

doi: 10. 11720/wtyht. 2021. 1201

杨玉勤,张翔,石连成,等. 砂岩型铀矿航磁微弱异常提取方法[J]. 物探与化探,2021,45(1):29-36. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2021. 1201](http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1201)
Yang Y Q,Zhang X,Shi L C,et al. A study of the method of extracting aeromagnetic weak anomalies from sandstone-type uranium deposits[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2021,45(1):29-36. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2021. 1201](http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1201)

砂岩型铀矿航磁微弱异常提取方法

杨玉勤^{1,2},张翔^{1,2},石连成^{1,2},邓德伟^{1,2}

(1. 核工业航测遥感中心,河北 石家庄 050002;2. 河北省航空探测与遥感技术重点实验室,河北 石家庄 050002)

摘 要:在中—新生代盆地区,受盆地盖层影响,砂岩型铀矿的航磁 ΔT 异常信息不明显,这直接影响利用航磁资料寻找砂岩型铀矿的应用效果。开展盆地内航磁微弱信息提取方法的研究,能充分发挥航磁资料在砂岩型铀矿勘查中的作用。本文总结了砂岩型铀矿形成微弱航磁异常的机理,分析界定了航磁微弱磁异常的定量范围,以 1:5 万高精度航磁数据为基础,通过对内蒙古西部已发现的层间氧化带砂岩型铀矿床航磁特征进行分析研究,总结出一套利用高通滤波提取砂岩型铀矿上方航磁微弱信息的方法,使用该方法在内蒙古二连盆地某铀成矿带开展了航磁微弱异常提取实验,在 3 个已发现的氧化带砂岩型铀矿上方提取出航磁微弱异常信息,为利用高精度航磁测量方法在中—新生代盆地区寻找砂岩型铀矿探索出一条新途径。

关键词:层间氧化带砂岩型铀矿;航磁;弱异常提取

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2021)01-0029-08

0 引言

砂岩型铀矿的航磁微弱信息研究一直是航空物探领域重要课题之一,前人进行过多项研究工作^[1-6],认为多数砂岩型铀矿上方有微弱航磁异常。但在中—新生代盆地区,受盆地盖层影响,砂岩型铀矿的航磁异常不明显,直接影响了利用航磁资料在中—新生代盆内寻找砂岩型铀矿的应用效果,需寻找总结有效提取航磁微弱异常信息的方法。在我国北方中—新生代盆地,已开展了多年以寻找砂岩型铀矿为目的的高精度航磁、航放综合测量工作,依据最新的航磁资料,进一步开展砂岩型铀矿的航磁微弱信息研究,对发挥高精度航磁资料在砂岩型铀矿勘查中的作用具有非常重要的意义。

1 研究依据

许多研究者曾开展过利用航磁微(弱)磁异常寻找油气和金属矿产等工作,进行了多种提取与油

气田、金属矿及构造有关的微(弱)磁异常的方法研究^[7-13]。

在铀矿勘探领域,某些铀矿(砂岩型和热液型)在形成与富集过程中,可使其周围铁磁性矿物遭受破坏或交代,使矿化段呈现弱磁性的规律。为此,国内外很多研究者在砂岩型铀矿的航磁微弱磁异常的形成机理和提取方法等方面进行了多项研究^[1-6,14-17]。俄罗斯研究者于 1995~1998 年,在古河床内与透水层中的层间氧化带尖灭界线有关的巴尔克夫铀矿床上研究发现,高精度航磁 ΔT 出现幅值为 $\pm 3 \sim \pm 12$ nT 的高频异常^[18]。国内学者在研究伊犁盆地砂岩型铀矿航磁特征时,发现在 3 个已知铀矿床上方均存在清晰的航磁弱异常,这些弱磁异常叠加在宽缓负异常背景场上,幅值为 $5 \sim 25$ nT^[1-2]。通过对比可地浸砂岩型铀矿(伊犁某矿)氧化带、氧化还原过渡带和还原带土壤铁磁性矿物含量的变化(图 1),对砂岩型铀矿上方微磁异常形成的机理进行了探讨,认为氧化还原过渡带地表土壤铁磁性矿物含量明显增高,使相应地段磁性增强,从而在砂岩型铀矿的氧化还原过渡带(铀矿体)范围内产生微

收稿日期: 2020-04-22; 修回日期: 2020-07-05

基金项目: 中国核工业地质局项目“内蒙古二连浩特地区 1:5 万航空物探调查”(201811-1)

作者简介: 杨玉勤(1965-),男,河北正定县人,正高级工程师,长期从事航空物探测量的资料解释工作。Email:498416908@qq.com

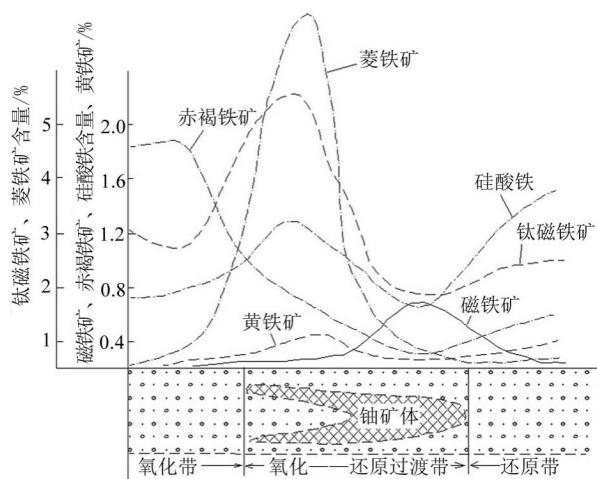


图1 伊犁某矿床铀矿体地球化学分带与地表土壤含铁矿物分布^[1]

Fig.1 The map of geochemical zoning of ore bodies and distribution of iron minerals in surface soil of Yili uranium deposit^[1]

弱磁异常。

2 航磁微弱磁异常的界定

虽然在利用航磁弱异常区寻找油气和砂岩型铀矿方面已开展了很多研究工作,但现有的规范和资料并没有对航磁微弱磁异常进行严格定义和量化。现行航空磁测技术规范(DZ/T 0142-2010)中在规范航磁局部异常的确定原则时,规定局部磁场变化大于或等于测量总精度的2倍,并且与一定的地质现象联系时,即为局部异常;同时还要求对小于测量总精度的2倍,但与地质任务关系密切的“弱异常”也应加以分析。航磁测量规范还要求,航空磁测磁力仪动态噪声水平(S_i)最低要求要 ≤ 0.2 nT(三级数据),把3倍的 S_i 作为剖面提取异常的依据。所以认为对于合格的航磁测量数据,出现 >0.6 nT的异常都是可信的。由此可以将 ≥ 0.6 nT且 ≤ 2 倍测量精度的航磁异常定义为微弱异常。根据近年来多个测区1:5万高精度航磁测量的测量精度统计结果来看,全测区的航磁测量总精度一般在1.5~2.9 nT,多数在1.8 nT左右。如果除去基岩出露区数据,只使用航磁数据变化较小的盆地区数据计算航磁测量精度,其精度会更小。所以2倍测量精度最高可界定在6 nT。

通过以上分析认为,对合格的航磁数据而言,可以把 $\geq 3S_i$ (即 ≥ 0.6 nT)且小于2倍测量总精度(约6 nT)界定为航磁微弱异常的范围,即把0.6~6 nT的异常界定为航磁微弱异常。

在重磁弱异常可信度的评价方面,刘云祥经过统计研究发现,随着弱异常规模增大和规律性增加,即使幅度在1~2.5倍异常总精度,其可信度也会大大增强^[18]。当前使用的高灵敏度氦光泵磁力仪进行的高精度航磁测量,完全可以探测到这些微弱磁异常。所以利用航磁测量数据进行砂岩型铀矿成矿预测的关键是如何将高频低幅0.6~6 nT的微弱磁异常提取出来。

3 航磁微弱异常特征及提取方法

为了对砂岩型铀矿的航磁微弱异常进行分析研究,本次以最新的1:5万高精度航磁数据为基础,内蒙古中西部已发现的砂岩型铀矿为研究对象,对提取砂岩型铀矿上方微弱磁异常的方法进行了探索实验。

3.1 内蒙古西部某铀矿航磁 ΔT 异常特征

内蒙古西部某铀矿床为层间氧化带型铀矿,据普查资料显示,该区域巴音戈壁组上段红色和黄色层间氧化带发育,呈不规则的带状,近EW向展布,前锋线为不规则蛇曲状。矿区自北向南为完全氧化带—氧化还原过渡带—还原带。钻探查明的矿体和矿化范围集中分布在氧化还原过渡带内^[19](图2)。

从矿区航磁 ΔT 剖面平面图上可以看出,由于矿床所在盆地中—新生界盖层均为无磁或弱磁性,基底为古生界弱磁性,矿床区域位于航磁 ΔT 负磁异常中,航磁异常仅表现为淹没在负背景场中向零值线方向的缓状突起,航磁基础图件上异常表现不十分明显。

将航磁剖面平面图纵向比例尺放大后,矿床所在的氧化还原过渡带能够在连续数条剖面上显示有弱磁异常存在(图3)。为突出显示这些微弱磁异常信息,需要寻找一种提取这类异常信息的有效方法。

3.2 航磁弱磁异常提取方法

砂岩型铀矿产于中—新生代盆地,由于盆地盖层一般为无磁(或弱磁),区域磁场通常表现为平缓的负背景场(或正背景场)。砂岩型铀矿引起的航磁弱异常一般为叠加在平缓磁场背景上的低幅高频异常,航磁基础图上一般没有明显的异常显示。提取低幅高频异常较为有效的一般方法是选用合适的滤波器和滤波窗口对原始磁异常数据进行高通滤波,能够滤掉低频、突出高频的信息。

3.2.1 滤波器选择

首先建立已知铀矿及其外围航磁数据库,数据

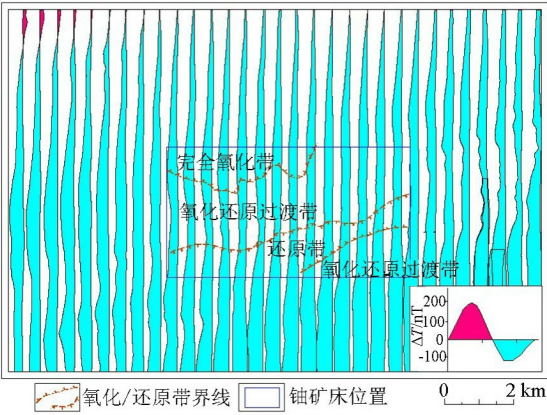


图2 内蒙古西部某铀矿航磁剖面平面
Fig.2 The aeromagnetic map of uranium deposit in the west of Inner Mongolia

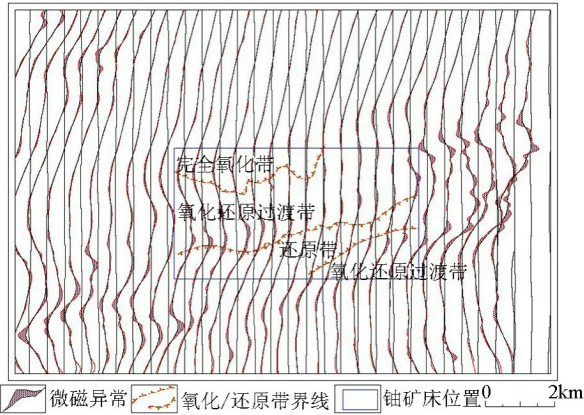


图3 内蒙古西部某铀矿航磁剖面平面(纵向比例放大后)

Fig.3 The aeromagnetic map of uranium deposit in the west of Inner Mongolia (large vertical scale)

范围覆盖已知的氧化带、氧化还原过渡带(见矿区域)及还原带。选取穿过矿区的L3790测线航磁数据进行滤波器选择对比实验。共选择了高通、巴特沃斯滤波、余弦滤波、高斯滤波4种滤波器对磁数据方法进行高通滤波处理。4种滤波器进行高通滤波处理后,在氧化还原过渡带均能提取出弱磁异常,利用巴特沃斯及余弦滤波器提取的弱磁异常局部异常较为突出,与氧化还原环境的分带性对应较好,本次选择使用了巴特沃斯滤波器。

3.2.2 滤波器窗口宽度选择

选定滤波器后进行了不同尺度滤波窗口对比实验,窗口尺度分别选择100、250、500、1 000、1 500、2 000、2 500、5 000、7 500 m,处理结果见图4。

经对比分析,如果滤波窗口选择太窄(100~250 m),获得的高频信号振幅太小,多数小于0.6 nT,其中多为地面噪声信号,如输电线塔等;滤波窗口选择在1 500~2 500 m就可以提取出小于2倍测量总精度(约6 nT)的微弱异常;如果滤波窗口选择太宽

(5 000 m 以上),高频信息较弱,异常宽度变大,局部异常信息减弱。为此,在滤波器的组合选择时,首先选择了巴特沃斯高通滤波器(窗口宽度为250 m)以滤除地面高频干扰异常,再选择巴特沃斯高通滤波器(窗口宽度为2 500 m)滤除埋藏较深的磁源体引起的低频异常;实际应用过程可采用航磁网格数据进行巴特沃斯带通滤波(滤波窗口250~2 500 m)。处理结果显示,在氧化还原过渡带(见矿范围)都有明显的弱磁异常(图4);矿床上方的航磁弱磁(微磁)异常在1~7 nT,异常靠近还原带一侧;完全氧化带弱磁异常信息则小于0.6 nT,多为噪声信息。

3.3 铀矿床航磁弱磁(微磁)信息提取结果

从图2看出,矿区范围内的航磁 ΔT 异常很不明显,基本上为平缓的负磁场。但航磁 ΔT 数据经过带通滤波处理后,突出了磁数据的低幅高频信息,处理结果成图后(图5a、图5b)可以看出氧化还原过渡带(见矿范围)基本上位于弱磁异常的正负变化梯度带位置,靠近还原带微弱磁异常明显,异常幅值在1~7 nT,而且在连续相邻测线上都有异常反映,异常分带特征明显。由此看出本次研究选用的提取航磁微弱磁异常处理方法是较为合理有效的。

3.4 验证效果

内蒙古二连盆地某铀成矿带已发现多个砂岩型铀矿为古河谷层间氧化带砂岩型铀矿床,是该铀成矿带重点找矿类型之一^[20]。为了验证砂岩型铀矿上方是否同样存在航磁微弱异常,并确定航磁微弱异常提取方法的有效性,在该区域开展了航磁微弱异常提取实验。

内蒙古二连盆地大部分区域已于2019年完成1:5万高精度航磁测量,航磁数据覆盖3个已发现的古河道砂岩型铀矿区,分布在工作区的东部(A矿)、中部(B矿)和南部(C矿)^[20-21],这为在该区域进行砂岩型铀矿的航磁微弱异常研究创造了良好的前提条件。

首先对3个已知铀矿的航磁 ΔT 异常特征进行分析。在3个铀矿上方的航磁 ΔT 剖面平面图上均未见明显的航磁异常,利用巴特沃斯带通滤波(250~2 500 m)方法处理后,在3个铀矿床上方均提取出明显的航磁微弱异常。

3.4.1 东部(A铀矿区)

二连盆地东部A铀矿床控矿成因为辫状河—层间氧化型,控矿沉积体系为辫状河沉积体系,矿体受水退体系域内辫状河控矿沉积体系控制。地球化学结构面主要呈NE-SW分布,呈带状展布,矿体明

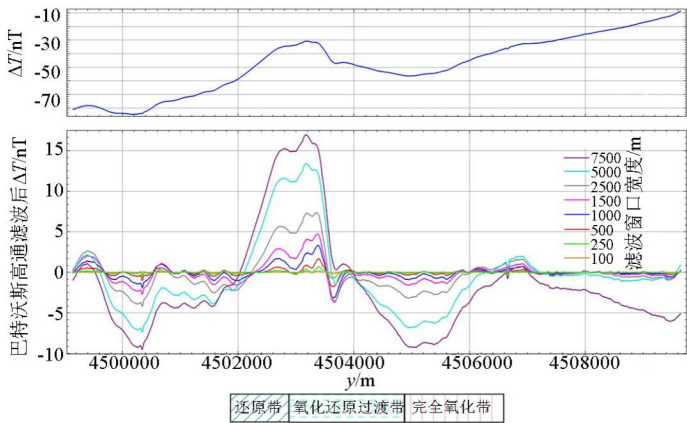


图 4 L3790 线航磁原始数据及不同滤波窗口提取微弱磁异常剖面对比

Fig. 4 Aeromagnetic ΔT data and different filtering window to filtering results extracted weak magnetic anomaly profile comparison chart of L3790

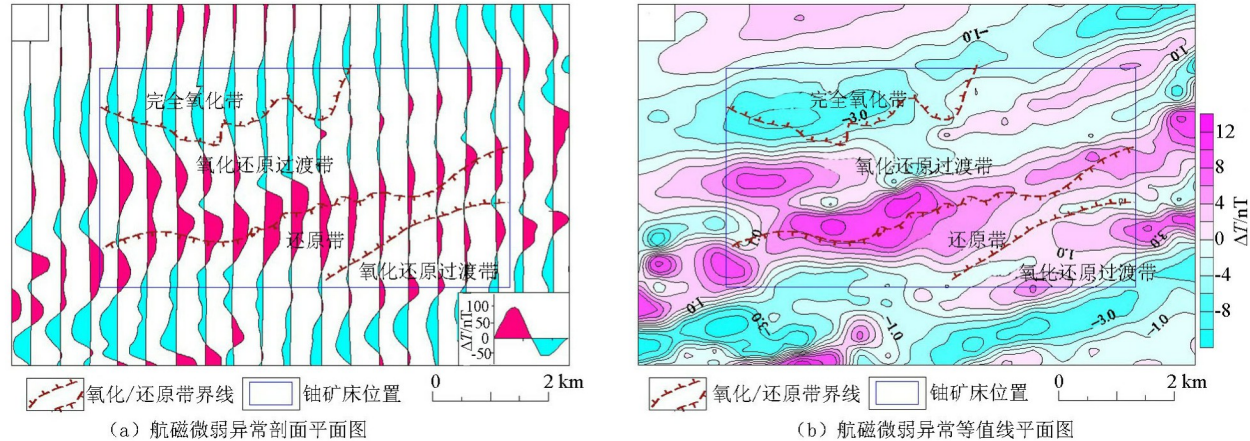


图 5 内蒙古西部某铀矿床航磁微弱异常信息

Fig. 5 The aeromagnetic weak information maps of a uranium deposit in Inner Mongolia

显受氧化带前锋线控制^[22]。

据刘波等在该铀矿所做的铀矿床环境参数中与铁磁性矿物有关的的参量 (TF_{Fe}/%) 统计结果显示, 不同的地球化学分带其 TF_{Fe} 含量有明显不同, 其中黄色氧化带为 1.42%, 黄绿色氧化带为 2.20%, 氧化还原过渡带为 2.98%, 还原带为 3.03%^[22], 说明在氧化还原过渡带 (铀成矿有利地段) 和还原带其 TF_{Fe} 含量明显高于氧化带。这些铁磁性矿物含量的变化可以在铀矿床上方引起航磁微弱的磁场变化。另外, 核工业 208 队在 A 矿床上方的地磁测量剖面上发现存在局部跳跃变化的现象 (图 6)^[23]。而过渡带则位于前锋线附近, 特别是偏向蚀源区方向。总体上看, 氧化还原过渡带引起的磁异常变化值不大, 一般在 10~30 nT。

现在需要解决的问题是如何在高精度航磁数据中提取这些微弱磁异常。其中 A 矿区域为 20 nT 平缓的正磁背景, 未见明显的局部异常, 推测为深部磁性基底的磁场特征, 其南侧见由隐伏岩体引起的宽

缓的磁异常 (图 7a)。航磁 ΔT 数据进行微弱磁异常提取处理后, 在 A 矿区域范围内提取出 1~8.0 nT 左右的微弱磁异常, 多条测线均见微弱异常反映, 大致呈 NE 向带状展布 (图 7b、图 7c)。西南段的两个已知矿体位于 NE 向展布的 0.5~6 nT 微弱磁异常南侧由正负变化较陡的梯度带上, 矿体走向与异常展布方向一致。中段的已知矿位于片状微弱异常的

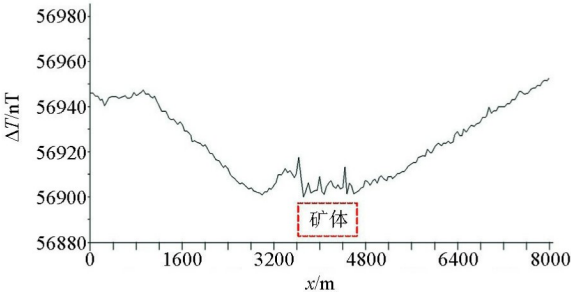


图 6 A 砂岩型铀矿地磁测量剖面^[25]

Fig. 6 Geomagnetic survey map of of A uranium deposit^[25]

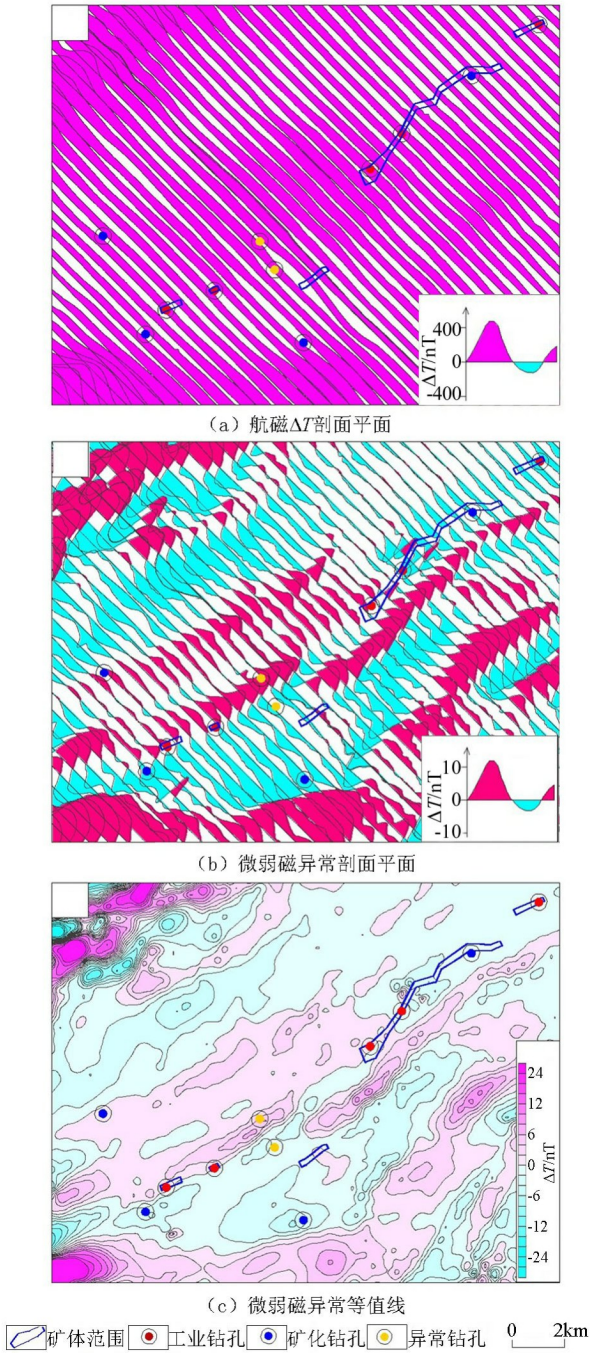


图 7 A 铀矿区航磁 ΔT 、微弱磁异常

Fig. 7 The aeromagnetic ΔT and weak magnetic information maps of uranium deposit area A

西北部。东北部主矿体位于 NE 向展布的 0.5~8 nT 微弱磁异常的北侧,矿体走向与异常展布方向一致。部分矿化孔及异常孔与微弱磁异常对应。

3.4.2 中部(B 铀矿区)

二连盆地中部 B 矿区,其东部矿体位于宽缓的磁异常边部,西部矿体整体位于负磁背景场中,除矿床的西北和东北侧见隐伏岩体引起的宽缓磁异常外,矿体上方未见明显的航磁 ΔT 异常(图 8a)。

航磁数据提取微弱磁异常处理后,在

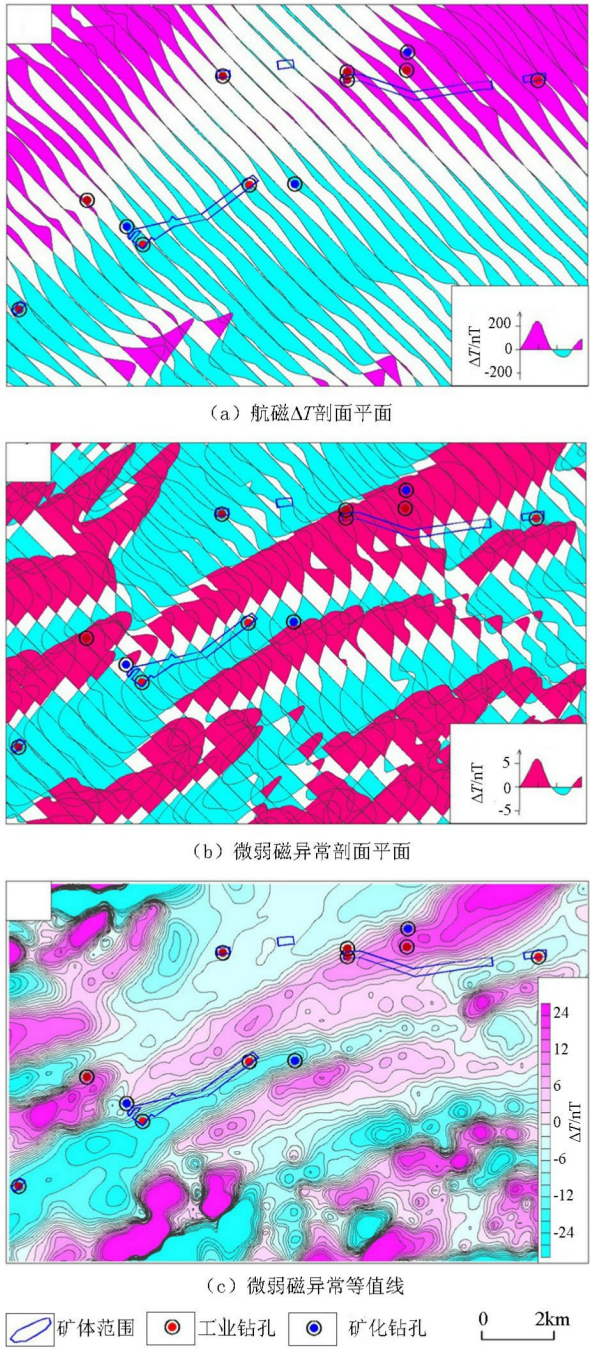


图 8 B 铀矿区航磁 ΔT 、微弱磁异常

Fig. 8 The aeromagnetic ΔT and weak magnetic information maps of uranium deposit area B

矿区范围提取出 1~10 nT 左右的微弱磁异常,多条测线均见微弱磁异常反映,大致呈 NE 向带状展布(图 8b、图 8c)。西侧主矿体西段对应微弱磁异常,东段对应微弱磁异常的正负变化梯度带,矿体走向与微弱磁异常展布方向基本一致。矿区内其他见矿孔及矿化孔多数与微弱磁异常对应。

从 A、B 两个铀矿区提取的航磁微弱异常展布方向与矿体走向的一致性见矿及矿化钻孔的对应性分析可以推断,这两个区域的铀成矿与航磁微弱

异常关系十分密切。分析这些微弱异常的成因可能有两点,一是由矿区的还原带—氧化还原过渡带—氧化带环境的磁性变化引起的异常,另一个原因是由与铀成矿关系密切的局部盖层断裂构造活动引起的磁异常。断裂构造是砂岩型铀矿成矿作用中的重要成矿条件,有利于铀的迁移和富集,它既是还原性物质(炭屑)的储存地又是还原性物质(H_2S 、烃类)的运输通道。因此,在有利铀成矿地区,断裂构造周围地层往往会形成一个氧化还原过渡带^[24]。这些航磁微弱异常的变化对寻找铀成矿有利的成矿环境具有重要的指示意义。

3.4.3 南部(C 铀矿区)

二连盆地南部 C 铀矿床区域,航磁 ΔT 以平缓的正背景场为主,矿体上方仅见特别低缓的航磁 ΔT 异常,异常不十分明显(图 9a)。

航磁 ΔT 数据进行微弱磁异常提取处理后,在矿区附近提取出 1~5 nT 左右的微弱磁异常,多条测线均见异常反映,大致呈 NE 向带状展布(图 9b、图 9c)。但现查明的已知矿体的走向与提取的微弱异常展布方向有些不一致,矿体走向以近 SN 向为主,而异常展布方向以 NE 向为主。矿体的位置与微弱磁异常的关系有待进一步研究。

4 结论

通过以上对内蒙古中—新生代盆地内 3 个砂岩型铀航磁 ΔT 及航磁微弱异常特征分析,可以看出,中—新生代盆地的砂岩型铀矿一般位于航磁 ΔT 平静的负磁背景场或平静的正磁背景场中,航磁异常不十分明显。

利用本文研究的方法进行航磁微弱异常提取后发现已知砂岩型铀矿矿体范围、工业孔及矿化孔上方或附近确实存在 1~10 nT 左右航磁微弱异常存在。这些航磁微弱异常对寻找成矿有利的地球化学环境和构造环境具有很好的指示意义。

1) 通过资料及数据分析对航磁微弱磁异常的量值进行了界定,把 0.6~6 nT 的航磁异常界定为微弱磁异常。

2) 分析总结了砂岩型铀矿弱磁(微磁)异常的形成机理,在内蒙古西部某铀矿床上方开展航磁微弱异常提取方法实验研究,总结了一套提取航磁微弱异常的方法,提取出明显的弱磁(微磁)异常。

3) 利用研究总结的航磁微弱异常提取方法,采用 1:5 万高精度航磁数据,在二连盆地某铀成矿带 3 个已发现的砂岩型铀矿区域进行了提取航磁微弱磁

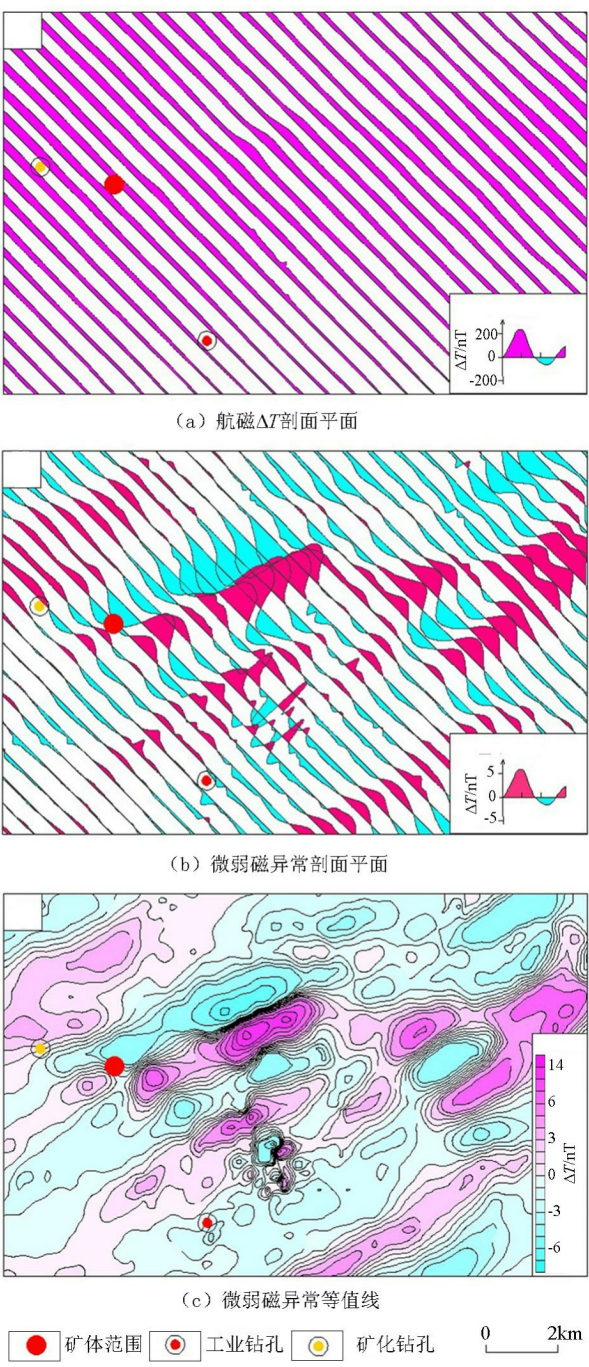


图 9 C 铀矿区航磁 ΔT 、微弱磁异常
Fig. 9 The aeromagnetic ΔT and weak magnetic information maps of uranium deposit area C

异常验证实验,结果表明,在 A、B、C3 个古河道砂岩型铀矿区上方均存在航磁微弱异常,其中 A、B 铀矿区的航磁微弱异常展布方向与矿体走向一致性较好,C 铀矿区较差。本文使用的航磁微弱异常的提取方法具有较好的使用效果。

4) 利用提取的航磁微弱异常可以寻找砂岩型铀矿成矿有利地化环境和构造环境,为铀成矿预测提供更丰富的信息。砂岩型铀矿航磁微弱异常提取方法的研究,为在中—新生代盆地地区利用高精度航

磁测量数据资料寻找古河道型砂岩型铀矿探索出一条新途径。

参考文献 (References):

[1] 江民忠,张积运,石岩,等. 微航磁异常与可地浸砂岩型铀矿床微磁异常研究及其找矿意义[J]. 铀矿地质,2007,23(5):298-303.
Jiang M Z, Zhang J Y, Shi Y, et al. Weak-aeromagnetic anomaly and in-situ leachable sandstone-type uranium deposit[J]. Uranium Geology,2007,23(5):298-303.

[2] 江民忠. 航测遥感技术在可地浸砂岩型铀矿预测中的应用研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉),2003.
Jiang M Z. Application of aerial survey and remote sensing technology in the prediction of in-situ leachable sandstone-type uranium deposit[D]. Wuhan:China University of Geosciences (Wuhan), 2003.

[3] 倪卫冲. 层间氧化带砂岩型铀矿床上航磁弱信息形成机理的初步探讨[J]. 航测与遥感,1998,50(4):1-20.
Ni W C. Preliminary discussion on the formation mechanism of aeromagnetic weak information of interlayer oxidation zone type uranium deposit[J]. Aerial Survey and Remote Sensing,1998,50(4):16-20.

[4] 倪卫冲. 在伊犁盆地南缘地区开展航放航磁弱信息提取的应用效果[J]. 航测与遥感,2000,55(1-2):8-19.
Ni W C. Application research on extracting weakness information of airborne radio and aeromagnetic in the southern margin of YiLi Basin[J]. Aerial Survey and Remote Sensing,2000,55(1-2):8-19.

[5] 倪卫冲. 在腾格尔坳陷西北缘开展航放航磁弱信息提取的应用试验[J]. 航测与遥感,2000,56(3-4):4-13.
Ni W C. Carrying out the application experiment of extracting weakness information of airborne radio and aeromagnetic in the northwestern Margin of Tengger depression[J]. Aerial Survey and Remote Sensing, 2000,56(3-4):4-13.

[6] 陈国胜. 鄂尔多斯盆地东部地区航磁弱异常的解释[J]. 航测与遥感,2002,60(3-4):10-15.
Cheng G S. Interpretation aeromagnetic weak anomaly in the eastern area of Ordos Basin [J]. Aerial Survey and Remote Sensing, 2002,60(3-4):10-15.

[7] 刘天佑,崔宁,邱绳德,等. 高精度重磁测量弱信号分析及其在塔北雅克拉地区的应用[J]. 石油勘探,1996,35(2):81-88.
Liu T Y, Cui N, Qiu S D, et al. The weak signal in prection gravity-magnetic survey and its application in Yakela area North Tarim [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum,1996,35(2):81-88.

[8] 胡先金. 油田上方的航磁异常特征[J]. 石油地球物理勘探,1989,24(4):599-602.
Hu X J. Characteristics of aeromagnetic anomalies above the oil field[J]. Petroleum Geophysical Exploration, 1989,24(4):599-602.

[9] 耿喜哲,张春华. 综合小波分析与分形方法进行弱磁异常识别[J]. 物探与化探,2002,26(2):126-130.
Geng X Z, Zhang C H. The application of wavelet analysis and

fractal technique to the recogation of micro-magnetic anomal [J]. Geophysical and Geochemical Expiration, 2002,26(2):126-130.

[10] 于长春,熊盛青,郭志红,等. 改进的非线性滤波方法在中高山地区的应用[J]. 物探与化探,2003,27(1):40-42.
Yu C C, Xiong S Q, Gou Z H, et al. The improved nonlinear filtering mthod and its application in middle and high mountain areas [J]. Geophysical and Geochemical Expiration, 2003,27(1):40-42.

[11] 张洪瑞,熊盛青,范正国,等. 中高山区高精度航磁调查找矿效果研究[J]. 地球物理学进展,2013,28(4):2052-2057.
Zhang H R, Xiong S Q, Fang Z G, et al. Expiration effect of high precision aeromagnetic survey in mid-high mountain areas [J]. Progress in Geophysics, 2013,28(4):2052-2057.

[12] 杨玉勤,李兵海,张翔,等. 利用航磁增强处理方法提取喇嘛苏铜矿及其外围弱磁异常[J]. 物探与化探,2018,46(6):1173-1179.
Yang Y Q, Li B H, Zhang X, et al. The extraction of weak magnetic anomalies in and around the Lamasucopper deposit by using automatic[J]. Geophysical and Geochemical Expiration, 2018,46(6):1173-1179.

[13] 杨玉勤,张翔,常树帅,等. 航磁弱异常信息增强出露在地质解释中的应用[J]. 西部资源,2017,80(5):143-146.
Yang Y Q, Zhang X, Chang S S, et al. The application of airborne magnetic weak information enhancement method in the field of geological[J]. Westen Resources, 2017,80(5):143-146.

[14] 倪卫冲. 航测生产中航放航磁弱信息提取的应用试验[R]. 核工业航测遥感中心,2000.
Ni W C. The application experiment weak information of aerial radio and magnetic in aerial survey production[R]. Airborne Survey Remote Sensing Center of Nuclear Industry, 2000.

[15] 韩绍阳,侯惠群,柯丹,等. 基于 GIS 软件平台的航磁弱信息提取研究[J]. 铀矿地质,2003,19(6):361-365.
Han S Y, Hou H Q, Ke D, et al. Research on extraction of aeromagnetic weak information based on GIS[J]. Uranium Geology, 2003,19(6):361-365.

[16] 常树帅. 砂岩型铀矿勘查中航放、航磁信息开发研究[J]. 铀矿地质,2006,22(5):300-304.
Chang S S. Development of aeroradiometric and aeromagnetic information for the exploration of sandstone type uranium deposit[J]. Uranium Geology,2006,22(5):300-304.

[17] 侯惠群,吴慧山,高必斌,等. 高精度磁测对古顿河构造填图的经验[G]//侯惠群. 外生铀矿床勘查中的地球物理方法及应用. 北京:海洋出版社,2002.
Hou H Q, Wu H S, Gao B E, et al. Experience of high-precision magnetic survey on mapping of Gudunhe structure [G]//Hou H Q. Geophysical methods and applications in the expioration of exogenous uranium deposit. Beijing:Ocean Press,2002.

[18] 刘云祥. 重磁弱异常处理研究与应用[J]. 勘探地球物理进展,2007,30(6):454-447.
Liu Y X. Processing and application of weak gravity and magnetic anomaly[J]. Progress in Exploration Geophysics,2007,30(6):454-447.

[19] 侯树仁,李有民,霍全林,等. 内蒙古阿拉善右旗塔木素铀矿床 H15-H96 线普查报告[R]. 核工业 208 大队,2014.
Hou S R, Li Y M, Huo Q L, et al. Survey report of H15-H96 line of Tamu uranium deposit in Alxa Right Banner, Inner Mongolia [R]. 208 of CNNC,2014.

[20] 康世虎,杨建新,刘武生,等. 二连盆地中部古河谷砂岩型铀矿成矿特征及潜力分析[J]. 铀矿地质,2017,33(4): 206-213.
Kang S H, Yang J X, Liu W S, et al. Mineralization characteristics and potential of paleo-valley type uranium deposit in central Erlian Basin, Inner Mongolia[J]. Uranium Geology, 2017, 33(4):206-213.

[21] 刘武生,康世虎,贾立城,等. 二连盆地中部古河道砂岩型铀矿成矿特征[J]. 铀矿地质,2013,29(6): 329-335.
Liu W S, Kang S H, Jia L C, et al. Characteristics of paleo-valley sandstone-type uranium mineralization in the middle of Erlian Basin[J]. Uranium Geology,2013,29(6): 329-335.

[22] 刘波,杨建新,乔宝成,等. 二连盆地巴彦乌拉铀矿床控矿成因相特征及成矿规律研究[J]. 矿产勘查,2017,8(1):16-26.
Liu B, Yang J X, Qiao B C, et al. Characteristics of ore-controling genesis facies and metallogenic regularity in Bayanwula uranium ore deposit [J]. Mineral Exploration, 2017, 8(1):16-26.

[23] 杨建新,刘武生,李满根,等. 二连盆地铀矿整装勘查区专项填图与技术应用示范报告[R]. 核工业二〇八大队,2016.
Yang J X, Liu W S, Li M G, et al. Special mapping and technical application report of Erlian Basin uranium mine assembly exploration area[R]. 208 of CNNC,2016.

[24] 曾建纲,聂逢君,封志兵,等. 二连盆地砂岩型铀矿找矿中的地球物理标识[J]. 金属矿山,2014,43(5):130-133.
Zeng J G, Nie F J, Feng Z B, et al. Geophysical indicators of Erlian Basin sandstone-type uranium deposits [J]. Metal Mine, 2014, 43(5):130-133.

A study of the method of extracting aeromagnetic weak anomalies from sandstone-type uranium deposits

YANG Yu-Qin^{1,2}, ZHANG Xiang^{1,2}, SHI Lian-Cheng^{1,2}, DENG De-Wei^{1,2}

(1. Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, China;2. Hebei Key Laboratory of Airborne Survey and Remote Sensing Technology, Shijiazhuang 050002, China)

Abstract: In the Mesozoic and Cenozoic basin areas, the aeromagnetic ΔT anomaly information of sandstone-type uranium deposits is not obvious due to the influence of the basin cover layer, which directly affects the application effect of using aeromagnetic data to find sandstone-type uranium deposits. The research on the method of extracting weak information of aeromagnetic data in the basin can give full play to the role of aeromagnetic data in the exploration of sandstone-type uranium deposits. This paper summarizes the mechanism of the formation of weak aeromagnetic anomalies in sandstone-type uranium deposits, and analyzes and defines the quantitative range of weak aeromagnetic anomalies. On the basis of the 1:50,000 high-precision aeromagnetic data and through the analysis and research on the aeromagnetic characteristics of the sandstone-type uranium deposits discovered in western Inner Mongolia, a high-pass filtering method was used to extract the aeromagnetic data above the sandstone-type uranium deposit. This method was used to carry out aeromagnetic weak anomaly extraction experiments in a uranium metallogenic belt in Erlian Basin of Inner Mongolia. The aeromagnetic weak anomaly information was extracted above three discovered interlayer oxidation zones of sandstone-type uranium deposits, thus finding a new way in the search for sandstone-type uranium deposits in the Meso-Cenozoic basin area.

Key words: interlayer oxidation zone sandstone-type uranium deposit;aeromagnetic survey; aeromagnetic weak magnetic anomaly extraction

(本文编辑:王萌)