

郭 华,王 平,谢汝宽. 航磁全轴梯度数据地质解释优势研究. 地球物理学进展, 2013, 28(5): 2688-2692, doi: 10. 6038/pg20130551.

GUO Hua, WANG Ping, XIE Ru-kuan. A Study of geological interpretation with the tri-axial aeromagnetic gradients. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2013, 28(5): 2688-2692, doi: 10. 6038/pg20130551.

航磁全轴梯度数据地质解释优势研究

郭 华<sup>1,2</sup>, 王 平<sup>1,2</sup>, 谢汝宽<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

**摘 要** 中国国土资源航空物探遥感中心成功研制出具有完全自主知识产权的航磁全轴梯度勘查系统,在中国的北部某地区进行了航磁全轴梯度测量飞行,获得了横向梯度、纵向梯度和垂向梯度数据. 本文简要介绍了测区地质概况、飞行方案及数据处理等,重点对梯度数据在断裂构造划分等方面进行了探讨,认为航磁梯度数据比总场数据更加清晰显示构造走向,并比较了实测和转换的垂向梯度数据,结果表明实测垂向梯度在反映地质体边界等方面具有一定优势.

**关键词** 航磁梯度, 地质解释, 构造走向

doi:10. 6038/pg20130551                      中图分类号 P631                      文献标识码 A

A Study of geological interpretation with the tri-axial aeromagnetic gradients

GUO Hua<sup>1,2</sup>, WANG Ping<sup>1,2</sup>, XIE Ru-kuan<sup>2</sup>

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for land and Resources, Beijing 100083, China)

**Abstract** China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for land and Resources successfully developed the tri-axial aeromagnetic gradient system with self-owned intellectual property rights, and tested at the north area in China, gained the magnetic gradients data of three directions. We briefly describe the survey area geology, flight programs and data processing, and discuss the geological interpretation with gradient data. The interpretation results show that the gradient data could more clearly reflect the structural trend and the measured vertical gradient data could better determine the geological boundaries than calculated vertical gradient data.

**Keywords** magnetic gradients, geological interpretation, structure trend

0 引 言

航空磁测可分为四个阶段,即地球磁场的总磁场强度或模量测量、地球磁场的总磁场强度模量的空间变化率或梯度测量、地球磁场的三个分量测量以及地球磁场三个分量的空间变化率的测量<sup>[1]</sup>. 国外开展航磁梯度测量和理论研究工作始于 20 世纪 60 年代. 20 世纪 70 年代中期,加拿大开展了航磁垂

直梯度测量,主要进行航磁垂直梯度测量用于固体矿床勘查. 20 世纪 80 年初美国开展了航磁水平梯度测量工作进行油气勘查,均取得一些好的效果. 20 世纪 80 年代末非洲研制成全轴磁梯度测量系统,在寻找贵金属和固体矿产的勘查中. 20 世纪 90 年代,国外的主要航空物探公司都研发或集成了航磁梯度测量系统,在金属矿、油气勘查等方面获得了较好的应用效果. 国内原冶金部地球物理勘查院在 20 世纪

80 年代初引进了加拿大吊舱式航磁垂直梯度测量的仪器,进行了航磁垂向梯度测量;核工业航测遥感中心在 21 世纪初引进加拿大航磁梯度测量系统,主要对放射性元素开展了梯度测量。

在国家高技术研究发展计划(863 计划)“航空地球物理勘查技术系统”重大项目资助下,中国国土资源航空物探遥感中心(简称航遥中心)成功研制出具有完全自主知识产权的航磁全轴梯度勘查系统,成功实施在 Y-12 飞机上的改装,通过了试验飞行与关键性指标测试,测试表明该系统具有非常好的同步特性、一致性与长期稳定性以及补偿精度<sup>[2]</sup>,其主要性能指标达到或优于国际先进水平,证明我国已经具备开展第二阶段航磁测量飞行工作的能力。2010 年,航遥中心在某中国北方某地区成功实施了航磁全轴梯度系统示范生产,获得了约 13000 km 的航磁全轴梯度数据。梯度数据相对于总场数据,提供了更丰富的异常信息,具有更高的异常分辨力。本文利用我国自主研发的首套航磁全轴梯度系统示范生产的梯度数据,从横向梯度数据如何较清晰地显示地质体构造走向、垂向梯度数据较清晰显示断异常体边界位置等方面进行讨论,总结梯度数据在地质解释方面的优势。

1 测区及工作概况

1.1 地质概况

研究区域的地层包括:第四系,磁性较弱,主要包括现代河床、河漫滩阶地之冲积砾土、砂砾石层,以及现代残、坡积层,还有残存的阶地之冲积砂土、砂砾石层等;上侏罗统上兴安岭组,岩性主要为酸性、中酸性绿灰色熔凝灰砾岩,含砾凝灰岩,绿灰或灰黄色熔凝灰砾岩夹薄层凝灰岩,浅绿灰色含砾凝灰岩,底部有一层凝灰砾岩;上石炭统林西组,主要是一套轻度变质、厚度巨大的泥砂沉积层。此处还发育燕山中期花岗岩体。地质略图见图 1(图中红色矩形框为研究区域)。

1.2 飞行方案及数据处理

由于我国目前尚无航磁全轴梯度测量的规范,飞行方案设计要求按《航空磁测技术规范》执行。所选区域内最高海拔 1848 m,最低海拔 683 m,平均海拔 1284 m 左右。综合考虑测区内的地质构造走向,本次测区飞行航向 150°↔330°,测线间距 500 m,基本沿地形起伏飞行。

1.2.1 总场数据处理

航磁总场数据处理按照《航空磁测技术规范》进

行,包括正常场校正、日变校正、调平等。调平方法主要利用切割线调平<sup>[3-5]</sup>和微调平<sup>[6,7]</sup>。

1.2.2 梯度数据处理

磁探头安置结构见图 2,飞机两个翼各安装一个探头、尾部竖直安装两个探头。左、右,后上、后下四个探头分别可测得  $T_L$ 、 $T_R$ 、 $T_U$ 、 $T_D$  四个地磁场强度,单位为 nT,通过四道磁力仪间地磁场强度的差值近似计算梯度,公式为

$$\frac{\partial T}{\partial x} \approx \frac{T_L - T_R}{\Delta x}, \tag{1}$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} \approx \frac{(T_L + T_R)/2 - T_D}{\Delta y}, \tag{2}$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \approx \frac{T_D - T_U}{\Delta z}, \tag{3}$$

其中  $\partial T/\partial x$ 、 $\partial T/\partial y$ 、 $\partial T/\partial z$  分别为横向梯度、纵向梯度和垂向梯度数据,单位为  $nT/m$ ,  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$  分别为磁探头的横向间距、纵向间距和垂向间距,单位为 m。

横向梯度和纵向梯度数据因为飞行方向相反时,会存在正负值变化,规定飞机航向在 0°~90°或 270°~360°时为测线或切割线的正方向,当沿反方向飞行时,实测梯度绝对值不变,正负号刚好相反。为此,需要对实测梯度方向进行归一化调整,沿测线反方向飞行时的方向归一化公式见式 4。此外,还需要对梯度数据进行调平处理<sup>[8]</sup>。公式为

$$\frac{\partial T}{\partial x} \approx -\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y} \approx -\frac{\partial T}{\partial y}. \tag{4}$$

2 资料解释

航磁  $\Delta T$  异常反映断裂构造的特征形式主要有<sup>[9-13]</sup>:

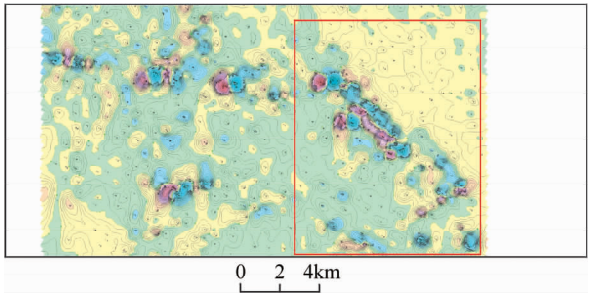
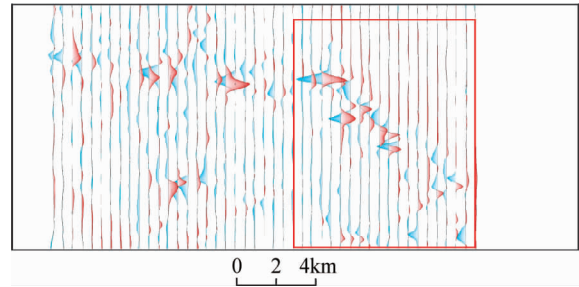
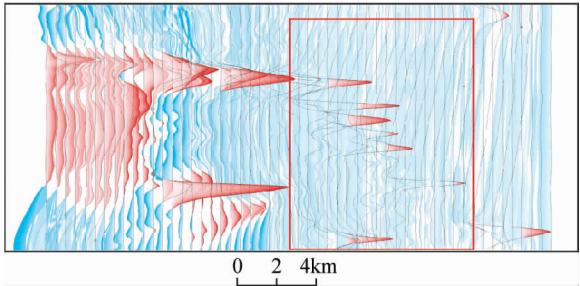
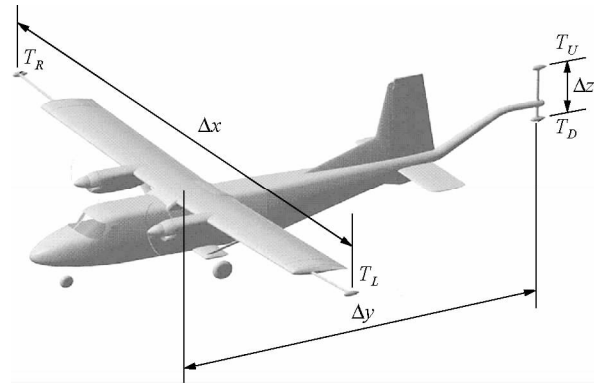
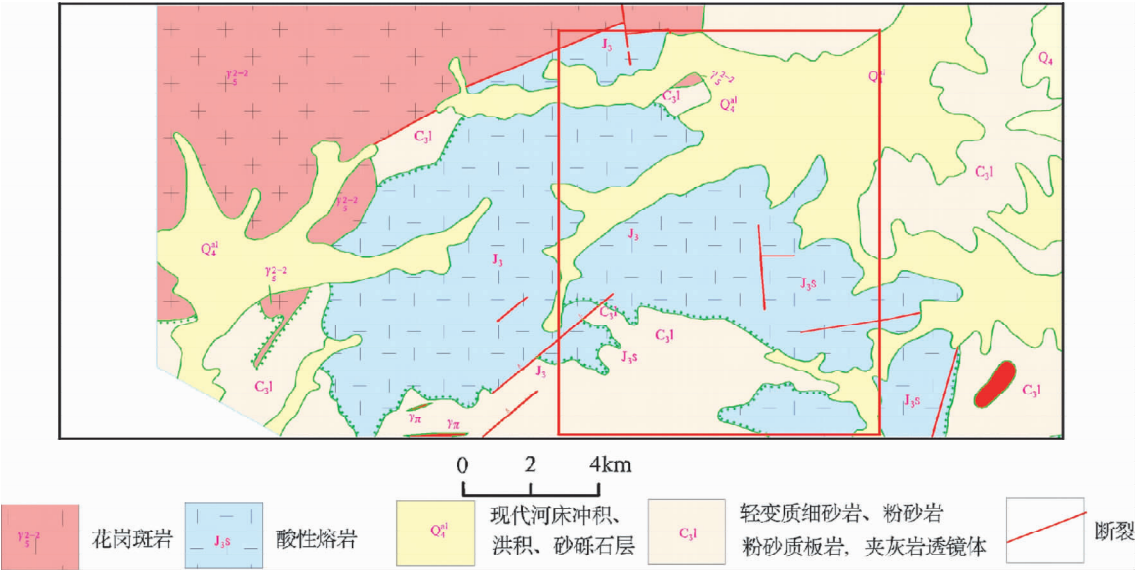
(1)不同区域磁场特征的分界线,它一般为深大断裂和大断裂的反映,断裂两侧不同磁场特征多反映基岩性质的差异,可能预示断裂两侧构造演化的不同;

(2)磁异常的梯度带,它往往是不同性质、不同深度磁性体的边界,以垂直运动为主的断裂或水平位移不大的断裂多表现此种异常特征;

(3)磁异常的错动线,它是断裂的另一种表现形式,多表明沿断裂两侧基岩或地质体发生了水平位移;

(4)线性磁异常带、串珠状磁异常分布带等。

航磁  $\Delta T$  异常是多源磁性体的综合反映,由于相邻磁性体影响和干扰,往往对准确确定断裂位置带来影响,造成一定的偏差。当测线方向和构造的走



向相似时,容易导致对构造认识的不准确.而在航磁梯度场图上,梯度异常信息清晰可见,利用梯度异常能较好地确定断裂位置.航磁梯度是由不同探头间测量值的差值所求得,当测线与构造走向相似时,构

造对不同探头的影响不一样,不同探头组合之间可以测得水平梯度的微弱变化,获得更多磁场信息.利用梯度数据推断地质构造的原则主要有<sup>[14-16]</sup>:

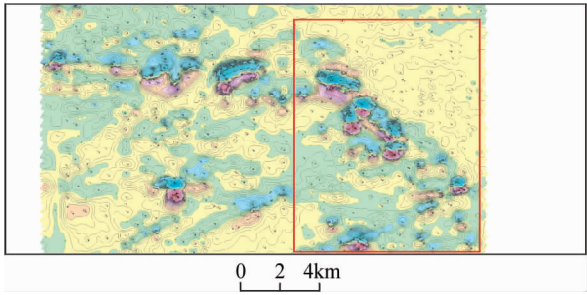


图 6 纵向水平梯度平面等值线图  
Fig. 6 Longitudinal gradient contour

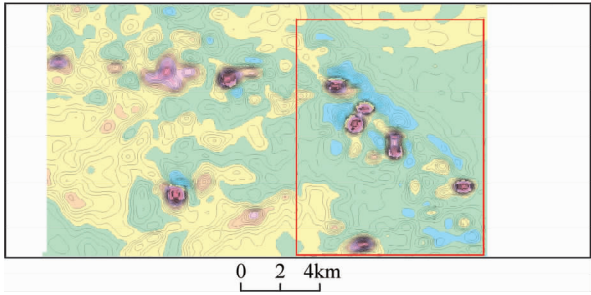


图 7 垂向梯度平面等值线图  
Fig. 7 Vertical gradient contour

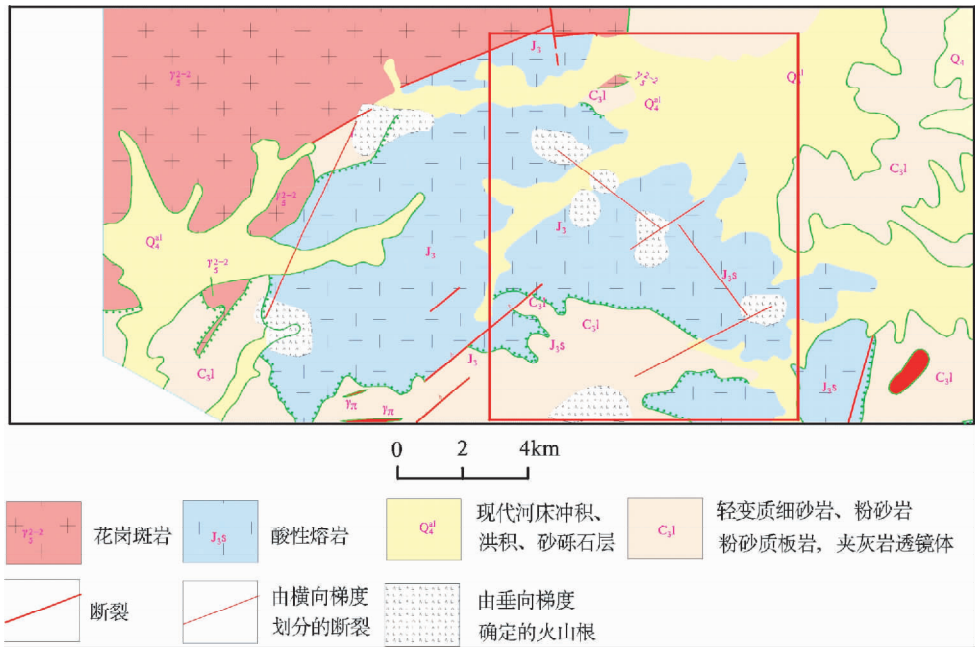


图 8 地质构造解释示意图  
Fig. 8 Geological interpretation result

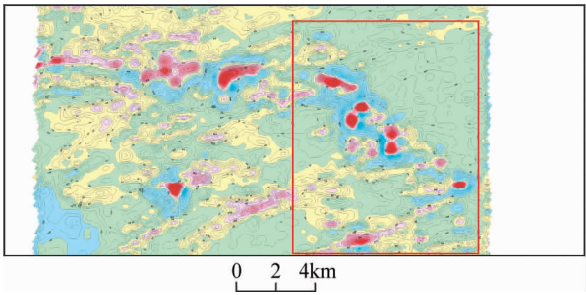


图 9  $\Delta T$  化极垂向一阶导数等值线平面等值线图  
Fig. 9 Vertical gradient transformed from RTP total field

- (1)垂向梯度的零等值线基本上对应着地质体的边界位置处,因此在推断地质体的边界位置处时,主要利用的垂向梯度等值线;
- (2)横向梯度的零等值线基本上对应着的是地

质体的中心位置处,横向梯度的最大值和最小值基本上分别对应着地质体的边界位置处。

在对比航磁总场平剖图及横向梯度平剖图时,航磁总场平剖图的红色区域框内反映的航磁异常显示为一些孤立的异常点(图 3),对于构造的反映并不明显,而横向梯度平剖图中反映出了近北西向构造异常(图 4)。此外,横向梯度及纵向梯度的平面等值线图对该构造的反映皆较明显(图 5、图 6)。

### 2.1 利用垂向梯度圈定地质体边界

该区域某些酸性熔岩类具有次火山岩的特征,且存在断裂构造,初步推断此区域有次火山岩发育。图 7 的垂向梯度等值线图中存在明显的正异常圈闭,推断由中酸性次火山岩引起,且推断为火山根,将垂向梯度等值线的零值线推断为火山根的边界位置。火山根的存在伴随着断裂构造的发育,因为涌溢

出来的岩浆岩要沿着断裂通道进行运移、涌出、喷发,因此利用横向梯度、纵向梯度数据进行了断裂构造的划分.图 8 为最终利用航磁梯度数据推断的断裂和火山根位置图.图 9 是利用  $\Delta T$  数据化极垂向一阶导数平面等值线图,与实测梯度(图 7)相比,实测垂向梯度的火山根异常形态近似于圆形圈闭,而图 9 中的垂向梯度的火山根异常形态为长条状.该差别可能是由于测线间距较大、化极及一阶导数处理存在误差.

3 结 论

通过实测横向梯度数据可以看出,梯度数据可以将受到背景场干扰的地质体的构造走向较清晰地反映出来.垂向梯度数据的线性零值线往往反映地质体边界,通过实测垂向梯度数据推断地质体边界位置具有一定优势.总场数据受到背景场的干扰,虽然通过数据转换处理可能突出地质体边界,但是经过滤波处理的总场数据在反映实际地质体上会存在一定的误差.

参 考 文 献 (References):

[1] 张昌达. 航空磁力梯度张量测量—航空磁测技术的最新进展[J]. 工程地球物理学报, 2006, 3(5): 354-361.  
Zhang C D. Airborne tensor magnetic gradiometry—The latest progress of airborne magnetometric technology[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics (in Chinese), 2006, 3(5): 354-361.

[2] 骆遥, 段树岭, 王金龙, 等. AGS-863 航磁全轴梯度勘查系统关键性指标测试[J]. 物探与化探, 2011, 35(5): 620-625.  
Luo Y, Duan S L, Wang J L, *et al.* Key indicators testing for AGS-863 three axis airborne magnetic gradiometer [J]. Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese), 2011, 35(5): 620-625.

[3] Foster M R, Jines W R, Van Der Weg K. Statistical estimation of systematic errors at intersections of lines of aeromagnetic Survey Data[J]. Journal of Geophysical Research, 1970, 75 (8): 1507-1511.

[4] Yarger H L, Robertson R R, Wentland R L. Diurnal drift removal from aeromagnetic data using least squares [J]. Geophysics, 1978, 43(6): 1148-1156.

[5] Green A A. A comparison of adjustment procedures for leveling aeromagnetic survey data[J]. Geophysics, 1983, 48(6): 745-753.

[6] Minty B R S. Simple micro-leveling for aeromagnetic data[J]. Exploration Geophysics, 1991, 22(3): 591-592.

[7] Ferraccioli F, Gambetta M, Bozzo E. Microlevelling procedures applied to regional aeromagnetic data: An example from the Transantarctic Mountains (Antarctica) [J]. Geophysical Prospecting, 1998, 46(2): 177-196.

[8] 骆遥, 王平, 段树岭, 等. 航磁垂直梯度调整  $\Delta T$  水平方法研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(11): 3854-3861.  
Luo Y, Wang P, Duan S L, *et al.* Leveling total field aeromagnetic data with measured vertical gradient[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2012, 55(11): 3854-3861.

[9] 李云平, 吴时国, 韩文功, 等. 合肥盆地和郯庐断裂带南段深部地球物理特征研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(1): 115-122.  
Li Y P, Wu S G, Han W G, *et al.* A study on geophysical features of deep structures of the Hefei Basin and the southern Tan-Lu fault zone[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(1): 115-122.

[10] 孙晓猛, 刘财, 朱德丰, 等. 大兴安岭西坡德尔布干断裂地球物理特征与构造属性[J]. 地球物理学报, 2011, 54(2): 433-440.  
Sun X M, Liu C, Zhu D F, *et al.* Geophysical features and tectonic attribute of the Derbugan fault in the western slope of Da Hinggan Ling mountains[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2011, 54(2): 433-440.

[11] 郝天眺, 黄松, 徐亚, 等. 关于黄海深部构造的地球物理认识[J]. 地球物理学报, 2010, 53(6): 1315-1326.  
Hao T Y, Huang S, Xu Y, *et al.* Geophysical understandings on deep structure in Yellow Sea[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2010, 53(6): 1315-1326.

[12] 张交东, 杨长春, 刘成斋, 等. 郯庐断裂南段走滑和伸展断裂的深部结构及位置关系[J]. 地球物理学报, 2010, 53(4): 864-873.  
Zhang J D, Yang C C, Liu C Z, *et al.* The deep structures of strike-slip and extension faults and their composite relationship in the southern segment of Tanlu fault zone[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2010, 53(4): 864-873.

[13] 邵建波, 范继璋. 老岭成矿带航磁地质研究[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(2): 449-454.  
Shao J B, Fan J Z. Aeromagnetic research of Laoling mineralization belt[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2004, 19(2): 449-454.

[14] 骆燕, 李晓禄, 蔡文良, 等. 潮水地区航磁梯度初步分析[J]. 东华理工学院学报, 2007, 30(2): 164-170.  
Luo Y, Li X L, Cai W L, *et al.* Preliminary analysis of aeromagnetic gradient experimental flight data in Chaoshui Basin[J]. Journal of East China Institute of Technology (in Chinese), 2007, 30(2): 164-170.

[15] 管志宁, 侯俊胜, 姚长利. 航磁梯度资料在金矿地质填图和成矿预测中的应用[J]. 现代地质, 1996, 10(2): 239-249.  
Guan Z N, Hou J S, Yao C L. Application of aeromagnetic gradient data in geological mapping and metallogenetic prognosis of gold deposits [J]. Geoscience (in Chinese), 1996, 10(2): 239-249.

[16] 李晓禄, 常树帅. 航磁梯度测量及其在砂岩型铀矿勘查中的应用初探[J]. 铀矿地质, 2009, 25(6): 355-360.  
Li X L, Chang S S. Aeromagnetic gradient survey and elementary application in sandstone type uranium deposits prospecting[J]. Uranium Geology (in Chinese), 2009, 25 (6): 355-360.