

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

徐长贵,杜晓峰,刘晓健,徐伟,郝轶伟

[中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300459]

摘要:深埋变质岩潜山风化壳相对致密,裂缝发育程度是储层优质的决定因素。利用岩心、铸体薄片、荧光薄片、扫描电镜、常规物性等实验分析方法,对渤海海域渤中19-6构造太古界深埋变质岩潜山优质储集层形成机制进行分析。研究表明,渤中19-6构造太古界以片麻岩、变质花岗岩和混合岩为主,岩石中长英质矿物含量高、地层脆性强,极易形成裂缝,为优质储集层的发育创造了较好的岩性条件;持续动力破碎作用使潜山内幕发育大规模裂缝发育带和动力破碎带,是变质岩优质储集层形成的关键;风化作用影响下潜山顶部形成大量次生溶蚀孔和沿裂缝溶蚀扩大孔,但深埋作用使顶部风化壳相对致密。在上述控制因素指导下,建立了“垂向贯通,横向连续”大型深埋变质岩优质储集层分布模式。

关键词:变质岩;优质储集层;潜山;太古界;渤中19-6构造;渤中凹陷;渤海海域

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Formation mechanism of high-quality deep buried-hill reservoir of Archaean metamorphic rocks and its significance in petroleum exploration in Bohai Sea area

Xu Changgui, Du Xiaofeng, Liu Xiaojian, Xu Wei, Hao Yiwei

(Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300459, China)

Abstract: The weathering crust of deep metamorphic rocks is relatively dense, and the development of fractures is key to reservoir quality. The formation mechanism of high-quality buried-hill reservoir of deep Archaean metamorphic rocks in the BZ 19-6 structure was analyzed through core description, casting thin section observation, microscopic fluorescent analysis of thin section, scanning electron microscopy and conventional physical property measurements. The results show that the Archaean rocks in the BZ 19-6 structure are dominated by gneiss, metamorphic granite and migmatite, in which the high content of felsic minerals with great brittleness is prone to fracture development. Thus, they tend to develop high-quality reservoirs. The fragmentation under continuous deformation and stress makes large-scale fracture zones and stress fragmenting zones developed inside the buried hill, which is the key to the formation of high-quality reservoirs in metamorphic rocks. The weathering resulted in a large number of secondary dissolution pores and dissolution enlarged pores along fractures on top of the buried hill. However, the weathering crust became relatively dense under deep burial. Under the guidance of controlling factors mentioned above, a reservoir distribution pattern of “vertical connectivity, and lateral continuity” is revealed for large-scale deep metamorphic reservoirs of high quality.

Key words: metamorphic rock, high-quality reservoir, buried hill, Archaean, BZ 19-6 structure, Bozhong Depression, Bohai Sea area

长期以来,古潜山一直是油气勘探的重要领域,目前已经形成了大量的潜山油气藏勘探理论与认识^[1-6]。国内外勘探实践证实潜山油气藏岩性多样,包括火山岩、碳酸盐岩、碎屑岩和变质岩,其中变质岩

油气藏勘探潜力最大。据统计,世界上已发现的几百个工业性基岩油气田中变质岩基岩油气田占总数的40%,油气储量占基岩潜山总储量的75%。从目前已发现的变质岩潜山油田藏来看,层位均为前寒武系,储

收稿日期:2018-09-11;修订日期:2019-12-16。

第一作者简介:徐长贵(1971—),男,博士、教授级高级工程师,石油地质与综合勘探。E-mail: xuchg@cnooc.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05024-003-001)。

集层岩性主要为变质花岗岩、片麻岩和混合岩,其中规模较大的油气藏包括乌克兰第聂伯-顿涅茨盆地前寒武系变质岩油田^[7]、利比亚锡尔特盆地阿乌特日拉和拿法拉油田^[8]、委内瑞拉马拉开波盆地拉帕兹油田^[8]、俄罗斯西西伯利亚盆地 Maloichskoe 油田^[8]、乍得 Bongor 盆地变质岩潜山油气藏^[9-10]、中国辽河拗陷曙光变质岩潜山油田^[11-13]和中国渤海海域辽西凸起锦州 25-1 南变质岩油气田^[14-18]。中国东部前寒武系变质岩潜山埋深普遍较浅,大部分埋深在 1 000 ~ 3 500 m,风化淋滤作用对储集层控制作用明显,如渤海油田锦州 25-1 变质岩潜山、辽河油田兴隆台潜山,潜山顶部风化壳均发育厚层风化砂化带和砂砾岩带,是油气成藏的优质储集部位。

太古界变质岩类潜山由于岩性多样、长期遭受风化作用,并经历了多期次构造应力叠加改造,储集空间结构复杂、储集层非均质性强等特点,对古潜山储集层的有效性评价一直以来都是有待攻克的难题。前人对变质岩储集层的研究主要集中在潜山裂缝型储集空间表征、裂缝成因以及对储集层的控制作用^[10-12,17-20]。变质岩潜山不仅在潜山顶面可形成风化壳型储集层,在潜山深层内幕同样可以形成构造裂缝型储集层^[9],不同学者通过对变质岩潜山裂缝发育期次及内部充填物特征进行刻画^[19],提出潜山内幕裂缝的形成主要与区域不同期次的构造作用关系密切。

渤海油田对潜山的勘探始于上世纪 70 年代,在“源控论”指导下,以凸起潜山为对象进行勘探,但勘探效果不理想,基本没有大的油气勘探突破^[21]。2000 年以后渤海油田以寻找规模性优质油气田为指导思想,将勘探领域从凸起稳定区转向活动断裂带,创新提出“活动断裂带油气差异富集理论”,以此为基础发现了锦州 25-1 南大型变质岩潜山油田,打开了变质岩潜山勘探的局面。“十三五”期间渤海油田转变思路,勘探层系由浅层逐步向深层、超深层转移。2016 年渤海油田在渤中凹陷西南部渤中 19-6 构造潜山中取得重大勘探突破,在太古界变质岩储集层中获得高产油气流,储集层发育厚度最大可达上千米。与国内外其他地区变质岩潜山不同,渤中 19-6 构造变质岩储集层埋深 4 000 ~ 5 500 m,储集层成因和分布规律与传统变质岩潜山有所差异。本文通过运用岩心、薄片、扫描电镜、荧光薄片、常规物性等多种实验分析手段,落实了深埋变质岩潜山储集层成因机制,综合地震、测井等资料建立了研究区变质岩潜山优质储集层分布模式,同时也对国内其他地区变质岩潜山储集层的勘探评价具有较好指导意义。

1 研究区地质概况

渤中凹陷是渤海海域最大的一个凹陷,也是渤海湾盆地沉积和沉降中心,在过去 50 余年的勘探开发中,探明的储量大多以原油为主,缺少规模性大气田的发现。传统地质观点认为,渤海湾盆地是个富油型盆地,生油潜力巨大,而生气潜力欠佳,以往的勘探实践也证实了在油型盆地中寻找大型气田的难度极高。近几年,通过对凹陷中烃源岩生烃机理持续攻关,发现凹陷内部烃源岩不仅可以在早期大量生油,还可以在晚期由高等植物成因的干酪根大量生气。古近系东营组和沙河街组发育 800 ~ 1 200 m 厚的超压泥岩,可作为区域性优质盖层。因此,整个凹陷具有得天独厚的天然气成藏条件,渤中 19-6 构造太古界变质岩大型天然气田的发现也证实了这一点,渤中凹陷是未来渤海油田在富油盆地中寻找大型天然气田的理想战场。

渤中 19-6 构造位于渤中凹陷的西南部,处于渤中西南洼和渤中主洼之间的近南北向构造脊上,总体是一个被近南西-北东向断层与近东西向走滑断层所切割的断背斜构造区,该区经历了多幕裂陷及新构造运动的叠加复合构造演化,具有断陷与拗陷叠置的结构特征^[22]。渤中 19-6 构造周围被渤中凹陷、沙南凹陷和黄河口凹陷环绕,凹陷自下向上发育前古近系、古近系和新近系,其中前古近系潜山发育“三层结构”自下往上为太古界变质岩、古生界碳酸盐岩和中生界火山岩,古近系自下向上依次发育孔店组、沙河街组和东营组,新近系自下向上发育馆陶组和明化镇组(图 1)。凹陷基底为太古界变质岩,呈区域分布特征,埋藏深度在 4 000 ~ 5 500 m,为渤海湾盆地埋藏深度最大的变质岩潜山储集层。

研究区南北地貌具显著差异,南部受两条走滑断层影响,呈高陡断块地貌特征,其中 1/3/5 井区位于走滑断层东侧,太古界潜山上覆巨厚孔店组砂砾岩地层,2 井区位于两条走滑断层之间,上部地层缺失孔店组,直接被沙三段泥岩覆盖,4/7 井区位于构造北部,受走滑断层影响较小,地貌整体较平缓。

2 变质岩储集层特征

不同地区变质岩储集层纵向发育程度差异较大,辽河油田兴隆台潜山钻遇变质岩厚度大,但储层净毛比低^[23],渤海油田锦州 25-1 南钻遇潜山厚度小,但净毛比高,而渤中 19-6 构造钻遇潜山厚度大,净毛比

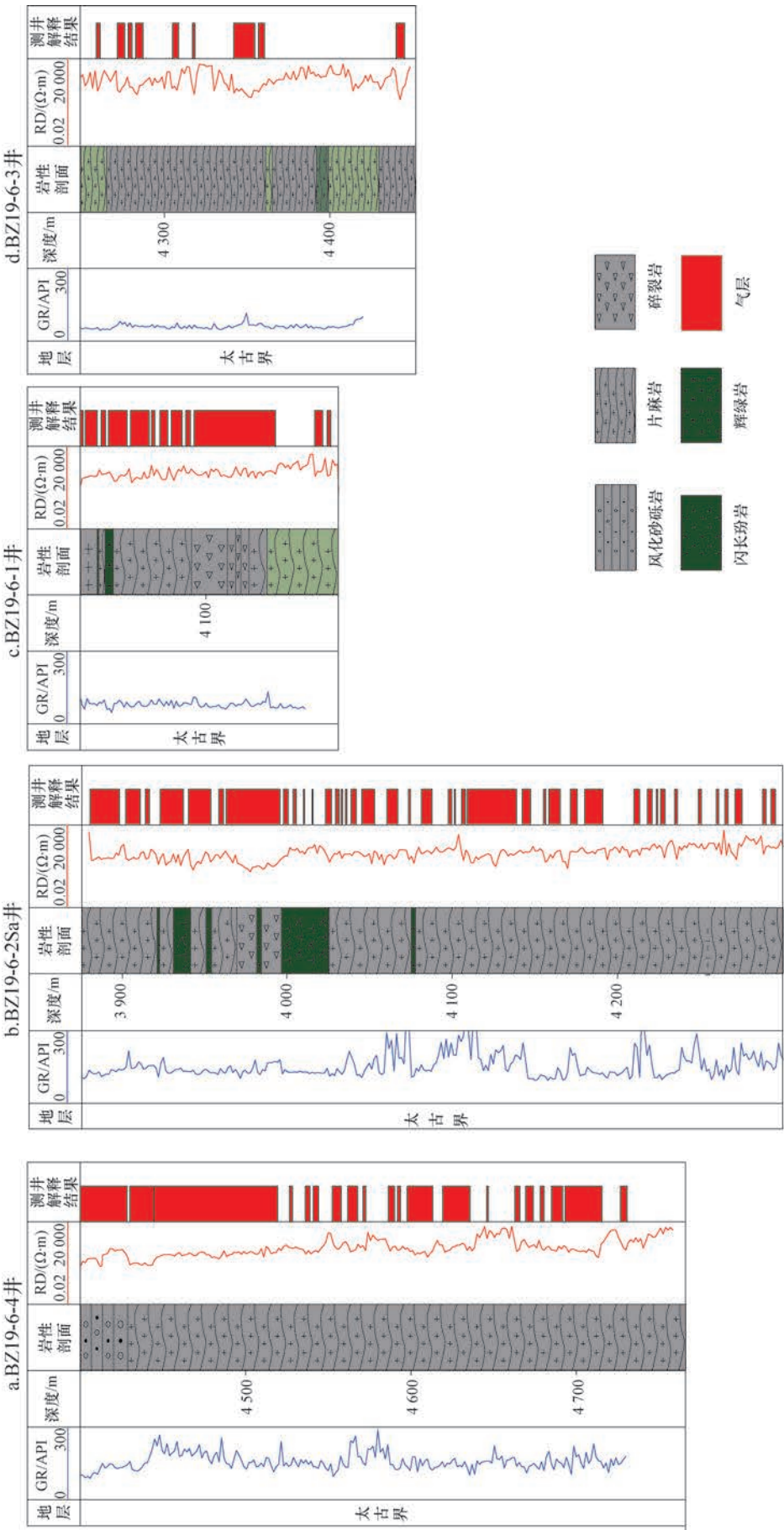


图2 渤中19-6构造太古界变质岩联井剖面
Fig. 2 The well correlation section of the Archean metamorphic rocks in the BZ 19-6 structure

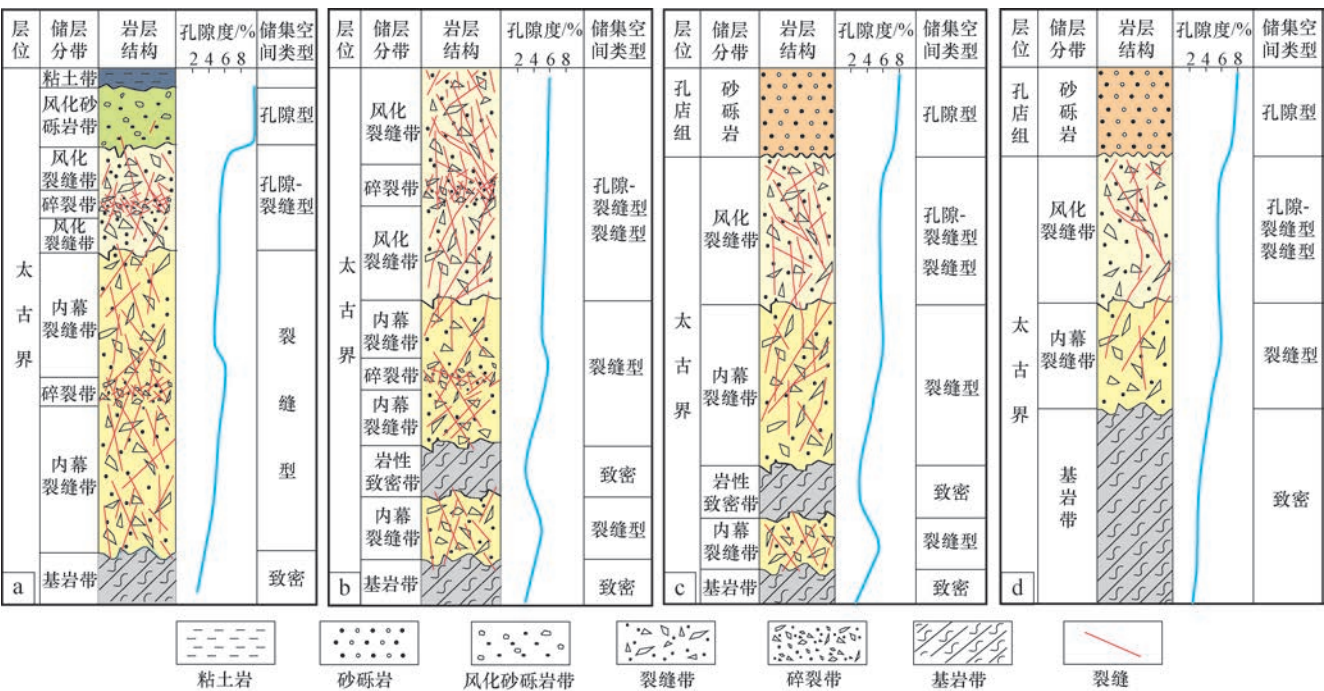


图 3 渤中 19-6 构造变质岩潜山储集层纵向分带类型

Fig. 3 Vertical zonation of metamorphic buried-hill reservoir in the BZ 19-6 structure

裂缝发育程度差, 风化裂缝带和内幕裂缝带厚度较薄 (图 3d), 主要分布在 3/5/6 井区。

2.1 岩石学特征

早期原岩类型丰富以及后期多期变质作用导致变质岩潜山岩性的多样性, 渤中 19-6 构造潜山主要发育 5 大类岩石类型。①片麻岩: 依据根据斜长石和比率和暗色矿物含量又可分为斜长片麻岩和二长片麻岩 (图 4a), 可见片麻状构造、粒状变晶结构 (图 4b) 和交代穿孔结构, 暗色矿物主要为云母类矿物, 黑云母与长英质矿物呈定向产出, 黑云母普遍发生绿泥石化 (图 4c)。②变质花岗岩: 主要发育变余半自形粒状结构, 呈块状或弱片麻状构造, 矿物中石英含量占石英和长石总含量的 20% ~ 60%, 根据斜长石和比率和暗色矿物含量又可分为变质英云闪长岩 (图 4d)、变质花岗闪长岩 (图 4e) 和变质二长花岗岩 (图 4f)。③混合岩: 岩石由原区域变质岩基体和新生英质脉体两部分组成, 根据脉体和基体的含量, 划分为混合片麻岩类和混合变质花岗岩类, 发育片麻状、条带状构造 (图 4g, h)。④碎裂岩和碎斑岩: 原岩为片麻岩, 岩石经历了强烈的破碎作用, 岩石破碎严重, 破碎后形成大小不一的碎块 (图 4i) 和碎斑, 残留的较大矿物碎斑常孤立地被碎粒物质包围 (图 4j)。基质主要为破碎的细小长英质, 可见黑云母发生褶皱变形。⑤后期侵入岩脉: 主要为后期岩浆侵入先期变质岩, 呈脉状分布, 岩石类型主要为

花岗斑岩 (图 4k)、闪长玢岩 (图 4l)、辉绿岩 (图 4m) 和辉绿玢岩 (图 4n), 这类岩体多以岩枝产状穿插于变质岩中。

变质岩中长英质含量较高的片麻岩类、变质花岗岩、混合岩、碎裂岩和碎斑岩是优质储层发育的“优势岩石”类型, 后期侵入岩脉遭受构造应力改造程度低, 岩石整体致密。

2.2 储集空间特征

渤中 19-6 构造太古界变质岩潜山储集层储集空间类型多样, 根据岩心和薄片观察, 储集空间按成因可分为风化淋滤孔 (缝)、构造裂缝和矿物颗粒晶内裂缝 2 大类。①风化淋滤孔 (缝): 构造抬升导致潜山暴露地表, 在长期的风化作用下在潜山顶部形成大量风化淋滤孔缝 (图 5a—c) 以及沿裂缝的溶蚀孔扩大孔, 储集空间类型为孔隙型和裂缝-孔隙型, 这类储集层物性好, 油气测试产能高。②裂缝: 分为两种类型, 一类为矿物颗粒晶内微裂缝, 晶内裂缝主要发育在矿物晶体颗粒内部, 形成时间较早, 潜山早期在构造运动作用下形成大量裂缝, 后期区域性走滑作用持续改造, 形成大量碎裂岩和碎斑岩, 在构造角砾内部继承大量先期形成微裂缝 (图 5d), 充填完全; 另一类为构造成因裂缝, 裂缝中充填碎基、方解石、铁白云石、铁质矿物 (图 5e), 同一条裂缝中可见多期次不同矿物充填。岩心和镜下观察显示裂缝多期性明显, 不同期次裂

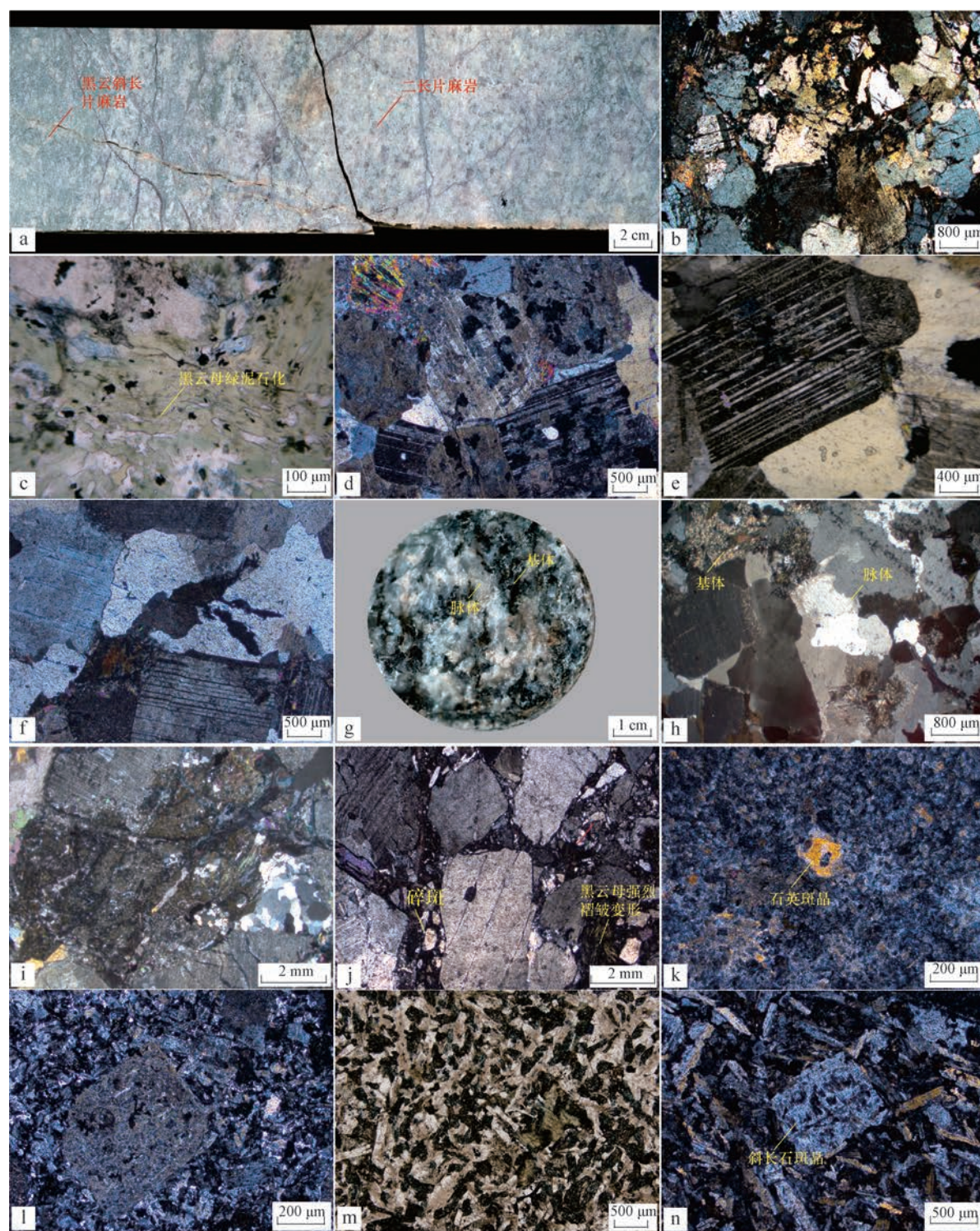


图4 渤中19-6构造太古界变质岩岩石学特征

Fig.4 Petrological characteristics of the Archaean metamorphic rocks in the BZ 19-6 structure

a. BZ19-6-2井,埋深3 877.7-3 878.05 m,黑云斜长片麻岩和二长变质花岗岩间互发育,岩心;b. BZ19-6-2Sa井,埋深3 925 m,二长片麻岩,粒状变晶结构,正交光;c. BZ19-6-2井,埋深3 878.45 m,黑云母发生叶绿泥石化,单偏光;d. BZ19-6-4井,埋深4 518 m,变质英云闪长岩,正交光;e. BZ19-6-4井,埋深4 502 m,变质花岗岩闪长岩,正交光;f. BZ19-6-4井,埋深4 574 m,变质二长花岗岩,正交光;g. BZ19-6-3井,埋深4 414 m,混合片麻岩,井壁取心;h. BZ19-6-3井,埋深4 414 m,混合片麻岩,可见新生脉体和原区域变质岩基体,正交光;i. BZ19-6-2Sa井,埋深4 265 m,片麻岩碎裂岩,正交光;j. BZ19-6-1井,埋深4 169.5 m,碎斑岩,正交光;k. BZ19-6-2Sa井,埋深4 025 m,花岗斑岩,正交光;l. BZ19-6-2Sa井,埋深4 020 m,闪长玢岩,正交光;m. BZ19-6-8井,埋深4 700 m,辉绿岩,正交光;n. BZ19-6-2Sa井,埋深4 076 m,辉绿玢岩,正交光

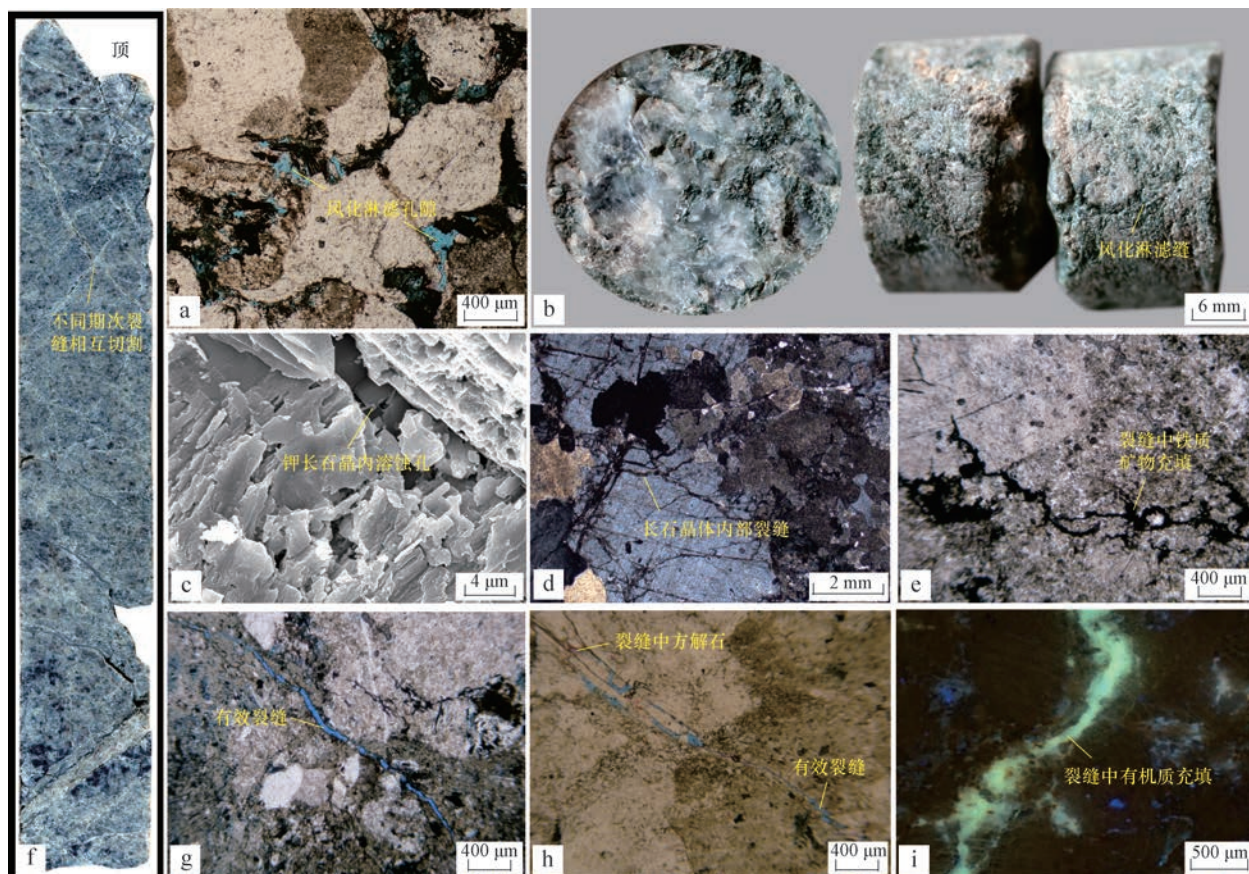


图5 渤中19-6构造太古界变质岩储集空间特征

Fig. 5 Reservoir space characteristics of the Archean metamorphic rocks in the BZ 19-6 structure

a. BZ19-6-4井,埋深4 427 m,风化砂砾岩,风化淋滤孔隙发育,单偏光;b. BZ19-6-1井,埋深4 025 m,潜山顶部风化淋滤缝发育,井壁取心;c. BZ19-6-1井,埋深4 030 m,潜山顶部钾长石晶体内部风化淋滤孔发育,扫描电镜;d. BZ19-6-1井,埋深4 052 m,长石颗粒晶体内部裂缝,正交光;e. BZ19-6-7井,埋深4 655 m,裂缝中铁质矿物充填,单偏光;f. BZ19-6-7井,埋深4 603.45~4 603.96 m,多期裂缝相互切割,岩心;g. BZ19-6-2Sa井,埋深3 885 m,晚期裂缝呈开启状态,单偏光;h. BZ19-6-4井,埋深4 473 m,裂缝中部分充填方解石,部分呈开启状态,单偏光;i. BZ19-6-1井,埋深4 081.5 m,裂缝中有机质充填,荧光

缝相互切割(图5f),晚期裂缝呈开启或半充填状态(图5g,h),可作为油气有效储集空间,荧光下裂缝中可见大量有机质充填(图5i)。

2.3 物性特征

利用渤中19-6构造旋转井壁取心和岩心资料,系统测定了228块太古界变质岩样品的孔隙度和渗透率,结果表明,变质岩潜山储集层具有非常强的非均质性,孔隙度分布范围为0.2%~17%,平均孔隙度为5.7%,渗透率分布范围为 $(0.003 \sim 156.5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均渗透率为 $4.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图6)。根据储集层物性频率分布特征,研究区储集层孔隙度和渗透率都较低,大于94%样品孔隙度小于10%,大于96%样品渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,与储集层整体埋藏深度有关。

潜山内部不同分带储集层物性差异较大,表现在①风化砂砾岩带:孔隙度分布范围为5.4%~21.9%,

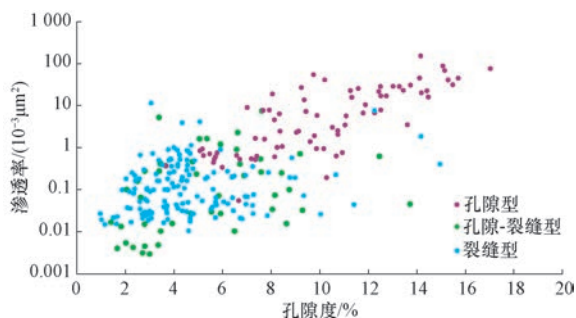


图6 渤中19-6构造太古界变质岩储集层孔隙度-渗透率关系

Fig. 6 The correlation between porosity and permeability of the Archean metamorphic reservoirs in the BZ 19-6 structure

渗透率分布范围为 $(0.9 \sim 614.8) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储集空间以孔隙型为主,储层物性最好;②风化裂缝带:孔隙度分布范围为1.2%~12.8%,渗透率分布范围为 $(0.01 \sim 5.39) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储集空间以孔隙-裂缝型

表1 渤中19-6构造变质岩潜山储集层分带特征
Table 1 Zonation characteristics of buried-hill reservoirs of metamorphic rocks in the BZ 19-6 structure

储集层分带	孔隙度/%	渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	储集空间类型
风化砂砾岩带	5.4~21.9	0.90~614.80	孔隙型, 裂缝-孔隙型
风化裂缝带	1.2~12.8	0.01~5.39	裂缝型
内幕裂缝带	2.4~6.2	0.10~11.80	裂缝型
基岩带	1.3~3.1	0.19~0.68	非储层

为主;③内幕裂缝带:孔隙度分布范围为2.4%~6.2%,渗透率分布范围为 $(0.1 \sim 11.8) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储集空间以裂缝为主,通常发育在断层附近;④基岩带:孔隙度分布范围为1.3%~3.1%,渗透率分布范围为 $(0.19 \sim 0.68) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为非储集层(表1)。

3 变质岩储集层特征

3.1 变质岩优质储层发育机制

通过对渤中19-6构造太古界变质岩潜山储集层发育特征分析,研究区变质岩优质储集层发育机制与分布主要受控于变质岩岩石类型、风化淋滤作用和构造应力作用3个因素。

3.1.1 岩性是控制储层发育的基础

前人对变质岩岩性对储集层的控制作用做过一些相关研究,认为岩石中暗色矿物含量与储集层发育程度关系密切^[24]。渤中19-6构造已钻井揭示了变质岩潜山岩性多样,不同岩性交互分布,但是太古界整体发育的是长英质含量较高、暗色矿物含量较低的变质花岗岩、片麻岩及混合岩等脆性岩类,不同井区岩石中长英质等脆性矿物含量变化不大,为优质储层的发育奠定了良好的岩石学基础。纵向上局部层段发育黑云二长片麻岩、黑云斜长片麻岩等暗色矿物含量较高的岩石以及厚层侵入岩,在一定程度上控制了潜山局部的裂缝发育程度。

以BZ19-6-1井为例,潜山上部4 024~4 136 m深度,岩性以二长片麻岩为主,岩石中长英质等脆性矿物含量高,储集层孔隙度分布范围为1.2%~12.8%,平均孔隙度为4.7%,绿泥石含量分布范围为4%~10%,平均含量为6.6%,电阻率平均值 $243 \Omega \cdot \text{m}$,综合解释气层99.8 m,大部分均可作天然气储集层;潜山下部4 136~4 180 m深度,岩性以黑云二长片麻岩为主,薄片显微镜下可见大量黑云母定向排列,并普遍发生绿泥石化,X衍射显示此段储集层中绿泥石含量

为61.8%,储集层孔隙度分布范围为1.2%~5.2%,平均孔隙度为2.6%,电阻率平均值 $1 110 \Omega \cdot \text{m}$,综合解释气层6.8 m(图7)。通过上下储集层段数据对比表明,潜山上部储集层中长英质含量高,下部暗色矿物含量高,在相同构造应力作用下,上部地层脆性强较下部地层更易形成裂缝,因此,潜山上部储集层更发育。

3.1.2 构造作用是裂缝形成的关键

构造作用是变质岩形成优质储集层最重要的控制因素,由于构造应力作用,基底的区域变质岩、混合岩等岩石受到强烈的改造作用,岩石和矿物发生不同程度的破碎,产生破碎带以及动力变质带,形成大量裂缝型储集空间。通过对渤中19-6构造岩心、井壁取心和微观薄片观察,确定了潜山中发育3期构造裂缝:I期裂缝形成与早期构造运动时期,主要发育与矿物晶体内部,裂缝中充填泥质、微晶白云石,充填作用为主,基本未能形成有效储集空间;II期裂缝与区域性大规模构造运动有关,岩石破碎作用强烈,形成大量碎裂岩和碎斑岩,是变质岩储集层主要造缝时期,也是优质储集层形成的关键时期,裂缝中充填碎基、铁质矿物和铁白云石为主;III期裂缝为晚期构造作用形成,裂缝呈中以方解石充填为主,裂缝大部分成开启或半充填状态,可作为天然气有效储集体(表2)。

区域构造分析及构造演化恢复表明,渤中19-6构造在印支期-燕山期主要受南北向挤压应力,形成一系列东西向展布的背冲断层,控制了太古界潜山早期隆起的构造形态(图8),同时,依附于这些逆冲断层,潜山内幕I期储层裂缝、碎裂带II期储层裂缝大量发育,为潜山优质储层的形成奠定了良好的基础。孔店组时期,研究区处于初始裂陷阶段,受控于南北向拉张应力,构造整体北高南低,沙三段末期,渤中19-6构造发生反转,南块整体抬升,北块整体沉降。东三段时期,受控于NNE向的右旋走滑压扭作用,渤中19-6构造北块在整体沉降的构造背景下,局部表现为构造隆升的特征(图8),以4/7井区为例,相对构造隆升率为 $210 \text{m}/\text{Ma}$ (最大地层厚度差/时间),这一时期的局部构造隆升,不仅在潜山高部位的应力集中区形成III期裂缝,同时也对早期碎裂带裂缝的再活化具有至关重要的作用,这也是7井区深埋潜山内幕发育有效裂缝型储层的关键因素(表2)。

3.1.3 风化淋滤作用是储集层纵向分带的重要因素

风化淋滤过程中矿物差异溶蚀作用对变质岩储集

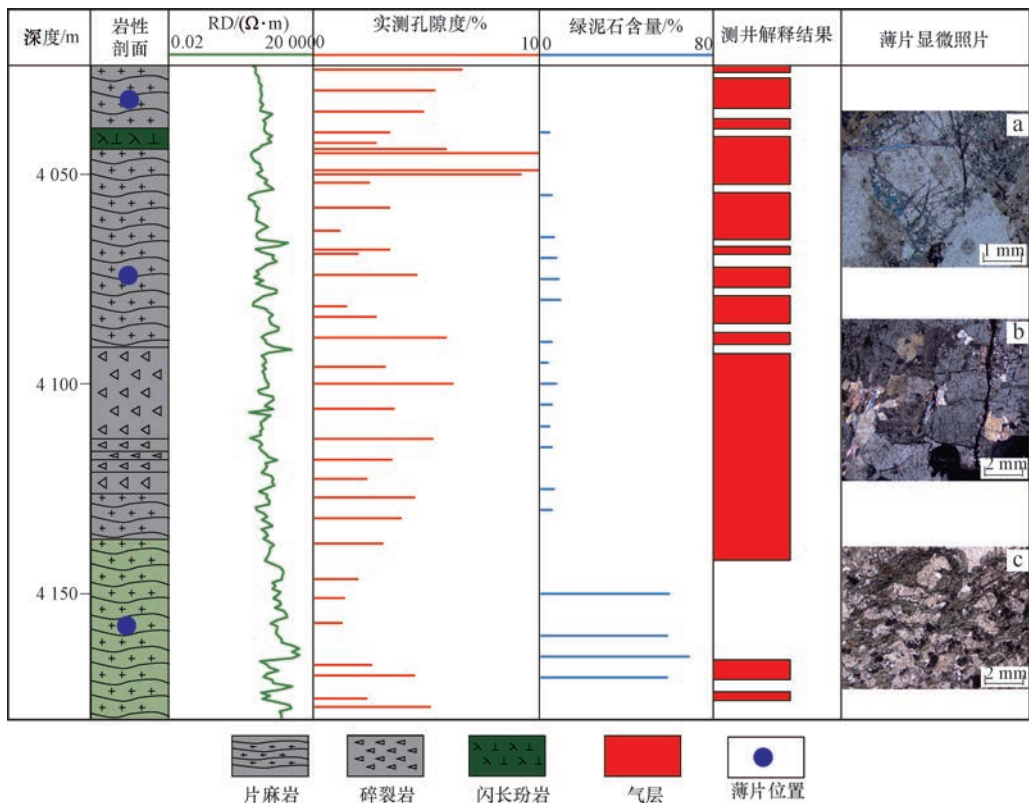


图 7 BZ19-6-1 井太古界变质岩潜山岩性与储集层对应关系

Fig. 7 The correlation between lithology and reservoir of Archean metamorphic rocks in Well BZ19-6-1

表 2 渤中 19-6 构造太古界变质岩裂缝发育期次及成岩演化

Table 2 Fracture development stages and diagenetic evolution of the Archean metamorphic rocks in the BZ 19-6 structure

裂缝期次	构造期次	充填特征	成因及有效性	岩心照片	微观特征
Ⅲ期	喜马拉雅运动	充填方解石为主	后期构造作用, 充填方解石为特征, 后期溶蚀形成有效裂缝		
Ⅱ期	燕山运动	充填碎基、铁质矿物和铁白云石为主	碎裂作用, 变质岩储层主要造缝作用, 优质储层形成期, 岩石类型为碎裂岩和碎斑岩		
Ⅰ期	印支运动	晶体内微裂缝, 充填断层泥、白云石为主	早期构造运动充填作用为主, 基本未能形成有效储集空间		

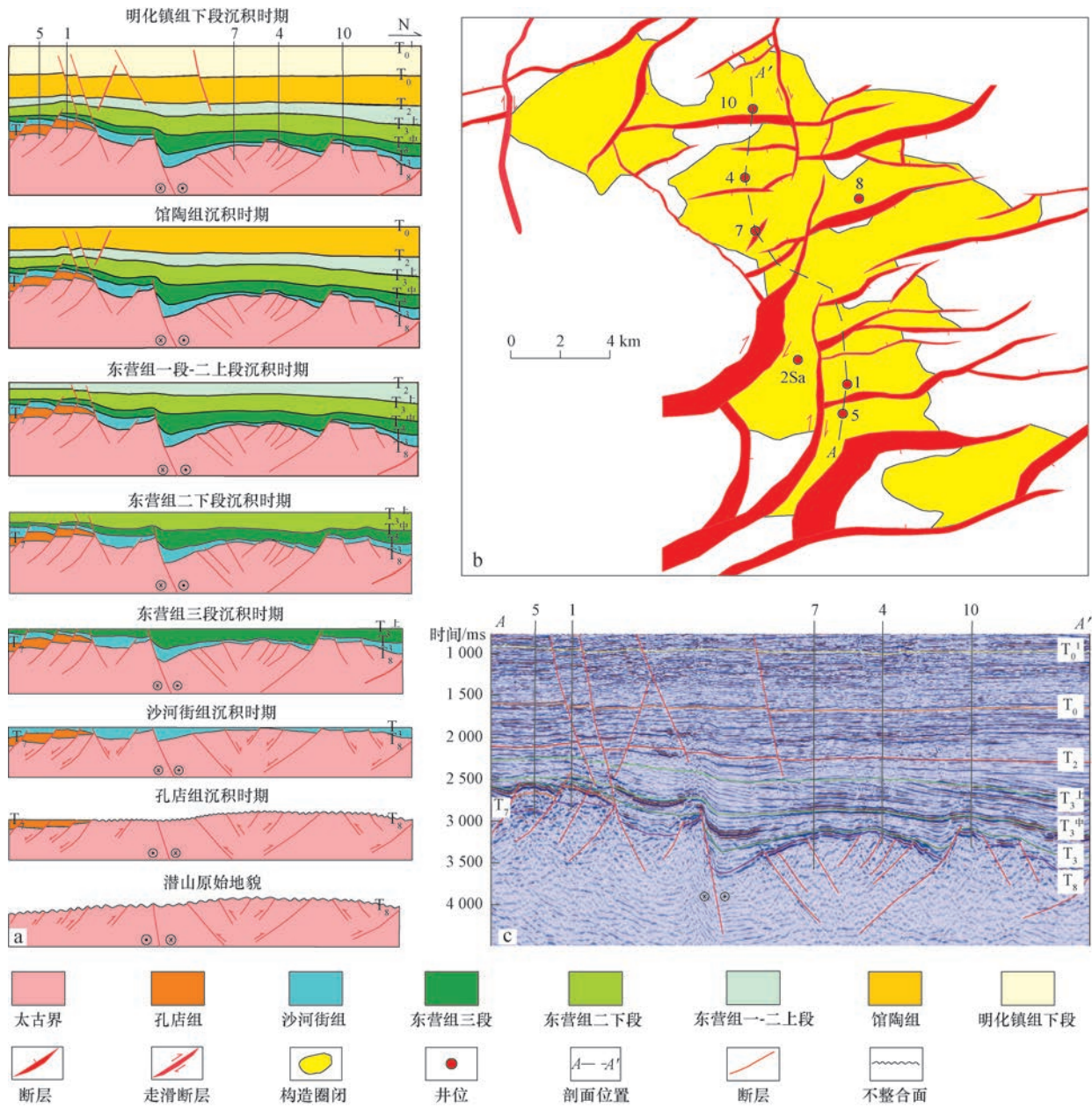


图8 渤中19-6构造演化及断裂发育特征

Fig. 8 Structural evolution and fracture development characteristics of the BZ 19-6 structure

a. 新生界构造演化特征; b. 断裂展布及圈闭发育特征; c. 地震剖面断裂发育特征

层品质影响较大,长石类矿物的溶蚀是长英质变质岩类优质储集层形成的主要机理。为此,对花岗岩进行大气水-矿物溶蚀实验,实验过程中把实验温度设置为60℃,通过提高反应温度来补偿反应时间。实验结果表明实验前钠长石表面无附着物,未见溶蚀现象(图9a),反应后钠长石在60℃条件下形成溶蚀坑,沿解理发生微弱溶蚀(图9b);实验前钾长石表面无附着物,未见溶蚀现象(图9c),钾长石在60℃条件下出现溶蚀坑沿解理发生微弱溶蚀(图9d)。结果表明,长石矿物解理发育,在风化淋滤过程中易沿解理面发生蚀变,其蚀变部位在水介质作

用下,井水溶液渗流,将水解物质带走,形成各种溶蚀孔隙。因此,花岗岩和长英质变质岩等结晶岩中长石类矿物的溶蚀是形成优质储集层关键。

渤中19-6构造太古界变质岩在地质历史时期,长期暴露于地表,岩石遭受了风化、剥蚀,使抗风化能力差的长石类矿物发生蚀变,大大增加了岩石的破碎程度,物理风化作用后,化学淋滤溶蚀作用对储集层进行更进一步的改善,加大了裂缝的开度,是储集层物性变化,有利于尤其的储集层和运移。尤其在潜山顶部和平缓部位,极易形成厚层风化壳,形成优质储集层。

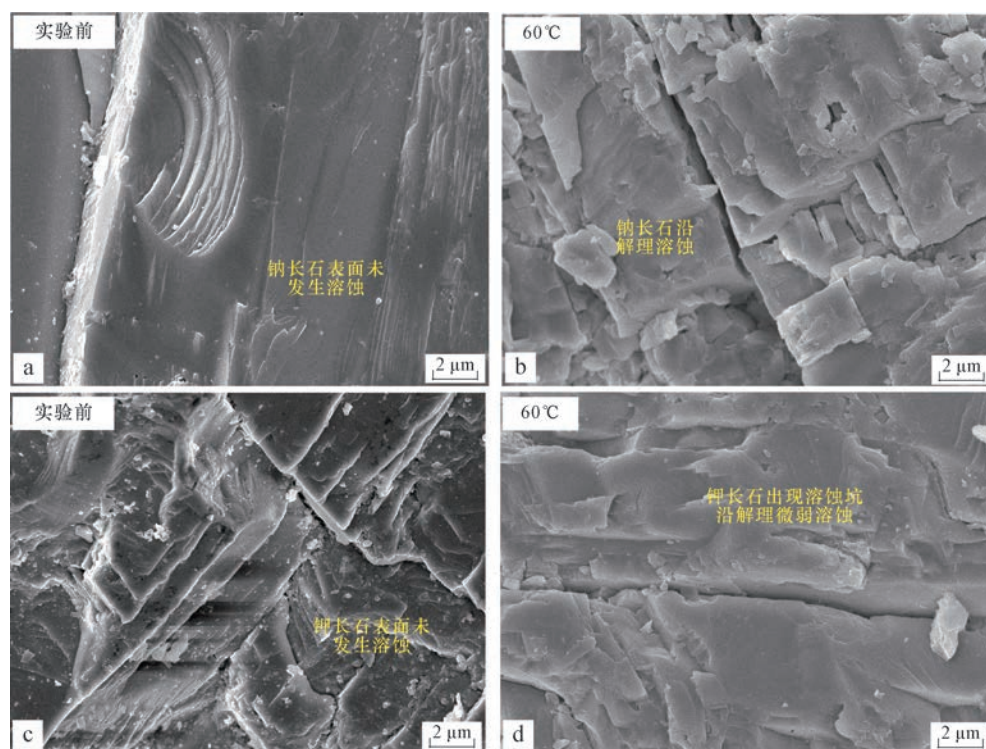


图9 花岗岩大气水溶蚀物理模拟实验

Fig. 9 The simulation of meteoric freshwater dissolution for granites

a. PL9-1-13井,埋深1 502.63 m,实验前钠长石(PI)样品,表面没有附着物,没有发生溶蚀现象;b. PL9-1-13井,埋深1 502.63 m,钠长石(PI)60℃下形成溶蚀坑,沿解理发生微弱溶蚀;c. PL9-1-13井,埋深1 502.63 m,实验前钾长石(KS)样品,表面没有附着物,没有发生溶蚀现象;d. PL9-1-13井,埋深1 502.63 m,钾长石(KS)60℃下出现溶蚀坑沿解理发生微弱溶蚀

受风化淋滤作用影响太古界变质岩潜山储集层纵向分带特征明显^[25-26],综合应用岩心、井壁取心、物性、测井解释成果等资料,按照储集层的结构和成因,将研究区太古界变质岩储集层自上向下分为风化砂砾岩带,风化裂缝带、内幕裂缝带和基岩带。①风化砂砾岩:发育在变质岩潜山顶部,风化淋滤成因为主,成分为变质岩颗粒,储集空间为孔隙型,发育少量裂缝,物性最好,可作为油气优质储集层(图3b,c);②风化裂缝带,受构造应力和风化作用共同控制,发育在风化砂砾岩带下部,储集空间类型以孔隙-裂缝型和裂缝型为主,裂缝以及沿裂缝溶蚀扩大孔发育(图3d,e);③内幕裂缝带,发育在潜山内幕,构造成因为主,通常分布在断裂带附近,岩性以碎裂化变质岩、碎裂岩以及碎斑岩为主,镜下可见长石解理发生应力变形(图3f)以及裂缝中大量碎基充填(图3g)等现象,通常呈优质储集层和致密储集层间互发育特征;④基岩带,基本不受风化作用和构造作用影响,位于潜山储集层最下部,裂缝不发育,为非储集层。

受古地貌控制导致变质岩潜山上覆地层时代不同,储层遭受风化淋滤作用时间存在差异。孔店组沉积之前太古界潜山古地貌差异不大,孔店组沉积时期

南部构造位置比北部低,呈负地貌状态,南部地区潜山上覆厚层古近系孔店组巨厚砂砾岩,而北部地区构造位置较高,上覆无厚层砂砾岩覆盖,持续遭受风化淋滤作用。因此,北部地区潜山遭受风化淋滤作用时间比南部长,潜山顶部风化砂砾岩带较南部发育,顶部储层物性比南部地区要好。

3.2 变质岩优质储层发育模式

渤中19-6构造太古界深埋变质岩潜山储集层垂向发育规律明显,主要受控于上覆地层年代、距离断层远近和古地貌差异。潜山顶部具有残丘地貌,风化作用强烈,不整合面之上相对较低位置发育一套近源堆积砂砾岩层,共同构成由不整合面控制的“似层状”储集层发育模式。中部是由风化作用和构造裂缝共同控制的“空间网状”储层发育模式,裂缝发育程度较高,能够形成多套碎裂带,能够形成立体空间内网状裂缝体系。下部储集层是由断裂控制的“枝状”裂缝发育模式,裂缝的发育主要受断层控制,局部形成碎裂带。底部为致密基岩带,以致密层为主。横向上不同地貌形态导致储集层分布规律具有显著差异,构造高部位风化作用形成的风化砂砾岩被快速剥蚀搬运,不易保

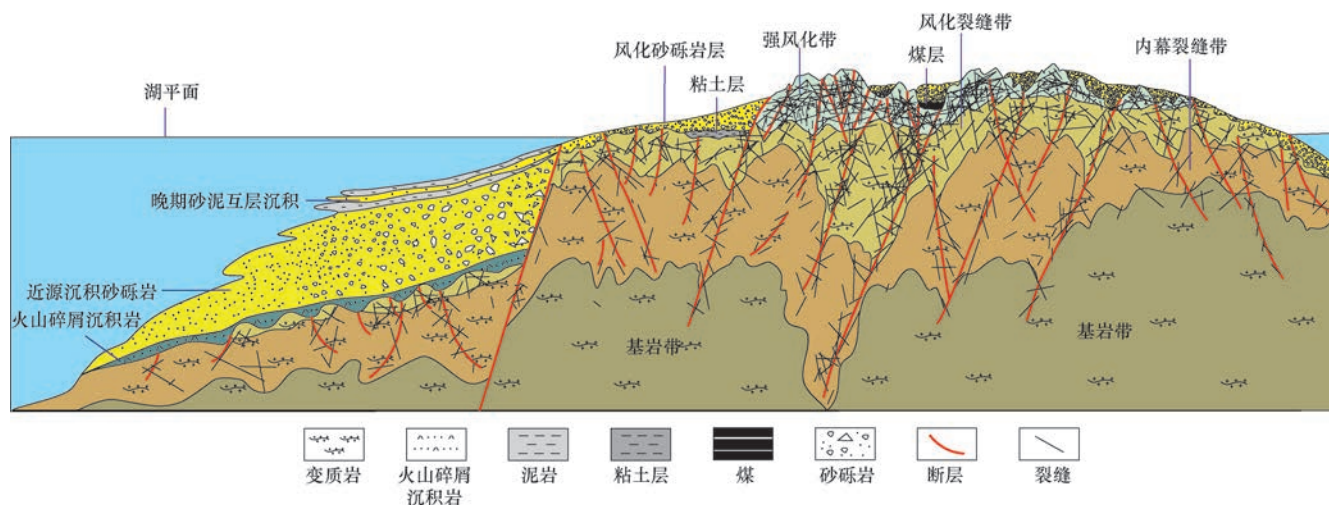


图 10 渤中 19-6 构造大型变质岩潜山优质储集层分布模式

Fig. 10 The distribution pattern of high-quality buried-hill reservoirs of large-scale metamorphic rocks in the BZ 19-6 structure

存,缺失顶部风化砂砾岩带,但是高陡部位高角度断裂发育,沿断裂的风化淋滤作用可延伸到潜山更深部位,由风化和构造作用相互叠加形成的优质储层发育带。平缓凹槽地区,潜山地貌较平缓,局部发育低洼凹槽,变质岩潜山风化淋滤作用产物相对易于保存,并形成风化粘土层的局部聚集,在局部小型地堑区也发现了薄层煤层。潜山顶部风化砂砾岩带发育,可作为天然气优质储集层。构造低部位潜山被孔店组巨厚砂砾岩长期覆盖,风化作用对储层改造时间短,潜山储集层整体发育程度稍差。综合岩性、构造作用和风化作用等多因素建立了渤中 19-6 构造“垂向贯通,横向连续”大型变质岩潜山优质储集层分布模式(图 10)。

4 油气勘探意义

渤海前古近系潜山勘探层系主要有中生界火山岩和碎屑岩、古生界碳酸盐岩和太古代变质岩,其中太古代变质岩潜山探明储量占潜山总储量的 60%,尤其是渤中凹陷西南部渤中 19-6 构造大型天然气田的发现更加证实太古代变质岩具有非常大的勘探潜力。与国内外其他变质岩油气藏不同,渤中 19-6 构造太古代变质岩储集层具有埋藏深度大、成岩强度高特点,优质储集层的发育与潜山内幕裂缝的发育程度密切相关,区域庐庐断裂活动以及潜山优质岩性耦合形成了规模性优质天然气储集层。渤中凹陷深埋太古代变质岩分布面积巨大,凹陷中央优质烃源岩为天然气形成提供了充足的资源基础,加之多期次构造运动,天然气成藏条件优越,大渤中凹陷深埋低位潜山天然气勘探潜力巨大。深埋变质岩潜山优质储集层形成机制的研究成功指导了渤中 19-6 构造后续评价井的部署,研

究成果可直接用于渤海其他地区变质岩潜山勘探及储集层预测。

5 结论

1) 渤中 19-6 构造太古代变质岩潜山岩性发育片麻岩、变质花岗岩、混合岩以及碎裂岩和碎斑岩,后期穿插大量花岗斑岩、闪长玢岩、辉绿岩和辉绿玢岩岩脉,潜山储集空间类型以孔隙-裂缝型和裂缝型为主。

2) 变质岩岩性是潜山成储能力的基础,岩石中长英质矿物含量决定了储集层造缝能力的差异;风化淋滤过程中长石类矿物的溶蚀是变质岩次生孔缝发育的关键;多期的区域构造运动是深埋型变质岩潜山内幕裂缝型储集层形成的主要控制因素。

3) 潜山储集层从上到下可分为风化砂砾岩带、风化裂缝带、内幕裂缝带和基岩带,组成上部“似层状”、中部“网状”、下部“枝状”,潜山内部“垂向贯通,横向连续”大型变质岩潜山优质储集体系。

参考文献

- [1] 陈景达. 渤海湾盆地的复式油气聚集带[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1988, 12(3): 41-50.
Chen Jingda, Multiple oil-gas accumulation zones in Bohai bay Basin [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1988, 12(3): 41-50.
- [2] 宋传春. 济阳凹陷低位古潜山成藏条件分析[J]. 特种油气藏, 2004, 11(3): 12-15.
Song Chuanchun. Reservoir forming conditions in low buried hill of Jiyang depression [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2004, 11(3): 12-15.
- [3] 赵凯, 蒋有录, 胡洪瑾, 等. 济阳凹陷潜山油气分布规律及富集样式[J]. 断块油气田, 2018, 25(2): 137-140.

- Zhao Kai, Jiang Youlu, Hu Hongjin, et al. Distribution regularities and enrichment styles of buried-hill reservoirs in Jiyang Depression [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2018, 25(2): 137–140.
- [4] 王进财, 赵伦, 张祥忠, 等. 古潜山岩溶储集层特征及其对产能的控制作用[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(6): 779–786.
- Wang Jincai, Zhao Lun, Zhang Xiangzhong, et al. Shan Fachao and Liu Minghui. Buried hill karst reservoirs and their controls on productivity. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(6): 779–786.
- [5] 王奇, 郝芳, 徐长贵, 等. 渤海海域沙西北地区潜山油源及成藏特征[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(4): 676–684.
- Wang Qi, Hao Fang, Xu Changgui, et al. Origin and accumulation characterization of petroleum in buried hill reservoirs in Shaxibei area, Bohai Sea[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(4): 676–684.
- [6] 咎念民, 王艳忠, 操应长, 等. 东营凹陷下古生界碳酸盐岩古潜山储层储集空间特征及发育模式[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(2): 355–365.
- Zan Nianmin, Wang Yanzhong, Cao Yingchang, et al. Characteristics and development patterns of reservoir space of the Lower Paleozoic buried hills in Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(2): 355–365.
- [7] 许志琴. 伸入地球内部的望远镜—大陆科学钻探[M]. 1995, 2: 11–14.
- Xu Zhiqin. A telescope in the earth—Continental Scientific Drilling. 1995, 2: 11–14.
- [8] 马龙, 刘全新, 张景廉, 等. 论基岩油气藏的勘探前景[J]. *天然气工业*, 2006, 26(1): 8–11.
- Ma Long, Liu Quanxin, Zhang Jian, et al. A discussion of exploration potentials of basement hydrocarbon reservoir[J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(1): 8–11.
- [9] 李威, 窦立荣, 文志刚, 等. 乍得 Bongor 盆地潜山油气成因和成藏过程[J]. *石油学报*, 2017, 38(11): 1253–1262.
- Li Wei, Dou Lirong, Wen Zhigang, et al. Buried-hill hydrocarbon genesis and accumulation process in Bongor Basin, Chad[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(11): 1253–1262.
- [10] 窦立荣, 魏小东, 王景春, 等. 乍得 Bongor 盆地花岗岩基岩潜山储层特征[J]. *石油学报*, 2015, 36(8): 897–904.
- Dou Lirong, Wei Xiaodong, Wang Chun, et al. Characteristics of granitic basement rock buried-hill reservoir in Bongor Basin, Chad[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(8): 897–904.
- [11] 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 Xianzhi, 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(Edition of Natural Science)*, 2007, 31(6): 6–9.
- [12] 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.
- [13] 谢文彦, 孟卫工, 张古文, 等. 辽河拗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] 邓运华. 2015. 渤海大中型潜山油气田形成机理与勘探实践[J]. *石油学报*, 2015, 36(3): 253–261.
- Deng Yunhua. Formation mechanism and exploration practice of large-medium buried-hill oil fields in Bohai Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(3): 253–261.
- [15] 邓运华, 彭文绪. 渤海锦州 25–1S 混合花岗岩潜山大油气田的发现[J]. *中国海上油气*, 2009, 21(3): 145–156.
- Deng Yunhua and Peng Wenxu. Discovering large buried-hill oil and gas fields of migmatitic granite on Jinzhou 25–1S in Bohai sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2009, 21(3): 145–156.
- [16] 徐长贵, 周心怀, 邓津辉, 等. 辽西凹陷锦州 25–1 大型轻质油田发现的地质意义[J]. *中国海上油气*, 2010, 22(1): 7–16.
- Xu Changgui, Zhou Xinhui, Deng Jinhui, et al. Geological significance in discovering large Jinzhou 25–1 light oilfield in Liaohe sag[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2010, 22(1): 7–16.
- [17] 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.
- [18] 朱毅秀, 王欢, 单俊峰, 等. 辽河拗陷茨榆坨潜山太古界基岩储层岩性和储集空间特征[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(6): 1225–1236.
- Zhu Yixiu, Wang Huan, Shan Junfeng, et al. Reservoir lithology and space characteristics of the Archeozoic basement rock in Ciyutuo buried hill, Liaohe Depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(6): 1225–1236.
- [19] 童凯军, 赵春明, 吕坐彬, 等. 渤海变质岩潜山油藏储集层综合评价与裂缝表征[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(1): 56–63.
- Tong Kaijun, Zhao Chunming, Lyu Zuobin, et al. Reservoir evaluation and fracture characterization of the metamorphic buried hill reservoir in Bohai Bay[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(1): 56–63.
- [20] 贾海松. BZ 气田变质岩潜山储层特征研究[J]. *石油地质与工程*, 2019, 33(5): 1–4.
- Jia Haisong. Reservoir characteristics of metamorphic buried hill in BZ gas field[J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2019, 33(5): 1–4.
- [21] 薛永安. 精细勘探背景下渤海油田勘探新思路与新进展[J]. *中国海上油气*, 2017, 29(2): 1–8.
- Xue Yongan. New ideas and progresses under refine exploration background of Bohai oilfield[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2017, 29(2): 1–8.

- [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2018, 48 (1): 1-14.
- [15] 刘忠宝,高波,胡宗全,等.高演化富有机质页岩储层特征及孔隙形成演化——以黔南地区下寒武统九门冲组为例[J].石油学报,2017,38(12):1381-1389.
- Liu Zhongbao, Gao Bo, Hu Zongquan, et al. Reservoir characteristics and pores formation and evolution of highmaturated organic rich shale: A case study of the Lower Cambrian Jiunchong Formation, southern of Guizhou area [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38 (12): 1381-1389.
- [16] 金之钧,胡宗全,高波,等.川东南地区五峰组-龙马溪组页岩气富集与高产控制因素[J].地学前缘,2016,23(1):1-10.
- Jin Zhijun, Hu Zongquan, Gao Bo, et al. Controlling factors on the enrichment and high productive of shale gas in the Wufeng-Longmaxi Formation, southeastern Sichuan Basin [J]. Earth Science Frontier, 2016, 23(1): 1-10.
- [17] Milliken K L, Rudnicki M, David N, et al. Organic matter-hosted pore system, Marcellus Formation (Devonian), Pennsylvania [J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(2): 177-200.
- [18] 王濡岳,龚大建,冷济高,等.黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩储层发育特征:以岑巩区块为例[J].地学前缘,2017,24(6):286-299.
- Wang Ruyue, Gong Dajian, Leng Jigao, et al. Developmental characteristics of the Lower Cambrian Niutitang shale reservoir innorthern Guizhou area: A case study in the Cengong block [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(6): 286-299.
- [19] 王飞宇,关晶,冯伟平,等.过成熟海相页岩孔隙度演化特征和游离气量[J].石油勘探与开发,2013,40(6):764-768.
- Wang Feiyu, Guan Jing, Feng Weiping, et al. Evolution of overmature marine shale porosity and implication to the free gas volume [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(6): 764-768.
- [20] 赵文智,李建忠,杨涛,等.中国南方海相页岩气成藏差异性比较与意义[J].石油勘探与开发,2016,43(4):499-510.
- Zhao Wenzhi, Li Jianzhong, Yang Tao, et al. Geological difference and its significance of marine shale gases in South China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 499-510.
- [21] 张鹏,黄宇琪,杨军伟,等.黔西北龙潭组页岩吸附能力主控因素分析[J].断块油气田,2019,26(2):162-167.
- Zhang Peng, Huang Yuqi, Yang Junwei, et al. Main controlling factors of shale adsorption capacity of Longtan Formation in Northwest Guizhou [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2019, 26 (2): 162-167.
- [22] 蔡潇,靳雅夕,叶建国,等.一种页岩有机孔与无机孔定量表征的方法[J].油气藏评价与开发,2020,10(1):30-36,63.
- Cai Xiao, Jin Yaxi, Ye Jianguo, et al. A quantitative characterization method for organic and inorganic pores in shale [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(1): 30-36, 63.
- [23] 聂海宽,包书景,高波,等.四川盆地及其周缘下古生界页岩气保存条件研究[J].地学前缘,2012,19(3):280-294.
- Nie Haikuan, Bao Shujing, Gao Bo, et al. A Study of shale gas preservation condition for the Lower Paleozoic in Sichuan Basin and its periphery [J]. Earth Science Frontiers. 2012, 19(3): 280-294.
- [24] 王濡岳,丁文龙,龚大建,等.黔北地区海相页岩气保存条件——以贵州岑巩区块下寒武统牛蹄塘组为例[J].石油与天然气地质,2016,37(1):45-55.
- Wang Ruyue, Ding Wenlong, Gong Dajian, et al. Gas preservation conditions of marine shale in northern Guizhou area: A case study of the Lower Cambrian Niutitang Formation in the Cen'gong block, Guizhou Province [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 45-55.
- [25] 罗胜元,刘安,李海,等.中扬子宜昌地区寒武系水井沱组页岩含气性及影响因素[J].石油实验地质,2019,41(1):56-67.
- Luo Shengyuan, Liu An, Li Hai, et al. Gas-bearing characteristics and controls of the Cambrian Shuijingtuo Formation in Yichang area, Middle Yangtze region [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(1): 56-67.
- [26] 赵文韬,荆铁亚,姚光华,等.复杂构造区页岩气保存条件研究[J].特种油气藏,2018,25(06):83-89.
- Zhao Wentao, Jing Tieya, Yao Guanghua, et al. Shale gas preservation condition in complex tectonic zone [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(6): 83-89.

(编辑 李 军)

(上接第247页)

- [22] 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(03):1-9.
- Xue Yongan 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(03): 1-9.
- [23] 岳隍.辽河太古界潜山储层测井评价研究[M].北京:中国石油大学,2011.
- Yue wei. Log Evaluation for Liaohae Archean Buried Hill Reservoir [M]. Beijing: China University of Petroleum, 2011.
- [24] 杨明慧.渤海湾盆地潜山多样性及其成藏要素比较分析[J].石油与天然气地质,2008,29(5):623-631,638.
- Yang Minghui. Diversity of buried-hills and comparison of their hydrocarbon-pooling factors in the Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(5): 623-631, 638.
- [25] 黄镇国,张伟强,陈俊鸿,等.中国南方红色风化壳[M].北京:海洋出版社,1996.
- Huang Zhengguo, Zhang Weiqiang, Chen Junhong, et al. Red residuum in Southern China [M]. Beijing: China Ocean Press, 1996.
- [26] 杨洁.华南沿海花岗岩风化壳岩土工程特征变化研究[D].西安:西安科技大学,2004.
- Yang Jie. Variation of geotechnical properties of weathered granite in Southeast China [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2004.

(编辑 张玉银)