doi: 10.11720/wtyht.2026.1369
李丽丽, 马子超, 马国庆, 等. 基于航空重磁数据阶跃边缘识别函数的欧拉反褶积方法研究及应用[J]. 物探与化探, 2026, 50(5): 882-891. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1369
Li L L, Ma Z C, Ma G Q, et al. Research and application of Euler deconvolution based on the step edge identification function for airborne gravity and magnetic data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(5): 882-891. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1369

基于航空重磁数据阶跃边缘识别函数的欧拉反褶积方法研究及应用

李丽丽[1,2], 马子超[1,2], 马国庆[1,2], 孟庆发[1,2], 明彦伯[3]
(1. 地球信息探测仪器教育部重点实验室(吉林大学), 吉林 长春 130026; 2. 吉林大学 地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026; 3. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 511458)

摘 要: 航空重磁测量中, 重磁数据的阶跃边缘检测(SD)滤波器由不同阶导数的比值构成, 能清晰识别矿体的边界。基于 SD 滤波器推导欧拉反褶积方程, 可以降低构造指数选择依赖性, 改善传统欧拉法发散问题, 获得收敛性更优的结果; 同时, 将 SD 滤波器的极大值与矿体边界对应的特征作为筛选标准, 强化磁异常阶跃特征提取, 以进一步提升计算结果的准确性, 实现矿体边界与深度的同步高精度反演。在模拟重磁数据中对该方法的应用效果进行了测试: SD 滤波器计算得到的水平分布与其他方法差异较小, 但其计算得到的深度信息精度明显高于其他方法; 此外, 基于 SD 滤波器的欧拉方法对磁化方向不敏感。在河北迁安铁矿资源的航空磁测与梯度测量工作中, 应用基于 SD 滤波器的欧拉反褶积方法计算铁矿体的分布取得了良好效果。研究结果表明, 该方法可用于航空重磁数据处理, 具有良好的实际应用效果与前景。

关键词: 航空重磁数据; 阶跃边缘检测; 欧拉反褶积; 矿体边界; 迁安铁矿
中图分类号: P631; P31 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)05-0882-10

0 引言

航空重磁测量是获取地下具有密度与磁化强度差异的矿体分布的常用地球物理探测方法。作为重磁数据解释的核心任务, 源体位置估算的相关自动解释技术已逐步发展起来[1-7], 例如特征点法[8]、欧拉反褶积法、维纳法及解析信号法等。其中, 欧拉反褶积是一种广泛应用的方法, 它通过原始重力或磁数据及其梯度构建线性方程, 进而获取位置参数。但该方法需依赖与源体形态相关的先验信息[9], 这对实际数据解释构成挑战, 因此研究人员相继提出了诸多改进方法。为减少错误先验信息的影响, 研究人员提出了梯度欧拉反褶积法[10-11] 以及其他无需形态信息的欧拉反褶积方法, 如倾斜角导数法[7] 与解析信号法[5]。但这些方法的计算结果存在发散问题, 因此需要通过设定筛选标准, 以获取更准确的结果。为得到收敛性更优的结果, 同时便于设定筛选标准, 研究人员开发出基于边缘检测滤波器的欧拉反褶积方程。该方程的函数极大值与源体水平位置相对应, 进而能获得更收敛、更精确的结果。平衡边界识别技术可同时获取不同埋深源体的水平位置[12-18]。Miller 等[12] 首次提出了名为“倾斜角”的平衡边界识别技术, 其中倾斜角为零的位置对应源体边界。Cooper 等[15-16] 提出通过水平梯度与垂直梯度的比值函数进行边界识别, 提升了对深部构造的识别能力。Ma[19] 建立了现有边缘检测函数与源体位置间的对应方程; 随后又提出了阶跃边缘检测(SD)滤波器[20], 该滤波器利用不同阶导数的比值实现了更清晰、准确的边界识别, 且具有更高的水平分辨率。

根据工作中的具体情况, 本文提出了以下方法: 首先, 基于阶跃边缘检测(SD)滤波器推导得到欧拉反褶积方程, 该方程可以降低构造指数选择依赖性, 改善传统欧拉法发散问题, 能获取更高分辨率的结

收稿日期: 2025-10-13; **修回日期**: 2025-12-17
基金项目: 国家自然科学基金项目(41674166)
第一作者: 李丽丽(1983-), 女, 博士, 副教授, 主要从事重力及磁法等地球物理勘探方面的教学和研究工作。Email: lilili@jlu.edu.cn

果; 然后, 利用 SD 滤波器与水平位置的对应关系设定筛选标准, 强化磁异常阶跃特征提取, 以获取更可靠的结果。理论模型实验和实际数据测试验证了本文方法的准确性。

1　基于阶跃边缘检测滤波器的欧拉反褶积法原理

传统的欧拉反褶积法利用原始重力或磁异常及其梯度来获取位置参数[9,21]:

$$(x-x_0)\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial x}+(y-y_0)\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial y}+(z-z_0)\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial z}=-N(f-\boldsymbol{B}), \tag{1}$$

式中: $\boldsymbol{f}$ 为位场; $\boldsymbol{B}$ 为背景场; N 为结构指数。为获取源体的位置信息, N 需由源体形态确定[21-22], 理想源体的结构指数如表 1 所示。

表 1　结构指数与源体的对应关系

Table 1　Correspondence between structural index and source body

源体形态	重力源体的结构指数	磁源体的结构指数
深度较大的接触带	−1	0
薄板状边缘(岩脉、岩床)	0	1
线源(水平圆柱体/垂直管状体)	1	2
球体或处于一定距离处的致密体	2	3

对于位场 $\boldsymbol{f}$ 的阶跃边缘检测(SD)滤波器 A^{SD}, 其定义为不同阶导数的比值[20]:

$$A^{\mathrm{SD}}=\arctan\left[\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial h}\Big/\left(k\left|\frac{\partial^2 \boldsymbol{f}}{\partial z^2}\right|\right)\right], \tag{2}$$

式中: A^{SD} 为 SD 滤波器; $\partial \boldsymbol{f}/\partial h=\sqrt{(\partial \boldsymbol{f}/\partial x)^2+(\partial \boldsymbol{f}/\partial y)^2}$; k 为辅助系数, 用于平衡式中不同阶导数的振幅, 通常情况下, $k=\dfrac{\max|\partial \boldsymbol{f}/\partial z|}{\max|\partial^2 \boldsymbol{f}/\partial z^2|}$。式(2)能呈现更清晰的源体边界。因此, SD 滤波器可用于计算水平位置信息, 且该位置信息能够降低周围源体的干扰并提高精度。

为降低噪声的影响, 二阶垂直导数通过水平导数的和来计算:

$$\frac{\partial^2 \boldsymbol{f}}{\partial z^2}=-\left(\frac{\partial^2 \boldsymbol{f}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \boldsymbol{f}}{\partial y^2}\right)。 \tag{3}$$

水平导数的计算在空间域中进行, SD 导数与源体位置参数之间的对应方程为:

$$\frac{\partial A^{\mathrm{SD}}}{\partial x}=C\cdot\left[\frac{\partial^2 \boldsymbol{f}}{\partial z^2}\left(\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial h}\right)^{-1}\left(\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial x}\frac{\partial^2 \boldsymbol{f}}{\partial x^2}+\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial y}\frac{\partial^2 \boldsymbol{f}}{\partial y\partial x}\right)-\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial h}\frac{\partial^3 \boldsymbol{f}}{\partial z^2\partial x}\right], \tag{4}$$

$$\frac{\partial A^{\mathrm{SD}}}{\partial y}=C\cdot\left[\frac{\partial^2 \boldsymbol{f}}{\partial z^2}\left(\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial h}\right)^{-1}\left(\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial x}\frac{\partial^2 \boldsymbol{f}}{\partial y\partial x}+\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial y}\frac{\partial^2 \boldsymbol{f}}{\partial y^2}\right)-\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial h}\frac{\partial^3 \boldsymbol{f}}{\partial z^2\partial y}\right], \tag{5}$$

$$\frac{\partial A^{\mathrm{SD}}}{\partial z}=C\cdot\left[\frac{\partial^2 \boldsymbol{f}}{\partial z^2}\left(\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial h}\right)^{-1}\left(\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial x}\frac{\partial^2 \boldsymbol{f}}{\partial z\partial x}+\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial y}\frac{\partial^2 \boldsymbol{f}}{\partial z\partial y}\right)-\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial h}\frac{\partial^3 \boldsymbol{f}}{\partial z^3}\right]; \tag{6}$$

$$C=k\Big/\left[\left(k\cdot\frac{\partial^2 f}{\partial z^2}\right)^2+\left(\frac{\partial f}{\partial h}\right)^2\right]。 \tag{7}$$

式(1)中 $\boldsymbol{B}$ 的导数很小, 可忽略不计。因此, 欧拉方程在 x、y 方向的一阶导数以及 z 方向的二阶导数为

$$(x-x_0)\frac{\partial^2 \boldsymbol{f}}{\partial x^2}+(y-y_0)\frac{\partial^2 \boldsymbol{f}}{\partial x\partial y}+(z-z_0)\frac{\partial^2 \boldsymbol{f}}{\partial x\partial z}=-(N+1)\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial x}, \tag{8}$$

$$(x-x_0)\frac{\partial^2 \boldsymbol{f}}{\partial x\partial y}+(y-y_0)\frac{\partial^2 \boldsymbol{f}}{\partial y^2}+(z-z_0)\frac{\partial^2 \boldsymbol{f}}{\partial y\partial z}=-(N+1)\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial y}, \tag{9}$$

$$(x-x_0)\frac{\partial^3 \boldsymbol{f}}{\partial x\partial z^2}+(y-y_0)\frac{\partial^3 \boldsymbol{f}}{\partial y\partial z^2}+(z-z_0)\frac{\partial^3 \boldsymbol{f}}{\partial z^3}=-(N+2)\frac{\partial^2 \boldsymbol{f}}{\partial z^2}。 \tag{10}$$

经过推导可得到:

$$\frac{\partial A^{\mathrm{SD}}}{\partial x}\cdot(x-x_0)+\frac{\partial A^{\mathrm{SD}}}{\partial y}\cdot(y-y_0)+\frac{\partial A^{\mathrm{SD}}}{\partial z}\cdot(z-z_0)=C\cdot\frac{\partial^2 \boldsymbol{f}}{\partial z^2}\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial h}。 \tag{11}$$

可通过 SD 滤波器导数组成的线性公式(式(11))来估算场源的位置坐标 (x_0,y_0,z_0)。为减少计算量并提升反演结果的精度, 其值小于平均值一半的观测点将不纳入计算。

通过式(11)计算的边界识别结果具有发散性。因此, 借助 SD 滤波器极大值与源体边界相对应的特征, 通过聚类设定边界识别结果的筛选标准: ①剔除孤立解。若某点与聚类中所有其他点的距离均小于窗口大小的一半, 则该点属于该聚类。②将经过前一步已聚焦的解归入更宽泛的聚类中, 同时实现聚类融合; 该步骤会将所有“水平中心间距小于所有聚类的最大水平置信半径”的聚类, 判定为属于同一聚类。③应用筛选器剔除解的数量少于给定值的聚类, 因为解的数量少于 3 个的聚类在统计上不显著。

2　理论模型试验

2.1　噪声测试

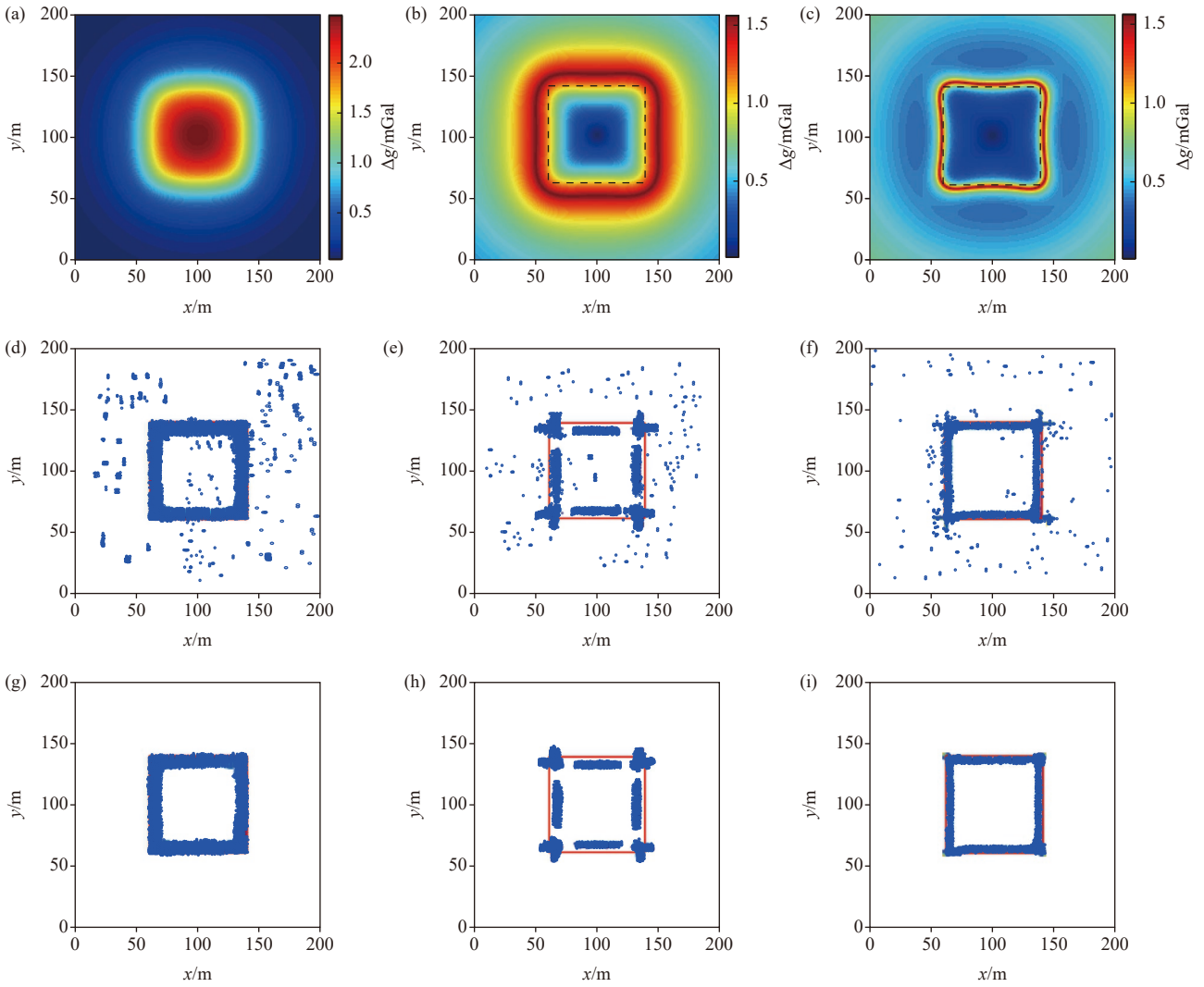
在无噪声和含噪声的重力异常上对该方法进行

测试。图 1a 展示了由顶部深度为 20 m、点距为 3 m 的棱柱体产生的合成重力异常。根据欧拉反褶积原理，该方法适用于单一源体的计算，窗口大小的选取准则为一个窗口仅包含场源的一个主要异常。窗口过小时，包含的源体信息较少，因此计算结果会不准确或发散。Reid 等[23] 提出反褶积窗口大小至少应为原始数据线间距或观测网格间距的 2 倍。因此，窗口大小设为 7×7。

为展示所提方法的应用效果，将 SD 滤波器的计算结果与归一化水平倾角（NHTA）滤波器（A^{NHTA}）的结果进行对比。基于 NHTA 的线性方程可表示为[19]：

$$\frac{\partial A^{\mathrm{NHTA}}}{\partial x}\cdot(x-x_0)+\frac{\partial A^{\mathrm{NHTA}}}{\partial y}\cdot(y-y_0)+\frac{\partial A^{\mathrm{NHTA}}}{\partial z}\cdot(z-z_0)=0, \tag{12}$$

$$A^{\mathrm{NHTA}}=\arctan\left(\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}\Big/\left|\frac{\partial f}{\partial z}\right|\right)。 \tag{13}$$



a—单个棱柱体产生的合成重力异常；b—(a) 中数据的归一化水平倾角（NHTA）；c—(a) 中数据的阶跃边缘检测（SD）；d—传统欧拉方法未筛选计算的源体水平位置；e—归一化水平倾角（NHTA）方法未筛选计算的源体水平位置；f—阶跃边缘检测（SD）方法未筛选计算的源体水平位置；g—传统欧拉方法经筛选计算的源体水平位置；h—归一化水平倾角（NHTA）方法经筛选计算的源体水平位置；i—阶跃边缘检测（SD）方法经筛选计算的源体水平位置

a—synthetic gravity anomaly generated by one prism; b—NHTA of the data in (a); c—SD of the data in (a); d—horizontal location of source computed by the traditional Euler method without screening; e—horizontal location of source computed by the NHTA without screening; f—horizontal location of source computed by the SD without screening; g—horizontal location of source computed by the traditional Euler method with screening; h—horizontal location of source computed by the NHTA with screening; i—horizontal location of source computed by the SD with screening

图 1　基于欧拉反褶积的单一棱柱体重力异常源定位及不同滤波方法对比

Fig. 1　Source location of gravity anomaly of single prism based on Euler deconvolution and comparison of different filtering methods

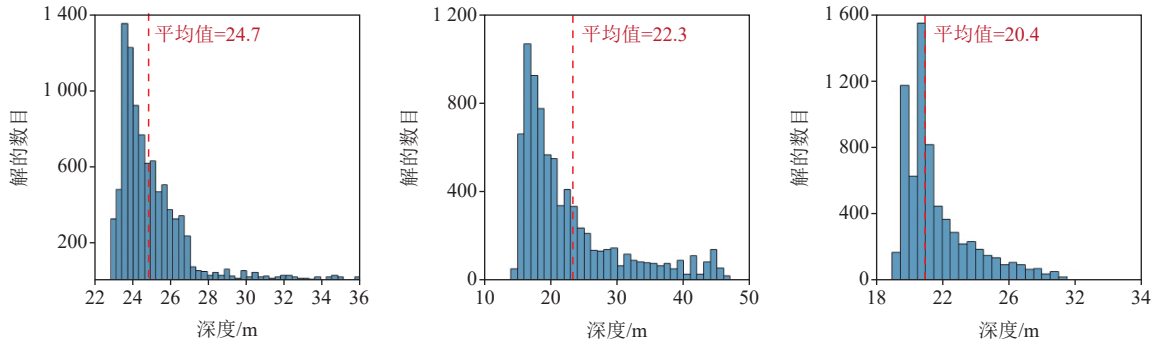
图 1b、c 分别展示了归一化水平倾角(NHTA)和阶跃边缘检测(SD)滤波器的结果, 其中真实边界用黑色虚线框标注。可见 SD 方法得到的边界更准确, 且分辨率更高。

图 1d~f 展示了窗口大小设为 7×7 时, 传统欧拉反褶积方法、NHTA 及 SD 法未进行筛选操作的源体水平位置结果。不同方法计算的源体水平分布均接近红色线条标注的真实位置, 但额外结果的存在会对实际数据的解释产生干扰, 因此需根据筛选准则对结果进行筛选, 以获得更准确的分布。

图 1g~i 展示了窗口大小设为 7×7、筛选网格设为点间距 2 倍时, 传统欧拉反褶积方法、NHTA 及 SD 滤波器经筛选后的结果。可见不同方法计算的源体水平分布均接近真实位置, 但传统欧拉反褶积方法的解收敛性欠佳; NHTA 的结果无法获取源体的完整形态; 而 SD 方法的解更清晰、收敛性更好, 且与源体真实水平位置完全一致。

2.2　深度测试

图 2 分别展示了欧拉方法、NHTA 及 SD 方法经筛选后的计算深度。传统欧拉方法计算的平均深度为 24.7 m, 大于场源的真实深度。NHTA 法计算的深度分布范围相对较广(15~25 m), 且均值深度接近真实深度。SD 法计算的深度主要分布在 18~22 m 之间, 均值深度为 20.4 m, 与该源体的真实埋藏深度吻合度较高。



(a) 传统欧拉反褶积法计算的深度　(b) NTHA法计算的深度　(c) SD法计算的深度

图 2　不同方法对单一棱柱体重力异常源的深度计算结果

Fig. 2　Comparison of depth calculation results of single prism gravity anomaly source by different methods

2.3　合成重力异常测试

图 3 给出了在 2 个模型合成重力异常上的测试结果。2 个棱柱体的顶部深度分别为 8 m 和 30 m (图 3a); 图 3b 为图 3a 数据的 NHTA 结果, 清晰显示出边界; 图 3c 为图 3a 数据的 SD 结果, 可见其对边界的识别分辨率更高。图 3d~f 分别为传统欧拉反褶积法、NHTA 法、SD 法反演得到的水平位置结果, 其中后两种方法均获得了源体来源的准确位置, 而传统欧拉反褶积法获取的位置信息无法反映源体来源的完整水平分布。图 3g~i 分别为传统欧拉反褶积法、NHTA 法、SD 法计算的深度, 结果表明 SD 法的精度最高。

2.4　抗噪声性能测试

由于 SD 滤波器的方程需要计算高阶导数, 因此需在含噪声数据上测试该方法的抗噪声能力。

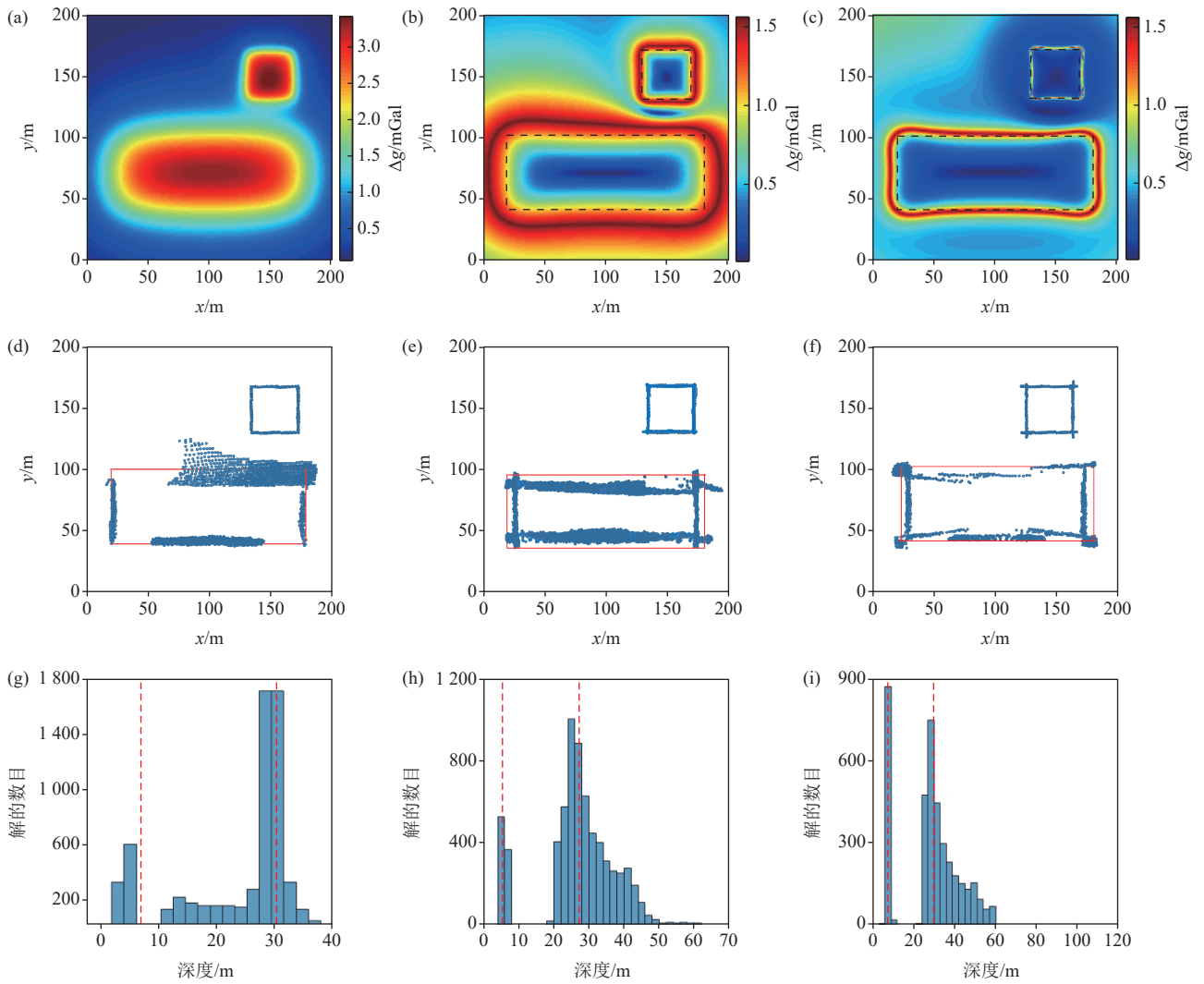
图 4a 展示了图 3a 数据被信噪比(SNR)为 70 的高斯噪声污染后的结果。该数据的 NHTA 结果与 SD 结果分别如图 4b、c 所示, 二者均能清晰呈现边界, 且 SD 法未放大噪声影响。图 4d~f 为传统欧拉法、NHTA 法、SD 法计算的源体水平分布, 其中 NHTA 法与 SD 法计算的水平位置结果仍能准确勾勒出源体的位置。图 4g~i 为欧拉法、NHTA 法、SD 法估算的深度, SD 法结果依旧稳定收敛且准确, 体现出其较强的抗噪声能力。

2.5　合成磁异常测试

为验证基于 SD 滤波器的欧拉法的可行性, 将该方法应用于合成磁异常数据的处理。图 5a 展示的 2 个棱柱体的顶部深度分别为 10 m 和 15 m, 倾角与偏角分别为 70°和 0°。图 5b 为经筛选后, SD 法计算得到的源体水平分布, 结果显示其位置与源体真实位置吻合度良好, 且对磁化方向不敏感。图 5c 为 SD 法计算的源体三维垂直位置, 图 5d 为 SD 法估算的深度, 结果显示 SD 法估算的 2 个棱柱体的深度分别为 9.5 m 和 14.3 m。SD 法计算的结果更稳定收敛且精度更高, 不受磁化方向的影响。

2.6　适用性测试

针对方法适用性, 采用球体(点源)、圆柱体(线源)和倾斜棱柱体(体源)叠加的模型, 图 6a 为埋深



a—添加高斯噪声后的合成重力异常; b—NHTA 法结果; c—SD 法结果; d—传统欧拉法计算的水平位置; e—NHTA 法计算的水平位置; f—SD 法计算的水平位置; g—传统欧拉法计算的深度; h—NHTA 法计算的深度; i—SD 法计算的深度

a—synthetic gravity anomaly adding Gaussian noise; b—the result of NHTA; c—the result of SD; d—the horizontal location computed by the traditional Euler method; e—the horizontal location computed by the NHTA method; f—the horizontal location computed by the SD method; g—the depth computed by the traditional Euler method; h—the depth computed by the NHTA method; i—the depth computed by the SD method

图 3　含高斯噪声双棱柱体重力异常源的边界识别、水平定位及深度反演对比

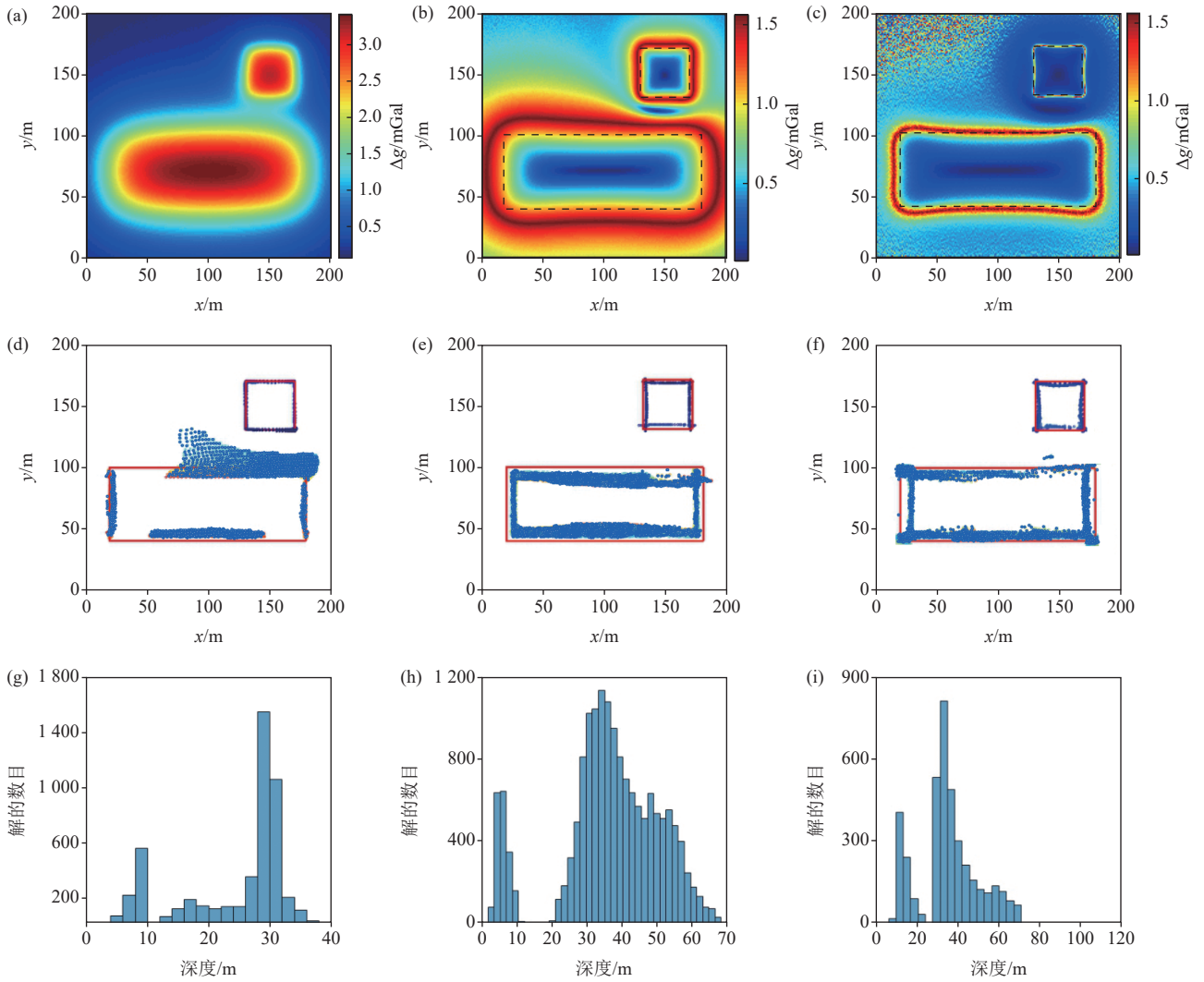
Fig. 3　Comparison of boundary recognition, horizontal location and depth inversion of gravity anomaly sources of double prisms with Gaussian noise

10 m 的球体和圆柱体以及埋深 15 m 的倾斜棱柱体叠加异常。

采用本文方法开展场源深度和位置的计算。图 6b、c 为地质体的场源位置水平和空间分布, 可以看出: 点源和线源的估算位置信息与实际位置吻合良好, 对于倾斜棱柱体, 由于存在异常向倾斜方向的伸展, 估计的场源位置向倾斜方向偏移, 但是依然与上顶面位置更加接近; 可见本文方法主要反映体源的上顶面位置信息, 这是由于本文方法是基于梯度信息的反演。图 6d 给出了估计深度信息, 可以看出对于复杂的叠加模型, 本文方法依旧可以得到稳健的结果。

3　应用实例

河北省迁安市铁矿区地处高变质带, 区内岩浆构造发育程度不一, 包括穿孔构造、流动构造及侵位变形构造。研究区内存在一系列卵形构造与韧性剪切带, 这些韧性剪切带叠加在椭圆形构造之上, 构成了太古宙高级变质区构造的主体构造格局(图 7)。迁安地区沉积变质型铁矿床形成于前寒武纪, 矿石自然类型主要为磁铁石英岩, 磁性参数高于其他岩性数十倍[24-26], 因此可以通过航空磁测和梯度测量进行铁矿体的反演推断。



a—2 个棱柱体生成的合成重力异常, *SNR*=70; b—(a) 中数据的 NHTA 结果; c—(a) 中数据的 SD 结果; d—传统欧拉法计算的水平位置; e—NHTA 法计算的水平位置; f—SD 法计算的水平位置; g—传统欧拉法计算的深度; h—NHTA 法计算的深度; i—SD 法计算的深度

a—synthetic gravity anomaly generated by two prisms, *SNR*=70; b—NHTA of the data in (a); c—SD of the data in (a); d—horizontal location computed by the traditional Euler method; e—horizontal location computed by the NHTA method; f—horizontal location computed by the SD method; g—depth computed by the traditional Euler method; h—depth computed by the NHTA method; i—depth computed by the SD method

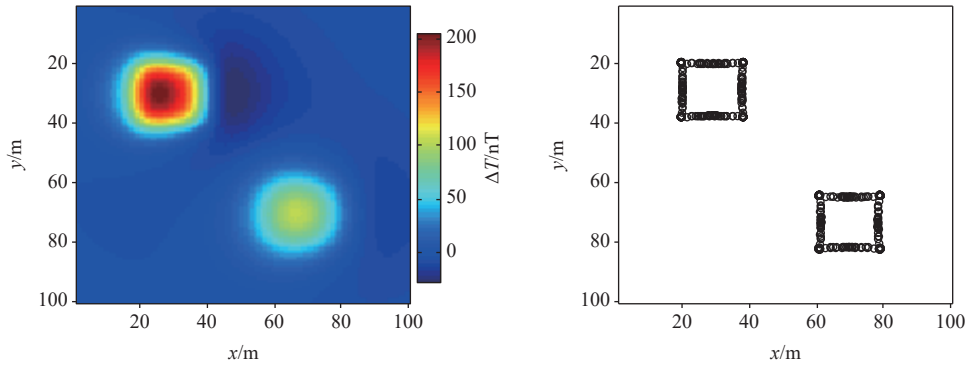
图 4　*SNR*=70 时双棱柱体重力异常源的定位与深度反演对比

Fig. 4　Comparison of location and depth inversion of double prism gravity anomaly sources at *SNR*=70

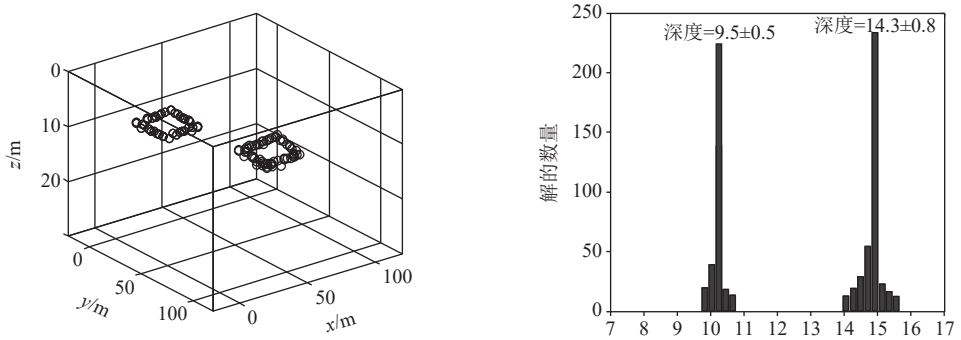
在该地区开展了航空磁测与梯度测量工作, 测量水平范围为 12 km×17 km, 平均飞行高度为 94 m, 数据间隔为 100 m。图 8a 展示了航空磁异常, 其测量误差为 2.3 nT。铁矿体所反映的高值异常呈 ES 向条带状分布, 且沿断裂构造发育。图 8b~d 分别展示了 x、y、z 3 个方向的磁梯度异常。梯度数据能更好地反映矿体的走向特征, 且水平分辨率更高。

将 SD 法应用于航空磁异常及其梯度数据, 以估算铁矿体的分布特征。由于边界识别方法敏感于磁化方向, 因此在边界识别之前需要对数据进行化极, 而 SD 场源位置的计算不需要化极。图 9a 展示了图 8a 数据经化极处理后的 SD 结果, 其中 SD 最大值对应矿体来源的水平分布范围, 用白线标注。图中可识别出 4 个铁矿体分布区, 它们沿断裂构造呈 ES 向展布。图 9b 展示了基于 SD 滤波器的欧拉方法估算的矿体位置与深度, 可见矿体主要沿 EW 向分布。

图 10 展示了研究区内 4 个推断矿体的分布情况, 结果显示西北侧矿体的埋藏顶部深度大于东南侧矿体。西北段的 1 号矿体深度约为 450 m, 而东南段矿体顶部深度约为 150~300 m。2 号矿体中段埋藏深度大于其两端(约 300~450 m)。3 号矿体延伸范围最大, 深度约为 450 m。4 号矿体位于研究区东北远端, 深度约为 400 m。



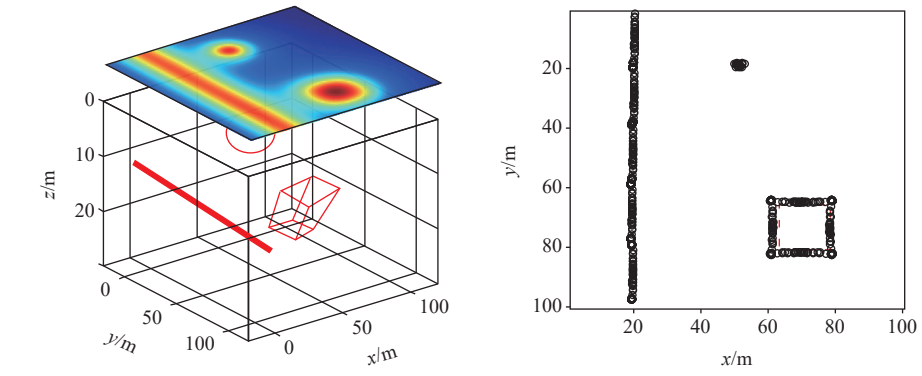
(a) 2个棱柱体生成的合成磁异常　　(b) SD法计算的水平位置



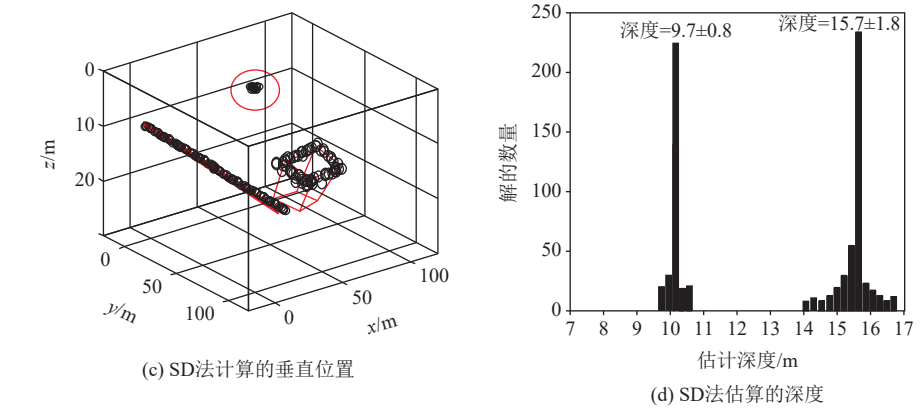
(c) SD法计算的垂直位置　　(d) SD法估算的深度

图 5　基于 SD 滤波器的欧拉法在双棱柱体合成磁异常源定位与深度估算中的可行性验证

Fig. 5　Feasibility verification of Euler method based on SD filter in location and depth estimation of synthetic magnetic anomaly sources of double prisms



(a) 球体、圆柱体及倾斜棱柱体的空间位置及叠加磁异常　　(b) SD法计算的水平位置



(c) SD法计算的垂直位置　　(d) SD法估算的深度

图 6　基于 SD 滤波器的欧拉法在复杂叠加磁异常源定位与深度估算中的适用性验证

Fig. 6　Applicability verification of Euler method based on SD filter in location and depth estimation of complex superimposed magnetic anomaly sources

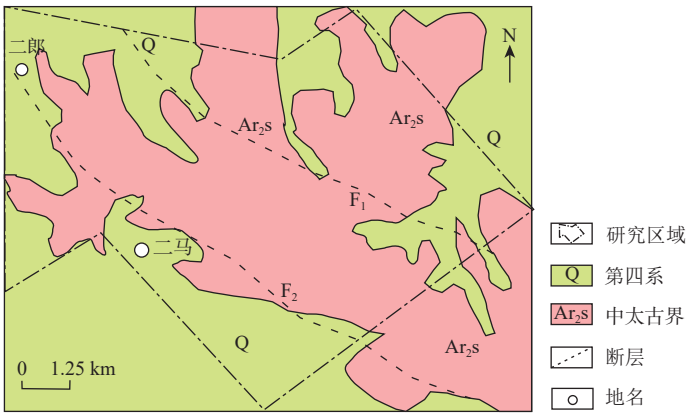


图 7　研究区地质概况

Fig. 7　Geology of the research area

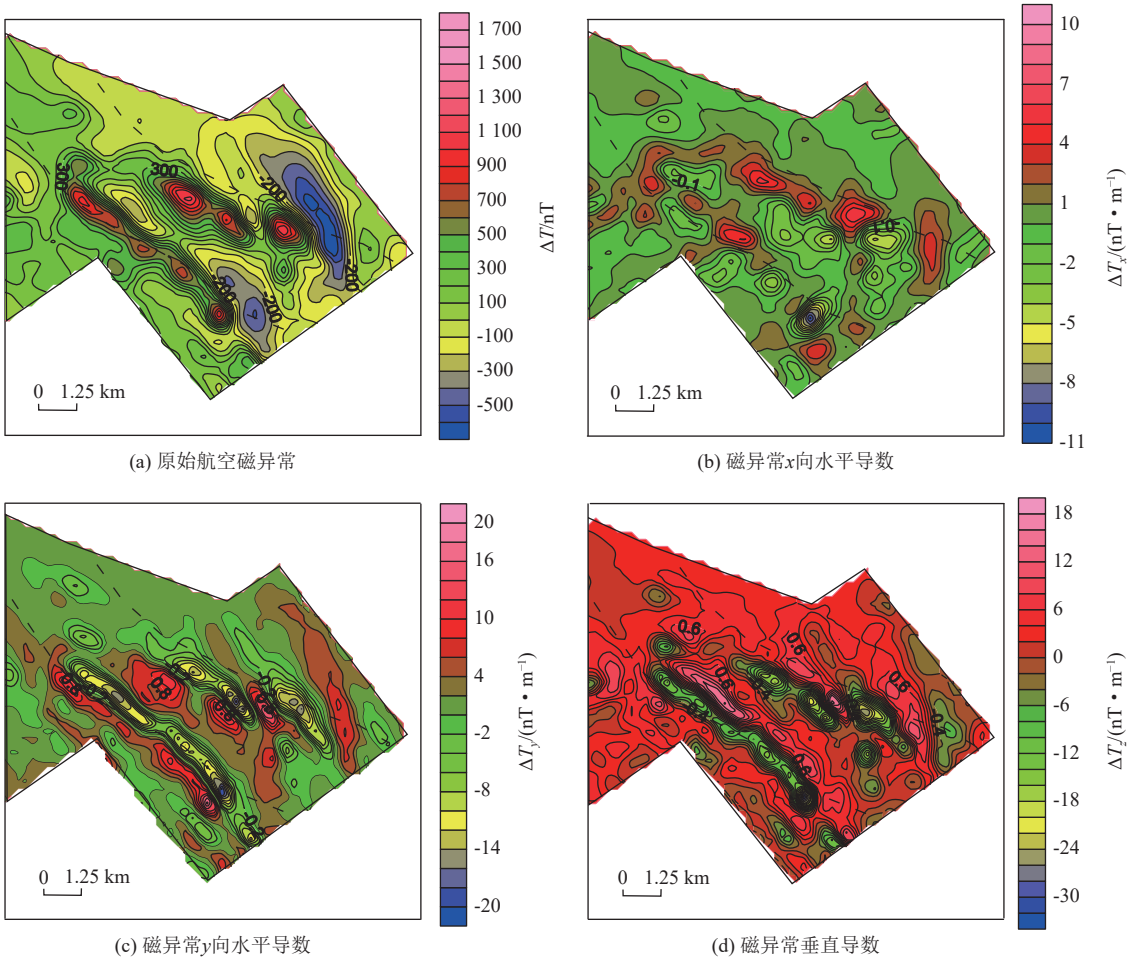


图 8　测区航空磁异常及其三维梯度分量特征

Fig. 8　Characteristic of measured aeromagnetic anomaly and its three-dimensional gradient components

4　结论

本研究建立了阶跃边缘检测(SD)滤波器与场源位置参数之间的线性关系, 从而能够获取更精确的位置信息。模型测试结果表明, SD 法计算的场源位置信息与实际位置一致, 且具有更高的分辨率和更准确的深度信息。将该方法应用于迁安市铁矿体分布的探测, 共圈定了 4 处矿体, 结果显示矿体分布与断裂走向基本吻合, 且沿断裂构造发育, 表明矿体主要受 NE 向断裂控制, 这与区域板块构造运动方向一致。该结果为未来的详细勘探工作提供了可靠依据。

本文提出的基于阶跃边缘检测滤波器的欧拉反褶积方法, 可用于航空重磁数据处理以获取地下矿

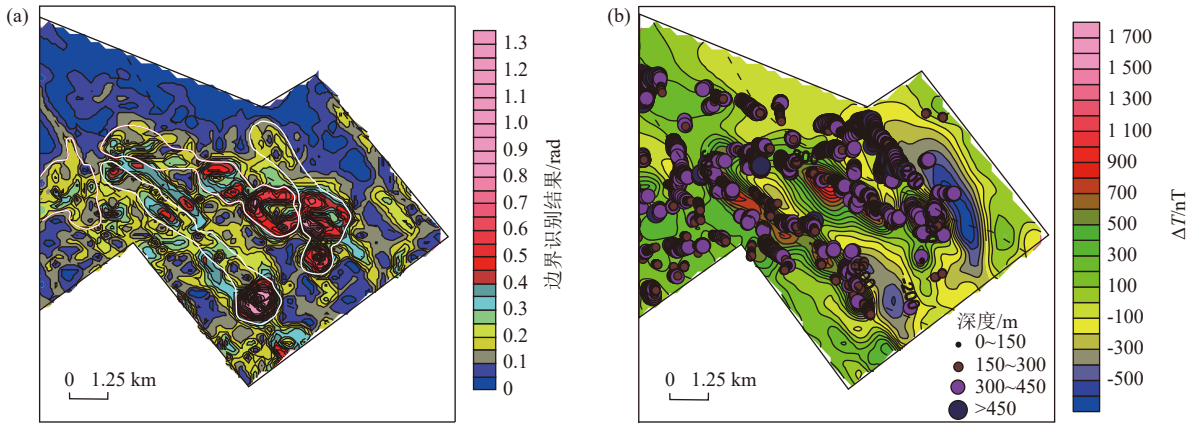


图 9　SD 滤波器的边界识别结果 (a) 及估算深度(b)

Fig. 9　Boundary recognition result by SD filter(a) and depth estimated by the SD method(b)

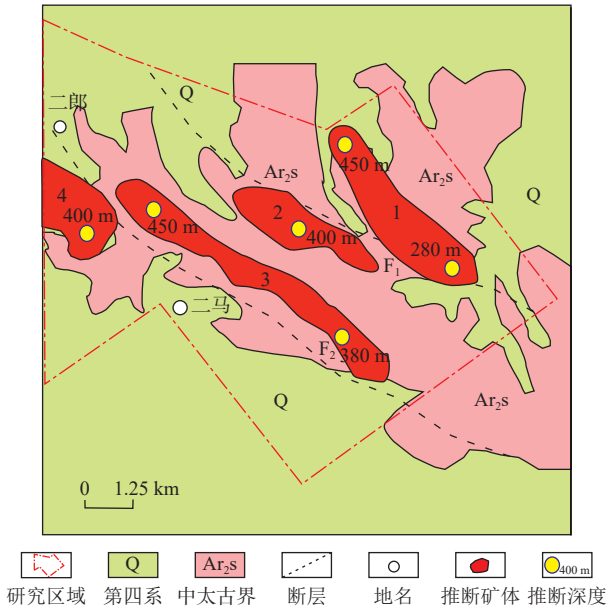


图 10　研究区推断矿体分布

Fig. 10　The distribution of inferred orebodies in the research area

体分布特征,具有良好的实际应用效果与前景。

参考文献(References):

[1] Debeglia N, Corpel J. Automatic 3-D interpretation of potential field data using analytic signal derivatives[J]. Geophysics, 1997, 62(1): 87−96.

[2] Thurston J B, Smith R S. Automatic conversion of magnetic data to depth, dip, and susceptibility contrast using the SPI (TM) method[J]. Geophysics, 1997, 62(3): 807−813.

[3] Hsu S K, Coppens D, Shyu C T. Depth to magnetic source using the generalized analytic signal[J]. Geophysics, 1998, 63(1): 194−203.

[4] Smith R S, Thurston J B, et al. iSPITM—The improved source parameter imaging method[J]. Geophysical Prospecting, 1998, 46(1): 31−37.

[5] Kirkham K. Investigations of a high-resolution aeromagnetic survey over the southeastern portion of the Illinois Basin[D]. Carbondale: Southern Illinois University of Carbondale, 2001.

[6] Salem A, Ravat D, Mushayandebvu M F, et al. Linearized least-squares method for interpretation of potential-field data from sources of simple geometry[J]. Geophysics, 2004, 69(3): 783−788.

[7] Salem A, Ravat D, Smith R, et al. Interpretation of magnetic data using an enhanced local wavenumber (ELW) method[J]. Geophysics, 2005, 70(2): L7−L12.

[8] Blakely R J. Potential theory in gravity and magnetic applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

[9] Thompson D T. EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data[J]. Geophysics, 1982, 47(1): 31−37.

[10] Fedi M. DEXP: A fast method to determine the depth and the structural index of potential fields sources[J]. Geophysics, 2007, 72(1): I1−I11.

[11] Fedi M, Florio G. Determination of the maximum-depth to potential field sources by a maximum structural index method[J]. Journal of Applied Geophysics, 2013, 88: 154−160.

[12] Miller H G, Singh V. Potential field tilt: A new concept for location of potential field sources[J]. Journal of Applied Geophysics, 1994, 32: 213−217.

[13] Verduzco B, Fairhead J D, Green C M. New insights into magnetic derivatives for structural mapping[J]. The Leading Edge, 2004, 23(2): 116−119.

[14] Wijns C, Perez C, Kowalczyk P. Theta map: Edge detection in magnetic data[J]. Geophysics, 2005, 70(4): 39−43.

[15] Cooper G R J, Cowan D R. Enhancing potential field data using filters based on the local phase[J]. Computers & Geosciences, 2006, 32: 1585−1591.

[16] Cooper G R J, Cowan D R. Edge enhancement of potential-field data using normalized statistics[J]. Geophysics, 2008, 73: H1−H4.

[17] Ma G Q, Li L L. Edge detection in potential fields with the normalized total horizontal derivative[J]. Computers & Geosciences, 2012, 41: 83−87.

[18] Ma G Q. Edge detection of potential field data using improved local phase filter[J]. Exploration Geophysics, 2013, 44: 36−41.

[19] Ma G Q. The application of extended Euler deconvolution method in the interpretation of potential field data[J]. Journal of Applied Geophysics, 2014, 107: 188−194.

[20] Ma G Q, Huang D, Liu C. Step-edge detection filters for the interpretation of potential field data[J]. Pure and Applied Geophysics, 2016, 173(3): 795−803.

[21] Reid A B, Allsop J M, Granser H, et al. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution[J]. Geophysics, 1990, 55: 80−91.

[22] Reid A B. Euler deconvolution[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007.

[23] Reid A B, Ebbing J, Webb S J. Avoidable Euler errors—The use and abuse of Euler deconvolution applied to potential fields[J]. Geophysical Prospecting, 2014, 62: 1162−1168.

[24] 江志强, 王建飞. 航磁梯度数据解释新方法在迁安铁矿勘探中的应用 [J]. 世界地质, 2017, 36(3): 947−953, 963.
Jiang Z Q, Wang J F. Application of new interpretation method of aeromagnetic gradient data in Qian'an iron ore exploration[J]. Global Geology, 2017, 36(3): 947−953, 963.

[25] 吕水, 李延康, 许曼, 等. 高精度磁法测量在隐伏磁铁矿勘查中的应用——以冀东迁安曹庄子地区为例 [J]. 中国地质调查, 2024, 11(4): 26−32.
Lly S, Li Y K, Xu M, et al. Application of high-precision magnetic survey in concealed magnetite exploration: A case study of Caozhuang area, Qian'an, eastern Hebei[J]. China Geological Survey, 2024, 11(4): 26−32.

[26] 汤绍合. 河北迁安变质铁矿床深部找矿突破及富矿成因探讨 [J]. 地质找矿论丛, 2012, 27(3): 271−277.
Tang S H. Deep prospecting breakthrough and genesis discussion of high-grade ore in metamorphic iron deposit in Qian'an, Hebei[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2012, 27(3): 271−277.

Research and application of Euler deconvolution based on the step edge identification function for airborne gravity and magnetic data

LI Li-Li [1, 2], MA Zi-Chao [1, 2], MA Guo-Qing [1, 2], MENG Qing-Fa [1, 2], MING Yan-Bo [3]

(1. *College of Geoexploration Science and Technology*, *Jilin University*, *Changchun* 130026, *China*; 2. *School of Earth Exploration Science and Technology*, *Jilin University*, *Changchun* 130026, *China*; 3. *Guangzhou Marine Geological Survey*, *Guangzhou* 511458, *China*)

Abstract: Airborne gravity and magnetic surveys, the step edge detection (SD) filter for gravity and magnetic data, comprising the ratios of derivatives of varied orders, enables clear identification of ore body boundaries. Deriving the Euler deconvolution equation based on the SD filter can reduce the dependence on the selection of the structural index, thereby mitigating the divergence of the traditional Euler method and obtaining more convergent results. Moreover, the maximum values of the SD filter and the ore body boundary characteristics can be used as screening criteria to enhance the extraction of the step characteristics of magnetic anomalies. This enhancement can further improve the accuracy of calculation results, thereby achieving simultaneous high-precision inversion of ore body boundaries and depths. The effectiveness of the Euler deconvolution method based on the SD filter (also referred to as the proposed method) was verified using simulated gravity and magnetic data. The simulation results demonstrate that compared to other methods, the SD filter revealed a slightly different horizontal distribution but more accurate depth information. Additionally, the proposed method was insensitive to the magnetization direction. To explore the iron ore resources in eastern Qian'an City, a significant iron ore prospect area in Hebei Province, China, the research team performed aeromagnetic and gradient surveys and calculated the distribution of iron ore bodies using the proposed method. The research results indicate that this method can be used for aviation airborne gravity and magnetic data processing, and has good practical application effects and prospects.

Key words: airborne gravity and magnetic data; step edge detection; Euler deconvolution; boundary of ore body; Qian'an iron mine

（本文编辑: 王萌, 沈效群）