

微重力技术在中深层气藏开发上应用：以新疆油田滴西121井区为例

胡宗芳, 胡清雄, 蔡 贇, 张长瑞, 史全党, 徐桂红, 覃建强, 解远刚, 邓申申, 朱鹤文, 白雪

Microgravity Monitoring Technology for Deep Gas-Reservoir Development based on Dixi 121 Wellblock in Xinjiang Oilfield

HU Zongfang, HU Qingxiong, CAI Yun, ZHANG Changrui, SHI Quandang, XU Guihong, QIN Jianqiang, XIE Yuangang, DENG Shenshen, ZHU Hwen, and BAI Xue

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15953/j.ctta.2023.135>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微重力探测城市地下空间试验及正演模拟分析

Experiment and Forward Modeling Analysis of Microgravity Detection of Urban Underground Space

CT理论与应用研究. 2022, 31(5): 543–556

地震相控混沌反演在岩性油气藏储层预测中的应用——以RY坳陷M井区为例

Application of Chaos Inversion Controlled by Seismic Facies in Prediction of Lithologic Reservoirs: A Case Study of M Well Area in RY Depression

CT理论与应用研究. 2019, 28(5): 549–557

基于支持向量回归的陆域天然气水合物成藏预测

Prediction of Terrestrial Gas Hydrate Accumulation Based on Support Vector Regression

CT理论与应用研究. 2019, 28(3): 299–310

碎屑岩储层饱和度及水驱油效果岩心实验评价——以塔河油田九区三叠系开发区为例

Core Experimental Evaluation of Clastic Reservoir Saturation and Water Displacement Effect: Triassic Development Zone in the 9th Block of Tahe Oilfield as an Example

CT理论与应用研究. 2021, 30(3): 311–321

基于三变量柯西分布的叠前地震反演及在优质含气储层预测中的应用

Prestack Seismic Inversion based on Trivariate Cauchy Distribution and Its Application in Commercial Gas Reservoir Prediction

CT理论与应用研究. 2020, 29(5): 566–575

基于相控的振幅补偿法在渤海B油田储层预测中的应用

Application of Amplitude Compensation Method Based on Phase Control in Reservoir Prediction of Bohai B Oilfield

CT理论与应用研究. 2021, 30(6): 681–690



关注微信公众号，获得更多资讯信息

胡宗芳, 胡清雄, 蔡贇, 等. 微重力技术在中深层气藏开发上应用: 以新疆油田滴西 121 井区为例[J]. CT 理论与应用研究 (中英文), 2025, 34(1): 99-109. DOI:10.15953/j.ctta.2023.135.

HU Z F, HU Q X, CAI Y, et al. Microgravity Monitoring Technology for Deep Gas-Reservoir Development based on Dixi 121 Wellblock in Xinjiang Oilfield[J]. CT Theory and Applications, 2025, 34(1): 99-109. DOI:10.15953/j.ctta.2023.135. (in Chinese).

微重力技术在中深层气藏开发上应用： 以新疆油田滴西 121 井区为例

胡宗芳¹, 胡清雄¹, 蔡贇^{2✉}, 张长瑞¹, 史全党¹, 徐桂红²,
覃建强¹, 解远刚¹, 邓申申², 朱鹤文², 白雪³

1. 中国石油新疆油田分公司采气一厂, 新疆 克拉玛依 834000

2. 北京中科地物能源技术有限公司, 北京 100083

3. 成都神州安信科技有限公司, 成都 610000

摘要: 天然气富集差异会引起地下介质密度较大的变化, 进而引起地表重力值的响应。微重力技术通过测量地表重力值来监测气藏开发区地下密度变化, 从而推测气藏开发中的流体变化。微重力监测的重力异常分离提取对于精细刻画气藏开发层段的密度变化至关重要。优选深度递推法实现不同尺度重力场分离, 提取得到可靠的剩余重力异常场, 以新疆油田滴西 121 井区为例, 结合钻探与生产动态数据, 研究剩余微重力异常与储层特征的关系。本文将微重力技术应用于中深层储层的气藏开发, 创新性地针对研究区地质情况建立砂地比正演模型, 分析砂体厚度在剩余重力异常场中的响应情况。结果表明: 微重力技术在中深层气藏开发中应用效果较好; 气藏开发层段砂地比越高, 剩余微重力异常越低, 与正演认识相符, 并与地震数据刻画的砂体分布规律一致。

关键词: 微重力监测; 气藏开发; 深度递推法; 剩余重力异常

DOI:10.15953/j.ctta.2023.135 中图分类号: P 631 文献标识码: A

Microgravity Monitoring Technology for Deep Gas-Reservoir Development based on Dixi 121 Wellblock in Xinjiang Oilfield

HU Zongfang¹, HU Qingxiong¹, CAI Yun^{2✉}, ZHANG Changrui¹, SHI Quandang¹,
XU Guihong², QIN Jianqiang¹, XIE Yuangang¹, DENG Shenshen², ZHU Hewen², BAI Xue³

1. Gas Production Plant, Xinjiang Oilfield Company, CNPC, Karamay 834000, China

2. Beijing Zhongke Energy Geophysical Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China

3. Chengdu Shenzhou Anxin Technology Co., Ltd, Chengdu 610000, China

Abstract: The difference in natural-gas enrichment significantly affects the underground medium density and thus the surface gravity. Microgravity monitoring technology monitors the morphological changes of a gas-reservoir development zone by measuring the surface gravity to obtain the change information of gas-reservoir development. The separation and extraction of gravity anomalies in microgravity monitoring is necessitated to accurately characterize the changes in gas-reservoir development intervals. The depth recursive method is the preferred method for separating residual gravity anomalies of different scales and extract reliable residual gravity anomalies. Considering the Dixi 121 well area of Xinjiang oilfield as an example and using the dynamic data of oil and gas drilling and production, the relationship between residual microgravity anomalies and reservoir characteristics is investigated in this study. The application of microgravity technology to the development of gas reservoirs in the middle and deep reservoirs is achieved, and a sand-ground ratio forward model is innovatively established for the geological conditions of the study area to analyse the response of the sand thickness in the residual gravity anomaly field. The findings of the study indicate that microgravity technology is an efficient method for developing reservoirs of middle and deep reservoirs. the higher the sand-ground ratio of the reservoir section, the lower the residual microgravity anomaly, which is in accordance with forward modelling and the distribution law of the sand-body

收稿日期: 2023-07-04。

第一作者: 胡宗芳, 女, 学士, 工程师, 主要从事油气田物探方法研究, E-mail: huzf@petrochina.com.cn。

通信作者: 蔡贇[✉], 男, 硕士, 工程师, 主要从事时移微重力、微重力反演问题等研究, E-mail: caiyun17@mails.ucas.ac.cn。

depicted by seismic data.

Keywords: microgravity monitoring; gas reservoir development; depth recurrence method; residual gravity anomaly

微重力技术是一种高精度的重力勘探方法^[1],通过监测地质体细微密度变化产生的重力异常,实现了更精细的研究并刻画地质体特征,早期应用于地下溶洞探测和考古领域^[2-3]。在地质勘探中,重力测量广泛应用于研究区域构造^[4-5]、划分构造单元、圈定沉积盆地范围、预测远景区、识别构造样式、寻找油气成藏有利区与金属矿化带等领域^[6-9]。随着重力测量精度的提高,可以识别与提取到微伽级的重力异常,微重力技术由此得到了快速发展。微重力勘探方法也越来越多地与油气开发相结合,特别是在油气藏生产动态监测中^[10-12]。1978年至1996年,微重力技术被应用于监测荷兰格罗宁根气田的油气开采^[13-14]。

近年来,微重力技术越来越广泛地应用于油藏注气(汽)开采过程中注水情况、汽腔发育形态描述、剩余油分布预测、浅层漏气监测以及气液边界监测、剩余气开发潜力、储气库库容评价等方面^[15-22]。目前,在油气藏评价与开发中,微重力监测技术主要应用于稠油热采中,储层埋深多为浅层,不超过1000m,且密度差异较大,应用效果较好。

在其他条件相同的情况下,埋深越浅或密度差越大的目标体在地表的重力响应越明显,而随着埋深加大,储层致密程度增加,储层与围岩间密度差异减小。相比于常规重力勘探,微重力勘探技术更擅长监测更细微的地表弱重力响应并进行处理分析和解释。但其中在深层油气储层开发中的适用性和应用效果仍亟需研究。

微重力异常分离与提取是微重力技术的核心。重力异常数据在油气勘探开发应用中必须要解决的难题是如何将地下不同深度的目标体所产生的重力异常从叠加的重力异常场中提取出来。因此,重力异常分离方法的可靠性对于微重力数据成果解释环节至关重要。目前,重力异常分离的方法众多,它们均有各自的特点和适用条件。在异常分离过程中,常规方法多存在异常分离不彻底,异常体位置不准确,不具备多尺度性等缺陷,得到的剩余重力异常与实际地质情况差异较大,提高重力解释环节的准确性需要更好的微重力异常分离方法。

油气藏开发过程中,目的层剩余重力异常的有效分离提取方法,是落实天然气分布、定性描述天

然气相对富集程度、评价天然气开发潜力的关键技术。本文通过模型试验,对比多种方法的分离效果,以新疆油田滴西121井区为例,针对埋深2600m以下的中深层储层段,采用深度递推法分离出目的层剩余重力异常,结合油气钻探与生产动态,研究剩余微重力异常与储层特征的关系,为油气藏开发中井位部署与措施调整提供指导依据。

1 原理

1.1 气藏在重力异常剖面上的特征

由于布格重力异常反映的是地幔到地表所有密度体产生的重力异常叠加效应,异常曲线平滑,主要表现为低频信息,高频信息被掩盖,反映的主要是区域背景信息。相对而言,油气藏的开发层段尺度较小,从信号的频率特征上来说,主要表现为高频信息,这些高频信息为研究的有效信号,需要从布格重力异常中分离出来。

布格重力异常可以分解为3部分:远源场部分、近源场部分、目的层部分。远源场部分是指离目的层观测区距离较远,通常称这部分异常为区域异常。近源区部分是指紧邻目的层的物质密度产生的重力场。剩余重力异常提取是指从布格重力异常中去除区域异常和近源场异常,从而获得研究区目的层深度层段的重力异常。通过分析剩余重力异常特征,明确剩余重力异常与气藏密度的对应关系,初步定性确定气藏中流体的平面分布情况。

根据油气聚集规律,构造的高部位是天然气(油)的聚集场所。在非含气构造上,重力呈“正向”构造显示,即重力高往往是构造高部位的反映。但在含气构造上,重力呈“负向”(镜像)构造显示,即在重力高背景异常上出现局部(次级)重力低异常,局部重力低的低值部位对应富气高部位,局部重力低的极值部位是含气构造的高点所在。另外,在一些含气构造上,在重力低周围出现的局部重力升高是与重力低相伴生的,往往不是构造高部位的反映,而重力低部位往往反映了高部位上气藏重力低异常的特征。

在微重力监测结果中,结果在对应低值异常部位均出现一个(或两个)“两高夹一低”异常,重力异常具典型的“隆中凹”特征。有些重力异常特征

完全可以作为区分含气区、不含气区以及判断含气丰度等依据。重力低值异常的范围就是含气层的分布范围，重力低的极值部位就是含气丰度最高部位，重力异常由高向低或由低向高的转折部位就是气液边界。研究中可以根据实际测区的地质特征及参数进行正演，并得到相应的正演数据，对水、气等低密度流体产生的剩余重力异常进行对比分析，含水地层剩余重力异常值会高于含气地层的剩余重力异常值。研究中还可以结合正演数据预测气水边界位置，从而明确含气区域分布情况。

在实际监测中，含气地层有明显的重力低值，与地下呈“镜像”关系。从信号频率角度，富气区表现为高频，边水次之（图 1）。

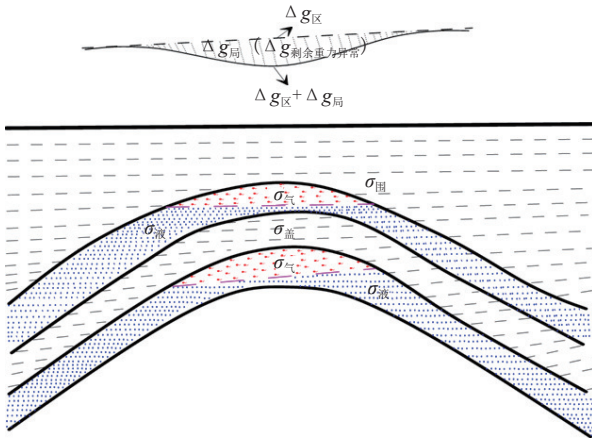


图 1 含气地层重力异常特征示意图

Fig.1 Schematic diagram of gravity anomaly characteristics of gas-bearing strata

1.2 剩余重力异常分离方法优选

常规重力异常分离方法可以分为滤波法、趋势分析法、剥皮法、非线性法等，滤波法常用的有 FK 滤波法、维纳滤波法、小波法等^[23]。这类重力异常分离方法普遍存在异常位置偏移、假异常和无法有效分离问题，如滤波法中使用的滤波器旁瓣效应引起的假异常、零相位引起的异常极值点偏移、剥皮法和非线性法对区域异常分离有效性较弱等。

石磊等^[24]选用了带通滤波法、向上延拓法、熵滤波法、非线性滤波法和优化滤波法 5 种方法进行了数据试验对比。试验结果表明，选用的 5 种方法能有效地压制高斯噪声干扰，但依旧存在浅层长方体中有效信号保留不够、部分有效信号被压制等缺点；此外，石磊对密度模型中地质体埋深、剩余密度、尺寸等多次试验后确定了一种由 3 类不同深度层共 11 个长方体组合成的通用正演模型，以此作

为重力分离方法是否能将浅、中、深不同深度的异常有效分离的标准判断模型。Meng 等^[25]延用了该正演密度模型并尝试使用优选延拓方法进行分离，也无法彻底分离出剩余重力场。蔡赞等^[19]首次将第 3 代复小波方法（dual-tree complex wavelet transform, DTCWT）应用于异常分离，使用包括通用正演密度模型在内的 3 种模型验证了 DTCWT 方法具有良好的方向性，但在深度上依旧存在残留。随后，蔡赞等^[20]改进了 DTCTW 方法，并在此基础上引入了深度学习中 YOLO v3 算法尝试识别浅部异常残留并消除，在理论模型中取得了良好效果，但由于实际生产中缺少样本数进行训练，在应用中未得到验证。

王真理等^[26]结合多种分离方法特点，提出了具有多尺度性的深度递推方法，该方法基于目标区域内局部的采样点的坐标和场值，利用深度递推法得到的采样点的区域场值具有更高的精度和准确度，目标区域的区域重力异常更符合实际情况，使得根据布格重力异常和区域重力异常得到的剩余重力异常更加准确，从而能够对地下地质体进行准确的预测。深度递推剩余重力异常分离方法是将曲面拟合与非线性分离方法相结合，局部异常计算采用曲面拟合^[27]计算区域场，然后从原数据中减去得到剩余异常。

曲面拟合方法本质是使用某个阶次的多项式曲面逼近重力区域场，通过相减得到剩余重力局部场。

$$G_{\text{resi}}(x, y, z) = G_{\text{Buge}}(x, y, z) - G_{\text{local}}(x, y, z) = \frac{G_{\text{Buge}}(x, y, z) - G^n(x, y, z)}{G_{\text{Buge}}(x, y, z) - G^n(x, y, z)}, \quad (1)$$

其中， $G_{\text{Buge}}(x, y, z)$ 、 $G_{\text{resi}}(x, y, z)$ 和 $G_{\text{local}}(x, y, z)$ 分别为布格重力场、局部重力场和区域重力场， $G^n(x, y, z)$ 为 n 阶多项式拟合的区域重力场。

非线性方法设相距间隔为 x 的 5 个点 A 、 B 、 C 、 D 、 E ，为求取 C 点的异常值，设半差 S 为（为了方便，用 A 、 B 、 C 、 D 、 E 分别也代表该点的场值）：

$$S = C - \frac{B + D}{2}. \quad (2)$$

定义 R 、 T 如下：

$$R = \frac{T}{S}, \quad (3)$$

$$T = (B - B_2) + C - C_2 + D - D_2, \quad (4)$$

其中， B_2 、 C_2 和 D_2 是 A 与 E 连线上 B 、 C 及 D 投影值。

将异常类型划分为 3 类，根据每一类对应的 R 的取值，对 C 点的异常值进行赋值计算。应用中

首先将间距小于等于 x 的异常从数据中提出, 而后对剔除异常的数据提取间距为 $2x$ 的异常。依次类推, 逐步迭代。最终间距的选择与目的层埋深和观测范围以及异常体尺寸有关。一般选取目的层埋深的一半作为最终间距的上限。非线性方法对曲面拟合的非对称性存在缺陷, 会引起分离异常形状畸变。

深度递推法 (图 2) 结合了两方法特点, 区域场对目标区域的影响在局部完全可以看作一个二阶的曲面。如果每个点都以二阶曲面拟合, 那么最终可以得到一个完整的区域场变化。如果对不同尺度的区域场, 都采用类似的二阶曲面拟合的做法, 那么可以得到所有尺度的区域场, 最终将可以实现区域场与异常场的分离。

设观测重力 Bugar 异常为 $g(x, y)$, x 、 y 分别代表地面坐标。假设:

$$g(x, y) = g_l + g_{r1} + g_{r2} + g_{r3} + \dots, \quad (5)$$

式 (5) 中, g_l 代表局部异常, g_{r1} 、 g_{r2} 、 g_{r3} 分别代表不同尺度的区域场。

设在某点 (m, n) 为中心一个较小的区域内 g_r 可以表示为:

$$g_r = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2, \quad (6)$$

式 (6) 中, x 、 y 为区域内点到中心点的距离。那么, 每点的误差平方和可以表示为:

$$E(g, g_r) = \sum_i \sum_j (g(i, j) - g_r(i, j))^2, \quad (7)$$

式 (7) 中, i, j 在点 (m, n) 为中心的区域内取值。

采用最小二乘法, 可以求得 $(a_0, a_1, a_2, a_3, a_4,$

$a_5)$ 。

对每个点都进行同样的运算, 即可求得每点的区域场值。

首先确定基本曲面大小; 其次对小尺度 (如一个采样间隔) 的数据进行异常分离, 得到小尺度异常和区域异常; 然后对得到的区域异常继续进行更大间隔 (如 2 倍间隔) 的异常分离。依次迭代, 直到得到目标层异常。深度递推法对不同尺度的区域场, 均采用二阶曲面拟合的得到所有尺度的区域场, 最终实现区域场与异常场的分离。根据公式推导, 可得知目标区埋深是对应分离尺度的 2.5 倍关系^[27]。

目前该方法已在通用正演模型及部分浅层案例如辽河油田稠油 SAGD 开发区及风城、重油 SAGD/VHSD 开发区得到了良好的应用效果, 但对于中深层气藏应用效果如何尚未可知。

2 模型试验

本次试验采用以下模型正演计算并进行重力异常分离。

模型由 4 个地质体组成, 其中 A_1 、 A_2 和 A_3 3 个地质体顶部埋深 100m, 边长为 50m 的立方体, 此 3 个地质体产生局部异常 (剩余重力异常)。另外一个地质体 B , 顶部埋深 800m, 尺寸为 400m × 500m × 150m 的长方体。剩余密度都是 0.85 g/cm³, 产生区域场 (表 1)。

图 3 是正演重力场, 希望能将 A_1 、 A_2 和 A_3 3 个地质体产生的异常从总异常中分离。图 4 (a) 是采用曲面拟合法分离的结果, 图 4 (b) 是采用非线性

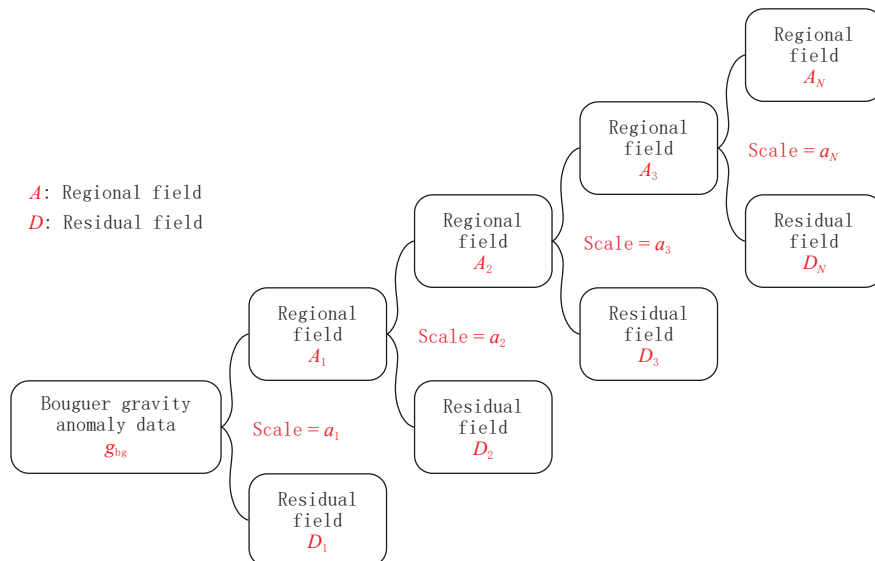


图 2 深度递推法分离异常过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of abnormal separation process via deep recurrence method

表 1 模型一正演模型参数
Table 1 Model forward parameters

直立长方体 序号	长度 /m	宽度 /m	厚度 /m	顶面埋深 /m	剩余密度 /(g/cm ³)
A ₁	50	50	50	100	0.85
A ₂	50	50	50	50	0.85
A ₃	50	50	50	100	0.85
B	400	500	150	100	0.85

性方法分离的结果，图 4(c) 是采用深度递推法分离的结果，图 4(d) 是目标地质体产生的重力异常分布（即需要提取的局部异常理论异常分布）。

对比图 4 中不同方法的分离结果，深度递推法分离得到的结果无论在异常位置及形状上都优于传统的非线性法，而曲面拟合法几乎没有将异常很好地分离，这说明其对近源异常没有分离能力，从而有力证明了相比于曲面拟合法、非线性滤波法，深度递推法在剩余重力异常提取中具有优越性。该方法不但可以较好的将区域场与剩余场分离干净，还可以依靠多尺度的能力，将 B 类和 C 类地质体产生的异常进行分离，且并不引入异常的畸变，异常提取结果清晰准确，保幅度也好于其他方法。

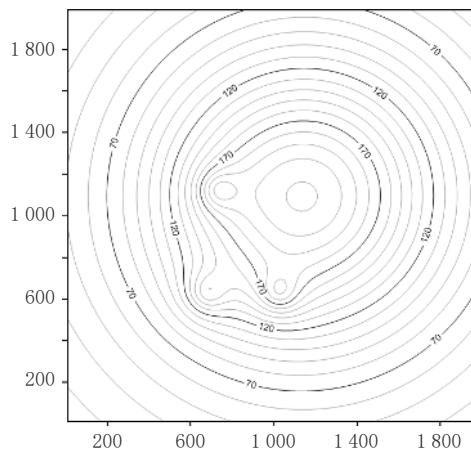
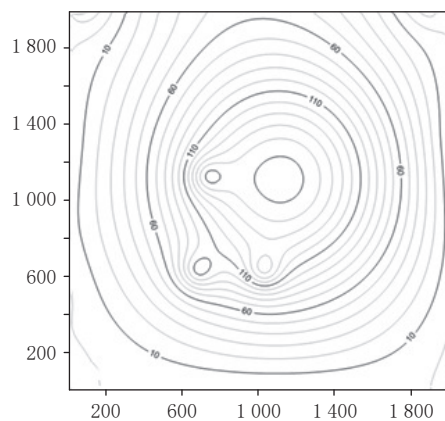


图 3 模型正演结果

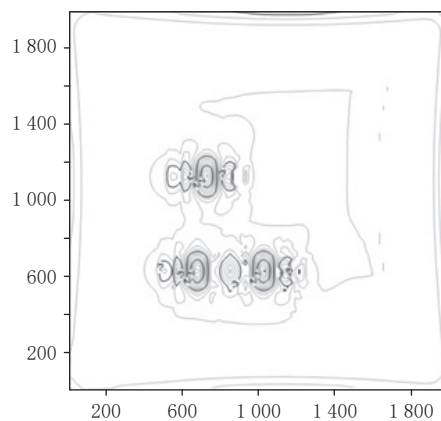
Fig.3 Model forward results

3 应用实例

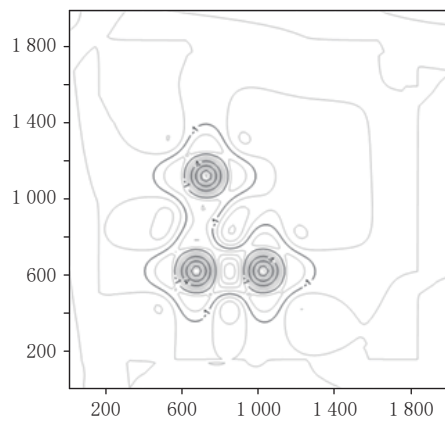
本文选取新疆油田 2021 年滴西 121 井区微重力观测数据作为实例进行分析。滴西 121 井区侏罗系头屯河组气藏埋深在 2600~2800m，属中深层气藏。该气藏的构造形态整体表现为西倾的单斜，地层整体呈东高、西低特点，局部发育鼻状构造，



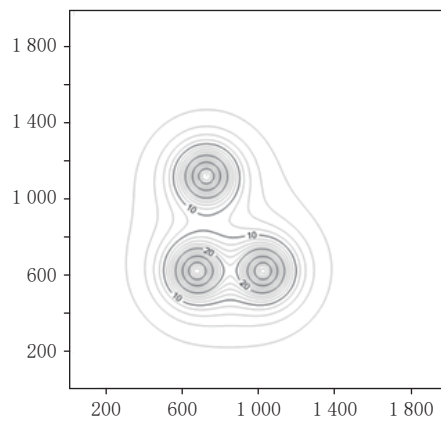
(a) 曲面拟合法异常分离结果



(b) 非线性滤波法分离结果



(c) 深度递推法分离结果



(d) 无深部异常体正演结果

图 4 多种方法异常分离结果

Fig.4 Multiple methods of obtaining abnormal separation results

地层倾角东缓西陡;北部受砂层尖灭线控制,砂层薄,岩性变细。

滴西 121 区内单井产量低,单井之间产量差别大,造成这些差异的原因尚无法确定。此外落实的两个圈闭的气藏展布范围也不清楚。

3.1 布格重力异常

2021 年 7 月 25 日至 2021 年 9 月 15 日进行野外数据采集。微重力设计点数 3137 个,实际有效测点数 3132 个,全面覆盖了整个工区。RTK 高程测量 3789 点次,包括高程加密测量 657 点次和质检测量 166 点次。监测研究区为红色方框以内区域(图 5)。本次测量重力观测精度设计值为 $0.035 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,实达 $0.012 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,高程精度实达 0.016m,已完全达到微重力测量标准。

研究区地形平整,区内地形起伏不超过 20m。经过对质量检查后的微重力数据进行格值转换、固体潮校正、零点漂移、地形校正、中间层校正、高度(自由空间)校正、正常场(纬度)校正,计算出测区布格重力异常值。其中,地形校正分别进行了近区、中区、远区 3 个区的校正,近区和中区所使用的数据来源于实测高程数据,远区改正所需数据范围远超工区范围,因此使用 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的 DEM 数据,最大程度上削弱了地形对数据的影响,保障了数据质量。

数据结果表明,布格重力异常可以很好的反映目标区背斜构造背景特征,研究区布格重力异常值呈现“东高西低”的特点(图 5(a)),对比头屯河组顶部构造图(图 5(b)),二者展示的构造信息基本

一致,说明本次提取的布格重力异常数据可靠。研究区含油气井点均位于重力场反映的构造高部位,位于天然气成藏有利区域。部分井钻遇层不在本次研究目的层内,因此以下不做展示研究。

3.2 剩余重力异常分离与提取

深度递推剩余重力异常分离提取方法用不同尺度提取出了不同深度的剩余重力异常。目标区埋深与对应分离尺度存在 2.5 倍关系该区域采样间隔为 5m,因此针对目标区头屯河组埋深 2600~2800m 的顶界曲面分别使用 208~224 的分离尺度将目的层剩余重力异常和浅层剩余重力异常分离处理。对比常规异常分离方法和深度递推法提取的剩余重力异常结果(图 6),很明显后者更能够反映出目的层内部的非均匀性特征,能提供丰富的地下介质信息。

剩余重力异常场是深度上小段范围内的重力叠加效应,包括了该范围内岩石骨架、流体、隔夹层甚至构造等的影响。在构造变化不大,地层岩性稳定的情况下,剩余重力异常可以反映地下流体富集程度,异常值由暖色变为冷色,地下流体富集程度高。剩余重力异常场中高幅值异常(暖色)表征密度相对高区域;剩余重力异常场中低幅值异常(冷色)表征密度相对低区域。研究区内天然气 Well 5 井、Well 8 井、Well 9 井均位于剩余重力异常场中低幅异常区域,表明通过深度递推法提取的目的层剩余重力异常低密度区与目的层流体富集区具有一致性。

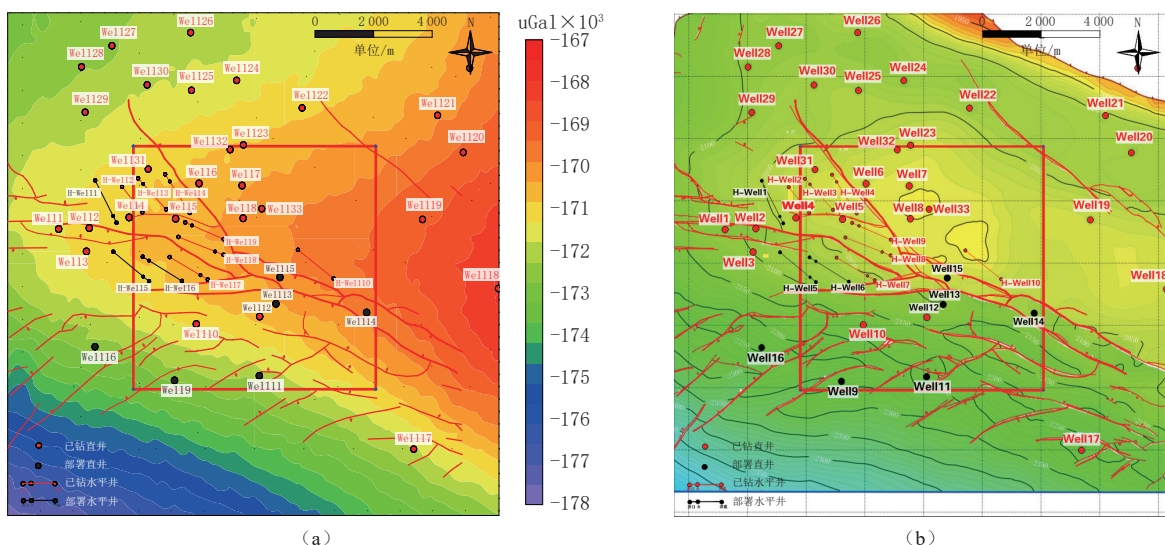


图 5 滴西 121 井区布格重力异常场等值线图与头屯河组顶面构造图

Fig.5 Contour map of Bouguer gravity anomaly field in Dixi 121 well area and structure map showing top surface of Toutunhe Formation

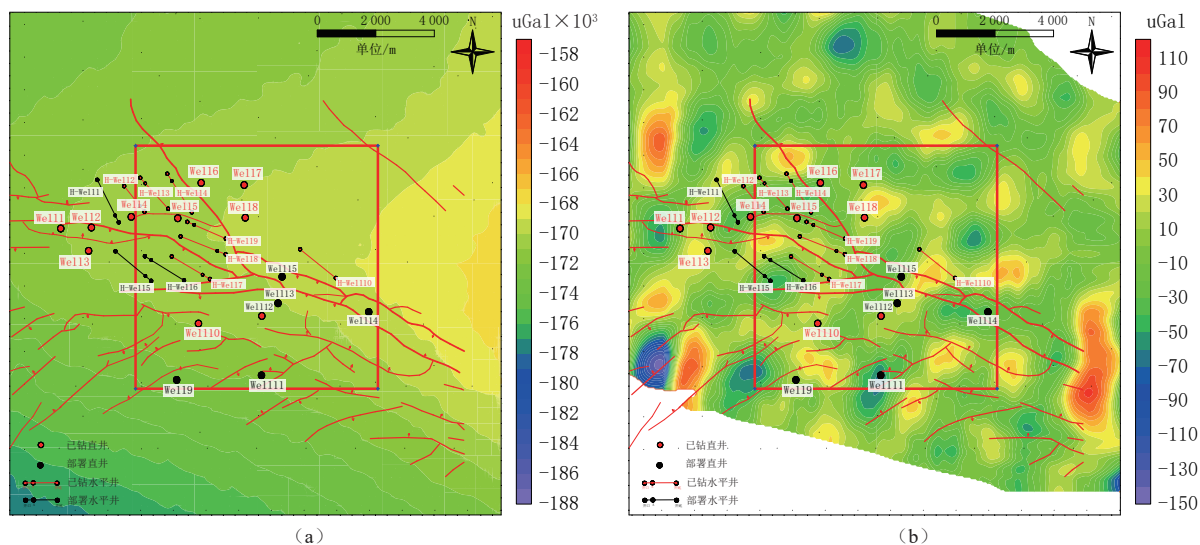


图6 高通滤波分离方法(a)和深度递推法(b)提取的目的层剩余重力异常等值线图

Fig.6 Contour map of residual gravity anomaly in target layer extracted using high-pass filter separation method (a) and depth recurrence method (b)

3.3 砂地比的重力场响应

为了提高监测目标体边界刻画精度,得到流体产生的异常信号,需要明确目的层岩石骨架在重力场中的响应情况。研究区沉积背景为湖侵退积,发育东西双物源,主要物源来自北部隆起剥蚀区,底部主要发育三角洲平原和前缘亚相,区内发育三角洲前缘水下分流河道砂体。目的层的岩石类型主要为碎屑砂岩和泥岩,其中砂岩层的厚度与目的层段地层总厚度的比值即为砂地比(表2)。在三角洲沉积体系中,砂地比对沉积微相的划分具有重要指导作用,而沉积微相分布与流体富集区域密切相关。为此,建立砂地比正演模型,进行对比分析,明确剩余重力异常与砂地比关系。

假设地下存在一剩余密度体, 根据公式(8)可以计算出地表任意一点的理论重力。

$$\Delta g(x, y, z) = G \iiint_V \frac{\sigma(\xi, \eta, \zeta) \cdot (\zeta - z) d\xi d\eta d\zeta}{((\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + (\zeta - z)^2)^{3/2}}, \quad (8)$$

其中, ξ, η, ζ 为地下密度异常体的位置; σ 为剩余密度; x, y, z 是地表重力测量点的位置。目的层中砂层密度小于泥岩密度, 假设地层厚度一定情况下, 对不同厚度砂层的剩余密度模型进行正演 (图 7)。根据砂地比与重力峰值的关系曲线 (图 8), 可知在地层厚度一定的情况下, 砂地比越高, 剩余重力异常峰值越小。地层厚度相同, 砂岩越厚, 相对而言该区“亏损”的密度越大, 因此在地表的重力场表征为低值。

根据目标区地层厚度与砂地比统计情况(表2),针对不同砂地比建立正演密度模型进行计算并使用相同的参数进行异常分离,为了进一步减小统计误差,在地层厚度范围内每隔1 m取剩余异常值并最

表 2 目标区地层厚度与砂地比统计表
Table 2 Statistical table of formation thickness and sand ratio in target area

井号	头屯河组 地层厚度/m	头屯河组 砂厚/m	头屯河组 砂地比	t ₁ 地层 厚度/m	t ₁ 砂厚 /m	t ₁ 砂 地比	t ₂ 地层 厚度/m	t ₂ 砂厚 /m	t ₂ 砂 地比	平均剩余密度 /(g/cm ³)
Well5	54.00	20.00	0.37	54.00	20.00	0.37	—	—	—	0.53
Well4	52.00	18.00	0.35	52.00	18.00	0.35	—	/	/	0.35
Well2	58.00	18.00	0.31	58.00	18.00	0.31	/	/	/	0.58
Well1	59.00	15.00	0.25	59.00	15.00	0.25	/	/	/	0.60
Well3	57.70	13.00	0.23	57.70	13.00	0.23	/	/	/	0.62
Well8	87.00	17.00	0.20	56.20	17.00	0.30	—	/	/	0.55
Well12	134.00	20.00	0.15	66.50	16.00	0.24	67.50	4.00	0.06	0.36
Well10	170.00	19.00	0.11	50.00	3.00	0.06	120.00	16.00	0.13	0.61
Well6	84.50	6.00	0.07	55.00	4.00	0.07	29.50	2.00	0.07	0.31

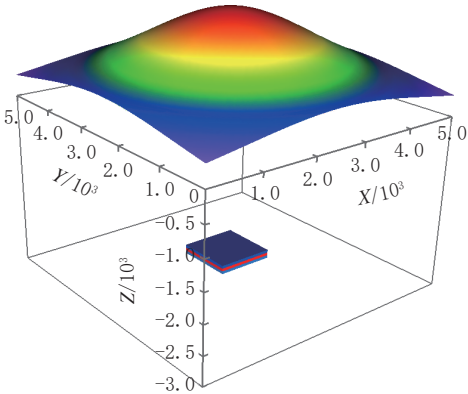


图 7 砂体剩余密度模型正演示意图
Fig.7 Sand-body residual density model showing the intent

终平均得到层段内平均剩余重力异常。考虑到异常分离方法无法做到保幅特性，对计算得到的正演段内平均剩余重力异常与统计得到的实际段内平均剩余重力异常进行归一化处理对比(表 3 和图 9)。

正演段内剩余重力异常(图 9 中蓝色圆点)代表着不同砂地比情况下平面上某一点在目标体内的平均剩余重力异常，实际段内平均剩余重力异常

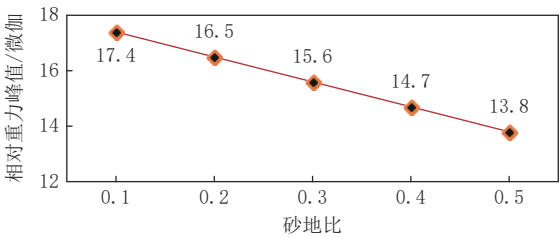


图 8 砂地比与重力峰值曲线图
Fig.8 Sand ratio and peak gravity curve

(图 9 中红色三角形)由分离结果中目标层段内不同深度剩余重力异常统计平均得到。图 9 结果表明，目标区砂体范围内中 8 口已知直井(Well 6、Well 7 不含砂，Well 9 和 Well 11 未钻，因此不做统计)在不同砂地比情况下正演计算得到平均剩余重力异常与实际平均剩余异常存在明显相关关系，两者数据拟合直线斜率十分相近，且实际统计结果拟合曲线确定系数 R^2 高达 0.868。

实际统计值与正演计算值拟合曲线之间斜率存在差异可能是由于测录井中带来的数据误差造成或已知样本数量过少造成的细微差异，不影响最终结

表 3 实际剩余重力异常与正演剩余重力异常归一化统计表
Table 3 Normalized statistical table of actual and forward residual gravity anomalies

井号	头屯河组砂地比	归一化前		归一化后	
		实际段内平均剩余重力异常	正演段内平均剩余重力异常	实际段内平均剩余重力异常	正演段内平均剩余重力异常
Well5	0.37	-8.43	17.97	0.08	0.00
Well4	0.35	-9.81	17.99	0.00	0.09
Well2	0.31	-2.25	18.02	0.43	0.23
Well1	0.25	-2.97	18.07	0.39	0.45
Well3	0.23	3.79	18.10	0.78	0.56
Well8	0.20	3.96	18.12	0.79	0.68
Well12	0.15	2.84	18.17	0.73	0.86
Well10	0.11	7.58	18.20	1.00	1.00

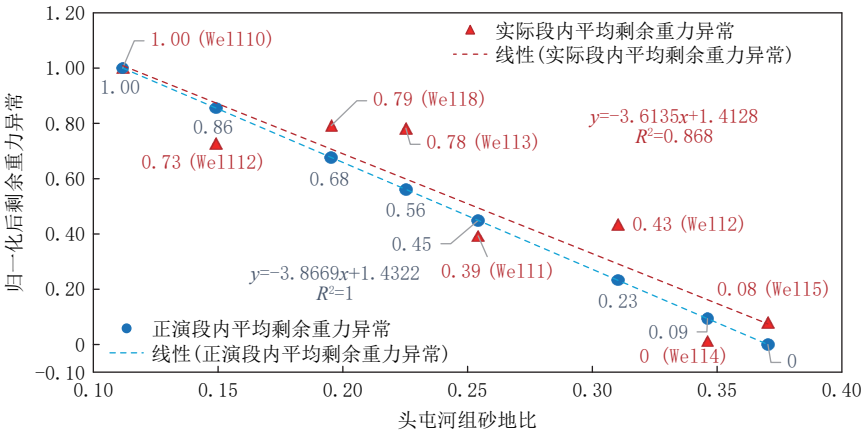


图 9 归一化后实际剩余重力异常与正演剩余重力异常对比图
Fig.9 Comparison between actual and forward residual gravity anomalies after normalization

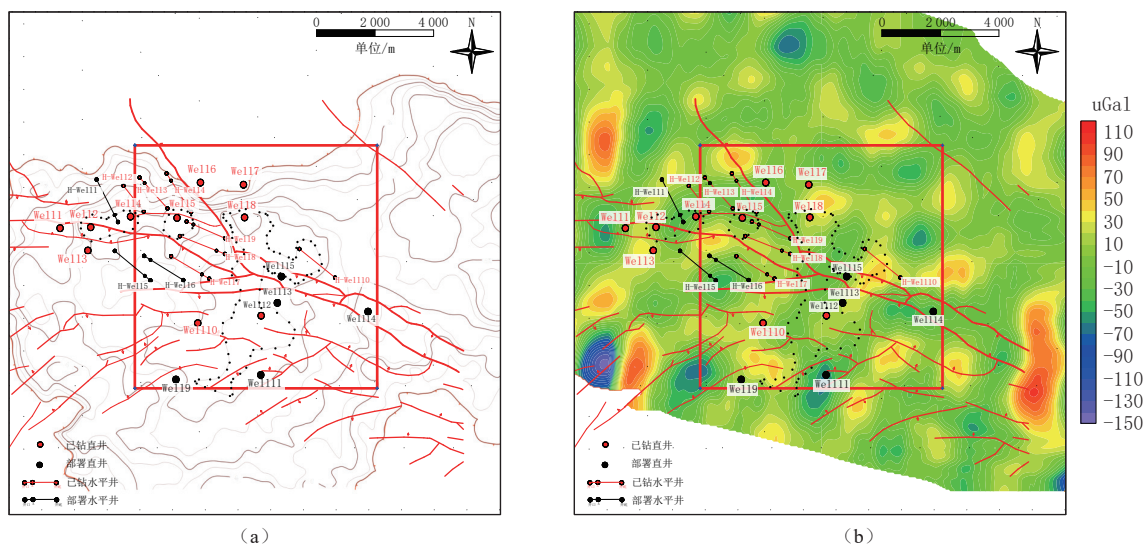


图 10 头屯河组砂体厚度图 (a) 与剩余重力异常场 (b) 对比图

Fig.10 Comparison of sand-thickness map (a) and residual gravity anomaly field (b) in Toutunhe Formation

论。当样本足够多时,两拟合曲线将无限逼近。

已知井验证了井周剩余重力异常的可靠性,从平面角度来看,对于无井或少井区域,剩余重力场对砂体厚度预测能起到较好效果。在研究区(红色线框)内,砂体厚度较大的区域(图 10(a)中黑色选线)在图 10(b)中剩余重力场中体现为低异常,即砂体厚度越大,密度相应越低,剩余重力值越小。深度递推法所获得的剩余重力异常场为含气有利区划分提供了一种新的地球物理手段。

4 结论

本文优选深度递推法对中深层气藏开发进行微重力监测,并进行理论模型试验。在实践案例中选取新疆油田滴西 121 井区 2021 年重力观测资料进行处理。经过模型试验和案例分析得出以下结论。

(1) 根据模型试验重力异常分离结果,优选的深度递推法比曲面拟合法、非线性滤波法在剩余重力异常提取与分离方面具有分离更彻底、异常位置更准确、多尺度性等优势。

(2) 实际应用中,在中深层目的层段平面密度变化均匀的情况下,分离的目的层剩余重力异常场保留了更多细节信息,与实际地下流体富集情况较为一致,体现了微重力监测技术在中深层气藏上适用性较好。

(3) 在研究区内创新性地针对目的层的砂地比建立对应正演模型,从单井测井信息和平面砂体厚度分布两个角度分析了砂体厚度在剩余重力异常场中的响应情况,结果表明,在地层厚度一定的情况下,砂地比越高,剩余重力异常峰值越小,实测统

计数据拟合曲线确定系数 R^2 高达 0.868。最终结果与地震数据刻画的砂体分布规律一致。

参考文献

- [1] 王谦身,张赤军,周文虎,等.微重力测量:理论、方法与应用[M].北京:科学出版社,1995.
WANG Q S, ZHANG C J, ZHOU W H, et al. Microgravity measurement: Theory, methods and applications[M]. Beijing: Science Press, 1995. (in Chinese).
- [2] 石亚雄,孙少安,吴丽华,等.微重力测量在溶洞探测中的应用[J].物探与化探,1991, 15(6): 468-470.
SHI Y X, SUN S A, WU L H, et al. The application of minigravity survey to Carst cave exploration[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1991, 15(6): 468-470. (in Chinese).
- [3] 王谦身,周文虎.微重力方法在考古工程中的应用——明茂陵地下陵殿探查[J].地球物理学进展,1995, 10(2): 85-94.
WANG Q S, ZHOU W H. The application of microgracimetry in archaeological engineering—proseciton of underground palcace of Maoling mausoleum of Ming Dynasty[J]. Progress in Geophysics, 1995, 10(2): 85-94. (in Chinese).
- [4] 曾华霖.重力场与重力勘探[M].北京:地质出版社,2005.
ZENG H L. Gravity field and gravity exploration[M]. Beijing: Geology Press, 2005. (in Chinese).
- [5] 王萌,姚长利,孟小红,等.卫星重力资料的处理及其在南美洲大陆区域构造研究中的应用[C]//中国地球物理论文集,2013: 52-53.
WANG M, YAO C L, MENG X H, et al. The processing of satellite gravity data and its application in the study of regional tectonics of the South American conti-

- nent[C]//Chinese Geophysical Papers. Kunming, 2013: 52-53. (in Chinese).
- [6] 黄金明. 重磁数据处理解释技术在华南地区岩体圈定与形态反演中的应用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
HUANG J M. The study of gravity and magnetic data processing and interpretation method on boundary delineation and shape inversion of rock body in south China[D]. Beijing: China University of Geosciences Beijing, 2013. (in Chinese).
- [7] 刘燕平, 任康. 海南岛戈枕金矿带重力勘探实验研究[J]. 物探与化探, 1995, (4): 311-315.
LIU Y P, REN K. Gravity exploration experimental study of the Gezhen gold ore belt, Hainan island[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1991, 15(6): 468-470. (in Chinese).
- [8] 袁学诚. 论中国西部岩石圈三维结构及其对寻找油气资源的启示[J]. 中国地质, 2005, 32(1): 1-12. DOI:10.3969/j.issn.1000-3657.2005.01.001.
YUAN X C. 3D lithospheric structure of western China and its enlightenment on petroleum prospecting[J]. Geology in China, 2005, 32(1): 1-12. DOI:10.3969/j.issn.1000-3657.2005.01.001. (in Chinese).
- [9] 马小雷. 鄂尔多斯盆地西南部地球物理场特征与砂岩型铀矿关系[D]. 西安: 西安石油大学, 2016.
MA X L. The relationship between Geophysical field features and sandstone-type uranium deposits in the west-south of Ordos Basin[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2016. (in Chinese).
- [10] 徐桂芬, 赵文举, 何展翔, 等. 时移微重力监测技术在油气田开发中的应用[C]//2017 物探技术研讨会论文集, 2017: 775-777.
XU G F, ZHAO W J, HE Z X, et al. Application of time-lapse microgravity monitoring technology in oil and gas field development[C]//Geophysical Exploration Technology Seminar, 2017: 775-777. (in Chinese).
- [11] 赵文举, 刘云祥, 胡文涛. 时移微重力监测技术在气藏开发中的应用[C]//中国地球科学联合学术年会, 2017: 1425-1426.
ZHAO W J, LIU Y X, HU W T. Application of time-lapse microgravity monitoring technology in gas reservoir development[C]//China Earth Science Joint Academic Conference, 2017: 1425-1426. (in Chinese).
- [12] 冯强汉, 魏千盛, 江磊, 等. 微重力监测技术在气藏开发中的应用[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(10): 1571-1580.
FENG Q H, WEI Q S, JIANG L, et al. The application of microgravity monitoring technology in gas reservoir development[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(10): 1571-1580. DOI:10.11764/j.issn.1672-1926.2021.07.012. (in Chinese).
- [13] MARTIN V G, ROGER H, MIRJAM, B. Gravity changes and natural gas extraction in Groningen[J]. Geophysical Prospecting, 2001, 47(6): 979-993. DOI:10.1046/j.issn.1365-2478.1999.00159.x.
- [14] JENNIFER L H, JOHN F F, CARLOS LV A, et al. 4-D microgravity modeling and inversion for waterflood surveillance: A model study for the Prudhoe Bay reservoir, Alaska[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 1997, Society of Exploration Geophysicists, 1997, 513-516. DOI:10.1190/1.1885948 issn.1052-3812.
- [15] 袁炳强, 陈青, 党炜. 新疆和田凹陷重力场与构造特征[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2009, 39(3): 399-403.
YUAN B Q, CHEN Q, DANG Y. The gravity field and tectonic feature at Hetian depression of Xinjiang[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2009, 39(3): 399-403. (in Chinese).
- [16] 李玉君, 任芳祥, 杨立强, 等. 稠油注蒸汽开采蒸汽腔扩展形态 4D 微重力测量技术[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(3): 381-384. DOI:10.11698/PED.2013.03.19.
LI Y J, REN F X, YANG L Q, et al. Description of steam chamber shape in heavy oil recovery using 4D microgravity measurement technology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(3): 381-384. DOI:10.11698/PED.2013.03.19. (in Chinese).
- [17] 辛坤烈. 蒸汽腔立体监测技术在 SAGD 开发中的应用[J]. 中外能源, 2018, 23(9): 43-51.
XIN K L. Application of three-dimensional monitoring technique of steam chamber to SAGD development[J]. Sino-global Energy, 2018, 23(9): 43-51. (in Chinese).
- [18] 蔡宁晓, 王真理, 周大胜, 等. 注蒸汽稠油热采开发区浅层汽窜的微重力勘探方法[J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(1): 235-242. DOI:10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2019.01.027.
CAI N X, WANG Z L, ZHOU D S, et al. A microgravity method for prospecting shallow steam channeling in thermal recovery zones[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(1): 235-242. DOI:10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2019.01.027. (in Chinese).
- [19] 蔡赞, 王真理, 梁瑶, 等. 双树复小波变换在时移微重力监测上的应用——以辽河油田 SAGD 区为例[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(2): 549-558. DOI:10.6038/pg2021DD0529.
CAI Y, WANG Z L, LIANG Y, et al. Application of DTCWT in time-lapse microgravity monitoring: A case study from SAGD area of Liaohe Oilfield[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(2): 549-558. DOI:10.6038/pg2021DD0529. (in Chinese).
- [20] 蔡赞. 基于双树复小波和 YOLO v3 算法的微重力异常分离研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
CAI Y. Research on separation of microgravity anomaly based on dual tree complex wavelet and YOLO v3 algorithm[D]. Beijing: University of Chinese academy of sciences, 2020. (in Chinese).
- [21] 廖伟, 刘国良, 何国林, 等. 基于微重力监测技术的地下储气库库容动用评价方法[J]. 天然气工业, 2022, 42(3): 106-113. DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2022.03.012.
LIAO W, LIU G L, HE G L, et al. Underground gas stor-

- age capacity utilization evaluation method based on microgravity monitoring technology[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(3): 106-113. DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2022.03.012. (in Chinese).
- [22] 刘代芹, 玄松柏, 陈石, 等. 基于高精度时变微重力方法研究呼图壁储气库地下介质密度变化特征[J]. *地震地质*, 2022, 44(2): 414-427. DOI:10.3969/j.issn.0253-4967.2022.02.009.
- LIU D Q, XUAN S B, CHEN S, et al. Study on the density variation characteristics of underground medium in Hutubi gas storage based on high-precision time-varying microgravity method[J]. *Seismology and Geology*, 2022, 44(2): 414-427. DOI:10.3969/j.issn.0253-4967.2022.02.009. (in Chinese).
- [23] 郭良辉, 孟小红, 石磊, 等. 重力异常分离的相关方法[J]. *地球物理学进展*, 2008, 23(5): 1425-1430. DOI:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.020.
- GUO L H, MENG X H, SHI L, et al. Preferential filtering method and its application to Bouguer gravity anomaly of Chinese continent[J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 55(2): 4078-4088. DOI:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.020. (in Chinese).
- [24] 石磊, 陈石, 蒋长胜, 等. 2013. 基于优化滤波法对芦山地震震区重力异常特征的分析[J]. *地震学报*, 2013, 35(5): 704-716. DOI:10.3969/j.issn.0253-3782.2013.05.009.
- SHI L, CHEN S, JIANG C S, et al. Characteristics of gravity anomaly in Lushan earthquake zone based on preferential filtering method[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2013, 35(5): 704-716. DOI:10.3969/j.issn.0253-3782.2013.05.009. (in Chinese).
- [25] MENG X H, GUO L H, CHEN Z X, et al. A method for gravity anomaly separation based on preferential continuation and its application[J]. *Applied Geophysics*, 2009, 6(3): 217-225. DOI:10.1007/s11770-009-0025-y.
- [26] 王真理. 一种获得剩余重力异常的方法及装置: 201711216885.9[P]. 2018-05-08.
- WANG Z L. Method and apparatus for obtaining residual gravity anomaly: 201711216885. 9[P]. 2018-05-08. (in Chinese).
- [27] 蔡宁晓. 基于多尺度曲面拟合的异常提取方法及应用研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- CAI N X. Research on anomaly extraction method and application based on multiscale surface fitting[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese).