

南堡凹陷斜坡带下古生界潜山储层特征与发育模式

肖述光^{1,2,3} 李慧勇¹ 黄志¹ 李飞¹ 刘凯¹

(1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津, 300459; 2. 自然资源部深时地理环境重建与应用重点实验室, 成都理工大学, 成都, 610059; 3. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京, 100083)

摘要: 下古生界潜山储层非均质性强、发育机制不清严重制约其勘探成效。本文运用岩心、成像测井及分析化验等资料, 开展了南堡凹陷斜坡带下古生界碳酸盐岩储层特征、主控因素和分布规律研究。结果表明, 研究区发育“表生岩溶”和“缝溶体”两类储层。“表生岩溶”储层储集空间以小型溶蚀孔洞为主, 集中分布于构造高部位和潜山顶部 100m 内; “缝溶体”储层主要储集空间为裂缝, 展布范围广, 且储层段一般超过 150m。岩石类型是储层发育物质基础, 灰岩和云质灰岩类为岩溶成储的优势岩性; 裂缝是储层发育核心要素, 缝网系统为大气水的溶蚀提供通道; 古地貌是储层发育关键条件, 上斜坡是岩溶作用有利位置。由此, 建立了“岩性-构造-古地貌”三元耦合储层发育机制。

关键词: 下古生界; 碳酸盐岩储层; 构造裂缝; 岩溶作用; 储层模式

中图分类号: P736

收稿日期: 2025-08-22

Reservoir Characteristics and Development Model of Lower Paleozoic Carbonate Buried Hill in the Slope Zone of Nanpu Depression

Xiao Shuguang^{1,2,3}, Li Huiyong¹, Huang Zhi¹, Li Fei¹, Liu Kai¹

(1. CNOOC (China) Tianjin Branch, Tianjin, 300459, China; 2. Key Laboratory of Deep-time Geography and Environment Reconstruction and Applications of Ministry of Natural Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. College of Energy, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

基金项目: 中海石油(中国)有限公司“七年行动计划”重大科技专项课题“渤海油田上产 4 000 万吨新领域勘探关键技术(编号: CNOOC-KJ135ZDXM 36TJ08TJ)”和自然资源部深时地理环境重建与应用重点实验室开放基金资助项目(DGERA20241003)联合资助。

第一作者简介: 肖述光, 男, 1986 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事海上油气勘探方面的研究工作。中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院, 022-66500482, x200504020104@126.com

Abstract: The strong heterogeneity and unclear development mechanism of the Lower Paleozoic buried hill reservoir seriously restrict its exploration effect. In this paper, the characteristics, main controlling factors and distribution rules of the Lower Paleozoic carbonate reservoirs in the slope zone of Nanpu Sag were studied by using core, imaging logging and analytical test data. The results show that the study area develops two types of reservoirs : ' supergene karst ' and ' fracture karst '. The reservoir space of ' supergene karst ' reservoir is dominated by small dissolution pores, which are concentrated in the high part of the structure and the top of the buried hill within 100 m. The main reservoir space of the ' fracture-dissolved body ' reservoir is fractures, with a wide range of distribution, and the reservoir section is generally more than 150 m. Rock type is the material basis of reservoir development, and limestone and dolomitic limestone are the dominant lithology of karst reservoir. Fracture is the core element of reservoir development, and the fracture network system provides a channel for the dissolution of atmospheric water. Paleogeomorphology is the key condition for reservoir development, and the upper slope is a favorable location for karstification. Therefore, the development mechanism of 'lithology-structure-paleogeomorphology 'three-element coupling reservoir is established.

Keywords: Lower Paleozoic; Carbonate reservoir; Structural fractures; Karstification; reservoir model

引言

下古生界碳酸盐岩潜山是渤海湾盆地重要的含油气层系, 1975 年至今已发现任丘、苏桥、杨税务、桩西、孤岛、富台、义和庄、千米桥、南堡等数十个油气田 (赵贤正等, 2012; 董月霞等, 2015; 马立弛等, 2020^[14])。潜山碳酸盐岩储层形成控制因素多, 非均质性强, 预测难度大, 是制约油气勘探发现最重要因素之一, 也是国内外学者和勘探家关注和研究的热点 (Zou et al, 2010; Hassani et al., 2014; Khodaparast et al, 2020; Nie et al., 2020; 华晓莉, 2025; 刘雨晴, 2025)。针对下古生界碳酸盐岩储层, 前人研究主要集中在储层特征及控制储层发育的不整合、成岩、古构造及演化、沉积等影响因素 (陈扬, 2020), 并将其划分为顶部风化壳型和内幕溶蚀型两类 (师政, 2016^[8]; 姜伟, 2017^[9]; 晁念民, 2018^[10]; 程鑫, 2020^[11])。风化壳储层岩石类型主要为白云岩和灰岩类, 储集空间类型主要为岩溶孔洞和裂缝, 以及少量晶间孔、膏模孔及其扩溶孔洞等, 其发育主要受控于沉积相带、成岩作用、表生岩溶作用和构造作用 (王俊明, 2004^[12]; 董月霞, 2015; 晁念民, 2018), 纵向上可划分为垂直渗流带、水平潜流带和深部缓流带 (时国, 2010^[13]); 潜山内幕溶蚀储层岩石类型主要为白云岩类, 储集空间以裂缝和伴生溶蚀为主, 包含少量原生孔隙, 主要受岩石类型、构造改造、顺层岩溶作用和热液活动影响, 同时受后期埋藏溶蚀作用调整 (汪泽成等, 2013^[16]; 李继岩, 2016^[17]; 王永诗和李继岩, 2017^[15])。渤海海域下古生界碳酸盐岩潜山油气勘探起步晚, 研究程度相对低, 储层特征及影响因素特殊和复杂, 岩溶储层发育与构造活动、成岩作用等因素

的关系尚无统一认识。因此，需对岩溶储层储集空间特征、控制因素和发育模式开展研究。本文以南堡凹陷南部斜坡带下古生界潜山为研究对象，结合岩心薄片观察、FMI 成像测井、构造解析、分析化验等手段，综合研究储层特征及主控因素，总结了储层地质成因机制，并预测了有利储层发育区带。

1 区域地质及勘探概况

南堡凹陷位于燕山褶皱带南缘，渤海湾盆地黄骅坳陷东北部，为在华北克拉通之上发育的具北断南超箕状断陷结构的中新生代断陷盆地。本次研究区域位于南堡凹陷南部斜坡带，中生界和上古生界超覆尖灭，下古生界直接下伏于新生界沙河街组碎屑岩系，属稳定浅海台地沉积，自下而上发育寒武系府君山组、馒头组、毛庄组、徐庄组、张夏组、崮山组、长山组、凤山组和奥陶系冶里组、亮甲山组、马家沟组，整体上具有由北至南、自西向东地层由新变老和逐渐减薄的平面展布特征。依据总体岩性组合特征，将下古生界分为 4 个地层岩性组合，其中组合 1 为上下马家沟组，以厚层泥质灰岩和云质灰岩为主，夹薄层白云岩；组合 2 为亮甲山组-崮山组顶部，上部为白云岩与灰岩互层，下部主要为厚层云质灰岩；组合 3 为崮山组底部和张夏组，崮山组底部为一套紫红色泥岩，张夏组块状致密鲕粒灰岩；组合 4 为馒头组和府君山组，其中馒头组为大套泥岩夹灰质云岩，府君山组为白云岩与灰岩互层（图 1）。

研究区所处的华北克拉通位于古亚洲洋、特提斯洋和太平洋构造体系域交汇位置，中生代以来经历了印支、燕山、喜山等多旋回构造运动改造，形成多个“挤压-拉张-挤压”旋回，产生了纵横交错断裂体系(肖述光等，2019^[18])，发育凹中隆断块、断背斜潜山构造带和斜坡区地层、构造-地层复合潜山构造带。上世纪 90 年代，中海油与科麦奇合作，对南部斜坡带进行钻探，揭示了下古生界碳酸盐岩潜山含油气性，但由于未钻遇规模性储集体，不具备商业价值而终止了勘探。2004 年，中石油冀东油田在研究区北缘钻探 LPN1 井，于奥陶系获高产工业油气流，发现了南堡油田，再次掀起了下古生界碳酸盐岩潜山勘探热潮。2019 至 2021 年，中海油再上斜坡带碳酸盐岩潜山，钻探曹妃甸 2-B 构造，其中 3 口井测井解释油层超百米，测试最高日产超千方，获得该区 50 年来首个中型油田发现。

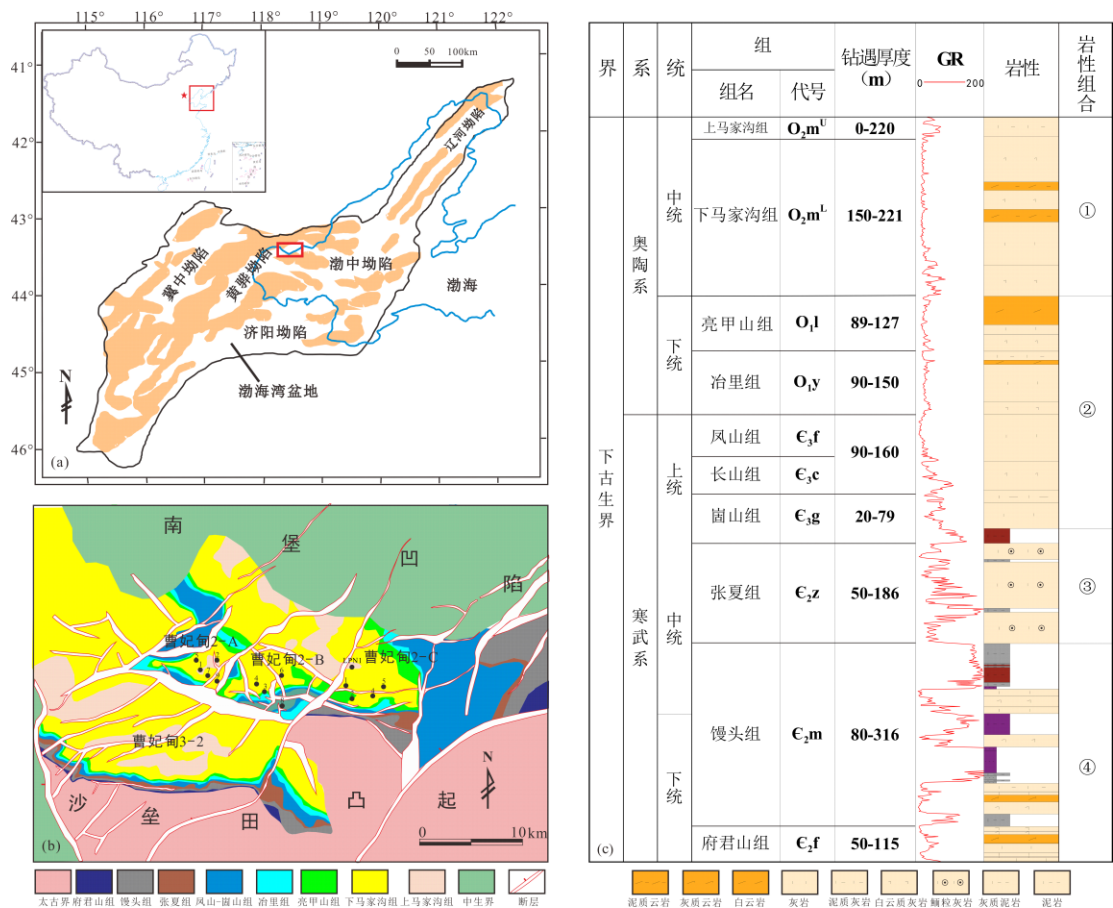


图 1 研究区地质背景

(a. 渤海湾盆地简图; b. 南堡凹陷斜坡潜山地层与断裂体系叠合图; c. 下古生界综合柱状图)

Fig. 1 Geological background of the research area

(a. Bohai Bay Basin; b. Tectonic units in the western Bohai Sea and research areas; c. Comprehensive stratigraphic histogram)

2 储层特征

2.1 储层岩石学特征

根据钻井岩心、壁心、岩屑观察，结合岩石薄片鉴定，研究区下古生界储层岩石类型多样，主要的岩石类型包括灰岩类、白云岩类、云质灰岩、灰质云岩和岩溶角砾岩。

灰岩类可分为晶粒类灰岩和颗粒类灰岩。晶粒灰岩由晶粒大小在 $4\mu\text{m}$ 以下的泥晶方解石组成，呈连续中厚层状产出，是研究区下古生界储层的主要岩石类型（图 2a-c）。受重结晶作用影响，部分泥晶灰岩转变为微晶、细晶灰岩。颗粒灰岩中颗粒类型主要为生物碎屑、砂屑，偶见竹叶状砾屑和鲕粒（图 2d、e）。

白云岩类包括晶粒白云岩和颗粒白云岩，有效储层发育段以泥晶-粉晶白云岩为主，白云石平均含量 94.79%。通过薄片观察，晶粒白云岩白云石化和重结晶作用较强，造成白云石类型多样，比如具有雾心亮边结构、表面污浊的晶粒和表面比较干净的晶粒，晶粒接触

紧密（图 2g）。颗粒白云岩在研究区分布较少，仅在下马家沟组偶见。

云质灰岩和灰质云岩为灰岩类与白云岩类间的过渡岩性，主要包括白云质泥晶灰岩、灰质泥晶白云岩等。灰质云岩中白云石多来自于方解石发生白云石化作用或同生期白云石的重结晶。基质一般为较细晶粒的白云石，方解石则为溶蚀孔洞或裂缝中后期充填的亮晶方解石。灰质云岩基质一般为泥晶方解石，白云石则以自形-半自形的形态分布于基岩中，或沿裂缝分布。

此外，在潜山顶部岩心中还见到岩溶角砾岩储层，角砾大小为 2mm~40mm，呈棱角-次棱角状，少量次圆-圆状，成分一般较为单一，以微晶白云岩为主(图 2f)。角砾之间往往被就近围岩溶蚀供给的粉砂-细砂级碳酸盐岩质碎屑和泥-微晶白云石晶屑充填，可含有一定数量的石英碎屑和泥、碳质外来组分，局部为岩溶水沉淀的粒状中-粗晶方解石充填胶结。

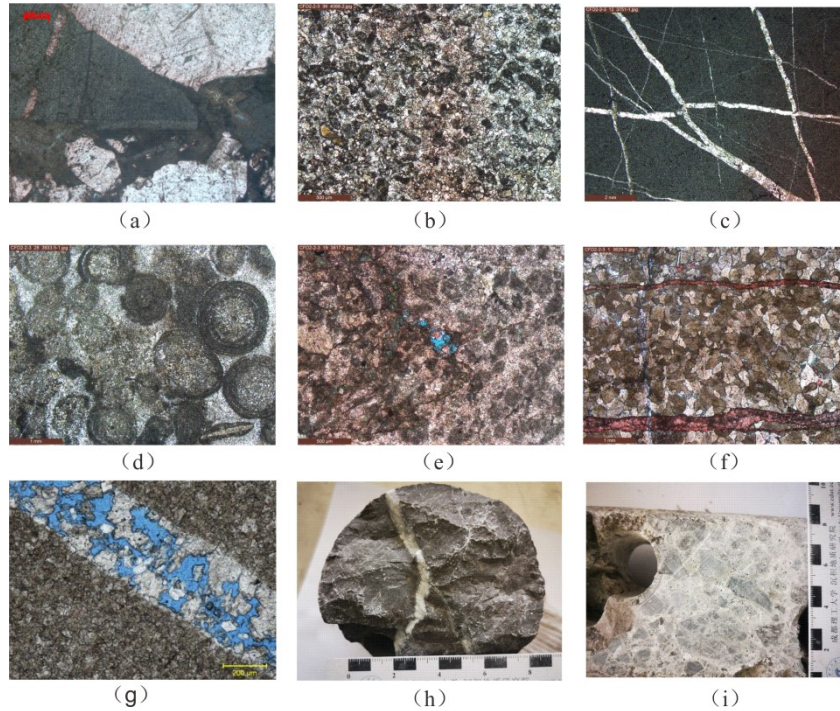


图 2 南堡凹陷斜坡带下古生界碳酸盐岩储层岩石学特征

(a. CFD2-B-9, 3566.74m, 粗晶云质灰岩; b. CFD2-B-3 井, 4088.00m, 白云质亮晶砂屑灰岩; c. CFD2-B-3, 3751.00m, 泥晶灰岩; d. CFD2-B-3, 3933.50m, 亮晶鲕粒灰岩; e. CFD2-B-3, 3817.00m, 亮晶砂屑灰岩; f. CFD2-B-3, 3629.00m, 中-细晶白云岩; g. CFD2-A-2, 3709.30m, 粉-细晶白云岩, 白云石具雾心亮边结构; h. CFD2-C-4, 3762.50-3765.35m, 泥晶白云岩; i. CFD2-B-9, 3567.40-3567.90m, 岩溶角砾灰岩)

Fig.2 Petrological characteristics of lower Paleozoic carbonate reservoir in slope zone of Nanpu sag

(a. CFD2-B-9, 3566.74m, coarse-grained dolomitic limestone; b. CFD2-B-3, 4088.00m, dolomitic sparry calcarenite; c. CFD2-B-3, 3751.00m, micrite limestone; d. CFD2-B-3, 3933.50m, sparry oolitic limestone; e. CFD2-B-3, 3817.00m, sparry calcarenite; f. CFD2-B-3, 3629.00m, medium-fine crystalline dolomite; g. CFD2-A-2, 3709.30m, powder-fine grained dolomite,

dolomite with fog core bright edge structure; h. CFD2-C-4, 3762.50-3765.35m, micritic dolomite; i. CFD2-B-9, 3567.40-3567.90m, karst breccia limestone)

2.2 储集空间特征

岩心、壁心等实物资料，成像、核磁等测井资料，以及铸体薄片、扫描电镜等微观资料表明研究区下古生界储层具有显著双重介质属性，即储集空间类型同时包含溶蚀孔洞和裂缝。根据孔隙和裂缝所占的储集空间的比例不同，可将研究区储层分为裂缝-孔隙型和孔隙-裂缝型两种类型。

裂缝-孔隙型储层储集空间以次生溶孔和溶洞为主，发育少量裂缝。次生溶孔主要包括溶扩孔、晶间溶孔、粒间溶孔，孔径一般小于 0.3mm，多呈“蜂窝状分布”，大部分未充填，少量被方解石充填。岩心上可见岩溶作用形成的岩溶角砾和洞穴，其中洞穴直径大小分布在 3~80mm，充填程度较低。成像测井上可见集中分布连片溶蚀孔洞。

孔隙-裂缝型储层储集空间以裂缝为主，尤其是规模较大的张开缝和溶蚀扩大缝，溶蚀孔洞所占比例退居其次。岩心和薄片可见未充填和半充填的裂缝以及溶蚀扩大缝，裂缝密度可达 20 条/m，缝宽 5~10mm，最高可达 15~20mm，成像测井显示裂缝以中高角度为主，局部微裂缝呈网状分布。裂缝大多已被方解石或白云石充填，部分钻井潜山顶部可见显著沿缝溶蚀扩容的现象（图 3）。

2.3 储层物性特征

不同储集空间类型的储层，其物性存在一定差异。裂缝-孔隙型储层壁心孔隙度分布范围为 1.4%~17.0%，平均值 4.4%；岩心分析渗透率分布范围 0.01mD~49.3mD，平均值 2.4mD；测井解释孔隙度分布范围 0.6%~18.7%，平均值 7.0%，中值 6.7%；DST 测试平均日产油约 100m³。孔隙-裂缝型储层测井解释孔隙度 2.0%~9.0%，平均 4.2%，中值 3.0%；根据潜山 DST 测试压力资料，试井解释的有效渗透率为 16.7mD~127.0mD。相较而言，孔隙-裂缝型储层孔隙度相对较低，但渗透率更高，测试产能也更高，最高日产油可达 1000 m³。

2.4 储层分布特征

下古生界储层分布均有较强的非均质性，裂缝-孔隙型储层发育于以曹妃甸 2-A 油田为代表的、远离强活动断裂带的构造相对稳定区，且集中分布于潜山山头，平面展布范围局限，面积仅有 1~2km²，垂向上主要分布于潜山顶部 100m 范围内，尤其是潜山顶部 50m 范围为储层集中发育区。孔隙-裂缝型储层主要发育于构造强活动区，尤其是长期活动的断裂带内，平面展布范围相对较广，在中新生代强构造活动叠加区，储层展布面积可达近

20km², 垂向上储层段一般超过 150m, 局部甚至可达 300m 以上。

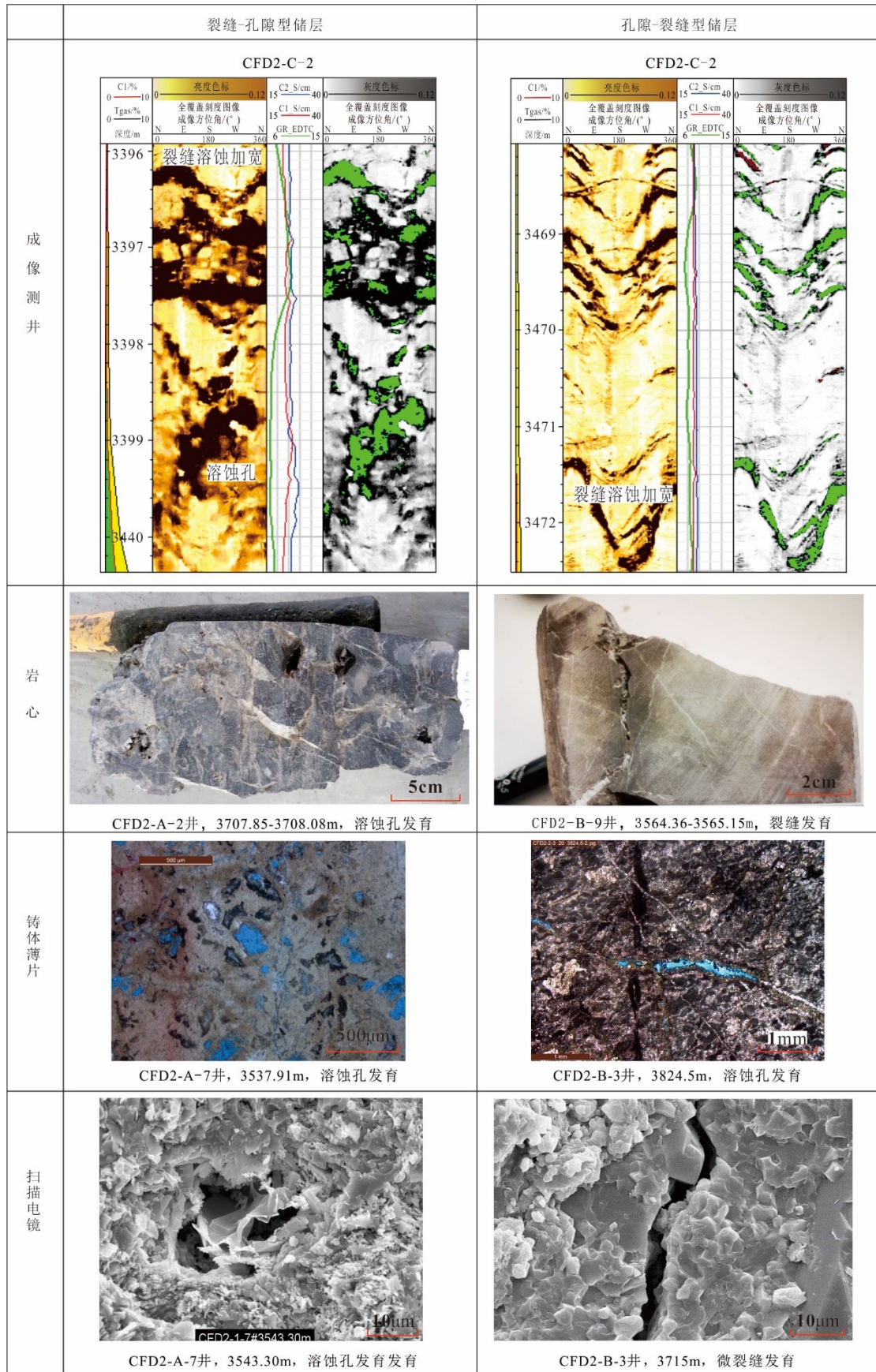


图 3 南堡斜坡带下古生界碳酸盐岩潜山储层发育特征

Fig.3 Development characteristics of Lower Paleozoic carbonate buried hill reservoir in Nanpu slope zone

3 储层发育主控因素及地质成因模式

综合以上关于储层储集空间和发育展布等特征，下面从地层岩性、构造应力、岩溶古地貌三个主要方面探讨下古生界海相碳酸盐岩储层发育的主控因素和成因模式。

3.1 地层岩性是碳酸盐岩储层发育的基础因素

海相碳酸盐岩地层岩性是控制优质储层形成的重要内在因素（马永生，2019^[19]）。不同地层岩性及组合本身的物质成分、结构构造和物理力学性质的差异，使其溶蚀强度不同，进而导致储层发育程度存在差异。

钻井、测井、薄片、岩心等资料揭示碳酸盐岩表生岩溶发育程度与泥质含量为负相关关系，泥质含量高的碳酸盐岩岩溶储层多不发育。值得一提的是，一些学者基于野外露头观察、抗压强度力学实验等的综合研究，认为白云岩相较于灰岩更易发生溶蚀作用而具有更好的成储条件，灰岩随白云石含量增加溶蚀作用增强（曹中宏，2014^[20]；郭建华，2009^[21]）。南堡凹陷斜坡带钻井揭示下古生界储层发育情况则有所不同。曹妃甸 2-A/B/C 构造灰岩类储层厚度显著大于白云岩类储层，灰岩类成储率大于白云岩类。针对研究区下古生界不同岩性近地表条件下表生岩溶差异，设计和开展了相关溶蚀实验，以期模拟大气水作用下不同岩性次生孔隙生成的差异。

碳酸盐岩大气水溶蚀物理模拟实验在中国石油大学（华东）深层油气全国重点实验室进行。

（1）实验仪器

实验所用仪器为 TC-2 动态水岩反应釜，材质为哈氏合金。

（2）实验样品选取及处理

实验样品选取岩性具代表性的钻井岩心，钻取直径 7cm 的柱塞。实验前将不同岩性柱塞岩样均制成 11 组厚约 0.3cm 的圆片样，并切分两部分（分别做铸体薄片和扫描电镜样）。

（3）大气水溶液的配制

大气水溶液的配制参考了国内外不同地区大气降水的地球化学数据。具体配制过程如下：首先称取 $MgCl_2$: 0.855g, $CaCl_2$: 0.2109g, $NaCl$: 1.6895g 放入 A 烧杯加水至 1L 溶解；其次，将 K_2SO_4 : 0.0535g, Na_2SO_4 : 1.50g, NaF : 0.042g, NH_4Cl : 0.00264g, $KHCO_3$: 0.02884g 加水至 1L 溶于 B 烧杯。C 烧杯中先加 950 mL 以上水，再加 AB 烧杯各 1mL 溶液以及 1mL 0.1mol/L 盐酸，加水至 1L 搅拌均匀，pH 值为 5.8。

(4) 实验流程

实验前对样品进行 X-衍射成分分析, 确定实验样品的成分组成; 实验中, 取实验所需样品放入釜内吊篮内, 釜内加入 500mL 配制好的大气水溶液; 待温度和压力达到目标温压条件后, 恒温、恒压连续反应 36 小时; 实验后, 对实验前后样品进行铸体薄片和扫描电镜观察, 对样品质量损失率和溶液离子浓度进行测定 (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{2+})。

由于大气水的溶蚀能力较弱, 质量损失量变化较小, 规律性不明显, 主要借助离子浓度数据和扫描电镜照片来说明大气水对样品的溶蚀情况。实验结果表明, 在表生和浅埋藏环境下, 石灰岩类普遍较白云岩类溶蚀程度更高, 且随白云石含量的增加, 灰岩类溶蚀程度呈现先增强后减弱的趋势, 白云石含量在 9%~15%之间时, 溶蚀程度最高。由此证实, 在表生岩溶作用下, 含云质灰岩为优势的成储岩性。

岩石结构对岩石可溶性的影响, 表现为粗粒结构的岩石粒间孔隙发育, 连通性好, 侵蚀性水流可沿粒间空隙扩散溶滤, 分散到整个岩石之中, 以致呈现出“空间溶蚀”特征。粗结构的碳酸盐岩以及构造角砾碳酸盐岩岩溶最发育。

研究区下古生界地层岩性组合 2 上部亮甲山-冶里组以厚层粗晶和亮晶云质灰岩为主, 白云石含量 4%~25%, 且处于表生和浅埋藏环境, 为最为有利的成储岩性组合。组合 1 上、下马家沟组岩性以微晶和泥晶泥灰岩和云质灰岩为主, 碳酸盐岩含量测定表明白云石含量在 12%~45%, 处于表生或浅埋藏环境, 为较为有利的成储岩性组合。组合 3 为张夏组亮晶鲕粒灰岩, 白云石含量通常低于 3%, 岩性均一、致密, 成储条件差。组合 4 馒头组和府君山组为厚层泥岩与白云岩和灰岩互层, 主要分布于潜山内幕, 大气淡水风化淋滤作用弱, 溶蚀成储条件差。通过井震结合, 对南堡凹陷斜坡带下古生界平面展布特征进行了刻画 (图 3)。研究区下古生界潜山顶部广泛残留上、下马家沟组, 斜坡高部位则主要残余呈线性分布的亮甲山组和冶里组, 均为有利的成储地层岩性组合, 为该区规模性储层形成提供了良好的物质基础。

3.2 构造应力是控制储层形成的核心要素

岩心、壁心和薄片等资料显示研究区下古生界裂缝类型以构造缝为主, 成像测井上可见大部分裂缝平直、产状稳定、成组出现且延伸较远, 应属剪裂缝(曾联波, 2007^[31])。裂缝共分为北西向、北东向和北北东向三个组系, 与周边主干断裂走向一致。剪裂缝主要为北西向和北东向, 缝面平直, 延伸较远; 张裂缝以北北东向为主, 数量较少, 主要发育于北北东向断裂附近, 缝面弯曲, 延伸短, 并切穿早期剪裂缝。通过裂缝之间相互切割、限制及组合等关系, 以及裂缝中方解石等充填物阴极发光特征(田晓平, 2021^[22]),

认为研究区受至少发育三期裂缝，并可判定其形成先后顺序，即北西向剪裂缝最早，北东向剪裂缝为其次，北北东向张裂缝形成时间最晚（图 6、7）。

构造裂缝是构造运动的产物，构造应力是决定研究区裂缝发育程度的主导因素。基于三维地震资料的古构造识别和解析，并结合区域古构造和应力场特征，对研究区潜山演化和裂缝成因进行探讨。下古生界碳酸盐岩潜山中新生代遭受了印支、燕山和喜山多旋回改造，形成多组系的缝网系统。印支期遭受北东-南西向挤压，形成北西西向逆冲断裂及相关褶皱，及与之伴生的北西西向剪裂缝（许志琴等，2012^[30]；李慧勇，2021^[23]）；燕山早期（早中侏罗世）以北西-南东向挤压为主导（纪友亮，2006^[32]），形成北东向逆冲断裂，发育背冲构造、冲断构造及相关褶皱，伴生形成北东向构造裂缝；喜山期北东向断裂的伸展活动，一方面导致新生裂缝的发育，另一方面使得先存裂缝系统活化释放空间，促进岩溶作用对储层的进一步改造。

综合考虑下古生界残留厚度、古构造样式等对关键期变形强度和裂缝发育密度进行分析和预测。印支期叠瓦式逆冲作用强度具有东强西弱的特征，曹妃甸 2-C 构造隆升幅度最高，下古生界剥蚀量大，相应的该时期其挤压作用强，裂缝也更为发育；燕山期，研究区发育挤压背冲构造样式，曹妃甸 2-B 构造位于逆冲相关褶皱的核部，构造变形强，裂 缝 密 度 大 。

表 1 实验样品 X-衍射成分数据及溶蚀度排序表

Table 1 X-ray diffraction composition data and dissolution sort table of experimental samples

岩类	样品编号	层位	深度 (m)	方解石含量 (%)	白云石含量 (%)	Ca+浓度	溶蚀度排序
灰岩	9-30-B	张夏组	3544.0	95.45	2.28	5.94	3
	3-30-B	下马家沟组	3421.5	85.21	12.35	6.73	1
	1-30-B	上马家沟组	3217.5	54.47	41.71	6.69	2
	5-30-B	亮甲山组	3220.8	54.43	43.69	5.69	4
白云岩	10-30-B	徐庄组	3188.0	0.31	67.73	3.49	1
	6-30-B	冶里组	3209.6	0.21	98.39	2.85	2
	8-30-B	长山组	3365.5	-	99.18	2.66	3

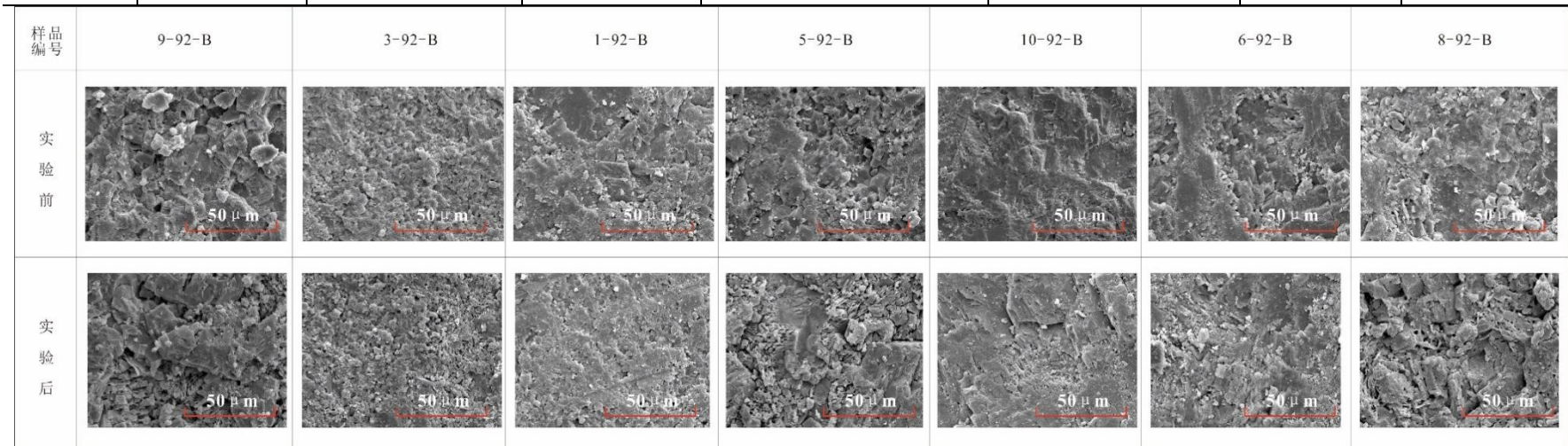


图 4 实验前后样品扫描电镜对比图

Fig. 4 Scanning electron microscope comparison of samples before and after the experiment

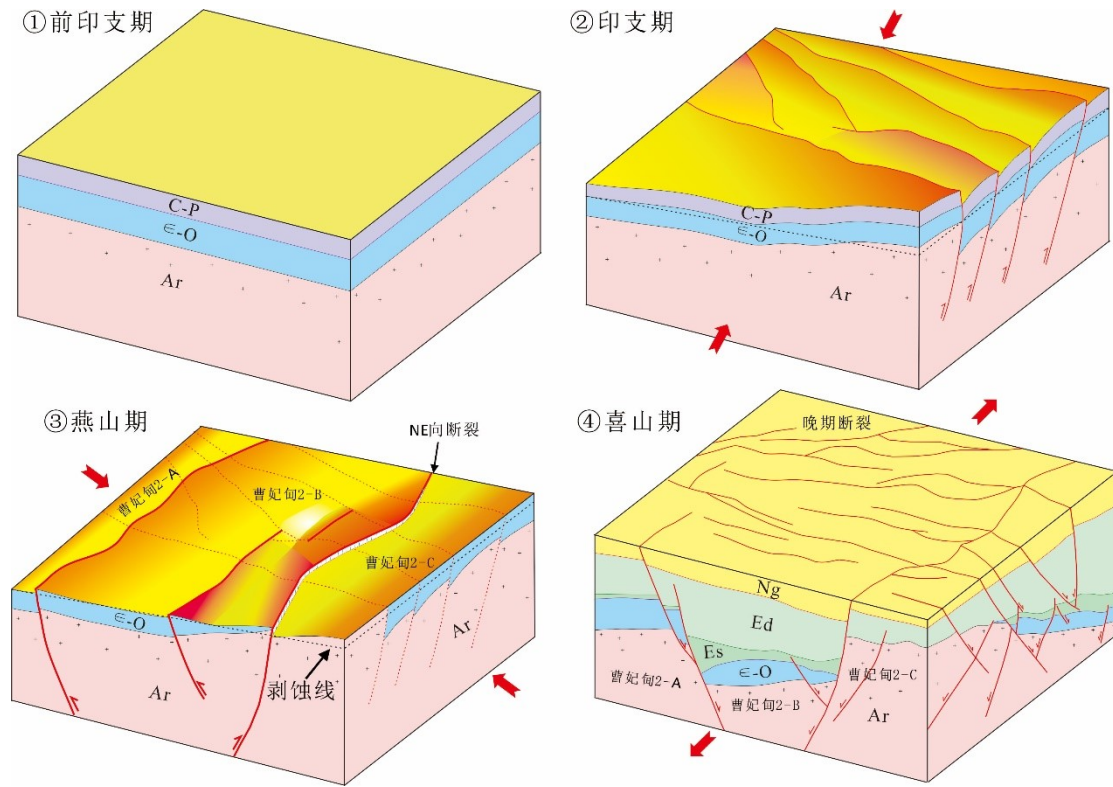


图 5 南堡凹陷斜坡带中新生代构造演化模式图

Fig.5 Meso-cenozoic tectonic evolution model of slope zone in Nanpu sag

构造运动及时期	裂缝走向玫瑰花图	裂缝性质	应力场模式	
喜山期		北东东向张裂缝		图例
燕山早期		北东向剪裂缝		
印支期		北西向剪裂缝		

图 6 南堡凹陷斜坡带关键构造期应力场及潜山裂缝发育特征

Fig.6 Characteristics of stress field and buried hill fracture development in key tectonic period of slope zone in Nanpu sag

3.3 岩溶古地貌是影响储层发育的关键条件

下古生界碳酸盐岩曾长期处于暴露地表、风化溶蚀的状态，岩溶地貌是导致差异溶蚀，进而影响储层发育的关键条件（李振宏，2006^[23]；齐振琴，2008^[24]）。综合区域构造演化，以及下古生界不整合侵蚀面上下地层展布情况的深入分析，采用印模法与残厚法相结合的手段，恢复和分析古地貌发育特征。

印支-燕山期在挤压冲断作用之下，研究区南部褶皱抬升，强烈剥蚀；曹妃甸 2-A/B/C 构造区为南高北低斜坡带，发生沿缝的溶蚀扩容，形成最早一期的岩溶风化壳；沙三段沉积期，受裂隙块断翘倾作用影响，形成曹妃甸 3-2、曹妃甸 2-B 两个山头，高部位遭受风化淋滤作用，形成喜山早期岩溶风化壳，低部位则被沉积物覆盖埋藏；沙一二段沉积期继承了沙三期地貌特征，局部高点风化溶蚀，直至东三段沉积期，碳酸盐岩潜山整体被覆盖埋藏（图 5、图 8）。

印模法利用古风化壳上覆充填沉积的标志层至侵蚀面的厚度等值线图来镜像反映侵蚀面的古地貌格局（江青春，2012^[25]；邓兴梁，2015^[26]），首先逐井确定研究区风化壳顶（ T_8 ）至上覆沙河街组顶（ T_3 ）地层厚度，再结合地震资料确定沙河街组厚度等值线图，建立剖面模型。结果表明：南堡凹陷斜坡带沙河街组厚度为 0~200m，东西向变化较大，东薄西厚的总趋势反映了东高西低的古地势。残厚法通过研究某个区域标志层之上的地层残余厚度对其古地貌形态进行分析。在南堡凹陷斜坡带下古生界内幕追踪了稳定标志层，利用内幕标志层（ T_g^7 ）至下古生界顶面残余厚度编制平面值线图，同样建立剖面模型。研究表明，稳定标志层之上下古生界残余厚度为 0~300m，从西向东，残余厚度依次减薄，反映了古地貌逐渐抬升的趋势。

根据地形特点，建立综合剖面模型。将研究区划分为岩溶高地（沙河街组厚度<50m，残余厚度<100m）、岩溶斜坡（沙河街组厚度 50~200m，残余厚度 100~300m）、岩溶洼地（沙河街组厚度 100~200m，残余厚度大于 300m）3 个二级古地貌单元，其中岩溶斜坡进一步细分为上斜坡和下斜坡（图 9）。

相关研究表明，长期继承性发育的斜坡背景更有利于岩溶储层发育（刘阳，2011^[29]；韩长城，2017^[27]；金民东等，2016^[28]）。从古地貌恢复结果与储层分布统计关系上看，岩溶上斜坡探井揭示的风化壳储层厚度最大，为 60~100m，部分地区的岩溶作用甚至能达到 200m 以上的深度；岩溶下斜坡钻井储层厚度在 10~20m 之间。

基于以上岩性、构造、古地貌三因素综合分析，建立了“优势岩性-叠合应力-岩溶地貌”三元耦合的下古生界碳酸盐岩储层发育模式（图 9）：广泛出露的白云质灰岩优势岩性组合为规模型溶蚀储层的形成提供了良好的物质基础；中生代多期强构造变形叠合所生成的缝网系统是下古生界碳酸盐岩成储核心要素；岩溶上斜坡等古地貌背景为风化壳储层发育提供重要的有利条件。

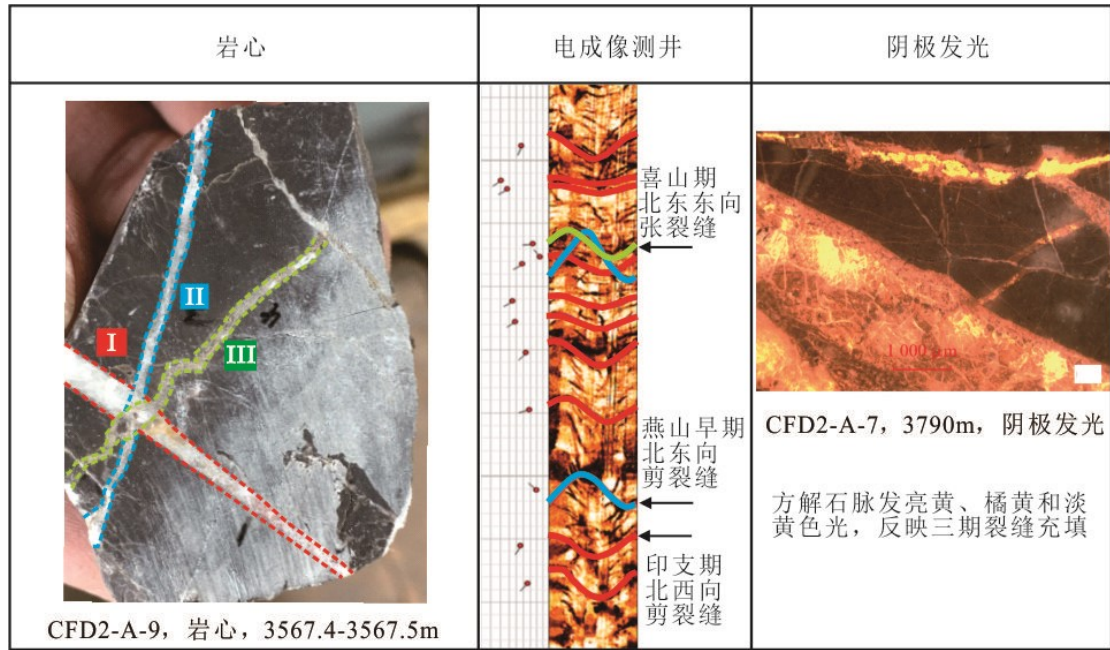


图 7 基于岩心、成像测井及阴极发光的潜山裂缝期次识别

Fig.7 Identification of buried hill fracture stages based on core, imaging logging and cathodoluminescence

“岩性-构造-古地貌”三者的耦合配置决定了研究区储层差异成因类型以及横向非均质性。具体而言，曹妃甸 2-A 潜山构造相对稳定，活动性弱，储层形成主要受风化作用控制，上马家沟组泥质灰岩和埋藏前岩溶上斜坡的古地貌背景为表生岩溶储层的发育提供了有利条件。表生岩溶储层集中分布于潜山高部位，较为局限，储层段厚度一般小于 100m，储集空间类型以裂缝-孔隙型为主。曹妃甸 2-B 和曹妃甸 2-C 构造印支和燕山期挤压逆冲作用强，构造裂缝规模性发育，下马家沟组白云质灰岩广泛出露，长期处于岩溶斜坡的有利古地貌背景，是缝溶体储层有利发育区。缝溶体储层是指在先存构造裂缝基础上，后期叠加流体改造所形成的沿缝溶蚀扩容以及与裂缝相关的孔洞组成的缝洞型储集体。缝溶体储层集中发育于强活动断裂带，储层段厚度可达 300m，分布范围也更加广阔。

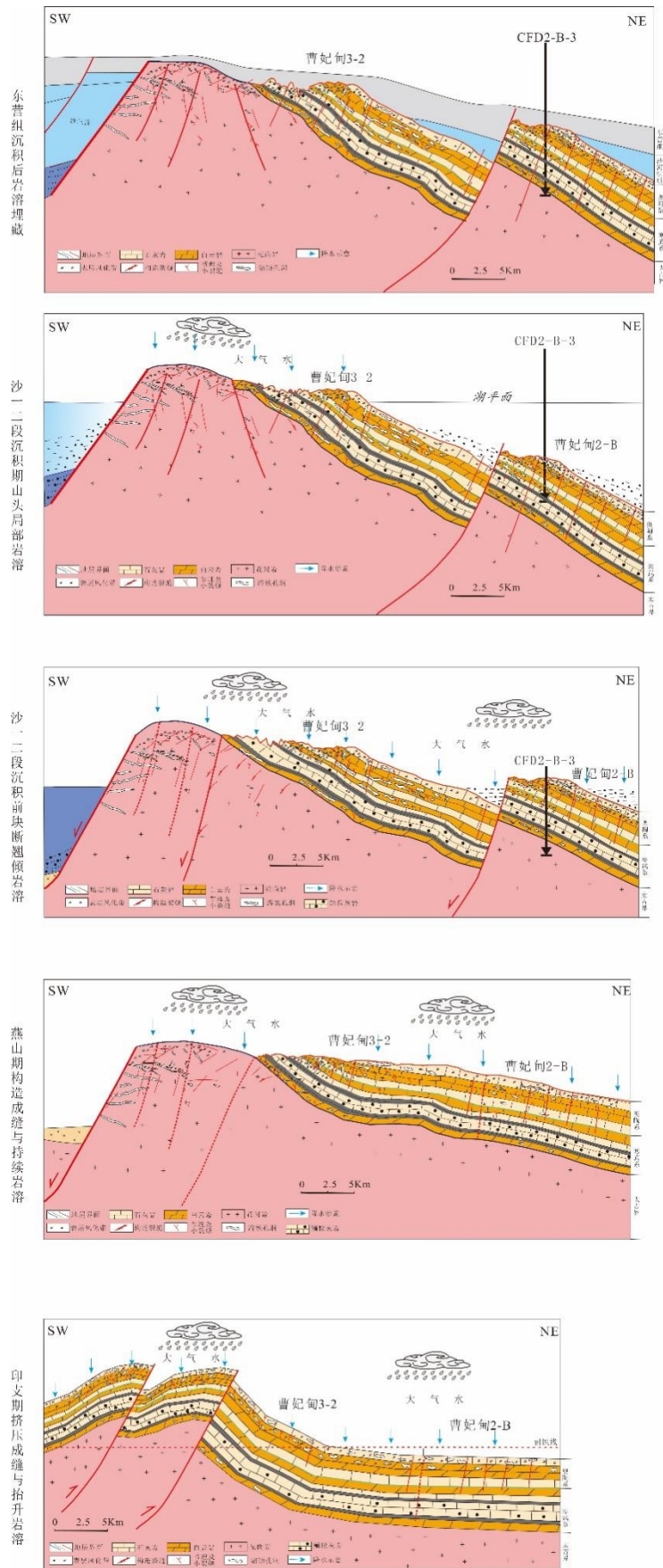


图8 构造-岩溶多阶段发育演化模式图

Fig.8 Structure-karst multi-stage development and evolution model diagram

值得指出的是，三元耦合控储强调岩性、构造和古地貌均处于优势或有利的状态下时才能发育规模性优质储层，而当其中一项或二项条件不具备时则可能不发育储层或仅局部发育储层。以 CFD2-B-8 井区为例，该区处于燕山期逆冲褶皱隆核心区以及岩溶上斜坡，构造应力和古地貌条件十分有利，但因其出露岩性为致密张夏组鲕粒灰岩而未能成储。另外，曹妃甸 2-A 构造区岩性和古地貌条件有利，但由于构造变形弱、裂缝发育程度低而仅发育局部储层。

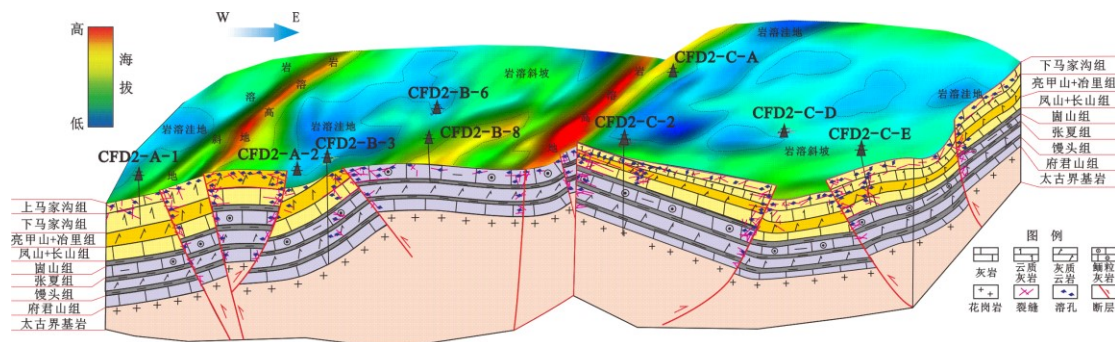


图 9 南堡凹陷斜坡带下古生界储层发育模式图

Fig.9 Development model of Lower Paleozoic reservoir in slope zone of Nanpu sag

4 结论及认识

(1) 南堡凹陷斜坡带下古生界碳酸盐岩储层表现出较强的横向差异性和非均质性。曹妃甸 2-A 构造区发育裂缝-孔隙型储层，储层规模小、分布局限；曹妃甸 2-B/C 构造区发育孔隙-裂缝型储层，储层段厚度大，平面展布范围相对更广，同时具有低孔隙度、高渗透率和高产能的特征，是规模性优质储层主要发育区。

(2) 下古生界碳酸盐岩储层发育主控因素为岩石类型、构造改造程度和古地貌背景。其中岩石类型是基础性因素，溶蚀实验表明下马家沟组-亮甲山组白云质灰岩和灰岩是成储的优势岩性组合；构造应力是核心要素，一方面构造作用形成的未充填或半充填裂缝可以成为有效的储集空间，另一方面构造裂缝直接控制了溶蚀孔洞-裂缝的发育程度；古地貌是影响储层发育关键条件，岩溶上斜坡的古地貌背景提供天然水动力坡度，强水流优势驱动高效溶蚀。

(3) “岩性-构造-古地貌”三者耦合控制储层的差异成因类型和平面展布。曹妃甸 2-A 潜山构造改造弱，储层发育主要受古地貌条件控制，发育表生岩溶储层。曹妃甸 2-B/C 潜山构造改造强，裂缝密度大，在岩性和古地貌条件有利位置发育规模性优质储层，如 CFD2-B 构造 3 井区、CFD2-C 构造 2 井区；而当岩性基础差或处于岩溶洼地时，则储层发育程度低或不发育储层。

(4) 曹妃甸 3-2 构造区下马家沟组-亮甲山组保存较全，分布广泛，具有良好地层岩性基础；印支期处于叠瓦逆冲构造前缘，构造成储背景优越；印支、燕山、喜山早期等古岩溶期，一直处于岩溶上斜坡的有利古地貌位置，预测该区为有利储层发育区。

References

- Cao, Z.H., Liu, G.Y., Zhang, H.C., et al., 2014. Experimental study on dissolution characteristics of Paleozoic carbonate rocks in Nanpu Sag and its surrounding uplifts [J].*Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition)*, 38 (1) : 8-13(in Chinese with English abstract).
- Chen, Y, 2020. Research on buried hill carbonate karst reservoirs in Bozhong 21-22 structural area (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu:1-3(in Chinese with English abstract).
- Cheng, X., 2020. Dissolution mechanism and high-quality reservoir genesis of Lower Paleozoic carbonate rocks in Jiyang-Huanghua area(Dissertation). China University of Petroleum (East China), Qingdao(in Chinese with English abstract).
- Deng, X.L., Zhang, Q.Y., Liang, B., et al., 2015. Study on the restoration method of karst paleogeomorphology of Ordovician Yingshan Formation in Tazhong II area [J]. *Karst in China*, 34 (2) : 154-158(in Chinese with English abstract).
- Dong, Y.X., Zhao, Z.J., Cao, Z.H., et al., 2015. Exploration potential and significance of Ordovician carbonate karst monadnock traps in Nanpu sag. *Acta Petrolei Sinica*, 36(6):653-663(in Chinese with English abstract).
- Guo, J.H., Guo, Y.C., Wang, L.S., 2009. Reservoir characteristics of buried hill in Hexiwu structural belt, Langgu sag, Jizhong depression [J].*Petroleum exploration and development*, 36 (6) : 701-708(in Chinese with English abstract).
- Han, C.C., 2017. Study on the characteristics and distribution of Ordovician fault-controlled karst reservoirs in Tahe oilfield (doctoral dissertation). China University of Petroleum (East China), Qingdao(in Chinese with English abstract).
- Hassani, A., Mortazavi, S. A., Gholinezhad, J., 2014. A New Practical Method for Determination of Critical Flow Rate in Fahliyan Carbonate Reservoir. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 115: 50-56. doi: 10.1016/j.petrol.2014.02.010.
- Hua, X.L., Li, H.Y., Xu, P., et al., 2025. Genetic mechanism and model of Lower Paleozoic carbonate buried hill reservoirs in western Bohai Sea [J]. *Geoscience*, 50 (2) : 494-503(in Chinese with English abstract).
- Li, H.Y., Xiao, S.G., Li, F., et al., 2021. Structural characteristics of the western branch of the Tanlu fault in Bohai Sea and its control on the formation of buried hills [J].*Geological Science and Technology Bulletin*, 40 (5) : 33-41(in Chinese with English abstract).
- Li, J.Y., Wang, Y.S., Liu, C.H., et al., 2016. Hydrothermal fluid activity and its quantitative evaluation of carbonate reservoir reconstruction-A case study of the Lower Paleozoic in the western Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J].*Petroleum Exploration and Development*, 43 (3) : 359-366 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z.H., Wang, X., Yang, S.Z., et al., 2006. Analysis of Control Factors of Ordovician Karst Reservoir in Ordos Basin. *Geence*. 20(2):299-306(in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Chen, L., Liang, B., et al., 2011. Comparison of Karst Features of Typical Carbonate Buried Hills in China. *Marine Geology Frontiers*, 27(3): 6-10(in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.Q., Deng, S., Li, H.Y., et al., 2025. Development characteristics and exploration implications of low-order fault systems in deep carbonate rocks : A case study of the Shunbei oil and gas field in the Tarim Basin [J].*Geoscience*, 50 (6) : 2239-2254(in Chinese with English abstract).
- Ji, Y.L., Hu, G.M., Huang, J.J., et al. 2006. Study on Mesozoic Stratum denudation and Mesozoic Cenozoic tectonic evolution in Bohai Bay area. *Journal of geology*, 80 (3): 351-358(in Chinese with English abstract).
- Jiang, Q.C., Hu, S.Y., Wang, Z.C., et al., 2012. Karst paleogeomorphology and exploration area of Maokou Formation in Sichuan Basin [J].*Petroleum Journal*, 33 (6) : 949-960(in Chinese with English abstract).
- Jiang, W., 2017. High-quality reservoir characteristics of Paleozoic carbonate buried hills in Dongying Sag (Dissertation). China University of Petroleum (East China), Qingdao(in Chinese with English abstract).

- Jin, M.D., Tan, X.C., Zeng, W., et al., 2016. Tectono-paleogeomorphology restoration and geological significance of Caledonian-Hercynian Longwangmiao Formation in Moxi-Gaoshiti area, Sichuan Basin [J]. *Sedimentological Journal*, 34 (4) : 634-644(in Chinese with English abstract).
- Khodaparast, S., Madanipour, S., Enkelmann, E., et al., 2020. Fault Inversion in Central Iran: Evidence of Post Pliocene Intracontinental Left Lateral Kinematics at the Northern Iranian Plateau Margin. *J Geodyn*, 140.
- Ma, L.C., Wang, Y.S., Jing, A.Y., et al., 2020. Discovery and significance of subtle buried hills in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin. *Petroleum Geology and Experiment*, 42(1): 13-18 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Y.S., He, Z.L., Zhao, P.R., et al., 2019. New progress in the formation mechanism of deep-ultra-deep carbonate reservoirs [J]. *Petroleum Journal*, 40 (12) : 1415-1425(in Chinese with English abstract).
- Nie, M., Wen, Z., Wang, Z., et al., 2020. Genesis and Evaporative Fractionation of Subsalt Condensate in the Northeastern Margin of the Amu Darya Basin. *J Petrol Sci Eng*, 188:106674. doi: 10.1016/j.petro.2019.106674.
- Qi, Z., Sun, X., Li, Z., et al., 2008. Evolution of Karst Paleogeomorphology and Development Features of Paleokarstic caves in the Qianmiqiao Buried Hill in Huabei Oil Fields. *Marine Origin Petroleum Geology*, 13(4): 37-43(in Chinese with English abstract).
- Shi, G., 2010. Ordovician sequence stratigraphy and paleokarst within sequence framework in South China (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu(in Chinese with English abstract).
- Shi, Z., 2019. The research on palaeokarst characteristics and development model in Nanpu sag and surrounding uplift(Dissertation). China University of Petroleum (East China), Qingdao(in Chinese with English abstract).
- Wang, J.M., 2004. Research on carbonate reservoir in Qianmiqiao buried hill(Dissertation). China University of Geosciences (Beijing), Beijing (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.S., Li, J.Y., 2017. Reservoir characteristics and main controlling factors of carbonate buried hill in Pingfangwang Oilfield, Jiyang Depression [J]. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition)*, 41 (4) : 27-35 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z.C., Zhao, W.Z., Hu, S.Y., et al., 2013. Types and distribution characteristics of oil and gas reservoirs in large marine carbonate oil and gas fields in China [J]. *Petroleum and natural gas geology*, 34 (2) : 153-160 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, S.G., Lv, D.Y., Hou, M.C., et al., 2019. Tectonic evolution process and buried hill formation mechanism in the southwest Bohai Sea area during the Mesozoic era [J]. *Natural Gas Industry*, 39(5):34-44 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z.Q., Yang J.S., Li, H.Q., et al. 2012. Indosinian collision orogeny and its orogenic mechanism in Chinese Mainland. *Acta petrologica Sinica*, 28 (6): 1697- 1709(in Chinese with English abstract).
- Zan, N.M., Wang, Y.Z., Cao, Y.C., et al., 2018. Reservoir space characteristics and development model of carbonate buried hill reservoirs in the lower Paleozoic of Dongying sag. *Petroleum and natural gas geology*, 39 (2) : 355-365 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, L.B., Qi, J.F., Wang, Y.X., 2007. Genetic types and geological conditions of structural fractures in low permeability reservoirs. *Journal of petroleum*, 28 (4): 52-56(in Chinese with English abstract).
- Zhao, X.Z., Wang, Q., Jin, F.M., et al., 2012. Main controlling factors and exploration practice of subtle buried-hill hydrocarbon reservoir in Jizhong depression. *Acta Petrol Sinica*, 33(z1):71-79(in Chinese with English abstract).
- Zou, C., Zhang, G., Tao, S., et al., 2010. Geological Features, Major Discoveries and Unconventional Petroleum Geology in the Global Petroleum Exploration. *Petroleum Exploration and Development*, 37: 129-145.

中文参考文献

- 曹中宏, 刘国勇, 张红臣, 等, 2014. 南堡凹陷及周边凸起区古生界碳酸盐岩溶解特性的试验研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 38(1):8-13.
- 陈扬, 2020. 渤中 21-22 构造区潜山碳酸盐岩岩溶储层研究(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 程鑫, 2020. 济阳-黄骅地区下古生界碳酸盐岩溶解机理及优质储层成因(博士学位论文). 青岛: 中国石油大学(华东).
- 邓兴梁, 张庆玉, 梁彬, 等, 2015. 塔中 II 区奥陶系鹰山组岩溶古地貌恢复方法研究[J]. 中国岩溶, 34(2):154-158.
- 郭建华, 郭原草, 王连山, 2009. 冀中坳陷廊固凹陷河西务构造带潜山储集层特征[J]. 石油勘探与开发, 36(6):701-708.
- 韩长城, 2017. 塔河油田奥陶系断控岩溶储集体特征及分布规律研究(博士学位论文). 青岛: 中国石油大学(华东).
- 华晓莉, 李慧勇, 许鹏, 等, 2025. 渤海西部下古生界碳酸盐岩潜山储层成因机理及模式[J]. 地球科学, 50(2):494-503.
- 金民东, 谭秀成, 曾伟, 等, 2016. 四川盆地磨溪—高石梯地区加里东—海西期龙王庙组构造古地貌恢复及地质意义[J]. 沉积学报, 34(4):634-644.
- 纪友亮, 胡光明, 黄建军, 等, 2006. 渤海湾地区中生代地层剥蚀量及中、新生代构造演化研究. 地质学报, 80(3):351-358.
- 江青春, 胡素云, 汪泽成, 等, 2012. 四川盆地茅口组风化壳岩溶古地貌及勘探选区[J]. 石油学报, 33(6):949-960.
- 姜伟, 2017. 东营凹陷古生界碳酸盐岩古潜山优质储层特征(硕士学位论文). 青岛: 中国石油大学(华东).
- 李慧勇, 肖述光, 李飞, 等, 2021. 渤海郑庐断裂西支构造特征及对潜山形成的控制作用[J]. 地质科技通报, 40(5):33-41.
- 李继岩, 王永诗, 刘传虎, 等, 2016. 热液流体活动及其对碳酸盐岩储集层改造定量评价——以渤海湾盆地东营凹陷西部下古生界为例[J]. 石油勘探与开发, 43(3):359-366.
- 李振宏, 王欣, 杨遂正, 等, 2006. 鄂尔多斯盆地奥陶系岩溶储层控制因素分析. 现代地质, 20(2):299-306.
- 刘阳, 陈利新, 梁彬, 等, 2011. 中国东部与西部典型碳酸盐岩潜山的岩溶特征. 海洋地质前沿, 27(3):6-10.
- 刘雨晴, 邓尚, 李海英, 等, 2025. 深层碳酸盐岩低序级断裂体系发育特征及勘探启示: 以塔里木盆地顺北油气田为例[J]. 地球科学, 50(6):2239-2254.
- 马立驰, 王永诗, 景安语, 2020. 渤海湾盆地济阳坳陷隐蔽潜山油藏新发现及其意义. 石油实验地质, 42(1):13-18.
- 马永生, 何治亮, 赵培荣, 等, 2019. 深层—超深层碳酸盐岩储层形成机理新进展[J]. 石油学报, 40(12):1415-1425.
- 齐振琴, 程昌茹, 孙秀会, 等, 2008. 千米桥古潜山岩溶地貌演化及古岩溶洞穴发育特征. 海相油气地质, 13(4):37-43.
- 时国, 2010. 南华北地区奥陶系层序地层与层序格架内古岩溶研究(博士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 师政, 2019. 南堡凹陷及周边凸起古岩溶作用特征及发育模式研究(博士学位论文). 青岛: 中国石油大学(华东).
- 田晓平, 张汶, 周连德, 等, 2021. 南堡凹陷二号断裂带古生界碳酸盐岩潜山岩溶模式. 岩性油气藏, 33(6):93-101.
- 王俊明, 2004. 千米桥潜山碳酸盐岩储层研究(博士学位论文). 北京: 中国地质大学(北京).
- 王永诗, 李继岩, 2017. 济阳坳陷平方王油田碳酸盐岩潜山内幕储层特征及其主控因素[J]. 中国石油大学学报

报(自然科学版), 41(4):27-35.

汪泽成, 赵文智, 胡素云, 等, 2013. 我国海相碳酸盐岩大油气田油气藏类型及分布特征[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(2):153-160.

肖述光, 吕丁友, 侯明才, 等, 2019. 渤海海域西南部中生代构造演化过程与潜山形成机制[J]. 天然气工业, 39(5):34-44.

许志琴, 杨经绥, 李化启, 等, 2012. 中国大陆印支碰撞造山系及其造山机制. 岩石学报, 28(6):1697-1709.

管念民, 王艳忠, 操应长, 等, 2018. 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. 石油与天然气地质, 39(2):355-365.

赵贤正, 王权, 金凤鸣, 等. 2012. 冀中坳陷隐蔽型潜山油气藏主控因素与勘探实践. 石油学报, 33(z1):71-79.

曾联波, 漆家福, 王永秀, 2007. 低渗透储层构造裂缝的成因类型及其形成地质条件. 石油学报, 28(4):52-56.

作者贡献度说明

作者 1: 肖述光, 本文中储层发育特征、构造控储、岩溶实验及相关认识主要贡献者;

作者 2: 李慧勇, 本文中岩性识别鉴定的主要贡献者;

作者 3: 黄志, 对本文中岩溶地貌恢复及控储认识作出贡献;

作者 4: 李飞, 本文中协助岩溶实验设计并对大气淡水岩溶改造认识作出贡献;

作者 5: 刘凯, 对本文中岩溶实验样品选择和实验操作作出贡献。