

文章编号: 1001-1749(2023)05-0635-11

# 高精度无人机航空磁测在塔里木盆地西南部地质构造调查中的应用

崔志强<sup>1,2</sup>, 胥值礼<sup>1,2</sup>, 孟庆敏<sup>1,2</sup>, 李飞<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所, 廊坊 065000;

2. 国家现代地质勘查工程技术研究中心, 廊坊 065000)

**摘要:** 受地表沙漠覆盖和复杂山前构造等影响, 塔里木盆地西南部的油气地质勘探难度大, 基础地质调查薄弱, 油气勘探历经数十年至今尚未获得实质性重大突破。通过开展高精度无人机航空磁测, 采用全夜航模式, 获取到蕴含丰富地质构造信息的航空磁测数据。利用非线性滤波、低通滤波、小波变换等方法, 剔除干扰异常, 实现了局部异常和背景场的分离, 揭示了与油气成藏相关的局部圈闭构造及其展布规律; 运用三维欧拉反褶积计算区域磁性基底深度, 清晰地展示了盆地基底的隆拗格局及主要生油凹陷特征, 为进一步开展油气勘探战略选区及深部资源评价提供了重要成果。

**关键词:** 无人机; 航空磁测; 油气地质勘探; 塔里木盆地

**中图分类号:** P 631.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.05.10

## 0 引言

塔里木盆地西南部(塔西南)多年受山前地表条件复杂、高陡断裂发育等影响, 对与油气成藏密切相关的深部生油凹陷特征认识尚不够精细, 对含油气有利背斜构造圈闭的识别和展布规律研究不够全面, 一定程度上影响到该地区的油气勘探效果<sup>[1]</sup>。高精度航空磁测能够克服自然环境, 获得大区域、均一化的高精度高质量数据, 不仅能直接捕捉到沉积盖层中背斜圈闭构造引起的弱磁局部异常, 还能研究盆地基底起伏, 可为石油地质勘探提供重要参考<sup>[2]</sup>。

中国地质调查局 2016 年在塔西南地区部署了大比例尺高精度航磁油气地质调查工作。通过 3 年实施, 完成了近 100 000 km<sup>2</sup> 1:50 000 的高精度航

磁油气构造调查任务。得益于该套无人机航空磁测系统的高分辨率、超低空能力和精准测控能力, 获取到了高质量调查成果数据。通过非线性滤波、导数转换、小波多尺度分解, 提取到了主要指示盆地沉积盖层中局部圈闭构造相关的大量弱磁异常, 同时运用欧拉反褶积方法, 计算并绘制了盆地磁性基底深度图, 为进一步开展油气勘探战略选区提供了重要成果。

## 1 油气地质概况

研究区属塔里木盆地西南拗陷的一部分。新生代以来, 塔西南受南北西西昆仑和南天山两个造山带的共同挤压作用, 构造变形强烈, 形成的一个多期多种类型叠加的再生前陆盆地<sup>[3]</sup>。塔西南地区地层

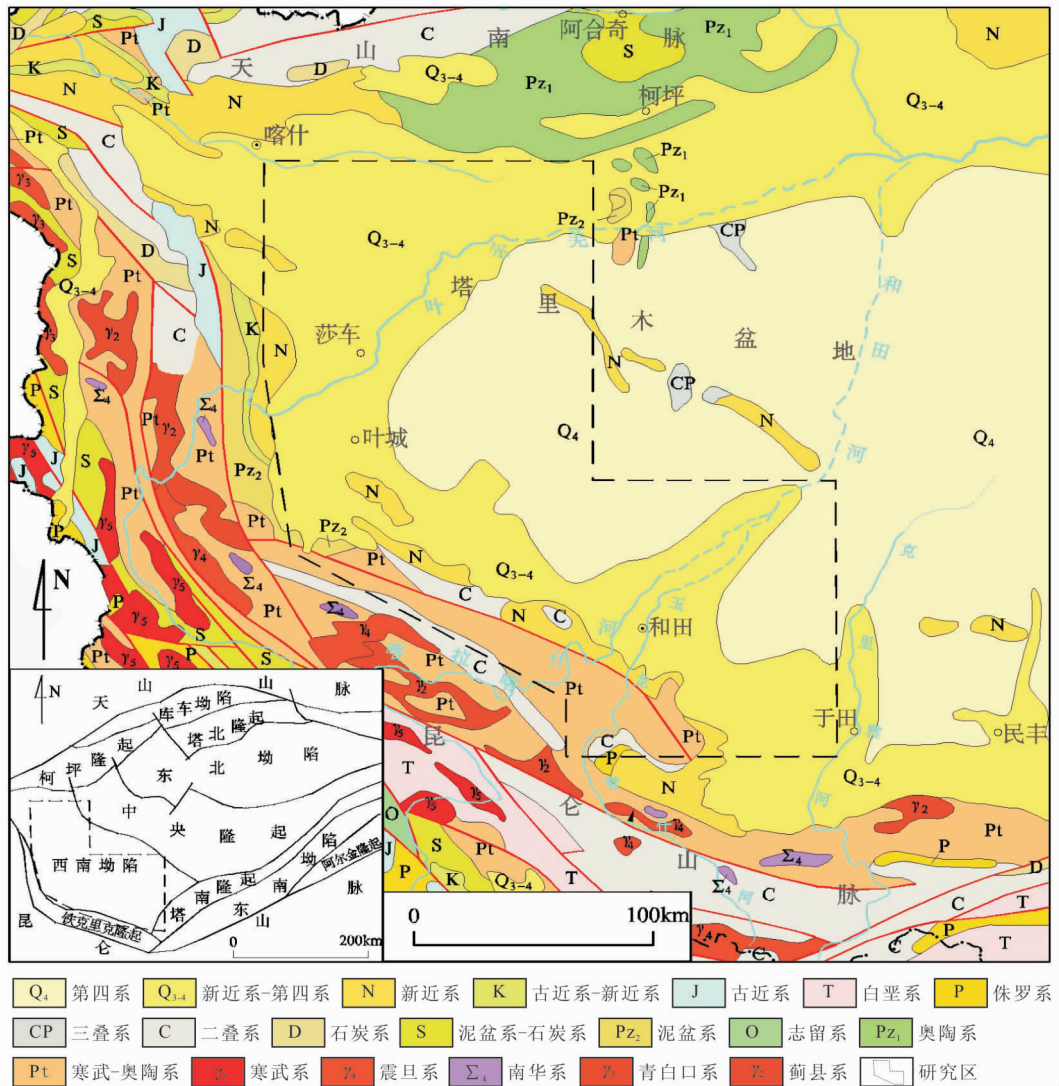


图1 塔里木盆地西南部地质构造略图

Fig. 1 The regional geological structure map in the southwest of Tarim Basin

发育较全,盆地基底由太古宇—古元古界片麻岩和中—新元古界副变质岩组成。基底上覆盖层从震旦系到第四系均发育,受不同时期的沉积古地理控制,不同时代的地层分布范围有差异,古生界地层在南北两区发育齐全,但中部缺失中上奥陶统、志留系、泥盆系,西北部缺失了上二叠统;中生界主要分布在山前狭长断陷区内;新生界均有分布,其中前陆凹陷区较厚(图1)。

长期的勘探显示,塔西南地区具有多套烃源岩、多个含油气系统、多期成藏的石油地质特点<sup>[4]</sup>。以石炭—二叠系为主力烃源岩,自下而上形成古生界、中生界、新生界3套储盖组合,成油地质条件优越。但目前已经探明含油气圈闭仅30余个,仅有巴什托普、柯克亚两个油气田进入工业开采,这与塔西南良

好的油气资源潜力不对称。物性显示,塔西南地区主要存在3个磁性层,分别是盆地基底太古界和下元古界深变质片麻岩系具有较强磁性,磁化率平均值达 $2\,000 \times 10^{-5}$  SI,构成了本区唯一的区域磁性层<sup>[5-7]</sup>。其次是下二叠统上部的玄武质火山岩夹层,厚度较薄(最厚不足1 000 m),具有较强磁性,磁化率均值在 $1\,700 \times 10^{-5}$  SI,较集中分布在叶城—皮山和岳普湖—色力布亚等区域,与深大断裂关系密切。最上部的新近系阿图什组砂岩具有弱磁性,磁化率均值在 $500 \times 10^{-5}$  SI左右,其厚度大且近地表,局部受构造变形能够引起弱磁异常。3个磁性层位正好位于前述下、中、上储盖组合的底部和顶部,磁性层受构造控制影响局部变形能不同程度的引起磁异常,被高精度磁测捕捉。



(a) 彩虹3无人机和航磁设备



(b) 远程控制系统



(c) 无人机地面控制站

图2 彩虹-III型无人机航空磁测系统

Fig. 2 An overview of the UAV aeromagnetic survey system

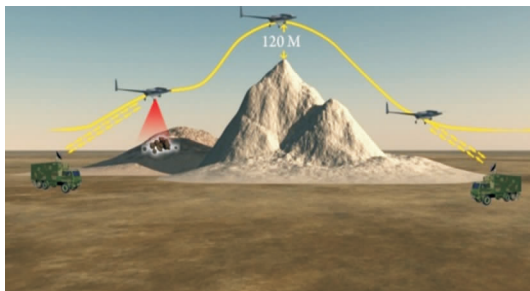


图3 多台测控站接力控制模式

Fig. 3 The relay control mode of multiple ground control stations

## 2 无人机航空磁测

### 2.1 无人机航空磁测系统

本次采用的是中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所自主研发的高精度无人机航空磁测系统<sup>[8-9]</sup>。该系统是将国际先进的航磁补偿器(AARC 510)和高精度铯光泵磁力仪(CS-VL)集成在国产的彩虹-III型无人机平台上,形成的国内首套具备长航时自主飞行能力的高精度中型无人机航空磁测系统(图2)。经过试验测试,该测量系统的各项技术指标满足国内航空磁测技术规范(DZ/T 0142-2010)要求,系统噪声由于10 pT,达到国际先进水平。

测量系统可通过多台地面测控站接力或海事卫星等方式实现远程控制,辅以三维航迹规划,能够实现全天时(可夜航)、大跨度(超200 km)、全自主的

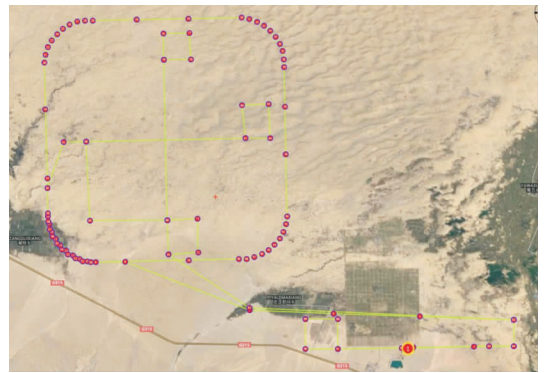


图4 无人机动态磁干扰补偿控制模式

Fig. 4 The control mode of UAV dynamic magnetic interference compensation

超低空沿地形缓起伏飞行,具备大规模调查测量能力。本次测量任务采用的是多台测控站接力控制模式(图3),实现了300 km跨度连续测量,并主要采用夜航模式完成。

### 2.2 飞行测量

1)高精度磁补偿。实现高质量的飞机动态磁干扰补偿是实现高精度测量的前提条件。针对无人机平台在飞行中动作幅度大、不规范等问题,设计了飞行姿态精确控制的磁补偿飞行方案。根据航空磁干扰补偿要求,通过设置航路控制数据流,由一系列控制点组成,每个控制点赋予相应的飞行姿态控制参数,严格控制无人机的机动动作,实现了规范的航空磁测飞行动态磁干扰补偿(图4)。多次补偿精度最优达到了0.02 nT(规范要求 $<0.08$  nT),有效地补偿了无人机在飞行过程中姿态变化对磁测数据的干扰,取得了良好的补偿效果,测量系统具备了动态高精度测量能力。

2)测线飞行。本次测量工作采用1:50 000比例尺,测线间距500 m,采样率10 Hz,平均飞行速度为180 km/h。根据地质构造走向为北西西-南东东向,测线设计为南北向。通过三维航迹规划制定每个飞行架次的飞行计划,对所有测线分段设置导航控制点<sup>[8]</sup>,每个导航控制点包括相应的飞行控制参数,形成飞行控制数据链,预置入测量系统,起飞后无人机就能自主完成该架次的测量任务并返航(图5)。

本次采用全夜间航模式完成测量工作,历经3 year时间,通过790个夜间测量架次,完成了200 000测线千米的磁测任务,夜间气流平稳,工业电磁干扰小,获取到了高质量的测量数据。航线保持度高,平均飞行高度偏离设计高度在5 m内,航线偏离3.4

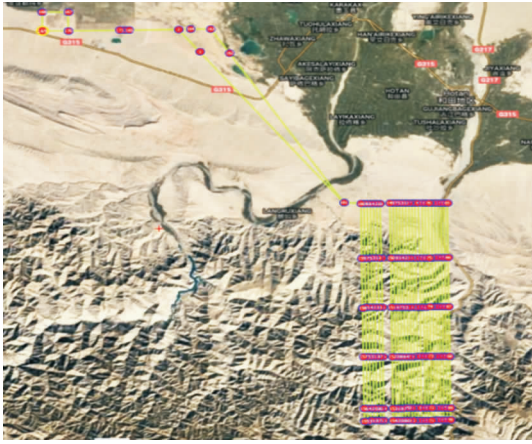


图 5 测线飞行控制模式

Fig. 5 The control mode of line flight

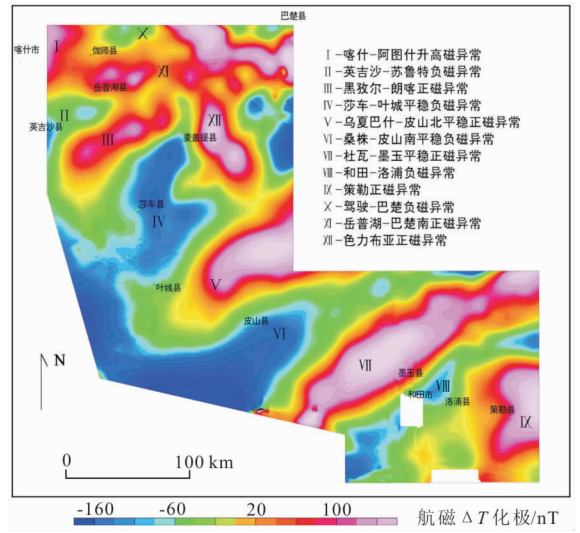


图 7 高精度航磁数据图

Fig. 7 High precision aeromagnetic feature distribution

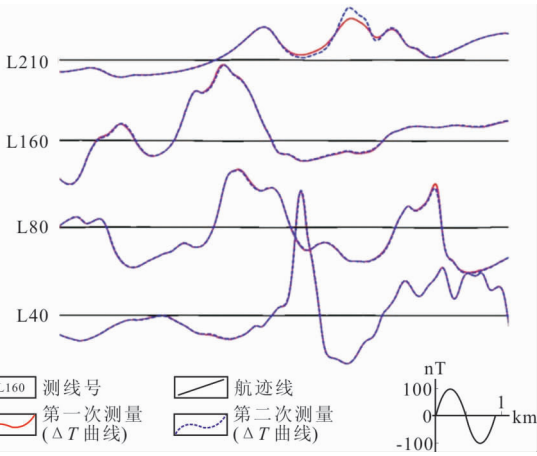


图 6 重复线航磁数据剖面对比图

Fig. 6 Repeated line contrast diagram of aeromagnetic data section

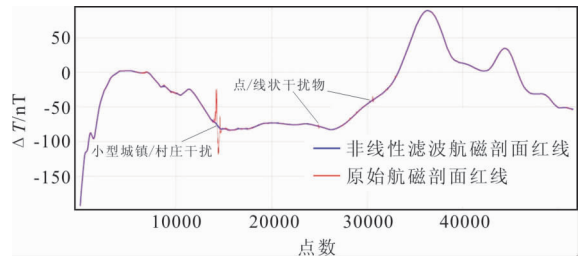


图 8 实测航磁数据剖面非线性滤波效果图

Fig. 8 The nonlinear filtering effect of measured aeromagnetic data profile

m, 平均动态噪声为  $5.34 \text{ pT} \sim 69.54 \text{ pT}$  ( $\text{pT} = 10^{-3} \text{ nT}$ ), 一级资料 ( $< 80 \text{ pT}$ ) 占比达  $99.96\%$ , 获取了高质量的测量原始数据。

3) 重复线质量。重复线测量是验证测量准确性的一个重要指标。图 6 是测区内几条测线与重复线的结果, 同一测线重复观测的航磁数据曲线的磁异常形态、异常强度一致性非常好, 说明测量系统稳定、可靠。同时航迹重合度也非常高, 说明无人机飞行测控精度高, 对获得高质量重复线测量成果至关重要。

### 2.3 测量成果数据

测量数据经坐标转换、磁日变校正、方向差校正、滞后校正、正常场改正、切割线调平后, 总精度达到  $0.54 \text{ nT}$  (规范要求小于  $3 \text{ nT}$ ), 传统有人驾驶的直升机和固定翼平台航空磁测数据总精度一般在  $2$

$\text{nT}$  左右。调平结果经化磁极后得到了调查区的高精度航空磁场成果基础成果图 (图 7), 成果图件显示区域磁场平滑、稳定, 无线性条带现象, 对局部弱磁异常显示清晰, 异常形态规则, 延伸稳定。

磁场成果图 (图 7) 显示, 研究区主要由平缓升高或降低的区域磁异常叠加多组弱 (小) 磁局部异常构成, 它们相互叠加、穿插组成多变的异常面貌。区磁异常主要九条北东轴向的平稳升高或降低的正/负磁异常构成, 包括英吉沙、叶城、藏桂巴扎、和田平稳降低负异常, 喀什、黑孜、皮山北、墨玉北、策勒平稳升高正异常, 它们自西向东, 呈正—负相间排列。北部岳普湖—巴楚南和色力布亚分别叠加一条东西、北西向的宽缓正磁异常。结合物性资料不难看出<sup>[10]</sup>, 这些区域磁异常主要由盆地基底的元古—太古界变质岩系岩相差异引起, 正磁异常由下元古界—太古界的强磁性深变质中基性岩浆杂岩系引起, 负磁异常区与中—上元古界的弱磁性变质结晶基

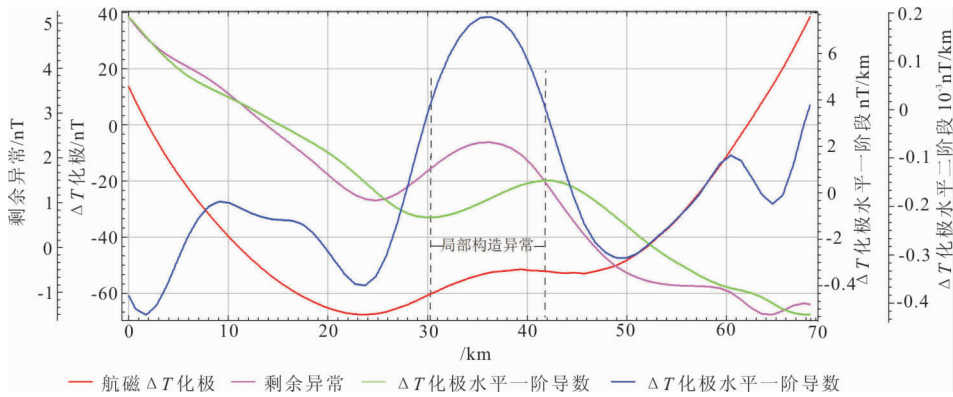


图9 局部异常水平梯度增强显示效果

Fig. 9 Local abnormal horizontal gradient enhanced display effect

岩系对应。在区域背景磁异常之上还叠加有大量近东西、南东东向的弱磁局部异常,这些低幅值局部异常主要由弱磁性沉积盖层受构造挤压作用局部形变引起,叠加在强度较大的区域场上已难以分辨,其形态和展布规律十分模糊。

### 3 局部构造异常识别与提取

本次高精度航磁油气地质构造调查的主要目标是研究区域磁性基底隆坳格局和局部圈闭构造的识别与展布规律研究,为了有效区分不同场源异常信息,就需要进行异常分离和显示增强,分别得到由磁性基底引起的区域场和局部圈闭构造引起的局部异常场。

#### 3.1 地表干扰的剔除

航空磁测获得的  $\Delta T$  总场包括多种地质体和人文环境干扰多种异常的叠加,由此首先需要剔除数据中来自地表建筑物和电磁信号等干扰。与地质体引起的较平缓异常相比,这类干扰距离探测器更近,具干扰大、体积小特征。因此在航磁  $\Delta T$  数据上表现为高频或短波场的尖刺状局部异常,曲线剧烈抖动,梯度极大。通过非线性滤波能够有效的剔除这部分干扰异常,非线性滤波的宽度(滤波窗口大小)需要根据干扰异常动态确定,由于该地区为沙漠覆盖区,干扰物主要为地面建筑物(如城镇)或输电线、道路等,而城镇规模大多仅在 1 km 左右,调查目标地质体(背斜构造等)宽度多在 5 km 以上。结合测量飞行速度(180 km/h)和采样率(10 Hz),两测点之间的实际距离在 5 m 左右,因此选取非线性滤波宽度 200 点,取得了很好剔除效果(图 8)。

#### 3.2 局部构造异常识别

叠加在区域背景场上的局部异常主要由弱磁性

沉积盖层受构造作用局部形变引起,其相对幅值小,叠加在较强的  $\Delta T$  总场上很难识别。为了突出这些局部构造异常的宏观展布特征,采用垂直于构造走向的水平导数来进行局部异常的显示增强,水平导数能够有效降低平稳变化背景场的视觉影响,并保留局部异常特征信息,对识别叠加在区域场上的弱磁异常行之有效<sup>[11-12]</sup>。首先进行垂直于主构造方向的水平一阶方向导数( $0^\circ$ 方向),局部异常在水平一阶导数上表现为正/负相伴组合梯度出现,圈闭构造的宽度为零线两侧正/负异常的峰值之间的距离。但是由于叠加异常的形态差异及其所处背景场形态不同,对异常异常的识别还不是很清晰。为了进一步增加局部异常的识别度,在水平一阶导数的基础上,再进行反方向( $180^\circ$ 方向)的水平方向导数,得到水平二阶方向导数,能够进一步削弱不同背景场及背景场梯度变化的影响。原叠加在背景场上的微弱异常呈现为一个完整正值梯度异常(图 9),异常范围为水平二阶导数的零线区域,增加了局部构造异常的识别度。图 10 为叶城县北东的克拉克依新生界弱磁性层受构造形成的弱磁异常,新近系砂岩受底部滑脱作用,滑脱断层上覆砂岩层形成断层传播背斜,弱磁性砂岩局部形变引起了该异常,异常相对强度约 3 nT。该弱小局部异常在化极图、局部异常图显示都不甚明显或不够完整,但在二阶水平导数图上为一个完整的构造背斜,背斜两翼异常对称,形态规则,局部异常显示得到了明显增强,易于识别。

#### 3.3 局部构造异常提取(背景场分离)

为了进一步研究局部构造异常和盆地基底特征,在有效识别局部异常的基础上,还需要进一步从航磁  $\Delta T$  总场中分离局部构造异常和磁背景场,分

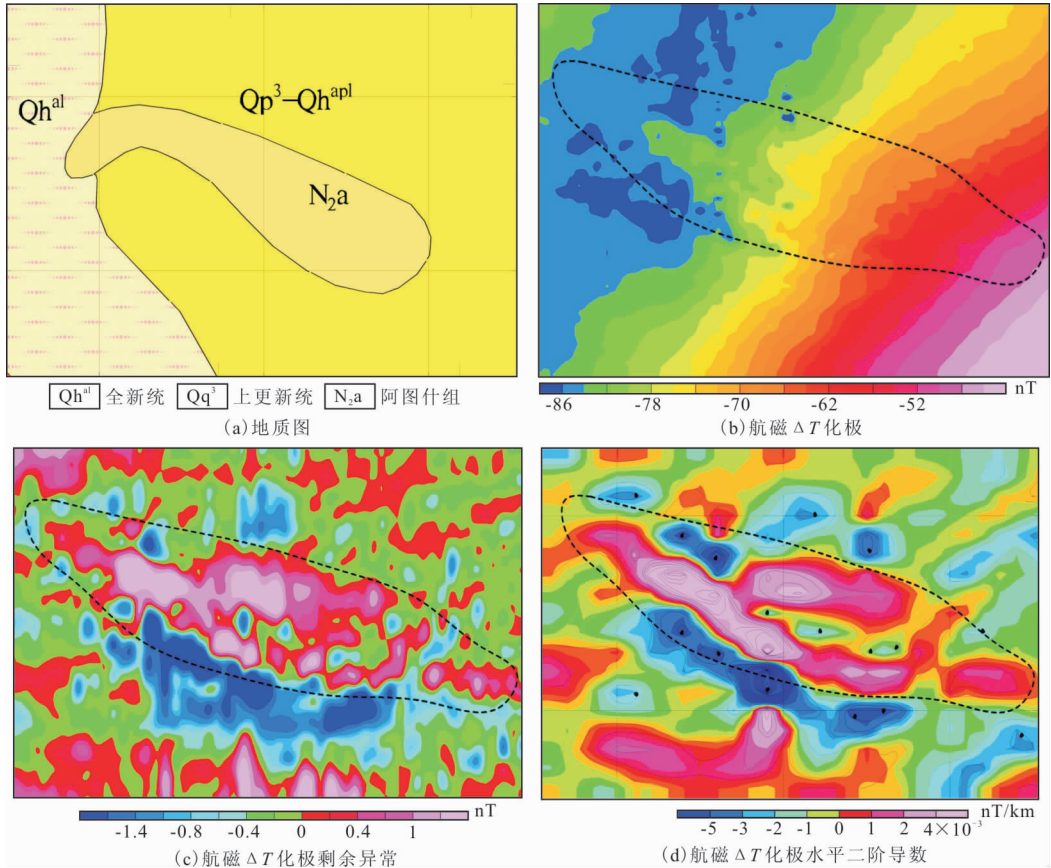


图 10 克拉克依背斜弱磁局部异常特征图

Fig. 10 The characteristics of weak magnetic anomaly in Karakey anticline

别获得由局部构造引起的局部异常和盆地基底引起的背景磁异常,提高磁性基底埋深计算的准确度。

常用的磁异常分离方法有滤波、延拓、趋势拟合等,但大多是基于滤波和延拓的,很难一次性实现多个尺度的局部异常与背景场的有效分离,局部异常会被或多或少的被保留在背景场中<sup>[13]</sup>,对后续计算造成偏差。而二维小波多尺度分解法能将信号按频域或空域的局部特征进行分离,适合随时间非稳定变化信号的分析,能够同时兼顾不同尺度的局部异常<sup>[14]</sup>。

经试验,确定了剔除近地表干扰航磁  $\Delta T$  数据进行二维小波多尺度分解的最佳处理参数,网格化间距  $1\ 000\ \text{m} \times 1\ 000\ \text{m}$ ,采用 Daubechies 德比契斯小波,计算 1 阶~6 阶异常分离。结果显示,① 1 阶分离的局部异常呈现小而分散特征,缺乏一定的连续性,主要包括未完全提出的地表干扰和部分近地表的弱小叠加异常;② 2 阶和 3 阶分离的局部异常和背景场基本相似,对单个异常的显示清晰,背景场圆滑;③ 4 阶~6 阶分离的局部异常和背景场相似且有继承性,且与 2 阶~3 阶局部异常相比,局部异常

范围明显增大,为过渡分离的背景场。同时也说明区域磁性层与上覆磁异常体存在一定的垂向距离,与本区地质背景吻合。根据部分已知局部异常的特征、空间尺度以及沉积盖层中局部构造的层位,认为 2 阶小波分离的局部异常较好的反映了盆地沉积盖层中由局部盖层引起的局部异常,剩余的背景场梯度平稳,无明显的局部叠加异常,是埋深较大的盆地磁性基底的反映(图 11)。

### 3.4 局部构造异常基本特征及展布规律

塔西南自渐新世以来一直处于挤压收缩的应力场构造环境,盆地基底和沉积盖层发生强烈变形,主要形成了基底隆起、断层相关褶皱等圈闭构造。磁性基底隆起、上覆弱磁性盖层局部发生形变都能不成程度的引起磁异常变化,能够被高精度磁测捕捉<sup>[15]</sup>。不同类型的局部构造对应的局部异常差异较大,区内主要存在三类局部构造。① 与盆地结晶基底隆起有关的局部构造异常,表现为宽缓正值异常、梯度平稳、规模大、等轴状、延伸多在几十千米、相对强度大、异常幅值多在几十~一百多纳特,如 131 纳特、231 纳特、453 纳特等(图 12(a));② 与古

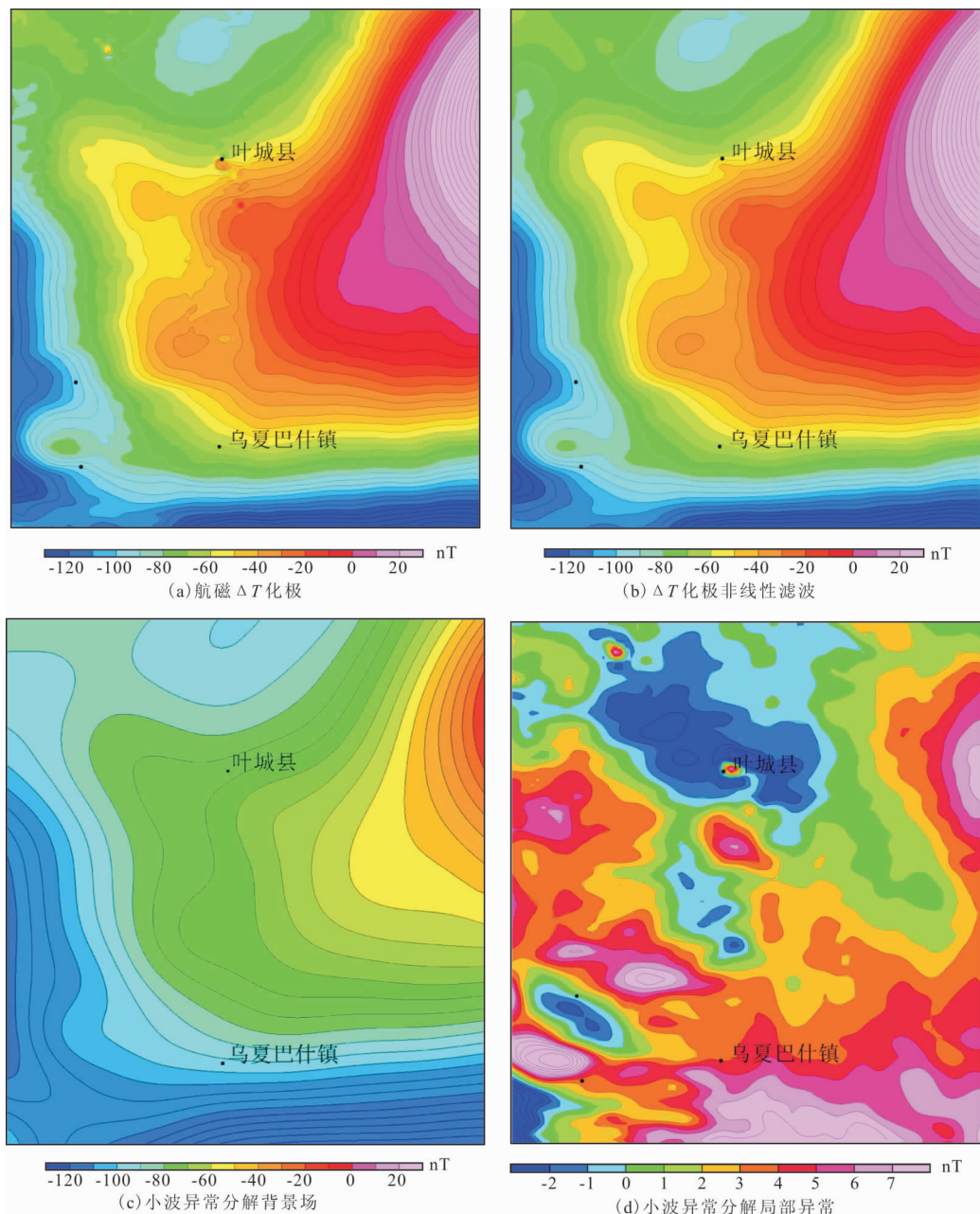


图 11 航磁  $\Delta T$  场小波多尺度分离效果图

Fig. 11 Effect diagram of aeromagnetic  $\Delta T$  field wavelet multi-scale separation

生界构造层形变有关的局部构造异常,具一定强度,异常幅值在一二十~几十纳特,梯度大、规模较大、长轴状、延伸 10 km~20 km 不等,如 422 纳特、512 纳特等;③与浅表弱磁性新生界变形有关的局部构造异常,表现为低幅值弱磁异常,异常幅值仅几个~十几纳特,宽度小(5 km~10 km),叠加在不同背景场上,表现为区域航磁上局部出现弱小波动,如 425 纳特、552 纳特等。

根据上述主要局部构造特征,基于航磁  $\Delta T$  场的二阶水平导数图和小波多尺度分离的局部异常

图,在研究区内共圈出局部构造 111 个,它们有规律的分布在 27 条局部构造带上 8 个构造区内(图 12 (b))。与以往勘探资料对比,本次新识别的可能为局部圈闭构造 23 个(表 1 中带\*)。这些圈定的局部构造轴向及局部构造带走向与邻近盆山结合带和主要逆冲推覆构造带一致,沿西昆仑北侧山前构造带自西向东延伸。表现出明显的南强北弱、西强东弱总体特征,从南部昆仑山前区域向北至坳陷中部,局部构造异常强度逐渐减弱,梯度变缓。那些指示基底隆起或古潜山的局部异常主要位于前陆坳陷区

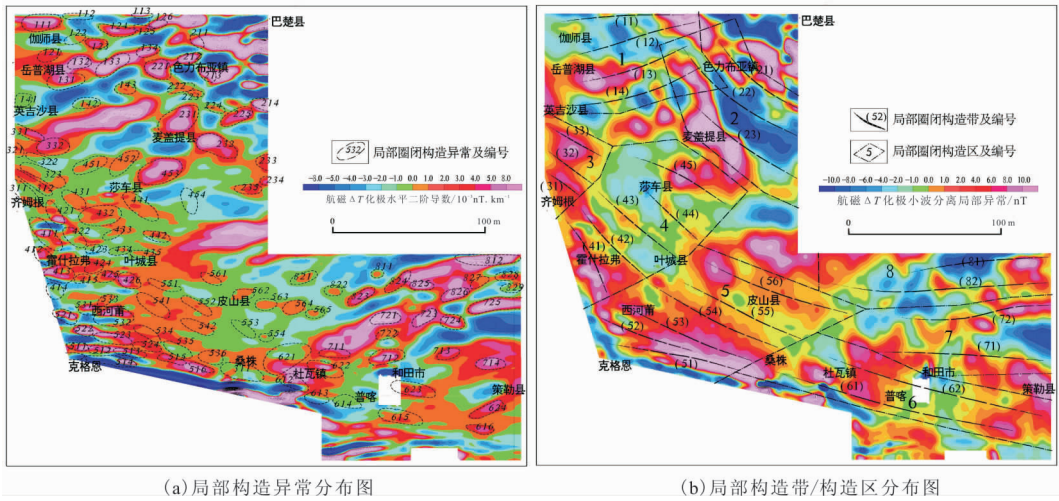


图 12 局部构造异常及分布规律图

Fig. 12 Local tectonics and their distribution pattern

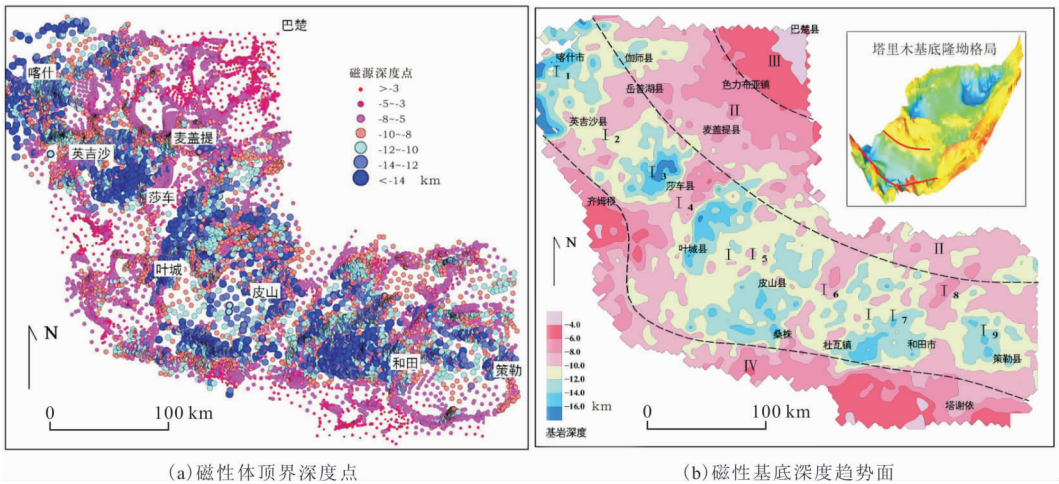


图 13 磁性体埋深点位和磁性基底深度图

Fig. 13 Magnetic body minimum burial depth point and magnetic basement depth diagram

中部岳普湖—莎车—和田北,那些与古生界局部构造对应的异常多分布于凹陷区边缘的斜坡或隆起带上,如齐姆根—西河蒲—杜瓦和色力布亚—麦盖提东一带;由浅部新生界局部构造引起的异常主要位于拗陷区边缘冲断带和中部,主要为断层折弯褶皱和盖层滑脱褶皱(如英吉沙—叶城—皮山北一带)。

## 4 磁性基底计算与基底隆坳格局

### 4.1 磁性基底计算

通过小波分解剔除局部异常后,得到的区域背景磁异常场主要由盆地结晶变质基底岩相差异和隆坳变化引起,同一磁性基底的隆坳(即深度)变化反映为磁异常的梯度变化。利用航磁数据进行深度计

算,主要是依据航磁  $\Delta T$  异常形态、梯度变化,计算磁性体的埋藏深度。在缺少先验条件下,为了快速、客观的磁性基底深度,采用欧拉反褶积方法(式 1)。该方法不需要先验信息,不受磁化方向的影响,适用于大面积的快速计算,得到场源体的水平位置和深度<sup>[16-17]</sup>。

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x}(x-x_0) + \frac{\partial f}{\partial y}(y-y_0) + \\ \frac{\partial f}{\partial z}(z-z_0) = -Nf(x-x_0, \\ y-y_0, z-z_0) \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $(x, y, z)$  为观测点位置;  $(\partial f/\partial x, \partial f/\partial y, \partial f/\partial z)$  为观点磁场梯度;  $(x_0, y_0, z_0)$  为磁源体位置;  $N$  为构造模型指数。构造指数  $(N)$  与场源的几何构造有关,不同的地质体有不同的  $N$  值。目标磁性体为深部磁性基底,其构造模型可以理解为有限延伸

表 1 局部构造分区分带统计表

Tab. 1 Statistical table of local structure zoning

局部构造区	局部构造带	局部圈闭构造代号(主要构造层)
1 岳普湖—色力布亚	1 <sup>st</sup> (11) 阿克喀什—塔克尔库	111(Pz+Cz) <sup>△</sup> , 112(Pz+Cz), 113(Pz+Cz)*
	2 <sup>nd</sup> (12) 伽师—第三农场	121(Pz)*, 122(Pz) <sup>△</sup> , 123(Pz), 124(Pz) <sup>△</sup> , 125(Pz)*, 126(Pz)
	3 <sup>rd</sup> (13) 岳普湖—色力布亚	131(Pt) <sup>△</sup> , 132(Pt), 133(Pz), 134(Pz) <sup>☆△</sup>
	4 <sup>th</sup> (14) 牙恰克	141(Cz), 142(Cz)*, 143(Cz)
2 色力布亚—麦盖提东	1 <sup>st</sup> (21) 玉代力克—康塔库木	211(Pz), 212(Pz), 213(Pz), 214(Pz)
	2 <sup>nd</sup> (22) 色力布亚—麦盖提东	221(Pz) <sup>☆△</sup> , 222(Pz)*, 223(Pz), 224(Pz), 225(Pz)
	3 <sup>rd</sup> (23) 麦盖提—海西	231(Pt), 232(Pz), 233(Pz), 234(Pz)*, 235(Pz)
3 齐姆根—英吉沙	1 <sup>st</sup> (31) 齐姆根	311(Cz) <sup>△</sup> , 312(Pz+Cz)
	2 <sup>nd</sup> (32) 黑孜尔	321(Cz), 322(Cz)*, 323(Cz)
	3 <sup>rd</sup> (33) 英吉沙	331(Cz) <sup>△</sup> , 332(Pt)
4 莎车—叶城西	1 <sup>st</sup> (41) 霍什拉甫	411(Pz), 412(Pz), 413(Pz), 414(Cz) △, 415(Pz)*
	2 <sup>nd</sup> (42) 棋盘北	421(Pz) △, 422(Pz) <sup>△</sup> , 423(Cz)*, 424(Cz), 425(Cz)*, 426(Cz) <sup>△</sup>
	3 <sup>rd</sup> (43) 泽普	431(Pz), 432(Pz) <sup>△</sup> , 433(Cz)*, 434(Cz), 435(Cz)
	4 <sup>th</sup> (44) 一杆旗	441(Pz+Cz) <sup>△</sup> , 442(Cz) <sup>△</sup>
	5 <sup>th</sup> (45) 莎车北	451(Pz), 452(Pz), 453(Pt), 454(Pz)
5 叶城—皮山南	1 <sup>st</sup> (51) 莆沙	511(Pz) <sup>△</sup> , 512(Pz) <sup>△</sup> , 513(Pz), 514(Pz), 515(Pz), 516(Pz)
	2 <sup>nd</sup> (52) 乌塘苏群	521(Pz+Cz), 522(Pz+Cz), 523(Pz+Cz), 524(Cz) <sup>△</sup>
	3 <sup>rd</sup> (53) 西河莆—克里阳	531(Pz+Cz) <sup>☆△</sup> , 532(Pz+Cz) <sup>☆△</sup> , 533(Cz)*, 534(Cz) <sup>△</sup> , 535(Cz), 536(Cz)
	4 <sup>th</sup> (54) 固满	541(Cz) <sup>△</sup> , 542(Cz) <sup>△</sup>
	5 <sup>th</sup> (55) 皮山南	551(Cz), 552(Cz), 553(Cz)*, 554(Cz)*
	6 <sup>th</sup> (56) 皮山北	561(Cz), 562(Cz), 563(Cz)*, 564(Cz), 565(Cz)*
6 和田南	1 <sup>st</sup> (61) 桑株—杜瓦	611(Pz+Cz) <sup>△</sup> , 612(Pz) <sup>△</sup> , 613(Pz+Cz) <sup>△</sup> , 614(Pz+Cz)*, 615(Pz) <sup>△</sup> , 616(Pz)*
	2 <sup>nd</sup> (62) 皮牙曼—和田	621(Pz), 622(Pz) <sup>△</sup> , 623(Pz) <sup>△</sup> , 624(Pz)*
7 和田北	1 <sup>st</sup> (71) 墨玉—策勒	711(Pz), 712(Pz), 713(Pz)*, 714(Pz)
	2 <sup>nd</sup> (72) 墨北—玉龙喀什	721(Pz), 722(Cz)*, 723(Pz), 724(Pz), 725(Pz)
8 玛扎塔格南	1 <sup>st</sup> (81) 玛扎塔格南	811(Cz), 812(Pz+Cz)
	2 <sup>nd</sup> (82) 和田北—玉龙东	821(Cz), 822(Cz)*, 823(Pz), 824(Pz), 825(Pz), 826(Pz), 827(Cz)*, 828(Cz), 829(Cz)*

Cz—新生代, Pz—古生代, Pt—元古带; \*表示本次新识别可能的局部圈闭构造, <sup>△</sup>表示地震探明, <sup>☆</sup>表示已有工业油气田

的台阶或岩墙,因此构造指数取值  $N=1^{[18]}$ 。计算步骤是:计算观测点梯度值,选择计算窗口  $10 \times 10$  (网格距),计算网格点的欧拉齐次方程,求出场源体的位置和深度值,计算区内所有网格点的磁源体位置。

全区计算得到 20 000 余个磁源体深度点(图 13(a)),对这些磁性体最小埋深数据与周围一定范围内所有的深度点进行趋势分析,由于区内磁性基底的隆起或凹陷规模较大,选取深度点的趋势分析范

围为 20 km,将明显浅于基底深度趋势面的深度点进行剔除。早期的勘探显示,塔西南前震旦系结晶基底上覆的古生界沉积层厚度普遍在 3 500 m~4 000 m,因此磁性基底趋势面之上 3 000 m 及以上的磁性体,主要是由于局部异常分离中未被完全分离的规模较大的古生界顶部和新生界磁性层局部构造引起。剔除这些深度点后绘制了盆地基底深度分布图(图 13(b)),清晰地展示了塔西南磁性基底的隆坳格局。

## 4.2 基底隆坳格局

油气生成、运移及聚集与盆地基底隆坳直接相关。图 12(b)显示,塔西南盆地前震旦系基岩深度普遍在 $-6\text{ km}\sim-12\text{ km}$ 之间,局部最深可达 $-16\text{ km}$ ,与早期认识一致,整体为北西—南东走向的坳陷带。以 $-8\text{ km}$ 和 $-6\text{ km}$ 深度分界线,可划分为 4 个特征明显的构造单元,分别为前陆中部坳陷(I)、麦盖提斜坡(II)、巴楚隆起(III)、西昆仑山前冲断带(IV)。四个构造单元组合形成典型的前陆盆地构造格架,由南向北表现为逆冲推覆带—前陆凹陷带—前端隆起(斜坡),并且对前陆中部坳陷内的次级隆起和凹陷有了更清晰地显示,前陆中部坳陷自西向东表现出清晰的隆坳有序复杂构造格局。在前陆中部凹陷带内分别以 $-10\text{ km}$ 等深线为界,清晰的展示出 9 个次级凹陷或凸起,自西向东有序排列,呈现出一凹一凸(两凹夹一凸)的格局,依次为喀什凹陷(I1)、英吉沙凸起(I2)、英吉沙东部凹陷(I3)、莎车凸起(I4)、叶城凹陷(I5)、藏桂凸起(I6)、和田凹陷(I7)、玉龙喀什凸起(I8)和策勒凹陷(I9)。个别大型凹陷区还可进一步划分多个更小一级的洼陷或凸起,如叶城凹陷(I5)可分为叶城洼陷、皮南洼陷和皮北洼陷。

## 5 结论

笔者利用物化探所最新研制的国内首套中大型无人机航空磁测系统,在塔西南地区完成了高精度的油气地质构造调查任务。经精细的数据处理,更清晰地展现了大量与含油气有利局部构造有关的微弱局部异常和基底隆坳格局,新展示了一些油气成藏相关的地质构造信息,为进一步开展油气资源勘探提供了扎实的地球物理资料。与此同时,作为国内首次采用无人机平台航空磁测系统安全、高效地完成了大面积的调查任务,证实了该套测量系统的测量能力和可靠性。该系统的成功应用,今后可在区域地质调查、矿产勘查等方面发挥重要作用。

### 参考文献:

[1] 康玉柱. 新疆油气资源开发工作回顾与展望[J]. 新疆地质, 2000, 18(2): 97—104.  
KANG Y Z. Backlook and prospect on the exploitation work of the oil—gas resources in XinJiang[J]. XinJiang Geology, 2000, 18(2): 97—104. (In Chinese)

[2] 张用夏. 含油气构造在航磁测量中的反映[J]. 石油物

探, 1983, 12(22): 18—29.  
ZHANG Y X. Representation of oil/gas traps in aeromagnetic maps[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 1983, 12(22): 18—29. (In Chinese)

[3] 徐向华, 周庆凡, 张玲. 塔里木盆地油气储量及其分布特征[J]. 石油与天然气地质, 2004(03): 300—303+313.  
XU X H, ZHOU Q F, ZHANG L. Oil and gas reserves and their distribution in Traim basin[J]. Oil&Geology, 2004(03): 300—303+313. (In Chinese)

[4] 康玉柱. 塔里木盆地油气藏(田)特征[J]. 石油实验地质, 2000, 6(22): 115—120.  
KANG Y Z. Some characteristics of oil fields in the tarim basin[J]. Experimental Petroleum Geology, 2000, 6(22): 115—120(In Chinese)

[5] 侯征, 于长春, 吴彦旺, 等. 新疆和田南部地区岩石磁化率变化特征研究[J]. 地球科学进展, 2016, 16(5): 481—493.  
HOU Z, YU C C, WU Y W, et al. Research of the Rock Magnetic susceptibility characteristics in southern Hotan Region in Xinjiang[J]. Advances in Earth Science, 2016, 16(5): 481—493. (In Chinese)

[6] 李先军, 赵祖应. 西昆仑北段矿产分布特征及找矿方向浅析[J]. 地质与勘探, 2009, 45(2): 1—7.  
LI X J, ZHAO Z Y. The mineral occurrences distribution and prospecting approaches of the northern section of the west Kunlun[ J] . Geology and Exploration, 2009, 45( 2) : 1 —7. (In Chinese)

[7] 丁道桂, 汤良杰. 塔里木盆地形成与演化[M]. 南京: 河海大学出版社: 1996.  
DING D G, TANG L J. Formation and evolution of Tarim basin[M]. Nanjing: Hohai University Press: 1996. (In Chinese)

[8] 崔志强, 李飞, 胥值礼. 彩虹—III型无人机航空磁测系统应用示范效果评述[J]. 物探化探计算技术, 2019, 41(6): 787—797.  
CUI Z Q, LI F, XU Z L. Application effect evaluation of the rainbow—3UAV aeromagnetic survey system [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 41(6): 787—797. (In Chinese)

[9] 李文杰, 李军峰, 刘世凯, 等. 自主技术无人机航空物探(磁/放)综合站研发进展[J]. 地球学报, 2014, 35(4): 399—403.  
LI W J, LI J F, LIU S K, et al. The progress in the development of the integrated UAV magnetic& radiation survey system[J]. Acta Geoscientica Sinic, 2014, 35(4): 399—403. (In Chinese)

- [10] 崔志强,胥值礼,李飞. 基于高精度航空磁测的塔西南拗陷深部地质构造研究[J]. 地质与勘探, 2020, 47(5):1238—1250.  
CUI Z Q, XU Z L, LI F. Some understanding of the deep geological structure in Southwest Tarim basin based on high-precision aeromagnetic survey [J]. Geology and Exploration, 2020, 47(5):1238—1250. (In Chinese)
- [11] 张用夏. 含油气构造在航磁测量中的反映[J]. 石油物探, 1983, 12(22):18—29.  
ZHANG Y X. Representation of oil/gas traps in aeromagnetic maps[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 1983, 12(22):18—29. (In Chinese)
- [12] 乔日新,张用夏. 高精度航空磁测在塔里木盆地油气勘查中的几点新认识[J]. 物探与化探, 2002, 26(5):334—371.  
QIAO R X, ZHANG Y X. New knowledge obtained from the application of high-precision aeromagnetic survey to oil and gas exploration in tarim basin[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2002, 26(5):334—371. (In Chinese)
- [13] 丁燕云,李占奎. 航磁寻找油气藏几种方法应用效果分析[J]. 中国海上油气(地质), 2001, 15(2):141—147.  
DING Y Y, LI Z K. An application effect analysis of several aeromagnetic methods in hydrocarbon exploration[J]. China Offshore Oil and Gas(geology), 2001, 15(2):141—147. (In Chinese)
- [14] 侯遵泽,杨文采. 中国重力异常的小波变换与多尺度分析[J]. 地球物理学报, 1997, 40(1):85—95.  
HOU Z Z, YANG W C. Wavelet transform and multi scale analysis on gravity anomalies of China[J]. Acta Geophysica Sinica, 1997, 40(1):85—95. (In Chinese)
- [15] 谢晓安,吴奇之,高岩. 塔里木盆地压扭断裂带构造特征与油气聚集[J]. 石油学报, 1997, 18(2):13—17.  
XIE X AN, WU Q Z, GAO Y. Hydrocarbon accumulation and structural characteristics of compresso-wrench fault belts in Tarim basin[J]. Acta Petrolei Ainica, 1997, 18(2):13—17. (In Chinese)
- [16] 杨文采,王家林,钟慧智. 塔里木盆地航磁场分析与磁源体结构[J]. 地球物理学报, 2012, 55(4):1278—1287.  
YANG W C, WANG J L, ZHONG H Z. Analysis of regional magnetic field and source structure in Tarim basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(4):1278—1287. (In Chinese)
- [17] 赵百民,郝天珧. 反演磁性地质界面的意义与方法[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2):353—359.  
ZHAO B M, HAO T Y. The geological significance and the inversion method of the magnetic geologic interface[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(2):353—359. (In Chinese)
- [18] 鲁宝亮,范美宁,张原庆. 欧拉反褶积中构造指数的计算与优化选取[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(3):1027—1031.  
LU B L, FAN M N, ZHANG Y Q. The calculation and optimization of structure index in Euler deconvolution [J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(3):1027—1031. (In Chinese)

## Application of the high-precision UAV aeromagnetic survey in geological structure investigation in southwestern Tarim basin

CUI Zhiqiang<sup>1,2</sup>, XU Zhili<sup>1,2</sup>, MENG Qingmin<sup>1,2</sup>, LI fei<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China;

2. The National Center for Geological Exploration Technology, Langfang 065000, China)

**Abstract:** Affected by complex piedmont structures and desert coverage, seismic exploration in the southwest of Tarim basin is challenging. Its primary geological survey is still relatively weak. Although it has experienced decades of oil and gas exploration, it has not yet made a substantial breakthrough. The author's team carried out a high-precision UAV aeromagnetic survey in the southwest of Tarim basin. The high-precision aeromagnetic survey data are obtained, and the all-night mode is adopted. Nonlinear filtering, low-pass filtering, and wavelet transform methods are used to eliminate interference anomalies from the measured data, and the separation of local anomalies and background fields is realized. The local anomaly field clearly reveals the local trap structures and their distribution rules related to oil and gas accumulation. The 3D Eulerian deconvolution is used to calculate regional magnetic basement depth, which clearly shows the uplift depression pattern of the basin basement and the characteristics of the prominent depressions. All these results have provided significant results for further oil and gas exploration.

**Keywords:** UAV; aeromagnetic survey; oil and gas geological exploration; Tarim basin