



综合地球物理在铁矿空间定位勘查工作的应用

赵雪娟¹,段会升²,慕钧浩³,王雪松⁴,孙中任¹,孙 钢⁴

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心,辽宁 沈阳 110034; 2. 烟台东方冶金设计研究院,山东 烟台 264006;
3. 辽宁省矿产勘查院有限责任公司,辽宁 沈阳 110031; 4. 沈阳大地事业科技有限公司,辽宁 沈阳 110036

摘 要:以辽宁抚顺毛公堡铁矿为研究目标,开展高精度重磁扫面,重点地区开展非等点距、非等比激电测深和宽音频大地电磁测深等观测工作。单剖面重点段小点距 5 m,非重点段大点距 20 m。非等比极距激电测深极距最大间隔小于 200 m。宽音频大地电磁最宽频率 0.1 Hz。重磁资料通过多软件、多参数、多方法处理,利用众多过渡图件开展综合研究,选定有效重点区。重点区施以非常规参量的常规测深方法,同时,开展多参量、多方法数据处理和反演方法,准确地刻画出深部电性特征。最终施钻验证。结果显示:高精度重力测量可以很好地辅助高精度磁测的铁矿勘查工作;重力异常能更好地表现异常地质体地表投影位置;电磁测深是垂向分界划分的有效方法;激电测深的电阻率、极化率等其他参量可以更好地划分、探测蚀变、构造、岩体界线;激电测深的多电参数可以弥补大地电磁测深电性参数单一的不足,帮助水体识别、多金属矿化识别、蚀变体以及构造和破碎带识别;由区选面、由面到点、由点及深的工作程序是有效的工作程序。施钻结果显示这套方法组合在铁矿勘查工作中,特别是在铁矿体埋深、倾向、倾角、形态等空间赋存状态参数确定上都有很好的表现。通过该方法形成了一套较为有效的铁矿勘查技术模型。

关键词: 铁矿;空间定位;地球物理勘查;重磁扫面;辽宁省

INTEGRATED GEOPHYSICAL EXPLORATION APPLIED IN SPATIAL POSITIONING OF IRON DEPOSIT

ZHAO Xue-juan¹, DUAN Hui-sheng², MU Jun-hao³, WANG Xue-song⁴, SUN Zhong-ren¹, SUN Gang⁴

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China; 2. Yantai Oriental Metallurgical Design and Research Institute Co., Ltd., Yantai 264006, Shandong Province, China; 3. Liaoning Mineral Exploration Institute Co., Ltd., Shenyang 110031, China;
4. Shenyang Dadi Business Technology Co., Ltd., Shenyang 110036, China

Abstract: Taking Maogongpu iron mine in Fushun, Liaoning Province, as the object, the study carries out the high-precision gravity and magnetic survey, with non-equidistant, non-equal-ratio IP sounding and wide-audio-frequency magnetotelluric (MT) sounding in key areas. The survey adopts small point distance of 5 m for key sections, and large point distance of 20 m for other sections in single profile. The maximum interval of non-equal-ratio pole distance induced polarization (IP) sounding is less than 200 m, and the widest frequency of wide-audio-frequency MT sounding is 0.1 Hz. The gravity and magnetic data are processed by multi-software, multi-parameter and multi-method, with multiple transition maps for comprehensive research and selection of effective key areas. Conventional sounding methods

收稿日期:2024-01-16;修回日期:2024-01-28. 编辑:张哲.

基金项目:中国地质调查局项目“东部岩浆岩带区域地质调查”(DD20230004);辽宁省科技厅项目“深部盲矿体勘查技术研究”(2020210101000271).

作者简介:赵雪娟(1965—),女,高级工程师,现主要从事物探、化探、遥感在地质矿产中的应用研究,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号,E-mail/wkykjyhl@163.com

通信作者:孙中任(1963—),男,博士,正高级工程师,主要从事地质勘查工作中物化遥的应用研究工作,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号,E-mail/sunzhongren@mail.cgs.gov.cn

with unconventional parameters are applied in key areas. Besides, multi-parameter and multi-method data processing and inversion methods are used to accurately characterize the deep electrical characteristics, which are finally verified by drilling project. The results show that the high-precision gravity survey can assist high-precision magnetic survey with iron deposit exploration. The gravity anomaly can better represent the surface projection position of anomaly geological body. Electromagnetic sounding is an effective method for vertical division. Parameters such as resistivity and polarizability of IP sounding can be used to classify and detect the boundary of alteration, structure and rock mass better. The multiple electrical parameters of IP sounding can make up for the shortage of single electrical parameters of MT sounding, and help to identify water body, polymetallic mineralization, altered body, structure and fracture zone. The working procedure from region to area, from area to point and from point to depth is effective. The drilling results show that the integrated methods have a good performance in the iron deposit exploration, especially in the determination of spatial occurrence parameters of iron orebody, such as buried depth, dip direction, dig angle and shape. A set of effective iron deposit exploration technology model is established with this method.

Key words: iron deposit; spatial positioning; geophysical exploration; gravity magnetic scanning; Liaoning Province

0 前言

抚顺地区与鞍本地区一样,都是辽宁省重要的铁矿产出地^[1-6],它们同属辽东吉南成矿带^[7-8],铁矿均产于鞍山群,属沉积变质型^[9-10],受变质岩系层状控制明显。鞍山-本溪地区为鞍山群的茨沟岩组、樱桃园岩组^[11],抚顺-清源地区为鞍山群的石棚岩组、通什村组^[12-13]。

作为我国的重要铁矿产地,这一地区一直以来就是矿床地质专家、勘查专家关注的热点区。成矿理论、成矿模型、勘查技术、勘查模型众多,且各具特点。但是,在勘查技术、勘查模型探索上,至今还没有公认的模板可寻。2020年辽宁省科技厅支持的“深部盲矿体勘查技术研究”项目取得了比较好的工作成果^[14]。该项目选择辽宁抚顺地区毛公堡铁矿为样板,采用重力、磁力、宽音频大地电磁测深、非等比激电测深等综合物探方法,通过野外技术、数据处理等问题研究,最终结果显示,这套方法组合在铁矿勘查工作中,特别是在深部铁矿体埋深、倾向、倾角、形态等空间赋存状态参数确定上都有很好的效果。

1 区域地质特征

研究区大地构造位置为中朝准地台(I)胶辽台隆(II)铁岭-靖宇台拱(III)龙岗断凸西侧,抚顺凸起南部浑南太古宙片麻岩卵形构造区。区域内沉积地层不发育,局部地段偶见混合岩中有太古宇鞍山群地层呈残留体形式出现。区域大面积出露太古宙混合岩,出露

地层主要为中太古界鞍山群石棚子组、通什村组变质岩系。岩性主要为角闪混合岩、黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩、斜长角闪岩等残留体。其中通什村组红透山段岩组为混合质含石榴黑云变粒岩,夹黑云角闪变粒岩、磁铁石英岩^[15-17]。区内变质岩系均遭到不同程度的混合岩化作用。

研究区岩体均属燕山期岩基型侵入体^[18-21]。岩体规模巨大,岩脉种类繁多。在苏子河断陷盆地西侧形成了南口前-十花顶子-西大顶子北西向岩浆岩带;在苏子河和沙河两断陷带夹持地块发育有纪家堡子-小桥子-三块石北西向构造岩浆岩带。岩浆岩带受北西向构造控制明显。

区内构造主要表现为断裂和褶皱构造。断裂构造可分为两组:北东向断裂,以浑河深大断裂为代表;北西向断裂,主要发育北东向断裂之次级构造苏子河断裂和沙河断裂。褶皱构造以北西向构造为主要形迹,在通什村组地层中形成较紧闭的同斜褶曲(复背斜和复向斜)构造^[22-32]。

2 铁矿地质特征

区域成矿属于古亚洲成矿域华北陆块北缘成矿省。矿床形成地质环境主要是海相沉积,成矿物质主要来源于海底基性火山喷发和陆源物质。中太古代末,古陆壳拉张形成海盆,海底基性-超基性火山喷发,在古老克拉通结晶基底上,首先沉积了陆源黏土质和砂质物质,随后相继出现了硅-铁物质韵律胶体沉

积、凝灰质火山沉积,最后以中酸性英安岩、基性玄武岩灰及黏土质沉积物而结束,是一套浅海盆地相复理石建造。空间上受太古宇层状高级变质基底杂岩系控制,后经多次不同规模和程度的区域变质变形改造,成矿物质进一步富集成矿。

矿体多呈层状、似层状、透镜状及马鞍状等。延深及延长一般不稳定,几十米至几百米不等,厚度变化大。矿石构造大多为条带状或条纹状,表现为以石英为主的条带(纹)和以磁铁矿为主的条带(纹)相间产出。金属矿物主要为磁铁矿,次为假象赤铁矿,还含少量黄铁矿和磁黄铁矿。铁矿石的自然类型以石英型磁铁矿石为主,石英角闪石型磁铁矿为辅。

3 岩矿石地球物理特征

3.1 区域岩矿石物性特征

通过收集总结研究前人相关资料,抚顺地区铁矿床的岩石、矿石具有如下特性特征。

1)磁性变化:太古宙片麻岩的磁化率算术平均值为 457×10^{-6} SI,变化范围在 $37 \times 10^{-6} \sim 1\,257 \times 10^{-6}$ SI;剩磁平均值为 18×10^{-3} A/m,变化范围在 $0 \sim 380 \times 10^{-3}$ A/m。磁铁石英岩的磁化率算术平均值为 $195\,225 \times 10^{-6}$ SI,变化范围 $98\,000 \times 10^{-6} \sim 199\,900 \times 10^{-6}$ SI;剩磁平均值为 $7\,098 \times 10^{-3}$ A/m,变化范围 $3\,367 \times 10^{-3} \sim 10\,509 \times 10^{-3}$ A/m。两者差异巨大,能够形成明显的磁异常。

2)密度变化:太古宙片麻岩的密度算术平均值为 2.69×10^3 kg/m³,变化范围 $2.58 \times 10^3 \sim 2.98 \times 10^3$ kg/m³。磁铁石英岩的密度算术平均值为 3.40×10^3 kg/m³,变化范围 $3.17 \times 10^3 \sim 3.57 \times 10^3$ kg/m³。两者具有 0.6×10^3 kg/m³ 的密度差,磁铁矿能够形成明显的重力高异常。

3)电阻率:太古宙片麻岩的电阻率算术平均值为 $4\,907$ Ω m,变化范围 $577 \sim 12\,181$ Ω m。磁铁石英岩的磁化率算术平均值为 $1\,224$ Ω m,变化范围 $335 \sim 4\,248$ Ω m。矿体相对岩层呈相对低阻。

4)极化率:太古宙片麻岩的极化率算术平均值为 2.48% ,变化范围 $1.34\% \sim 3.32\%$ 。磁铁石英岩的极化率算术平均值为 19.1% ,变化范围 $6.5\% \sim 33.4\%$ 。两者相差1个数量级,能够形成明显的激电异常。

3.2 毛公堡矿区的物性特征

根据前人统计,抚顺毛公堡矿区磁铁矿的磁化率最高,平均值为 $28\,581 \times 10^{-6}$ SI;含磁铁矿的条纹状斜长

角闪岩(弱磁)磁化率变化范围在 $85 \times 10^{-6} \sim 1\,092 \times 10^{-6}$ SI,算术平均值为 302×10^{-6} SI;构造破碎带的磁化率变化范围 $2 \times 10^{-6} \sim 184 \times 10^{-6}$ SI,算术平均值为 73×10^{-6} SI。其他岩石的磁化率算术平均值一般在为 $5 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6}$ SI,表现为无磁或低磁性。

4 研究思路

4.1 问题提出

当前铁矿勘查主要为地面磁测,以勘查强磁性铁矿为主要工作目的。对斜磁化化极不彻底、化极异常扭曲、化极假异常、埋藏较深或含量不高的磁铁矿形成的弱异常等目前面临的勘查技术问题重视不够,容易漏矿或对勘查区的评价形成错误的结论。突出的问题是对于埋深较大的隐伏铁矿或相对品位不富的磁铁矿的找矿方法研究较少。随着国民经济的快速发展以及浅表矿产的勘查开发程度全面提高,特别是新一轮找矿突破战略行动的全面开展,对于深部资源的勘查需求越来越多,对于隐伏铁矿或低品位的铁矿勘查方法研究显得十分重要和必要。

4.2 解决方案

本研究基于“深部盲矿体勘查技术研究”项目,选择辽宁抚顺地区毛公堡铁矿为研究平台,进行勘查技术探索。通过对异常进行重新评价,查出最佳的异常区和异常点,研究最佳布钻位置和施钻深度,并进行相关钻探验证,从而验证勘查技术组合的可行性,指导地区铁矿勘查,提高钻探成功概率。

研究区由矿山提出,总体思路是:1)有的放矢。有针对性地开展工作,不做无效工作,投入的方法要有地球物理前提,有理论基础,有成功案例,具有先进性,有创新空间。2)节约成本。投入的技术方法要尽可能少,数据处理要有创新,参量要尽可能多,只有这样才能利用大量的参数开展研究和论证。在异常中心要做超高密度测量,异常外部用大点距做粗略描绘,以节省成本。3)由已知到未知。科研工作,尤其是深部地质勘查工作“因地制宜”十分重要且必要。因此,在已知区开展测量,既可以验证方法的有效性,又可以总结工作区的垂向电性特征,将试验孔电性层作为其他工作的标志层。4)最小原则。在重要异常区“保二争三”(即整体异常保证2条以上测线,有条件的要设3条测线;异常线上保证2个测点,有条件的要布3个以上测点),其

他异常仅布单条测线。

采用先面后点、由浅及深的工作方法。研究区扫面用高精重磁，异常区定点用宽音频大地电磁和非等比激电测深。

5 已知井盲测验证

为了选择有效的勘查方法，在扫面工作实施之后进行了已知井的盲测。

剖面由矿山设计，在不足 300 m 的剖面上有 8 个已知钻孔。利用这 8 个孔的资料，矿山已经完成了一个比较细致的地质断面。本次采用背靠背式完成了点距为 20 m 的宽音频电磁测深。图 1 为大地电磁测深的反演断面与实际的地质断面对比。从中可以看到大地电磁测深对目标体的刻画能力。在电阻率断面图上近地表 20~30 m 是一层厚度不匀低阻层，而且该低阻层的薄厚与地势有关——地势低其厚度大，地势高其厚度相对变小；与深部高阻体有关——高阻体顶部其厚度小，高阻体两侧其厚度相对变大。如果将深部高阻体解释为岩体的话，其正符合浅地表的风化地层的特征。

在它下面的所谓基岩层电阻率低阻异常呈“S”型，它相对其上、下夹持的高电阻体呈低阻状态。最重要的是地质断面图显示该断面矿体也呈“S”型产出，而且深度也十分吻合（埋深 750 m 矿体与电磁测深不足 50 m 误差可理解为解释误差）。这说明宽音频电磁测深在研究区探测磁铁矿是有效的。不仅能表现出有效的异常，而且利用宽音频电磁测深还能大致了解到矿体的深度、形态、产状、厚度、变形，及其连接关系、赋存关系。

6 研究成果

6.1 重磁参量

高精重磁最终使用参数：最小点距 $D_{min}=5\text{ m}$ ；一般点距 $D=20\text{ m}$ 。重力总误差 $\varepsilon_g=\pm 0.02\times 10^{-5}\text{ m/s}^2$ ；磁测总误差 $\varepsilon_m=\pm 2.69\text{ nT}$ （极差 $R_{\Delta t}=|11\ 436.46|\text{ nT}$ ）。

重磁异常数据处理：数据处理主要包括数据的网格化、化磁极处理（磁）、剩余异常、重磁上延拓处理、4 个方向（0°、45°、90°、135°）的水平一阶导数、垂向一阶导数、垂向二阶导数、多次两频率高通、五频率分频、北东和北西方向类因子提取、4 个方向（0°、45°、90°、135°）

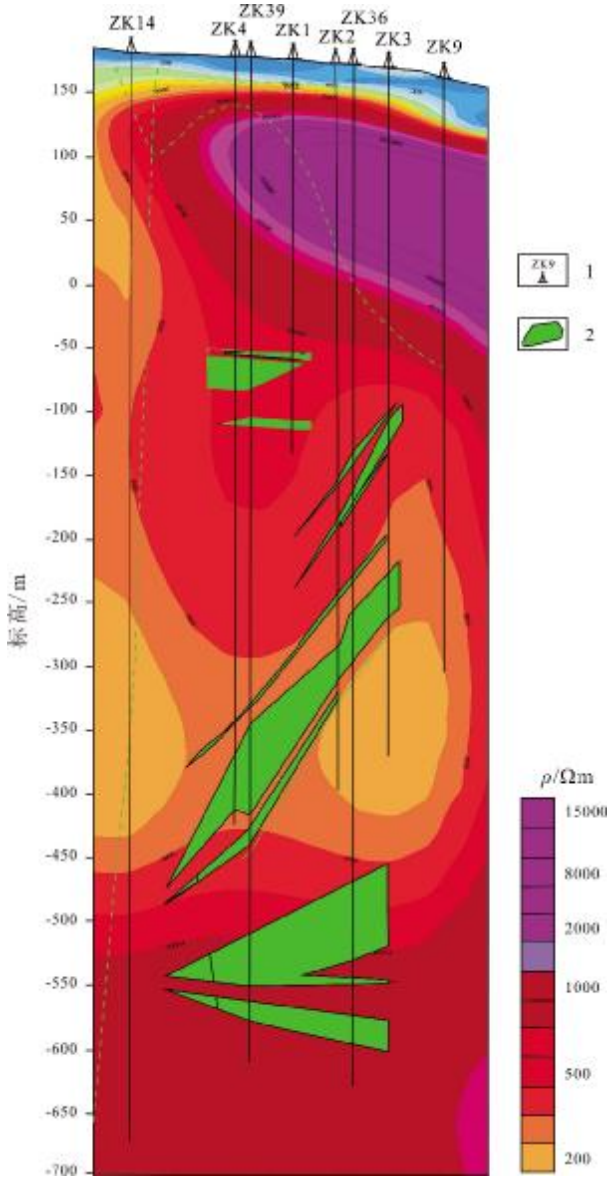


图 1 大地电磁测深反演断面与地质断面对比

Fig. 1 Comparison of magnetotelluric sounding inversion and geological sections

1—钻孔及编号(drill hole and number); 2—矿体(orebody)

形态因子提取、数据切割技术、4 个方向（0°、45°、90°、135°）两算法的深度异常成像、伪重力异常计算（磁数据）、水平导数模量、北西方向微构造提取、倾斜滤波、低通异常滤波、小子域滤波、小波滤波、北西方向微构造与北西方向一导相关分析、线性异常提取、补偿圆滑区域场计算、深部磁化率求取、深部磁核求取、多方法滤波尝试、多方法二维和三维反演等处理。最终形成过渡图件 97 套，并提出推断成果。

实施方案:在过渡图件的支持下,提出大地电磁和激电测深工作方案(图2)。宽音频大地电磁最宽频率0.1 Hz(一般音频频率1~10 kHz);非等比激电测深 $(AB/2)_{\max}=2\ 000\text{ m}$ 时其极距最大间隔为 $D=200\text{ m}$ 。

6.2 异常分析

在工作布置图上研究区共分3个重点区。第1重点区异常表现最好,磁极值 $\Delta T_{\max}=3\ 147\text{ nT}$,梯度 $\partial T/\partial x=24\text{ nT/m}$ 。异常面积大、幅值高、规模强、背景优、衬度好,而且各种重磁参数套合好,形态展布也比较理想,但是因为地形(坡度大于 18°)、征地和可能的矿藏储量等问题,矿山建议放弃第1重点区的验证。第2个重点区次之,磁极值 $\Delta T_{\max}=2\ 570\text{ nT}$,梯度 $\partial T/\partial x=19\text{ nT/m}$ 。相对不理想的是第3重点区,磁极值 $\Delta T_{\max}=3\ 093\text{ nT}$,梯度 $\partial T/\partial x=20\text{ nT/m}$ 。它面积不小,异常中心亦明显。但从历史资料看,第3重点区矿山已经实施过三个钻孔,尽管从扫面成果图上其钻孔的位置不是最佳的,但是基本上把第3重点区已经查明了。在3个区开展了同样的深部探测后,最终实施验证孔选择在以往没施钻的盲区——第2重点区。

图3是第2重点区第1剖面非等比激电测深的测量结果。激电测深除采用非等比极距外,使用了直读和计算的包括供电电流、供电电压、第1块视极化率、第2块视极化率、第3块视极化率、第4块视极化率、视电阻率、半衰时、衰减度、弱衰减、强衰减、偏离度、综合参数、衍生指数、相对极化率、极阻比、放电速率1、放电速率2、放电速率3、放电速率比共20个电性参数。

视电阻率自浅及深基本是低—高一低—高一高形态相间隔,可以将其归纳为“KHK”型;视极化率则相反,为高一低—高一低的“HK”型。极化率与电阻率基本上呈负相关。浅部高阻区对应的是低极化区,剖面深部左翼低阻异常区则对应极化率高异常。剖面右侧高阻带尽管浅、深部极化率异常有所不同,但总体依然归结为低极化区。

衰减度、半衰时、强衰减、弱衰减是与水含量相关的参数;放电速率、放电速率比、偏离度、相对极化率、极阻比等电参数基本上都是表征蚀变离子(带电荷离子、络合物离子团)和金属离子相对富集特征和极化性

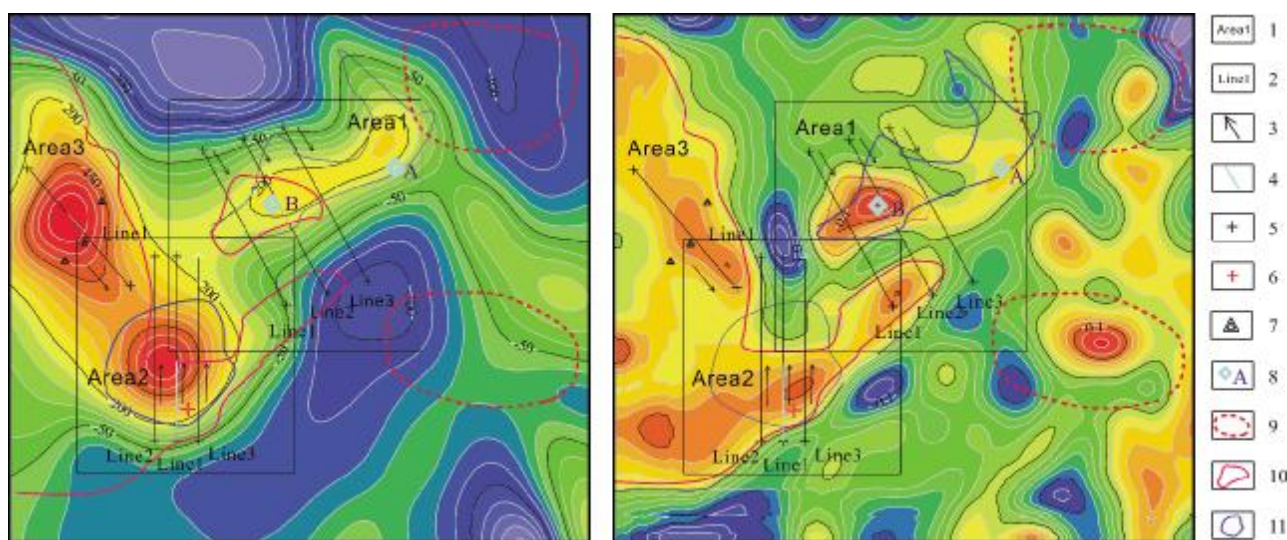


图2 部分过渡图件及测深工作布置图

Fig. 2 Transition maps with depth sounding layout

a—高精磁测相对总场小子域等值线平面图(contour map of small subdomain by high-precision magnetic survey); b—高精重力布格异常相对异常插值等值线平面图(contour map of interpolation by high-precision Bouguer gravity survey); 1—重点工作区号(number of key work area); 2—宽音频电磁测深测线号(number of wide audio frequency electromagnetic sounding line); 3—宽音频电磁测深测线方向(direction of wide audio frequency electromagnetic sounding line); 4—非等比激电测深测线(non-equal-ratio IP sounding line); 5—剖面端点(section end point); 6—设计钻孔(designed borehole); 7—前人实施钻孔(previous borehole); 8—最初设计钻孔(originally designed borehole); 9—圈定的环状构造(delineated ring structure); 10—重力异常示意位置(gravity anomaly location); 11—磁力异常示意位置(magnetic anomaly location)

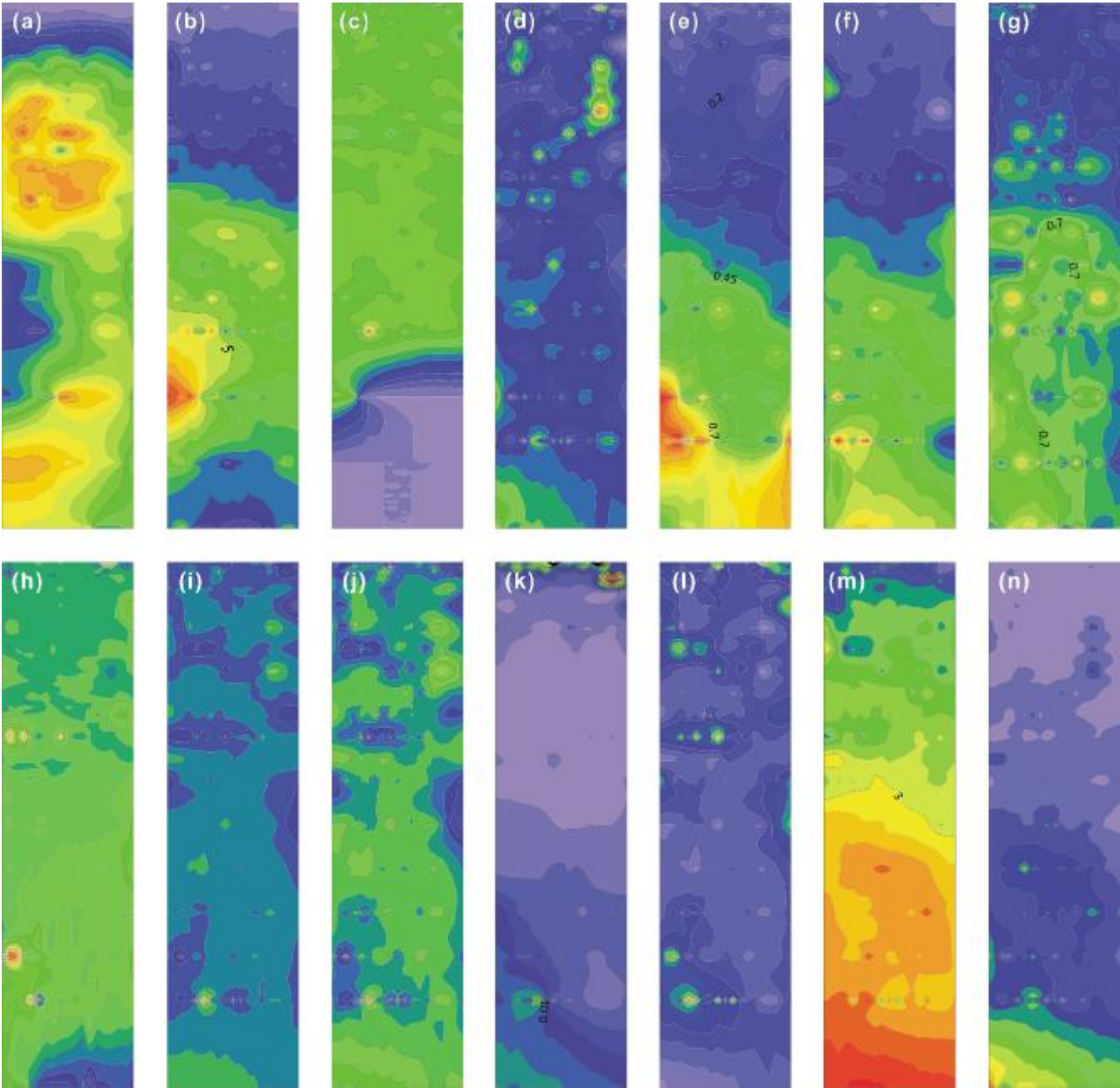


图 3 部分非等比激电测深过渡图件

Fig. 3 Transition maps of non-equal-ratio IP

a—视电阻率(apparent resistivity); b—视极化率(apparent polarizability); c—衰减度(decay degree); d—半衰时(half life); e—放电速率 1 (discharge rate 1); f—放电速率 2 (discharge rate 2); g—放电速率 3 (discharge rate 3); h—放电速率比(discharge rate ratio); i—弱衰减(weak attenuation); j—强衰减(strong attenuation); k—相对极化率(relative polarizability); l—偏离度(deviation degree); m—衍生指数(derivative index); n—综合参数(integrated parameter)

特征. 这些参数的断面图显示,除电阻率外,近地表均无明显异常. 其他电参数异常也基本上都出现在极化率异常相同层位, 或者相邻层位, 即发育在视深度 750 m 左右.

大地电磁测的电性剖面(图 4)上表现出研究区的

4 层结构. 第 1 层低阻层:厚度 20 m 左右,不均匀,地势高厚度小,地势低厚度大,一般阻值低于 2 000 Ωm ; 第 2 层高阻层:厚度 100~180 m,阻值 $\geq 5\,000\, \Omega\text{m}$,但该高阻层中间被截断;第 3 层低阻层:为本次勘查深度内的最厚电性层,厚度 400~550 m,电阻率为 1 000~

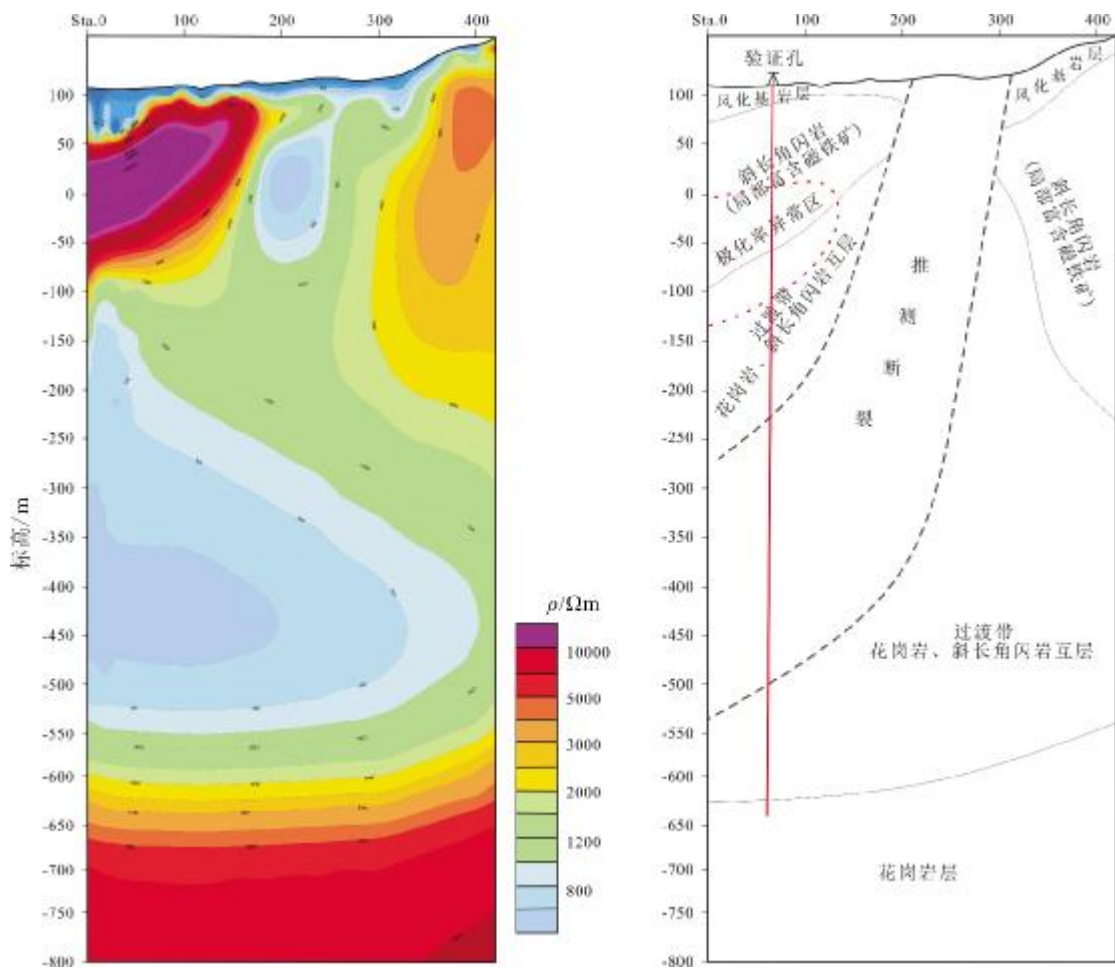


图 4 第 2 重点区 1 剖面大地电磁测深反演断面图及钻孔设计图

Fig. 4 MT sounding inversion profile and borehole design of Line 1 in Area 2

a—视电阻率二维反演断面图(2D inversion section of apparent resistivity); b—大地电磁测深推断成果及建议井位(MT sounding inferred result and proposed well location)

2 000 Ωm , 总体呈层状, 近似水平, 厚度由西向东逐渐变薄, 阻值由西向东逐渐增大; 第 4 层高阻层: 也是本次探测解释的最下层, 为水平层, 电阻率 $\geq 5\,000\,\Omega\text{m}$, 由于第 3 层的楔型关系, 该电性层由最西侧的剖面 Line 2 到最东侧的剖面 Line 3 越来越浅。

6.3 地质解释

因为激电测深为视深度, 地质解释以宽音频大地电磁测深为主, 以激电测深视深度(1/3~1/5)异常为参考。

第 1 层低阻层, 电阻率呈层状或似层状, 深度越浅阻值越低, 其阻值变化特征符合混合岩风化电性特征。

第 2 层高阻层中间明显发育一条陡立的低阻异常, 推断其为构造破碎带, 因为其破碎而富含地下水离子, 且使其活跃, 从而形成了相对高导体。该断层左

盘抬升, 右盘下降, 断距很小, 很可能为逆断层属性。高阻层埋深 30 m 左右, 厚度约 150 m。靠近断层部位, 构造作用使该层扭曲, 形成了伪厚度变大。激电测深显示该层化学性质的稳定性, 使其在其他电参数, 如视极化率、半衰时、衰减度、弱衰减、强衰减、偏离度、综合参数、衍生指数、相对极化率、极阻比、放电速率等方面没有明显的异常。结合重磁梯度特征, 电阻率在 10 000~15 000 Ωm , 认为第 2 层高阻层相对富含石英等高阻矿物, 而且极可能相对富含磁铁矿。

第 3 层为过渡带, 即花岗岩、斜长角闪岩、混合岩带, 而且因为与断裂相交而岩石破碎。由于断裂的存在, 该层向上突起, 近似楔形。视极化率、相对极化率等电性参数没有明显异常, 但是对于第 2、第 3 分层刻画得很好。同时, 各电参数异常对剖面中间发育的构

造也都有很好的显示。

第4层是老基底花岗岩层,该层近似水平、稳定,受本剖面描述的断裂构造影响不大,因其与工作目的关系不大,不对其作重点解释。

验证孔位的选择:目标层(第2层)向南变深变厚,但磁重异常规模不大,重磁中心与电性高阻异常最浅部吻合,说明重磁电同源。考虑到激电测深视深度700 m(实深度200 m左右)为规模不大的极化率异常,尽管该异常仅表现为极化率且低于6%,其他金属离子敏感的电参数(如衰减度、弱衰减、强衰减、衍生指数、相对极化率等)也表现平平,但从技术方法研究而言,还是应予以关注。推荐的验证孔是Sta.60(图4)。

6.4 验证结果

最终验证孔定位于Line 1和Line 3之间,位置对应Sta.120附近(图5)。

因为验证孔较Line 1向东偏移,第2层高阻层自西向东有下潜的趋势,所以钻孔位置的第2层高阻层下底理论上较Line 1的Sta.120略深。

最终施钻结果与预期的结果完全相符。0~14.1 m

深度为破碎层;14.1~129.45 m为条纹状弱磁性斜长角闪岩,其中41~43.4 m肉红色花岗岩脉,49.5~53.2 m肉红色花岗岩脉,54~66.4 m辉长岩,66.4~71.9 m磁铁石英岩,82.9~83.7 m辉长岩脉;129.45~346.8 m为辉长岩、灰白色细粒斜长角闪岩互层,其中辉长岩中多见绿帘石化、蛇纹石化,局部碳酸盐细脉较多;346.8~798.5 m为辉长岩与肉红色花岗岩互层,其中375~576.6 m岩石破碎严重,辉长岩与花岗岩接触部位多形成断层泥;798.5~880.3 m为深灰色花岗闪长岩。

为便于对比,将验证孔磁化率、电阻率、极化率曲线制成垂向图(图6)。从图6可见,近地表130 m以浅磁电界线明显;中段为深度129.45~346.8 m的低阻段,与第3剖面极具可比性;798.5 m的花岗岩底与大地电磁测深结果十分吻合。钻孔验证表明:宽音频大地电磁测深对于区分磁铁矿的矿体与围岩是有效的。

7 结论

利用重磁扫面方法勘查磁铁矿是直接、快速、有效的。重磁资料通过多软件、多参数、多方法处理,可合

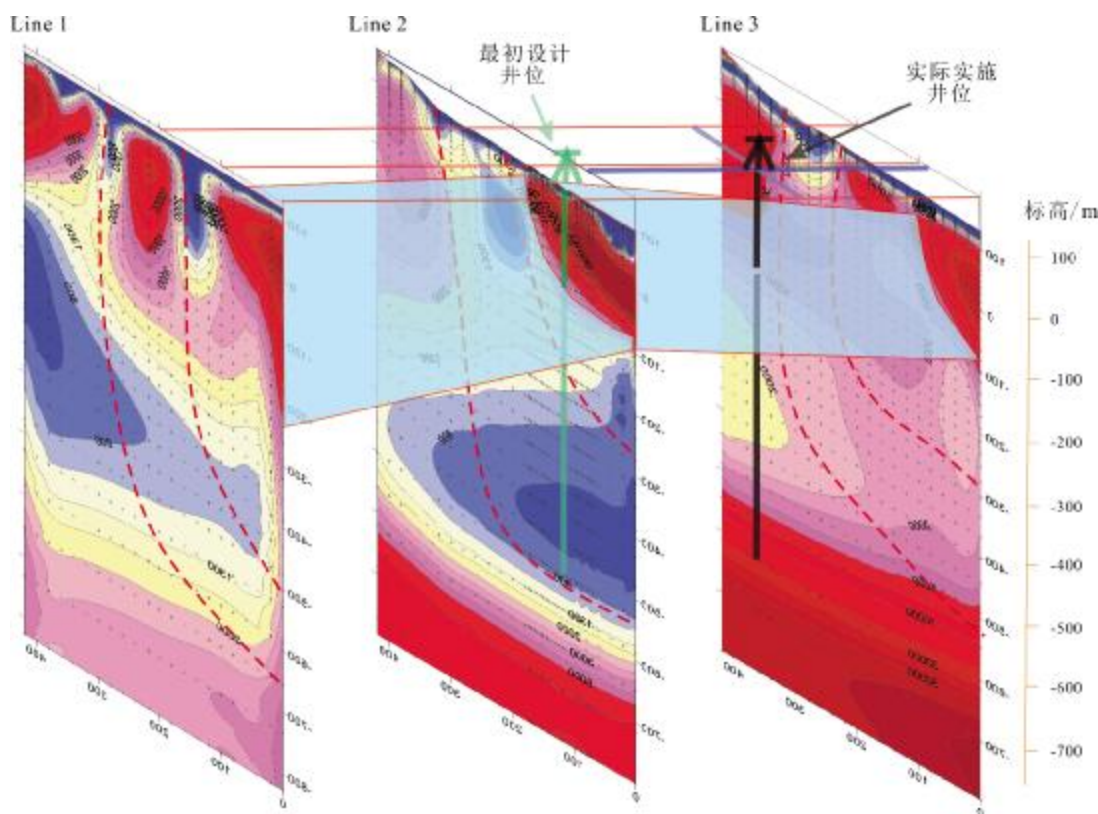


图5 验证孔位置及与大地电磁测深断面关系

Fig. 5 Relationship between verification hole location and MT sounding section

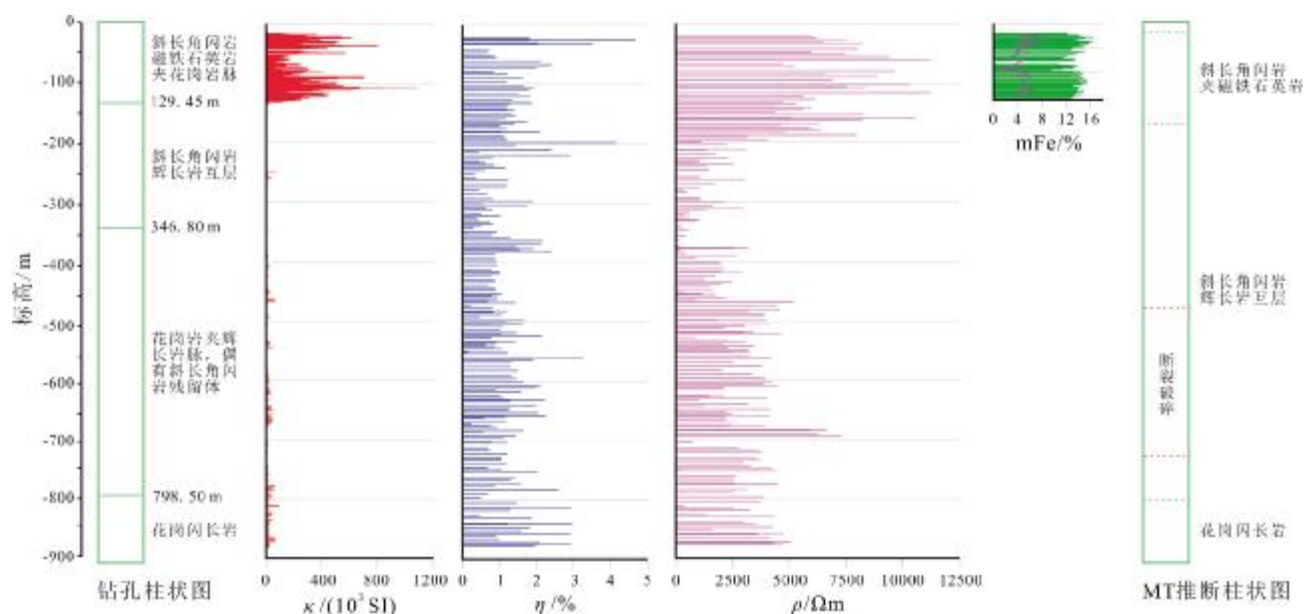


图6 验证孔磁化率、极化率、电阻率与矿体垂向断面对比图

Fig. 6 Comparison of vertical section between magnetic susceptibility, polarizability and resistivity of verification hole and orebody

理有效选定重点区。重点区施以非等比激电测深和宽音频大地电磁测深等观测技术,技术上采用非等点距从而更细致、准确地刻画出深部电性特征的工作程序是合理的和有用的。

通过研究得出如下结论:1)磁铁矿体(矿化体)重磁异常是客观存在的;2)重力异常与磁异常(包括化极磁异常)的地表投影中心不是严格对应的,重力异常能更好地表现异常地质体地表投影位置,磁异常对异常地质体更敏感;3)电磁测深是垂向分界划分的有效方法;4)激电测深的电阻率、极化率及其他参量可以更好地划分和探测蚀变、构造、岩体界线;5)非等比激电测深与大地电磁相互补充、相互印证;6)激电测深的20个电参数可以弥补大地电磁测深无法观测的偏水离子或偏金属离子的各个电参数的异常形态,可以帮助水体、多金属矿化、蚀变体、构造和破碎带的识别;7)由区选面、由面到点、由点及深的工作程序,对高精度重力测量技术的充分重视,以及对传统测量参量技术的改变和专家模式的应用取得了良好的研究成果。

存在的问题:1)激电测深的探测深度有限,就本研究区而言,反演后深度不足视深度的1/3;2)验证孔钻探结果显示目的层磁铁矿品位不高,这也符合了本项目的另一项研究成果^[14],即铁矿呈“三高一低”的物性特征,电阻率应不高于2 000 Ωm,极化率应不低于6%,

磁化率不低于100 000×10⁻⁶ SI,密度高于3.00×10³ kg/m³;

3)本项目研究的目标体的电性参量与围岩的差异不大,重要的是目标体的规模也不够大,当异常源与围岩的物性差异及其规模都不大的条件下做地球物理勘查(研究)是十分不利的。

参考文献(References):

- [1]沈其韩.鞍山式铁矿深部找矿整装勘查中应注意的若干问题[J].地质学报,2012,86(9):1331-1334.
Shen Q H. On the deep prospecting and integrated exploration of Anshan type iron deposits[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(9): 1331-1334. (in Chinese)
- [2]沈保丰,翟安民,苗培森,等.华北陆块铁矿床地质特征和资源潜力展望[J].地质调查与研究,2006,29(4):244-252.
Shen B F, Zhai A M, Miao P S, et al. Geological character and potential resources of iron deposits in the North China Block [J]. Geological Survey and Research, 2006, 29(4): 244-252.
- [3]张朋,乔树岩,姜海洋,等.辽宁鞍山地区铁矿成矿规律与资源潜力分析[J].地质与资源,2012,21(1):134-138.
Zhang P, Qiao S Y, Jiang H Y, et al. Metallogenic regularities and resources potential of the iron deposits in Anshan-Benxi area, Liaoning Province[J]. Geology and Resources, 2012, 21(1): 134-138.
- [4]刘军,靳淑韵.中国铁矿资源的现状与对策[J].中国矿业,2009,18(12):1-2,19.
Liu J, Jin S Y. The actuality and countermeasure of the iron ore resource in China[J]. China Mining Magazine, 2009, 18(12): 1-2,19.

- [5]王岩, 王林林. 辽宁鞍山地区铁矿成矿规律与资源潜力分析[J]. 装饰天地, 2015, 18(S2): 144.
Wang Y, Wang L L. Analysis on metallogenic regularity and resource potential of iron deposit in An-Ben area, Liaoning Province [J]. Decoration World, 2015, 18(S2): 144. (in Chinese)
- [6]谢忠. 辽宁省清原县大莱河铁矿床地质特征[J]. 地质与资源, 2016, 25(3): 265-268.
Xie Z. Geological characteristics of the Dalaihe iron deposit in Qingyuan County, Liaoning Province[J]. Geology and Resources, 2016, 25(3): 265-268.
- [7]李士江, 全贵喜. 鞍山-本溪地区含铁变质地层的划分与对比[J]. 地质找矿论丛, 2010, 25(2): 107-111.
Li S J, Quan G X. Stratigraphic division and correlation of iron ore-bearing metamorphic rocks in Anshan-Benxi area[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2010, 25(2): 107-111.
- [8]于凯君. 辽宁鞍山地区铁矿床地质特征及成矿预测[J]. 勘察测绘, 2017, 12: 262.
Yu K J. Geological characteristics and metallogenic prediction of iron deposits in An-Ben area, Liaoning Province [J]. Investigation and Mapping, 2017, 12: 262. (in Chinese)
- [9]刘陆山, 付海涛, 刘忠元, 等. 鞍山-本溪地区富铁矿分布规律及成因探讨[J]. 地质与资源, 2015, 24(4): 341-346.
Liu L S, Fu H T, Liu Z Y, et al. Distribution and genesis of high-grade iron ore in Anshan-Benxi region [J]. Geology and Resources, 2015, 24(4): 341-346.
- [10]王恩德, 夏建明, 赵纯福, 等. 弓长岭铁矿床磁铁矿形成机制探讨[J]. 地质学报, 2012, 86(11): 1761-1772.
Wang E D, Xia J M, Zhao C F, et al. Forming mechanism of high-grade magnetite bodies in Gongchangling, Liaoning Province[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(11): 1761-1772.
- [11]王守伦. 鞍山地区鞍山群富铁矿成因类型的讨论[J]. 矿床地质, 1986, 5(4): 14-22.
Wang S L. The genetic types of rich iron deposits of Anshan Group in Anshan-Benxi area[J]. Mineral Deposits, 1986, 5(4): 14-22.
- [12]卢崇海, 张耀华, 奚锐, 等. 辽宁鞍山-抚顺地区新太古代含铁建造层位对比及形成时代讨论[J]. 化工矿产地质, 2013, 35(4): 193-200.
Lu C H, Zhang Y H, Xi R, et al. Discussion on Archaean iron formation strata comparison and its forming era in Anshan-Benxi-Fushun area of Liaoning[J]. Geology of Chemical Minerals, 2013, 35(4): 193-200.
- [13]李延河, 张增杰, 侯可军, 等. 辽宁鞍山地区沉积变质型富铁矿的成因: Fe-Si-O-S 同位素证据[J]. 地质学报, 2014, 88(12): 2351-2372.
Li Y H, Zhang Z J, Hou K J, et al. The genesis of Gongchangling high-grade-iron ores, Anshan-Benxi area, Liaoning Province, NE China: Evidence from Fe-Si-O-S isotopes[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(12): 2351-2372.
- [14]赵雪娟, 孙中任, 段会升, 等. 辽宁抚顺地区铁矿地球物理模型——以毛公堡铁矿为例[J]. 地质与资源, 2023, 32(4): 497-504.
Zhao X J, Sun Z R, Duan H S, et al. Geophysical model of iron deposits in Fushun region of Liaoning Province: A case study of Maogongpu Iron Mine [J]. Geology and Resources, 2023, 32(4): 497-504.
- [15]洪秀伟, 庞宏伟, 刘学文, 等. 辽宁本溪大台沟铁矿地质特征[J]. 中国地质, 2010, 37(5): 1426-1433.
Hong X W, Pang H W, Liu X W, et al. Geological characteristics of the Dataigou iron deposit in Benxi, Liaoning Province [J]. Geology in China, 2010, 37(5): 1426-1433.
- [16]张璟, 邵军, 鲍庆中, 等. 辽宁本溪大台沟铁矿地质特征及找矿标志[J]. 地质与资源, 2014, 23(4): 343-351, 356.
Zhang J, Shao J, Bao Q Z, et al. Geological characteristics and prospecting indicators for Dataigou iron deposit in Benxi, Liaoning Province [J]. Geology and Resources, 2014, 23(4): 343-351, 356.
- [17]张朋, 彭明生, 欧阳兆灼, 等. 辽宁鞍山地区铁矿床地质特征及找矿标志分析[J]. 地质与资源, 2012, 21(6): 516-521.
Zhang P, Peng M S, Ouyang Z Z, et al. Geological characteristics and ore-searching guides of the iron deposits in Anshan-Benxi area, Liaoning Province [J]. Geology and Resources, 2012, 21(6): 516-521.
- [18]杨秀清, 李厚民, 李立兴, 等. 辽宁鞍山-本溪地区铁矿床流体包裹体和硫、氢、氧同位素特征研究[J]. 地质学报, 2014, 88(10): 1917-1931.
Yang X Q, Li H M, Li L X, et al. Characteristics of fluid inclusion, S, H and O isotope of iron deposit in Anshan-Benxi area, Liaoning Province [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(10): 1917-1931.
- [19]付海涛, 刘陆山, 冷文芳, 等. 鞍山-本溪南部隐伏花岗岩体地质特征[J]. 地质找矿论丛, 2013, 28(2): 176-180.
Fu H T, Liu L S, Leng W F, et al. Geological characteristics of concealed granitic body in the Anshan-Benxi region [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2013, 28(2): 176-180.
- [20]周世泰. 鞍山、本溪地区鞍山群变质岩岩石化学研究及条带状铁矿的成矿条件[J]. 中国地质科学院院报, 1987, 9(2): 139-153.
Zhou S T. The petrochemical study of the Archean banded iron deposit in Anshan-Benxi district, Liaoning Province [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1987, 9(2): 139-153.
- [21]刘明军, 李厚民, 李立兴, 等. 辽宁弓长岭铁矿床二矿区类矽卡岩的岩石矿物学特征[J]. 岩矿测试, 2012, 31(6): 1067-1076.
Liu M J, Li H M, Li L X, et al. Petrological and mineralogical characteristics of the Skarnoid in No. 2 mining area of the Gongchangling iron deposit, Liaoning, China [J]. Rock and Mineral Analysis, 2012, 31(6): 1067-1076.
- [22]陈永生, 葛志广, 付方华. 鞍山深部铁矿综合地球物理研究[J]. 工

- 程地球物理学报, 2017, 14(2): 180-184.
- Chen Y S, Ge Z G, Fu F H. Comprehensive geophysical study on deep iron ore in Anshan area [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2017, 14(2): 180-184.
- [23] 付海涛. 鞍山地区 EW 向深大断裂地质特征[J]. 地质找矿论丛, 2014, 29(4): 471-479.
- Fu H T. Geological characteristics of huge and deep EW fracture at Anshan-Benxi area [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2014, 29(4): 471-479.
- [24] 孙中任, 赵雪娟, 滕寿仁, 等. 相对视电阻率异常的应用[J]. 地球物理学进展, 2017, 30(6): 2760-2765.
- Sun Z R, Zhao X J, Teng S R, et al. Application of relative apparent resistivity anomaly [J]. Progress in Geophysics, 2017, 30(6): 2760-2765.
- [25] 刘明军, 李厚民, 薛春纪, 等. 辽宁弓长岭铁矿床二矿区矿石及类矽卡岩的地球化学特征及其找矿意义[J]. 地质学报, 2014, 88(10): 1889-1903.
- Liu M J, Li H M, Xue C J, et al. Geochemical characteristics and prospecting significance of ores and skarnoid of No. 2 diggings of the Gongchangling iron deposit in Liaoning [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(10): 1889-1903.
- [26] 刘军, 靳淑韵. 辽宁弓长岭铁矿磁铁矿富矿的成因研究[J]. 现代地质, 2010, 24(1): 80-88.
- Liu J, Jin S Y. Genesis study of magnetite-rich ore in Gongchangling iron deposit, Liaoning [J]. Geoscience, 2010, 24(1): 80-88.
- [27] 李鸿业, 赵秀德. 鞍山地区鞍山式铁矿区地质构造[J]. 前寒武纪研究进展, 1999, 22(3): 22-29.
- Li H Y, Zhao X D. Geological structure of BIF mining district in Anshan-Benxi area, Liaoning Province [J]. Progress in Precambrian Research, 1999, 22(3): 22-29.
- [28] 白银增, 赵涌涛, 王泽蛟, 等. 辽宁查马电铁矿三维地质建模及深部预测[J]. 地质与资源, 2019, 28(4): 321-325.
- Bai Y Z, Zhao Y T, Wang Z J, et al. 3D geological modeling and deep prospecting prediction in Chamatun iron deposit, Liaoning Province [J]. Geology and Resources, 2019, 28(4): 321-325.
- [29] 李莹, 何保, 滕寿仁, 等. 辽宁本溪大台沟铁矿床地球化学特征及成因探讨[J]. 矿物岩石, 2019, 39(1): 74-81.
- Li Y, He B, Teng S R, et al. Geochemical characteristics and genesis of the Dataigou iron deposit in Benxi, Liaoning Province [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2019, 39(1): 74-81.
- [30] 张林. 地质物探综合方法在辽宁张家堡地区隐伏铁矿普查中的应用[J]. 矿产勘查, 2017, 8(2): 288-292.
- Zhang L. Application of comprehensive method of geological exploration and geophysical method in prospecting the concealed iron ore body in Zhangjiapu area, Liaoning [J]. Mineral Exploration, 2017, 8(2): 288-292.
- [31] 郭兰昌, 许雷, 潘洪英. 多种数据处理方法用于辽宁本溪某铁矿的磁异常解释[J]. 科技与企业, 2015(11): 109, 111.
- Guo L C, Xu L, Pan H Y. A variety of data processing methods for magnetic anomaly interpretation of an iron ore mine in Benxi, Liaoning Province [J]. Science and Technology Enterprises, 2015(11): 109, 111. (in Chinese)
- [32] 王建复. 小波多尺度分解用于辽宁铁岭下峪铁矿磁异常的解釋[J]. 物探与化探, 2013, 37(4): 615-619.
- Wang J F. The application of wavelet multi-scale solution to the magnetic anomaly interpretation of the Xiayu iron ore deposit in Tieling, Liaoning Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(4): 615-619.

(上接第 536 页/Continued from Page 536)

- [60] 魏博. 吉林红旗岭-茶尖岭-漂河川地区铜镍硫化物矿床铂族元素和铼-钨同位素地球化学特征[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2013: 1-157.
- Wei B. Platinum-group element and Re-Os isotopic compositions of the magmatic Ni-Cu sulfide deposits in the Hongqiling-Chajianling-Piaohechuan region, eastern part of the Central Asian Orogenic Belt [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2013: 1-157.
- [61] 姜常义, 凌锦兰, 赵彦锋, 等. 镁铁质-超镁铁质岩体含矿性评价指标体系——应用于寻找岩浆硫化物矿床[J]. 西北地质, 2012, 45(4): 51-60.
- Jiang C Y, Ling J L, Zhao Y F, et al. Ore-bearing potential evaluation index system of mafic and ultramafic intrusions: Used to search for magmatic sulfide deposits [J]. Northwestern Geology, 2012, 45(4): 51-60.
- [62] 曾华霖. 重力场与重力勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 1-273.
- Zeng H L. Gravity field and gravity exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005: 1-273.
- [63] 孙立吉. 红旗岭铜镍硫化物矿床地质地球化学特征及找矿技术方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013: 1-171.
- Sun L J. Geological and geochemical characteristics of Hongqiling Cu-Ni sulfide deposit and prospecting techniques for the same type deposit [D]. Changchun: Jilin University, 2013: 1-171.
- [64] 尹贵志, 翟国红, 贾万金, 等. 吉林省红旗岭矿区 1 号岩体地质特征及深部铜镍资源潜力分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2019, 71(2): 44-51.
- Yin G Z, Zhai G H, Jia W J, et al. Geological characteristics of No.1 rock mass and potential of deep copper and nickel resources in Hongqiling mining area of Jilin Province [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2019, 71(2): 44-51.