



渤中19-6凝析气田太古宇潜山储层发育主控因素及地质模式

范廷恩, 牛 涛, 范洪军, 胡光义, 樊鹏军, 马淑芳, 肖大坤

Archaeozoic buried-hill reservoir of Bozhong 19-6 condensate field: Main controlling factors and development model

FAN Tingen, NIU Tao, FAN Hongjun, HU Guangyi, FAN Pengjun, MA Shufang, and XIAO Dakun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2020092701>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

惠州凹陷花岗岩潜山储层条件分析及石油地质意义

Reservoir condition analysis of a buried granite hill in the Huizhou Depression and its petroleum geological significance

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(4): 126

复杂储层凝析气藏储量评价

RESERVE CALCULATION FOR COMPLEX RESERVOIR OF A CONDENSATE GAS FIELD

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(1): 131

北部湾盆地涠西南凹陷灰岩潜山储层特征及分布规律

Characteristics of limestone buried-hills and their distribution in the Weixinan Depression of the Beibu Gulf Basin

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(1): 94

东海某凹陷平北区基底岩浆岩优质储层发育模式

The development model for high quality magmatic basement reservoir in a depression of East China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(6): 93

日本海天然气水合物气源成因及主控因素探讨

DISCUSSION ON GAS ORIGINS AND MAIN CONTROLLING FACTORS FOR GAS HYDRATES IN THE SEA OF JAPAN

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(5): 102

东海西湖凹陷中央背斜带花港组成藏条件及主控因素分析—以H3气藏为例

Analysis of reservoir-forming conditions and key controlling factors of Huagang Formation in the central anticlinal belt of Xihu Sag of East China Sea—Taking the reservoir H3 for example

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(5): 127



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020092701

渤中 19-6 凝析气田太古宇潜山储层发育主控因素及地质模式

范廷恩, 牛涛, 范洪军, 胡光义, 樊鹏军, 马淑芳, 肖大坤

中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028

摘要:综合运用岩心、测井、地震、野外露头及生产测试资料对渤中 19-6 太古宇潜山储层发育特征及主控因素进行了分析。研究发现渤中 19-6 太古宇潜山储层主要受岩石类型、构造运动和风化淋滤等因素影响, 储层纵向分为风化带和内幕带, 其储层发育主控因素及储层空间分布模式差异明显。其中, 风化带受构造和风化淋滤作用双重控制, 发育构造缝、风化缝、溶蚀孔隙等储集空间类型, 裂缝整体发育呈网状, 储层连通性好。受宏观古地貌控制, 风化带厚度从古构造高部位向构造低部位呈逐渐减薄的“似层状”分布模式。同时, 受岩石类型、局部断层、沟-脊微地貌以及坡度等因素的影响, 风化带厚度局部增厚或减薄。潜山内幕带主要受内幕高角度断层控制, 基本不受风化作用影响, 储集空间以构造缝为主。通过内幕高角度断层的识别和刻画, 认为内幕带储层沿高角度断层带状、漏斗型分布。上述认识对于渤中 19-6 凝析气田开发方案的编制, 特别是为潜山储量动用及注采井网部署奠定了重要基础。

关键词:太古宇潜山; 主控因素; 古地貌; 风化带; 内幕; 地质模式; 渤中 19-6

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Archaeozoic buried-hill reservoir of Bozhong 19-6 condensate field: Main controlling factors and development model

FAN Tingen, NIU Tao, FAN Hongjun, HU Guangyi, FAN Pengjun, MA Shufang, XIAO Dakun

CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China

Abstract: In order to reveal the distribution pattern of the Archaeozoic buried hill reservoirs in the Bozhong 19-6 condensate field, integrated study is carried out with cores, well logs, well testing data, seismic data in addition to outcrops. The Archaeozoic buried hill reservoir consists of weathered crust reservoirs and internal rock reservoirs, which have obvious differences in controlling factors and distribution patterns. The formation of weathered crust reservoir mainly depends upon structural deformation and weathering, of which the thickness is dependent on the ancient landform. It usually becomes thinner from the paleostructural high to the structural low. Rock types, local faults, microreliefs and topographic slopes are also the controlling factors needed to be considered. However, the inner part reservoir is mainly controlled by the high-angle faults, and the main reservoir space is provided by structural fractures.

Key words: Archaeozoic buried hill; control factors; paleogeomorphology; weathered zone; inner hill; geological model; Bozhong19-6

1 地质概况

渤中 19-6 潜山凝析气田是近年来渤海发现的最大千亿方大气田, 该气田的发现将为缓解华北地区用气紧张、实现京津冀绿色低碳经济发展发挥重要作用。渤中 19-6 凝析气田位于渤中凹陷西南部, 东南方向为渤南低凸起, 西部为埕北低凸起, 南接黄河口凹陷, 北接渤中凹陷主洼, 为渤中凹陷西南次洼和南次洼夹持的、具有洼中隆特征的背斜构造

带(图 1)。研究区渤中 19-6 构造带及周边纵向地层自上而下依次发育第四系平原组、明化镇组、馆陶组、东营组、沙河街组以及太古宇变质岩基底, 除上述地层外, 构造带南部还发育孔店组砂砾岩地层, 构造带北部发育中生界地层。其中, 沙三段、沙一段以及东三段为主要的 3 套烃源岩层, 明化镇组、馆陶组、孔店组等主要发育碎屑岩储层, 中生界地层岩性主要为砂砾岩和凝灰岩^[1-2], 太古宇为变质岩基底。太古宇变质岩潜山基底是研究区的主要含气层段, 埋藏深度 4 200~5 500 m, 构造上被南北走向

资助项目: 国家科技重大专项“海上开发地震关键技术及应用研究”(2011ZX05024-001)

作者简介: 范廷恩(1971—), 男, 高级工程师, 主要从事开发地质及油藏地球物理方面的研究, E-mail: fante@cnooc.com.cn

收稿日期: 2020-09-27; 改回日期: 2020-11-19。 周立君编辑

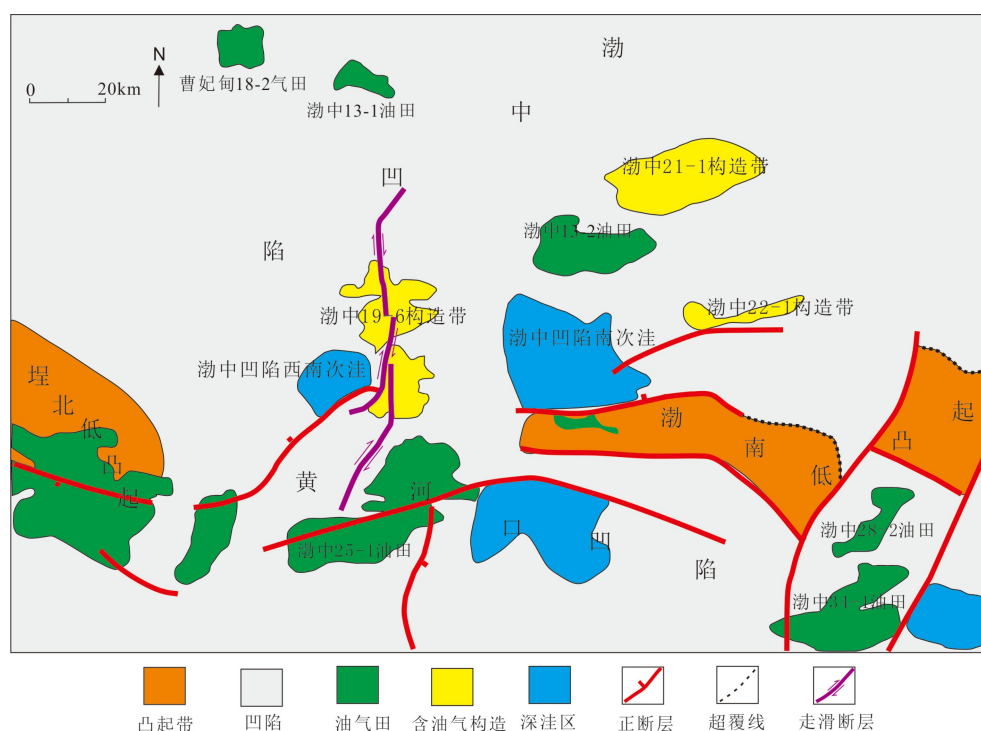


图 1 渤中 19-6 凝析气田区域位置图

Fig.1 The location of Bozhong 19-6 condensate field

的郯庐断裂切割成东、西两部分,并进一步被近东西向次级断裂切割成复杂断块^[3]。岩性以二长片麻岩、变质花岗岩以及混合花岗岩为主,储层空间分布复杂,储集空间类型以裂缝为主,同时发育一定数量的溶蚀孔隙。潜山平均孔隙度 3.9%,平均渗透率 2.6 mD,低孔低渗特征。凝析油含量平均 700 g/m³,属于特高含凝析油的块状凝析气藏。

钻井揭示渤中 19-6 太古宇潜山储层发育规律复杂,主要表现在:①不同断块及同一断块不同位置储层发育厚度差异大,变化快,有效储层厚度 40~400 m,测试产能差异大,测试产气量 1.1~30 万方/天;②含气层段长,储层不仅在潜山风化带发育,在进尺 1000 m 的内幕带仍发育有效储层。渤中 19-6 太古宇潜山的发现是近年来深层天然气勘探的重大突破,但目前对其储层发育模式及控制因素的研究、认识还不够深入。本文基于钻井、测井、测试等资料,综合阐述了渤中 19-6 太古宇潜山储层的发育规律和地质模式,对该气田及周边相似潜山油气田的储层认识及开发方案编制具有重要意义。

2 潜山纵向分带

太古宇变质岩潜山储层形成的控制因素复杂,前人研究一般认为岩性、构造运动和风化淋滤作用是变质岩潜山储层形成的三大主要控制因素,其中岩

石类型是内因,构造运动和风化淋滤作用是外因^[4-5]。在潜山岩石类型相同的条件下随着深度增加,潜山内部受构造以及地表风化淋滤等作用的改造作用逐渐减弱,因此,潜山储集层纵向发育程度出现差异。潜山顶部除在构造运动过程中形成构造缝外,在出露地表期间遭受风化淋滤作用的进一步改造,形成风化缝、收缩缝、溶蚀孔缝等储集空间类型,越靠近潜山顶部,改造作用越强,储层中裂缝和孔隙越发育^[6-11]。通常情况下,在石油勘探开发中将这部分受构造和风化淋滤作用双重影响的储集层段称为风化带。随着深度的增加,构造应力以及地表地质营力作用逐渐减弱,储集空间类型主要以构造缝为主且构造缝数量逐渐减少,这部分主要受构造运动控制而不受风化淋滤作用影响或影响很小的储集层称为内幕带^[12-18]。在野外太古宇变质岩露头中这种纵向的差异比较普遍,在露头顶部裂缝非常发育,网状裂缝发育特征明显,岩石碎裂化程度高(图 2a),随深度增大,裂缝数量逐渐减少,岩体越来越致密。

通过对渤中 19-6 凝析气田已钻井进行分析发现,风化带和内幕带储集性能的差异在物性以及钻时、电阻率等电测曲线上也有明显的体现。其中风化带由于裂缝较为发育,成像测井平均线裂缝密度 3~6 条/m,储集性能好,测井解释平均孔隙度 2.4%~6.5%,净毛比 0.33~0.62(表 1)。而内幕带储集层整



图2 山东泰安新泰地区断裂带野外地质露头特征

Fig.2 Outcrops of a fault zone in Xintai region, Tai 'an, Shandong Province

表 1 渤中 19-6 太古宇潜山风化带分带标准

Table 1 Standards for classification of weathering zone in Bozhong19-6 field

	钻时/（min/m）	RS/(Ω·m)	RD/(Ω·m)	裂缝密度/（条/m）	孔隙度/%	净毛比%
风化带	8~29	75~930	180~1100	3~6	2.4~6.5	0.33~0.62
内幕带	12~52	440~6200	700~22000	0.8~1.2	1.7~3.9	<0.35

体较差,平均裂缝线密度 0.8~1.2 条/m,测井解释平均孔隙度 1.7%~3.9%,净毛比小于 0.35。从电测曲线上看,风化带裂缝发育,钻时和电阻率相对较低,钻时 8~29 min/m,电阻率 170~1100 Ω·m。另外,由于风化带受风化淋滤作用较强,黏土矿物增多,伽马能谱测井中 TH、U 含量较内幕带明显增高。内幕带致密层较为发育,钻时普遍较高,为 12~52 min/m,电阻率明显高于风化带,为 700~22000 Ω·m,由于内幕带受风化淋滤作用较弱,TH、U 含量较风化带明显降低(图 3)。

3 风化带储层特征

渤中 19-6 太古宇潜山风化带厚度 42~415 m,厚度差异大,主要储集空间为构造裂缝、风化缝,其次是溶蚀缝、溶蚀孔等。岩心显示风化带整体裂缝较为发育,同时,宏观裂缝整体充填程度高,超过

50%的宏观裂缝完全充填,为闭合无效缝,充填物主要为泥质、硅质、钙质、铁白云石等。成像测井解释有效裂缝开度 200~600 μm,裂缝相互切割整体呈网状特征,越靠近潜山顶部风化改造作用越强,岩石碎裂化程度越高(图 4a),随着深度增加,风化缝数量减少,以构造缝为主(图 4b),裂缝间的岩块变致密。另外,张裂缝延伸长度短,裂缝壁不规则,平均张开度大,个别残留张裂缝开度大于 2 mm,在部分张裂中可见发育完好的石英晶体(图 4c),石英晶体的存在对裂缝的支撑作用明显,有效降低了压实过程中裂缝的闭合程度(图 4d)。通过铸体薄片和扫描电镜分析发现,微观储集空间类型主要为微裂缝,其次是溶蚀孔隙,溶蚀孔隙沿微裂缝呈串珠状分布。微观储集空间整体充填程度也较高,铸体薄片定量统计结果显示微观裂缝充填比例达 85.2%,主要充填物为白云石、铁白云石、硅质、泥质等(图 5)。

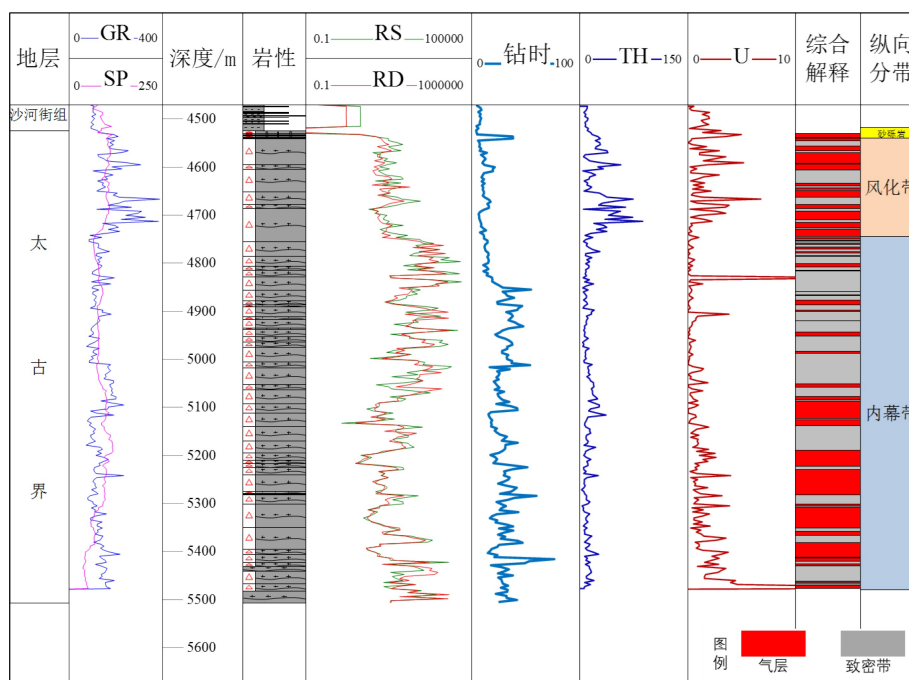


图 3 渤中 19-6 太古宇潜山 BZ19-6-G 井单井纵向分带特征

Fig.3 Vertical zonation of BZ19-6-G well in Bozhong 19-6 field

4 风化带储层发育控制因素

风化带储层受构造和风化淋滤双重作用控制, 整体储层比较发育, 空间连续性好, 呈“似层状”分布。通过古地貌、断层、沟-脊、坡度等控制因素与风化带储层关系分析发现, 风化带厚度主要受古地貌控制, 古地貌构造越高, 风化带厚度越大。同时, 受局部断层、沟-脊、坡度等因素的调节作用, 局部风化带储层厚度增大或减小。

4.1 宏观古地貌

通过风化带厚度与各控制因素的相关性分析发现, 渤中 19-6 潜山风化带厚度受古地貌控制明显。渤中 19-6 太古宇潜山上覆地层为沙一段和沙二段, 以稳定沉积的灰色、深灰色泥岩为主, 且与上覆东营组沉积之间为整合接触, 因此采用层拉平的方法将沙河街组顶拉平进行古地貌恢复^[19], 恢复的古地貌能够反映潜山在埋藏前的相对古地貌形态(图 6)。根据层拉平的机理, 上覆沙河街组地层厚度变化即反映了古地貌的高低变化。统计发现, 风化带厚度与潜山上覆沙河街组地层厚度相关性较好(图 7), 对应的古地貌构造高部位储层厚度大, 向构造低部位储层厚度逐渐减薄。渤中 19-6 构造古近系沉积前的古地貌恢复结果显示, 研究区构造整体呈近南北向的构造脊形态(图 7), 构造脊部位风

化带厚度最大, 储层平均厚度 213 m, 向两侧构造低部位厚度逐渐减薄, 平均厚度仅为 56 m, 整体表现为从构造高部位向低部位逐渐减薄的“似层状”鲤鱼背模式。

潜在构造运动过程中除形成控制断块边界的较大规模断层外, 还会派生出一些较小规模的断层, 这些小断层使得断块内部潜山顶部呈现出高低起伏的初始地貌特征。同时, 由于断层及断层附近裂缝发育集中, 岩体风化剥蚀速度快, 逐渐被侵蚀成为沟谷, 经过长期的风化剥蚀之后潜山顶部就形成了高低起伏的“沟-脊”地貌^[20]。其中, “脊”为剥蚀残留高部位, 风化带厚度大, “沟”为原断层位置被侵蚀而成的低洼部位, 风化带厚度相对较薄。通过潜山顶部“沟脊”微地貌的精细刻画能够进一步表征潜山风化带厚度的变化规律和分布特征。沟脊在潜山构造高部位和低部位均发育, 通过沟脊地貌的精细刻画, 可以指导在构造高部位预测出裂缝发育相对差的“沟”, 进而进一步指导开发井网部署。同时, 也可以指导在构造低部位预测出裂缝相对发育的“脊”, 据此进行潜力评价。

4.2 岩石类型

岩石类型是影响潜山储层发育的重要内因, 特别是暗色矿物的含量直接影响了裂缝形成的难易程度。根据前人研究结果, 黑云母、角闪石等暗色矿物为韧性矿物, 不易形成构造裂缝^[5], 因此暗色矿

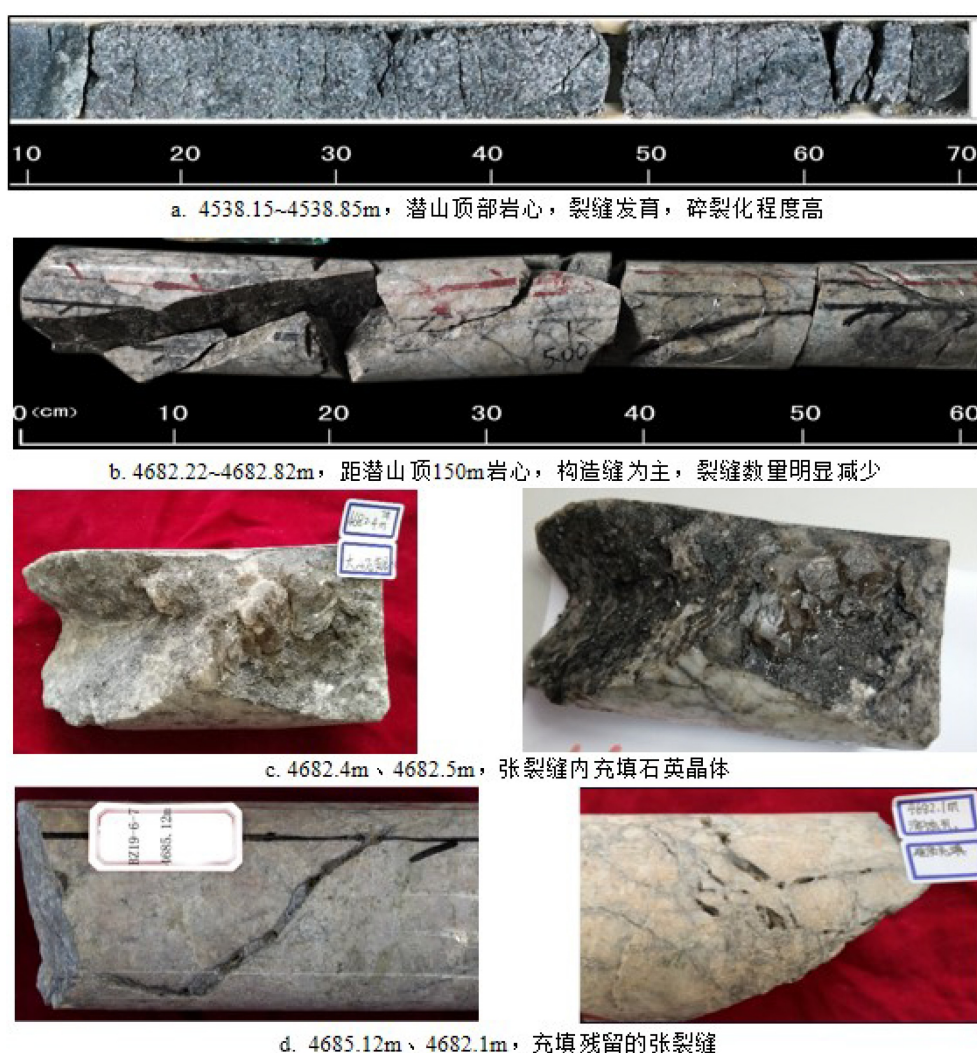


图4 BZ19-6-G井太古宇潜山岩心特征

Fig.4 Pictures of cores from well BZ19-6-G in Bozhong19-6 field

物含量越高越不利于裂缝型储层的形成。统计发现,渤中19-6潜山中央构造脊东西两侧暗色矿物含量差异明显,其中西块暗色矿物含量低,暗色矿物含量平均3.9%,储层厚度120~420 m,测试产量18~31 万方/天,无阻流量45~160 万方/天。东块暗色矿物含量较高,暗色矿物含量平均7.5%,储层厚度38~253 m,测试产量1.1~20 万方/天,无阻流量1.2~70 万方/天,西块储层及测试产能明显比东块好。

4.3 局部断层

断层及断层周围一定范围内为应力集中区,往往会派生或次生一些构造裂缝,形成的构造裂缝不仅可以直接作为潜山岩体的储渗空间,而且也岩体出露地表后的风化淋滤提供了基础^[5]。类比其他潜山油气田及野外地质露头勘测结果显示,断层单侧影响裂缝发育的距离约为150 m。对山东新泰野外一处断距约为150~200 m的断层进行观测,该断

层上升盘出露太古宇变质岩,在断层带核心约20 m范围内裂缝相互切割,岩块基本完全碎裂,局部可见明显的断块角砾、糜棱岩等。随着与断层距离增加,裂缝密度逐渐降低,距离断层约50 m范围内,平均裂缝密度为20~30 条/m(图2d),50~100 m范围内平面裂缝密度5~15 条/m(图2c),100~150 m范围内平均裂缝密度3~10 条/m(图2b),当距离断层距离超过150 m时,变质岩露头仅有零星裂缝发育,基本以致密岩块为主(表2)。在断层及其一定范围内由于裂缝发育,为后期的风化淋滤作用提供了便利,不仅岩块风化程度相比其他地方高,且沿裂缝风化的深度更大,最终形成的风化带厚度大,因此局部断层的发育会对风化带厚度起到一定的调节作用。

4.4 构造坡度

构造坡度的陡缓影响风化带的保存程度,平缓

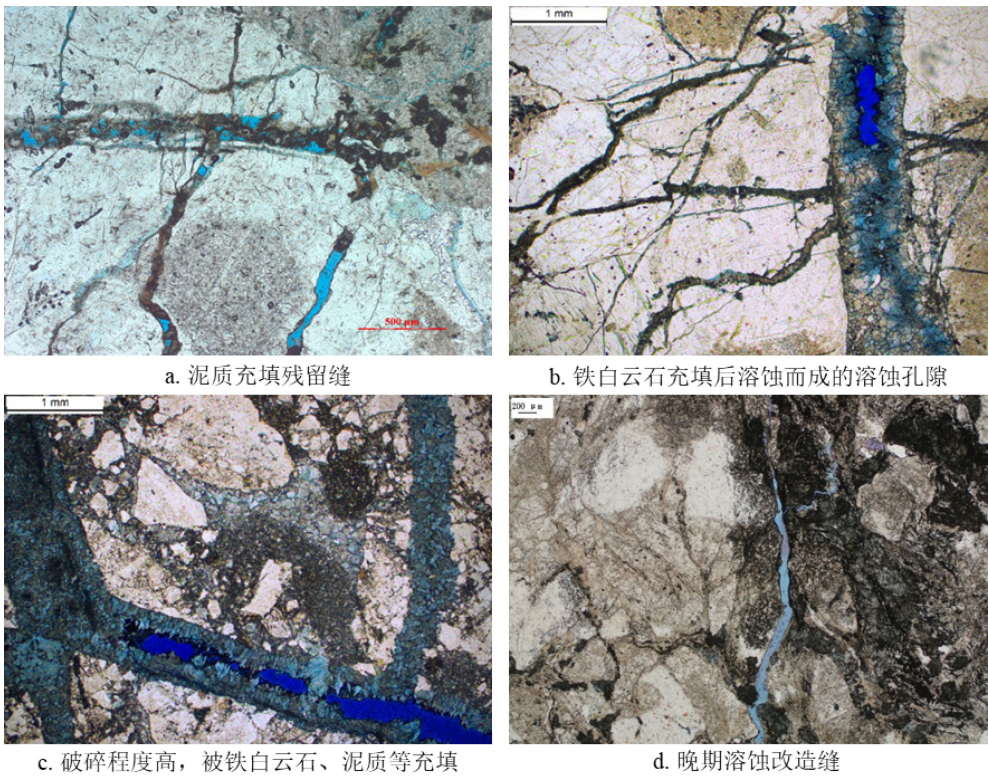


图 5 渤中 19-6 潜山微观裂缝类型及充填特征
Fig.5 The types and filling characteristics of micro-fractures in Bozhong 19-6 field

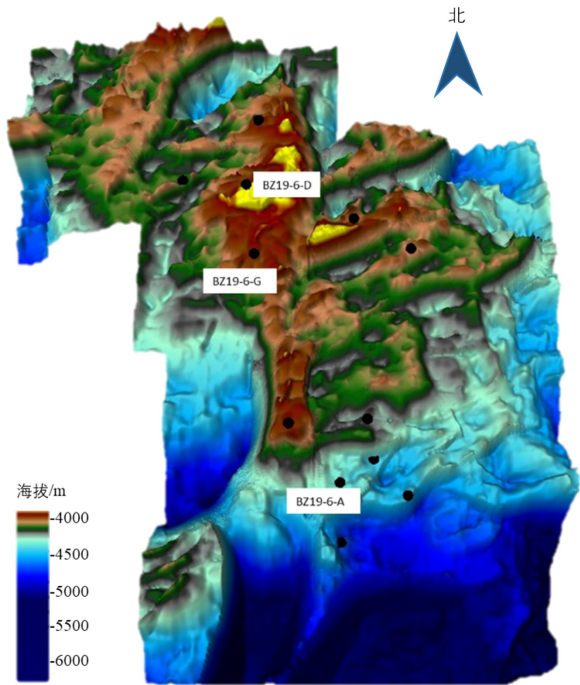


图 6 渤中 19-6 太古宇潜山古近系地层沉积前古地貌图
Fig.6 Paleogeomorphology of buried hill in Bozhong19-6 field

的潜山面有利于风化带的保存, 储集层厚度大, 储集性能好; 反之, 潜山面陡, 风化带更容易被侵蚀, 不利于风化带的保存, 风化带厚度薄, 储集性能

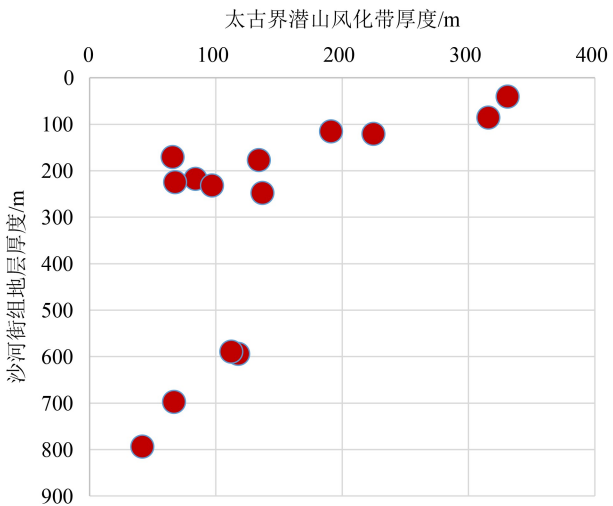


图 7 太古宇潜山风化带厚度与上覆沙河街组地层厚度交会图
Fig.7 The relation of the weathering zone thickness to the strata thickness of the overlying Shahejie Formation

表 2 新泰变质岩露头断层附近裂缝发育密度统计
Table 2 Fracture density on the metamorphic outcrop fault near Xintai

与断层距离/m	20	40	100	150	200
裂缝密度/(条/m)	破碎带	20~30	5~15	<10	<5

差。胜利油田太古宇潜山不同部位的生产井的试油资料统计证实,平缓潜山顶面的太古宇储集体的储集性能普遍优于陡峭的潜山斜坡^[4]。渤中 19-6 潜山各断块坡度 $3.9^{\circ}\sim 16.4^{\circ}$, 对应的风化带储层厚度差异较大,统计结果显示坡度小于 9° 的断块风化带厚度 110~220 m,坡度大于 9° 的断块风化带厚度 42~92 m(图 8)。需要注意的是,实际的古地貌比较复杂,同一断块内也具有一定的构造起伏,不同部位坡度也都有一定差异,因此,在同一断块内部也会因为坡度的差异导致局部风化带厚度的增大或减小。

5 内幕带储层特征

早期渤海海上已发现的太古宇潜山油气田,如锦州 25-1 南潜山、蓬莱 9-1 潜山油田、曹妃甸 18-1/18-2 油田等,含油气层段都集中分布在距离潜山顶 50~300 m 范围的风化带内。2011 年在辽河兴隆台潜山深化勘探中钻探的兴古 7 井在潜山顶面 1500 m 以下深度段获得了高产油气流,这充分说明太古宇潜山储集层不一定限于潜山顶部的风化壳,在潜山内幕仍具有形成油气藏的可能,潜山内幕也具有巨大勘探潜力。渤中 19-6 凝析气田多口探井揭示在进山 1000 m 范围内的内幕带仍发育有效储层(图 3)。

5.1 内幕带储层特征

内幕带岩心、铸体薄片、成像测井等综合分析结果表明,储层的主要储集空间类型为构造裂缝,风化淋滤作用形成的风化缝、溶蚀孔发育较少,基质相对致密,整体裂缝走向以 NE 向和近 NE 向为主。与风化带相比低角度裂缝数量减少,高角度裂缝比例增加,倾角大于 60° 的高角度缝比例占到 26.1%~49%。另外,由于内幕带受风化淋滤作用影

响小,溶蚀孔隙发育较少,长石矿物表面相对新鲜,蚀变程度较低。内幕带储层整体较差,储层净毛比小于 0.35,测井解释孔隙度 2.13%~3.86%,测井解释渗透率 1.75~2.30 mD。

5.2 主控因素分析

对于潜山内幕储层的成因目前业内还没有形成统一意见,多数人认为构造改造程度是影响内幕储层发育的最关键因素,只要构造运动足够强烈,即使是岩石矿物中暗色矿物含量高或岩性单一,同样也可以形成优质储层^[12]。

渤中 19-6 潜山经历了印支运动、燕山运动、喜山运动多期构造运动,形成了多期断裂系统:印支期扬子板块与华北板块碰撞,产生大量北西西向的逆冲断层;燕山期太平洋板块沿北西西向朝东亚大陆俯冲,郯庐断裂发生左旋挤压,派生出大量北东向的断层;燕山早期渤海湾盆地进入拉张裂陷阶段,在近南北向的拉张作用下,形成了大量东西向张性正断层。多期复杂的构造运动在潜山内部形成了大量的内幕高角度断层,这些内幕断层控制了内幕裂缝的发育。

5.3 内幕带储层分布模式

潜山内幕带储层主要受内幕高角度断层控制,内幕储层沿断层呈“带状”分布,内幕高角度断层的识别刻画成为内幕储层预测的关键。通过对原始地震数据进行 F-K 滤波处理,潜山内幕高角度断层的地震反射得到了很好的增强(图 9),同时将不同倾向的高角度断层分开。其次,通过在潜山内幕不同深度提取沿层振幅切片,来表征潜山内幕高角度断层的平面分布特征。通过内幕高角度断层的识别,发现内幕高角度断层发育的区域内幕带储层普遍发育好,高角度断层与井点储层特征及测试结果吻合较好。

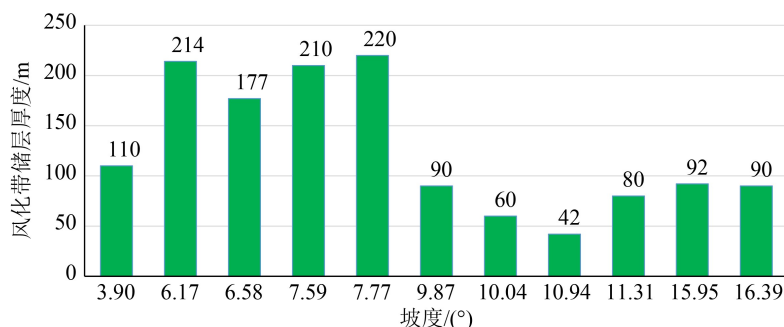


图 8 渤中 19-6 凝析气田风化带厚度与坡度关系图

Fig.8 Relationship between weathering zone thickness and slope in Bozhong19-6 field

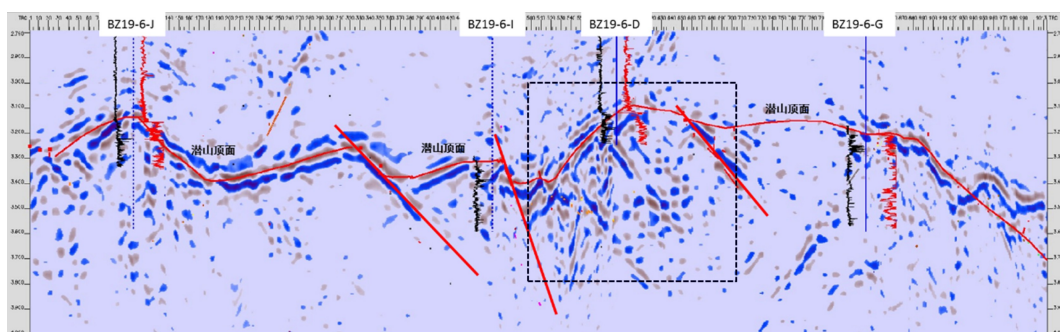


图 9 潜山内幕高角度断层地震反射特征

Fig.9 The seismic reflection characteristics of high Angle faults of a buried hill

内幕高角度断层属性分析显示,内幕高角度断层整体分布具有局部发育集中、不均匀、平面分布不连续的特征。同时,潜山向下随深度增加应力差减小,溶蚀作用减弱,改善储层物性的成岩作用减

弱。但是,压实及胶结作用增强,导致储层物性逐渐变差。因此,潜山内幕带储层纵向具有沿内幕高角度断层“带状”分布,同时在一定范围内自上而下裂缝带逐渐变窄,呈“漏斗形”的展布模式(图 10)。

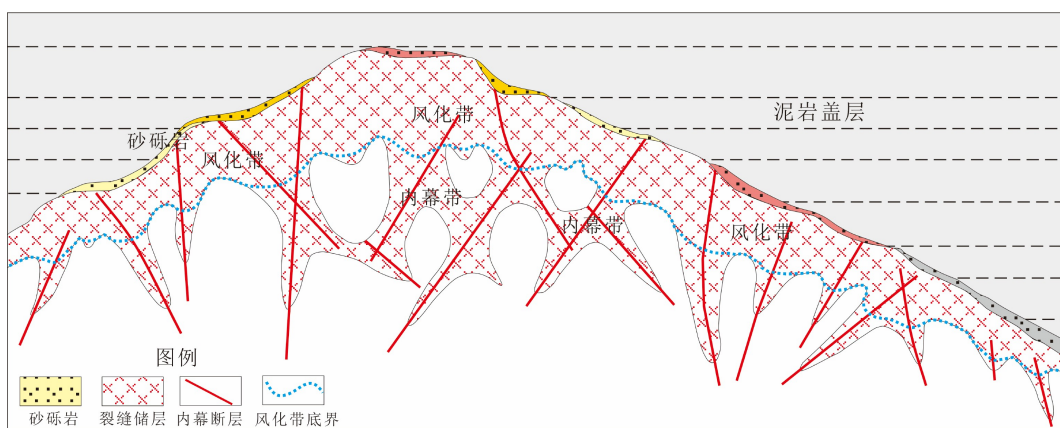


图 10 渤中 19-6 凝析气田太古宇潜山地质模式

Fig.10 The geological model of a buried hill in Bozhong19-6 field

6 结论

(1) 渤中 19-6 潜山纵向上分为风化带和内幕带,风化带厚度 42~415 m,空间上分布连续,从高部位到低部位厚度逐渐减薄,呈“似层状”分布。内幕带沿内幕高角度断层呈“带状”漏斗型分布,空间分布不连续,通过内幕高角度断层与风化带连通。

(2) 风化带储层厚度整体与宏观古地貌相关性较好,同时受岩石类型、局部断层、沟脊微地貌以及坡度等因素的调节控制,局部厚度增大或减小。风化带储层受构造运动和风化淋滤作用双重控制,储集空间包括构造缝、风化缝及溶蚀孔隙等,物性较好;

(3) 内幕带储层主要受控于岩石类型和构造运动两大因素,渤中 19-6 潜山岩性较为单一,矿物组

成差异小,构造改造程度是潜山内幕裂缝是否发育的关键因素。潜山内幕储集空间以构造裂缝为主,基质致密,物性相对较差。

参考文献 (References)

- [1] 徐长贵, 于海波, 王军, 等. 渤海海域渤中19-6大型凝析气田形成条件与成藏特征[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 25-38. [XU Changgui, YU Haibo, WANG Jun, et al. Formation conditions and accumulation characteristics of Bozhong 19-6 large condensate gas fields in offshore Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(1): 25-38.]
- [2] 谢玉洪, 张功成, 沈朴, 等. 渤海湾盆地渤中凹陷大气田形成条件与勘探方向[J]. 石油学报, 2018, 39(11): 1199-1210. [XIE Yuhong, ZHANG Gongcheng, SHEN Pu, et al. Formation conditions and exploration direction of large gas field in Bozhong sag of Bohai Bay Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(11): 1199-1210.]

- [3] 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]. 地质勘探, 2018, 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, 2018, 39(1): 33-44.]
- [4] 张鹏飞, 刘惠民, 王永诗, 等. 济阳坳陷太古界潜山储集体发育模式[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2017, 41(6): 20-29. [ZHANG Pengfei, LIU Huimin, WANG Yongshi, et al. Development model of Archeozoic buried hill reservoir in Jiyang Depression [J]. Journal of China University of Petroleum, 2017, 41(6): 20-29.]
- [5] 张鹏飞, 刘惠民, 曹忠祥, 等. 太古宇潜山风化壳储层发育主控因素分析: 以鲁西-济阳地区为例[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2015, 45(5): 1289-1298. [ZHANG Pengfei, LIU Huimin, CAO Zhongxiang, et al. Analysis on main controlling factors of Archeozoic weathering crust reservoir: With Jiyang and Luxi Area as an example [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2015, 45(5): 1289-1298.]
- [6] 邹华耀, 赵春明, 尹志军. 辽东湾JZS潜山变质岩风化壳识别及储集特征[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(4): 599-607. [ZOU Huayao, ZHAO Chunming, YIN Zhijun. Development and distribution of the metamorphite-weathering crust and its feature of reservoir-property for the JZS Buried Hill, Liaodongwan Area [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(4): 599-607.]
- [7] 伍劲, 高先志, 周伟, 等. 柴达木盆地东坪地区基岩风化壳与油气成藏[J]. 新疆石油地质, 2018, 39(6): 666-672. [WU Jin, GAO Xianzhi, ZHOU Wei, et al. Base rock weathering crusts and petroleum accumulation in Dongping Area, Qaidam Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018, 39(6): 666-672.]
- [8] 付淑清, 王钧, 熊海仙, 等. 南岭保护区石坑崆花岗岩风化壳理化学特征与环境分析[J]. 生态科学, 2018, 37(5): 174-179. [FU Shuqing, WANG Jun, XIONG Haixian, et al. Physical, chemical characteristics of Shikengkong granite weathered crust and potential environments analysis in Nanling area [J]. Ecological Science, 2018, 37(5): 174-179.]
- [9] 李治, 秦启荣, 李朋波, 等. 准噶尔腹部火山岩风化壳储层特征及其影响因素[J]. 地质找矿论丛, 2018, 33(4): 589-596. [LI Zhi, QIN Qirong, LI Pengbo, et al. Reservoir characteristics and influence factor of weathering volcanic crust: A case study of Carboniferous System of Shixi Oilfield in the center of Junggar Basin [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2018, 33(4): 589-596.]
- [10] 张顺, 王丽静, 张博远, 等. 松辽盆地安达古隆起风化壳特征及控藏机制[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(1): 9-16. [ZHANG Shun, WANG Lijing, ZHANG Boyuan, et al. Characteristics of the weathered crust and reservoir-controlling mechanism for Anda Palaeohigh in Songliao Basin [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(1): 9-16.]
- [11] 陈志海, 牟珍宝, 孙钰. 越南白虎油田缝洞型基岩油藏特征与开发对策[J]. 中外能源, 2009, 14(9): 45-49. [CHEN Zhihai, MU Zhenbao, SUN Yu. Characteristics and development strategy of fracture-cavern basement oil reservoir in White Tiger Field, Vietnam [J]. Sino-Global Energy, 2009, 14(9): 45-49.]
- [12] 张鹏飞, 曹忠祥, 刘惠民, 等. 太古界潜山内幕储层发育主控因素分析: 以鲁西-济阳地区为例[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(1): 96-104. [ZHANG Pengfei, CAO Zhongxiang, LIU Huimin, et al. Main controlling factors of Archeozoic inner buried hill reservoir: with Luxi and Jiyang area as an example [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(1): 96-104.]
- [13] 谢文彦, 孟卫工, 张占文, 等. 辽河坳陷潜山内幕多期裂缝油藏成藏模式[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(6): 649-652. [XIE Wenyan, MENG Weigong, ZHANG Zhanwen, et al. Formation model of multi-stage fracture reservoirs inside the buried hills in Liaohe Depression [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(6): 649-652.]
- [14] 马志宏. 辽河坳陷太古宇变质岩内幕油藏成藏特征[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(2): 25-29. [MA Zhihong. Formation features of interior reservoir in metamorphic rock of Archean Eonothem, Liaohe depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(2): 25-29.]
- [15] 任芳祥, 龚姚进, 谷团, 等. 潜山内幕油藏裂缝发育段井眼信息响应特征研究[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(9): 1781-1792. [REN Fangxiang, GONG Yaojin, GU Tuan, et al. Research on the response characteristics of wellbore multi-information in the fracture developed section of the buried hill inside reservoirs [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(9): 1781-1792.]
- [16] 高先志, 陈振岩, 邹志文, 等. 辽河西部凹陷兴隆台高潜山内幕油气藏形成条件和成藏特征[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(6): 6-9. [GAO Zhixiang, CHEN Zhenyan, ZOU Zhiwen, et al. Forming conditions and accumulation features of oil pools within the inner of highly buried-hills of Xinglongtai in west sag of Liaohe Depression [J]. Journal of China University of Petroleum, 2007, 31(6): 6-9.]
- [17] 宋柏荣, 胡英杰, 边少之, 等. 辽河坳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.]
- [18] Cuong T X, Warren J K. Bach ho field, a fractured granitic basement reservoir, cuu long basin, offshore SE Vietnam: a "buried-hill" play [J]. Journal of Petroleum Geology, 2009, 32(2): 129-156.
- [19] 李家强. 层拉平方法在沉积前古地貌恢复中的应用[J]. 油气地球物理, 2008, 6(2): 46-49. [LI Jiaqiang. Application of bedding flattening in the process of rebuilding paleogeomorpholog before basin deposition: A case study in Dongying sag, Jiyang Depression [J]. Petroleum Geophysics, 2008, 6(2): 46-49.]
- [20] 聂妍. 潜山微小断层的表征方法[J]. 中国科技论文, 2019, 14(1): 28-32, 50. [NIE Yan. Research on small faults description of buried hill [J]. China Sciencepaper, 2019, 14(1): 28-32, 50.]