

文章编号: 0253-2697(2023)10-1587-12 DOI:10.7623/syxb202310001

渤海湾盆地大型变质岩潜山油田勘探发现及地质意义

徐长贵¹ 周家雄² 杨海风² 官大勇² 宿雯² 叶涛² 赵弟江²

(1. 中国海洋石油有限公司 北京 100010; 2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司 天津 300452)

摘要:渤海湾盆地渤南低凸起西段太古宇潜山带具有良好的油气成藏条件,渤中26-6油田是整装的古生代油田,原油探明储量超亿吨。利用大量岩心、岩石薄片、测井和地球化学等资料对渤中26-6油田进行系统研究后认为:太古宇潜山储层在垂向上可划分为风化砂砾岩带、风化裂缝带和基岩带,其中,风化裂缝带是最主要的储层发育带;在印支期、燕山期、喜马拉雅期3期构造运动下形成的裂缝是太古宇潜山储层发育的基础,印支期的挤压碰撞与燕山期的走滑逆冲是裂缝形成的主要动力,喜马拉雅期近SN向的伸展作用保持了先期裂缝的有效性;在裂缝沟通下,大气淡水溶蚀形成了面积广泛的潜山优质储层,距不整合面约420 m以浅的范围是优质储层发育段;潜山上覆盖的“弱超压、强稳定”东营组泥岩为大型油藏的保存提供了良好的封盖条件;渤中26-6油田太古宇潜山与其南侧的黄河口凹陷烃源岩直接接触,与北侧的渤中凹陷烃源岩以不整合面相连,形成了多元立体油气运移充注模式。上述认识指导了渤中26-6油田太古宇高丰度油藏的高效勘探,进一步完善了渤海湾盆地深层太古宇潜山的成储、成藏模式,对于渤中凹陷西南环太古宇潜山带的油气勘探具有重要的指导意义。

关键词:渤中凹陷;渤中26-6油田;太古宇变质岩;构造运动;优质储层;高丰度油藏

中图分类号:TE122

文献标识码:A

Discovery of large-scale metamorphic buried-hill oilfield in Bohai Bay Basin and its geological significance

Xu Changgui¹ Zhou Jiexiong² Yang Haifeng² Guan Dayong² Su Wen² Ye Tao² Zhao Dijiang²

(1. CNOOC Limited, Beijing 100010, China; 2. Tianjin Branch, CNOOC China Limited, Tianjin 300452, China)

Abstract: Archean buried-hill zone in the western section of Bonan low salient of Bohai Bay Basin has good conditions for hydrocarbon accumulation. Bozhong26-6 oilfield is an Archean integrated oilfield with proven reserves of crude oil exceeding 100 million tons. Based on a large number of core, thin section, well logging and geochemical data, a systematical study was performed on Bozhong26-6 oilfield. The analysis suggests that the Archean buried-hill reservoirs can be vertically divided into weathered conglomerate zone, weathered fracture zone and bedrock zone, among which the weathered fracture zone is the key reservoir development zone. The superimposed fractures formed by the Indosinian, Yanshanian and Himalayan movements provided the foundation for the development of Archean buried-hill reservoirs. The Indosinian compression and collision and the Yanshanian strike-slip thrust were the main driving forces for the formation of fractures, and the south-north extension of the Himalayan epoch maintained the validity of earlier fractures. Under the communication of fractures, a wide area of high-quality buried-hill reservoirs is formed by the dissolution of atmospheric fresh water, and the high-quality reservoirs are developed in the zone within 420 m away from the unconformity. The mudstone of Dongying Formation with weak overpressure and strong stability overlying buried hill provides good sealing conditions for the preservation of large-scale oil reservoirs. The Archean buried hills are in direct contact with the source rocks of Huanghekou sag in the south, and are connected with the source rocks of Bozhong sag in the north by the unconformity, thus forming a multi-dimensional oil-gas migration and charging mode. In conclusion, the above findings provide a guidance for the efficient exploration of Archean high-abundance oil reservoirs in Bozhong26-6 oilfield, further improve the hydrocarbon accumulation and reservoir mode of deep Archean buried hills in Bohai Bay Basin, and are of important guiding significance for the oil and gas exploration of the Archean buried hill zone around the southwest Bozhong sag.

Key words: Bozhong sag; Bozhong26-6 oilfield; Archean metamorphic rock; tectonic movement; high-quality reservoir; high-abundance oil reservoir

引用:徐长贵,周家雄,杨海风,官大勇,宿雯,叶涛,赵弟江. 渤海湾盆地大型变质岩潜山油田勘探发现及地质意义[J]. 石油学报, 2023,44(10):1587-1598,1611.

Cite: XU Changgui, ZHOU Jiexiong, YANG Haifeng, GUAN Dayong, SU Wen, YE Tao, ZHAO Dijiang. Discovery of large-scale metamorphic buried-hill oilfield in Bohai Bay Basin and its geological significance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023,44(10):1587-1598,1611.

基金项目:中海石油(中国)有限公司“七年行动计划”科技重大专项“渤海油田上产4000万吨新领域勘探关键技术”(CNOOC-KJ135 ZDXM36TJ08TJ)资助。

第一作者及通信作者:徐长贵,男,1971年10月生,2007年获中国地质大学(北京)博士学位,现为中海石油有限公司勘探副总师、教授级高级工程师,主要从事石油天然气地质综合研究及油气勘探管理工作。Email: xuchg@cnooc.com.cn

自20世纪70年代任丘古潜山高产油田发现以来,潜山一直是渤海湾盆地重要的勘探目标,并在渤海海域相继发现了渤中28-1古生界油气藏、锦州25-1南太古界潜山油藏、蓬莱9-1中生界油田,展现了渤海海域潜山具有良好的勘探前景^[1-5]。进入21世纪以来,渤海油田通过对渤海海域西南部构造演化与构造精细解释,落实了渤中19-6太古界大型潜山圈闭群,成功在渤海湾盆地发现了太古界千亿立方米大型凝析气田^[6-9]。区域分析认为,渤南低凸起太古界潜山与渤中19-6潜山同为太古界印支期逆冲带,理应具有相似的成藏条件,而渤南低凸起太古界潜山经历了近40年的勘探,仅在渤中26-2潜山发现了小型凝析气藏。针对渤南低凸起太古界潜山的成藏特征,渤海油田在优质储层、盖层保存及油气充注等方面做了大量研究,建立了渤南低凸起太古界潜山应力-溶蚀联合成储、强稳定泥岩封盖、多油源强势充注的成藏模式。继在渤中19-6

潜山发现大气田之后,渤海油田成功在渤海海域西南部潜山带渤中26-6潜山发现了亿吨级太古界大油田。该油田的发现进一步完善了渤中西南潜山带成储机理,同时为渤中19-6—渤中26-6潜山围区的挖潜指明了方向。

1 区域地质背景

渤中26-6潜山位于渤海海域中南部渤南低凸起西段,表现为近EW向边界大断层夹持的大型古隆起,其南、北两侧分别被黄河口凹陷、渤中凹陷两大富烃凹陷夹持(图1)。研究区潜山地层在纵、横向上变化较大,在低凸起的高部位仅发育太古宇,并向NE方向下倾,依次出露下古生界和中生界,潜山上覆新生界,自下而上发育东营组二段(东二段)下亚段、东二段上亚段、东营组一段(东一段)、馆陶组、明化镇组和第四系平原组(图1)。目前,太古界潜山上的钻井均位于低凸起的高部位,太古界潜山与古近系东营组呈不整合接触。

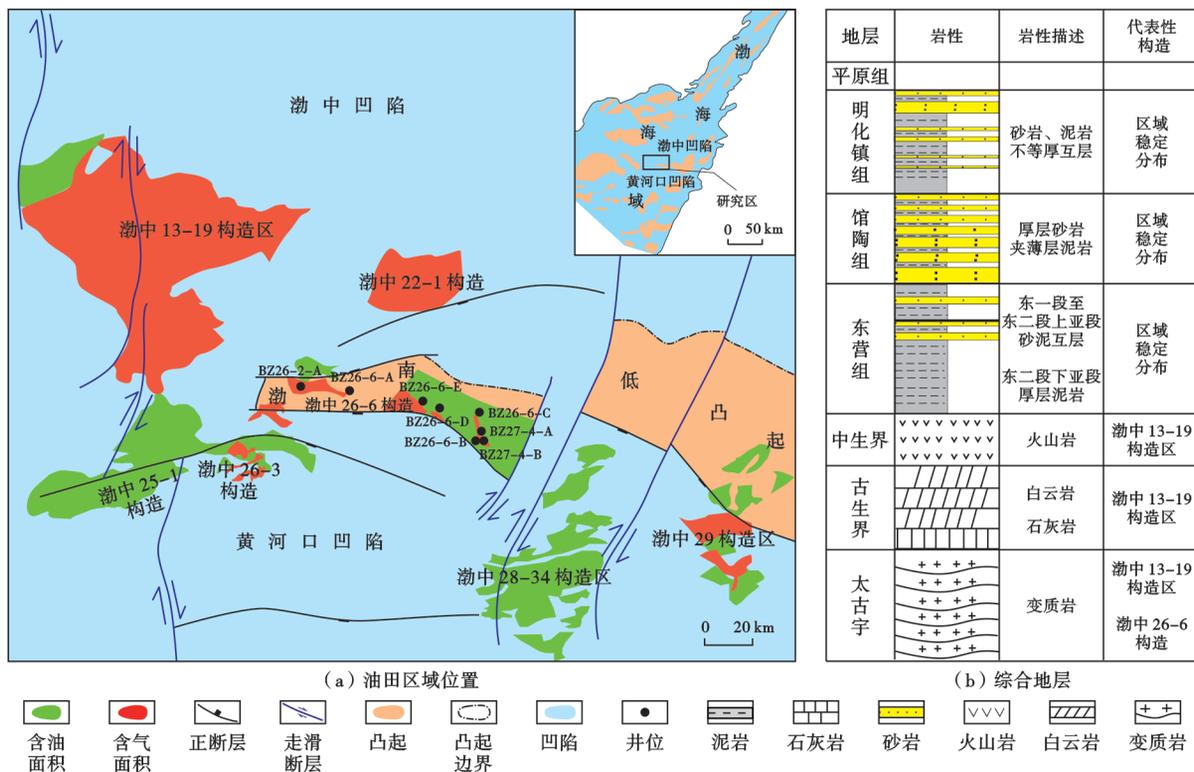


图1 渤中26-6油田区域位置和综合地层特征

Fig. 1 Regional location and comprehensive stratigraphic characteristics of Bozhong26-6 oilfield

2 油田勘探发现历程及地质特征

2.1 勘探发现历程

渤南低凸起西段的潜山勘探始于20世纪70年代末期渤海油田“定洼选带”时期,在东、西高点分别以古近系东营组和沙河街组为主要目的层,同时探索潜山地层和岩性。该时期有2口探井钻遇太古界潜山,岩

性为变质花岗岩,录井显示良好,证实了太古界潜山花岗岩的含油气性。20世纪末期,油田公司在潜山带利用三维地震资料对太古界潜山再次开展勘探工作。在渤南低凸起西高点发现了渤中26-2潜山小型凝析气藏,其太古宇凝析气的探明储量仅为 $6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、凝析油的探明储量为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$;而在渤南低凸起东高点,BZ27-4-B井钻至太古宇潜山,测试6次,未获得

商业产能,勘探工作再次停滞。2018年,在渤中19-6潜山获得大气田的启示下,油田公司在渤南低凸起的最高部位钻探了BZ26-6-A井,进山75 m、净毛比仅为30%,测试见水。2021—2022年,通过精细勘探研究和技术创新,明确了在渤南低凸起内中位潜山优质储层的形成机制,在构造平缓的东高点钻探BZ26-6-B井,解释油层超过300 m,中途测试的产油量近 $330\text{ m}^3/\text{d}$,证实了渤南低凸起的中位潜山同样具有很好的勘探潜力。通过系统的储层刻画和成藏综合分析,建立了变质岩潜山应力-溶蚀联合成储、多油源强势充注、强稳定泥岩封盖的油气成藏模式,钻探的4口评价井显示,油层厚度均超过100 m,成功发现了大型变质岩潜山油田——渤中26-6油田,其石油探明地质储量为 $1.12\times 10^8\text{ t}$ 。

2.2 地质特征

渤中26-6油田的含油层系为太古宇潜山。油田所在构造与渤中19-6潜山、渤中28-1潜山同为印支期近SN向挤压作用形成的EW向古隆起。古隆起上发育两组断裂体系,分别为NWW向的挤压-拉张断裂

体系和NEE向的挤压-走滑断裂体系。NWW向的断裂体系控制着古隆起EW展布的构造雏形,NEE向的断裂体系斜向切割先存古隆起,将其自西向东划分为不同断块,并在先期挤压和后期沉降活动的差异控制下,各断块自西向东呈现由高到低的构造形态。其中,西断块为古潜山的最高点,太古宇潜山的出露范围较小,在渤中26-2潜山发现小型凝析气藏;东断块形态宽缓,太古宇出露范围大,与东营组富泥超压地层组成良好储-盖组合,在渤中26-6潜山发现太古宇油田。

3 渤中26-6油田的成藏条件

3.1 厚层风化裂缝带是变质岩潜山油藏的主要储集场所

3.1.1 储层类型与基本特征

渤中26-6油田的太古宇潜山储层主要发育在混合花岗岩和花岗片麻岩中[图2(a)、图2(b)],距离风化壳顶部的岩石风化强,蚀变作用明显[图2(c)]。储层的储集空间包括裂缝和溶蚀孔。岩心与岩石薄片均揭示裂缝具有不同发育期次且相互切割的特征,为多

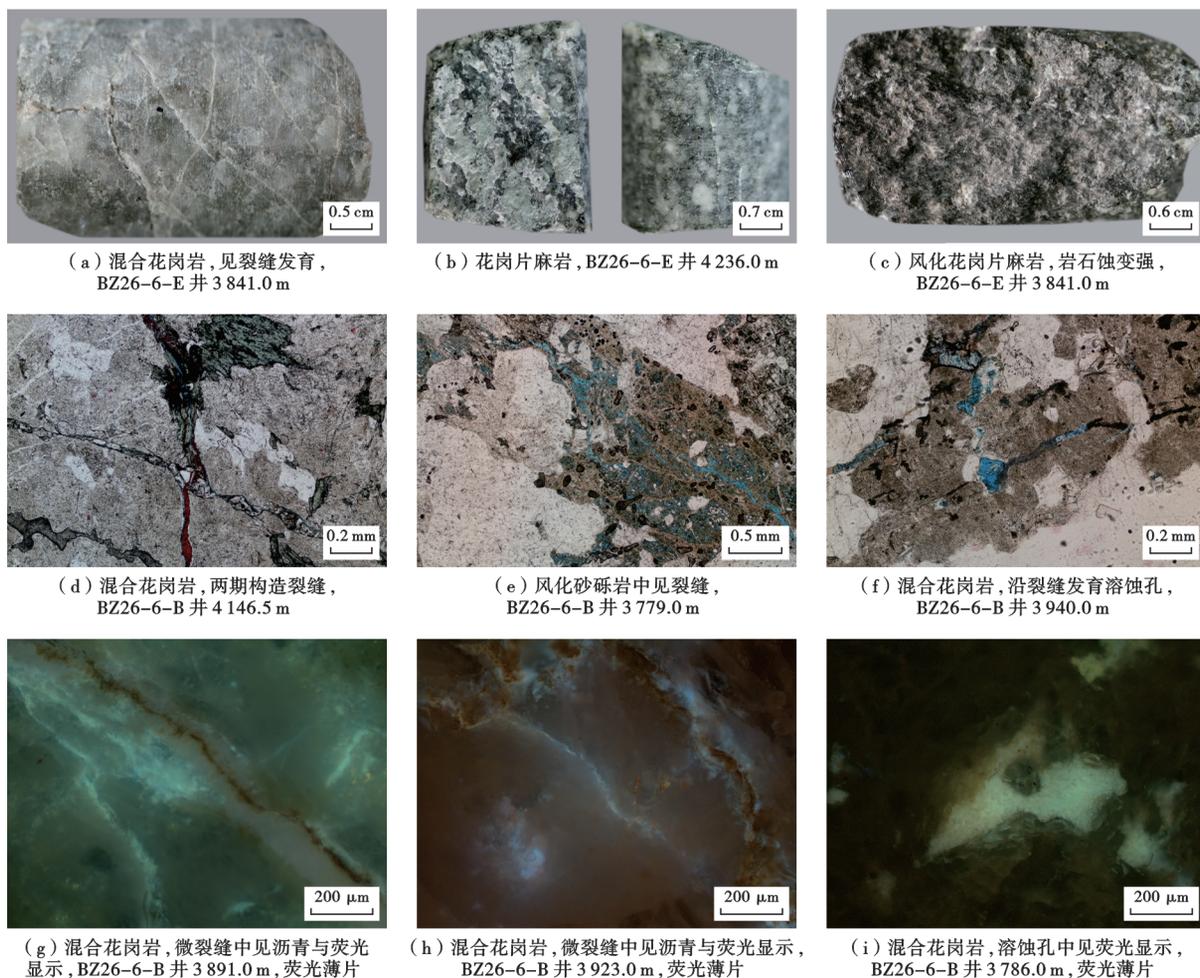


图2 渤中26-6油田的储层岩性与储集空间类型

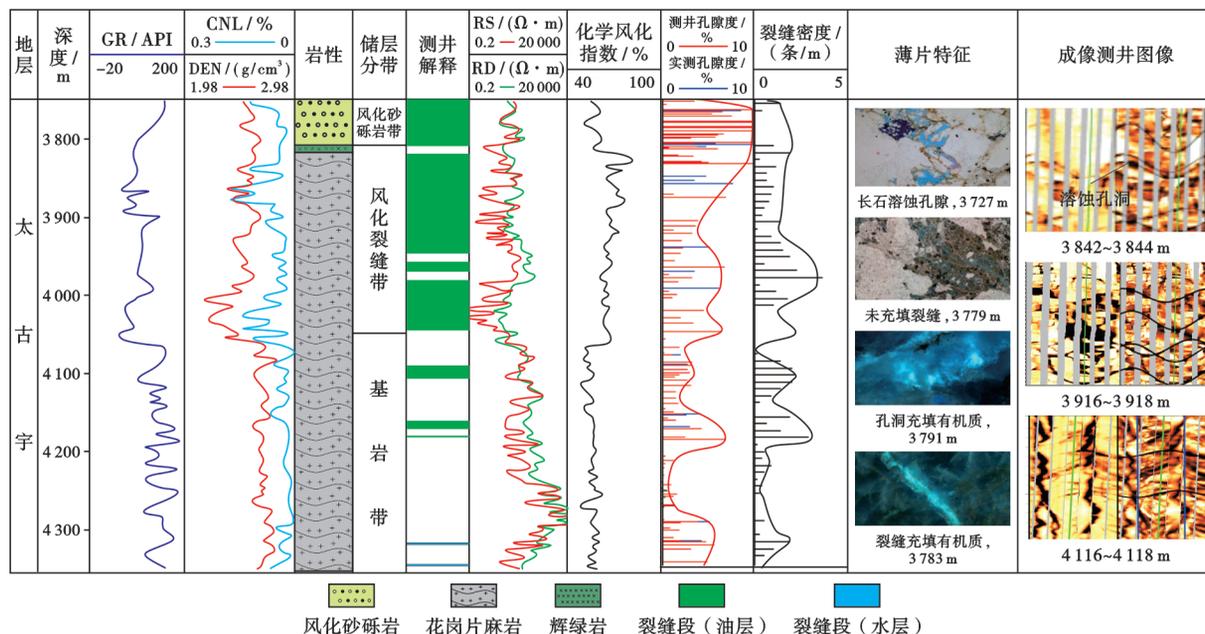
Fig. 2 Lithology and space types of reservoir in Bozhong26-6 oilfield

期造缝的构造背景[图 2(a)、图 2(d)]。风化带中黏土矿物含量较高,薄片下岩石破碎,可见微裂缝与溶蚀微孔[图 2(e)]。距离风化壳 200 m 以内大部分样品中可见溶蚀孔,溶蚀孔主要分布在长石中,偶见黑云母溶蚀。值得注意的是,溶蚀孔多沿构造裂缝分布,表明流体主要沿先期构造裂缝运移,并对长石等易溶矿物进行溶蚀[图 2(f)]。荧光薄片中,无论是在构造裂缝中还是在溶蚀孔隙中均可见荧光显示及沥青充填,这证实裂缝与溶蚀孔构成的缝孔(洞)系统是主要的储油空

间[图 2(g)—图 2(i)],即渤中 26-6 潜山储层具有双孔介质特征。

3.1.2 太古宇潜山储层的垂向分带性

渤中 26-6 油田的太古宇潜山储层在垂向上具有明显的三元结构特征。根据岩性、储集空间类型、物性差异等,自上而下可将储层划分为风化砂砾岩带、风化裂缝带和基岩带。其中,风化裂缝带厚度大、横向分布稳定,是渤中 26-6 油田最主要的储层发育带。渤中 26-6 油田储层的综合特征见图 3。



注:GR—自然伽马;CNL—补偿中子;DEN—密度;RS—浅侧向电阻率;RD—深侧向电阻率。

图 3 渤中 26-6 油田的储层综合特征

Fig. 3 Comprehensive reservoir characteristics of Bozhong26-6 oilfield

风化砂砾岩带位于潜山顶部,厚度为 31~101 m,主要分布在构造的平台区和相对低部位。风化砂砾岩中的砾石成分为变质花岗岩,其磨圆度较差,呈棱角一次棱角状,局部砾石中可见裂缝,储集空间以砾间孔和砾内溶蚀孔为主。风化砂砾岩带的实测孔隙度为 7%~10%,物性较好。该带由于强烈的风化崩解作用,裂缝密度较低。

风化裂缝带分布于距潜山顶面 120~310 m 处,分布较稳定。岩性为风化的变质花岗岩,岩心上可见明显的风化褪色现象、含大量的高岭土。该带的裂缝密度在 3 个储层分带中最大,为 1~4 条/m。风化裂缝带的储集空间多为裂缝-孔隙型和孔隙-裂缝型,镜下可见沿裂缝广泛发育的溶蚀孔隙;储层的净毛比为 37.1%~72.6%,平均高达 54.6%;物性较好,孔隙度为 4.6%~7.2%。

基岩带为新鲜的变质花岗岩。该带储层整体不发育,仅在局部见构造裂缝,裂缝密度整体较低;裂缝多

被充填,少见溶蚀现象,荧光显示较弱,储层零星发育。

3.1.3 规模储层形成的主控因素及发育模式

大量研究表明,太古宇规模储层的形成主要与岩性、裂缝发育及流体溶蚀等有关^[10-13]。渤中 26-6 油田的岩性整体为一套混合花岗岩和花岗片麻岩,岩性在横向上变化小,构造裂缝与流体溶蚀是控制储层差异分布的关键因素。

(1) 多期构造叠加形成的裂缝奠定了太古宇潜山储层的基础

渤中 26-6 油田在构造上隶属于渤中凹陷西南环的潜山带。勘探实践已证实,渤中凹陷西南环为印支期、燕山期以及喜马拉雅期 3 期构造运动的强叠合区^[14-16],在其潜山带内已发现渤中 19-6 气田和渤中 13-2 油田 2 个亿吨级变质岩潜山油气田。不同时期的挤压应力、走滑应力与伸展应力的叠加对太古宇潜山有效裂缝的发育起到重要的控制作用^[17-20]。

已钻井的资料统计结果表明,渤中凹陷西南环主

要发育 NWW 向和 NEE 向两组裂缝,这分别与印支期 NWW 向的构造轴向和燕山期 NEE 向的构造轴向相一致[图 4(a)],证实裂缝的形成主要受这两期构造运动控制。印支期,受华南板块向华北板块碰撞作用影响,渤中凹陷西南环形成了一系列 NWW 向断裂及其相关褶皱,渤中 26-6 油田在构造上即位于大型褶皱的核部。在太古宇褶皱过程中,褶皱核部形成了一系列 NWW 向的构造裂缝。已钻井揭示,NWW 向的裂缝具有自核部向翼部逐步减少的趋势[图 4(b)、图 5]。燕山期,受太平洋板块自西向东俯冲作用控制,渤中凹陷西

南环形成了一组 NEE 向的逆冲断裂,这使得印支期 NWW 向的构造进一步复杂化,具有东、西分带的特征。值得注意的是,燕山期的断裂活动诱发的地层褶皱变形较弱(图 5),故其造缝能力也弱于印支期,如图 4(b)所示,在断层周围,BZ26-6-E 井和 BZ26-6-B 井表现出不同时期的裂缝发育程度有差异。两期构造活动形成了 NWW 与 NEE 向裂缝的缝网体系。渤海海域在新生代经历了近 SN 向的伸展,在区域伸展作用下,先期形成的构造裂缝处于区域伸展背景之下,极大地保持了裂缝的有效性,这也为后续流体的沿缝溶蚀提供了重要通道。

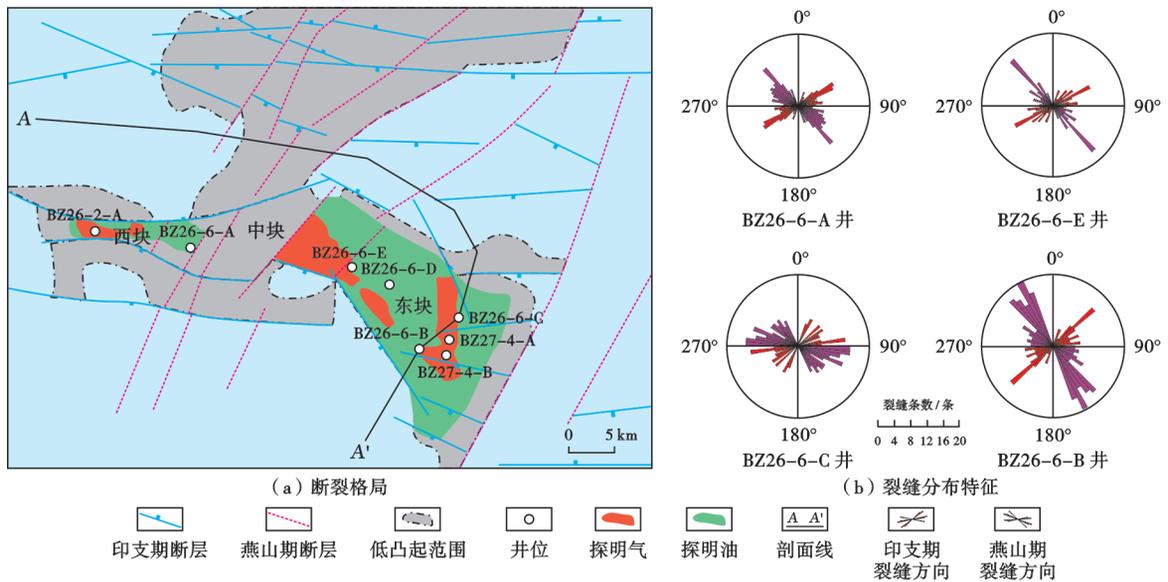


图 4 渤中 26-6 油田前新生代的断裂格局与已钻井的裂缝分布特征

Fig. 4 Pre-Cenozoic fracture pattern and fracture distribution based on drilling well in Bozhong26-6 oilfield

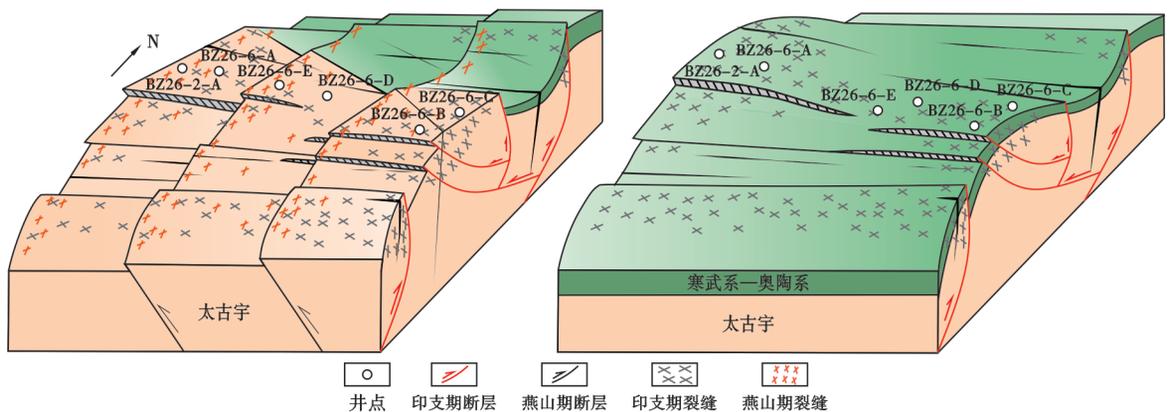


图 5 渤中 26-6 油田前新生代构造演化过程与构造裂缝分布示意

Fig. 5 Schematic diagram of Pre-Cenozoic tectonic evolution and structural fracture distribution in Bozhong26-6 oilfield

(2) 大气淡水溶蚀是太古宇潜山优质储层发育的关键

渤中 26-6 油田的实测储层物性与采样点距不整合面距离的统计结果表明,岩石的储集物性整体具有随距离不整合面变远而变差的趋势。在距不整合面约

420 m 的范围内,孔隙度具有自上而下逐步降低的趋势,这揭示了风化作用强度自上而下逐步降低。该范围内的孔隙度最大可达 17%,渗透率可大于 15 mD。而在距不整合面 420 m 以深,孔隙度普遍低于 5%,渗透率多小于 2 mD(图 6)。分析认为,风化作用可使 420 m

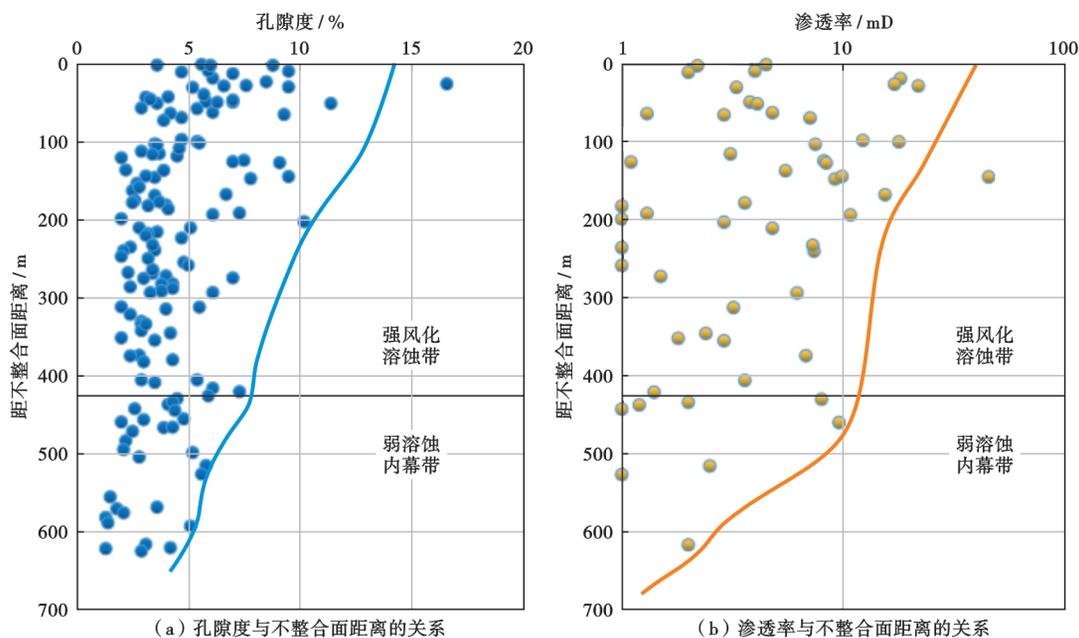


图6 渤中26-6油田太古宇潜山储层的物性与不整合面距离的关系

Fig. 6 Relationship between physical properties of Archean buried-hill reservoir and the distance from unconformity in Bozhong26-6 oilfield

以浅的储层得到显著改善,其中,孔隙度可提高3倍以上,而渗透率可提高近10倍。风化指数也证实,在距不整合面约420m以浅,风化指数显著增加,这与物性的分布能较好地吻合。

(3) 规模储层的形成受多期构造与风化淋滤共同控制

印支期强烈的挤压碰撞与燕山期走滑逆冲为渤中26-6油田构造裂缝的形成提供了外部动力,形成了NWW向和NEE向两组裂缝。新生代以来近SN向

的伸展作用使得先期裂缝的有效性得到较好地保持,立体的有效缝网体系是规模储层形成的基础。从燕山期至古近纪,渤中26-6油田的构造遭受了超过100Ma的风化,这使得距不整合面约420m范围内的裂缝体系遭受了风化淋滤改造,潜山顶部30~101m发生强烈破碎,形成风化砂砾岩带,该带在地貌平台区和相对低部位厚度较大。在风化裂缝带,岩石保持刚性特征,并沿着裂缝发生溶蚀增孔,孔隙度为5%~10%。在420m以深,裂缝带受风化改造较弱(图7),孔隙度主

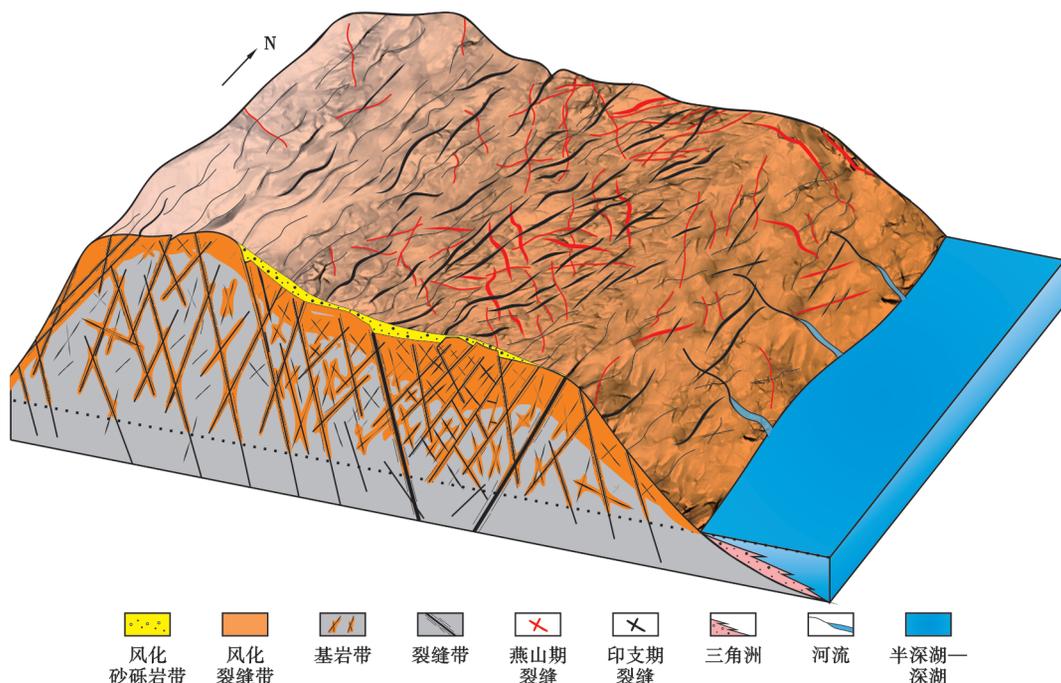


图7 渤中26-6油田太古宇潜山油藏成储综合模式

Fig. 7 Comprehensive reservoir formation mode of Archean buried-hills in Bozhong26-6 oilfield

要分布在 2%~5%。此外,构造裂缝后续溶蚀的“缝溶体”也使得渤中 26-6 油田顶部形成稳定分布的规模储集体。

3.2 “弱超压、强稳定”的泥岩为太古宇潜山油藏提供了良好的保存条件

渤中 26-6 油田所在的太古宇潜山为被东营组覆盖的中位潜山,该潜山经过新生代早期长时间暴露剥蚀,披覆了薄层东营组泥岩。高丰度油气藏的形成需要稳定的盖层条件,因此,油田泥岩盖层的有效性至关重要。已钻井统计,渤中 26-6 油田的上部稳定分布了东二段下亚段[图 1(b)],其泥岩厚度为 200~320 m,

颜色均为灰黑色,沉积环境以半深湖—深湖亚相为主。

根据钻井声波曲线数据计算,东二段下亚段泥岩的压力系数为 1.2~1.4[图 8(a)]。利用地球物理方法对区带上的泥岩压力系数进行计算,从其分布来看,渤中 26-6 油田泥岩的压力系数稳定,普遍大于 1.4,且在断层零星发育的南、北侧低部位,压力系数也能达到 1.3[图 8(b)]。由此可见,晚期的断层活动对区域泥岩封盖的破坏作用较弱,东二段下亚段泥岩盖层具有较强的稳定性,具备“弱超压、强稳定”的特征,是形成渤中 26-6 油田太古宇潜山油藏的盖层保障。

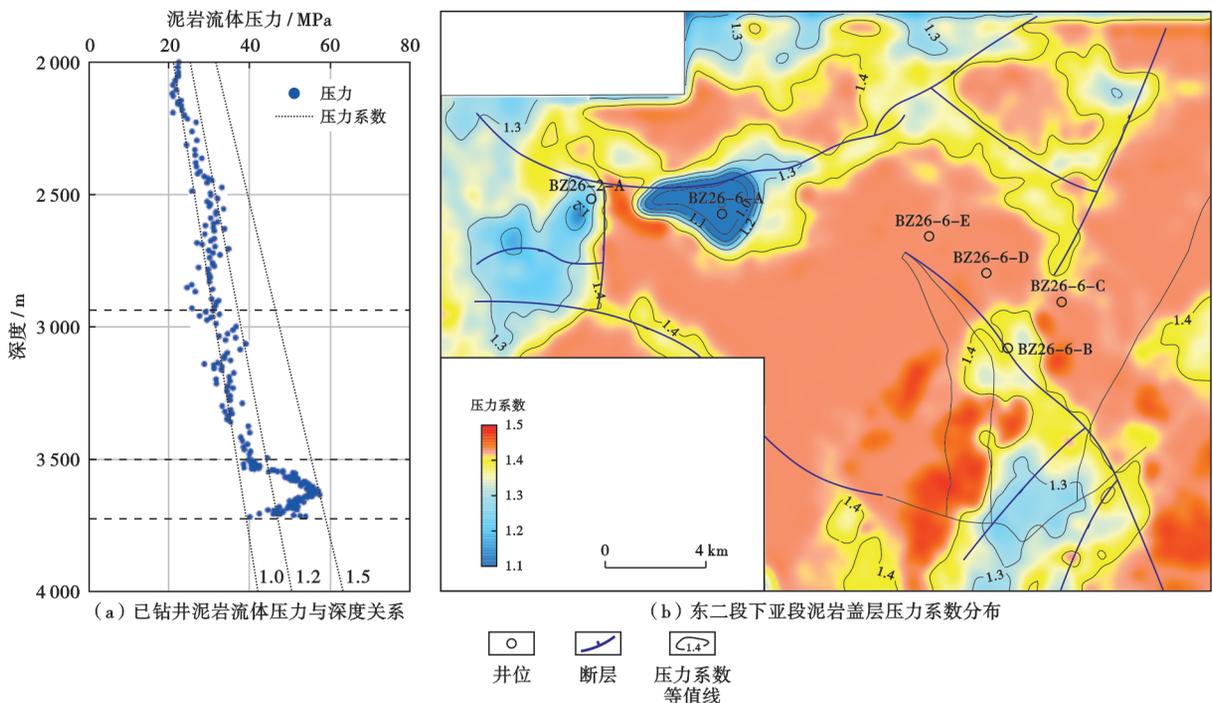


图 8 单井泥岩的压力特征与泥岩压力的平面分布

Fig. 8 Mudstone pressure in single well and plane distribution of mudstone pressure

3.3 “双源多向”的油气充注条件有利于形成太古宇潜山高丰度油气藏

渤中 26-6 油田的南、北侧分别毗邻黄河口凹陷西次洼和渤中凹陷南次洼两个富烃洼陷,这两个洼陷均对其油气成藏具有重要贡献。渤中凹陷南次洼主要发育沙河街组三段(沙三段)与东营组 2 套烃源岩,其有机质丰度较高,总有机碳(TOC)含量平均为 2.3%,干酪根类型以混合型为主(Ⅱ₁—Ⅱ₂型),部分为腐殖型(Ⅲ型);烃源岩顶面埋深在 3 000~6 000 m,平均深度约为 5 000 m,已进入成熟—高成熟生烃阶段。黄河口凹陷主要发育沙三段、沙河街组一段(沙一段)2 套烃源岩,其有机质丰度较高(TOC 含量平均约为 2.5%),干酪根类型以Ⅱ₁—Ⅱ₂型为主;沙河街组烃源

岩顶面的主体埋深在 3 000~4 500 m,埋藏相对较浅,现正处于生烃高峰阶段,也具备规模供烃条件^[21-22]。

渤中 26-6 油田在双洼供烃的基础上具备“多向”的油气运移路径。首先,潜山的南侧、东南侧以陡坡带的形式与黄河口凹陷西次洼相连,西次洼的沙三段烃源岩至潜山的供烃窗口较大,接触面积约为 27 km²。其次,潜山的北侧以斜坡带的样式与渤中凹陷南次洼相接,南次洼沙三段、东营组三段(东三段)烃源岩生成的油气通过不整合面向太古宇潜山运移(图 9),并在印支期—燕山期多期构造运动的改造下,通过古生界、太古宇内生成的裂缝运移。不整合面和裂缝的运移通道作用均已被证实,特别是在潜山低部位,油气显示在古生界距离潜山顶面 200 m 的范围内活跃。

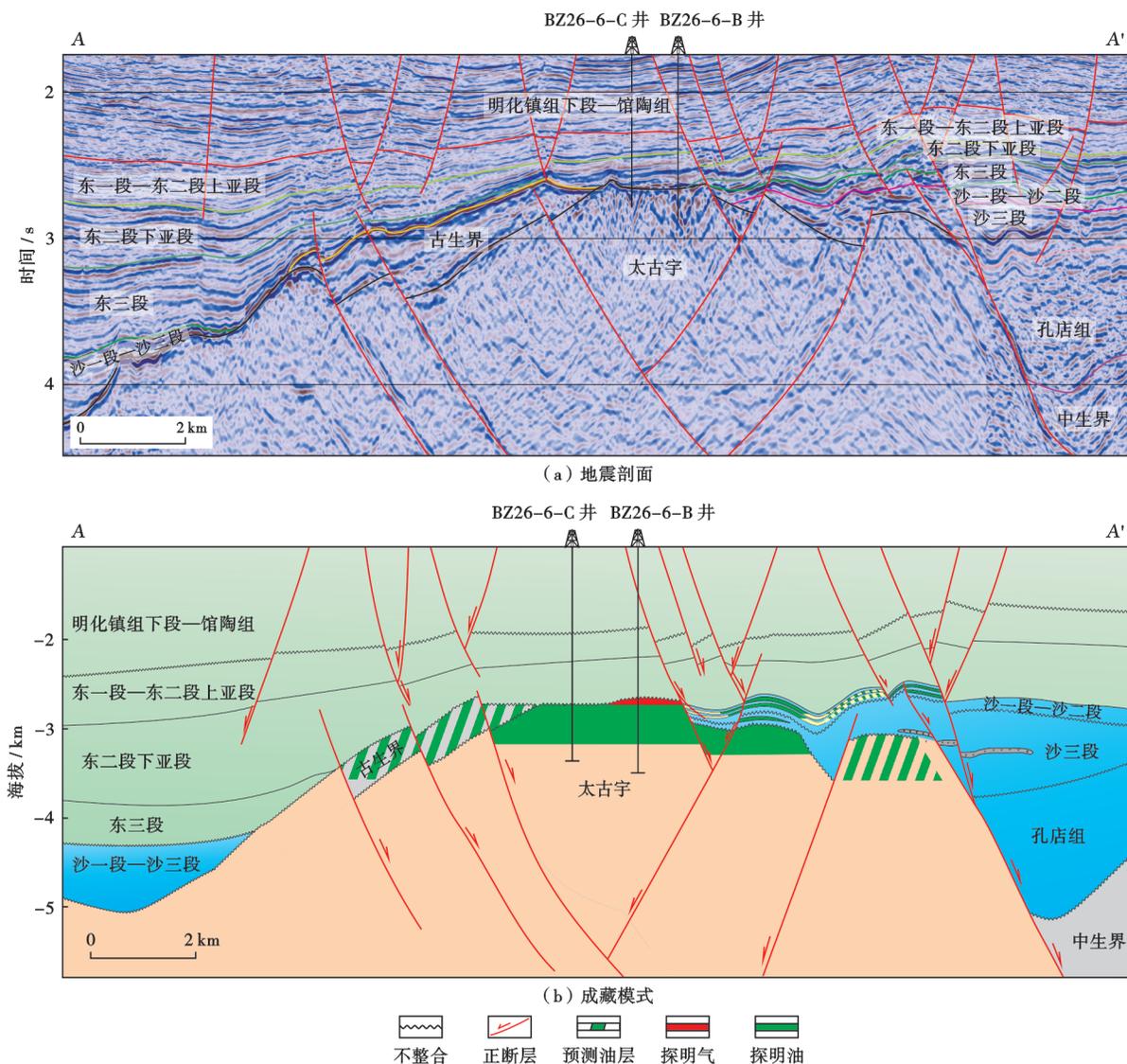


图9 渤中26-6油田地震剖面及成藏模式(剖面位置见图4)
 Fig. 9 Seismic profile and oil accumulation mode of Bozhong26-6 oilfield

因此,渤中26-6油田的太古宇变质岩潜山具有“双源多向”的充注条件,加之有厚层变质岩优质储层和稳定泥岩盖层保障,具备形成高丰度油气藏的条件。目前,渤中26-6油田太古宇潜山油藏的最大探明烃柱高度达600 m,最大探明油藏丰度为 $270 \times 10^4 \text{ t/km}^2$,是中国最大的整装变质岩潜山油田。

4 油藏特征及成藏过程

4.1 油藏的流体性质

地层流体分析表明,渤中26-6油田中的流体以常规油为主,顶部见凝析气,整体为带有凝析气顶的轻质油油藏,气油比为176~1346,地层中原油的体积系数为1.727。纵向上,油气主要分布在潜山顶面以深约420 m的优质储层内,其中,天然气占据构造高部位,气柱高度约为170 m,原油占据构造低部位,油柱高度

约为430 m。

渤中26-6油田的原油具有黏度低、含硫低、含蜡量高、凝固点高的特点。20℃条件下的原油密度为 $0.812 \sim 0.837 \text{ t/m}^3$,50℃条件下的原油黏度为 $1.92 \sim 3.99 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,含蜡量为17.92%~20.41%(平均为18.52%),含硫量低(平均为0.06%),凝固点介于18~25℃,属于轻质原油。

天然气可分为凝析气与溶解气两种,凝析气的最大反凝析液量达13.37%,地面凝析油含量达 469.19 g/m^3 ,属于高含凝析油的凝析气。无论是凝析气还是溶解气,均具有甲烷(CH_4)含量高、二氧化碳(CO_2)含量为中一高,微含硫化氢(H_2S)的特点,其中, CH_4 含量高、为69.40%~73.41%; CO_2 含量为12.06%~16.10%; H_2S 含量为0~0.001%(表1)。

表 1 渤中 26-6 油田的原油和天然气分析数据

Table 1 Analysis data of crude oil and natural gas in Bozhong26-6 oilfield

| 井名 | 井段/m | 原油物理性质 | | | | | 天然气性质 | | | |
|----------|-----------------|----------------------------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------|
| | | 密度(20℃)/ (g/cm ³) | 黏度(50℃)/ (mPa·s) | 含蜡量/ % | 含硫量/ % | 凝固点/ ℃ | CO ₂ / % | H ₂ S/ % | CH ₄ / % | 烃类气/ % |
| BZ26-6-B | 3 687.5~3 791.0 | 0.812 | 1.92 | 15.46 | 0.05 | 18 | 12.06 | 0.0010 | 73.41 | 84.15 |
| BZ26-6-D | 3 754.9~3 886.0 | 0.837 | 3.69 | 17.92 | 0.06 | 22 | 15.85 | 0.0005 | 70.35 | 83.79 |
| BZ26-6-C | 3 891.0~4 295.0 | 0.836 | 3.99 | 20.41 | 0.06 | 25 | 16.10 | 0 | 69.40 | 83.34 |

4.2 油藏的成藏过程

钻井资料分析(图 10),渤中 26-6 油田具有油气异源的特征,正常原油主要来源于黄河口凹陷的沙三段,凝析油气主要来自于渤中凹陷南次洼的沙三段。正常原油具有中一高的 4-甲基甾烷含量,偏高的伽马蜡烷含量、低的四环萜烷含量[图 10(c)]以及低成熟度[C_{29} 甾烷 $S/(S+R)$ 比值低、 C_{29} 甾烷 $\beta/(\alpha+\beta)$ 比值低、甲基菲指数低]的特征(图 11),这与黄河口凹陷沙三段的原油特征类似[图 10(b)]。凝析油的生物标志化合物具有中等 4-甲基甾烷含量、低伽马蜡烷含量、低

四环萜烷含量[图 10(d)]和高成熟度[C_{29} 甾烷 $S/(S+R)$ 、 C_{29} 甾烷 $\beta/(\alpha+\beta)$ 比值高、甲基菲指数高]的特征(图 11),这与渤中 19-6 油田的凝析油特征相近[图 10(a)]。渤中 26-6 油田的天然气类型以偏腐殖型为主,利用甲烷碳同位素换算的天然气成熟度[以镜质体反射率(R_o)为指标]大于 1.5%,这与渤中凹陷已发现的天然气类型和成熟度一致,而黄河口凹陷已发现的天然气以油型气为主, $R_o < 1\%$,与渤中 26-6 油田的天然气差异明显,这意味着其天然气主要来自渤中凹陷南次洼。

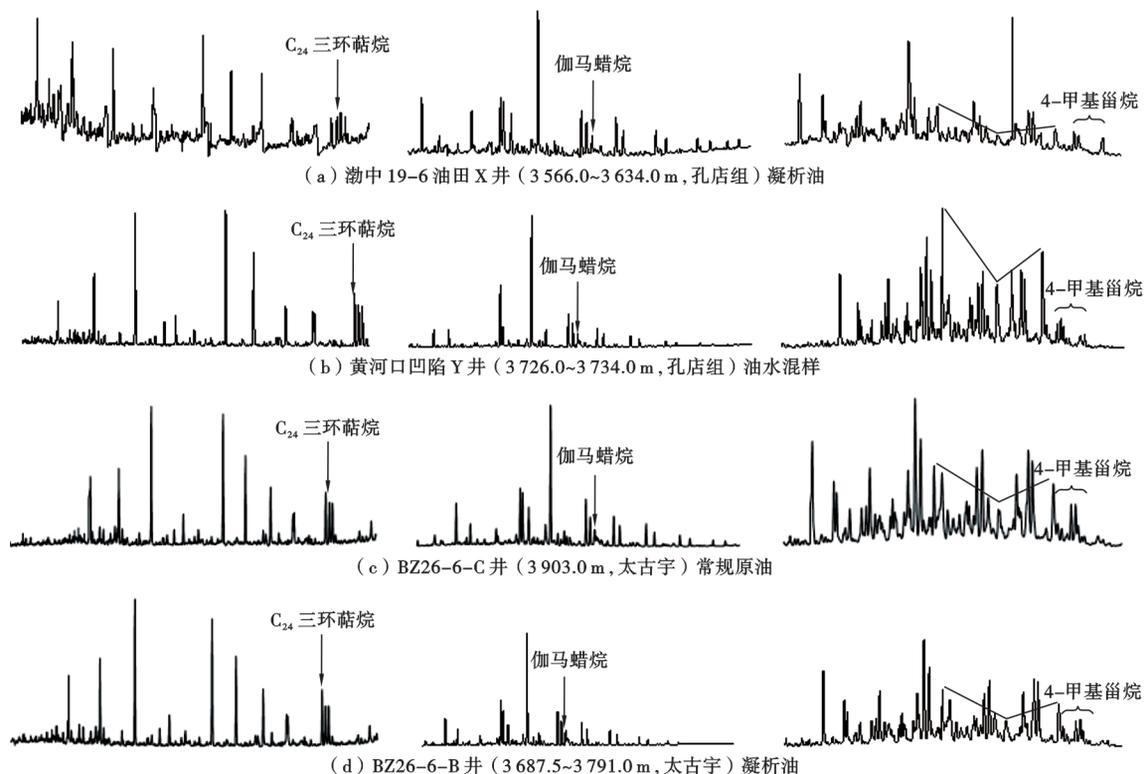


图 10 渤中 26-6 油田的油源对比

Fig. 10 Oil-source correlation of Bozhong26-6 oilfield

流体包裹体资料显示:渤中 26-6 油田经历了重质油—天然气—轻质油 3 期充注。第 1 期充注以正常原油为主,原油主要来自渤中凹陷南次洼。明化镇组下段沉积期,渤中凹陷南次洼进入快速沉降期,沙三段烃源岩大面积成熟,整体进入生油高峰,油气开始向渤中

26-6 油田的构造内运移聚集。根据渤中 26-6 油田沙一段、沙河街组二段(沙二段)储层中与烃类包裹体共生的盐水包裹体的均一温度,结合埋藏史(图 12)确定成藏期在距今 7.5~10.0 Ma。第 2 期充注以天然气为主,天然气来自渤中凹陷南次洼沙三段。在新构造运动初

期(距今 5~7 Ma),渤中凹陷南次洼的沙三段烃源岩整体进入高成熟阶段,并大量生气,渤中 26-6 油田的天然气开始大规模聚集并占据构造高部位,驱使早期的原油向下运移,油气成藏时间在距今 4~5 Ma。第 3 期充注以轻质原油为主,石油来自黄河口凹陷沙三段。新构造

运动晚期,黄河口凹陷的沙三段烃源岩广泛进入成熟—高成熟阶段并大量生、排烃,渤中 26-6 油田接受了主要来自黄河口凹陷沙三段的大规模轻质油,而早期聚集的天然气大规模溶解于原油中,仅在潜山顶部保留规模较小的凝析气藏,油气充注时间在 2.5 Ma 至今。

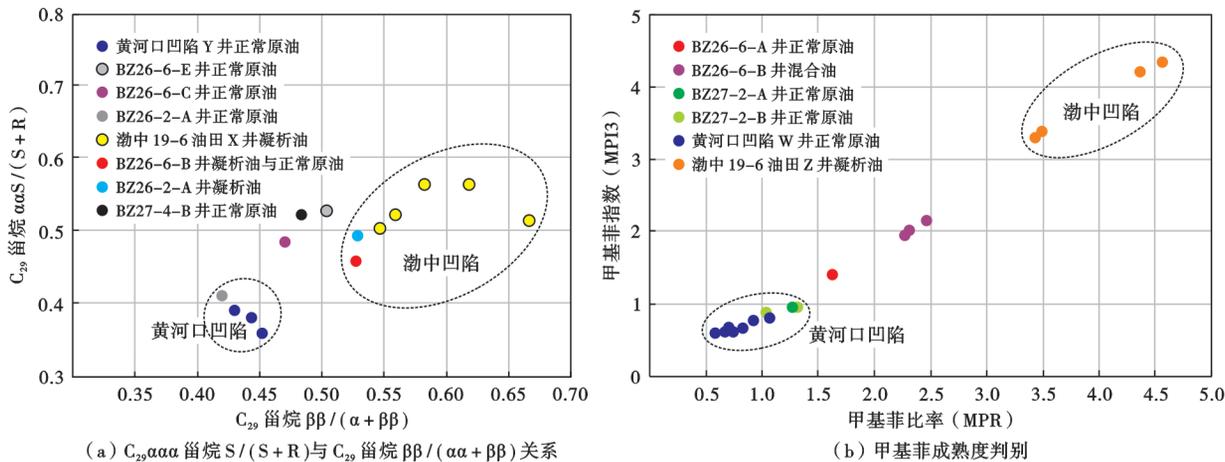
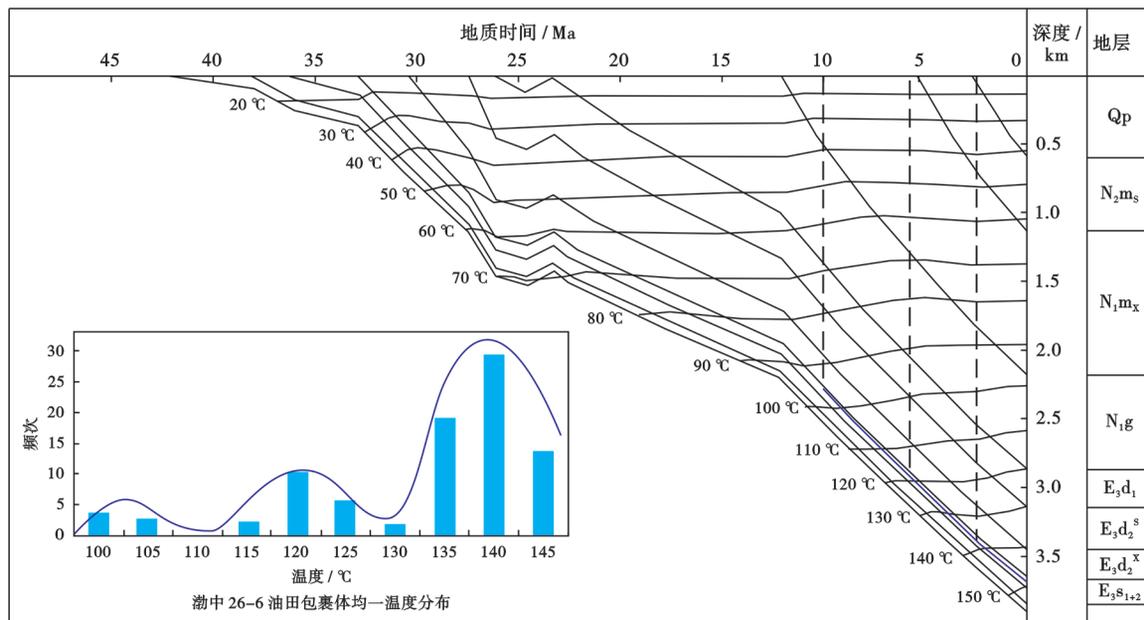


图 11 渤中 26-6 油田的原油成熟度对比
Fig. 11 Comparison of crude oil maturity in Bozhong26-6 oilfield

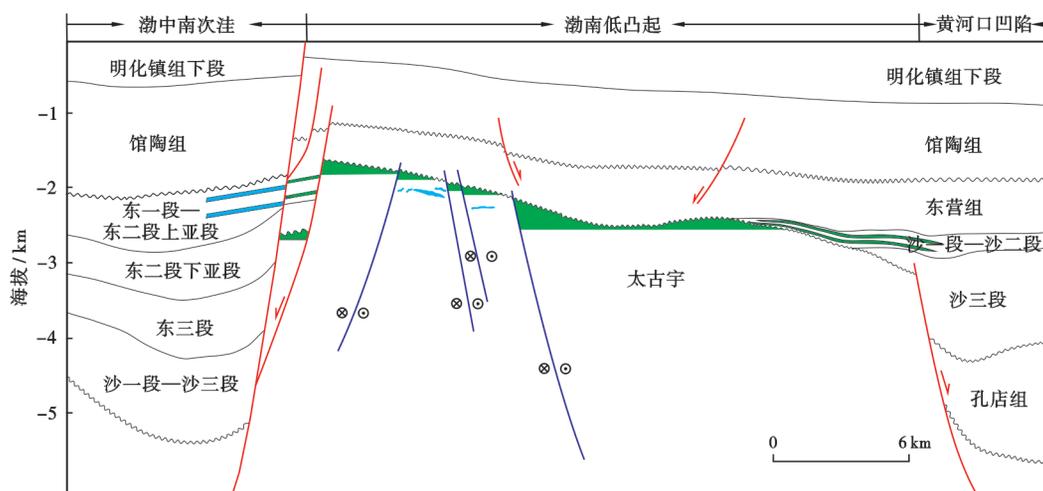


注: Qp—平原组; N₂m_s—明化镇组上段; N₁m_x—明化镇组下段; N₁g—馆陶组; E₃d₁—东一段; E₃d₂^s—东二段上亚段; E₃d₂^x—东二段下亚段; E₃s₁₊₂—沙一段+沙二段。

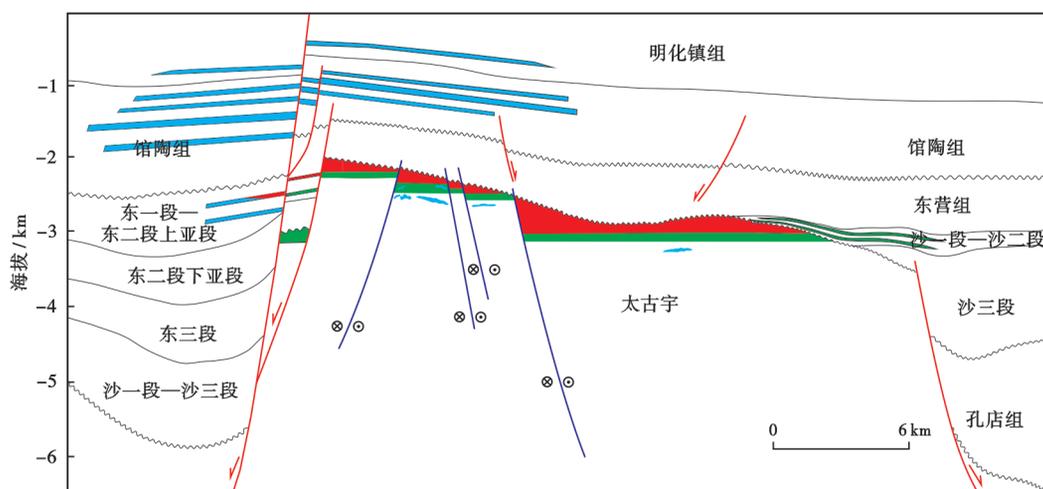
图 12 渤中 26-6 油田单井埋藏史
Fig. 12 Burial history of single well in Bozhong26-6 oilfield

综上所述,渤中凹陷南次洼沙三段烃源岩经历了先油后气的生、排烃过程,而黄河口凹陷因其沙三段烃源岩受构造沉降的影响较晚,在更晚的时期才进入生油阶段。早期,渤中凹陷南次洼的沙三段烃源岩与渤中 26-6 油田的潜山对接,生成的原油沿不整合面与深

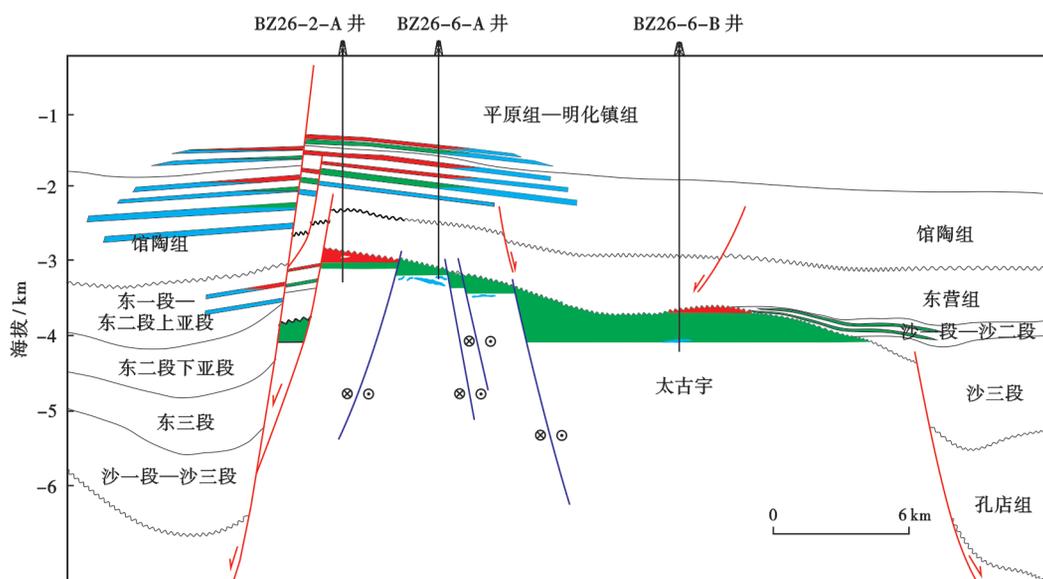
大断裂向渤中 26-6 油田的潜山运移[图 13(a)];中期,渤中凹陷南次洼的沙三段烃源岩随着埋深不断增大,开始进入大规模生成凝析气阶段,生成的凝析气继续向渤中 26-6 油田的潜山运移,占据了潜山构造的高部位,而生烃形成的超压为油气运移提供了良好的动力;



(a) 距今 10 Ma 油气藏分布模式



(b) 距今 5 Ma 油气藏分布模式



(c) 现今油气藏分布模式

不整合
 正断层
 走滑断层
 探明气
 探明油
 水层

图 13 渤中 26-6 油田潜山的油气成藏过程

Fig. 13 Hydrocarbon accumulation process of buried hills in Bozhong26-6 oilfield

晚期,渤中 26-6 油田南侧的黄河口凹陷进入生油高峰,原油沿着潜山南侧的深大断裂进入渤中 26-6 油田,占据了构造低部位[图 13(b)],而早期聚集的天然气在地层高温高压下溶解于原油中。渤中 26-6 油田经历了先油后气再油的成藏过程,最终形成了顶气底油的油气藏[图 13(c)]。

5 结论及意义

(1) 渤中 26-6 油田太古宇潜山储层的发育受构造运动和风化淋滤作用共同控制。多期构造运动叠加形成的裂缝是储层发育的基础,而后期沿裂缝形成风化淋滤溶蚀,在这两者的共同控制下,在距太古宇潜山不整合面约 420m 以浅的风化裂缝带成为优质储层。

(2) 渤中 26-6 油田太古宇潜山上覆“弱超压、强稳定”的东营组泥岩形成了良好的封盖条件。东营组广泛发育强稳定的泥岩盖层,呈弱超压的特征,且基本不发育破坏泥岩盖层的长期活动断层,油藏的保存条件良好。

(3) 渤中 26-6 油田太古宇潜山被其南、北侧富烃凹陷夹持,形成“双源多向”油气充注模式。潜山南侧与黄河口凹陷西次洼的沙河街组烃源岩直接接触,供烃窗口较大;北侧与渤中凹陷南次洼的沙河街组烃源岩以潜山不整合面相连,形成良好的油气运聚条件。

(4) 渤中 26-6 油田太古宇油田为带有凝析气顶的轻质油油田。油源对比分析表明,受控于南、北两侧烃源岩演化程度的差异,潜山流体经历了“先油后气再油”3 期油气充注。

(5) 渤中 26-6 油田的发现完善了渤中凹陷西南环太古宇潜山的勘探技术,对于渤海湾盆地太古宇潜山高丰度油田的持续探索具有重要的借鉴意义。

参 考 文 献

[1] 薛永安,李慧勇.渤海海域深层太古界变质岩潜山大型凝析气田的发现及其地质意义[J].中国海上油气,2018,30(3):1-9.
XUE Yong'an, LI Huiyong. Large condensate gas field in deep Archean metamorphic buried hill in Bohai Sea: discovery and geological significance[J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(3): 1-9.

[2] 周心怀,项华,于水,等.渤海锦州南变质岩潜山油藏储集层特征与发育控制因素[J].石油勘探与开发,2005,32(6):17-20.
ZHOU Xinhui, XIANG Hua, YU Shui, et al. Reservoir characteristics and development controlling factors of JZS Neo-Archean metamorphic buried hill oil pool in Bohai Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(6): 17-20.

[3] 薛永安.渤海海域深层天然气勘探的突破与启示[J].天然气工业,2019,39(1):11-20.
XUE Yong'an. The breakthrough of the deep-buried gas explo-

ration in the Bohai Sea area and its enlightenment[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(1): 11-20.

- [4] 李欣,闫伟鹏,崔周旗,等.渤海湾盆地潜山油气藏勘探潜力与方向[J].石油实验地质,2012,34(2):140-144.
LI Xin, YAN Weipeng, CUI Zhouqi, et al. Prospecting potential and targets of buried-hill oil and gas reservoirs in Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(2): 140-144.
- [5] 宋柏荣,胡英杰,边少之,等.辽河拗陷兴隆台潜山结晶基岩油气储层特征[J].石油学报,2011,32(1):77-82.
SONG Bairong, HU Yingjie, BIAN Shaozhi, et al. Reservoir characteristics of the crystal basement in the Xinglongtai buried-hill, Liaohe depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 77-82.
- [6] 徐长贵,杜晓峰,刘晓健,等.渤海海域太古界深埋变质岩潜山优质储集层形成机制与油气勘探意义[J].石油与天然气地质,2020,41(2):235-247.
XU Changgui, DU Xiaofeng, LIU Xiaojian, et al. Formation mechanism of high-quality deep buried-hill reservoir of Archean metamorphic rocks and its significance in petroleum exploration in Bohai Sea area[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2): 235-247.
- [7] 谢玉洪.渤海湾盆地渤中凹陷太古界潜山气藏 BZ19-6 的气源条件与成藏模式[J].石油实验地质,2020,42(5):858-866.
XIE Yuhong. Gas resources and accumulation model of BZ19-6 Archean buried-hill large-scale gas reservoir in Bozhong sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(5): 858-866.
- [8] 施和生,王清斌,王军,等.渤中凹陷深层渤中 19-6 构造大型凝析气田的发现及勘探意义[J].中国石油勘探,2019,24(1):36-45.
SHI Hesheng, WANG Qingbin, WANG Jun, et al. Discovery and exploration significance of large condensate gas fields in BZ19-6 structure in deep Bozhong sag[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(1): 36-45.
- [9] 周心怀,王清斌,冯冲,等.渤海海域大型太古界潜山储层形成条件及地质意义[J].地球科学,2022,47(5):1534-1548.
ZHOU Xinhui, WANG Qingbin, FENG Chong, et al. Formation conditions and geological significance of Large Archean buried hill reservoirs in Bohai Sea[J]. Earth Science, 2022, 47(5): 1534-1548.
- [10] 侯明才,曹海洋,李慧勇,等.渤海海域渤中 19-6 构造带深层潜山储层特征及其控制因素[J].天然气工业,2019,39(1):33-44.
HOU Mingcai, CAO Haiyang, LI Huiyong, et al. Characteristics and controlling factors of deep buried-hill reservoirs in the BZ19-6 structural belt, Bohai Sea area[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(1): 33-44.
- [11] 吴智勇,郭建华,吴东胜.大民屯凹陷静安堡西侧低潜山变质岩储层裂缝发育特征[J].石油与天然气地质,2001,22(4):322-325.
WU Zhiyong, GUO Jianhua, WU Dongsheng. Fractured characteristics of metamorphic reservoirs in low buried-hill in west of Jing'anpu, Damintun depression[J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(4): 322-325.
- [12] 杜晓峰,刘晓健,张新涛,等.渤海海域太古界变质岩储层特征与形成控制因素[J].中国海上油气,2021,33(3):15-27.
DU Xiaofeng, LIU Xiaojian, ZHANG Xintao, et al. Characteristics and controlling factors of Archean metamorphic reservoirs in Bohai Sea area[J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(3): 15-27.