殷睿,张春灌,袁炳强,等. 利用重磁资料研究 Vøring 盆地断裂构造与油气远景[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(5): 43-54. YIN Rui, ZHANG Chunguan, YUAN Bingqiang, et al. Fault structure and the oil and gas prospect of the Vøring Basin using gravity and magnetic data[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(5): 43-54.

# 利用重磁资料研究 Vøring 盆地断裂构造与油气远景

殷睿<sup>1,2</sup>,张春灌<sup>1,2\*</sup>,袁炳强<sup>1,2</sup>,胡洪川<sup>1,2</sup>

(1 西安石油大学地球科学与工程学院, 西安 710065; 2 西安石油大学, 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 西安 710065)

摘 要:挪威中部近海的 Voring 盆地油气地质条件良好,为了深入了解该区的断裂构造特征 和油气勘探潜力,系统整理了现有的重磁数据。使用变纬度化极技术消除跨纬度变化对于磁 力数据的影响,并运用位场边缘识别技术提取本区位场边缘识别信息。综合已有地质和地球 物理认识,对研究区的重磁异常特征进行系统分析,确定了 Voring 盆地的断裂构造特征,划 分了油气勘探有利区。研究结果表明, Voring 盆地内次级断裂走向复杂,有 NE、近 SN 向 2 组主要断裂,同时多被沿 NW 和近 EW 向发育的 2 组断裂切断。盆地还发育有 4 条大的边界 断裂 (F1—F4),这些断裂控制了本区次级构造的发育。在 Voring 盆地内圈定了油气勘探有 利区,在重力垂向二阶导数异常图上反映为异常幅值高、异常梯度变化大、有断裂控制的异常 带及其侧翼。

关键词: 挪威; Vøring 盆地; 重磁异常; 断裂构造; 勘探有利区 中图分类号: P618.13; P736 文献标识码: A DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.135

### 0 引言

Voring 盆地位于北极地区挪威中部近海,有着 丰富的矿产资源,但环境气候条件十分恶劣,故在 油气地质方面的研究程度较其他地区偏低<sup>[1]</sup>。挪威 中部近海的勘探由来已久,从1980年开始,挪威就 将油气开采重心转移到了挪威中部地区。美国地 质调查局一份统计表明,挪威中部油气勘探潜力很 高,是寻找油气的重点地区<sup>[2]</sup>。其中,Vøring 盆地代 表了挪威中部近海广阔的未被充分勘探的深水地 区,具有极高的油气资源潜力<sup>[3]</sup>。在过去的 40 年间, 挪威中部陆架开展了大量的油气勘探工作,在地球 物理探测上也取得了一些进展,但仍存在许多争议, 特别是 Vøring 盆地所在的挪威中部边缘的外缘和

#### 收稿日期: 2024-06-12

资助项目: 国家自然科学基金 "Jan Mayen 微陆块深部结构和物质组成的 地球物理约束及构造意义" (42172224)

**第一作者:** 殷睿(1997—), 男, 在读硕士, 主要从事地球物理综合解释方面的研究工作. E-mail: 2529361810@qq.com

\*通讯作者:张春灌(1981一),男,博士,教授,主要从事综合地球物理勘 探及构造地球物理方面的研究工作.E-mail:zhangchunguan@xsyu.edu.cn 远端,对于断裂构造和深部边缘的组成等有所争 论<sup>[4-7]</sup>。

为了深入了解 Voring 盆地的断裂构造特征和 油气勘探潜力, 对重力和磁力数据进行了系统地整 理, 使用变纬度化极技术避免跨纬度变化对于磁力 数据的影响, 并运用位场边缘识别技术提取本区位 场边缘识别信息。对布格重力异常、磁力化极异常 进行了滑动平均等滤波处理以达到分离区域重力 异常和局部重力异常的效果。通过水平总梯度等 边缘识别技术以获取更高分辨力的位场边缘信息。 系统地分析了上述获取的异常特征, 并将重力垂向 二阶导数异常获取的重力局部异常信息和现有的 油气田分布特征, 结合地区的生储盖组合、油气运 移和聚集成藏等地质认识以及二维地震剖面的解 释结果, 以确定 Vøring 盆地断裂构造特征并圈定油 气勘探有利区。

### 1 地质背景

#### 1.1 区域地质特征

Vøring 盆地是挪威中部被动大陆边缘的重要

组成部分,形成于晚侏罗世一早白垩世一次主要的 伸展期<sup>[8]</sup>。之后3个伸展阶段和3个压缩阶段记录 了挪威和格陵兰之间从裂谷到海底扩张的转变。 海底扩张开始后, Vøring 盆地整体处于挤压状态, 在早始新世和中渐新世发生了2次主要挤压事件。 中侏罗世晚期---早白垩世大量的地壳伸展和减薄 导致了 Vøring 盆地主要发育白垩系盆地。盆地经 历了快速的差异沉降,并被分割成多个小型盆地。 白垩纪时期, Vøring 盆地内的大部分构造已经发育 成熟,盆地内沉积了以细粒碎屑岩为主的上白垩统 地层<sup>[9]</sup>。从上白垩纪早期到晚期, Vøring 盆地出现 了东格陵兰物源的碎屑物质的输入。新生代边缘 裂陷导致大陆分裂,岩浆岩大量侵入,部分在表面 以溢流玄武岩的形式向 Vøring 断崖向内陆延伸 10~40 km(内流),部分以基岩的形式侵入 Vøring 盆地的沉积物中,可能也侵入形成内缘隆起核心的 大陆块体<sup>[10]</sup>。在整个新生代期间,盆地内演化出了 穹窿构造。此外,岩浆物质以侵入体的形式侵入 Vøring 崖峭两侧的下地壳。这些构造要素对整个

新生代和第四纪大陆边缘的沉积分布起了重要作用<sup>[11]</sup>。

从区域地质(图 1)可以看出,研究区西北部主 要发育有始新统,中部呈 NE 向展布上新统大面积 发育,两者交界处存在海陆过渡带,大面积发育与 断裂有关的玄武岩流,局部存在因裂陷作用变薄的 陆壳,在其东部边缘发育有连续的古近系地层,东 北局部存在一些较老的地层。Vøring 盆地(大致 位于 63°—69°N、2°—12°E)是呈 NE 向展布的大型 沉积盆地,盆地内主要区域发育有上新统。南部边 界为 NW 向的 Jan Mayen 断裂带,将 Møre 盆地和 Vøring 盆地相分隔,北部以 Bivrost 断裂带为界,2 条断裂近平行,在西侧与 Vøring 高原以 Vøring 崖 峭为界,东部则以一系列小型断裂形成与 Trøndelag 台地的边界,盆地内部发育有众多的 NE 向展布的 断裂。

### 1.2 油气地质特征

目前的油气发现主要集中在侏罗系断陷,在中





侏罗系顶面深可达 3 000 m, 发育上侏罗统的优质 烃源岩和海相砂岩储层、白垩系的浊积砂岩储层发 育<sup>[13]</sup>。挪威中部陆架盖层分布广泛, 烃源岩主要分 布在下侏罗统三角洲平原相泥页岩和上侏罗统海 相泥页岩。其中, 上侏罗统海相泥页岩和上侏罗统海 相泥页岩。其中, 上侏罗统海相泥页岩是主力烃源 岩, 储层主要分布在中侏罗统滨浅海相砂岩和白垩 系一古近系浊积砂岩(图 2)。结合生储盖组合可将 挪威中部陆架油气成藏模式归为下生上储型和上 生下储型 2 类<sup>[14-15]</sup>, 第 1 组是以下侏罗统的煤层、 页岩为烃源岩, 以中侏罗统的砂岩为储层, 以上侏 罗统的泥页岩为盖层, 属于下生上储型, 烃类流体 通过垂向断裂向上第一或二次运移至砂岩储层。 另 1 组是以上侏罗统的泥页岩为差层, 属于 上生下储型, 烃类流体自排出后可以快速进入圈闭 成藏。

### 2 地球物理场特征

#### 2.1 布格重力异常

研究区覆盖范围为 0°—12°E、62°—69°N, 重力 资料来源于斯克里普斯海洋研究所发布的全球重 力数据库 V29.1。该数据库中的海域重力资料来自 卫星测高重力资料, 精度可达 4×10<sup>-5</sup> m/s<sup>2</sup>, 空间分 辨率约为 8 km, 可以满足 1:1 000 000 比例尺面积 性海洋重力工作的需要<sup>[16-17]</sup>。为了得到布格重力 异常, 需要对研究区的卫星重力异常进行布格校正, 将得到的卫星自由空间重力异常和高程数据利用 公式<sup>[18]</sup> 计算出研究区的布格重力异常并编制成图。



图 2 挪威中部陆架岩性柱状图

Fig.2 Lithological column of the central Norwegian shelf

成图结果显示,本区内的布格重力异常通常表现为 条带状或块状分布,异常值介于(79.6 ~182.1)× $10^{-5}$  m/s<sup>2</sup>。

由布格重力异常图(图3)可以观察到,宏观上 重力异常呈西北高、东南低,中部高低间梯级带十 分发育的特征。西部大范围高值区与南部、中部、 北部的过渡区存在明显的异常变化,呈 NE 或 NW 向线性展布,可以为不同区域的分界提供依据。南 部异常多呈不规则块状、NE 向展布, 高低值过渡带 多连续且延伸较长。东北部异常多呈条带状展布, 3条高值异常散布在1条连续性较好且呈"U"形低 值异常的周围。东部多呈大范围的低值异常,零星 由局部的高值异常散布其中。中部异常区主要呈 现出3大特征,即宏观上异常走向多呈 NE 向展布 或近 SN 向展布、从 NE 到 SW 异常高值和异常低 值相间分布、在局部的高值区或低值区也发育有规 模较小的重力低值或高值区。大体以 66°N 为界, 北侧布格重力异常走向有 NE 和 NW 向, 宏观为 NE 向,而南侧的布格重力异常走向为近 SN 向展布。

在该区识别了几个狭长的低重力异常,走向大致为 NE向,低值异常带被NE向的狭长高值异常带分隔 开,高值圆形重力异常沿着西部边界分布。宏观上 重力异常图的重力高值区和重力低值区交错分布, 反映了该地区凸起带和凹陷带分布的格局,以及基 底埋深的差异。重力高值区分别对应Nyk凸起、 Utgard凸起、Nordland凸起、Gjallar凸起4个NE 向的凸起和Helland-Hansen凸起带、Modgunn凸起、 Grip凸起3个近SN向凸起;重力低值区对应Naglfar凹陷、Nagrind凹陷、Træna凹陷、Ras凹陷4个 NE向的凹陷,以及1个近EW向的Vigrid 坳陷和 1个近SN向的Halten凹陷。此外,众多显著的异 常梯度带说明该区域存在规模较大的断裂,表明研 究区地质构造复杂。

### 2.2 磁力化极异常

研究区磁力资料来自于美国国家环境信息 中心于 2017 年更新公布的全球地磁异常网格 EMAG2V3<sup>[19]</sup>。该数据由卫星、海洋、航测和地测



Fig.3 Bouguer gravity anomaly and fault distribution in the Vøring Basin

数据整理而成,可以很好地满足对地壳地下结构和成分研究的需求。由于本区内纬度的跨度较大(纬度差为 7°),常规的化极异常通常不符合获取高精度的需求<sup>[20]</sup>,因此采用变纬度化极技术对磁力数据进行化极处理<sup>[21]</sup>,得到 Vøring 盆地磁力化极异常 图(图 4),异常值介于-295.2~929.6 nT。

磁力化极异常图可以提供大的构造趋势,滑动 平均处理后的异常通常可以突出中上地壳变化,异 常的波长和幅度提供了关于深度、来源和磁特性的 信息。磁力化极异常图(图 4)显示,磁力化极异常 自北西向东南呈高低值异常交错分布。在西北部 磁力异常多为条带状,规模较大且连续性较好,呈 NE 向展布。西南部异常总体上也呈高低值异常带 交错分布的特征,异常值多为近 SN 向展布。中部 异常区边缘大范围为高值区,呈现近 SN 或 NE 向 条带状分布,研究区中心大面积为低值区,并呈现 零散高值异常,推测为沉积层厚度较深导致。在西 部边缘 1 条连续拉长的 NE 向低值异常带很好地反 映了盆地西部两侧的边界。

### 3 断裂构造特征

### 3.1 解释方法

通过对重磁数据的处理解释,在平面图上能够 直接展现研究区域地质体和断裂构造在横向上的 展布特征等信息。重磁异常划分断裂的主要依据 有梯级带的变化、线性异常带、异常带的轴向错动 扭曲等。国产研制的地球物理处理软件 RGIS<sup>[22]</sup> 可以很好地处理布格重力异常和磁力异常,通过软 件可以使用位场边缘识别技术对异常进行处理,常 用的技术包括滑动平均、延拓、归一化总水平导数 标准差等,对重磁数据处理后可以得到相应的异常 图件如布格重力异常图(图 3)、磁力化极异常图 (图 4)、局部重力异常、水平总梯度重力异常图、重 力异常 NVDR-THDR 图、磁力化极局部异常图等 (图 5)。







Fig.5 Gravity and magnetic anomaly and fault distribution in the Vøring Basin

### 3.2 主干断裂特征

截至波长 61 km 的滑动平均滤波局部重力异 常强调深盆地和中地壳密度的变化,波长和波幅提 供了断层块和次盆地的构造信息,结合其他异常特 征可综合识别 Vøring 盆地的断裂构造特征(图 5)。 断裂分布图表明, Vøring 盆地的断裂构造复杂,盆 地内发育有众多的次级断裂,有 NE、近 SN 向 2 组 主要断裂,同时多被沿 NW 和近 EW 向发育的 2 组 断裂横切,说明后 2 组断裂的发育时间较晚,这些 断裂系统通常控制着研究区次级构造单元的发育。 这些断裂在局部重力异常图及磁力化极局部异常 图中体现为异常的梯级带,在水平总梯度重力异常 图上体现为极值的连线。Vøring 盆地还有 4 条主 要的边界断裂(F1—F4断裂),在重磁异常图上有 着较明显异常特征,通常表现为连续性好、规模较 大的异常梯级带的变化。

(1) F1 断裂 位于 Vøring 盆地南部边界断裂, 是东 Jan Mayen 断裂带在大陆地壳中向西南方向的 直接延伸,将 Vøring 盆地与 Møre 盆地分隔,整体 呈 NW 向展布,与 Vøring 盆地北部边界 F3 断裂走 向平行。该断裂在局部重力异常图和磁力化极局 部异常图上呈现线性的重力高值带和低值带之间 的过渡带和异常低值带的错动。

(2) F2 断裂 为 Vøring 盆地西部边界断裂 (66°5′—68°5′N、1°55′—9°E),与 Vøring 崖峭相重 合,将 Vøring 盆地与 Vøring 高原分隔。由于板块 运动导致的地壳拉伸和走滑,形成了这一显著的陆 架边缘断裂。该断裂在磁力化极局部异常图上整 体表现为连续、清晰的低值磁异常,在水平总梯度 重力异常图、重力异常 NVDR-THDR 图呈现为极 值的连线。

(3)F3 断裂位于68°6—66°3′N、8°30—11°0′E, 为 Vøring 盆地北部边界断裂,与F1 断裂平行,被认 为是始新世熔岩前缘的右倾和低洼的 Vøring 盆地 与北方邻区之间的主要过渡带,受其控制 Vøring 盆 地和 Trøndelag 台地北部地质体明显右倾。F3 断裂 两侧的构造走向发生了偏移,表明F3 断裂在相对 较晚发生的地质事件中分隔了 Vøring 盆地,是界定 边界的重要标志。该断裂在局部重力异常图及磁 力化极局部异常图上呈现为异常的梯级带。

(4)F4 断裂 位于63°3'—66°7'N、6°4'—10°8'E, 为 Vøring 盆地东部边界断裂,分隔了 Vøring 盆地 和 Trøndelag 台地。F4 断裂是由一系列小型断裂构 成的,这些断裂属于转换型断裂系统。该断裂在局 部重力异常图上显示为等值线梯级带变化,在水平 总梯度重力异常图、重力异常 NVDR-THDR 图呈 现为极值的连线。

#### 3.3 断裂体系特征

重磁资料对于平面上地质构造单元的划分和 线性构造有着较准确的分辨力,为了能够更加细致 地了解 Vøring 盆地的地质构造特征,选取本区内 的 2 条地震剖面,结合已有的地质认识进行了定量 拟合解释(图 6、7)。在定量拟合中,结合文献资料 海水层密度值取 1.03 g/cm<sup>3</sup>,新生界地层密度值取 2.05~2.1 g/cm<sup>3</sup>,白垩系地层密度值取 2.3~2.55 g/cm<sup>3</sup>,前白垩系地层密度值取 2.6~2.7 g/cm<sup>3</sup>,地壳 密度值取 2.75~2.95 g/cm<sup>3</sup>,地幔密度值取 3.25~ 3.3 g/cm<sup>3[23-25]</sup>。

剖面 AA'呈 NW 向, 剖面长度约 450 km, 横跨 Vøring 边缘的中部, 贯穿 Vøring 高原、Vøring 盆地、 Trøndelag 台地。剖面从西北至东南布格重力异常 值呈现高低交错的特征, 在 Vøring 高原段异常值普 遍较高, 最高值约为 104.1×10<sup>-5</sup> m/s<sup>2</sup>; 在 Vøring 盆 地段的异常最高值约为 85.2×10<sup>-5</sup> m/s<sup>2</sup>, 异常最低值



Fig.6 Comprehensive interpretation of profile AA'



Fig.7 Comprehensive interpretation of profile BB'

约为 10.9×10<sup>-5</sup> m/s<sup>2</sup>; 在 Trøndelag 台地段异常值普 遍较低, 异常最低值约为-3.1×10<sup>-5</sup> m/s<sup>2</sup>。整体上, 西北向东南异常值逐渐降低, 变化梯度较缓, 呈"两 高夹一低"的特征。剖面定量解释结果表明, 莫霍 面的埋深是影响布格重力异常的重要因素, 剖面自 西北向东南莫霍面的埋深逐渐增加, 与布格重力异 常值曲线起伏趋势相对应, 曲线的左端莫霍面埋深 较浅, 地壳厚度较薄, 是由于沿挪威中部边缘的大 伸展因子局部>4, 地壳伸展过程中使地壳减薄并 影响地下岩石密度分布<sup>[26]</sup>, 进而在重力异常曲线上 表现为高值异常。该剖面的断裂十分发育, 与根据 重磁数据划分的横向断裂位置吻合, 在剖面线约 41、 325 km 处分别为 F2 和 F4 边界断裂。

剖面 BB'位于 Vøring 盆地北部, 宏观上呈 NW 向, 剖面长度约 342 km, 剖面从西北至东南布格重 力异常值呈现为高低交错的特征, 与横跨的区域构 造相对应。该剖面展示了 Vøring 盆地地层年龄普 遍年轻, 但在 Trøndelag 台地下存在较老的地层, 这 与向海的年轻盆地形成了一定的对比<sup>[27]</sup>。在剖面 线约 40、130、175、250 km 处都有显著隆起的基底, 这几处都是边缘域内的构造高点, 与布格重力异常 曲线高值相吻合; 在剖面经过的布格重力异常低值 区, 也同样对应着相应的凹陷和背斜构造。纵向剖 面的断裂与重磁数据推断的横向断裂位置相吻合, 该剖面的断裂也比较发育, 断裂之间地层的发育与 侧向/边界断裂的构造演化密切相关<sup>[28]</sup>。这些断裂 可能是在深部 Vøring 盆地的下一中白垩统广泛分 布的过压泥页岩中解耦和发展的<sup>[29]</sup>。Vøring 盆地 与 Vøring 高原之间以一个构造高点相隔, 在剖面线 约 55、263 km 处分别确定为 F2 和 F4 边界断裂。

### 4 油气勘探有利区预测

Vøring 盆地的油气调查工作开展较早,但目前 大多数调查工作集中在 Vøring 盆地东部, 而对于盆 地中部和西部勘探程度很低,基于这些调查工作, 挪威石油局完善了油气田分布的信息(图 8),为 Vøring 盆地中西部油气勘探有利区预测提供了参 考。从剖面图和平面断裂分布图可以看出,盆地的 中部和东部边缘构造活动十分强烈,有大量的断裂 和地层不整合,这些都为油气运移提供了条件。生 储盖组合与构造特征的配置是控制油气富集区的 关键因素,特别是在储层发育广泛的层段(盆地裂 陷收敛期),构造圈闭因素就成为控制油气平面分 布的关键<sup>[30]</sup>。付广等<sup>[31]</sup>将断裂密集带内部结构分 为背向、向形和单斜形3种类型,认为如果是背形 断裂密集带,其内及附近是油气运移的低势区,有 利于油气在背形断裂密集带及附近聚集成藏,单斜 形和向形断裂密集带及附近油气较少。而重力垂 向二阶导数异常通常能够反映局部地质体的重力

场效应,对旁侧迭加异常或垂向迭加异常的反应更 加敏感,提高断裂要素信息的研究能力。前人通过 对渤海海域油气田分布和重力异常的相关性研究, 发现局部重力高带是寻找油气的有利靶区<sup>[32]</sup>。因 此,结合已有的油气地质认识和油气田分布信息, 利用重力垂向二阶导数异常的横向信息(图 8)以及 剖面的纵向信息去圈定油气勘探有利区。



图 8 Voring 盆地布格重力垂向二阶导数异常、断裂分布及油气勘探有利区 Fig.8 Bouguer gravity vertical second derivative anomaly, fault distribution and favorable oil and gas exploration area in the Voring Basin

重力垂向二阶导数异常图(图 8)显示,在 Vøring 盆地的中部和东部边缘有 3 条 SN 向较为连续的高 值异常带,结合南侧和北侧的 2 条剖面分析,发现 3 条高值带及其附近处于盆地多次拉伸和压缩的 活跃带,其地质构造复杂,断裂十分发育,且多为背 形断裂密集带,有利于油气的聚集成藏。结合现有 的油气田分布规律发现,油气田多分布在异常高值 区及侧翼和大范围低值区中的局部高值区,与东部 边缘的高值异常带相关性很好,因此,认为中部 2 条高值异常带油气资源潜力很高。在此基础上对 Vøring 盆地潜在的油气勘探有利区进行了圈定,依 据断裂和异常的走向划分了 3 条油气勘探有利区 带,在重力垂向二阶导数异常图上反映为异常幅值 高、异常梯度变化大的异常带及侧翼,和低值异常 区中的高值异常区,在 Vøring 盆地的构造单元上反映为凸起区、凹陷区的斜侧和凹陷区中局部的凸起带。

### 5 结论与认识

(1)研究区布格重力异常表现复杂,异常值宏 观上呈西高东低,异常走向通常为 NE 或近 SN 向 展布,异常多为块状或条带状,从西至东高低带交 错分布。磁力化极异常的异常值宏观上西高东低, 区内大面积的低值异常,局部有圆形或块状高值异 常散布。

(2) Vøring 盆地断裂构造复杂,盆地内发育有 众多的次级断裂,有 NE、近 SN 向 2 组主要断裂, 同时发育有 NW 和近 EW 向 2 组次级断裂,这些断裂系统通常控制着盆地内次级构造单元的发育。 Vøring 盆地还存在 4 条主要的边界断裂 (F1—F4 断裂),规模较大、伸展距离较长,在重磁异常图上 有着明显异常特征。

(3)在 Voring 盆地圈定了 3 个油气勘探有利 区,在重力垂向二阶导数异常图上反映为异常幅值 高、异常梯度变化大的异常带和侧翼,以及低值异 常区中的高值异常区,勘探有利区多位于 Voring 盆 地内部的凸起区、凹陷区的斜侧和凹陷区中局部的 凸起带。

#### 参考文献:

 [1] 李江海,刘仲兰,王洛,等.北极地区大地构造特征及其构造 演化:北极地区大地构造编图研究进展[J].海洋学报,2016, 38(7):85-96.

> LI J H, LIU Z L, WANG L, et al. The tectonic setting and geological evolution of the Arctic : from compiling of tectonic map of the Arctic[J]. Haiyang Xuebao, 2016, 38(7): 85-96.

- [2] BIRD K J, CHARPENTIER R R, GAUTIER D L, et al. Circum-Arctic resource appraisal: estimates of undiscovered oil and gas north of the Arctic Circle[R]. U.S. Geological Survey, 2008.
- [3] 蒋德鑫,张厚和,李春荣,等. 全球深水-超深水油气勘探历程 与发展趋势 [J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(10): 1-12. JIANG D X, ZHANG H H, LI C R, et al. Global deep- and ultradeep-water oil and gas exploration: review and outlook[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(10): 1-12.
- [4] ZASTROZHNOV D, GERNIGON L, GOGIN I, et al. Regional structure and polyphased Cretaceous-Paleocene rift and basin development of the mid-Norwegian volcanic passive margin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 115: 104-269.
- [5] FALEIDE J I, BJORLYKKE K, GABRIELSEN R H. Geology of the Norwegian Continental Shelf//Bjørlykke, K. (Ed. ), Petroleum Geoscience: from Sedimentary Environments to Rock Physics[M]. Heidelberg: Springer, 2015: 603-637.
- [6] FAZLIKHAN H, FOSSEN H, GAWTHORPE R L, et al. Basement structure and its influence on the structural configuration of the northern North Sea rift[J]. Tectonics, 2017, 36(6): 1151-1177.
- FARSET R B. Structural geology and basin development of the Norwegian Sea[J]. Norwegian Journal of Geology, 2020, 100(4): 1-60.
- [8] PLANKE S, SKOGSEID J, ELDHOLM O. Crustal structure off Norway, 62° to 70° north[J]. Tectonophysics, 1991, 189(1/4): 91-107.
- [9] BJORLYKKE K, AVSRTH P. Petroleum Geoscience: from Sedimentary Environments to Rock Physics[M]. Berlin: Springer, 2015.
- [10] ZEHNDER C M, MUTTER J C, BUHL P. Deep seismic and geochemical constraints on the nature of rift-induced magmat-

ism during breakup of the North Atlantic[J]. Tectonophysics, 1990, 173(1/4): 545-565.

- [11] SKOGSEID J, PEDERSEN T, ELDHOLM O, et al. Tectonism and magmatism during NE Atlantic continental break-up: the Vøring Margin[C]//Geological Society, London: Special Publications, 1992; 305-320.
- [12] ASCH K. Geology without national boundaries the 1: 5 million international geological map of Europe and adjacent areas IG-ME 5000[J]. Episodes, 2006, 29(1): 39-42.
- [13] 卢景美,李爱山,赵阳,等. 北大西洋段演化特征和海相经源 岩研究 [J]. 中国石油勘探, 2014, 19(4): 80-88.
  LU J M, LI A S, ZHAO Y, et al. Tectonic evolution characterize of North Atlantic and marine source rock study[J]. 2014, 19(4): 80-88.
- [14] 范玉海, 屈红军, 王辉, 等. 挪威中部陆架油气地质特征及勘 探潜力 [J]. 世界地质, 2015, 34(3): 690-696.
   FAN Y H, QU H J, WANG H, et al. Petroleum geology and ex-

ploration potential of mid-Norway continental margin[J]. World Geology, 2015, 34(3): 690-696

[15] 刘怡君. 挪威陆缘盆地形成演化及其成藏过程分析 [D]. 西安: 西安石油大学, 2017.

LIU Y J. Formation evolution and oil and gas generation accumulation of continental marginal basin in Norway[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2017.

[16] 张明华,张家强.现代卫星测高重力异常分辨能力分析及在 海洋资源调查中应用 [J].物探与化探,2005,29(4):295-298, 303-379.

ZHANG M H, ZHANG J Q. Resolution of modern satellite altimetric gravity anomaly and its application to marine geological survey[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2005, 29(4): 295-298, 303-379.

- [17] 张春灌, 袁炳强, 张国利. 最新全球重力数据库 V23 中陆域重 力资料质量评估 [J]. 地球科学进展, 2017, 32(1): 75-82.
  ZHANG C G, YUAN B Q, ZHANG G L. Quality evaluation of land gravity data in the latest global gravity database V23[J].
  Progress in Geophysics, 2017, 32(1): 75-82.
- [18] 刘兵,吴世敏,龙根元,等.重力水平梯度矢量法在琼东南盆 地基底断裂划分上的应用[J].热带海洋学报,2011,30(5):74-80.

LIU B, WU S M, LONG G Y, et al. Studying basement fault division in Southeast Hainan Basin of the South China Sea using gravity horizontal gradient vector method[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2011, 30(5): 74-80.

[19] 韩梅,张春灌,李想,等. 地球磁异常网格第 3 版 (EMAG2v3) 海平面数据质量评估:以东南亚 Sulu 海及北极 Kolbeinsey 脊 南段为例 [J]. 地球物理学进展, 2023, 38(4): 1466-1472.
HAN M, ZHANG C G, LI X, et al. Quality evaluation of sea level data in the Earth Magnetic Anomaly Grid at 2 Arc Minute Resolution Version 3 (EMAG2v3): taking the Sulu Sea in Southeast Asia and the southern section of the Kolbeinsey Ridge in the Arctic as an example[J]. Progress in Geophysics, 2023, 38(4): 1466-1472.

- [20] 张冕,张春灌,段祎乐,等. Aegir 脊及邻区重磁异常及构造特征[J].海洋地质前沿,2023,39(5):64-72. ZHANG M, ZHANG C G, DUAN Y L, et al. Gravity, magnetic anomalies, and tectonic features of the Aegir Ridge and adjacent areas[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(5): 64-72.
- [21] 张春灌,赵敏,袁炳强,等.利用重磁资料研究北极地区扬马 延微陆块中南部断裂构造与油气远景 [J]. 石油物探, 2023, 62(1): 173-182.

ZHANG C G, ZHAO M, YUAN B Q, et al. Fault structure and hydrocarbon prospects of the central-south Jan Mayen microcontinent in the Arctic region based on gravity and magnetic data[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum. 2023, 62(1): 173-182.

[22] 张明华, 王成锡, 黄金明, 等. 基于 GIS 的重磁电数据处理解 释软件系统 [C]. 北京: 中国地球物理学会第二十七届年会论 文集, 2011: 580.

> ZHANG M H, WANG C X, HUANG J M, et al. Gravity magnetic and electrie data processing system based on GIS[C]. Beijing: Proceedings of the 27th Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society, 2011: 580.

- [23] PERON-PINVIDIC G, AKERMOEN T, LEIVESTAD L I. The North-East Atlantic mid-Norwegian rifted margin: insights from the deep imaging Geoex MCG RDI19 dataset[J]. Tectonophysics, 2022, 824: 229225.
- [24] ZASTROZHNOV D, GERNIGON L, GOGIN I, et al. Cretaceous-Paleocene evolution and crustal structure of the northern Vøring Margin (offshore mid-Norway): results from integrated geological and geophysical study[J]. Tectonics, 2018, 37(2): 497-528.
- [25] EBBING J, GERNIGON L, PASCAL C, et al. A discussion of structural and thermal control of magnetic anomalies on the mid-Norwegian margin[J]. Geophysical Prospecting, 2009, 57(4): 665-681.

- [26] LUNDIN E R, DORE A G. Hyperextension, serpentinization, and weakening: a new paradigm for rifted margin compressional deformation[J]. Geology, 2011, 39(4): 347-350.
- [27] GERNIGON L, FRANKE D, GEOFFROY L, et al. Crustal fragmentation, magmatism, and the diachronous opening of the Norwegian-Greenland Sea[J]. Earth-Science Reviews, 2020, 206: 102839.
- [28] BREKKE H, DAHLGREN S, NYLAND B, et al. The prospectivity of the Vøring and Møre basins on the Norwegian Sea continental margin[C]//Geological Society, Petroleum Geology Conference series. London: The Geological Society of London, 1999, 5(1): 261-274.
- [29] DORE A G. The structural foundation and evolution of Mesozoic seaways between Europe and the Arctic[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1991, 87(1/4): 441-492.
- [30] 谭丽娟, 蒋有录. 渤海湾盆地东营: 惠民凹陷油气成藏模式和 油气富集控制因素 [J]. 石油实验地质, 2003, 25(4): 366-370. TAN L J, JIANG Y L. Pool-forming patterns of hydrocarbon and controlling factors of hydrocarbon enrichment in the Dongying and the Huimin sags[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(4): 366-370.
- [31] 付广,王宇鹏. 断裂密集带及附近下生上储式油气富集的控制因素 [J]. 岩性油气藏, 2018, 30(2): 23-29.
  FU G, WANG Y P. Controlling factors of hydrocarbon enrichment with the type of "below source and upper reservoir" in fault concentrated zones and nearby[J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30(2): 23-29.
- [32] 张春灌. 渤海海域重力异常特征及油气分布规律探讨 [J]. 断 块油气田, 2010, 17(2): 169-172.
  ZHANG C G. Features of gravity anomaly and oil-gas distribution rules in Bohai Sea area[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2010, 17(2): 169-172.

## Fault structure and the oil and gas prospect of the Vøring Basin using gravity and magnetic data

YIN Rui<sup>1,2</sup>, ZHANG Chunguan<sup>1,2\*</sup>, YUAN Bingqiang<sup>1,2</sup>, HU Hongchuan<sup>1,2</sup>

(1 School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2 Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: The Vøring Basin, in the Norwegian midland near the sea has favorable geological conditions for hydrocarbon accumulation. To gain a deeper understanding on the fault structure and hydrocarbon exploration potential in the basin, available gravity and magnetic data have been analyzed systematically. The Varimax transformation technique was applied to eliminate the influence of latitude changes on the magnetic data. Additionally, the edge detection technique for potential fields was utilized to delineate the edge of the local field in this area. By integrating existing geological and geophysical knowledge, a systematic analysis on the gravity and magnetic anomalies in the study area was conducted, and ultimately the fault structure features of the Vøring Basin were identified and the outlining favorable areas for hydrocarbon exploration were defined. Result indicates that the secondary faults in the Vøring Basin exhibit complex orientations, including mainly two sets of major faults in northeast and nearly north-south directions respectively. Additionally, there are other two sets of faults trending northwest and nearly east-west, and they often cut across the first two sets of faults. The basin is surrounded by four major boundary faults (F1 $\sim$ F4), which control the development of secondary structures in the area. Favorable hydrocarbon exploration areas in the Vøring Basin were delineated, represented by high-amplitude anomalies with clear gradients in the second-order vertical derivative anomalies, as well as anomalous bands controlled by faults and their flanks, as evidenced on the gravity gradient map.

Key words: Norway; Vøring Basin; gravity-magnetic anomalies; fault; exploration favorable zones