

王泽霖, 陈安清, 李慧勇, 等. 渤海湾盆地碳酸盐岩潜山裂缝-岩溶联合控储机制[J]. 海洋学报, 2024, 46(12): 66-78, doi:10.12284/hyxb2024031

Wang Zeji, Chen Anqing, Li Huiyong, et al. The control mechanism of multi-stage fracture-related karst reservoirs of carbonate buried hills in Bohai Bay Basin[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(12): 66-78, doi:10.12284/hyxb2024031

# 渤海湾盆地碳酸盐岩潜山裂缝-岩溶联合控储机制

王泽霖<sup>1,2</sup>, 陈安清<sup>1,2\*</sup>, 李慧勇<sup>3</sup>, 王清斌<sup>3</sup>, 周雪威<sup>1,2</sup>, 叶涛<sup>2,3</sup>,  
罗健<sup>1,2</sup>, 肖述光<sup>3</sup>, 侯明才<sup>1,2</sup>

(1. 成都理工大学 自然资源部深时地理环境重建与应用重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 成都理工大学 沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 3. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459)

**摘要:** 新生古储的潜山油气已成为我国海域盆地的重要勘探领域。渤海湾盆地的沙西北地区是一个典型碳酸盐岩潜山带, 由于对其发育的多期裂缝的控储作用及与之相关的岩溶性质缺乏研究, 制约了碳酸盐岩潜山的油气勘探。本文通过详细分析沙西北地区碳酸盐岩潜山储层缝-洞系统发育特征, 研究裂缝与岩溶的控储作用。结果表明, 渤海海域渤中西南环下古生界碳酸盐岩潜山属于裂缝相关岩溶储层, 储集空间主要为溶蚀孔洞、构造裂缝和沿构造裂缝溶蚀扩大孔洞, 优质储层具有岩性选择性, 泥晶白云岩和细晶白云岩发育的裂缝和溶蚀孔洞更好。储层主要发育 3 期裂缝, E-W 向和 NE 向剪裂缝主要与印支期和燕山末期的两次构造挤压有关, 第三期 NW 向张裂缝则与喜山期的拉张运动有关, 挤压作用是形成高密度缝的主要机制, 后期的伸展作用是裂缝松弛形成储集空间的必要条件。下古生界碳酸盐岩潜山储层经历了 3 期岩溶作用, 分别为加里东稳定构造背景的岩溶、印支期挤压褶皱成山背景的岩溶和燕山期-新生代早期伸展背景的断块地垒岩溶。总之, 渤海湾盆地沙西北地区碳酸盐岩潜山储层是多期次多类型构造-岩溶作用联合复合形成的, 不同构造部位的联合复合程度差异分析是认识成储规律的重要因素。

**关键词:** 潜山油气藏; 碳酸盐岩; 裂缝; 岩溶作用; 渤海湾盆地

中图分类号: P736.21<sup>†3</sup>

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2024)12-0066-13

## 1 引言

油气勘探中的潜山(buried hill)一词是指位于盆地基底并被更年轻的地层沿不整合面披覆的基岩凸起<sup>[1]</sup>, 其蕴藏的油气资源被称为“基岩油气藏”。盆地深层和超深层的基岩已成为全球勘探热点<sup>[2-3]</sup>。渤海湾盆地是我国重要的含油气盆地(图 1a), 也是我国最早进行潜山勘探的盆地之一。2019 年, 在渤海湾盆地 BZ19-6 构造发现大型变质岩花岗岩潜山油气藏,

探明地质储量近  $3 \times 10^8 \text{ t}^{[4]}$ 。随后, 又在 BZ13-2、BZ26-5 等发现潜山油气藏<sup>[5]</sup>, 掀起了潜山基岩油气藏的勘探热潮。下古生界碳酸盐岩地层是渤海湾新生代盆地的基岩类型之一, 20 世纪 70 年代发现的任丘油田是渤海湾盆地最早成功勘探的潜山油气藏, 其储层就是碳酸盐岩<sup>[6]</sup>。目前, 又在渤中凹陷周缘发现有 BZ28-1、BZ21-22、CFD2-1 等多个小型含油气构造, 表明碳酸盐岩潜山亦具有重要的勘探潜力, 研究表明储层是相关富油凹陷周缘构造能否成藏的关键因素<sup>[7-9]</sup>。

收稿日期: 2023-09-13; 修订日期: 2024-03-12。

基金项目: 国家自然科学基金(42272132); 珠峰计划项目(80000-2023ZF11402); 四川省科技计划创新群体项目(2023NSFSC1986)。

作者简介: 王泽霖(1997—), 女, 山东省东营市人, 主要从事石油地质学研究。E-mail: sancy1225@163.com

\* 通信作者: 陈安清, 教授, 主要从事沉积学、石油地质学方面的教学与研究。E-mail: aqinth@163.com

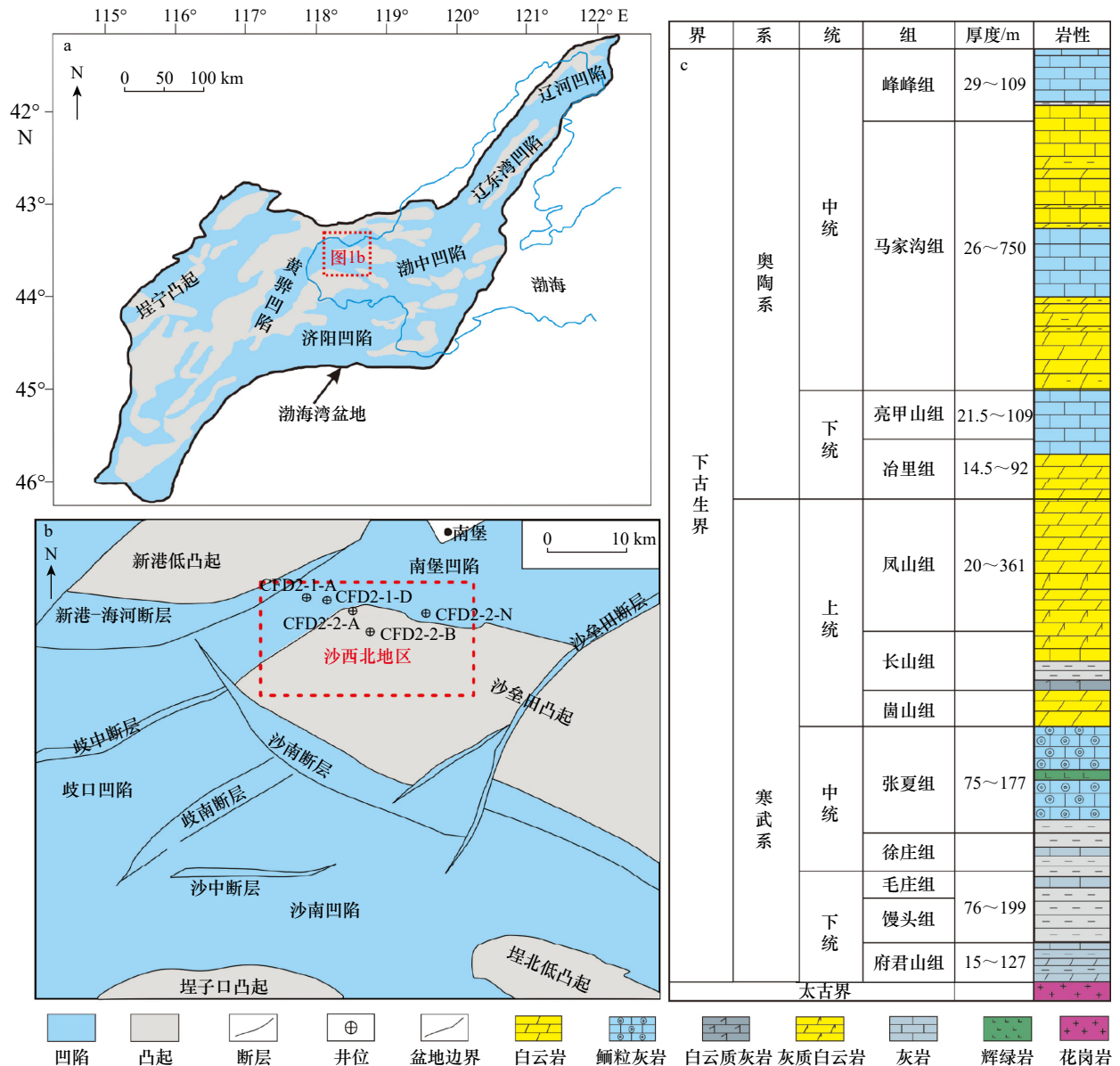


图1 渤海湾盆地地理位置(a)、研究区(红色虚线框)及其周缘前新生代构造纲要(b)和研究区下古生界地层综合柱状图(c)  
 Fig. 1 The location of Bohai Bay Basin (a), pre-Cenozoic tectonic outline map of the study area and surroundings (b), the lower Palaeozoic stratigraphy and lithology column of the study area (c)

渤海湾盆地下古生界碳酸盐岩经历了强烈而复杂的断裂作用和多期岩溶改造<sup>[10-11]</sup>。针对渤海湾盆地这类复杂的新生代断陷盆地,前人已通过盆地内多个油田的案例对碳酸盐岩基底潜山储层的成因机制展开研究:如大港油田千米桥潜山下古生界碳酸盐岩储层主要受岩溶作用影响,包括早期淡水表生岩溶和后期深埋热液溶蚀改造叠加改造<sup>[12]</sup>;济阳坳陷碳酸盐岩潜山储层则是多种储集类型共存的复合型储集体,发育有风化壳带、水平溶蚀带、断层裂缝溶蚀带和顺层岩溶带4套储层<sup>[13-15]</sup>。这些案例充分说明了碳酸盐岩潜山储层的形成机制是非常复杂的<sup>[9,16]</sup>。在渤海海域内的沙西北地区,通过先期岩心观察,揭示了碳酸盐

潜山的储集空间主要是由缝-洞系统组成,并伴有多期次的方解石脉充填现象,表明该地区的碳酸盐岩经历了裂缝和岩溶的双重改造。但是对于裂缝和岩溶的关系以及它们如何联合控储缺乏研究,从而影响了对储层发育分布规律的认识,并制约了碳酸盐岩潜山的油气勘探。为此,本文试图从区域构造演化出发,详细分析沙西北构造带碳酸盐岩储层缝-洞系统的形成过程,揭示储层发育的主控因素,为该类型潜山勘探提供一种新的模式。

## 2 地质背景

渤海湾盆地位于华北板块东部(图1a),是一个典

型的新生代陆相断陷盆地,勘探面积约为  $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,为中国东部地区最为重要的油气产区。在区域构造应力的影响下,研究区在前新生代形成了大量的印支期的 NWW 向挤压断裂和燕山期 NEE 向伸展-挤压断裂;这些基底断裂在新生代受郯庐断裂继续活动的影响,进一步伸展活化,并控制了新生代盆地的形成格局<sup>[17-18]</sup>。

沙西北构造位于渤海海域西部沙垒田低凸起的西北斜坡带,为斜坡带上逆断层形成的背斜构造;构造主要沿 NWW 方向展布,并受近 NNE 向的沙垒田二号走滑断层的改造<sup>[19]</sup>(图 1b);构造紧邻南堡、歧口等富烃凹陷,具备良好的成藏条件,油气主要赋存于下古生界碳酸盐岩地层<sup>[20-21]</sup>(图 1b,图 1c)。沙西北下古生界碳酸盐岩受印支期、燕山期和喜山期多幕构造运动叠加改造,形成了独特的“断块型(Fault block)”地垒地堑构造<sup>[22-23]</sup>。受多期构造抬升影响,沙西北地区下古生界直接与上覆新生界呈不整合接触,奥陶系上统、上古生界和中生界完全剥蚀。其中,寒武系地层由下到上可划分为下统的府君山组、馒头组和毛庄组,中统的徐庄组和张夏组,上统的崮山组、长山组和凤山组(图 1c);奥陶系地层由下到上划分为下统的冶里组、亮甲山组,中统的马家沟组和峰峰组(图 1c)。研究区早古生代为浅水碳酸盐岩台地—陆表海背景下的潮坪、局限台地和开阔台地环境<sup>[24]</sup>。

### 3 潜山储层岩石学特征

研究区下古生界碳酸盐岩潜山储层岩性以晶粒

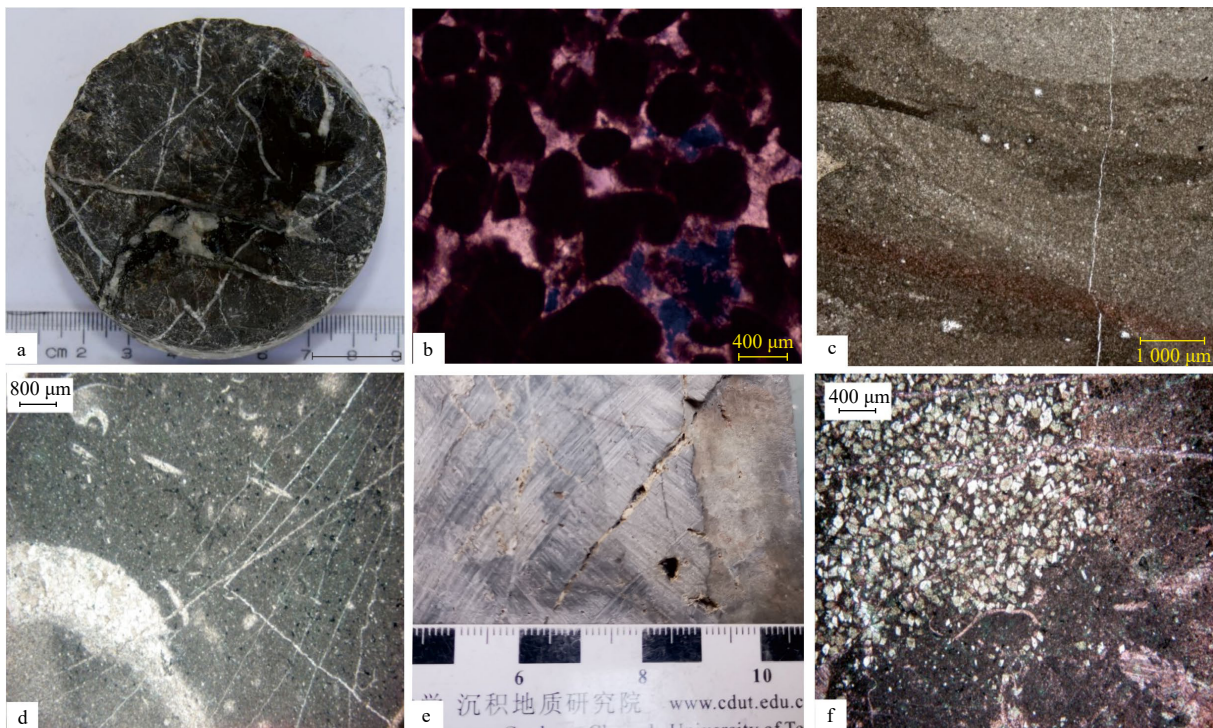
白云岩和晶粒灰岩为主,也可见部分颗粒灰岩和少量颗粒白云岩发育(图 2)。其中,晶粒白云岩发育层段是最主要的储层段。晶粒白云岩在研究区呈厚层状分布,晶粒大小主要包括泥晶、细晶和不等晶;晶型表现为自形、半自形和它形多种形态。颗粒白云岩在研究区分布较少,只在下马家沟组局部钻遇,颗粒多呈团块状,成分多为暗色泥晶白云石,由亮晶方解石胶结。晶粒灰岩灰岩呈中厚层状产出,主要分布在寒武系中统、奥陶系下马家沟组及冶里组的底部。颗粒灰岩主要为寒武系张夏组的鲕粒灰岩和崮山组的竹叶状灰岩,较为致密。

#### 3.1 泥微晶灰岩

该类岩石在研究区下古生界各地层中均有分布,由泥-微晶方解石组成,主要包括含颗粒泥晶灰岩、泥质泥晶灰岩、条带状泥晶灰岩等(图 2a)。一般以呈深灰色,中-薄层的致密块状为主,亦见厚层块状,不含或含少量生屑、鲕粒及陆源泥、粉砂等。研究区泥-微晶灰岩一般形成于较弱的水动力环境或安静的水体中,如局限台地灰质泻湖或开阔台地潮下静水环境中,在沉积时虽含有大量细小晶间微孔,但经过后期压实压溶作用的改造,储集性能极差,一般仅能作为非储集岩类。局部泥-微晶灰岩发生白云岩化形成泥-粉晶白云质灰岩,可具有一定的储集性。

#### 3.2 颗粒灰岩

颗粒灰岩包括鲕粒灰岩、竹叶状灰岩、砂屑灰岩为主、次为砾屑灰岩和生物屑灰岩等。鲕粒灰岩主



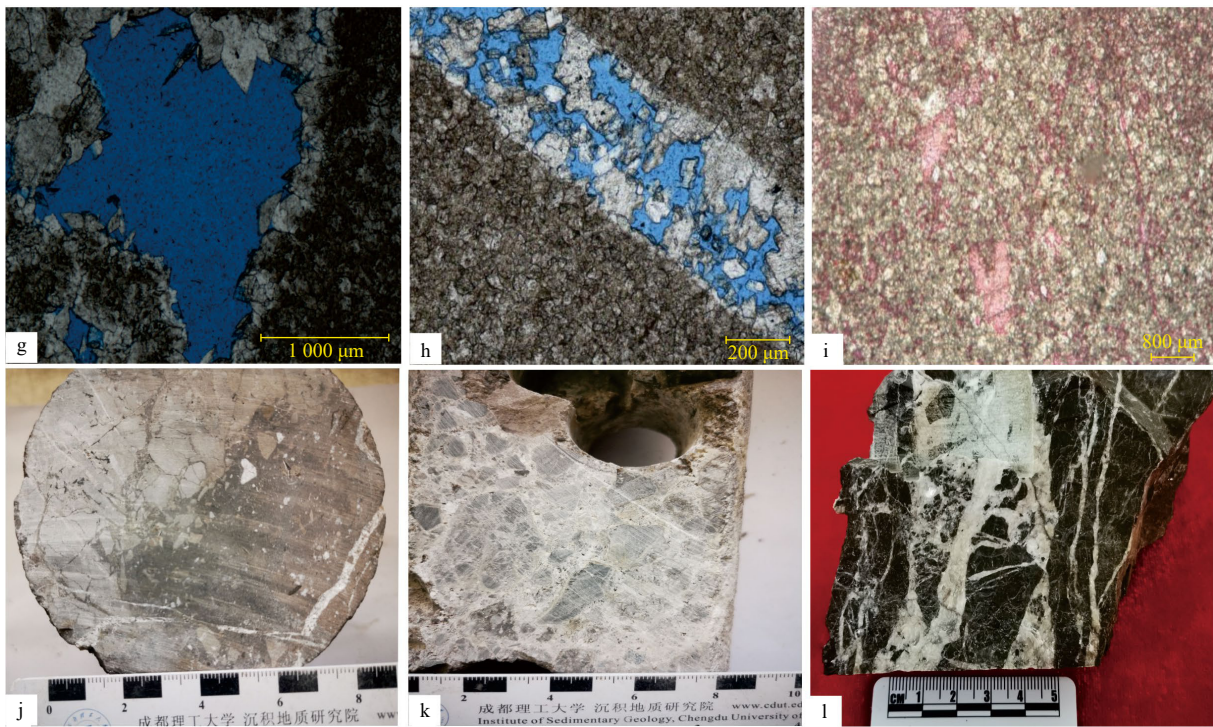


图2 研究区下古生界碳酸盐岩典型岩性照片

Fig. 2 The lithologic photographs of the carbonate in the study area

- a. 泥晶灰岩, 多期裂缝充填, CFD-H 井, 冶里组, 3 740.04 m(-); b. 亮晶胶结砂屑灰岩, 见粒间溶孔, CFD2-1-B 井, 上马家沟组, 3 477.4 m (-); c. 纹层状泥-微晶白云岩, CFD2-1-B 井, 崮山组, 3 708 m; d. 含生屑泥-微晶白云岩, CFD2-2-I 井, 冶里组, 3 955 m (-); e. 细晶白云岩, 发育裂缝及裂缝相关溶蚀孔洞, CFD2-1-A 井, 亮甲山组, 3 710 m; f. 灰质粉晶白云岩, CFD2-2-B 井, 亮甲山组, 3 400 m (-); g. 细晶白云岩, 发育大型溶孔, 溶洞壁发育环边白云石, CFD2-1-B 井, 冶里组, 3 830 m (-); h. 粉-细晶白云岩, 裂缝内充填的白云石发育溶蚀孔, CFD2-1-B 井, 亮甲山组, 3 709.3 m (-); i. 粉晶灰质白云岩, 发育少量晶间孔, CFD2-2-C 井, 冶里组, 3 640 m (-); j. 岩溶角砾白云岩, CFD2-1-B 井, 冶里组, 3 547 m; k. 岩溶角砾灰岩, CFD2-2-I 井, 亮甲山组, 3 566 m; l. 岩溶角砾白云岩, 多组裂缝被方解石充填, CFD2-1-B 井, 上马家沟组, 3 442.4 m

(-) 指示单偏光镜下观察到的现象

- a. Micritic limestone, multi-stage fracture filling, Well CFD-H (3 740.04 m), Yeli Formation; b. sparkling cemented sand clastic limestone, intergranular solution pore, Well CFD2-1-B (3 477.4 m), Shangmajiaogou Formation; c. laminated mud-microcrystalline dolomite, Well CFD2-1-B (3 708 m), Gushan Formation; d. clastic mud-microcrystalline dolomite, Well CFD2-2-I (3 955 m), Yeli Formation; e. fine crystalline dolomite, development of cracks and fracture-related dissolution voids, Well CFD2-1-A (3 710 m), Liangjiashan Formation; f. calcareous silty dolomite, Well CFD2-2-B (3 400 m), Liangjiashan Formation; g. fine crystalline dolomite, large solution pores are developed and ring-edge dolomite is developed on the cave wall, Well CFD2-1-B (3 830 m), Yeli Formation; h. powder-fine-grained dolomite, the dolomite filled in the fracture develops dissolution pores, Well CFD2-1-B (3 709.3 m), Liangjiashan Formation; i. powdery gray dolomite with a small number of intergranular pores, Well CFD2-2-C (3 640 m), Yeli Formation; j. karst breccia dolomite, Well CFD2-1-B (3 547 m), Yeli Formation; k. karst brecciate limestone, Well CFD2-2-I (3 566 m), Liangjiashan Formation; l. karst breccia dolomite, several groups of cracks are filled with calcite, Well CFD2-1-B (3 442.4 m), Shangmajiaogou Formation

(-): Multiple fractures been filled

要见于张夏组和徐庄组, 鲕粒含量为 50%~75%, 多以放射鲕或同心鲕、复鲕为主, 有的以生屑为鲕核, 以亮晶方解石为胶结物, 含量为 15%~30%, 形成于高能的开阔台地浅滩环境。砾屑灰岩多见于凤山组、长山组以及崮山组, 砾屑之间常充填一些小的砾屑、砂屑、生屑等, 砾屑呈扁圆状至长椭圆形、竹叶状等, 基质多为灰泥, 少量砂屑亮晶, 其成因与风暴流作用有关。砂屑灰岩广泛分布于寒武系和奥陶系各地层中, 是由内碎屑经方解石胶结而成, 内碎屑含量为 60%~85%, 具有较好的分选性和磨圆度(图 2b), 形成于高

能浅滩环境。生物屑灰岩中的生物碎屑种类多, 有有孔虫、藻类、三叶虫、介形虫、腕足、双壳、棘皮类、腹足类和介形虫等, 部分为与蓝绿藻(或蓝细菌)活动有关的藻团块灰岩, 在开阔台地环境中形成的生屑灰岩, 其生屑种类较多, 含量较高, 反映更高一些的环境能量, 局限台地环境中形成的生屑灰岩种类较单一, 含量低, 反映受限制的较低或间歇搅动的能量环境。

### 3.3 泥-微晶白云岩

泥微晶白云岩在研究区分布较广, 典型结构为它形-半自形的泥-微晶结构(图 2c, 图 2d), 一般由小于

4  $\mu\text{m}$  的微晶白云石组成,白云石有序度较低,常发育有裂缝,常见的构造有水平-微波状纹层、泥裂、鸟眼构造。这类白云岩主要分布于寒武系凤山组及长山组,奥陶系上马家沟组上部、下马家沟组下部、亮甲山组、冶里组地层中。此类白云岩的成因一般用蒸发泵白云岩化模式加以解释,即在干旱炎热的气候条件下,在礁滩顶部或受障壁保护的泻湖-潮坪环境,由蒸发作用导致高镁卤水浓缩,进而交代灰泥,引发了准同生白云岩化作用。

### 3.4 粉-细晶白云岩

粉-细晶粒白云岩(图 2e 至图 2i)是研究区古潜山下古生界最重要的碳酸盐岩储层类型,广泛发育于中奥陶统上马家沟组上部、下马家沟组下部和下奥陶统亮甲山组、冶里组地层中。白云石的晶体大小为 0.05~0.15 mm,成因类型可划分为 2 种:其一是原始的泥-微晶白云岩重结晶而成,晶粒白云岩中残余有较多原岩的泥-微晶结构或杂质(图 2g),在显微镜下呈较脏的棕褐色,白云石重结晶作用明显。此类型较致密,一般不太有利好储层发育。其二是成岩期白云石化作用产物,白云石大小较均匀,形态以半自形-自形晶为主(图 2h 至图 2j),以白云石普遍具“雾心亮边”结构为其显著特征,大多数粉-细晶白云岩的晶间孔和晶间溶孔、溶洞较发育(图 2h),面孔率一般在 2%~10% 之间,孔隙度为 6%~12%,高者可达 14%~18%,有很好的孔渗性,好的白云岩储层大多为此类型。部分晶间孔、晶间溶孔被方解石或沥青充填(图 2j),孔渗性强烈受损而难以形成好储层。

### 3.5 岩溶角砾白云岩/灰岩

岩溶角砾白云岩或岩溶角砾灰岩主要见于顶部不整合面附近,呈灰-深灰色,有铁染呈紫红色,角砾多为棱角状,角砾间具有典型的岩溶充填现象,为暴露地表期形成的喀斯特化角砾岩(图 2j 至图 2l)。

## 4 储集空间及储层分带特征

研究区碳酸盐岩储层储集空间类型丰富,与裂缝相关的溶蚀类孔隙为主要的储集空间(图 2)。岩心观察显示尤其是在白云岩中发育强溶蚀形成的溶洞(图 2e, 图 2g)。储层的缝-洞有时被成岩期的次生矿物部分充填(图 2h),同时也保留有部分的残留孔和空斑孔。

通过对钻井岩心及薄片资料等观察可以看出,沙西北地区碳酸盐岩潜山斜坡部位具有完整的 3 层岩溶结构,其结构可以分为顶部的岩溶残积层、垂直渗流带和水平潜流带。但在潜山顶部风化壳结构不大

完整,并不能识别出特别明显的垂直渗流带和水平潜流带。岩溶残积层,不规则的角砾大小混杂,并且完全被胶结,不具有储集性能;与残积层直接接触的为下伏的岩溶储集层,其中白云岩层往往具有较好的缝-洞体系发育。一方面,由于白云岩常伴随有膏质团块的产生,后期易被溶蚀形成洞穴;另一方面,由于白云岩具有较好的渗流能力,有利于受后期顺层岩溶的发育。

通过对沙西北地区 CFD2-1、CFD2-2 油田各井的统计揭示,有效储层主要分布在距潜山不整合面以下 300 m 范围内,储层的高角度与低角度裂缝均发育,储集空间主要为裂缝相关的岩溶缝洞,在主断层附近的井,储层呈厚层块状,离主断裂较远的井,一般细晶白云岩的岩溶作成储作用较强,受白云岩层的约束,为层控型储层(图 3)。储层非均质性较强,且具有平面上厚度变化大,纵向上分布差异大的特征(图 3)。纵向上可以划分为风化壳型储层和内幕型储层两种类型。其中风化壳型储层位于距潜山顶面 150 m 的范围内,主要表现为裂缝-孔隙型储层,储层分布连续,单层厚度大。而内幕型储层则位于距潜山顶面 150~300 m 范围内,为裂缝-孔隙型储层。潜山内幕型储层的岩性选择性更明显,主要分布在白云岩层,裂缝和溶蚀现象都在白云岩中更容易发生,即内幕型储层主要取决于白云岩的分布。

结合实际生产资料分析显示,CFD2-2 油田明显要比 CFD2-1 油田的储层厚度大。通过对储层物性的分析发现,储层发育的横向差异和裂缝关系密切。CFD2-1 油田普遍孔隙度较高,3 口井(CFD2-1-A、CFD2-1-B、CFD2-1-C)的储层孔隙度平均值为 6.6%,但储层厚度平均值只有 17.7 m,储层更偏向于溶蚀孔隙型储层(图 3)。而 CFD2-2 油田各钻井的储层孔隙度较 CFD2-1 井都较低,裂缝对储集空间的占比较 CFD2-1 油田高得多,储层厚度也较 CFD2-1 油田高,属于裂缝-孔隙型储层,这与它距离断层(沙垒田断层)更近有关(图 1)。

## 5 储层裂缝特征

裂缝发育是沙西北地区下古生界碳酸盐岩储层的重要特征。岩心观察显示裂缝类型主要有构造裂缝、溶蚀裂缝和成岩裂缝,其中以构造裂缝为主,且对储层质量的影响最大。根据岩心、壁心和薄片裂缝的切割关系,识别出 3 组构造裂缝(图 4)。第一组裂缝中的充填物主要为细晶方解石。第二组裂缝切割第一组裂缝,表明他们比第一组裂缝形成时间晚。

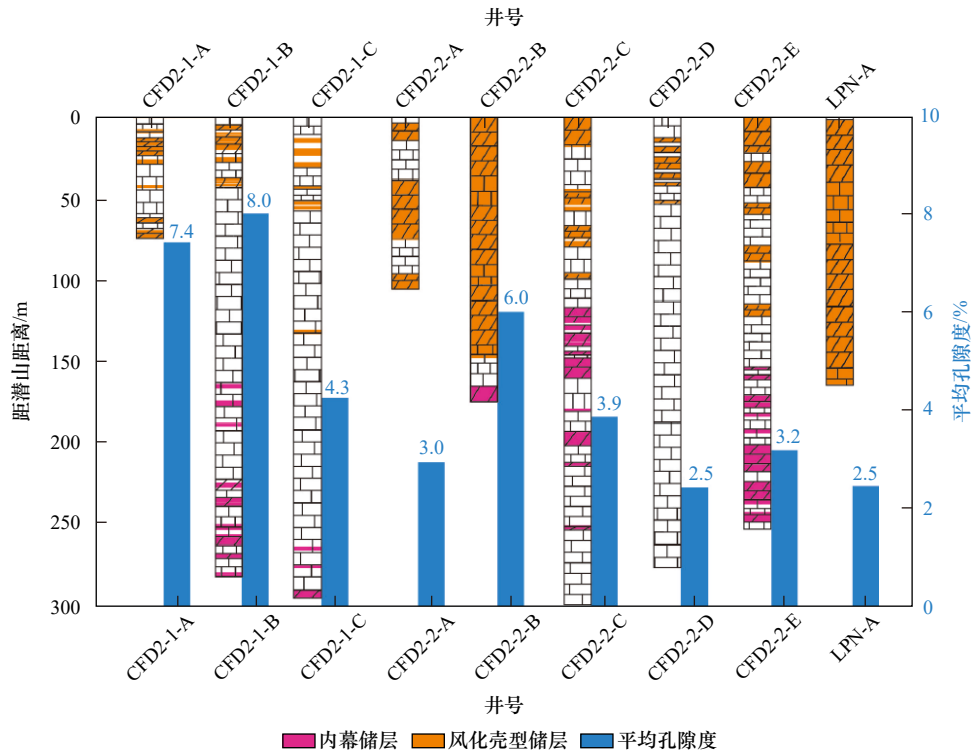


图3 沙西北地区储层距潜山顶部距离及储层物性分布

Fig. 3 The diagram of reservoir intervals distance from buried hill top and the distribution of reservoir physical property of each boreholes in Shaxibei area

第二组裂缝的充填物以含泥质方解石为主,与第一组裂缝中的充填物明显不同。这两组裂缝均表现为宽度较小,为0.1~1.0 cm,缝面平直,延伸较远,均为剪应力下产生的裂缝。第三组裂缝切割前两组裂缝,说明其形成时期比前两组都晚。第三组裂缝表现为缝面较粗糙,缝宽较大,为1.5~2.0 cm,延伸较短,为局部走滑压扭作用下产生的裂缝。

构造裂缝、溶解裂缝和诱导缝在成像测井下表现出不同的特征<sup>[25-27]</sup>(图5a,图5b)。构造裂缝在成像测井下呈正弦曲线形态,表面较为平滑;溶蚀裂缝的成像测井响应主要表现为裂缝面的粗糙和扩张,以及沿裂缝分布的溶蚀孔隙,甚至与裂缝一起形成的珠状溶洞;钻井诱导缝主要是由于钻具震动或地层被泥浆挤压在井壁伴生出来的,在FMI图像上主要表现为对称分布的暗色条纹,呈羽状或雁列状。通常,诱导缝的方位与最大主应力方向一致<sup>[28]</sup>。研究区钻井诱导缝揭示渤海湾盆地现今最大主应力方向接近NWW走向(图5c)。此外,成像测井还可以区分充填和有效(开放)裂缝<sup>[29]</sup>。有效裂缝由于泥浆侵入阻力低而呈现深色正弦曲线,而填充或闭合的裂缝呈现亮色,这与高阻矿物的充填有关<sup>[30]</sup>。

成像测井显示,沙西北碳酸盐岩潜山中发育NW向NE向和W-E向3组裂缝(图5d)。其中W-E走

向的裂缝占主导地位,约占总裂缝的60%,其与现今诱导缝走向相近;三组裂缝均呈中高倾角,倾角多分布于在40°~70°之间(图5e),这类裂缝约占裂缝总数的70%。岩心、薄片和成像测井中均观察到有效裂缝(未填充裂缝)和填充裂缝。其中,W-E向裂缝充填度为18%,NW向裂缝充填度为64%,NEE向裂缝充填程度为47%,主要为碳酸盐矿物充填。成像测井计算的裂缝宽度分布广泛,范围为30~280 μm,W-E向裂缝宽度较大,集中在200~280 μm范围内,NW和NEE向裂缝宽度多集中在50~140 μm范围内。考虑到W-E向裂缝普遍存在比另外两组裂缝更大的宽度,我们推断W-E向裂缝在晚期的伸展背景下有较大的松弛开启度。

## 6 构造演化及裂缝期次

在地震剖面解释的基础上,结合区域构造史,通过平衡剖面分析恢复了沙西北地区碳酸盐岩潜山的构造演化过程(图6)。潜山的演化可以分为5个阶段:(1)下古生界碳酸盐岩沉积后,由于加里东运动造成华北地台整体抬升,进入了近130 Ma的沉积剥蚀阶段<sup>[31]</sup>,研究区整体缺失上奥陶统、志留系和泥盆系沉积;(2)进入海西期后,抬升停止,华北板块再次成为广泛沉积的克拉通盆地,发育了石炭、二叠系地

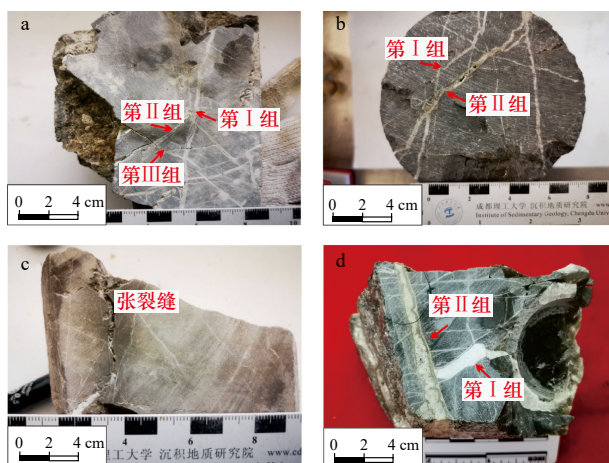


图4 研究区裂缝发育特征及期次

Fig. 4 The characteristics and sequence of fracture families occurrence in the study area

a. 岩心发育两组剪切缝和一组张裂缝,第I组裂缝中充填细晶方解石,第II组裂缝中充填泥晶方解石,第III组裂缝未被充填。

CFD2-2-N井,3560 m; b. 剪切缝充填方解石脉体,CFD2-1-B井,3450 m; c. 岩心中发育一组张裂缝,CFD2-1-B井,3442 m; d. 两组

剪切缝相互切割,CFD2-1-B井,3706 m

a. Two shearing fractures and one tensile fracture can be observed in the core. The fractures of Family I are filled with fine crystalline calcites, the fracture of Family II is filled with argillaceous calcites, and the fracture of Family III is not filled, Well CFD2-2-N (3 560 m); b. the shearing fractures are filled with calcite veins, Well CFD2-1-B (3 450 m); c. a tensional fracture observed in the cor, Well CFD2-1-B (3 442 m); d. the two families of fractures cut each other, Well CFD2-1-B (3 706 m)

层;(3)印支运动期间,由于华北板块和华南板块的强烈碰撞,受S-W向(现今方向)挤压应力影响<sup>[32-33]</sup>,研究区发育大量压裂缝。与此同时,挤压应力也造成地壳发生第二次抬升,先期沉积的石炭、二叠系地层被整体剥蚀,下古生界重新暴露地表;(4)燕山早期到燕山中期,研究区进入连续沉积阶段,沉积了一套中生界地层。(5)燕山晚期,受来自S-E方向的挤压应力影响<sup>[34]</sup>,研究区再次成为隆起剥蚀区,同时发育第二期压裂缝;(6)新生代早期,郟庐断裂走滑断裂造成研究区先存的大型潜山隆起裂陷肢解成隆-洼相间的格局,断块出现倾翘,倾翘断块上端成为潜山山头,再次发生剥蚀和岩溶作用,其典型特征是有沿层面的顺层岩溶作用,导致下古生界下部碳酸盐岩发育岩溶储层;(7)自新生代中晚期以来,渤海湾盆地发生了强烈的裂陷作用,盆地迅速下沉,地垒被新的盆地埋藏成为潜山<sup>[23,35-37]</sup>。同时新的断层活动进一步加强改造了潜山构造幅度,并造成早期裂缝的松弛释放空间以及形成部分新的构造裂缝。

前文成像测井和岩心观察分析均显示,下古生界潜山发育3组裂缝,结合上文区域构造演化史,我们

认为,前两期剪裂缝(E-W向和NE向)主要与印支期和燕山末期的两次构造挤压运动有关,而第三组张裂缝(NW向裂缝)则与喜山期的走滑压扭作用有关<sup>[38]</sup>。而早期挤压背景下形成的裂缝不但密度大,且经历过地表暴露,发育大量裂缝相关的岩溶溶蚀孔洞,局部的方解石充填则有利于支撑缝洞空间。新生代伸展构造背景促进了早期挤压形成的裂缝向松弛开启转化,从而形成大量裂缝型储集空间。

## 7 裂缝相关的岩溶成储机制

岩溶作用是碳酸盐岩成储的重要机制。综合已有的研究,我们在此按构造背景将岩溶分为以下4种类型:(1)稳定构造型,以鄂尔多斯盆地奥陶系顶部的加里东岩溶为代表,具有典型的3层结构<sup>[39]</sup>;(2)挤压构造型,以塔河油田的奥陶系岩溶为代表,为挤压背景下形成的缝-洞体系<sup>[40]</sup>;(3)走滑构造型,以塔里木盆地顺北油田的断缝体为代表<sup>[41]</sup>;(4)伸展构造型,裂谷盆地背景下的地垒岩溶,即为本文所提供的一个新的解析案例。岩心和显微薄片分析显示沙西北下古生界碳酸盐岩潜山储层是构造裂缝相关岩溶储层,以伸展构造背景下的地垒岩溶为主,具有多种岩溶叠加的特征。

三期岩溶作用分别为加里东期准同生期岩溶(Karst I)、印支期岩溶(Karst II)、燕山晚期岩溶(Karst III)。加里东期,研究区为稳定台地沉积背景<sup>[42]</sup>,并没有广泛的裂缝分布,此时发生了第一期非裂缝相关岩溶作用(Karst I)。印支期为构造挤压背景<sup>[43]</sup>,渤海湾地区在构造挤压作用下褶皱成山,并且在褶皱核部挤压缝发育,该时期在褶皱山背景下的大气淡水溶蚀作用,形成了第二期裂缝相关的岩溶作用(Karst II)。由于暴露剥蚀作用强,大多地区的下古生界碳酸盐岩甚至被剥蚀殆尽,因此第二期岩溶保存的较差。燕山-新生代早期,渤海湾盆地主要为伸展背景下形成的地堑-地垒相间的格局<sup>[44]</sup>,地堑为小型湖泊,地垒则为暴露的岩溶发育区,这一地貌格局的水文循环是非常活跃的,也有利于岩溶储层形成核保存,在此将这类岩溶划分为第三期(Karst III)。沙西北地区的断块由于翘倾作用,断块上端的高部位有较大的剥蚀作用,导致前两期的岩溶保存有限,因此主要见到的是第三期岩溶,同时由于大气水会产生沿裂缝扩溶和沿渗流作用较强的白云岩层段发生顺层溶蚀的现象,因此在中生界覆盖区更容易发生多期岩溶叠加作用。3期岩溶具有明显的区分标志,第一期岩溶是非裂缝相关岩溶,因此岩溶孔洞通常不是裂缝导流溶蚀形成的,通

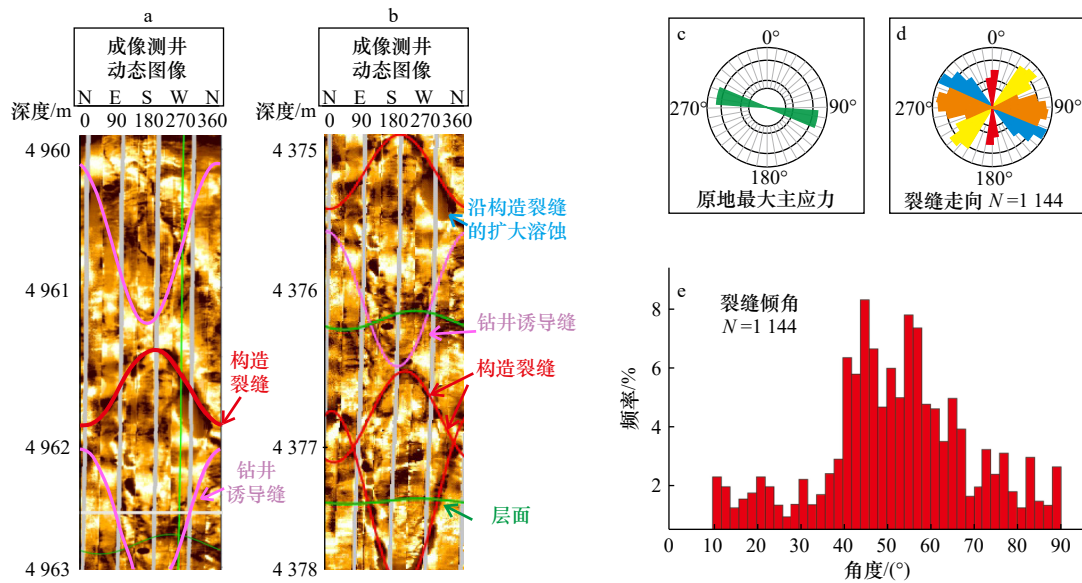


图5 渤中凹陷西南部碳酸盐岩潜山岩心成像测井中识别的天然裂缝(红色曲线代表构造裂缝, 粉红色曲线代表诱导裂缝)  
 Fig. 5 Natural fractures identified in the imaging logging of carbonate buried hill cores in the southwest of Bozhong Sag (Red curves represent tectonic fractures. Pink curves represent induced fractures)

a. CFD2-1-A 井的钻井诱导裂缝; b. CFD2-1-A 井诱导缝与构造裂缝, 孔隙沿裂缝发育; c. 诱导裂缝的走向玫瑰图显示了 NWW 向最大主应力;  
 d, e. 根据图像测井计算的 3 组裂缝走向和倾角  
 a. Induced fractures from Well CFD2-1-A; b. induced fractures and tectonic fractures from Well CFD2-1-A, the dissolved pores developed along the fracture;  
 c. rose plot of induced fractures shows the NWW trending maximum principal stress; d, e. fracture strike and dip calculated from image

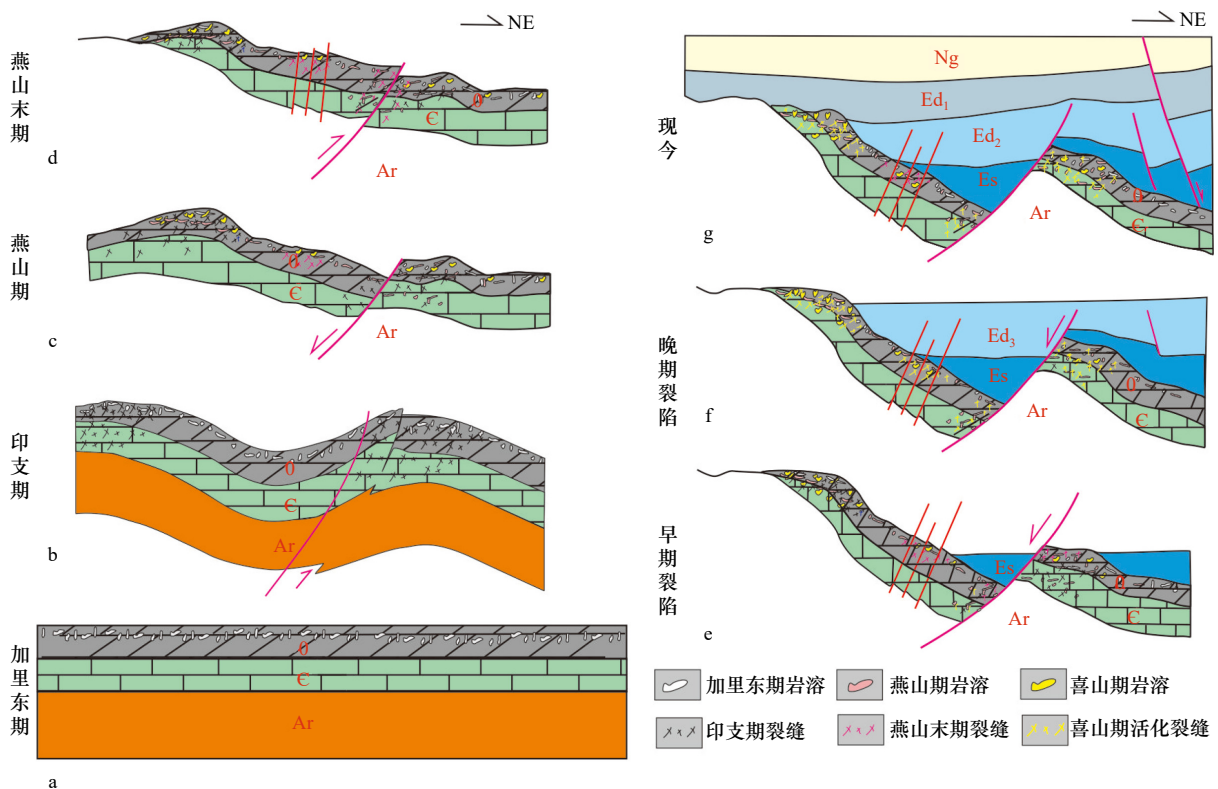


图6 沙西北地区潜山构造演化与裂缝-岩溶联合复合成储机制

Fig. 6 Tectonic evolution of the buried hill and reservoir formation of fracture-karst combined mechanism in Shaxibe area

常是碳酸盐岩基质中无裂缝的溶蚀孔洞。而第二期岩溶和第三期岩溶的区分一是通过与它们相关的裂缝的切割关系, 二是裂缝充填物的地球化学具有明显

的区别: 第二期褶皱成山背景的岩溶, 其伴生的方解石充填物的碳、锶同位素具有与下古生界碳酸盐岩沉积期相同的特征<sup>[45]</sup>, 这是由于该背景下, 无外来水

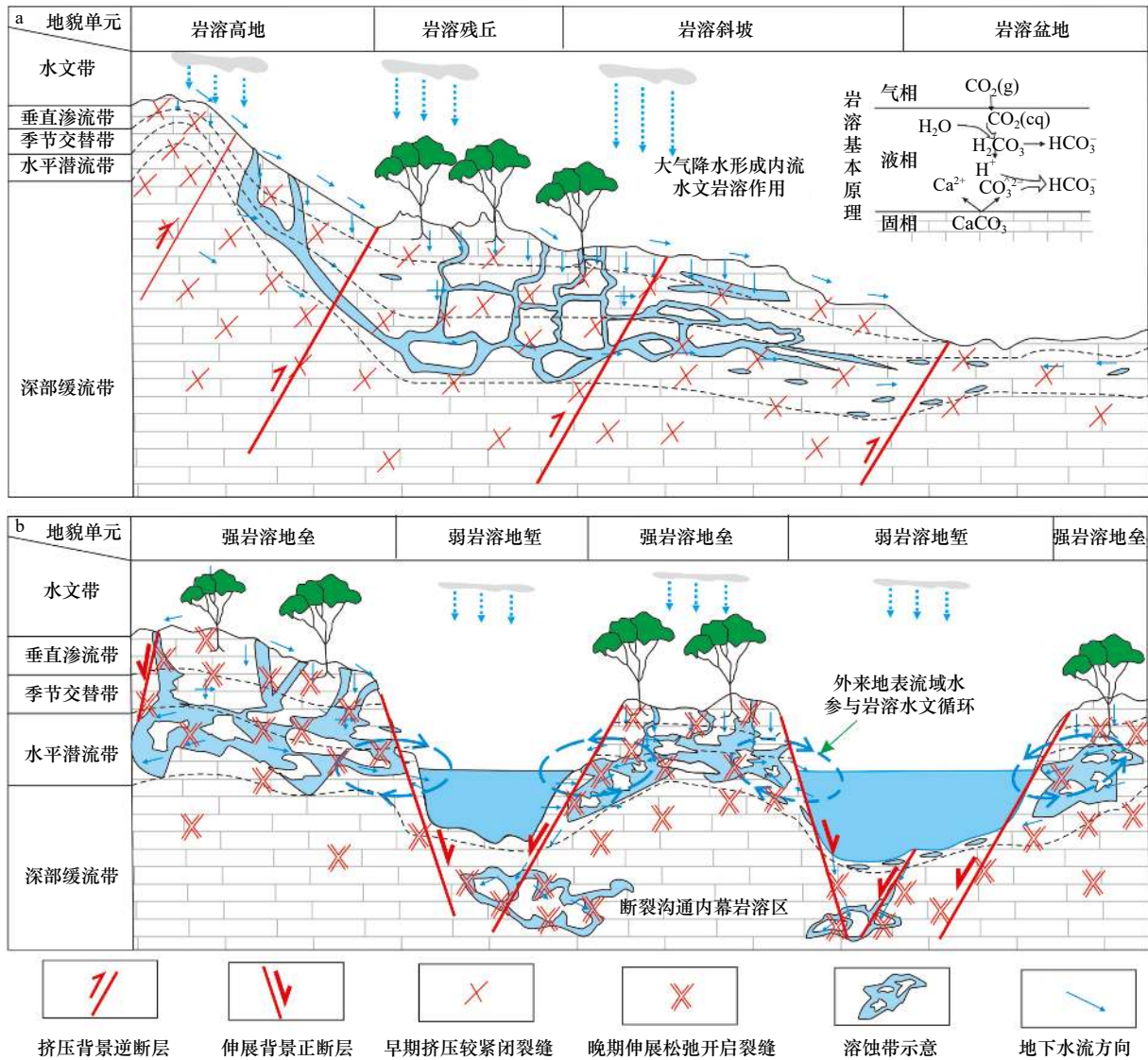


图 7 两种不同水文条件的裂缝相关岩溶模式

Fig. 7 Two fracture-related karstification models for two different hydrological conditions

a. 只有降雨内流体系的高地貌背景; b. 有外来径流体系的地垒-地堑背景

a. Only with internal precipitation runoff in geomorphic highland setting; b. with external runoff water in horst-graben setting

系的孤立岩溶体系,方解石充填物是上部溶蚀碳酸盐岩的产物在下部沉淀的(图 7a)。第三期地堑-地垒相间的背景是具有外来水系的开放体系(图 7b),方解石充填物的碳、锶同位素与当时流域相关<sup>[45-46]</sup>。以上 3 期岩溶作用耦合 3 期构造活动及其产生的裂缝共同形成了研究区这种多期裂缝相关岩溶储层。

空间上,不同的构造部位所发育或保存的岩溶期次也具有差异。断块潜山山头高部位,主要发育了印支期(Karst II)和燕山末期(Karst III)的岩溶,加里东期的非裂缝相关岩溶由于抬升剥蚀而基本不保存。中生界覆盖区由于印支期之后没有暴露地表,印支期岩溶(Karst II)保存最好,也有一定的加里东期岩溶(Karst I)保存,并有断块翘倾作用下大气水沿上倾端

顺流至内幕的顺层岩溶(Karst III)。总体上,新生界覆盖之前暴露的最后阶段具有最佳的地堑-地垒岩溶发育水文条件,也是最容易保存下来的。以上分析表明,沙西北下古生界碳酸盐岩储层受沉积环境控制的层状白云岩分布和多次的裂缝-岩溶共同改造所形成的。广泛发育的碳酸盐岩台地-陆表海背景下的潮坪相控制了白云岩的分布,奠定了储层形成的物质基础。后期的地表暴露使大气水不仅能在风化壳表面溶蚀,也能在潜山内幕的白云岩发育层段进行顺层溶蚀。多期构造形成裂缝系统大大促进了岩溶作用的发生。另外,不同构造部位,裂缝和岩溶的控制程度有所差异。发育厚储层的井离主断裂近,裂缝的控制更为明显,既灰岩和白云岩在裂缝改造下都能成储;

离主断裂稍微远的井,岩溶作用更明显,岩溶往往顺白云岩层发生,因此储层受白云岩层的约束呈层状。研究区经历的多期次构造活动形成的裂缝系统本身既可以作为储集空间,又可以成为岩溶发生的网状导流系统,使岩溶作用的影响范围最大化。

## 8 结论

(1)渤海海域渤中西南环下古生界碳酸盐岩潜山属于裂缝相关岩溶储层,储集空间主要为溶蚀孔洞、构造裂缝和沿构造裂缝溶蚀扩大孔洞,优质储层具有岩性选择性,泥晶白云岩和细晶白云岩发育的裂缝和

溶蚀孔洞更好。

(2)岩心和成像测井揭示储层主要发育3期裂缝,E-W向和NE向剪裂缝主要与印支期和燕山末期的两次构造挤压有关,第三期NW向张裂缝则与喜山期的拉张运动有关,挤压作用是形成高密度缝的主要机制,后期的伸展作用是裂缝松弛形成储集空间的必要条件。

(3)下古生界碳酸盐岩潜山储层经历了3期岩溶作用,分别为加里东稳定背景的常规岩溶、印支期挤压背景的褶皱高地岩溶和燕山期-新生代早期伸展背景的断块地垒岩溶,多期次构造裂缝与多期岩溶耦合形成了多期次裂缝相关岩溶储层。

## 参考文献:

- [1] Weeks A W. Geology of Petroleum[M]. Geology of Petroleum, 1967.
- [2] 贾承造, 庞雄奇, 姜福杰. 中国油气资源研究现状与发展方向 [J]. 石油科学通报, 2016, 1(1): 2-23.  
Jia Chengzao, Pang Xiongqi, Jiang Fujie. Research status and development directions of hydrocarbon resources in China[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2016, 1(1): 2-23.
- [3] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 深层、超深层碳酸盐岩油气储层形成机理研究综述 [J]. 地学前缘, 2011, 18(4): 181-192.  
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong. The research status and advances in porosity evolution and diagenesis of deep carbonate reservoir[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(4): 181-192.
- [4] 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.
- [5] 李慧勇, 牛成民, 许鹏, 等. 渤中 13-2 大型整装覆盖型潜山油气田的发现及其油气勘探意义 [J]. 天然气工业, 2021, 41(2): 19-26.  
Li Huiyong, Niu Chengmin, Xu Peng, et al. Discovery of Bozhong 13-2 Archeanlarge monoblockvolatile buried hill oilfield and its oil and gas exploration significance[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(2): 19-26.
- [6] 杨培山, 李功治. 任丘碳酸盐岩油藏的开发 [J]. 石油学报, 1980(4): 57-64.  
Yang Peishan, Li Gongzhi. Development of carbonate reservoirs in the Renqiu oil field[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1980(4): 57-64.
- [7] 胡安文, 王飞龙, 王广源, 等. 渤海湾盆地渤中凹陷渤中 21-22 构造区 CO<sub>2</sub> 成因及其对油气成藏的影响 [J]. 天然气地球科学, 2023, 34(12): 2151-2159.  
Hu Anwen, Wang Feilong, Wang Guangyuan, et al. The origin of CO<sub>2</sub> and its influence on oil and gas accumulation in Bozhong 21-22 structure in the Bozhong Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(12): 2151-2159.
- [8] 周心怀. 渤中 28-2 南油田成藏模式及其勘探意义 [J]. 中国海上油气, 2012, 24(5): 1-5, 10.  
Zhou Xinhui. The accumulation model of BZ28-2S oilfield and its exploration significance[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2012, 24(5): 1-5, 10.
- [9] 于海波, 王德英, 牛成民, 等. 渤海海域渤南低凸起碳酸盐岩潜山储层特征及形成机制 [J]. 石油实验地质, 2015, 37(2): 150-156, 163.  
Yu Haibo, Wang Deying, Niu Chengmin, et al. Characteristics and formation mechanisms of buried hill carbonate reservoirs in Bonan Low Uplift, Bohai Bay[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(2): 150-156, 163.
- [10] 叶涛, 王清斌, 黄志, 等. 碳酸盐岩层序地层格架对岩溶储层的控制作用——以渤海西南海域下古生界为例 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(4): 991-1005.  
Ye Tao, Wang Qingbin, Huang Zhi, et al. Characteristic of sequence stratigraphic framework and its controls on reservoir: a case study of Lower-Paleozoic carbonate in southwest area of Bohai sea[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(4): 991-1005.
- [11] 余一欣, 周心怀, 徐长贵, 等. 渤海海域新生代断裂发育特征及形成机制 [J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(2): 273-279.  
Yu Yixin, Zhou Xinhui, Xu Changgui, et al. Characteristics and formation mechanisms of the Cenozoic faults in the Bohai Sea waters[J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(2): 273-279.
- [12] 马小明, 余元洲, 李云, 等. 千米桥古潜山凝析气藏油气富集规律新认识 [J]. 天然气工业, 2009, 29(4): 25-26.  
Ma Xiaoming, Yu Yuanzhou, Li Yun, et al. Research on hydrocarbon enrichment in condensate gas reservoirs in Qianmiaoqiao buried hill[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(4): 25-26.
- [13] Liu Dawei, Cai Chunfang, Hu Yongjie, et al. Multistage dolomitization and formation of ultra-deep Lower Cambrian Longwangmiao-formation reservoir in central Sichuan Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 123: 104752.
- [14] 刘树根, 时华星, 王国芝, 等. 桩海潜山下古生界碳酸盐岩储层形成作用研究 [J]. 天然气工业, 2007, 27(10): 1-5.  
Liu Shugen, Shi Huaxing, Wang Guozhi, et al. Formation mechanism of Lower Paleozoic carbonate reservoirs in Zhuanghai buried

- hill[J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(10): 1–5.
- [15] 王颖, 王英民, 赵锡奎, 等. 济阳拗陷断块型潜山油气成藏特征 [J]. *天然气工业*, 2005, 25(2): 10–13.  
Wang Ying, Wang Yingmin, Zhao Xikui, et al. Oil and gas reservoir formation characteristics of fault-block buried hills in Jiyang Depression[J]. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(2): 10–13.
- [16] 马帅, 王永诗, 王学军, 等. 济阳拗陷下古生界潜山内幕型白云岩储层发育特征及成因机理 [J]. *地质论评*, 2023, 69(S1): 279–280.  
Ma Shuai, Wang Yongshi, Wang Xuejun, et al. Characteristics and genetic mechanism of inner buried hill dolomite reservoir in Lower Paleozoic of Jiyang Depression[J]. *Geological Review*, 2023, 69(S1): 279–280.
- [17] 胡志伟, 吕丁友, 王德英, 等. 渤海海域前新生代关键构造期变形特征与潜山油气成藏意义 [J]. *中国海上油气*, 2023, 35(1): 50–62.  
Hu Zhiwei, Lü Dingyou, Wang Deying, et al. Deformation characteristics of critical tectonic periods during pre-Cenozoic and significance of buried hill hydrocarbon accumulation in the Bohai Sea area[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2023, 35(1): 50–62.
- [18] Ye Tao, Chen Anqing, Niu Chengming, et al. Effective fractures linked with tectonic reactivation and multiple genetic fluids in the ultradeep Paleozoic carbonate buried hills of the BozhongSag, North China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 140: 105642.
- [19] Huang Zhi, Yang Haifeng, Ye Tao, et al. Characteristics and formation mechanism of Carbonate buried hill fractured-dissolved reservoirs in Bohai Sea, Bohai Bay Basin, China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 11: 1135905.
- [20] 姜福杰, 郭婧, 庞雄奇, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷全油气系统 3 类油气资源联合评价 [J]. *石油学报*, 2023, 44(9): 1472–1486.  
Jiang Fujie, Guo Jing, Pang Xiongqi, et al. Joint evaluation of three types of oil-gas resources in whole petroleum system of Nanpusag, BohaiBay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(9): 1472–1486.
- [21] 王洪宇, 付晓飞, 王海学, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷断裂活动定量分析和评价对油气成藏的控制作用研究 [J]. *地质学报*, 2020, 94(10): 3062–3073.  
Wang Hongyu, Fu Xiaofei, Wang Haixue, et al. Research on the controlling effect of quantitative analysis and evaluation of fault activity on oil and gas accumulation in QikouSag of Bohai Bay Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(10): 3062–3073.
- [22] 郝奕玮, 骆满生, 徐增连, 等. 华北陆块新元古代–中生代沉积盆地划分及其构造演化 [J]. *地球科学*, 2014, 39(8): 1230–1242.  
Hao Yiwei, Luo Mansheng, Xu Zenglian, et al. Division of sedimentary basins and its tectonic evolution in North China from new-proterozoic to Mesozoic[J]. *Earth Science*, 2014, 39(8): 1230–1242.
- [23] 侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 渤海湾盆地中、新生代构造演化研究 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 2001, 37(6): 845–851.  
Hou Guiting, Qian Xianglin, Cai Dongsheng. The tectonic evolution of Bohai Basin in Mesozoic and Cenozoic time[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2001, 37(6): 845–851.
- [24] 李卓, 郭诚, 周立业, 等. 渤海 S 油田下古生界碳酸盐岩储层主控因素分析 [J]. *广东石油化工学院学报*, 2019, 29(3): 5–9.  
Li Zhuo, Guo Cheng, Zhou Liye, et al. Analysis on main controlling factors of Lower Paleozoic carbonate reservoir in Bohai S oil field[J]. *Journal of Guangdong University of Petrochemical Technology*, 2019, 29(3): 5–9.
- [25] 李阳, 金强, 钟建华, 等. 塔河油田奥陶系岩溶分带及缝洞结构特征 [J]. *石油学报*, 2016, 37(3): 289–298.  
Li Yang, Jin Qiang, Zhong Jianhua, et al. Karst zonings and fracture-cave structure characteristics of Ordovician reservoirs in Tahe oil-field, Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(3): 289–298.
- [26] 柳建华, 蔺学曼, 张卫锋, 等. 塔河油田碳酸盐岩储层有效性测井评价实践与思考 [J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(6): 950–958.  
Liu Jianhua, Lin Xuemin, Zhang Weifeng, et al. Logging evaluation of carbonate reservoir effectiveness in Tahe oilfield, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(6): 950–958.
- [27] 董亨茂. 成像测井资料在构造裂缝预测和评价中的应用 [J]. *天然气工业*, 2006, 26(9): 58–61.  
Dong Hengmao. Application of imaging well logging data in prediction of structural fracture[J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(9): 58–61.
- [28] 丁文龙, 漆立新, 吕海涛, 等. 利用 FMI 资料分析塔河油田南部中–下奥陶统储层构造应力场 [J]. *现代地质*, 2009, 23(5): 852–859.  
Ding Wenlong, Qi Lixin, Lü Haitao, et al. Analysis of the Lower-Middle Ordovician reservoir tectonic stress field using FMI data in the south of Tahe Oilfield[J]. *Geoscience*, 2009, 23(5): 852–859.
- [29] 黄继新, 彭仕宓, 王小军, 等. 成像测井资料在裂缝和地应力研究中的应用 [J]. *石油学报*, 2006, 27(6): 65–69.  
Huang Jixin, Peng Shimi, Wang Xiaojun, et al. Applications of imaging logging data in the research of fracture and ground stress[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(6): 65–69.
- [30] 邓虎成, 周文, 周秋媚, 等. 新场气田须二气藏天然裂缝有效性定量表征方法及应用 [J]. *岩石学报*, 2013, 29(3): 1087–1097.  
Deng Hucheng, Zhou Wen, Zhou Qiumei, et al. Quantification characterization of the valid natural fractures in the 2<sup>nd</sup>XuMember, Xinchang gas field[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(3): 1087–1097.
- [31] 翟明国. 克拉通化与华北陆块的形成 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(8): 1037–1046.  
Zhai Mingguo. Cratonization and the Ancient North China continent[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2011, 41(8): 1037–1046.
- [32] 李勇, 钟建华, 温志峰, 等. 印支运动对济阳拗陷构造形态形成演化的影响 [J]. *地质论评*, 2006, 52(3): 321–330.  
Li Yong, Zhong Jianhua, Wen Zhifeng, et al. Effects of Indosinian movements on tectonic formation and evolution, Jiyang Depression[J]. *Geological Review*, 2006, 52(3): 321–330.
- [33] 索艳慧, 李三忠, 曹现志, 等. 中国东部中生代反转构造及其记录的大洋板块俯冲过程 [J]. *地学前缘*, 2017, 24(4): 249–267.  
Suo Yanhui, Li Sanzhong, Cao Xianzhi, et al. Mesozoic-Cenozoic inversion tectonics of East China and its implications for the subduc-

- tion process of the oceanic plate[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(4): 249–267.
- [34] 王宇, 徐春强, 郭玲莉, 等. 渤海湾盆地石臼坨东 428 潜山构造成因解析: 华北克拉通破坏的深度揭示 [J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(1): 219–228.  
Wang Yu, Xu Chunqiang, Guo Lingli, et al. Structural analysis of Shijiutuo east 428 buried hill in Bohai Bay Basin: implications on destruction of the North China Craton[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(1): 219–228.
- [35] Allen M B, Macdonald D I M, Xun Zhao, et al. Early Cenozoic two-phase extension and Late Cenozoic thermal subsidence and inversion of the Bohai Basin, northern China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1997, 14(7/8): 951–972.
- [36] Liang Jintong, Wang Hongliang, Bai Ying, et al. Cenozoic tectonic evolution of the Bohai Bay Basin and its coupling relationship with Pacific Plate subduction[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 127: 257–266.
- [37] 黄雷, 周心怀, 刘池洋, 等. 渤海海域新生代盆地演化的重要转折期——证据及区域动力学分析 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(6): 893–904.  
Huang Lei, Zhou Xinhuai, Liu Chiyang, et al. The important turning points during evolution of Cenozoic Basin offshore the Bohai Sea: evidence and regional dynamics analysis[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(3): 476–487.
- [38] 邵晓州, 王苗苗, 惠潇, 等. 鄂尔多斯盆地盐池地区裂缝特征、形成期次及发育模式 [J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(10): 1510–1513.  
Shao Xiaozhou, Wang Miaomiao, Hui Xiao, et al. Characteristics, formation stages and development model of fractures in Yanchi area, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(10): 1510–1513.
- [39] 王国亭, 程立华, 孟德伟, 等. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系古岩溶型碳酸盐岩致密储层特征、形成机理与天然气富集潜力 [J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(4): 685–695.  
Wang Guoting, Cheng Lihua, Meng Dewei, et al. Characterization and formation of the Ordovician tight paleokarst carbonates in the eastern Ordos Basin and its gas accumulation[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(4): 685–695.
- [40] 傅恒, 韩建辉, 孟万斌, 等. 塔里木盆地塔中北坡奥陶系碳酸盐岩岩溶储层的形成机理 [J]. *天然气工业*, 2017, 37(3): 25–36.  
Fu Heng, Han Jianhui, Meng Wanbin, et al. Forming mechanism of the Ordovician karst carbonate reservoirs on the northern slope of Central Tarim Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(3): 25–36.
- [41] 倪新锋, 张丽娟, 沈安江, 等. 塔里木盆地英买力-哈拉哈塘地区奥陶系碳酸盐岩岩溶型储层特征及成因 [J]. *沉积学报*, 2011, 29(3): 465–474.  
Ni Xinfeng, Zhang Lijuan, Shen Anjiang, et al. Characteristics and genesis of Ordovician carbonate karst reservoir in Yingmaili-Halahatang area, Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(3): 465–474.
- [42] 夏明军, 戴金星, 邹才能, 等. 鄂尔多斯盆地南部加里东期岩溶古地貌与天然气成藏条件分析 [J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(3): 291–298, 315.  
Xia Mingjun, Dai Jinxing, Zhou Caineng, et al. Caledonian karst palaeogeomorphology and the forming condition of gas pool, southern Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(3): 291–298, 315.
- [43] 王淑萍. 塔河油田下奥陶统碳酸盐岩缝洞型储层结构特征及成因模式 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2015.  
Wang Shuping. Structural characteristics and genetic model of Lower Ordovician carbonate reservoirs in Tahe Oilfield[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015.
- [44] 李伟, 吴智平, 赵文栋. 渤海湾盆地燕山期构造特征与盆地转型 [J]. *地球物理学进展*, 2010, 25(6): 2068–2077.  
Li Wei, Wu Zhiping, Zhao Wendong. Structural characteristics and Basin transformation in the Bohai Bay Basin in the Yanshan era[J]. *Progress in Geophysics*, 2010, 25(6): 2068–2077.
- [45] Luo Jian, Cao Haiyang, Chiarella D, et al. Ultra-deep carbonate basement reservoirs formed by polyphase fracture-related karstification in the Offshore Bohai Bay Basin, China[J]. *Petroleum Science*, 2023, 20(4): 2009–2025.
- [46] 侯贵廷, 叶良新, 杜庆娥. 渤张断裂带的构造机制及其地质意义 [J]. *地质科学*, 1999, 34(3): 375–380.  
Hou Guiting, Ye Liangxin, Du Qinge. Tectonic mechanism and geological significance of the Bozhang fault zone[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1999, 34(3): 375–380.

## The control mechanism of multi-stage fracture-related karst reservoirs of carbonate buried hills in Bohai Bay Basin

Wang Zeji<sup>1,2</sup>, Chen Anqing<sup>1,2</sup>, Li Huiyong<sup>3</sup>, Wang Qingbin<sup>3</sup>, Zhou Xuewei<sup>1,2</sup>, Ye Tao<sup>2,3</sup>,  
Luo Jian<sup>1,2</sup>, Xiao Shuguang<sup>3</sup>, Hou Mingcai<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Deep-Time Geography and Environment Reconstruction and Applications of Ministry of Natural Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. CNOOC (China) Tianjin Branch, Tianjin 300459, China)

**Abstract:** The buried hill oil and gas reservoirs have become an important exploration field in China's marine basins. The northwestern area of Shaleitian area of Bohai Bay Basin is a typical carbonate buried hill zone. Due to the lack of research on the reservoir control effect of multiple stage fractures and their related karstification, the oil and gas exploration of carbonate buried hills is restricted. This paper conducts a detailed analysis of the development characteristics of the fracture-cave system in carbonate buried hill reservoirs in the northwestern Shaleitian Uplift, and studies the reservoir control effects of fractures and karst. The results indicate that the lower Paleozoic carbonate buried hills in the northwestern area of Shaleitian Uplift belong to fracture related karst reservoirs. The reservoir space includes dissolution pores, structural fractures, and expansion pores along the structural fractures. High quality reservoirs have lithological selectivity, and fractures and dissolution pores developed in microlite crystalline dolomite and fine crystalline dolomite are better. The reservoir mainly develops three sets of fractures, with E-W and NE oriented shear fractures mainly related to two tectonic compressions during the Indosinian and Late Yanshanian. The third set of NW oriented tensile fractures is related to the intracratonic movement during the Himalayan orogeny, and compression is the main mechanism for forming high-density fractures. The later stage of extension is a necessary condition for the relaxation of fractures to form reservoir spaces. The Lower Paleozoic carbonate buried hill reservoirs have undergone three stages of karstification, which are karstification in the steady Caledonian tectonic background, karstification in the Indosinian compressive background, and fault block-horst karstification in the Yanshanian-Himalayan extensional background. In summary, the carbonate buried hill reservoirs in the northwestern Shaleitian Uplift are formed by multiple stages and multiple types of tectonic-karst processes, and the analysis of the differences in the degree of recombination in different structural parts is an important factor in understanding the reservoir formation mechanism.

**Key words:** buried hill reservoir; carbonate rock; fracture; karstification; Bohai Bay Basin