黄志,叶涛,肖述光,等. 渤海湾盆地沙垒田西北斜坡带碳酸盐岩潜山储层形成与油气成藏.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(6):1815-1828. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240249.
Huang Zhi,Ye Tao,Xiao Shuguang,et al. Formation and Hydrocarbon Accumulation of Slope-Type Carbonate Buried Hill Reservoir in Northwest of Shaleitian, Bohai Bay Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2024,54(6):1815-1828. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240249.

渤海湾盆地沙垒田西北斜坡带碳酸盐岩潜山储层形成与油气成藏

黄 志,叶 涛,肖述光,李 飞,高文博,戴建芳
中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300459

摘要:下古生界碳酸盐岩潜山是渤海湾盆地重要的油气勘探领域,目前已发现的碳酸盐岩潜山油气藏主要集中在构造高部位,对构造低部位斜坡带碳酸盐岩潜山的储层发育程度以及成藏规模还缺乏深入认识。为了探索斜坡带碳酸盐岩潜山储层发育规律,明确油气成藏条件,本研究以沙垒田西北(沙西北)斜坡带为靶区,开展了潜山构造演化、储集空间形成机理、潜山油气成藏综合分析。结果表明:沙西北斜坡带下古生界潜山岩性由上组合(大套灰岩夹白云岩、泥灰岩)和下组合(鲕粒灰岩、灰岩和泥岩互层)组成,凿山组区域稳定泥岩是二者的分界线;斜坡带潜山经历印支期、燕山早期、燕山中期、燕山晚期和喜马拉雅期五期构造运动,具有跷跷板式构造演化特征,多期构造活动形成的大量裂缝为储层发育奠定基础,优势岩性组合-叠合应力成缝-多期岩溶改造三元耦合控制碳酸盐岩潜山储层发育,上组合形成似层状缝溶型优质储层,是优势的油气聚集层系;低斜坡碳酸盐岩潜山处于烃源岩超压中心与常压储层直接接触的常超过渡带,发育上组合表生岩溶成储-下组合致密层遮挡封盖的地层侧封油气成藏模式,形成斜坡带大中型油田群。

关键词:碳酸盐岩;斜坡带潜山;缝溶型储层;地层侧封;油气成藏;渤海海域
doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240249 **中图分类号**:TE122.2;P618.13 **文献标志码**:A

Formation and Hydrocarbon Accumulation of Slope-Type Carbonate Buried Hill Reservoir in Northwest of Shaleitian, Bohai Bay Basin

Huang Zhi, Ye Tao, Xiao Shuguang, Li Fei, Gao Wenbo, Dai Jianfang
CNOOC China Limited, Tianjin Branch, Tianjin 300459, *China*

Abstract: Lower Paleozoic carbonate buried hill is an important oil and gas exploration field in Bohai Bay basin. The existing buried hill is mainly concentrated in the high structural position. The reservoir development and hydrocarbon accumulation scale in the low structural position of low slope carbonate buried hill are less understood. In order to understand the developing principles of slope carbonate buried hill and the forming conditions of hydrocarbon accumulations, the tectonic evolution of buried hill, the

收稿日期:2024-10-08
作者简介:黄志(1986—),男,高级工程师,主要从事石油地质综合研究工作, E-mail:huangzhi3@cnooc.com.cn
基金项目:国家自然科学基金项目(41972313,41790453)
Supported by the National Natural Science Foundation of China (41972313,41790453)

genetic mechanism of reservoir spaces, the comprehensive analysis of hydrocarbon accumulation were carried out in northwest Shaleitian. It is concluded that: 1) The lithology of the lower Paleozoic buried hill in the slope belt of northwest Shaleitian is composed of the upper association (large set of limestone and muddy limestone) and the lower association (oolitic limestone, interbedded limestone and mudstone), the stable mudstone in the Gushan Formation is the boundary between these two units. 2) The buried hill in the slope zone have undergone five periods of tectonic movements, namely the Indosinian, the Early Yanshanian, the Middle Yanshanian, the Late Yanshanian, and the Xishanian, and had the characteristics of seesaw-type structural evolution. A large number of fractures formed by multi-stage tectonic activities is favorable for the foundation of reservoirs. The component coupling of dominant lithology, superposition stress fracture formation and multi-stage karst transformation controlled the development of carbonate buried hill reservoirs, forming stratiform fracture-soluble high-quality reservoirs, of which the upper association is the dominant oil-gas accumulation layer. 3) The low-slope carbonate buried hill is located in the transitional zone, with the oil-gas accumulation model of upper supergene karst reservoir-lower dense layer shielding and sealing formation, forming large and medium-sized oilfield groups in the slope area.

Key words: carbonate rock; slope type buried hill; fracture-soluble reservoir; stratigraphic lateral sealing; Oil-gas accumulation; Bohai Sea

0 引言

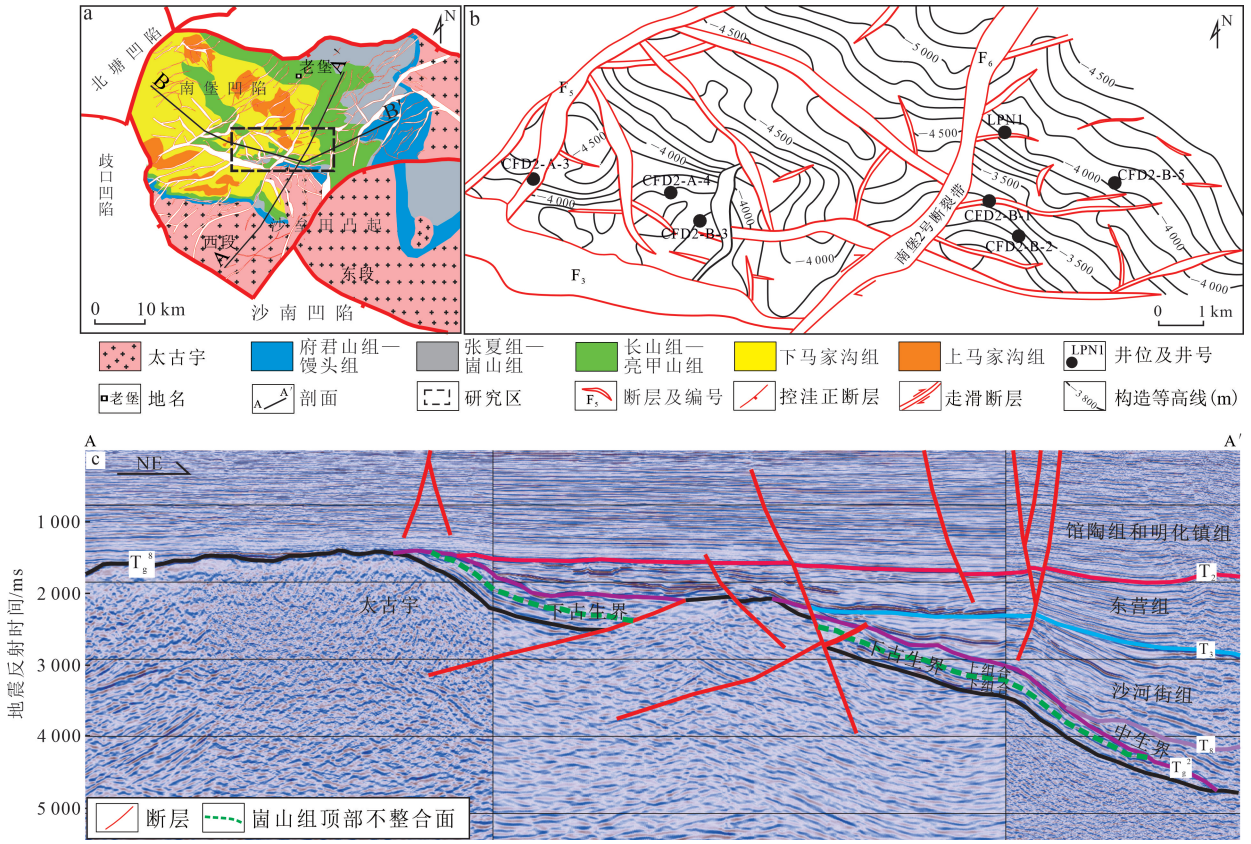
碳酸盐岩储集了全球约50%的石油和25%的天然气[1-3],是重要的油气储集岩。渤海湾盆地广泛发育下古生界碳酸盐岩潜山,目前已发现了任丘、千米桥、埕岛、杨税务等大中型下古生界碳酸盐岩潜山油气田,油气储量约占盆地总储量的6%[4],证实了渤海湾盆地古生界碳酸盐岩潜山具有巨大的勘探潜力,是渤海湾盆地重要勘探领域之一。

渤海海域近5年古潜山勘探取得了丰硕成果,相继发现了全球规模最大的变质岩凝析气田渤中19-6凝析气田及国内最大的变质岩油田渤中26-6油田[5],但下古生界碳酸盐岩潜山一直未获得大中型油气田发现。近年来,诸多石油地质研究人员针对渤海海域下古生界碳酸盐岩潜山开展了大量有益的研究,主要集中在地层岩性[6-7]、构造演化[8]、油气储集层[9-14]等方面,认识到:渤海古生界碳酸盐岩潜山以风化壳岩溶储层为主,岩性和沉积相是碳酸盐岩潜山储层形成的基础,岩溶作用是碳酸盐岩潜山储层形成的关键,构造破裂作用是碳酸盐岩潜山储层形成的纽带。但这些研究多数聚焦于储集空间、岩溶作用和白云岩成因等方面的探讨,且研究区域多集中于古隆起,而对断陷盆地占比最大的斜坡带碳酸盐岩潜山成藏条件和潜力缺乏研究。

沙垒田凸起西北(沙西北)斜坡带古生界碳酸盐岩潜山勘探始于1976年,在凸起核心区钻探了10余口探井,虽获得了油层发现但并无规模储量,斜坡带也仅在反向断裂形成的背斜构造发现了小型潜山油田(曹妃甸2-1),勘探自此陷入困境。2012—2016年,中海石油重新采集了沙垒田西段连片三维地震资料,在此基础上,大力开展了潜山地质组成及演化、储集空间形成与分布、油气聚集规律等相关研究,并在沙西北斜坡带发现了渤海海域首个下古生界潜山大中型油田——曹妃甸2-B油田,取得了较大勘探突破。本次研究选取沙西北斜坡带为靶区,根据最新三维地震、钻井、薄片观察及扫描电镜等实验分析和数据,探索斜坡带碳酸盐岩潜山储层的形成与油气成藏条件,提出缝溶型储层概念,建立烃源岩超压中心与常压储层直接接触的常超过渡低斜坡带碳酸盐岩潜山地层侧封油气成藏新模式,以期实现渤海海域斜坡带碳酸盐岩潜山勘探的突破,为断陷盆地类似地区油气勘探提供理论支持和技术依据。

1 研究区地质概况

研究区沙西北斜坡带位于渤海湾盆地沙垒田凸起西段西北部,因地处南堡凹陷向沙垒田凸起过渡的斜坡带,构造命名为沙西北斜坡带(或沙西北构造带),面积约3.0×10^3 km^2,呈北西走向(图1a、b)。研究区基底从南至北出露太古宇、下古生界和中生界(图1c)。太古宇以混合花岗岩与花岗片麻岩为



a. 沙西北及围区前中生代古地质图[10]；b. 沙西北斜坡带下古生界潜山顶面构造形态图；c. 过沙西北斜坡带地震剖面。

图 1　沙垒田西北构造纲要及潜山地层出露特征

Fig.1　Tectonic outline and buried hill stratigraphic outcropping characteristics in northwest Shaleitian

主；下古生界寒武系为海相碳酸盐岩和泥岩互层，以厚层泥岩夹薄层白云岩或灰岩为主，下古生界奥陶系为海相碳酸盐岩沉积，以大套灰岩和白云岩为主，夹薄层泥灰岩；中生界岩性最为复杂，为一套含火山岩的陆相碎屑岩，其仅发育在南堡凹陷深洼区；上覆新生界自下而上发育沙河街组、东营组、馆陶组、明化镇组和平原组，且从北向南新生界逐渐超覆变新，至凸起高部位仅发育新近系馆陶组和明化镇组(图 1c)。南堡凹陷是发育于寒武系—奥陶系基底之上的中、新生代叠合型裂谷盆地，研究区由于紧邻南堡凹陷曹妃甸次洼、林雀次洼，油气成藏条件较为优越。

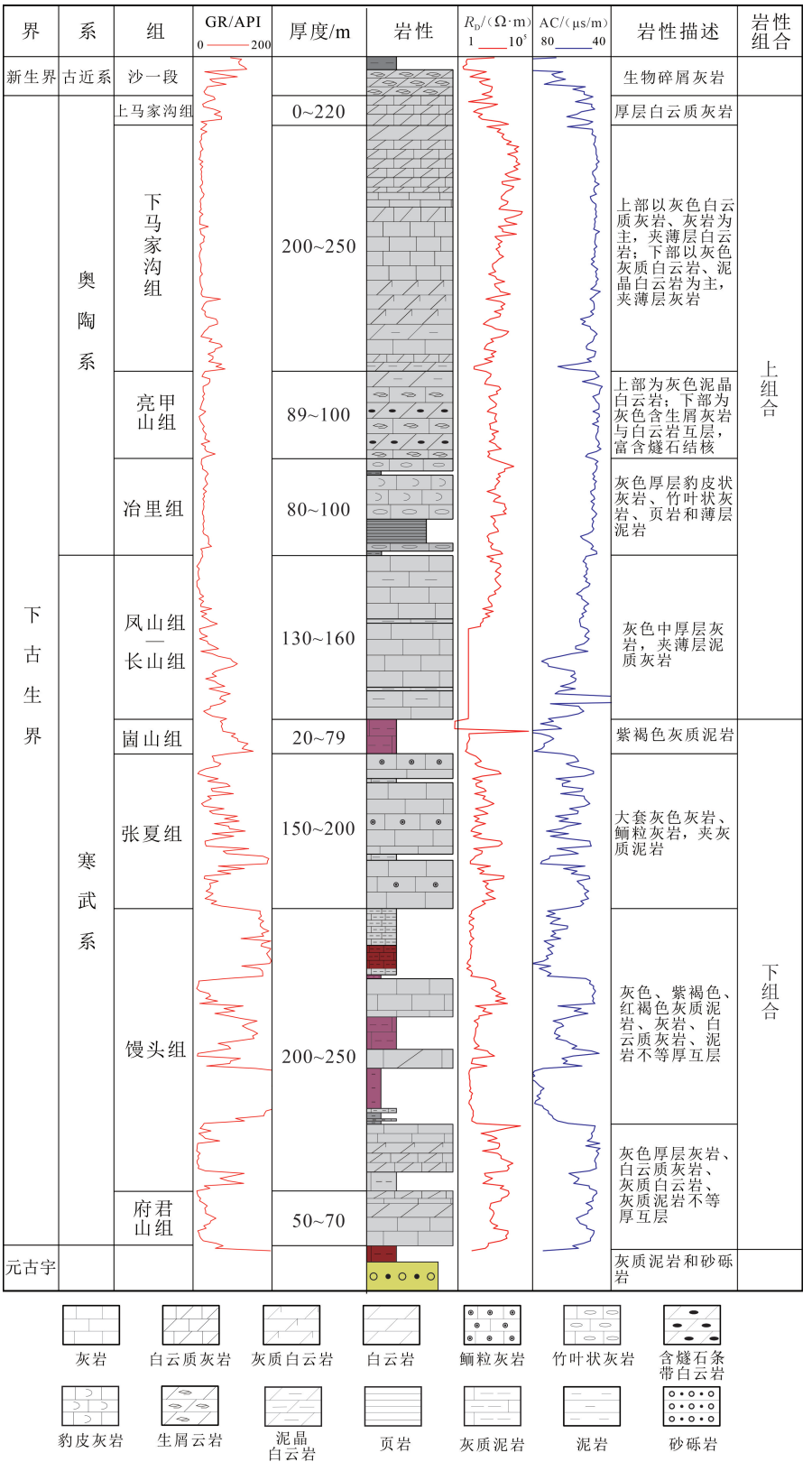
2　潜山地层岩性及构造演化

2.1　潜山地层特征和岩性序列

沙西北斜坡带隶属于华北地台，基底主要为下古生界克拉通稳定地台沉积物，发育寒武系和奥陶系共计 10 个地层组(图 2)。通过岩心、偏光显微、X 射线衍射及扫描电镜观察发现，下古生界岩性序列具有两分性，可分为上组合和下组合。

上组合以碳酸盐岩为主，主要发育大套灰岩夹白云岩、泥灰岩，包含上下马家沟组、亮甲山组、冶里组、凤山组和长山组。凤山组—长山组主要发育灰色中厚层灰岩，长山组和凤山组的界线不明显，总厚度为 130～160 m；冶里组岩性以灰岩为主，白云石体积分数向上逐渐增加至 10%，厚度为 80～100 m，下部发育薄层泥灰岩与凤山组分隔；亮甲山组上部为灰色泥晶白云岩，下部为灰色含生屑灰岩与白云岩互层，白云石体积分数向上逐渐降低，厚度为 89～100 m，与冶里组分界不明显；下马家沟组岩性以深灰色白云岩为主，白云石体积分数在中部最低，厚度为 200～250 m；上马家沟组岩性以厚层白云质灰岩为主，残留厚度为 0～220 m。因此，上组合不发育稳定海相泥岩，各组仅以薄层泥灰岩为分界，且多数分界不清楚，岩性较为均一，总体以碳酸盐岩为主(图 2)。

下组合岩性为鲕粒灰岩、泥岩、薄层灰岩或白云岩互层，碳酸盐岩体积分数低于上组合，主要包括崮



GR. 自然伽马；R_D. 电阻率；AC. 声波时差。

图2 沙垒田西北下古生界综合柱状图

Fig.2 Comprehensive histogram of the Lower Paleozoic in northwest of Shaleitian

山组、张夏组、馒头组和府君山组。其中：府君山组岩性以灰岩、白云质灰岩和白云岩为主；馒头组以灰质泥岩、灰岩和白云质灰岩和泥岩不等厚互层为主；张夏组发育大套灰岩、鲕粒灰岩，可夹中厚层灰质泥岩；崮山组岩性主要为灰质泥岩。

通过岩性序列精细分析，认为下古生界复杂岩性潜山可简化为以碳酸盐岩为主的上组合及以泥岩为主的下组合。上组合和下组合岩性的分界为崮山组灰质泥岩，钻井揭示渤海海域西部崮山组海相泥岩分布稳定，且崮山组上、下岩性差异大，因此，在崮山组顶部出现可区域追踪的地震轴（图 1c），依据地层厚度关系可预测地层分布，提高探井成功率。

2.2　潜山形成及演化

2.2.1　断裂体系特征

研究区发育北西向（或近东西向）及北东向两组断裂体系，相互切割、分割，形成网格状构造格局。北西向（或近东西向）和北东向断裂分别归属于不同的断裂系。北西向（或近东西向）断裂属张—蓬断裂体系，剖面上呈上陡下缓的形态，在断层上盘邻近断层处下古生界逐渐减薄（图 1b、c）；而中生界和古近系则明显增厚，呈现跷跷板的特征，北西向断层整体上控制了该区隆凹相间的格局。北东向断裂隶属于黄骅—东明断裂体系，由多条平行蜿蜒延伸的断裂组成，剖面上呈陡倾板状，与北西向断层呈交切关系，将北西向凸起分切成多个独立的山头。整体来看，研究区断裂体系呈现三横四纵网格状构造格局。

2.2.2　潜山形成及演化

沙西北地区构造演化作为渤海湾盆地中新生代构造演化的缩影，与整个东亚中生代以来的大地构造动力学背景紧密相关[15-17]。根据地层变化及断裂活动等研究，并结合前人成果[14-18]，沙西北地区识别出印支期、燕山早期、燕山中期、燕山晚期和喜马拉雅期五期构造活动，控制了潜山的形成与演化。

早古生代该区在太古宇变质岩基底上沉积了一套陆表海的碳酸盐岩，晚古生代为海陆过渡相沉积。由于早古生代加里东运动和海西运动以垂直升降为主，水平方向构造作用较弱，此时古生代地层形变小，改造弱（图 3a）。

印支期，受华南板块与华北板块碰撞作用影响，研究区形成了一系列的北西西向（或近东西向）逆冲断裂，引起了古生界的褶皱变形，同时形成了多排整体向北东方向逐步抬升的北西向构造带，并在逆冲断裂上盘和褶皱高部位发生剥蚀。该时期上古生界基本剥蚀殆尽，下古生界在逆冲断裂上盘根部和褶皱高部位剥蚀强烈（图 3b、图 1c）。

燕山早期，研究区转入滨太平洋构造体系域，受北西向挤压应力场作用，北东向逆冲断裂开始形成，在先存北西向逆冲断裂及相关褶皱的格局上进行立交桥式叠加，沙西北地区进一步差异隆升，形成了三横四纵的构造雏形，导致北东向逆冲断裂上盘靠近两组断裂根部的下古生界被强烈剥蚀，形成多个中间厚、边缘薄的古生界残留区（图 3c，图 1a、c）。

燕山中期，华北地区构造体制和应力场发生了根本性变革，研究区由先前的压扭剪切应力场转入张扭剪切应力场，稳定的克拉通被破坏，柏各庄等先存的北西向逆冲断裂发生负反转，形成了北断南超的南堡凹陷雏形，并沉积了中生代地层。沙西北地区受块断旋转翘倾作用，为隆升区，剥蚀作用强。由此可见，燕山中期沙西北地区发生了一次大的构造格局变化，由印支期北高南低转变为北低南高，形成跷跷板式演化现象（图 3d）。燕山晚期，受东部高原作用影响，研究区整体抬升构造作用较弱。

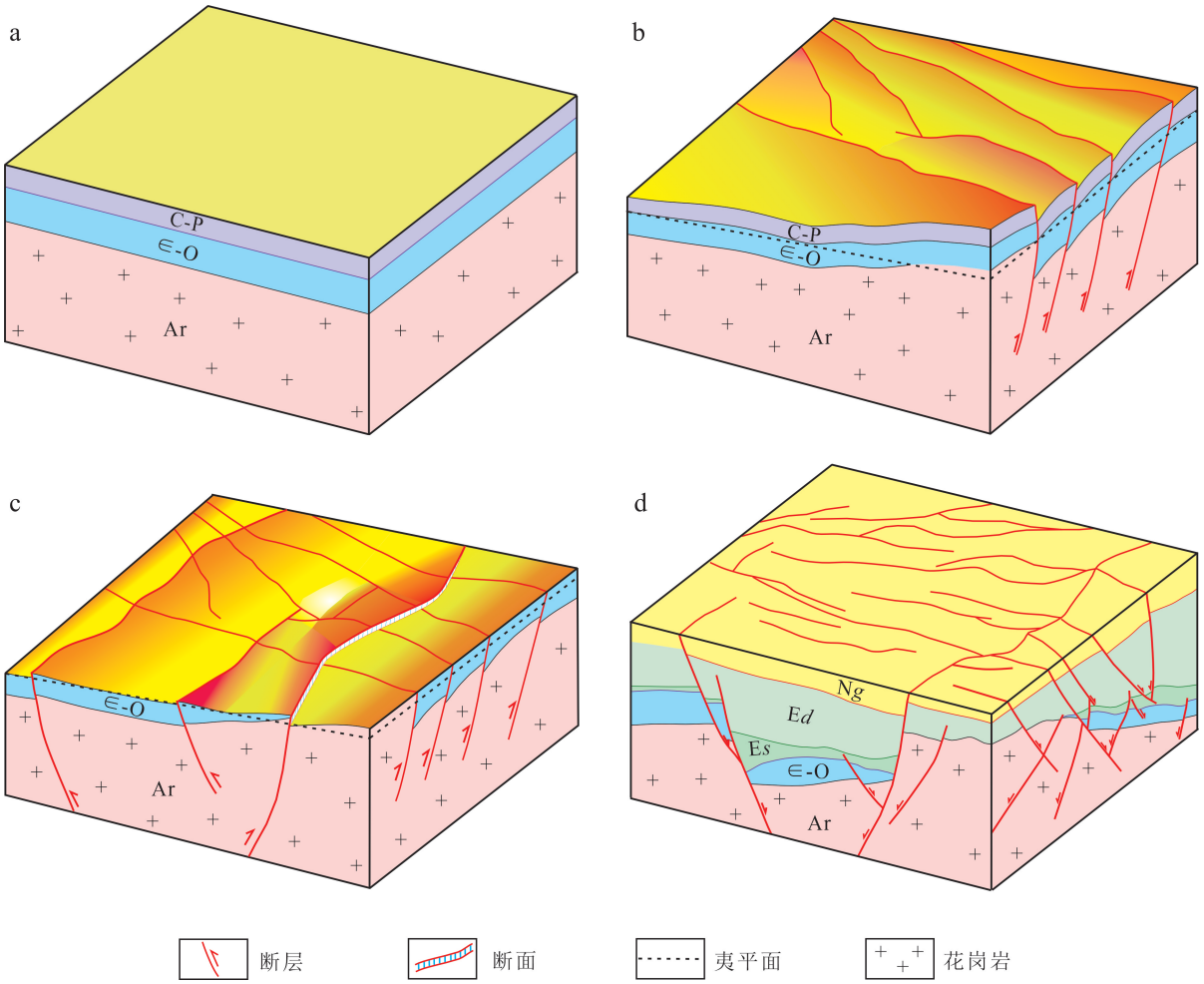
喜马拉雅期，受太平洋持续俯冲和地幔隆升热对流影响，该区继承了燕山中期构造格局，先存北西向断裂和北东向断裂发生强烈断陷，北断南超为主，并伴随东西向伸展，形成南堡凹陷多个烃源灶和多个潜山块体，造就了沙西北地区南北分带、东西分块的构造格局（图 3d）。受差异隆升影响，沙西北地区逐步定型为南堡凹陷向沙垒田凸起过渡的斜坡带。

基于构造演化分析，总结了断陷盆地碳酸盐岩潜山勘探低效原因：受多期构造演化影响，现今构造高并非印支期和燕山期挤压应力集中区，导致高点储层差，储量规模小；受剥蚀和喜马拉雅期断陷影响，下古生界现今主要分布在斜坡带，风化壳储层较发育；传统认为斜坡带为油气运移过路区[19-20]，难以形成大中型油气田，因此对斜坡带探索少。

3　储集空间与储层发育模式

3.1　储层基本特征

由岩心、成像及薄片等实验资料分析可知，沙西北地区下古生界储集空间类型多样，以裂缝、溶孔、溶洞为主。裂缝、溶孔与溶洞具有耦合共生关系，常见裂缝的溶蚀扩大，以及沿裂缝发育的溶蚀孔、洞（图 4）。该现象说明，下古生界碳酸盐岩潜山储层的形成主要依靠次生作用，后期构造运动成缝以及沿缝溶蚀是储层形成的主要营力。本研究将这类在



a. 海西期;b. 印支期;c. 燕山早期;d. 燕山中期—喜马拉雅期。Ar. 太古宇;∈-O. 寒武系—奥陶系;C-P. 石炭系—二叠系;Es. 古近系沙河街组;Ed. 古近系东营组;Ng. 新近系馆陶组。

图3 沙垒田西北地区潜山发育演化史图

Fig.3 Comprehensive histogram of Lower Paleozoic in northwest Shaleitian

微晶灰岩或白云岩中发育沿缝溶蚀形成的储集空间称为缝溶型储层。

1)裂缝:研究区构造裂缝极为发育,在岩心、薄片上大量可见(图4h、i)。受后期流体影响,构造裂缝发生溶蚀形成溶蚀裂缝(图4c)。同一条溶蚀缝不同位置的宽度不一致,一般介于0.03~1.00 cm之间。裂缝极易被碳酸盐岩矿物所充填(图4e),多数裂缝可见沿缝发育的溶蚀扩大孔洞(图4b、g)。成像资料显示,研究区主要发育两组裂缝,一组以北东东向为主,另一组以北西西向为主,其中北东东向裂缝占主导。另外,裂缝发育的深度下限与测试产能底界具有高度一致性。

2)溶孔:由于受后期流体作用,碳酸盐岩发生溶解,产生一系列晶间扩溶孔(图4c、d),孔径较小,一般小于1 mm,该类储集空间较为少见。

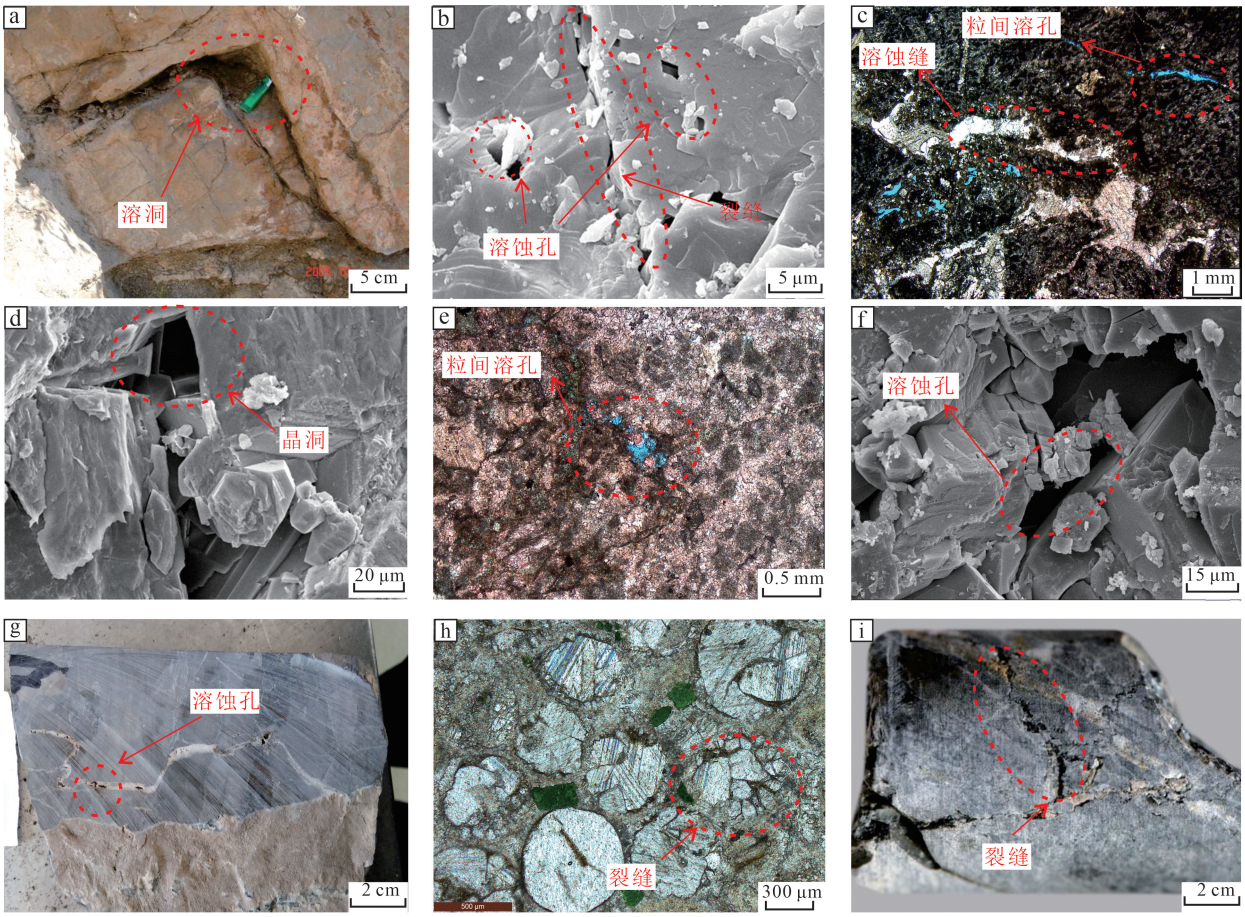
3)溶洞:主要发育在灰岩地层中,常见于马家沟组和冶里组—亮甲山组,独立分布或者沿裂缝分布,溶洞大小不一,一般直径为1~2 cm(图4a)。

由钻井揭示可知:潜山顶部发育高孔高渗储层,以裂缝-孔洞性储层为主;潜山中下部储层低孔高渗,以孔洞-裂缝性储层为主(图5)。统计表明,该区潜山储层主要分布在距潜山顶面300 m范围以内的上组合中,下组合仅局部白云岩段发育薄层储层,储层净毛比低(图5)。

3.2 储集空间

3.2.1 裂缝的形成

沙西北地区下古生界海相碳酸盐岩历经印支、燕山及喜马拉雅多期构造活动,受北西和北东向为主的挤压、走滑、伸展应力叠加改造,形成多种类型的裂缝。印支期,在强烈近南北向挤压作用下,形成



a. CFD2－A－2 井，3 600.45 m，白云岩，溶洞；b. CFD2－B－3 井，3 715.00 m，灰岩，裂缝和溶蚀孔；c. CFD2－B－3 井，3 333.00 m，亮晶砂屑灰岩，粒间溶孔和溶蚀缝；d. CFD2－B－3 井，3 664.00 m，白云质灰岩，可见白云石晶洞；e. CFD2－B－3 井，3 817.00 m，灰岩，发育粒间溶蚀孔；f. CFD2－B－3 井，4 082.00 m，白云岩，白云石溶蚀孔；g. CFD2－A－2 井，3 709.50 m，顺裂缝发育溶蚀孔；h. CFD2－B－3 井，3 955.00 m，鲕粒灰岩，构造裂缝发育；i. CFD2－B－3 井，3 757.00 m，灰岩，构造裂缝发育。

图 4　沙垒田西北地区下古生界碳酸盐岩储层储集空间特征

Fig.4　Spatial characteristics of Lower Paleozoic carbonate reservoirs in northwest Shaleitian

一系列北西—南东向逆冲断裂和相关褶皱，伴随断裂和隆起产生，发育北西向裂缝体系。燕山早期，在北西—南东向挤压作用下，在早期裂缝基础上叠加了北东向裂缝体系。燕山中期—喜马拉雅期，在近南北向拉张应力场下，潜山裂缝体系发生了一定程度的活化，形成了优质的裂缝储集体。

利用成像测井资料与元素测、录井资料，统计了不同白云石体积分数段的裂缝发育线密度（图 6），结果表明，除了少量灰岩中（白云石体积分数低）裂缝密度较大之外，整体上随着白云石体积分数的增加，裂缝的密度具有明显增加的趋势。实验表明，白云岩的抗压强度为 49.00 MPa，灰质白云岩为 70.74 MPa，白云质灰岩抗压强度为 75.40 MPa，而灰岩的抗压强度可达 104.90 MPa[21]。即随着碳酸盐岩白云石体积分数的增加，抗压强度具有逐步降低的趋势。需注意，白云岩的抗压强度仅为灰岩的 1/2，白云岩体积分数越高，岩石越容易发生破裂形成构造裂缝。另外，从裂缝纵向分布观察，上组合岩性较为均一，多类型裂缝交织发育，而下组合仅零星层段裂缝较为发育（图 5）。导致下组合裂缝发育差的原因主要是崮山组发育稳定泥岩，裂缝大部分终止于该力学性质变化界面上[22]。

3.2.2　裂缝的溶蚀机制

构造裂缝为流体的渗流提供了良好的通道，这是岩溶储层发育的基础。裂缝充填物的观察以及碳氧同位素分析结果表明，研究区至少发生了两期岩溶：第一期充填物以细晶白云岩/灰岩为主，C 同位素介于－2‰～0之间，O同位素介于－16‰～－8‰

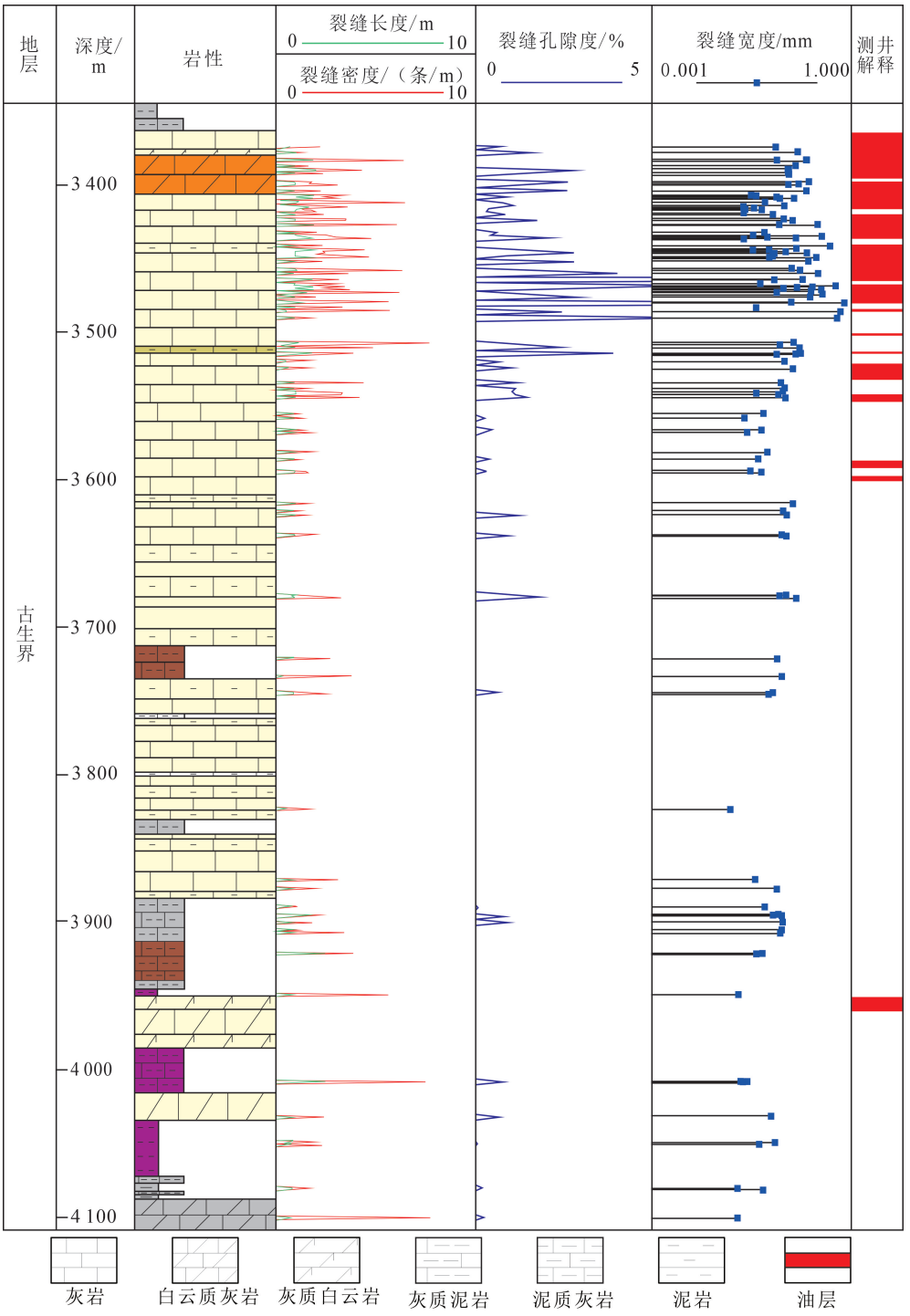
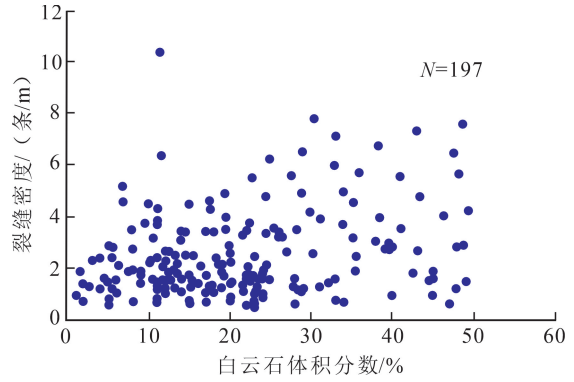


图5 CFD2－B－2井裂缝垂向发育特征

Fig.5 Vertical development characteristics of fractures in Well CFD2－B－2

之间(图7),可能代表表生期的大气淡水溶蚀;第二期以粗晶白云岩/灰岩为主,C同位素介于－4‰～－2‰之间,O同位素介于－18‰～－8‰之间(图7),表明其成岩温度更高,可能与埋藏期的岩溶有关[23-24]。

但值得注意的是,沙西北地区上组合以灰岩为主,白云岩欠发育,与渤海湾盆地已发现规模性储层存在较大差异,这也是该区已钻井未发现规模储层的根本原因。通常认为,大套灰岩不具备大型优质储层发育条件;但碳酸盐岩溶蚀作用模拟实验[25]表明,灰岩中白云石质量分数不同会对其溶蚀强度产



N.样本数。

图 6　灰岩中裂缝密度与白云石体积分数的关系

Fig.6　Relationship between the content of calcite in limestone and density of fissures

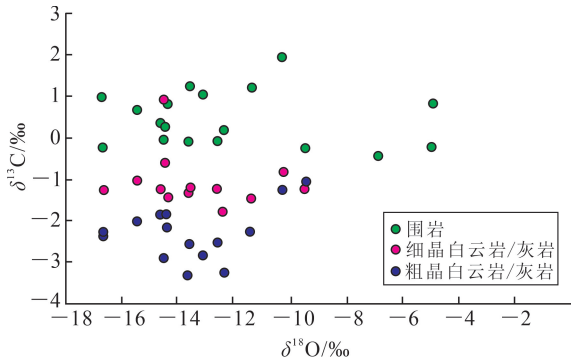


图 7　潜山围岩及构造裂缝充填物 C、O 同位素交会图

Fig.7　Intersection diagram of C and O isotopes in buried hill surrounding rock and tectonic fracture fill

生影响，当白云石体积分数＜9%时，溶蚀作用与白云石体积分数呈正相关关系；当白云石体积分数＞15%时，溶蚀作用与白云石体积分数呈负相关关系，说明白云质灰岩这类过渡岩性具有形成优质储层的潜力。而研究区下古生界顶部的马家沟组发育白云质灰岩和灰岩，亮甲山组—冶里组主要发育白云岩和白云质灰岩的岩性组合；上组合总体为灰岩、白云质灰岩互层，且灰岩中白云石体积分数大多介于5%～15%之间，溶蚀作用最强，易于形成厚层优质储层。

基于以上分析，结合构造演化过程，认为研究区发育四期表生岩溶和一期埋藏岩溶作用。加里东期构造活动虽然较弱，但经历长达 1.5 亿 a 的风化剥蚀（图 8a）；印支期，受南北向挤压，研究区形成近北西西向褶皱，在印支期逆冲断裂带附近形成裂缝密集带，与此同时发生第二次表生岩溶，受地貌影响，南堡凹陷现今凹陷区为岩溶高地，流体流动方向由北向南（图 8b）；燕山早期，在压扭作用下，断裂附近进一步形成北东东向断裂密集区，此时古生界潜山仍然暴露，持续表生溶蚀（图 8c），裂缝的充填物表现为相对高的 C 同位素特征；燕山中晚期—喜马拉雅期早期，由于伸展作用，构造格局发生了变革，南部沙垒田为岩溶高地，流体向北流动（图 8d）；喜马拉雅晚期，古生界在斜坡背景下发生埋藏顺层岩溶，由于埋藏深度较大，导致充填物的 C 同位素更偏负；随着新生代的持续埋藏，O 同位素整体偏负。岩溶高地的变迁，导致现今构造高部位和低部位均具有较强的岩溶作用。

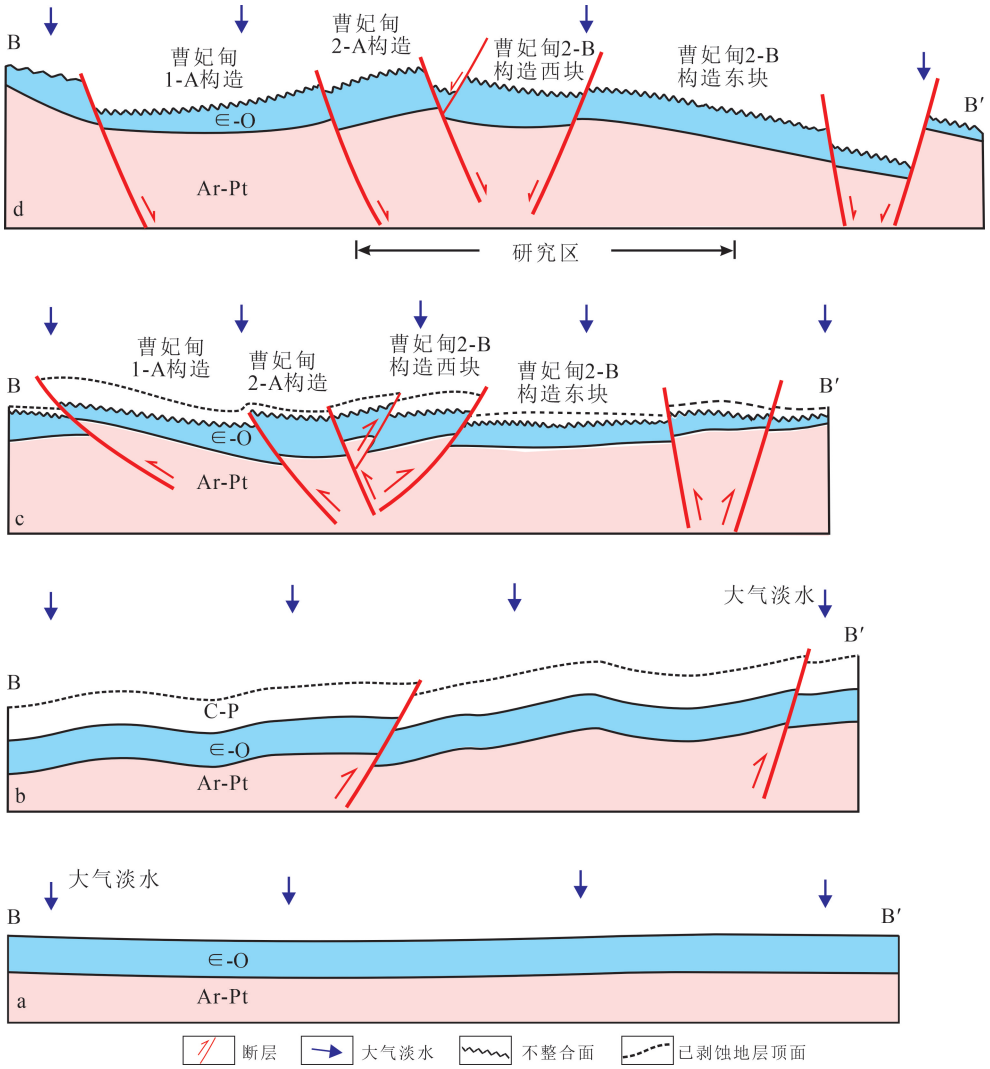
3.2.3　储层发育模式

沙西北地区由于下古生界岩性组合特殊，影响了储层的发育模式。上组合各组界线不清，岩性以碳酸盐岩为主，岩性较为均一，且裂缝交织发育，受后期岩溶改造，在其顶部 200～300 m 内易形成储层。下组合发育崮山组稳定泥岩、张夏组鲕粒灰岩以及馒头组稳定泥岩，且张夏组鲕粒灰岩相对泥晶灰岩溶蚀效率低[26]；另外，下组合颗粒灰岩的弹性模量最大，同一构造区，鲕粒灰岩裂缝发育条件较灰岩和白云岩差，裂缝密度低[27]，钻井揭示张夏组均为致密层。可见下组合难以形成规模储层，一般为非渗透层，是流体流动的遮挡层。

基于岩性组合序列、裂缝纵向分布规律以及岩溶作用模式，认为沙西北地区碳酸盐岩潜山受优势岩性组合-叠合应力成缝-多期岩溶改造的共同控制，上组合形成了沿潜山顶面发育的、具穿时效应的似层状缝溶型储层，下组合一般为致密层。上组合白云质灰岩提供了较好的物质基础；同时受到印支—燕山运动早期和燕山运动晚期两期构造挤压，造成上组合多类裂缝交织形成缝网体系；后期沿缝网体系进行多期岩溶改造，印支期大气淡水由北向南、燕山中期—喜马拉雅期大气淡水由南向北运移，岩溶高地的变迁使得现今构造高部位和低部位均发育规模性储层；多因素耦合下，形成一套沿潜山顶面发育的、具有穿时效应的、大面积分布的似层状缝溶型储层（图 9），该类储层形成与我国西部的顺层岩溶、断溶体有本质区别。

4　地层侧封型碳酸盐岩潜山成藏新模式

沙西北地区碳酸盐岩潜山带整体表现为凹陷区向凸起区过渡的斜坡带。传统成藏模式认为，斜坡



a. 加里东期(表生期潜山岩溶);b. 印支期(断裂控制表生岩溶);c. 燕山早期(断裂控制表生岩溶);d. 燕山中晚期—喜马拉雅期(表生和埋藏岩溶)。∈. 寒武系;O. 奥陶系;Ar. 太古宇;Pt. 元古宇。剖面B-B′位置见图1。

图8 古地貌发生反转形成四期表生岩溶作用

Fig.8 Paleolandform inverted to form four stages of supergenetic karst

带的单斜型潜山由于风化壳储层连通问题缺少遮挡保存条件,成藏风险较大[19-20]。

研究区下古生界岩性序列特殊,具有明显的两分特征。上组合表现为较纯碳酸盐岩段,易于形成巨厚的缝溶型储层;而下组合为鲕粒灰岩、灰岩和泥岩等互层,其中张夏组鲕粒灰岩的鲕粒之间充填泥晶灰岩,导致该套地层溶蚀速率低、抗压强度大、力学非均质性强[26-27],裂缝易终止于力学性质变化界面上,难形成规模较大的构造缝,表现为致密层发育段。基于下古生界岩性序列控制下储层的变化规律,建立了斜坡带下古生界碳酸盐岩潜山上组合表生岩溶成储-下组合致密层遮挡封盖的新型成藏模式,认识到斜坡带潜山同样具有截留油气能力,具备形成大中型油气田的保存条件(图10)。

此外,沙西北地区整体的单斜构造特征致使潜山顶部稳定分布的缝溶储层与沙河街组优质烃源岩直接接触,即潜山侧向与生烃中心对接。潜山顶面大面积发育的缝溶型储层可以作为油气的高效输导体系,将低部位生烃中心生成的油气向高部位运移和聚集;且曹妃甸2-B构造紧邻的林雀次洼和曹妃甸次洼,均发育超压[28-30],最大压力系数可达1.7以上。两大超压中心与常压体系的直接接触,使潜山处于常超过渡位置,导致低孔渗的潜山成为油气运移和汇聚的指向区,在超压驱动下,使油气能高效、远距离地在潜山中运移。

油气成藏模式的新认识推动了勘探思路转变,

坚定了向曹妃甸 2－B 构造斜坡带潜山进一步勘探的信心。在斜坡带钻探的 CFD2－B－2 井，测试获得日产油超千立方米的产能，构造低部位后续钻探的两口井也获得成功，发现了曹妃甸 2－B 中型整装潜山油田，油藏厚度达 1 200 m，标志着渤海油田在斜坡带潜山勘探领域获得突破。

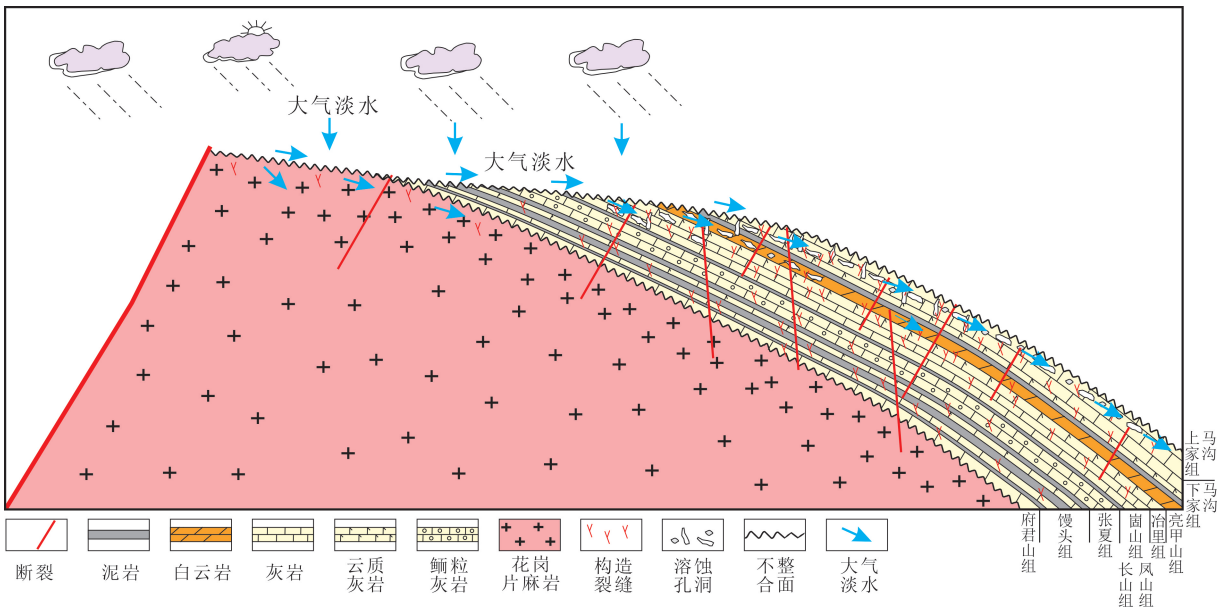
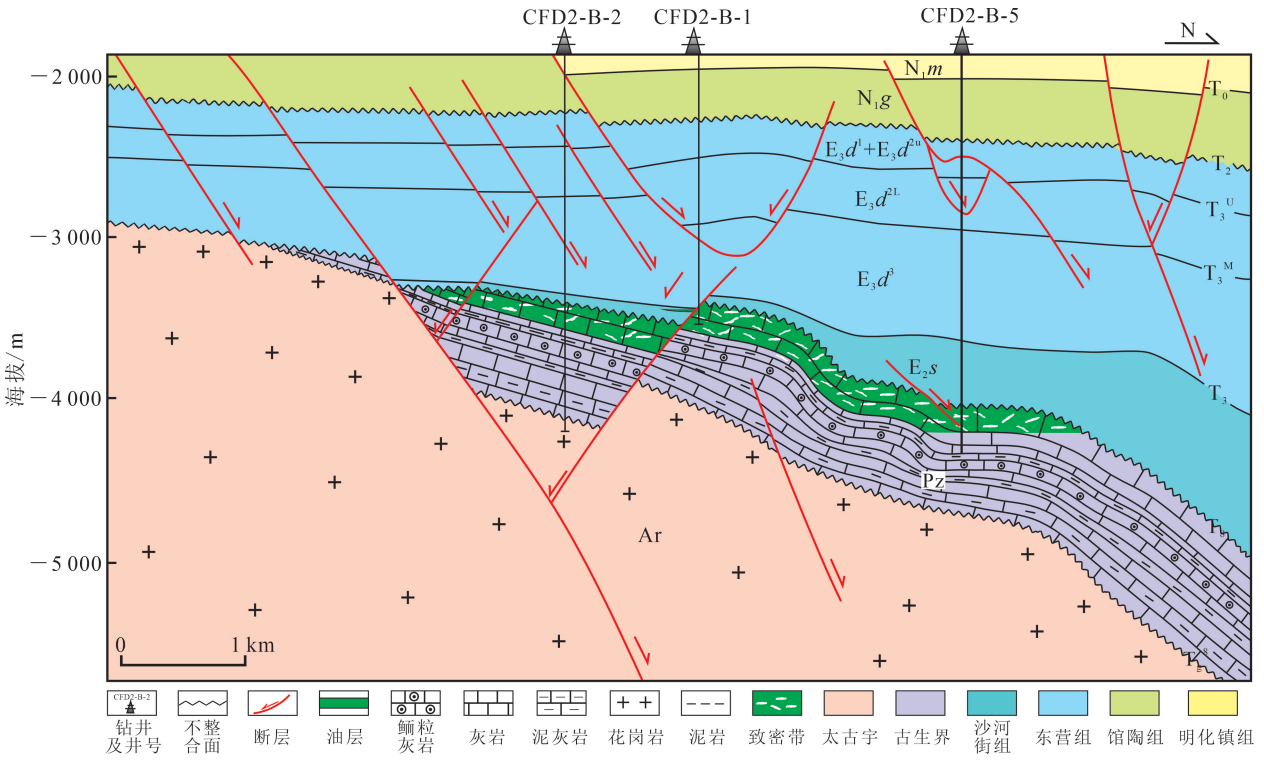


图 9　斜坡型下古生界碳酸盐岩“穿时”缝溶型似层状储层发育模式

Fig.9　Development pattern of slope-type Lower Paleozoic carbonate rocks “through” fracture-like layered reservoirs



Ar. 太古宇；Pz. 古生界；E_2s. 沙河街组；E_3d^3. 东营组三段；E_3d^{2L}. 东营组二段下部；$E_3d^1+E_3d^{2u}$. 东营组一段＋东营组二段上部；N_1g. 馆陶组；N_1m. 明化镇组。

图 10　曹妃甸 2－B 油田斜坡带成藏模式图

Fig.10　Accumulation model of slope zone of Caofeidian Oilfield 2－B

5 结论

1)沙西北斜坡带潜山主要发育下古生界,其岩性序列由上组合和下组合组成。上组合为较纯碳酸盐岩段(包括大套灰岩夹白云岩),而下组合为鲕粒灰岩、灰岩、灰质泥岩和泥岩等互层;上、下组合以崮山组海相稳定泥岩为分界线,可进行区域追踪,明确地层分布规律,提高探井成功率。

2)沙垒田古隆起斜坡上的潜山经历印支期、燕山早期、燕山中期、燕山晚期和喜马拉雅期五期构造运动,形成跷跷板式构造演化,使研究区发育四期表生岩溶和一期埋藏岩溶,导致现今构造高部位和低部位均具有较强的岩溶作用。

3)碳酸盐岩潜山储层受优势岩性组合-叠合应力成缝-多期岩溶改造三元耦合控制,形成一套沿潜山顶面发育的、具有穿时效应的及大面积分布的似层状缝溶型储层。

4)斜坡带碳酸盐岩潜山处于常超过渡带,发育上组合表生岩溶成储-下组合致密层遮挡封盖的地层侧封油气成藏模式,表明斜坡带亦可形成大中型油田群。

参考文献(References):

[1] 王建波,沈安江,蔡习尧,等. 全球奥陶系碳酸盐岩油气藏综述[J].地层学杂志,2008,32(4):363-373.
Wang Jianbo, Shen Anjiang, Cai Xiyao, et al. A Review of Global Ordovician Carbonate Reservoirs[J]. Journal of Stratigraphy, 2008, 32(4): 363-373.

[2] 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.
Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Hu Suyun, et al. Geological Conditions and Distribution Characteristics of Large-Scale Development of Carbonate Reservoirs in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 1-12.

[3] 谢增业,魏国齐,李剑,等. 中国海相碳酸盐岩大气田成藏特征与模式[J].石油学报,2013, 34(增刊1): 29-40.
Xie Zengye, Wei Guoqi, Li Jian, et al. Accumulation Characteristics and Models of Marine Carbonate Gas Field in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(Sup. 1): 29-40.

[4] 费宝生,汪建红.中国海相油气田勘探实例之三:渤海湾盆地任丘古潜山大油田的发现与勘探[J].海相油气地质,2005,10(3):43-50.
Fei Baosheng, Wang Jianhong. Exploration of Marine Oil and Gas Fields in China: 3 : Discovery and Exploration of Large Buried Hill Oil Fields in Renqiugu in Bohai Bay Basin[J]. Marine Petroleum Geology, 2005, 10(3): 43-50.

[5] 衣健, 李慧勇, 单玄龙, 等.渤海湾盆地渤中凹陷太古宇变质岩潜山储集层垂向结构单元划分与识别[J].石油勘探与开发,2022,49(6): 1107-1118.
Yi Jian, Li Huiyong, Shan Xuanlong, et al. Division and Identification of Vertical Structural Units of Ararchean Metamorphic Rock Reservoir in Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022,49 (6): 1107-1118.

[6] 华晓莉,李慧勇,孙希家,等.渤海沙西北构造带下古生界碳酸盐岩潜山白云岩形成机制研究[J]. 高校地质学报,2018,24(6):833-840.
Hua Xiaoli, Li Huiyong, Sun Xijia, et al. Study on the Formation Mechanism of Buried Hill Dolomite of Paleozoic Carbonate Rocks in the Northwest Tectonic Belt of Bohaisha[J]. Geology Journal of Chinese Universities, 2018, 24(6): 833-840.

[7] 谌辰. 沙垒田凸起及周缘潜山成藏条件研究[D]. 成都:成都理工大学,2020.
Chen Chen. Study on the Accumulation Conditions of the Uplift and Periphery Buried Hills in Shaleitian [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.

[8] 胡贺伟,李慧勇,于海波,等.渤中21-22构造区断裂演化及其对油气的控制作用[J]. 东北石油大学学报,2016,40(2):36-45.
Hu Hewei, Li Huiyong, Yu Haibo, et al. Fault Evolution in Bozhong 21-22 Tectonic Area and Its Controlling Effect on Oil and Gas[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2016, 40(2): 36-45.

[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.
Yu Haibo, Wang Deying, Niu Chengmin, et al. Characteristics and Formation Mechanism of Low-Raised Carbonate Buried Hill Reservoirs in Bonan Sea [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(2): 150-156.

[10] 董月霞,赵宗举,曹中宏,等. 南堡凹陷奥陶系碳酸盐岩岩溶残丘圈闭勘探潜力及意义[J].石油学报,2015,36(6):653-663.

Dong Yuexia, Zhao Zongju, Cao Zhonghong, et al. Exploration Potentialand Significance of Ordovician Carbonate Karst Remnant Mound Trap in Nanpu Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(6): 653-663.

[11] 华晓莉，李慧勇，孙希家，等.渤中凹陷碳酸盐岩潜山岩溶分带特征与优质储层分布规律研究[J].高校地质学报，2020，26(3)：333-338.
Hua Xiaoli, Li Huiyong, Sun Xijia, et al. Study on the Characteristics of Karst Zoning and the Distribution of High-Quality Reservoirs in Carbonate Buried Hills in Bozhong Sag[J]. Geological Journal of Chinese Universities, 2020, 26(3): 333-338.

[12] 杨一珉，罗健，徐云龙，等.渤南低凸起下古生界碳酸盐岩潜山储层特征及控制因素[J]. 断块油气田，2020，27(4)：448-453.
Yang Yimin, Luo Jian, Xu Yunlong, et al. Characteristics and Controlling Factors of Buried Hill Reservoirs in Paleozoic Carbonate Rocks Under the Low Bulge of Bonan Province[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2020, 27(4): 448-453.

[13] 张岚，王少鹏，吴穹螈，等. 古潜山Z油田下古生界碳酸盐岩主控因素及储层发育模式[J]. 地质与资源，2023，32(1)：49-56.
Zhang Lan, Wang Shaopeng, Wu Qiongyuan, et al. Main Controlling Factors and Reservoir Development Model of Lower Paleozoic Carbonate Rocks in Buried Hill Z Oilfield[J]. Geology & Resources, 2023, 32(1): 49-56.

[14] 李慧勇，肖述光，李飞，等. 渤海西部沙西北斜坡带下古生界潜山储层特征及成藏主控因素[J]. 地球科学，2023，48(1)：329-341.
Li Huiyong, Xiao Shuguang, Li Fei, et al. Characteristics of Paleozoic Buried Hill Reservoirs in the Northwest Slope Belt of the Western Bohai Sea and the Main Controlling Factors of Accumulation[J]. Earth Science, 2023, 48(1): 329-341.

[15] 李三忠，索艳慧，戴黎明，等. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏[J]. 地学前缘，2010，17(4)：64-89.
Li Sanzhong, Suo Yanhui, Dai Liming, et al. Formation of Bohai Bay Basin and Craton Failure in North China[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(4): 64-89.

[16] 陆诗阔，李继岩，吴孔友，等. 冀中坳陷潜山构造演化特征及其石油地质意义[J]. 石油天然气学报，2011，33(11)：35-40.
Lu Shikuo, Li Jiyan, Wu Kongyou, et al. Tectonic Evolution Characteristics and Petroleum Geological Significance of Buried Hills in Jizhong Depression[J]. Journal of Oil and Gas Research, 2011, 33(11): 35-40.

[17] 付立新，楼达，李宏军，等.印支—燕山运动对大港探区古潜山形成的控制作用[J].石油学报，2016，37(12)：19-30.
Fu Lixin, Lou Da, Li Hongjun, et al. The Controlling Effect of Indo-Yanshan Movement on the Formation of Ancient Buried Hills in Dagang Exploration Area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(12): 19-30.

[18] Huang Z, Yang H, Ye T, et al. Characteristics and Formation Mechanism of Carbonate Buried Hill Fractured-Dissolved Reservoirs in Bohai Sea, Bohai Bay Basin, China[J]. Front Earth Sci, 2023, 11: 1135905.

[19] 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.
Zhao Xianzheng, Wang Quan, Jin Fengming, et al. Main Controlling Factors and Exploration Practice of Concealed Buried Hill Oil and Gas Reservoirs in Jizhong Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 71-79.

[20] 马立驰，王永诗，景安语. 渤海湾盆地济阳坳陷隐蔽潜山油藏新发现及其意义[J]. 石油实验地质，2020，42(1)：13-18.
Ma Lichi, Wang Yongshi, Jing Anyu. New Discovery and Significance of Hidden Buried Hill Reservoirs in Jiyang Depression of Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(1): 13-18.

[21] 侯贵廷，潘文庆. 裂缝地质建模及力学机制[M]. 北京：科学出版社，2013.
Hou Guiting, Pan Wenqing. Geological Modeling and Mechanical Mechanism of Fractures[M]. Beijing: Science Press, 2013.

[22] 赵文韬，侯贵廷，张居增，等. 层厚与岩性控制裂缝发育的力学机理研究：以鄂尔多斯盆地延长组为例[J]. 北京大学学报(自然科学版)，2015，51(6)：1047-1058.
Zhao Wentao, Hou Guiting, Zhang Juzeng, et al. Study on the Mechanical Mechanism of Layer Thickness and Lithology Controlling Fracture Development: A Case Study of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Journal of Peking University (Natural Science), 2015, 51(6): 1047-1058.

[23] 伊海生，林金辉，周恳恳，等. 青藏高原北部新生代湖

相碳酸盐岩碳氧同位素特征及古环境意义[J]. 古地理学报, 2007,9(3): 303-312.
Yi Haisheng, Lin Jinhui, Zhou Kenken, et al. Carbon and Oxygen Isotope Characteristics and Palaeoenvironmental Implication of the Cenozoic Lacustrine Carbonate Rocks in Northern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Palaeogeography, 2007, 9(3): 303-312.

[24] 刘传联. 东营凹陷沙河街组湖相碳酸盐岩碳氧同位素组分及其古湖泊学意义[J]. 沉积学报, 1998, 16(3): 109-114.
Liu Chuanlian. Carbon and Oxygen Isotopic Compositions of Lacustrine Carbonates of the Shahejie Formation in the Dongying Depression and Their Paleolimnological Significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(3): 109-114.

[25] 师政. 南堡凹陷及周边凸起古岩溶作用特征及发育模式研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2019.
Shi Zheng. Study on the Characteristics and Development Mode of Paleokarst in Nanpu Sag and Surrounding Bulges[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2019.

[26] 张天付,鲍征宇,马明,等. 鲕粒灰岩的溶解动力学特征和微观形貌的发育演化[J]. 沉积学报,2009,27(6): 1033-1042.
Zhang Tianfu, Bao Zhengyu, Ma Ming, et al. Dissolution Kinetic Characteristics and Morphology Evolution of Oolitic Limestone[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(6): 1033-1042.

[27] 朱庆杰,苏幼坡,陈艳华.轮南地区奥陶系天然裂缝形成的控制因素与发育机理[J]. 地质灾害与环境保护, 2002, 3(4): 64-69.
Zhu Qingjie, Su Youpo, Chen Yanhua. Controlling Factors and Development Mechanism of Ordovician Natural Fractures in Lunnan Area[J]. Geological Hazard and Environmental Protection, 2002, 3(4): 64-69.

[28] 孙明亮,柳广弟,董月霞. 南堡凹陷异常压力分布与油气聚集[J].现代地质,2010,4(6): 1126-1131.
Sun Mingliang, Liu Guangdi, Dong Yuexia. Anomaly Pressure Distribution and Hydrocarbon Accumulation in Nanpu Sag[J]. Modern Geology, 2010, 4(6): 1126-1131.

[29] 汤建荣,王华,孟令箭,等.渤海湾盆地南堡凹陷地层压力演化及其成藏意义[J].地球科学,2016,41(5): 85-96.
Tang Jianrong, Wang Hua, Meng Lingjian, et al. Evolution of Stratigraphic Pressure in Nanpu Sag in Bohai Bay Basin and Its Accumulation Significance[J]. Earth Science, 2016, 41(5): 85-96.

[30] 孙赵军,曹强,叶加仁,等.基于地震速度预测南堡凹陷中深层地层压力[J].油气地质与采收率,2016,16(4): 34-40.
Sun Zhaojun, Cao Qiang, Ye Jiaren, et al. Prediction of Overpressure Distribution in Mid-Deep Strata of Nanpu Sag Based on Seismic Velocity[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 16(4): 34-40.