the resulting-model can reveal the distributions of physical properties of hidden geological bodies, major faults, folded structures and magma bulge structure. In addition, it can display gravity and magnetic regional field, fault distribution, known ore occurrence, diorites and Zhouchongcun Formation to identify the spatial positions of metallogenetic favorable sections by 3D visualization.

Key words: 3D geological model; shallow-covered area; strata; pluton; Yuncao area

