

doi: 10.11720/wtyht.2022.1493

吴成平, 于长春, 熊盛青, 等. 自相关滤波方法及其在山东齐河—禹城铁矿勘查应用[J]. 物探与化探, 2022, 46(4): 940-945. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1493>

Wu C P, Yu C C, Xiong S Q, et al. Application of autocorrelation filtering to iron ore prospecting in Qihe-Yucheng area, Shandong Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(4): 940-945. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1493>

# 自相关滤波方法及其在山东齐河—禹城铁矿勘查应用

吴成平<sup>1,2</sup>, 于长春<sup>1,2</sup>, 熊盛青<sup>1,2</sup>, 徐剑春<sup>1,2</sup>, 徐东礼<sup>1,2</sup>, 乔春贵<sup>1,2</sup>

(1. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 自然资源部 航空地球物理与遥感地质重点实验室 北京 100083)

**摘要:** 山东齐河—禹城地区属于典型的厚覆盖区, 深部隐伏铁矿在地表引起的地球物理异常相对较弱, 因此提取铁矿引起的局部弱异常是该地区找矿预测的关键。自相关滤波方法采用一定波长的高通滤波压制区域场的影响, 达到提取局部弱异常的目的。首先, 通过建立不同规模和深度的铁矿模型和产生背景场的倾斜岩体模型, 在此基础上正演获得叠加磁场, 对该磁场进行自相关滤波方法处理, 有效地提取了铁矿体产生的弱异常。而后, 对齐河—禹城地区的实测数据进行处理, 处理结果与钻孔资料进行对比, 验证了方法的有效性。自相关滤波方法提取弱异常缩小了找矿范围, 对圈定找矿有利部位和钻探验证具有重要指导意义。

**关键词:** 自相关滤波; 厚覆盖区; 深部铁矿; 弱异常

**中图分类号:** P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2022)04-0940-06

## 0 引言

自相关滤波方法是数字信号处理中非常重要的处理方法, 多用于识别有意义的弱异常, 如识别矿体、含油气构造体、断裂构造等。该方法在重磁领域的应用仍在不断发展过程中, 最早 G. D. Garland<sup>[1]</sup> 基于泊松定理, 利用相关系数分析研究重磁异常。姜枚等<sup>[2]</sup> 阐述了统计分析方法在区域重磁资料解释中的应用, 指出计算相关函数时延迟距离或窗口选择的重要性。秦葆瑚<sup>[3]</sup> 应用自相关滤波方法降低噪声、突出弱异常, 对实测磁数据用插值切割法与自相关滤波方法进行对比试验, 发现两者获取的剩余异常相似, 但后者异常形态受滤波半径影响更小。熊盛青<sup>[4]</sup> 提出自协方差、互协方差为基础的结构逻辑法提取非平稳场中的弱异常, 应用于铜多金属矿和金矿勘查。刘天佑<sup>[5]</sup> 采用剖面相关滤波对扬子

地台断裂不同延拓高度数据进行处理, 取得较好的效果。韩兆红等<sup>[6]</sup> 在测线上自动寻找剩余局部异常最大点处的观测值作为参考模型, 改造自相关滤波因子, 并处理实测资料, 圈定新的找矿远景区。自相关滤波方法在重磁领域应用还不是很多, 在深部铁矿勘查中未见应用。山东齐河—禹城厚覆盖区铁矿在地表引起的异常微弱, 利用自相关滤波方法对研究区内数据进行局部弱异常提取, 取得了较好的效果, 为厚覆盖区找矿提供了支撑, 拓展了自相关滤波方法的应用领域。

## 1 原理及公式

自相关滤波方法是利用自相关计算滤波函数, 采用一定宽度的滤波窗口进行高通滤波, 压制区域场的影响, 从而达到提取局部弱异常的目的。本次主要针对网格数据进行自相关滤波处理。设滤波窗

收稿日期: 2021-08-31; 修回日期: 2021-09-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0602201)

第一作者: 吴成平(1982-), 教授级高级工程师, 主要从事航空物探数据处理和综合解释工作。Email: chengpingwu@163.com

通讯作者: 于长春(1964-), 教授级高级工程师, 长期从事航空物探方法技术研究和资料解释工作。Email: bjycc@126.com

口半径(即自相关半径)为  $R$ (单位为点数),自相关半径  $R$  可以根据已知目标体引起的异常来确定;或根据探测目标实际情况,结合理论模型试验确定——即依据探测目标的规模、埋深、物性等参数,正演出其在观测面引起的异常,根据异常规模及地球物理数据情况选择合适的自相关半径点数。自相

$$\bar{Z}(\sqrt{l^2+k^2}) = \frac{1}{8} [Z(i+k, j-l) + Z(i-k, j-l) + Z(i+k, j+l) + Z(i-k, j+l) + Z(i-l, j+k) + Z(i-l, j-k) + Z(i+l, j+k) + Z(i+l, j-k)] , \tag{2}$$

$$a = \sum_{l=1}^R \sum_{k=0}^l \frac{1}{l^2+k^2}, \tag{3}$$

$$p(\sqrt{l^2+k^2}) = \frac{1}{l^2+k^2}, \tag{4}$$

其中: $Z_0$  为窗口中心点的异常值,即计算点  $Z(i, j)$ ;  $l=1, 2, \dots, R$ ;  $k=0, 1, \dots, l$ ;  $i=1, 2, \dots, M$ ;  $j=1, 2, \dots, N$ ;  $M, N$  表示研究区大小(测线数为  $M$ , 每条测线的测点数为  $N$ )。  $\bar{\mu}$  则表示窗口内全部测点的平均值;  $A^2$  表示窗口内有效异常的方差;  $\sigma^2$  表示窗口内所有测点的方差。

计算点  $Z(i, j)$  处经过自相关滤波后的异常值  $Z_{loc}(i, j)$  为:

$$Z_{loc}(i, j) = [Z(i, j) - \bar{\mu}] \times \rho, \tag{5}$$

随着滤波窗口的移动,可获得所有测点自相关滤波后的异常值。需要指出的是:滤波窗口移动时,研究区边缘的滤波窗口半径范围数据点将无法按式(1)计算滤波函数,为了压制这种“边界效应”,对原始数据进行了括边处理<sup>[7-9]</sup>。

## 2 模型试验

为了验证自相关滤波方法对厚覆盖区深部矿体探测的有效性,进行了模型试验。其中,岩体模型主

关计算的滤波函数  $\rho$  表达式为<sup>[3,6]</sup>:

$$\rho = \frac{\frac{1}{\alpha} \sum_{l=1}^R \sum_{k=0}^l p(\sqrt{l^2+k^2}) [Z_0 - \bar{Z}(\sqrt{l^2+k^2})]^2}{\frac{1}{(2R+1)^2} \sum_{m=-R}^R \sum_{n=-R}^R [Z(i+m, j+n) - \bar{\mu}]^2} = \frac{A^2}{\sigma^2}, \tag{1}$$

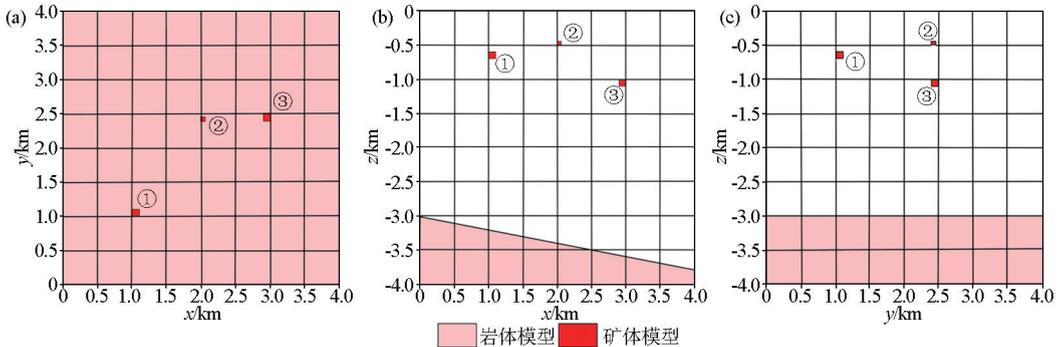
要作用为产生背景磁场,岩体模型位于 3~4 km 深度,有效磁化强度为  $1\ 470 \times 10^{-3}$  A/m,岩体模型在各平面投影见图 1;并建立埋深 650、475、1050 m 的 3 个矿体模型,矿体模型为边长 50 m 或 100 m 的立方体模型,其有效磁化强度为  $33\ 600 \times 10^{-3}$  A/m,具体位置、几何参数、磁性参数见表 1。

表 1 矿体模型参数

Table 1 Parameters of the iron ore models

编号	质心坐标/ (x/m, y/m, z/m)	长/m	宽/m	高/m	磁化强度/ ( $10^{-3}$ A · m <sup>-1</sup> )
①	(1050, 1050, -650)	100	100	100	33600
②	(2025, 2425, -475)	50	50	50	33600
③	(2950, 2450, -1050)	100	100	100	33600

对上述建立的组合模型体进行正演计算,获得了组合模型体在地表 ( $Z=0$  m) 产生的垂直磁化  $\Delta T$  异常(图 2a),在此基础上进行自相关滤波方法处理,提取局部弱异常(图 2b)。从图中可以看出,利用自相关滤波方法基本消除了背景场干扰,提取的局部弱异常为矿体模型产生的异常。尤其③号矿体在原磁场图中不明显、未圈闭,通过自相关滤波方法处理后,尽管由于埋深较大导致产生的异常弱,但是形成了圈闭异常。同时,3 个矿体的磁异常经过处理,异常范围缩小,更接近地质体边界范围,其中①号矿体异常范围减小最为明显。模型试验结果表明自相关滤波方法提取弱异常是行之有效的。

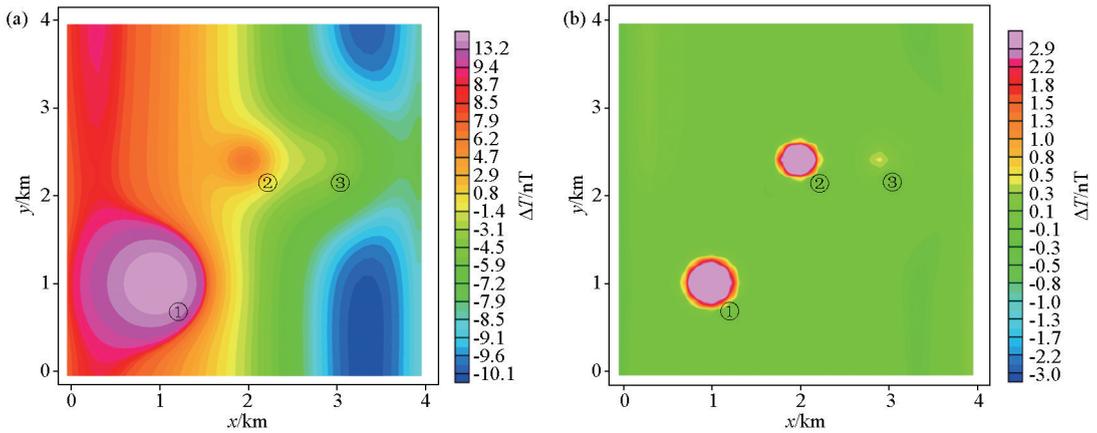


a—模型在  $xy$  平面投影; b—模型在  $xz$  平面投影; c—模型在  $yz$  平面投影

a— $xy$  plane profile of theoretical geological model; b— $xz$  plane profile of theoretical geological model; c— $yz$  plane profile of theoretical geological model;

图 1 地质模型在  $xy, xz, yz$  平面投影

Fig. 1  $xy, xz$  and  $yz$  plane profiles of geological model



a—地面正演  $\Delta T$  异常; b—自相关滤波方法提取局部弱异常  
a—ground forward  $\Delta T$  field; b—extracted local weak anomaly map by using self auto correlation filtering method

图2 自相关滤波方法模型试验

Fig. 2 The theoretical model test of self-correlation method

### 3 实际应用

#### 3.1 数据处理

山东齐河—禹城地区位于山东省西北部,地处黄河以北。2011年在山东齐河—禹城地区完成了1:5万航磁测量,测线方向为SN向;2017年,又进行了1:5万航磁测量,测线方向与2011年相同,但测线位置穿插于2011年测线,相当于进行了加密测量。以2017年航磁数据为基准,对上述航磁数据进行调平融合处理<sup>[10]</sup>,得到了1:2.5万航磁数据。数据网格化采用的网格距为50 m×50 m。

在自相关滤波方法处理之前对数据进行了化极处理。根据钻探资料,研究区内铁矿体埋深在700~1500 m,厚度几米至上百米不等。通过分析已知铁矿产生的航磁异常以及对铁矿体产生的异常进行正演模拟,该地区铁矿引起的航磁异常宽度一般为1~2 km,因此设定自相关半径为20个数据点。自相关滤波方法使用的软件为基于中国自然资源航空物探遥感中心GeoProbe Ver 4.0软件平台<sup>[11]</sup>自主开发的插件。

#### 3.2 应用效果

研究区地表被厚度大于500 m的巨厚新生代沉积地层覆盖(图3a),覆盖层下方地层发育不完整——缺失白垩系、三叠系、泥盆系、志留系等。燕山晚期岩浆活动强烈,侵入岩属于幔源分异型,以闪长岩类中基性侵入岩为主。据相关成矿理论<sup>[12-13]</sup>,中基性侵入岩为该区矽卡岩型铁矿成矿地质体,碳酸盐岩地层与岩体的接触带是铁矿成矿的有利部位<sup>[14]</sup>。

区内隐伏地层磁性较弱,引起磁异常的主体为中基性岩体,其平均磁化强度为 $1\ 470\times 10^{-3}$  A/m,而铁矿石平均磁化强度 $33\ 600\times 10^{-3}$  A/m,可在大规模岩体产生的异常中引起局部弱异常<sup>[15]</sup>。主体异常为负背景场中的升高正磁场,异常整体走向为NNE向,总长度约35 km,最大宽度约15 km,自南而北主要分为3个异常区,分别为大张异常区、潘店异常区和李屯异常区(图3b)。

经自相关滤波处理后,上述3个异常区由岩体引起的背景场基本消除,认为提取的规模和强度相对较大的弱异常是地下磁性体局部凸起或磁性不均的反映,是找矿的重要部位。需要注意的是:①这里指的弱异常是相对于原叠加异常强度而言;②提取的局部弱异常中也有部分异常是地面干扰引起,其波长短、相对杂乱,在解释中应根据异常特征,并结合遥感、实地踏勘等资料加以区分。

本区已施工多个钻孔<sup>[16-18]</sup>,可以看到见矿钻孔均位于提取的局部弱异常范围内(图4),而且局部异常强度相对较大。例如:李屯地区ZK1、ZK0701、ZK5、ZK6、ZK7等见矿钻孔所处的局部异常;潘店地区PZK01见矿钻孔所处的局部异常;以及大张地区ZK001、ZK002、ZK003、DZK01所处的局部异常。而未见矿钻孔多位于强度较弱的局部异常,甚至不在局部异常范围内,如图4中ZK3、ZK4在提取的局部异常边部,ZK2801则不在提取的局部异常范围内。钻孔资料表明,自相关滤波方法提取的局部弱异常,尤其那些强度相对较大的局部弱异常与深部铁矿密切相关,对该地区寻找深部铁矿具有重要意义,可指导后续钻探工作。

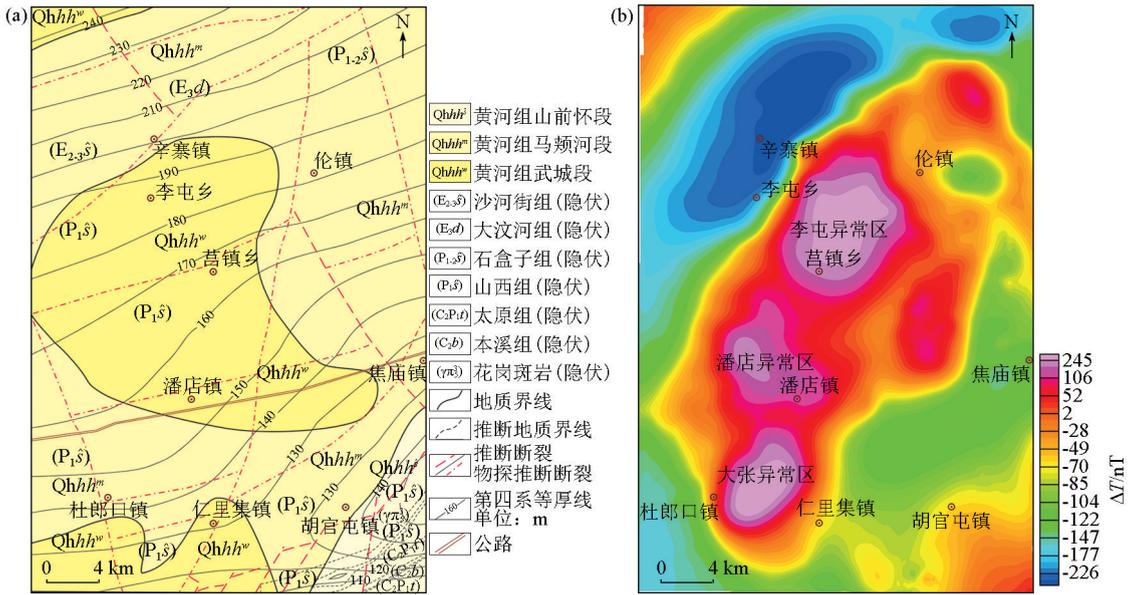


图3 研究区地质图(a)和航磁异常  $\Delta T$ (b)

Fig. 3 Geological map and magnetic map of study area

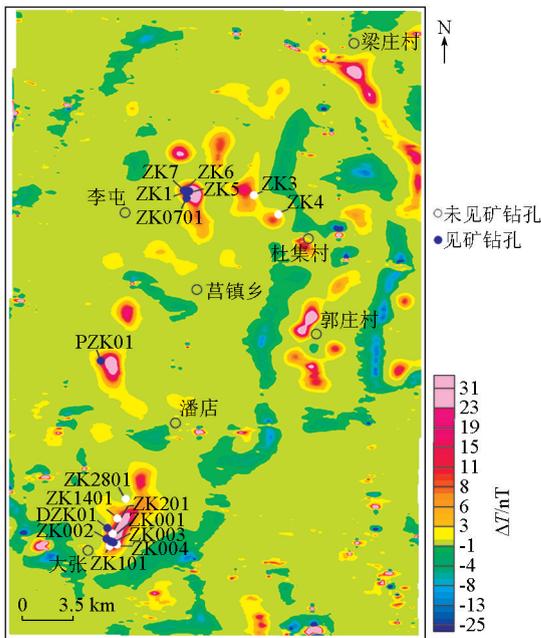


图4 自相关滤波方法处理结果及钻孔分布

Fig. 4 The result of self-correlation autocorrection filtering and borehole distribution

### 4 结论

1) 应用自相关滤波方法对磁异常进行处理, 压制了背景场的影响, 明显突出了局部弱异常。不仅从叠加磁场中提取出有意义的异常, 而且自相关滤波方法提取的局部弱异常, 其异常范围比原异常更接近磁性地质体的实际边界。

2) 在齐河—禹城厚覆盖区, 铁矿埋深大导致在

地表观测的铁矿体引起的地球物理信号相对弱, 而且铁矿引起的异常湮没在大面积的磁性岩体引起的异常中, 铁矿预测的难度大。通过自相关滤波方法提取弱异常显著缩小了找矿范围, 为该地区找矿靶区圈定和钻探验证等工作提供了重要依据。

3) 自相关滤波方法提取的局部弱异常突出矿致异常等有用信息的同时, 也突出了部分地表人文干扰异常, 在地质解释过程中建议使用遥感、实地踏勘等资料进行排除。

**致谢:** 山东省煤田地质规划勘察研究院、中化地质矿山总局山东地质勘察院、山东省地调院等单位及相关技术人员提供了研究区钻孔资料, 匿名审稿专家和编辑部对本文提出了宝贵意见和建议, 在此表示由衷感谢。

### 参考文献 (References):

[1] Garland G D. Combined analysis of gravity and magnetic anomalies[J]. Geophysics, 1951, 16(1): 51-62.

[2] 姜枚, 张瑜才, 王德夫. 试谈统计分析方法在区域重磁资料解释中的某些应用[J]. 物探与化探, 1982, 5(6): 321-327. Jiang M, Zhang Y C, Wang D F. Some applications of statistical analysis method in regional gravity and magnetic data interpretation [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1982, 5(6): 321-327.

[3] 秦葆瑚. 用自相关滤波法提取弱异常[J]. 物探与化探, 1991, 15(3): 240-241. Qin B H. [J]. Extracting weak anomalies by self-correlation filtering [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1991, 15(3): 240-241.

[4] 熊盛青. 航空物探勘查金属矿产时提取弱信息的解释方法

- [J]. 现代地质, 1997, 11(1): 67-73.
- Xiong S Q. Interpretation method of extracting weak signals of aero geophysical data for prospecting metallic deposits[J]. Geoscience, 1997, 11(1): 67-73.
- [5] 刘天佑. 相关滤波方法及其在扬子地台断裂分析中的应用[J]. 地质科技情报, 1993, 12(S): 45-50.
- Liu T Y. The relative filtering and its application to fault analysis of the yangtze platform[J]. Geological Science and Technology Information, 1993, 12(S): 45-50.
- [6] 韩兆红, 吴燕冈, 张成海, 等. 自相关滤波法提取重磁场中弱异常[J]. 世界地质, 2010, 29(1): 124-129.
- Han Z H, Wu Y G, Zhang C H, et al. Extracting weak anomaly in gravity and magnetic field with self-correlation filtering method [J]. Global Geology, 2010, 29(1): 124-129.
- [7] 王万银, 邱之云, 刘金兰, 等. 位场数据处理中的最小曲率扩边和补空方法研究[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(4): 1327-1338.
- Wang W Y, Qiu Z Y, Liu J L, et al. The research to the extending edge and interpolation based on the minimum curvature method in potential field data processing [J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(4): 1327-1338.
- [8] 段本春, 徐世浙. 磁(重力)异常局部场与区域场分离处理中的扩边方法研究[J]. 物探化探计算技术, 1997, 19(4): 11-17.
- Yin B C, Xu S Z. A study of the scheme of extending edge in the processing of separating local field from regional field for magnetic/gravity anomaly [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 1997, 19(4): 11-17.
- [9] 邢怡. 重磁异常分离方法技术研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2008.
- Xing Y. Research in the method of separating anomalous gravity and magnetic data [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2008.
- [10] 吴成平, 王卫平, 马勋表. 航磁弱异常区磁场水平调整——以黔东南地区为例[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(4): 1496-1500.
- Wu C P, Wang W P, Ma X B. Leveling aeromagnetic data for the weak magnetic field: A case study in eastern Guizhou [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(4): 1496-1500.
- [11] 王林飞, 薛典军, 何辉, 等. 插件技术在GeoProbe地球物理软件平台中的应用[J]. 物探与化探, 2013, 37(3): 547-551.
- Wang L F, Xue D J, He H, et al. The application of the plugin technology to geophysical software platform (Geoprobe) [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(3): 547-551.
- [12] 叶天竺, 韦昌山, 王玉往. 勘查区找矿预测理论与方法(各论)[M]. 北京: 地质出版社, 2017.
- Ye T Z, Wei C S, Wang Y W. Theory and method of prospecting prediction in prospecting areas (monograph) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017.
- [13] 钱龙兵, 郭丽荣, 余庆亮. 广东莲花山断裂带南西段整装勘查区矿床预测模型[J]. 地质学刊, 2017, 41(3): 468-473.
- Qian L B, Guo L R, Yu Q L. Mineral prediction model of the integrative exploration area in the southwest section of the Lianhua-shan fault zone, Guangdong Province [J]. Journal of Geology, 2017, 41(3): 468-473.
- [14] 郝兴中, 郑金明, 刘伟, 等. 山东省齐河——禹城地区矽卡岩型铁矿成矿预测[J]. 地球学报, 2020, 41(2): 293-302.
- Hao X Z, Zheng J M, Liu W, et al. Metallogenic prognosis of skarn-type iron ore deposits in Qihe-Yucheng area, Shandong province [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2020, 41(2): 293-302.
- [15] 吴成平, 于长春, 王卫平, 等. 鲁西齐河地区岩(矿)石物性特征及应用[J]. 地球科学进展, 2019, 34(10): 1099-1107.
- Wu C P, Yu C C, Wang W P, et al. Physical characteristics of rocks and ores and their application in Qihe area, Western Shandong [J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(10): 1099-1107.
- [16] 周明磊, 汝亮, 朱裕振, 等. 山东齐河—禹城地区重磁场特征及找矿预测[J]. 物探与化探, 2021, 45(2): 301-307.
- Zhou M L, Ru L, Zhu Y Z, et al. Magnetic field characteristics and ore prediction in Qihe-Yucheng area of Shandong Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(2): 301-307.
- [17] 沈立军, 朱裕振, 王怀洪, 等. 山东齐河—禹城地区李屯富铁矿床地球化学特征及地质意义[J]. 地质论评, 2021, 67(1): 84-98.
- Shen L J, Zhu Y Z, Wang H H, et al. Geochemical characteristics and geological significance of Litun iron ore deposit in Qihe-Yucheng area, Shandong Province [J]. Geological Review, 2021, 67(1): 84-98.
- [18] 郝兴中, 杨毅恒, 刘伟. 山东潘店地区矽卡岩型铁矿地质特征及找矿意义[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(20): 51-58.
- Hao X Z, Yang Y H, Liu W. Geological characteristics and prospecting significance of skarn type iron deposit in Pandian area, Shandong province [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(20): 51-58.

## Application of autocorrelation filtering to iron ore prospecting in Qihe-Yucheng area, Shandong Province

WU Cheng-Ping<sup>1,2</sup>, YU Chang-Chun<sup>1,2</sup>, XIONG Sheng-Qing<sup>1,2</sup>, XU Jian-Chun<sup>1,2</sup>, QIAO Chun-Gui<sup>1,2</sup>

(1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Airborne Geophysics and Remote Sensing Geology, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Deeply concealed iron ores cause relatively weak geophysical anomalies on the ground surface in the Qihe-Yucheng area,

Shandong Province, a typical thickly covered area. Therefore, it is the key to the ore prospecting in this area to extract local weak anomalies caused by iron ores. Autocorrelation filtering can extract local weak anomalies by reducing the influence of a regional field using a high-pass filter of a certain wavelenth. The steps of the method are as follows. First, establish a model of incline plutons generating background field and models of iron ores of different scales and depths. Based on this, obtain the superimposed magnetic field through forward modeling. Then carry out autocorrelation filtering processing of the superimposed magnetic field to effectively extract the weak anomalies of iron ores. The autocorrelation filtering method was used to process the measured data in the Qihe-Yucheng area and the processing results were compared to the borehole data, verifying that the autocorrelation filtering method is effective. The extraction of weak anomalies using the autocorrelation filtering method allows for the ore prospecting scope to be reduced, which can provide guidance on the determination of prospecting favorable locations and drilling verification.

**Key words:** autocorrelation filtering; thickly covered area; deep iron ore; weak anomaly

(本文编辑:王萌)