

采用音频大地电磁法间接探测深埋富集铁矿床

席振株^{1,2}, 朱伟国^{1,2}, 张道军³, 张良六⁴, 冯万杰^{1,2}, 邓志刚³

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;

2. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;

3. 长沙五维地科勘察技术有限责任公司, 长沙 410205; 4. 重庆市地质勘查局 川东南地质大队, 重庆 400038)

摘要: 由于深埋富集铁矿矿体的埋深超过 500 m, 直接运用音频大地电磁法(AMT 法)圈定深埋富集铁矿矿体异常的纵向分辨率难以实现, 为此, 根据矿床成因、成矿环境以及矿体赋存空间特征等地质因素, 建立地质模型, 在地质模型的基础上构建地电模型; 在地电模型的基础上, 应用 AMT 法达到间接找矿的目的。綦江式铁矿和宁乡式铁矿的勘查实践结果表明, 应用 AMT 法能够确定找矿标志、含矿层次和赋矿构造等, 从而间接实现探测深埋富集铁矿床。

关键词: 綦江式铁矿; 宁乡式铁矿; AMT 法; 地电模型

中图分类号: P631.3

文献标志码: A

Indirectly exploit buried deposits of rich iron by audio-frequency magnetotelluric method

XI Zhen-zhu^{1,2}, ZHU Wei-guo^{1,2}, ZHANG Dao-jun³, ZHANG Liang-liu⁴, FENG Wan-jie^{1,2}, DENG Zhi-gang³

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education,

Central South University, Changsha 410083, China;

3. Changsha 5D Geo-survey and Technical Co., Ltd., Changsha 410205, China;

4. Geological Team of Southeastern Sichuan, Chongqing Bureau of Geological Exploration and Exploitation of

Mineral Resources, Chongqing 400038, China)

Abstract: When the enrichment iron ore is buried more than 500 m, it is difficult to achieve the longitudinal resolution of iron ore abnormalities by using audio-frequency magnetotelluric (AMT) method directly. For this reason, based on the geological factors of the ore genesis, metallogenic environment, ore controlling space, and so on, the geological model was made and then the electrical model was set up, which was used to achieve the aim of indirect ore prospecting by AMT method. The prospecting tests results in Qijiang-type iron deposit and Ningxiang-type iron deposit prove that the AMT method can determine prospecting mark, ore-bearing strata, ore-bearing structure and so on. So, indirectly detect deep-buried rich iron ore.

Key words: Qijiang-type iron deposit; Ningxiang-type iron deposit; AMT method; geoelectric model

随着国民经济的快速发展, 我国对铁资源的需求日趋增加, 但由于国内 0~500 m 铁矿资源不足, 需加大对深部铁矿的勘查力度, 以缓解我国对铁矿资源需求的压力。

相对于几何电阻率测深法, 音频大地电磁法(Audio-frequency magnetotelluric method, AMT 法)^[1-2]

具有装置轻便、工作效率高、不受高阻层屏蔽和对低阻层有较高分辨率等优点, 是探测深部铁矿资源的有效方法^[3-4]。

在矿产勘查中, AMT 法主要用来划分地层, 探测褶皱断裂构造以及直接探测金属矿床异常^[5-7], 即使面对埋深较大的目标, 只要具备了相应的地球物理条

件, 音频大地电磁测深法也能够取得较好的效果。但是由于方法本身限制, 随着趋肤深度的增加, 音频大地电磁测深法的分辨率能力也将相应降低^[8~9]。因此, 对于埋深较大的富集铁矿, 直接运用 AMT 法来圈定铁矿异常的难度较大, 尤其是在低阻覆盖层下进行探测, 降低了 AMT 的探测能力, 使其无法直接探测出异常的存在^[10]。

针对深埋隐伏富集铁矿床, 运用 AMT 法难以直接圈定铁矿异常的情况, 本文作者提出根据矿床成因、成矿环境以及矿体赋存空间特征等地质因素, 建立地质模型, 在地质模型的基础上构建电性模型; 在地电模型的基础上, 应用 AMT 法达到间接找矿的目的。

1 AMT 方法原理

AMT 法是通过观测雷电、太阳风等天然音频电磁波在大地产生的感应电磁场来研究地下电性结构的一种地球物理方法^[11~12], 采用的天然场源的频率变化范围为 100 kHz~1 Hz, 通过测量地表水平电场分量 E_x , 与正交的水平磁场分量 H_y 之比, 可确定地下介质的电阻率值(ρ_a)。其计算公式为

$$\rho_a = \frac{1}{5f} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (1)$$

式中: f 是频率, Hz; ρ_a 是视电阻率, $\Omega \cdot m$; E 是电场强度, mV/km; H 是磁场强度, nT。在电磁理论中, 把电磁场在大地中传播时, 其振幅衰减到初始值 $1/e$ 时的深度, 定义为趋肤深度(δ), 其公式为

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2)$$

由此可知, 趋肤深度将随电阻率(ρ)和频率(f)的变化而变化。测量是在和地下研究深度相对应的频带上进行的。一般来说, 频率较高的数据反映浅部的电性特征, 频率较低的数据反映较深的地层特征。因此, 在一个宽频带上观测电场和磁场信息, 并由此计算出视电阻率和相位。

2 繁江式铁矿找矿应用

2.1 构建繁江式铁矿找矿地电模型

根据地洼学说理论^[13], 调查评价区区域大地构造处于扬子陆块四川中生代前陆盆地华蓥山碳酸盐台地的南延部位。按照繁江式铁矿成矿演化地质模式(见图 1), 繁江式铁矿属内陆湖沼相化学沉积型铁矿床, 也可称为大陆湖沼型碎屑岩-泥质岩-有机岩层状赤铁矿-菱铁矿矿床^[14]。赤铁矿和菱铁矿、碎屑岩以及煤层、炭质页岩等有机岩构成了繁江式铁矿含矿层位的低阻特征, 其上覆地层主要是侏罗系的石英砂岩, 下伏地层为三叠系的灰岩, 都是呈相对高阻特征。特别是矿体的富集部位与煤层、炭质页岩等有机岩厚度和品质正相关, 在矿体的富集部位, 煤层、炭质页岩等有机岩厚度大、品质好, 从而大大降低含矿层位的电阻率, 增强了低阻异常强度, 扩大了异常范围; 同时, 由于矿体早期富集在洼地和后期受褶皱构造, 在空间上形成局部地质体, 从而引起局部低阻异常。

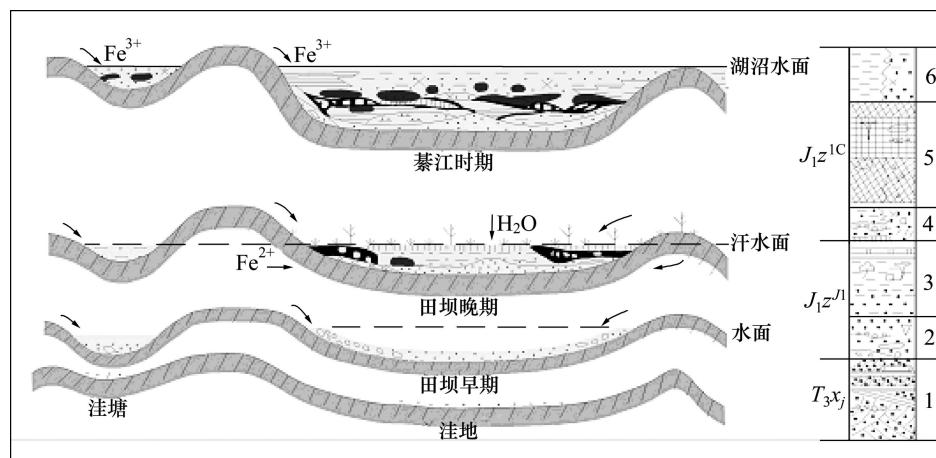


图 1 繁江式铁矿成矿演化地质模式: 1—由冲积中粗粒岩屑石英砂岩组成的侵蚀基地; 2—河水流入洼地沉积由侵蚀风化碎屑组成的边滩石英砂石; 3—在蛇曲河边滩沉积之上发育的由煤、炭质页岩组成的泥炭湖; 4—河水带入砂、泥质、铁质进入湖泊; 5—主要成铁时期、地表和(或)地下水水流携带粉砂质进入湖泊, 经同生-成岩期后的变化形成菱铁矿、赤铁矿和燧石; 6—粘土岩、泥质砂岩、含铁砂岩组成铁层顶板或与铁层相变或缺失

Fig. 1 Ore-forming geological evolution mode of Qijiang-type iron deposit

综合上述分析,针对綦江式铁矿 AMT 法间接找矿技术线路如下:1)结合地质资料推断出侏罗系下统珍珠冲组和三叠系上统须家河组为巨厚低阻特征的找矿标志层位;2)通过标志层位确定含矿层位和褶皱的地下空间展布;3)在低阻标志层位中,确定闭合的相对低阻异常,低阻异常就是矿体最富集的部位,从而实现间接找矿的目的。

2.2 AMT 间接探测綦江式铁矿应用

矿区地处云贵高原与重庆市南部过渡地带,区内地形大致呈北高南低的趋势,山脉延伸大体呈南北向,与地质构造线的方向基本一致。野外采用 EH-4 电导率成像仪开展 AMT 测线 1 条,测线方向 60°,测点 58 个,点距 50 m,电极距 50 m,采用连续电磁阵列剖面的工作方式(CEMAP),测线总长 2 600 m(2 600~5 200 m)。

图 2 所示为綦江县某铁矿 AMT 电阻率断面图,除地表风化低阻层外,地下可分为 3 个电性变化区,由浅到深,分别定为层①、层②、层③。断面图表层下伏出现的高阻层,推断为侏罗系中统和下统组成的高阻层①,主要由含有石英砂岩高阻岩性组成;1)下伏出现的低阻层,推断为地层侏罗系下统和三叠系上统组成的低阻层②,主要由赤铁矿和菱铁矿、碎屑岩以及煤层、炭质页岩等有机岩组成;2)下伏出现的高阻层,即断面图底部的高阻层,推断为地层三叠系组成的高阻层③,主要为灰岩。从断面成果图又可以看出,高阻层①、低阻层②和高阻层③呈现拱形特征,推断是东溪背斜引起,背斜轴部在里程 3 150 m 附近。从断面图不难发现在 3 100~4 600 m 里程段存在闭合

低阻异常,推测为煤层、炭质页岩等有机岩,厚度大和品质好,为赤铁矿和菱铁矿富集部位。所以,3 100~4 600 m 里程段是找矿最为有利的地段。ZK4101 和 ZK4103 的钻孔资料揭示矿体厚度在 1~5 m 之间,品位约在 20% 左右,品位较低,而 ZK4105 孔矿体厚度在 8~12 m 之间,品位约在 40% 左右,品位较高,可见,从 ZK4101 钻孔、ZK4103 钻孔再到 ZK4105 钻孔矿体逐渐富集。低阻异常虽然不能直接反映矿体,但是可以反映矿体富集早期的洼地区,间接实现找矿的目的。

3 宁乡式铁矿找矿应用

3.1 构建宁乡式铁矿找地电模型

调查区大地构造位置位于上扬子陆块南部碳酸盐台地武隆凹褶束^[13]。按照宁乡式铁矿成矿演化地质模式(见图 3^[15]),该类铁矿为沉积岩型矿床,成矿时代为晚泥盆系黄家磴期,控矿的古地理为鄂西海盆西北部海湾滨海环境,滨海相邻滨亚相,主矿层赋存于上泥盆统黄家磴组上部铁质碎屑岩建造,其分布严格受含矿地层(上泥盆统)控制^[16~17]。泥盆系上统黄家磴组为主要的含赤铁矿和菱铁矿矿层位,其岩性主要为泥质白云岩、泥质灰岩、灰岩,砂岩、页岩、粉砂岩等,其电性为低阻特征;其下伏地层志留系中统罗惹坪组岩性主要为页岩、砂质页岩,夹砂岩,整体表现为低阻特征;而其上覆地层为石炭系中统黄龙组,其岩性主要为灰岩夹白云质灰岩及硅质灰岩,表现为高阻特征。

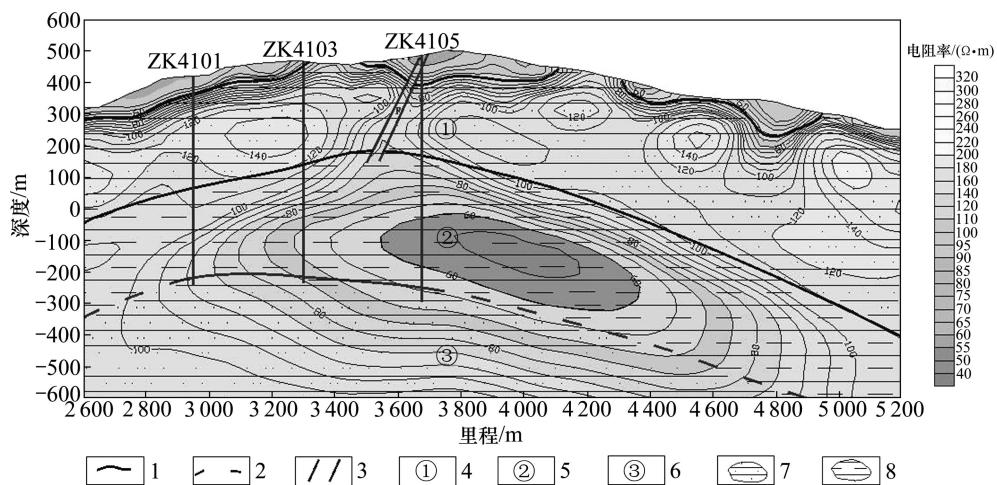


图 2 綦江县某铁矿 AMT 法电阻率断面深度—里程图^[10]: 1—电性分界线; 2—物探推断成矿带; 3—断层破碎带; 4—侏罗纪石英砂岩、粉砂岩带; 5—侏罗纪泥岩、页岩带; 6—三叠系石英砂岩、粉砂岩带; 7—石英砂岩; 8—泥岩

Fig. 2 Depth—distance plots of cross section of resistivity from AMT in Qijiang county^[10]: 1—Electrical line; 2—Geophysical speculating ore belt; 3—Fault zone; 4—Jurassic quartz sandstone and siltstone; 5—Jurassic mudstone and shale; 6—Triassic quartz sandstone, siltstone; 7—Quartz sandstone; 8—Mudstone

综合上述分析, 针对宁乡式铁矿 AMT 法间接找矿的技术线路如下: 石炭系和泥盆系具有明显的电性差异, 通过界定石炭系和泥盆系的层位空间的变化形态, 就能够确定深部含矿层位褶皱形态、赋存地下空间位置, 达到指导深部找矿的目的。

3.2 AMT 间接探测宁乡式铁矿应用

调查评价区位于渝东、鄂西接壤的巫山山脉, 属

中山深切割溶蚀地貌。区内碳酸盐岩广布, 岩溶地貌发育, 地势剧烈起伏。野外开展 AMT 测线 1 条, 测线方向 134° , 平行于地质勘探线, 测点 251 个, 点距 20 m, 电极距 20 m, 采用连续电磁阵列剖面的工作方式(CEMAP), 测线总长 5 000 m(0~5 000 m)。

从巫山县某铁矿 AMT 法电阻率断面图(见图 4)可以看出: 1)根据断面图、地层信息结果, 以及等值线电性变化, 除地表风化低阻层外, 地下可分为 3 个电

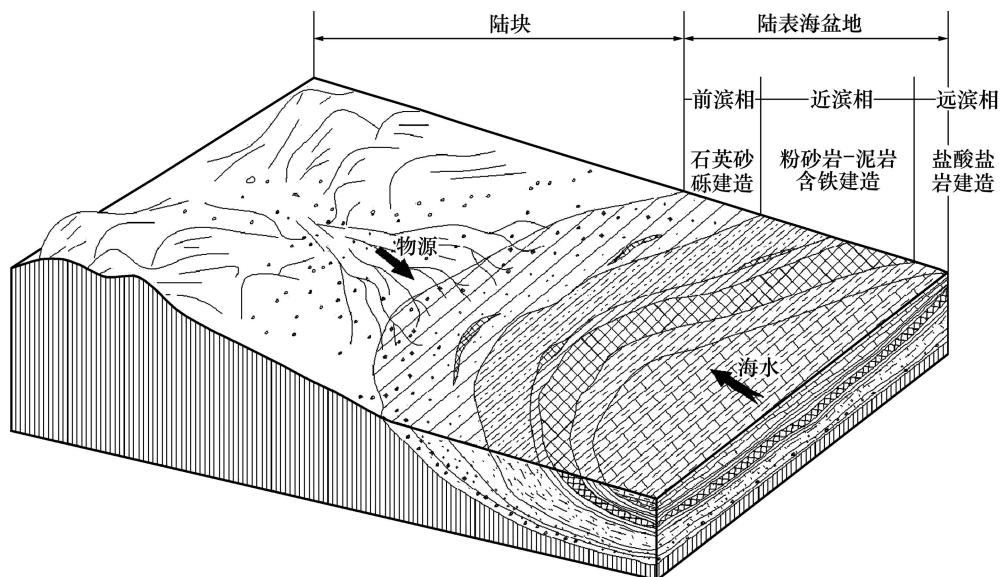


图 3 宁乡式铁矿成矿演化地质模式^[15]

Fig. 3 Ore-forming geological evolution mode of Ningxiang-type iron deposit^[15]

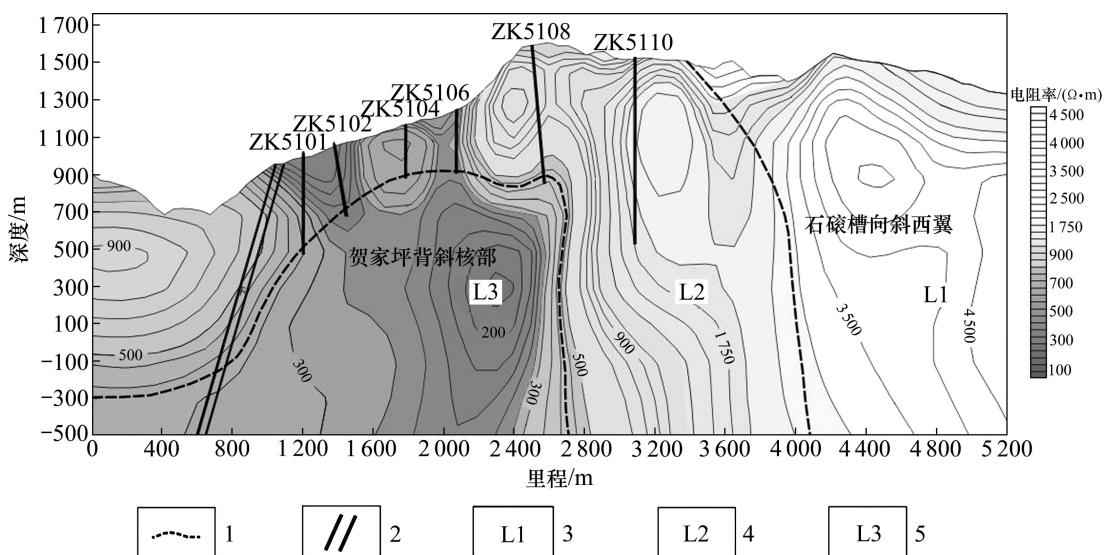


图 4 巫山县某铁矿 AMT 法电阻率断面深度一里程图: 1—物探推测地层界线; 2—断层破碎带; 3—三叠系灰岩带; 4—二叠系泥质灰岩、页岩带; 5—泥盆系炭质页岩、粘土岩、砂岩、赤铁矿带

Fig. 4 Depth-distance plots of cross section of resistivity from AMT in Wushan county: 1—Geophysical speculating stratigraphic boundaries; 2—Fault zone; 3—Triassic limestone; 4—Dyasargillaceous limestone and shale; 5—Devonian black cat, claystone, sandstone, haematite

性变化区,由浅到深,分别定为L1、L2、L3。断面图最右端大约4 000 m到5 000 m里程出现的高阻层,推断为三叠系下统嘉陵江组和大冶组组成的高阻层L1,主要由灰岩、白云质灰岩高阻岩性组成;①左边大约里程2 600 m到4 000 m出现的高低阻互层,推断为二叠系中统、上统以及石炭系中统黄龙组组成的高低阻互层L2,主要含灰色中厚层夹薄层含泥质灰岩及黑色页岩和煤线以及浅棕色、灰色含钙质页岩,形成高低阻互层;②左边深部,约0~2 000 m里程的低阻层,推断为由泥盆系上统黄家橙组、中统云台观以及志留系中统罗惹坪组组成的低阻层L3,主要含灰黑色炭质页岩或煤线、灰白、淡红色粘土岩、砂岩(含铁质类砂岩)、赤铁矿(褐铁矿)等低阻岩层组成。2)根据断面图视电阻率变化,可以看出高阻层L2、高低阻互层L2和低阻层L3在小号里程呈现拱形特征,推断是贺家坪背斜引起,背斜轴部在里程1 850 m附近;同样高阻层L1、高低阻互层L2之间的分界线在测线中间里程呈向下方向,推断为石砾槽向斜西翼边缘形状。3)根据钻孔资料,推测巫山层铁矿主要位于高低阻互层L2底板,低阻层L3顶板,即L2与L3交界层位处,并推出此层位随着贺家坪背斜西翼的变化方向和石砾槽向斜西翼的延伸方向向深部拓展,且贺家坪背斜东翼向小里程方向向下延伸,其核部铁矿层标高最大;铁矿层随L2与L3交界层位处向大里程趋于深部,其埋深较大。

地面ZK5101、ZK5102、ZK5104、ZK5106和ZK5108钻孔揭示的石炭系和泥盆系的地质界线对应AMT电阻率断面图反映的高低阻界面,即高阻电性层L2与低阻电性层L3的接触面;但是,ZK5110钻孔在1 050 m的孔深位置还是二叠系的灰岩,说明贺家坪背斜东西两翼并不对称,西缓东陡,这一地质特征与AMT反映的结果吻合。可见,AMT可以有效确定深部褶皱构造的展布以及深埋矿体的赋存状态。

4 结论

1) 针对綦江式铁矿的成因和地质背景,应用AMT法首先推断出侏罗系下统珍珠冲组和三叠系上统须家河组为巨厚低阻特征的找矿标志层位;然后通过标志层位确定含矿层位和褶皱的地下空间展布;最后在低阻标志层位中,根据有机岩与铁矿关系确定闭合的相对低阻异常就是矿体最富集的部位,从而实现间接找矿的目的。

2) 针对宁乡式铁矿的地质成因和地质背景,石炭

系和泥盆系具有明显的电性差异,应用AMT法界定石炭系和泥盆系的层位空间的变化形态,确定深部含矿层位褶皱形态、赋存地下空间位置,达到指导深部找矿的目的。

3) 在綦江式铁矿和宁乡式铁矿的勘查实践表明,在地质模型的基础上建立电性模型,根据地电模型,应用AMT法能够间接实现探测深埋富集铁矿床。

REFERENCES

- [1] 李金铭. 地电场与电法勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 427~440.
LI Jin-ming. Geoelectric field and electrical exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005: 427~440.
- [2] 汤井田, 何继善. 可控源音频大地电磁法及其应用[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005: 1~6.
TANG Jing-tian, HE Ji-shan. Methods and applications of CSAMT [M]. Changsha: Central South University Press, 2005: 1~6.
- [3] 陈乐寿, 刘国栋. 大地电磁测深研究[M]. 北京: 地震出版社, 1984: 1~4.
CHEN Le-shou, LIU Guo-dong. Research of magnetotelluric sounding method [M]. Beijing: Seismological Publishing House, 1984: 1~4.
- [4] 朴化荣. 电磁测深法原理[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 14~22.
PIAO Hua-rong. Electromagnetic sounding principle [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990: 14~22.
- [5] 孙燕, 刘建明, 曾庆栋, 张作伦, 张松, 汪在聪, 褚少雄, 叶杰, 于昌明. 综合地球物理方法在某金多金属矿区找矿中的应用[J]. 地球物理进展, 2010, 25(6): 2096~2101.
SUN Yan, LIU Jian-ming, ZENG Qing-dong, ZHANG Zuo-lun, ZHANG Song, WANG Zai-cong, CHU Shao-xiong, YE Jie, YU Chang-ming. Application of comprehensive geophysical methods in ore prospecting in one Au polymetallic mineralizing area [J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(6): 2096~2101.
- [6] 朱光喜. 音频大地电磁在铁路隧道工程勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2009, 6(3): 294~298.
ZHU Guang-xi. Application of audio magnetotelluric in geological engineering exploration of railway tunnel [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2009, 6(3): 294~298.
- [7] 王玉和, 王厚臣, 程久龙, 姜国庆. EH4电磁方法在断层定位及导水性探测中的应用[J]. 山东科技大学: 自然科学版, 2010, 29(4): 35~39.
WANG Yu-he, WANG Hou-chen, CHENG Jiu-long, JIANG Guo-qing. Application of EH4 electromagnetic method in locating of faults and detection of its water transmissibility [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology:

- Natural Science, 2010, 29(4): 35–39.
- [8] NABIGHIAN M N. Electromagnetic methods in applied geophysics (Volume 1): Theory [M]. Tulsa: Society of Exploration Geophysics, 1988: 5–10.
- [9] 周军, 王成龙, 曾珍. 音频大地电磁测深在攀西铜矿勘探中的应用[J]. 内蒙古石油化工, 2008, 12(1): 104–106.
ZHOU Jun, WANG Cheng-long, ZENG Zhen. Application of audio magnetotelluric sounding in western of Panzhihua for copper exploration [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2008, 12(1): 104–106.
- [10] 席振株, 冯万杰, 李瑞雪, 陈兴朋. 低阻覆盖层对高频大地电磁测深的影响[J]. 地质与勘探, 2011, 47(4): 673–678.
XI Zhen-zhu, FENG Wan-jie, LI Rui-xue, CHEN Xing-peng. Effect of a low-resistivity cover on high-frequency magnetotelluric sounding [J]. Geology and Exploration, 2011, 47(4): 673–678.
- [11] 考夫曼 A A, 凯勒 G V. 频率域与时间域电磁测深[M]. 王建谋, 译. 北京: 地质出版社, 1987: 112–144.
KAUFMAN A A, KELLER G V. Frequency and transient soundings [M]. WANG Jian-mou, transl. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 112–144.
- [12] 石应俊, 刘国栋, 吴广耀, 王家映, 王华俊, 王光锷, 吴乃爵. 大地电磁测深法教程[M]. 北京: 地震出版社, 1985: 7–15.
SHI Ying-jun, LIU Guo-dong, WU Guang-yao, WANG Jia-ying, WANG Hua-jun, WANG Guang-e, WU Nai-jue. Magnetotelluric sounding method tutorial [M]. Beijing: Seismological Publishing House, 1985: 7–15.
- [13] 陈国达. 地台活化说及其找矿意义[M]. 北京: 地质出版社, 1960.
- CHEN Guo-da. Activation of platform theory and its prospecting significance [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1960.
- [14] 陈龙. 重庆綦江县篆塘角铁矿地质特征及成因[J]. 四川地质学报, 2009, 29(2): 149–161.
CHEN Long. On geological characteristics and genesis of the Zhuantangjiao Fe deposit in Qijiang county [J]. Acta Geologica Sichuan, 2009, 29(2): 149–161.
- [15] 徐乔, 左全周, 刘雄刚, 吴发明, 黄维富, 陈芳. 重庆市巫山县桃花—邓家铁矿调查评价总体设计及2010年度工作方案[R]. 重庆: 重庆市地质调查院, 2010.
XU Qiao, ZUO Quan-zhou, LIU Xiong-gang, WU Fa-ming, HUANG Wei-fu, CHEN Fang. Survey and evaluation of the overall design scheme of the year 2010 of Taohua-Dengjia iron ore in Wushan county Chongqing city [R]. Chongqing: Chongqing Bureau of Geological Exploration, 2010.
- [16] 赵一鸣, 毕承思. 宁乡式沉积铁矿床的时空分布和演化[J]. 矿床地质, 2000, 19(4): 350–362.
ZHAO Yi-ming, BI Cheng-si. Time-space distribution and evolution of the Ningxiang type sedimentary iron deposits [J]. Mineral Deposits, 2000, 19(4): 350–362.
- [17] 肖军, 刘严松, 孙传敏, 何政伟, 周庆磊. 巫山县桃花赤铁矿地质特征及成因探讨[J]. 矿物岩石, 2009, 29(3): 69–73.
XIAO Jun, LIU Yan-song, SUN Chuan-min, HE Zheng-wei, ZHOU Qing-lei. Study on the geological characteristics and genesis of Taohua hematite deposit in the Wushan county [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2009, 29(3): 69–73.

(编辑 龙怀中)