

## 渤海海域沙垒田凸起西北部奥陶系 碳酸盐岩储层发育主控因素与分布预测

王粤川, 韦阿娟, 高坤顺, 彭靖淞, 郭颖, 黄志

(中海石油(中国)有限公司天津分公司)

**摘要** 基于岩心、薄片观察以及同位素、稀土元素等分析资料,明确了渤海海域沙垒田凸起西北部奥陶系碳酸盐岩潜山储层岩性主要为白云岩,储集空间包括溶蚀孔、洞、缝,储层类型为裂缝-孔隙型,裂缝是沟通孔洞的重要通道。储层演化机制上,碳酸盐岩白云石化作用、岩溶作用和构造作用是储层发育的主控因素;白云石化作用是储层发育的基础,岩溶作用是储层发育的重要保障,构造作用是储层发育的关键。地震地质储层综合预测表明研究区西南部为风化壳岩溶储层发育的有利地区。

**关键词** 渤海海域; 沙垒田凸起; 奥陶系; 碳酸盐岩储层; 储层预测; 控制因素

**中图分类号**: TE122.2 **文献标识码**: A

随着新生代含油气层系勘探的不断深入,渤海海域急需寻找新的勘探领域。中国陆上海相碳酸盐岩油气资源丰富,在中西部塔里木、四川和鄂尔多斯等海相盆地已探明大量油气<sup>[1]</sup>,东部渤海湾盆地在下古生界奥陶系和中上元古界蓟县系海相碳酸盐岩中也已发现较多油气<sup>[2-3]</sup>。潜山,作为渤海湾盆地陆上油气勘探已被证实的重要领域之一,它在渤海海域由于受地理条件和勘探开发成本的限制,油气勘探程度远低于陆上的平均水平<sup>[2,4]</sup>。鉴于渤海海域下古生界海相碳酸盐岩分布更为广泛,故海域的海相碳酸盐岩潜山应是一个重要的勘探领域。

渤海海域沙垒田凸起西北部的奥陶系碳酸盐岩潜山,油气地质条件优越,但钻井揭示的储层非均质性强,储层分布规律不清,这严重制约了后续勘探评价。中国陆上海相碳酸盐岩勘探实践证明,碳酸盐岩储层类型多样,不同构造背景和沉积背景下碳酸盐岩储层控制因素和分布规律不同<sup>[1,5]</sup>。现根据渤海湾盆地奥陶系海相碳酸盐岩形成和演化的地质背景<sup>[2]</sup>,在借鉴中国陆上海相碳酸盐岩储层发育主控因素<sup>[5-7]</sup>和储层成因<sup>[8-10]</sup>等相关研究基础上,利用研究区内已

有录井、测井、岩心等资料以及薄片鉴定、扫描电镜分析和地球化学分析等技术手段,对沙垒田凸起西北部奥陶系碳酸盐岩储层特征、发育控制因素及储层展布等开展研究,期望研究结果不仅可以指导勘探部署,同时也能对渤海海域周边碳酸盐岩储层研究有一定的借鉴作用。

### 1 地质概况

沙垒田凸起位于渤海湾盆地渤海海域西部,北以斜坡与南堡凹陷相连,西部、南部分别以边界断裂与歧口凹陷、沙南凹陷相接(图1)。研究区及周边下古生界奥陶系整体属于地表海沉积<sup>[2]</sup>,受加里东运动抬升剥蚀,缺少顶部地层,自下而上包括冶里组、亮甲山组、下马家沟组、上马家沟组的石灰岩和白云岩沉积(图2)。加里东运动后,该区沉积了石炭系—二叠系海陆交互相砂岩、泥岩夹薄层海相石灰岩和煤层,在沉积晚期经历了海西构造运动,产生平行不整合。中生代早期该区经历了印支期强烈的挤压推覆,全区大范围缺失石炭系—二叠系,之后受燕山运动负反转影响,沉积了侏罗系—白垩系河湖相砂岩、泥岩和火山岩夹煤

收稿日期: 2015-08-04; 改回日期: 2015-11-09

本文为国家重大科技专项“近海隐蔽油气藏勘探技术”(编号: 2011ZX05023-002)部分成果

王粤川: 1980年生,2006年毕业于大庆石油学院矿产普查与勘探专业,现为渤海石油研究院高级工程师,主要从事储层与勘探地质研究工作。通讯地址: 300452 天津塘沽闸北路 609 信箱; E-mail: wangych@cnooc.com.cn

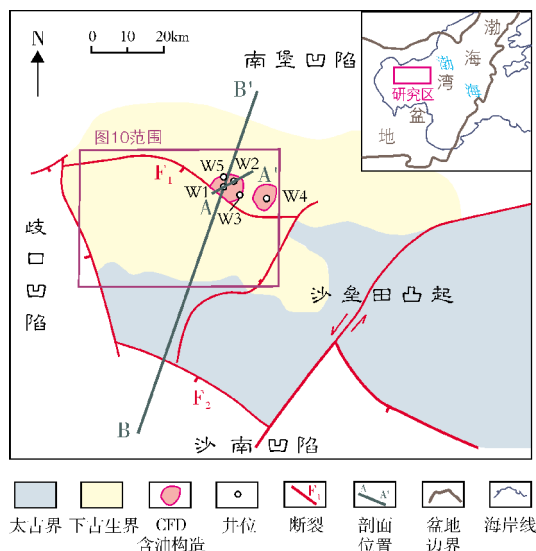


图 1 渤海海域沙垒田凸起构造位置  
及前新生界地层分布

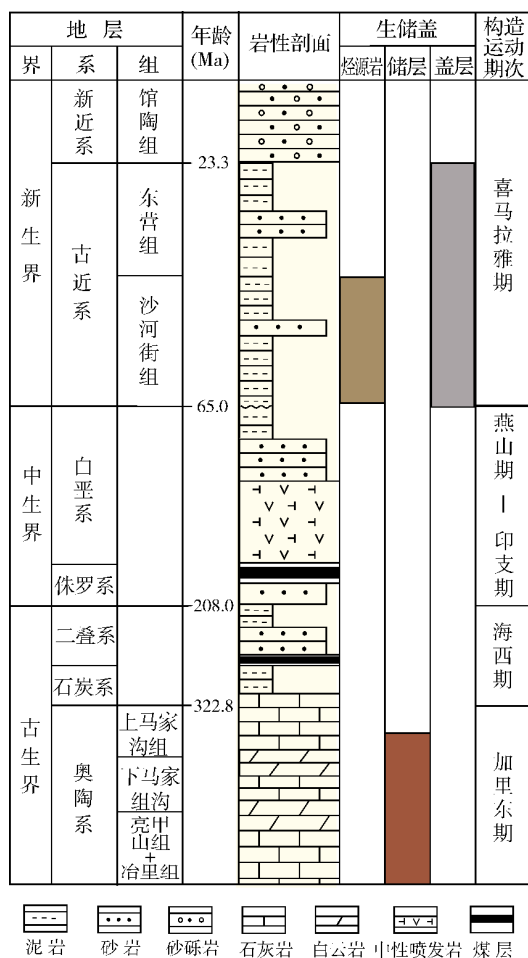


图 2 沙垒田凸起及周边地层综合柱状图

层(图2),在燕山运动末期,强烈正反转剥蚀早期地层,最终形成沙垒田凸起主体为太古界花岗岩、仅西北部残留下古生界奥陶系碳酸盐岩的面貌(图1)。新生代喜马拉雅运动早期,凸起主体一直是一个隆起剥蚀区,仅西北部斜坡在古近纪沉积了沙河街组和东营组厚层湖相泥岩夹砂岩;晚期,凸起和西北部斜坡同时接受新近纪馆陶组巨厚辫状河砂砾岩沉积(图2)。

沙垒田凸起西北部奥陶系碳酸盐岩目前已勘探发现CFD含油构造(图1,图3);不整合型圈闭、断裂—不整合型圈闭发育;上覆的古近系东营组和沙河街组泥岩是良好的盖层;邻近凹陷的沙河街组泥岩已经成熟,可以直接向下伏奥陶系碳酸盐岩供烃;油气通过不整合面和断层进行立体输导,油气运移条件好。从CFD构造钻井揭示的储层非均质性较强来看,储层发育程度为该区油气成藏的主控因素。

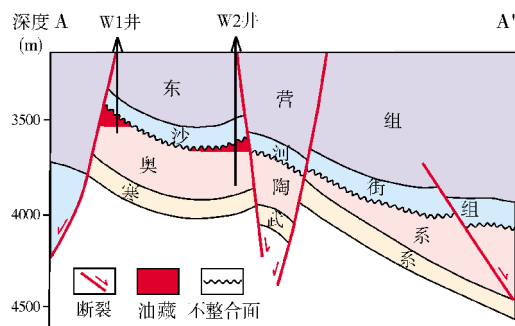


图 3 沙垒田凸起 CFD 构造北东—南西向油藏剖面  
A—A'剖面位置见图 1

## 2 储层特征

### 2.1 储层岩石学特征

根据 CFD 构造 W1 井、W2 井岩心的详细观察和 75 块岩石薄片的统计分析,沙垒田凸起西北部奥陶系碳酸盐岩储层的岩性主要为白云岩,包括泥—微晶白云岩、粉—细晶白云岩和角砾白云岩,其次为白云质灰岩和石灰岩(图 4)。白云岩主要成分是白云石,方解石含量一般不超过 10%,陆源碎屑主要为泥质,晶粒白云岩和角砾白云岩相对于泥质白云岩而言,泥质含量较低,含量为 1%~4%。其中,泥质白云岩和泥—微晶白云岩一般由晶径小于 0.004 mm 的微晶白云石组成,常见的构造有水

平—微波状纹层、泥裂、鸟眼构造(图4a);角砾白云岩的角砾大小为0.2~4.0 cm,以棱角状为主,成分较为单一,多为微晶白云石,角砾间主要被就近围岩溶蚀供给的碳酸盐岩碎屑、泥—微晶白云石

以及石英和方解石充填(图4b);粉—细晶白云岩的白云石大小较均匀,形态以半自形—自形晶为主,以白云石普遍具“雾心亮边”结构为其显著特征(图4c)。

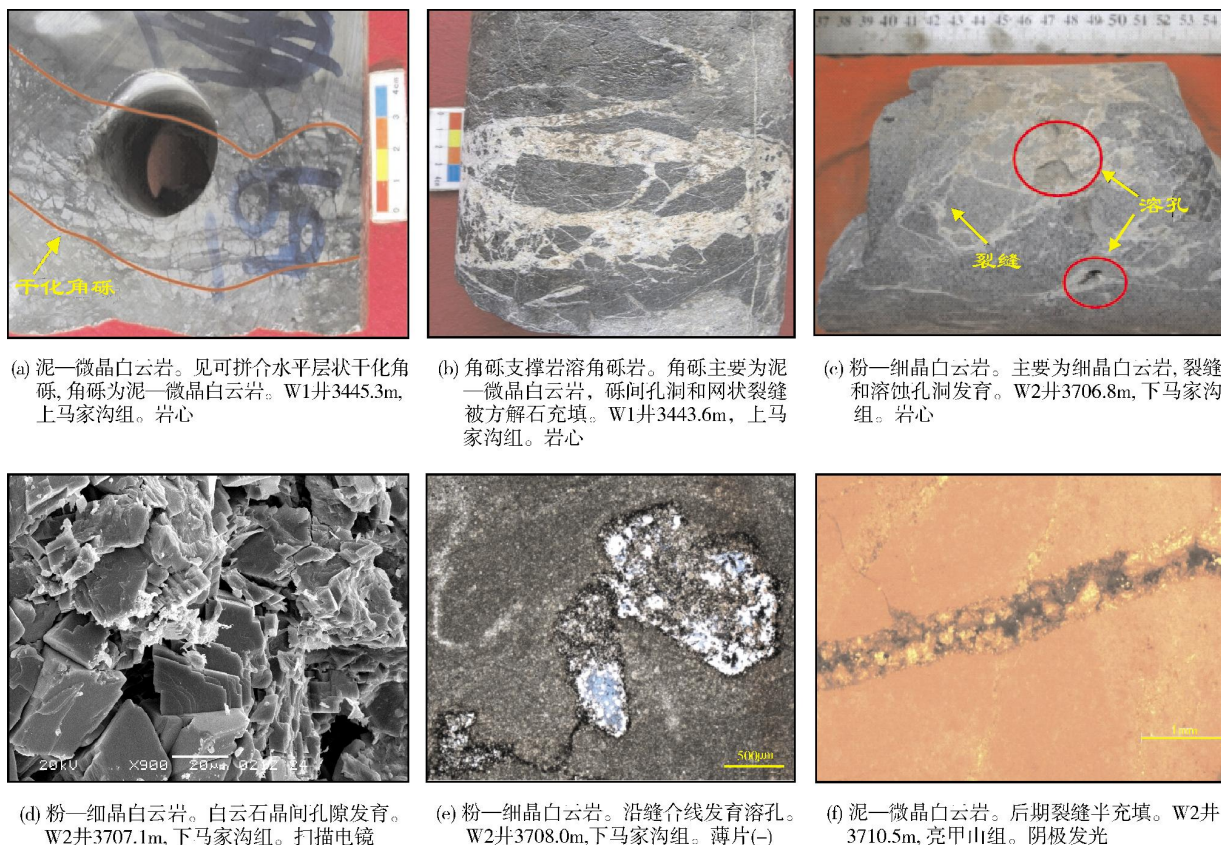


图4 沙垒田凸起奥陶系碳酸盐岩岩石学特征及储集空间

## 2.2 储集空间类型及物性

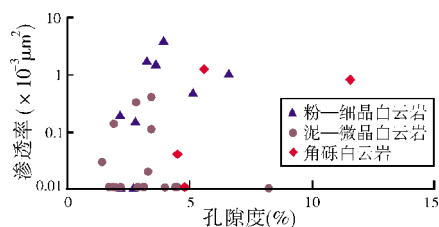
根据CFD构造已钻井岩心、薄片鉴定等资料分析,沙垒田凸起西北部奥陶系碳酸盐岩储层的储集空间类型多样,包括孔隙、溶洞和裂缝。孔隙是主要储集空间之一,以晶间孔隙和晶间溶孔为主,其次为粒间溶孔和粒内溶孔(图4c—4e);溶洞不太发育,在钻井过程中未见明显的漏失与放空,主要在潜山顶部分发育砾间洞和砾间溶洞,洞径一般小于5 mm,呈多棱角不规则状,几乎全被白云石、方解石、硅质和泥质所充填(图4b);裂缝较发育,岩心观察裂缝密度15条/m,裂缝以高角度缝和斜交缝为主,按成因可分为成岩缝、构造缝和溶蚀缝,按形成期次构造缝可进一步分为早期裂缝和晚期裂缝,早期裂缝一般被

方解石、白云石、硅质全充填,晚期裂缝为半充填和未充填(图4f)。因此,该区奥陶系碳酸盐岩储层储集空间主要为孔隙和裂缝,储层类型为裂缝—孔隙型,且裂缝为溶蚀作用和油气运移提供重要的渗流通道条件,在裂缝中可见沥青,沿裂缝可见溶蚀孔隙发育(图4e)。

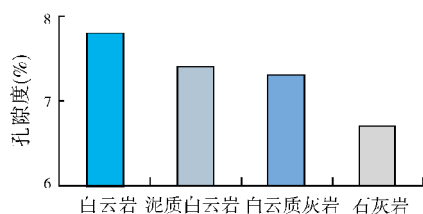
CFD构造W1井、W2井奥陶系碳酸盐岩岩心50个小岩样的孔渗统计结果(图5a)表明,孔隙度为1.4%~11.6%,平均为3.8%,主体部分为2%~6%,其样品数占样品总数的比例超过80%;渗透率为 $(0.01\sim3.8)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,平均为 $0.4\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,渗透率变化范围较大,并且分布较为分散。尽管5口井(W1井—W5井)不同岩类储层的测井解释孔隙度(图5b)明显高于岩样实测孔隙度,但由于小岩样物性主要



代表基质物性,故实测孔渗结果仍反映出碳酸盐岩基质物性的低孔、低渗特征,且渗透率与孔隙度之间正相关性不强,说明储层以裂缝为主要的渗流通道,储层类型为裂缝—孔隙型。



(a) 小岩样实测孔隙度、渗透率散点图



(b) 不同岩类测井平均孔隙度直方图

图5 沙垒田凸起奥陶系碳酸盐岩储层物性统计

### 3 储层发育的主控因素

碳酸盐岩储层在漫长的地质历史中形成和演

化,一般受沉积、成岩和构造三大地质因素的联合控制<sup>[6-8]</sup>。从沙垒田凸起西北部奥陶系油气勘探现状和碳酸盐岩储层研究结果看,白云石化作用、岩溶作用和构造作用是控制该区碳酸盐岩储层发育的主要因素,其中,白云石化作用是储层发育的基础,岩溶作用是储层发育的重要保障,构造作用是储层发育的关键。

#### 3.1 白云石化作用是储层发育的基础

勘探实践证明,白云岩储层是重要的碳酸盐岩储层<sup>[6]</sup>。CFD构造钻井揭示奥陶系碳酸盐岩储层岩性主要为白云岩和石灰岩(图6),结合前述不同岩性的测井解释平均孔隙度,白云岩>泥质白云岩>白云质灰岩>石灰岩,这表明白云岩类储集物性相对好于石灰岩类(图5b)。

白云岩相对于石灰岩储集物性较好,这与白云石化作用有关<sup>[9-10]</sup>,白云石化是一个通过方解石溶解和白云石沉淀使石灰岩转化为白云岩的过程,这一转变将使矿物体积缩小12%~13%,有利于晶间孔的发育(图4d),而在埋藏过程中,白云岩相对于石灰岩更具抗压实作用,这是影响深层碳酸盐岩储层孔隙保存的重要因素。相对于孔隙增加和保存来说,更为

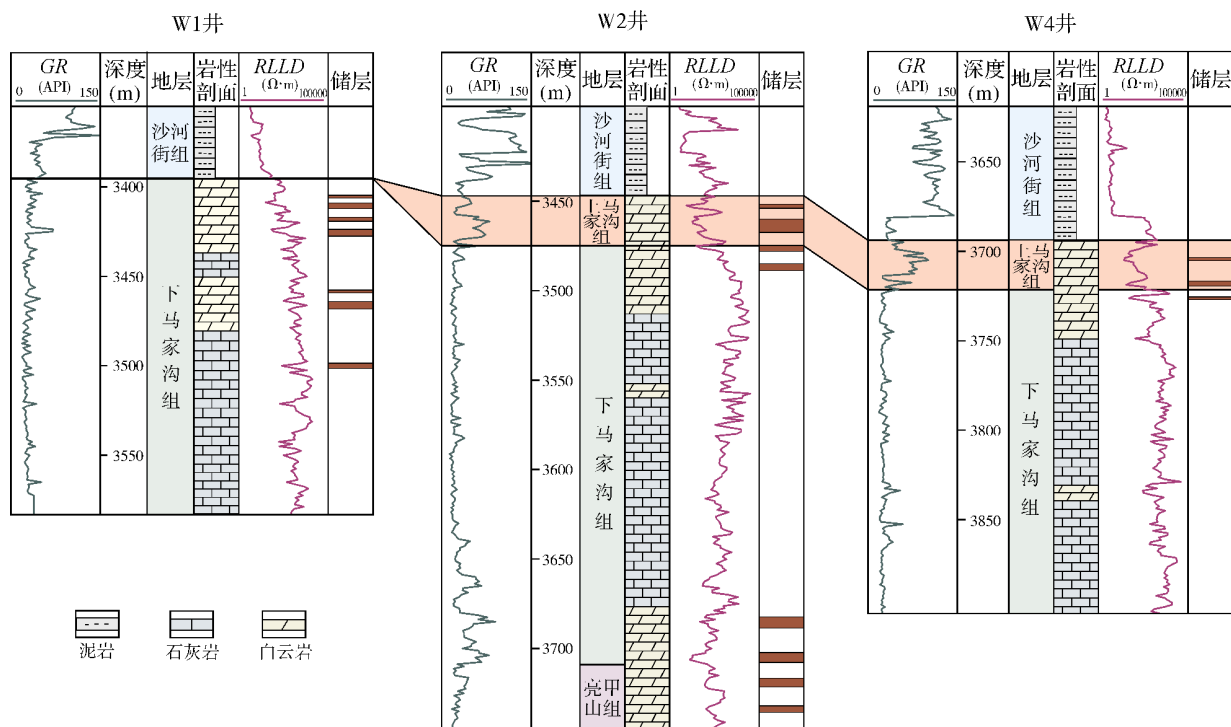


图6 沙垒田凸起奥陶系碳酸盐岩储层对比图

重要的是白云岩在深层有利于裂缝发育<sup>[5,10]</sup>,从而使渗透率明显增大,有利于地质流体通过,并为后期溶蚀(图4e)及储集物性改善奠定基础。

白云岩储层按成因可以分为准同生白云岩、渗透回流白云岩、埋藏白云岩和热液白云岩<sup>[11-12]</sup>。研究区上马家沟组和下马家沟组顶部准同生白云岩发育,岩性为泥—微晶白云岩,常见的构造有水平—微波状纹层(图4a)、泥裂、鸟眼构造。

参考和对比塔里木盆地白云岩成因类型<sup>[11]</sup>,沙垒田凸起CFD构造W2井下马家沟组底部和亮甲山组顶部10个白云岩岩心样品的白云石MgO—CaO关系呈线性负相关(图7a),这反映白云石为交代成因或重结晶成因,可以将其划分为埋藏、渗透回流两种成因类型,但从该区钻井揭示奥陶系石膏层不发育的情况看,渗透回流成因白云岩分布局限,应以埋藏成因白云岩为主。

另外,从白云石有序度测定结果看(图7b),W2井下马家沟组底部和亮甲山组顶部6个白云岩样品的白云石有序度平均值为0.83,明显高于上马家沟组、下马家沟组3个准同生白云岩样品的白云石有序度,这反映深部的白云石结晶程度较高,成为埋藏白云石化。

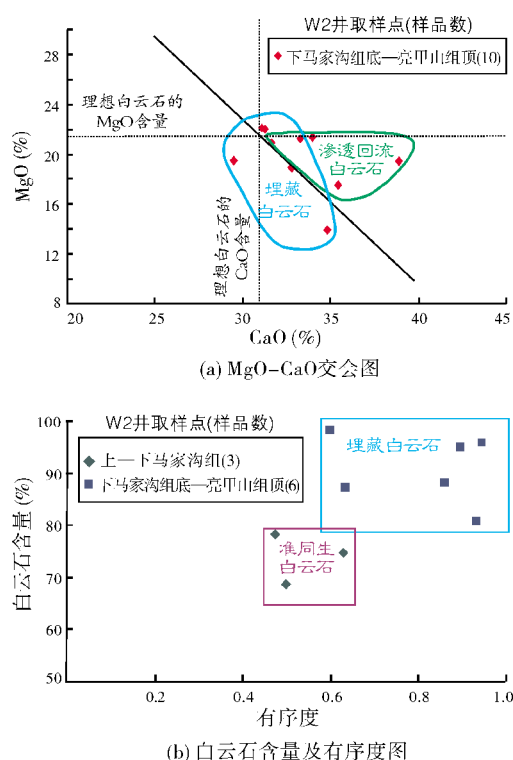


图7 沙垒田凸起奥陶系不同类型白云岩的地球化学特征

因此,沙垒田凸起西北部奥陶系主要发育埋藏白云岩和准同生白云岩,其中,埋藏白云岩的岩性为粉—细晶白云岩,其晶间孔和裂缝相对于准同生白云岩(泥—微晶白云岩)的要更发育(图4c—4f),实测物性统计结果也反映了二者储集物性的差异(图5a)。

### 3.2 岩溶作用是储层发育的重要保障

岩溶作用是指地表水(大气淡水)和地下酸性水对可溶性岩石的溶解、淋滤、侵蚀、搬运的改造过程及由此产生的地表与地下地质现象的总和,通常包括三种不同类型:准同生岩溶作用、表生岩溶作用和埋藏岩溶作用<sup>[13-14]</sup>。

沙垒田凸起西北部奥陶系经历了加里东、海西、印支、燕山和喜马拉雅多期构造运动,使多套地层遭受风化剥蚀,发生了表生岩溶作用,它们具有以下识别特征:(1)潜山顶部广泛分布岩溶角砾岩。岩溶角砾岩是岩溶作用的直接产物,也是判别古岩溶作用最直接的标志。根据岩心观察,该区可以识别出角砾支撑岩溶角砾岩(图4b),角砾成分主要为泥—微晶白云岩,角砾间主要被外部带入的泥、粉砂以及较细小的就近围岩溶蚀供给的碳酸盐岩溶蚀碎屑组成的基质充填,为原地溶蚀跨塌和堆积充填的成因特征。(2)碳酸盐岩围岩碳、氧同位素明显偏负的特征。岩溶作用过程中流体与碳酸盐岩发生化学反应,必然引起以海水的碳、氧同位素为基础的碳酸盐岩围岩同位素发生变化。并且,对于表生岩溶作用来说,由于大气淡水严重贫氧同位素,随着淋滤作用增强,将使氧同位素明显降低<sup>[15-16]</sup>。从CFD构造W2井潜山顶部碳、氧同位素测定结果(图8a)看,相对于奥陶纪海水,样品碳、氧同位素明显偏负,这说明遭受了强烈的大气淡水淋滤作用。正是在表生岩溶作用影响下,在潜山顶部形成了大量的溶蚀孔、洞、缝,钻井揭示的储层和高孔带也主要位于潜山顶部100 m范围内(图6),并且离潜山顶部距离越远,表生岩溶作用越弱,储层发育程度相对变差。

除潜山顶部表生岩溶作用形成的储层外,W2井揭示下马家沟组底部和亮甲山组顶部储层发育(图6),且该储层段正处于埋藏白云石化作用阶段。薄片观察以及碳氧同位素、稀土元素分析结果表明,该段储层的形成与晚期中—深埋藏阶段经历的埋藏

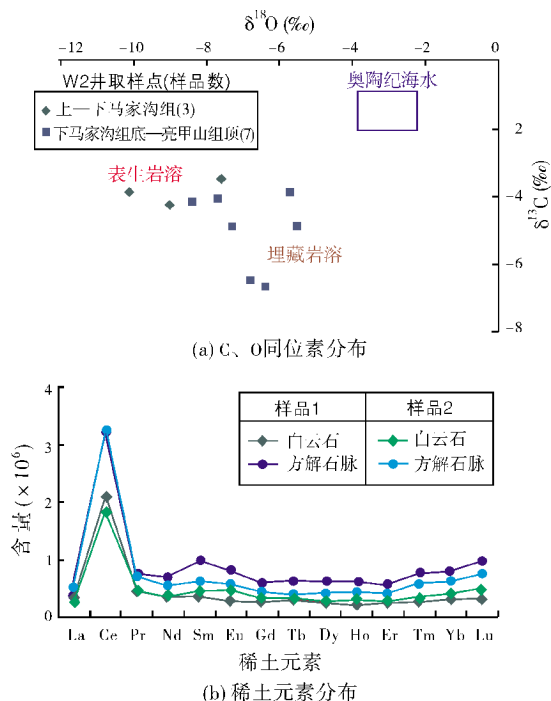


图8 沙垒田凸起奥陶系碳酸盐岩碳、氧同位素及稀土元素分布

岩溶作用有关。埋藏岩溶作用与表生岩溶作用最大的区别在于受淡水淋滤作用影响小,在相对封闭的环境中主要受烃源岩埋藏演化形成的酸性流体、碎屑岩压实热水、岩浆活动深部热液等各种流体的影响,导致岩石结构和成分发生一系列变化<sup>[14-17]</sup>。储层薄片分析见非选择性溶蚀孔隙发育(图4e),并且伴生沥青质,表现为典型的埋藏岩溶作用,与烃源岩大量排烃运移伴生的有机酸有关。

W2井下马家沟组底部和亮甲山组顶部储层7个样品的碳、氧同位素测定结果(图8a)表明,与表生岩溶储层3个样品的值相比,其氧同位素更高、碳同位素更偏负,这明显与有机酸带来的有机碳注入有关。

从该套地层2个样品的白云石、方解石脉的稀土元素统计结果(图8b)看,发生埋藏岩溶作用的白云岩全岩REE总体配分模式与海水类似<sup>[17]</sup>,即除Ce呈现一定程度正异常外,轻稀土元素较重稀土元素稍富集,这反映了成岩环境局限;此外,方解石脉REE升高,推断因为酸性流体对稀土元素具有较强的溶解作用而使得裂缝中流体的REE含量升高。因此,W2井下马家沟组底部和亮甲山组顶部储

层的形成主要与烃源岩生成的有机酸有关,这与该区烃源岩晚期大量排烃的时间相一致,烃类和有机酸沿原有孔、缝系统运移和溶蚀,早期埋藏白云石化作用形成的储集空间为后期岩溶作用的发生提供了有利条件。

### 3.3 构造作用是储层发育的关键

华北古生界经历了多次反复抬升和剥蚀,形成了七次岩溶期<sup>[6]</sup>,并且主要受印支期、燕山期和喜马拉雅期构造运动的影响,纵向上发育表生岩溶带、渗流岩溶带和潜流岩溶带等岩溶相带,形成了大量溶蚀孔、洞、缝。一般来讲,表生岩溶时间越长会越有利于岩溶相带的发育,埋藏时间越短则越有利于储集空间的保存<sup>[2]</sup>。

沙垒田凸起西北部奥陶系碳酸盐岩大体经历了两个发展阶段(图9):地台发育阶段(加里东期—海西期)和褶皱断陷发育阶段(印支期—喜马拉雅期)。根据陆上研究成果<sup>[2]</sup>,地台发育阶段,加里东期地层整体抬升,奥陶系遭受剥蚀程度较弱,受大气水风化淋滤,在地表有限范围形成了岩溶储层;海西期由于上覆石炭系—二叠系,奥陶系几乎未受岩溶作用影响,并且早期岩溶形成的孔、缝、洞被部分充填。褶皱断陷发育阶段,对研究区储层的形成更为重要。随着印支期强烈的挤压褶皱和逆冲推覆运动,上古生界普遍遭受剥蚀,奥陶系出露地表,经风化淋滤形成溶蚀孔、洞、缝;燕山早、中期,印支期的逆冲断裂发生负反转,除印支期褶皱主体部位未接受沉积外,其余地区被中生代沉积所覆盖,这不利于表生岩溶作用发育,仅在断裂附近伴生了构造裂缝,并且印支期形成的孔、洞、缝在埋藏过程中几乎全被充填;燕山末期构造活动最为强烈,断块翘倾和差异升降明显,断块高部位的中生界遭受剥蚀,奥陶系出露并重新遭受风化淋滤,且一直持续到喜马拉雅早期,从而形成了大量溶蚀孔、洞、缝。

由于燕山早、中期奥陶系未大范围出露接受风化淋滤,从CFD构造钻探结果看,潜山顶部岩溶储层分布在距潜山顶部100 m范围内,明显小于周边陆上同时期遭受强烈剥蚀区的储层纵向分布深度(一般>150 m<sup>[2,18]</sup>),且纵向岩溶相带发育不全,在钻井过程中未见明显漏失和放空,这说明不发育大的缝、洞;岩心观察、薄片分析表明,印支期、燕山早期发育的裂缝均被充填,而燕山末期产生的裂缝多数

未充填或半充填(图4f),这为后期地下流体活动提供了通道,有利于埋藏溶蚀作用的发生。燕山末期—喜马拉雅早期的构造活动对奥陶系碳酸盐岩储层发育具有决定作用,而早期的构造运动对储层形成影响较小。

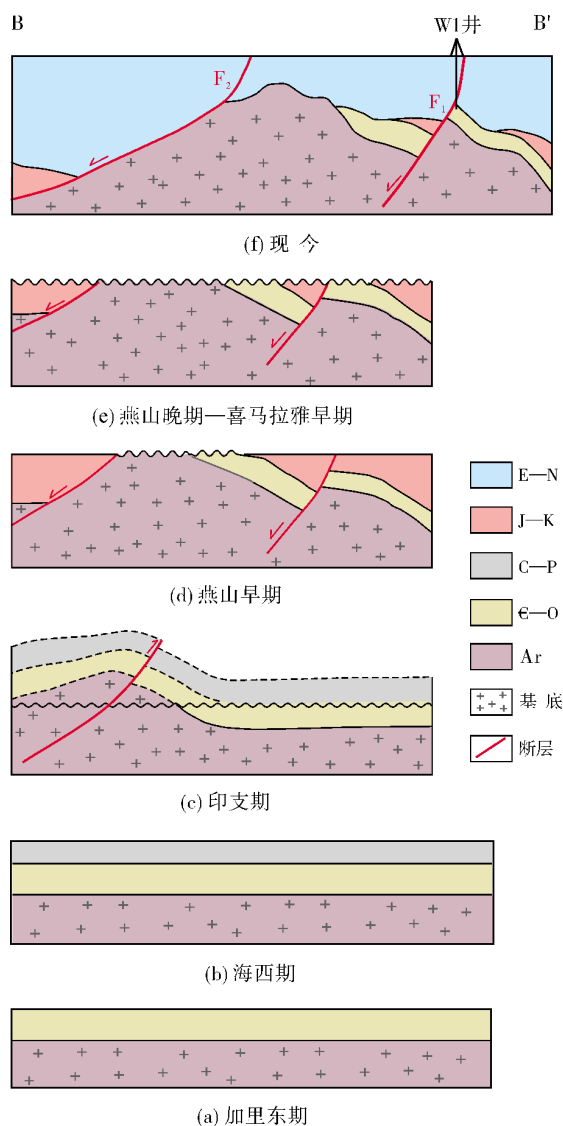


图9 沙垒田凸起构造演化剖面  
B—B'剖面位置见图1

#### 4 储层分布预测

沙垒田凸起西北部奥陶系碳酸盐岩储层主要包括埋藏岩溶形成的和表生岩溶形成的两种。由于埋藏岩溶储层的形成和分布相对较复杂<sup>[8]</sup>,故仅对风化壳岩溶储层的分布采用古地貌恢复基础上的频谱

分析方法开展预测,以期推动研究区奥陶系碳酸盐岩潜山勘探。

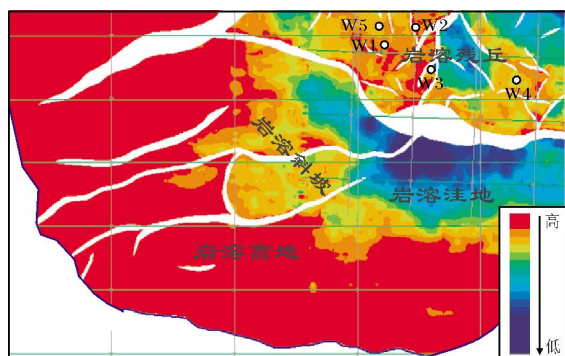
地质历史早期深埋地下的古岩溶地貌的恢复通常比较困难,目前国内常用的恢复方法有印模法、残余厚度法、“V”字填图法及地震模型预测法等<sup>[19]</sup>。由于研究区经历了多期构造运动,导致碳酸盐岩残余厚度与现今构造无直接关系,采用印模法难以消除后期运动对古地貌的影响,因此选择上覆地层厚度回剥法来恢复燕山末期—喜马拉雅早期这一关键成储时期的岩溶古地貌。恢复结果(见图10a)表明,潜山古岩溶地貌整体呈现由西南往东北方向变低的趋势,西南部早期古隆起特征明显,碳酸盐岩地层剥蚀强烈。根据古地貌形态以及奥陶系碳酸盐岩上覆地层的时代,将上覆古近系东营组的高古地貌地区划分为岩溶高地,将上覆古近系沙河街组的斜坡和丘形古地貌地区划分为岩溶斜坡以及岩溶残丘,将上覆中生界的负向古地貌划分为岩溶洼地。区内表生岩溶储层的发育与燕山末期—喜马拉雅早期古地貌高低关系明显,西南部岩溶高地经历了多次抬升剥蚀和风化淋滤,并且断裂发育,应为表生岩溶储层发育较为有利的地区(图9,图10a)。

从燕山末期—喜马拉雅早期的岩溶古地貌看,CFD构造位于岩溶残丘(图10a),W1、W2井在奥陶系潜山顶部均钻遇较发育的储层,而位于岩溶斜坡部位的W3、W4、W5井,由于岩溶作用相对较弱,储层发育程度较差(图6中W4井)。这进一步证实了燕山末期—喜马拉雅早期这一关键时期表生岩溶作用对储层发育的控制。

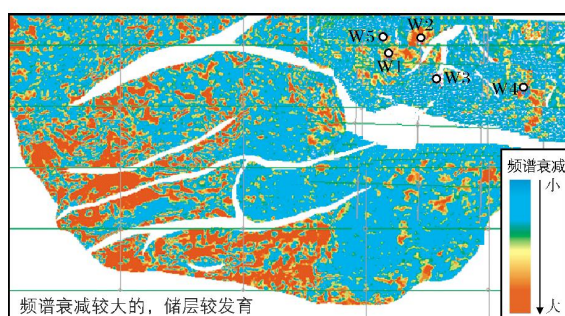
在岩溶古地貌刻画的基础上,开展了储层分布的地球物理预测,通过对已有预测方法的对比和优选<sup>[20]</sup>,最终采用频谱分析方法对奥陶系潜山顶部的表生岩溶储层进行预测。频谱分析目前广泛应用于储层及储层流体预测<sup>[21]</sup>,频谱即振幅随频率的变化关系,当地震波穿过储层时,其频谱关系通常都会改变,通过对比分析地震波在穿过目的层之前和穿过目的层之后的频谱,可以判断目的层储层的发育程度。

首先从CFD构造已钻井出发,由钻井道频谱分析可见,频谱能量在经过储层段后能量衰减特征明显,储层不发育段则无明显衰减特征,由此明确可以





(a) 燕山末期—喜马拉雅早期岩溶古地貌(白色为断层)



(b) 频谱衰减属性(白色为断层)

图10 沙垒田凸起西北部奥陶系碳酸盐岩储层地震地质预测

通过提取频谱衰减属性对储层发育的有利区域进行预测。沙垒田凸起奥陶系碳酸盐岩潜山顶部频谱衰减属性提取结果(图10b)表明,奥陶系分布区西南部频谱能量的衰减要比东北部CFD构造的更明显,且衰减分布范围更大,据此推测研究区西南部为奥陶系碳酸盐岩储层发育的有利地区,这个分布区与岩溶高地及断裂分布区有较好的对应性,这间接说明了岩溶古地貌及构造对储层的控制作用。从成藏条件看,西南部岩溶高地紧邻西部歧口凹陷(图1)以及东北部的沙河街组烃源岩发育区,油气沿不整合面和断层运移(图3),并在潜山背斜、断块等圈闭中聚集成藏,因此,西南部可作为研究区奥陶系碳酸盐岩潜山勘探的有利地区。

## 5 结 论

(1)渤海海域沙垒田凸起西北部奥陶系碳酸盐岩潜山主要储集岩类为泥—微晶白云岩、粉—细晶白云岩和角砾白云岩,储集空间包括晶间溶孔、粒间

溶孔和粒内溶孔,储层类型为裂缝—孔隙型,裂缝为储层主要的渗流通道。

(2)碳酸盐岩白云石化作用、岩溶作用和构造作用是研究区奥陶系碳酸盐岩储层发育的主控因素,储层的演化以白云石化作用为基础,在构造作用的控制下,经过了表生岩溶和埋藏岩溶作用的改造。

(3)地震地质储层综合预测表明,研究区西南部岩溶高地是风化壳岩溶储层发育的有利地区,这为奥陶系碳酸盐岩潜山勘探提供了依据。

## 参 考 文 献

- [1] 赵文智,沈安江,胡素云,等. 中国碳酸盐岩储集层大型化发育的地质条件与分布特征[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 1-12.
- [2] 张善文,隋凤贵,林会息,等. 渤海湾盆地前古近系油气地质与远景评价[M]. 北京:地质出版社, 2009: 335-355.
- [3] 赵贤正,王权,金凤鸣,等. 冀中坳陷隐蔽型潜山油气藏主控因素与勘探实践[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 71-79.
- [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.
- [5] 马永生,蔡勋育,赵培荣,等. 深层超深层碳酸盐岩优质储层发育机理和三元控储模式[J]. 地质学报, 2010, 84(8): 1087-1093.
- [6] 余家仁,雷怀玉,刘趁花. 试论海相碳酸盐岩储层发育的影响因素——以任丘油田雾迷山组为例[J]. 海相油气地质, 1998, 3(1): 39-48.
- [7] 张新超,孙赞东,吴美珍. 塔中北斜坡鹰山组岩溶储层发育规律[J]. 海相油气地质, 2014, 19(1): 43-50.
- [8] 朱东亚,张殿伟,李双建,等. 四川盆地地下组合碳酸盐岩多成因岩溶储层发育特征及机制[J]. 海相油气地质, 2015, 20(1): 33-44.
- [9] 徐亮. 东营凹陷碳酸盐岩白云石化储层孔隙形成机理研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(4): 463-467.
- [10] 张学丰,刘波,蔡忠贤,等. 白云石化作用与碳酸盐岩储层物性[J]. 地质科技情报, 2010, 29(3): 79-83.
- [11] 赵文智,沈安江,胡素云,等. 塔里木盆地寒武—奥陶系白云岩储层类型与分布特征[J]. 岩石学报, 2012, 28(3): 758-768.
- [12] 贺训云,寿建峰,沈安江,等. 白云岩地球化学特征及成因——以鄂尔多斯盆地靖西马五段中组合为例[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 375-383.
- [13] 陈景山,李忠,王振宇,等. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩古岩溶作用与储层分布[J]. 沉积学报, 2007, 25(6): 858-867.



- [14] 邹才能,等. 非常规油气地质[M]. 北京:地质出版社,2011:166-169.
- [15] 霍勇,庞秋维,罗顺社,等. 靖边潜台南部奥陶系马家沟组古岩溶储层地球化学特征[J]. 中国岩溶,2014,33(2):248-253.
- [16] 文华国,陈浩如,温龙彬,等. 四川盆地东部石炭系古岩溶储层成岩流体:来自流体包裹体、微量元素和 C、O、Sr 同位素的证据[J]. 岩石学报,2014,30(3):655-666.
- [17] 胡文瑄,陈琪,王小林,等. 白云岩储层形成演化过程中不同流体作用的稀土元素判别模式[J]. 石油与天然气地质,2010,31(6):810-817.
- [18] 曹中宏,张红臣,刘国勇,等. 南堡凹陷碳酸盐岩优质储层发育主控因素与分布预测[J]. 石油与天然气地质,2015,36(1):103-108.
- [19] 张银德,周文,邓昆,等. 鄂尔多斯盆地高桥构造平缓地区奥陶系碳酸盐岩岩溶古地貌特征与储层分布[J]. 岩石学报,2014,30(3):757-767.
- [20] 蔡左花,冯霞,刘诗荣,等. 川西坳陷 XC 构造带雷口坡组顶部风化壳储层预测[J]. 海相油气地质,2014,19(4):50-56.
- [21] 袁志云,孔令洪,王成林. 频谱分解技术在储层预测中的应用[J]. 石油地球物理勘探,2006,41(增刊 1):11-15.

编辑:董庸

## Development Controlling Factors and Distribution Predication of Ordovician Carbonate Reservoirs in Northwestern Part of Shaleitian Arch, Offshore Bohai Sea

Wang Yuechuan, Wei Ajuan, Gao Kunshun, Peng Jingsong, Guo Ying, Huang Zhi

**Abstract:** The drilling data revealed complex development and distribution characteristics of Ordovician buried-hill carbonate reservoirs in northwestern part of Shaleitian arch, offshore Bohai Sea. According to cores, thin sections, isotope and trace elements, it is defined that the Ordovician carbonate reservoirs mainly consist of dolostone in lithology. Dissolved pores, caves and fractures are representative of reservoir space and main type of reservoirs is fractures-pores. Dolomitization, karstification and tectonism are the main factors of controlling the reservoir development, in which dolomitization is the basic factor, karstification is the important guarantee and tectonism is the key factor. The result of comprehensive seismic and geological prediction shows that the favorable Ordovician karst weathering-crust reservoirs develop in the southwest of the research area.

**Key words:** Bohai Sea; Shaleitian arch; Ordovician; Carbonate reservoir; Reservoir prediction; Controlling factor

Wang Yuechuan: Senior Petroleum Geology Engineer. Add: Tianjin Branch Company of CNOOC Ltd., Mail Box 609, Zhabei Rd., Tanggu, Tianjin, 300452, China