谢兵,徐昉昊,范彩伟,等. 北部湾盆地涠西南凹陷灰岩潜山储层岩溶识别及发育模式.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(6):2029-2046. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240223.

Xie Bing, Xu Fanghao, Fan Caiwei, et al. Karst Identification and Development Model of Buried Hill Limestone Reservoir in Weixinan Depression, Beibuwan Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(6): 2029-2046. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240223.

北部湾盆地涠西南凹陷灰岩潜山储层岩溶识别及发育模式

谢 兵[1],徐昉昊[1],范彩伟[2],满 勇[2],江 凡[2],徐国盛[1],张喜淳[1],李安然[1]

1.油气藏地质及开发工程全国重点实验室(成都理工大学),成都 610059

2.中海石油(中国)有限公司湛江分公司,广东 湛江 524057

摘要:涠西南凹陷灰岩潜山勘探程度低,剩余资源勘探潜力大,二号断裂带周缘已发现多个潜山油田或含油构造,显示良好的勘探前景。本文综合运用钻井、录井、岩心、薄片、成像测井等资料,对二号断裂带碳酸盐岩储层发育特征、岩溶结构进行了系统研究,并根据构造演化与沉积背景综合分析了X构造岩溶储层的演化发育模式。研究结果表明:二号断裂带X构造古潜山岩性主要为灰岩类、灰质白云岩类,储集空间以溶蚀孔、洞、缝为主,孔隙度在0.01%~35.88%之间变化,但平均值偏低,仅为4.30%;以X-1井为例,X构造表生岩溶储层自上而下划分为表层风化带、垂直渗流带、水平潜流带和深部缓流带,水平潜流带岩溶缝/洞发育最优,为优质储层发育带;X构造裂缝-溶洞型灰岩潜山储层发育程度主要受岩相、古地貌及后期构造运动三者控制。岩相决定了溶蚀作用的发育程度,构造运动使地层抬升产生差异化剥蚀以及形成大量的裂缝,为后期岩溶作用提供了有利的渗流空间。古地貌控制了潜水面的相对位置从而控制岩溶的发育位置,岩溶斜坡高部位受到的岩溶作用最强。综合3个控制因素建立了"岩性筑基-裂缝拓容-岩溶改造"的三元耦合碳酸盐岩缝-洞型储层发育模式。

关键词:北部湾盆地;涠西南凹陷;碳酸盐岩潜山;储层特征;岩溶作用;储层发育模式

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240223 **中图分类号**:P618.13;TE12 **文献标志码**:A

Karst Identification and Development Model of Buried Hill Limestone Reservoir in Weixinan Depression, Beibuwan Basin

Xie Bing[1], Xu Fanghao[1], Fan Caiwei[2], Man Yong[2], Jiang Fan[2], Xu Guosheng[1], Zhang Xichun[1], Li Anran[1]

收稿日期:2024-09-25

作者简介:谢兵(2000—),男,硕士研究生,主要从事石油天然气勘探方面的研究,E-mail:1023312771@qq.com

通信作者:徐昉昊(1988—),男,副教授,主要从事储层地质学、流体地球化学与油气成藏方面的研究,E-mail:xufanghao17@cdut.edu.cn

基金项目:国家自然科学青年基金项目(42302186);中海石油(中国)有限公司湛江分公司项目(CCL2023ZJFN0540)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (42302186) and the Project of CNOOC China Limited, Zhanjiang Branch (CCL2023ZJFN0540)

1. *National Key Laboratory of Reservoir Geology and Development Engineering (Chengdu University of Technology), Chengdu 610059, China*

2. *CNOOC China Limited, Zhanjiang Branch, Zhanjiang 524057, Guangdong, China*

Abstract: The exploration degree of buried hill limestone in Weixinan sag is low, and the exploration potential of remaining resources is large. Several buried hill oil fields or oil-bearing structures have been discovered around the No. 2 fault zone, which shows a good exploration prospect. In this paper, the development characteristics and karst structure identification of carbonate reservoir in No. 2 fault zone are systematically studied by using the data of drilling, logging, core, thin section and image logging, and the evolution and development model of karst reservoir in X structure is comprehensively analyzed according to the tectonic evolution and sedimentary background. The results show that the lithology of the buried hill of the X structure in the No. 2 fault zone is mainly limestone and lime dolomite, and the reservoir space is dominated by solution pores, caverns and fractures. The porosity varies from 0.01% to 35.88%, but the average value is only 4.30%. Taking well X-1 as an example, the supergene karst reservoir of X structure is divided into surface weathering zone, vertical seepage zone, horizontal subsurface flow zone and deep slow flow zone from top to bottom. The horizontal subsurface flow zone has the best karst fractures/caverns and is a high-quality reservoir development zone. The development degree of X tectonic fracture-cavern type limestone buried hill reservoir is mainly controlled by lithofacies, paleogeomorphology and late tectonic movement. The lithofacies determined the development degree of dissolution, and the tectonic movement caused differentiated denudation and formed a large number of fractures, which provided favorable percolation space for the later karst process. The paleogeomorphology controlled the relative position of the diving surface and thus controlled the development position of karst, and the high part of the karst slope was subjected to the strongest karst process. Based on three controlling factors, the three-element coupling reservoir development model of "lithology foundation building, fracture capacity expansion and karst reconstruction" is established.

Key words: Beibuwan basin; Weixinan sag; carbonate buried hill; reservoir characteristics; karstification; reservoir development model

0 引言

涠西南凹陷位于北部湾盆地的东北部,是中国海域重要的石油和天然气资源区之一[1-2]。在二十世纪八九十年代,涠西南凹陷在潜山的资源探测方面取得了诸多成就,成功发现了数个碳酸盐岩潜山油田及其相关的含油气构造[3-4]。国内相关学者[5-10]对碳酸盐岩岩溶储层的岩溶类型、岩溶环境以及岩溶储层发育控制因素等方面做了深入的研究并取得了重要的进展。

前人[11-13]对涠西南一号断裂带做了大量研究,徐守立等[11]认为涠西南凹陷一号断裂带附近黄龙组潜山岩溶现象较为普遍,溶洞和裂缝发育,其中以构造缝和溶蚀缝最为显著。王永辉等[12]认为岩溶的普遍发育可能由白云石化的增孔作用及构造作用导致,生屑灰岩在交代为白云岩的过程中,岩石颗粒体积变小,晶间孔隙变大,在与地下水接触时,增孔作用导致其与地下水的接触面积变大,从而溶蚀更易发生。构造作用使岩溶期潜水面波动及岩溶带厚度发生变化,形成多期渗流带-潜流带,且岩溶作用强弱受古地貌的影响与控制,而赵顺兰等[13]认为构造裂缝带利于岩溶作用,溶洞受地下水控制。王永辉等[12]提出,涠西南凹陷的碳酸盐岩潜山岩溶储层在形成过程中先后经历了多个不同的地质作用阶段,包括准同生期至浅埋藏期的岩溶作用、抬升期的风化淋滤表生岩溶作用以及再埋藏期的断裂差异升降改造作用,岩溶储层还遭受了溶蚀、胶结、交代、重结晶和构造破裂化等多种复杂成岩作用的影响。

综合来看,涠西南凹陷碳酸盐岩潜山具有良好的勘探前景,前人在构造演化、油气来源、岩石学特

征、一号断裂带储集空间、岩溶储层演化模式等方面有较多的认识[11-19]。但关于二号断裂带碳酸盐岩潜山岩溶储层方面的研究，前人只停留在通过观察铸体薄片、钻录井识别、测井识别标志等手段分析该地区的岩溶储层特征，缺少运用成像测井资料对该地区岩溶储层特征进行识别，对二号断裂带灰岩潜山岩溶储层演化模式分析不够深入等。因此，笔者在收集整理前人研究成果的基础上，聚焦分析二号断裂带 X 构造，对二号断裂带 X 构造岩溶储层特征、X 构造岩溶测井响应特征、二号断裂带潜山成山过程与岩溶储层发育演化的关系、X 构造溶洞-裂缝型灰岩潜山储层发育模式等进行系统深入的研究，旨在为二号断裂带碳酸盐岩潜山下一步的油气勘探提供启发。

1　区域地质概况

涠西南凹陷为北部湾盆地北部坳陷的一个二级构造单元，呈 NE 向展布，其北西部是近 NE 向的涠西南断裂，南东部为企西隆起。涠西南凹陷长约 135 km，最宽处有37 km，整体面积约 3 000 km^2，是在古生界碳酸盐岩基底上发育的新生代断陷，包括 NE 向一号断裂带、二号断裂带、三号断裂带、东南斜坡带和涠西南低凸起等构造单元，自古生代至今历经加里东期、海西期、印支—燕山早中期、燕山晚期—喜马拉雅早期、喜马拉雅期和现今等 6 个阶段[14-17]。在涠西南凹陷的一号断裂带，潜山中的原油主要是由流沙港组二段底部的油页岩所生成；而在二号断裂带，潜山的原油则主要源自流沙港组二段下部的暗色泥岩[18-20]。一号断裂带碳酸盐岩潜山主要地层为上石炭统黄龙组；二号断裂带潜山主要地层由下石炭统的下部地层构成，包括石磴子段和孟公坳段。本文的研究区 X 构造位于涠西南凹陷二号构造带南西部，包含 7 口井(图 1a)，但只有 X-1 井和 X-2 井具有成像测井资料，其中 X-1 井成像测井资料最为清晰并且该井穿过 X 构造顶部，更具有代表性，因此本文主要通过分析 X-1 井来进行岩溶储层特征的识别。

北部湾盆地涠西南凹陷内新生界发育齐全，自下而上分别为古新统长流组陆相沉积层、始新统流沙港组和渐新统涠洲组海相-陆相沉积层、下中新统下洋组海相沉积层、中中新统角尾组海陆过渡相沉积层、上中新统灯楼角组、上新统—更新统望楼港组；第四系松散沉积层覆盖其上(图 1b)。早石炭世，该区主体为开阔碳酸盐岩台地相，在今海南岛西北侧、西南侧零星分布小的剥蚀古陆，古陆附近发育过渡相。中晚石炭世海侵范围空前扩大，大陆剥蚀区大规模缩小并准海岸平原化，该区主体为开阔碳酸盐岩台地相。

2　储层特征

2.1　岩石学特征

基于涠西南凹陷 X 潜山构造石炭系岩心、镜下薄片和 X 衍射矿物组成资料，碳酸盐岩矿物成分统计结果(图 2a)表明，潜山内部岩石类型以灰岩、白云岩为主。碳酸盐岩结构与岩石成因密切相关，是沉积环境的重要标志，由晶粒结构分布图(图 2b)可见，石炭系主要以泥晶灰岩为主，粉晶灰岩次之。下石炭统石磴子段主要为灰色、灰褐色角砾灰岩和生屑灰岩，局部泥质富集，形成泥质纹层或薄夹层，同时夹杂着薄层石英砂岩，底部为灰黑色白云岩；孟公坳段主要为生屑灰岩以及富含硅质的深灰色、灰黑色薄-厚层灰岩，致密坚硬，同时夹杂着薄层细砂岩。

2.1.1　灰岩类

1)白云质灰岩

岩石经受白云石化、溶蚀、破裂、重结晶等一系列成岩作用，结构、构造发生较大改变，尤其是构造破裂作用，使岩石呈角砾状，溶蚀缝洞或裂缝中充填着不同结构的灰岩、白云岩碎块(图 3a)。岩石的主体碎块为泥-粉晶云质灰岩(岩块)，以灰泥基质结构为主，并见生物与生物碎片，白云石呈粉晶粒状、星散状均匀分布(图 3b)，基质为粉晶方解石(重结晶)，残余部分为泥晶方解石。

2)泥晶灰岩

方解石为泥晶结构，局部偶见弱白云石化，构造微裂缝较发育，可见 X 型剪切缝，有机质沿纹层发育，网状缝合线被方解石脉切穿(图 3c)。

3)泥晶生屑灰岩

岩石呈生屑颗粒结构。内碎屑以砂屑为主，大小介于 0.10～0.30 mm 之间，岩石含部分球粒。大量生屑颗粒以棘皮、腕足为主(图 3d、e)，粒间充填泥晶方解石，呈现星散状白云石化，白云石呈粉晶自形、半自形结构。

4)球粒灰岩

多见于 X-7 井，岩石呈泥晶球粒结构。球粒呈泥晶结构，富含藻类(图 3f)，形态不规则，部分相互黏结，粒间充填泥晶方解石。生屑种类较多，以棘

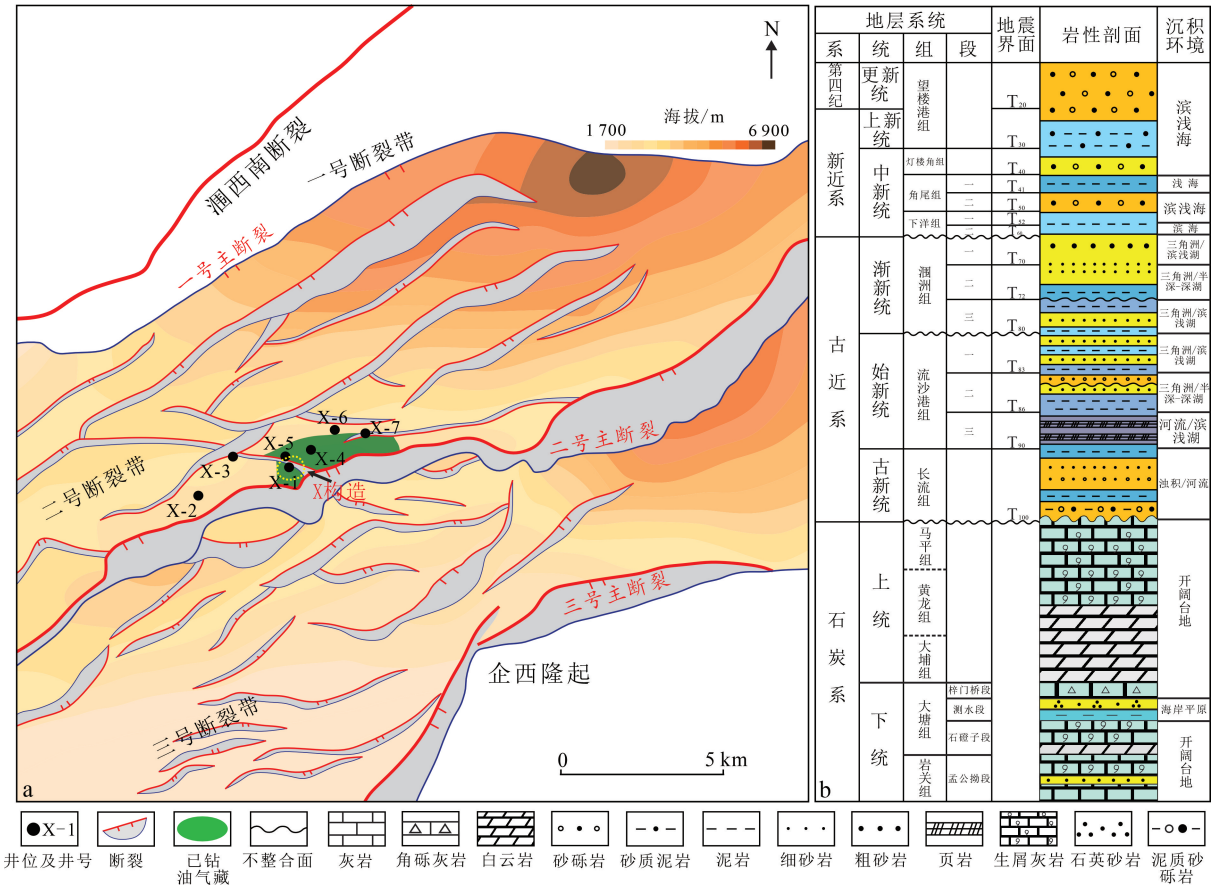
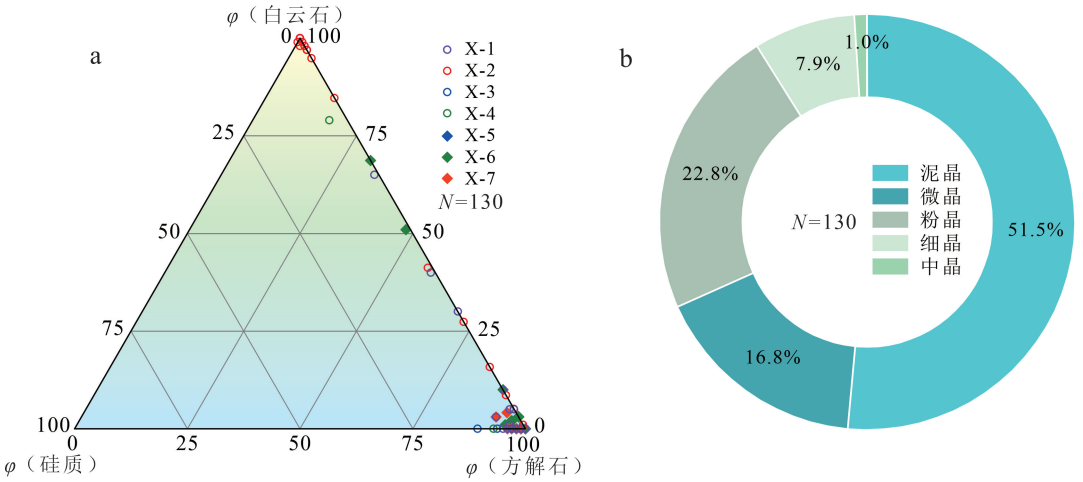


图1 涠西南凹陷X构造区域构造位置(a)及地层综合柱状图(b)

Fig.1 Structural position (a) and comprehensive stratigraphic histogram (b) of X structure area in Weixinan sag



N.样品数。

图2 二号断裂带X潜山碳酸盐岩矿物成分(a)及晶粒结构分布图(b)

Fig.2 Mineral composition (a) and grain structure distribution (b) of X buried hill carbonate rocks in fault zone No.2

皮、苔藓虫、双壳类最为常见；另见少量有孔虫，保存完好。溶蚀缝亦发育，但均被方解石充填，见少量沥青条带。

2.1.2　白云岩类

1）细—中晶白云岩

白云石以自形至半自形为主，晶体形态良好，表现出波状消光特性。白云石晶体之间存在孔隙，但其中一部分孔隙已被有机物质所填充。细—中晶白云岩为热液白云石化产物，同时可见硅化、方解石化（图 3g）。

2）泥—粉晶灰质云岩

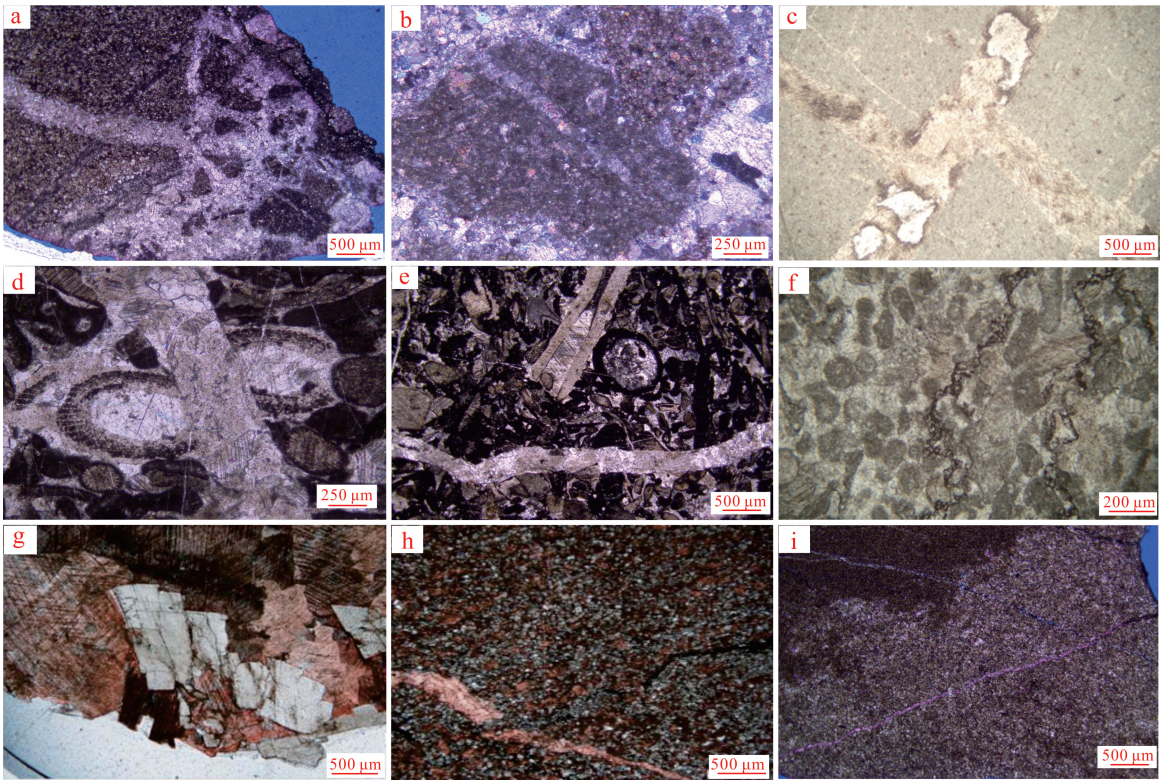
白云石经历了重结晶过程，并伴随着溶蚀作用。古沥青因溶蚀作用而遭到破坏，形成了斑块状的形态。此外，还存在少量的粗晶白云岩以及含有有机质的泥-粉晶灰云岩（图 3h）。

3）残余细—粉晶内碎屑云岩

岩石具有残余白云质内碎屑结构，局部呈细粉晶结构（图 3i）。白云石以粉晶自形、半自形结构为主，个别具雾心亮边结构，颗粒与基质白云石大小相等。大量砂屑具有暗影，其轮廓大小介于 0.25～0.75 mm之间，部分颗粒暗影呈圆形。白云石晶粒致密镶嵌接触，晶间孔不发育。仅在个别视域中见到零星分布的晶间孔，部分被他形粉晶方解石充填，大部分被白云石充填。少量微裂缝未充填，少量构造-溶蚀缝被方解石充填或被白云石半充填。

2.2　储集空间类型

北部湾盆地潜山岩性复杂，储集空间类型多样，主要包括溶蚀孔/洞缝、裂缝、基质孔等[21]。涠西南凹陷二号断裂带潜山 X 构造石炭系岩心显示，碳酸盐岩发育溶孔、溶洞、溶缝、裂缝等（图4），不同层位



a. X－2 井，3 559 m，白云质灰岩，岩石呈角砾状，溶蚀缝洞或裂缝中充填着不同结构的灰岩、白云岩碎块；b. X－2 井，3 559 m，白云质灰岩，见生物及生物碎片，白云石呈粉晶粒状、星散状均匀分布；c. X－7 井，3 060 m，泥晶灰岩，多期溶缝发育，溶缝被方解石、泥质和有机质等充填；d. X－2 井，3 661 m，泥晶生屑灰岩，可见棘皮、腕足等古生物（横切面）；e. X－2 井，3 661 m，泥晶生屑灰岩，镜下以棘皮为主，并含腕足类、双壳类、介形虫和有孔虫等；f. X－7 井，3 189 m，球粒灰岩，泥晶球粒结构，富含藻类；g. X－7 井，3 297 m，细—中晶白云岩，见鞍状白云石；h. X－7 井，3 313 m，泥—粉晶灰质云岩，见方解石脉体以及沥青缝；i. X－2 井，3 560 m，残余细—粉晶内碎屑云岩，岩石具有残余白云质内碎屑结构，局部呈细粉晶结构。

图 3　涠西南凹陷 X 构造碳酸盐岩古潜山岩心薄片显微特征

Fig.3　Thin section microscopic characteristics of carbonate rock core of buried hill of X structure in Weixinan sag

发育的形态、展布、规模有所不同。碳酸盐岩储集空间的成因主要为风化淋滤作用(表生岩溶作用)和构造作用两种,前者影响岩溶储集空间,后者控制着裂缝储集空间以及对先存岩溶储集空间的进一步改造。

2.2.1 溶洞

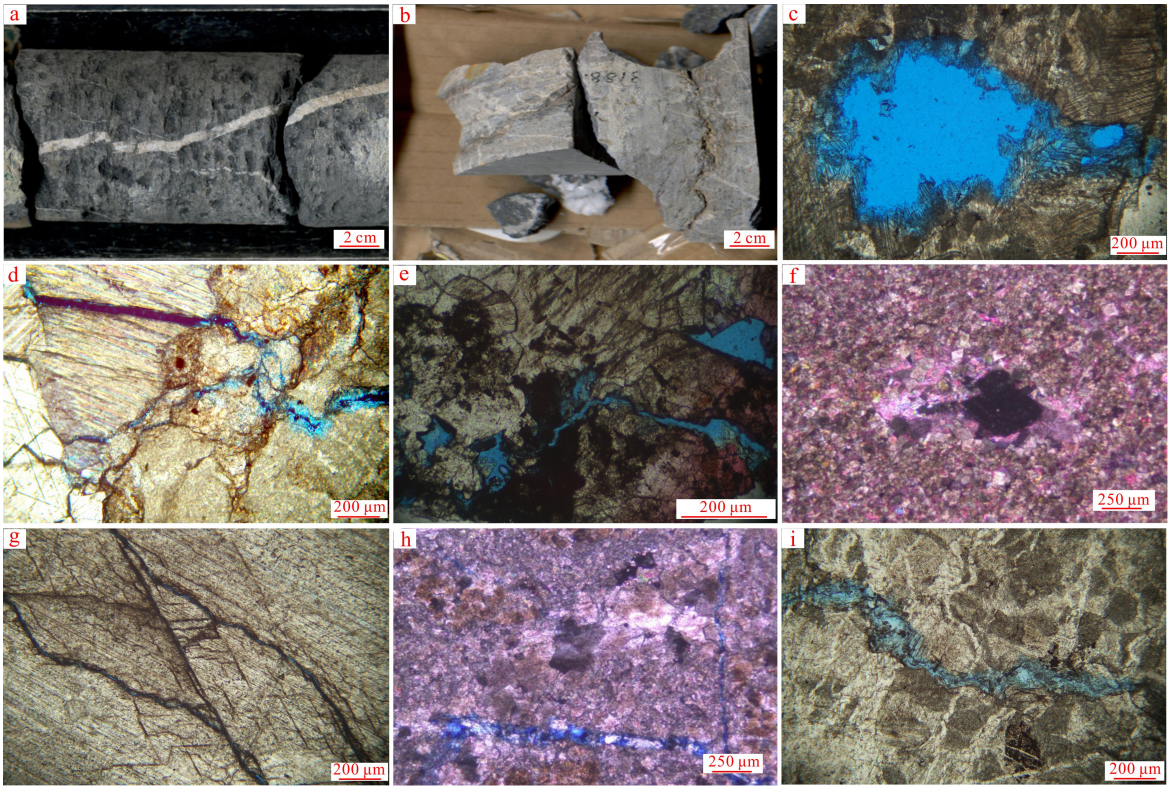
按照高度划分,洞高小于 1 m 的为小型溶洞,洞高介于1～3 m 之间的为中型溶洞,洞高大于 3 m 的为大型溶洞。

大中型溶洞洞穴系统是涠西南灰岩潜山的主要储集空间。根据区域构造调研,涠西南凹陷灰岩潜山至少经历了早二叠世末、晚三叠世两期大规模构造抬升,上部地层遭受暴露剥蚀,石炭系碳酸盐岩被抬升到地表或近地表,古潜山形成,在经历大规模表层岩溶和顺层岩溶后,形成了厚层的风化壳和复杂的地下溶洞系统[11]。

小型溶洞可以在岩心及镜下观察到(图 4a、b、c),小型溶洞或溶缝常被晶簇状方解石、灰岩角砾、泥质等充填。

2.2.2 溶孔

溶孔可分为多种类型,例如粒间溶孔、粒内溶孔、晶间溶孔及脉溶孔等。粒间溶孔是由碎屑颗粒之间的填充物质受到侵蚀而形成,这类孔隙的直径一般为 30～250 μm,而它们的孔隙率约为 2.5%(图 4d)。粒内溶孔通常位于生物骨骼的内部,这些孔隙被老化的生物框架包围(图 4e)。晶间溶孔主要生成于白云石晶体相互交错的区域,直径范围通常在 50～500 μm 之间,形状多为多边形或菱形,面孔率可达 6.0%(图 4f)。后期的方解石脉中也存在溶孔,这些脉溶孔的直径范围为 25～120 μm,通常呈现港湾状,其面孔率最高可达 5.0%(图 4h)。



a. X－7 井,3 301 m,灰岩,溶洞、溶蚀孔大量发育,同时可见裂缝被方解石充填;b. X－6 井,3 189 m,灰岩,可见裂缝大量发育且被泥质充填;c. X－1 井,3 280 m,溶洞,大量方解石被溶蚀;d. X－1 井,3 067 m,粒间溶孔,同时可见溶蚀缝发育且被方解石和泥质填充;e. X－1 井,3 220 m,粒内溶孔,可见方解石晶体内被溶蚀,有沥青充填;f. X－2 井,3 762 m,白云石化形成较多晶间溶孔,后被他形粉晶方解石充填;g. X－1井,3 390 m,构造破裂作用形成数条构造微裂缝;h. X－2 井,3 718 m,受构造作用形成裂缝,被粉晶方解石充填,形成方解石脉,可观察到方解石脉被溶蚀;i. X－1 井,3 191 m,泥晶方解石被溶蚀,形成溶蚀缝。

图 4 涠西南凹陷 X 构造孔隙显微特征

Fig.4 Micro-pore characteristics of X structure in Weixinan sag

2.2.3　裂缝

研究区内裂缝发育较好，以岩溶缝、构造缝为主。裂缝是碳酸盐岩储层的重要储集空间，是沟通溶蚀孔洞及洞穴之间的桥梁，为酸性流体溶蚀提供通道，为后期扩溶形成溶洞和洞穴提供条件。对于碳酸盐岩储层而言，裂缝的重要性甚至超过孔隙，许多致密碳酸盐岩由于裂缝的发育变得极具勘探潜力[11]。

在涠西南凹陷二号断裂带的取心观察中发现，缝壁的两侧呈现出不规则的高低起伏，缝隙的宽度变化显著，且常伴有分支现象(图4g)。晶间溶蚀缝的宽度范围为 20～120 μm，延伸距离较短，主要存在于特定区域(图 4h、i)。另外，部分溶蚀缝是由原有的构造裂缝经过溶蚀作用演变而来(图 4d)，而大部分缝隙则被方解石完全或部分填充。

2.3　储层物性

通过收集整理涠西南凹陷二号断裂带 X 构造 6 口井中距潜山顶部 100 m 处的孔隙度资料，并采取 1.25 m 的深度间隔，对 6 口井的孔隙度进行了分段统计和计算，统计数据显示 X－1 井孔隙度在 0.01%～34.88%之间变化，X－2 井孔隙度在 0.01%～35.61%之间变化，X－3 井孔隙度在 2.11%～9.56%之间变化，X－4 井孔隙度在 0.16%～18.25%之间变化，X－6 井孔隙度在 5.42%～28.68%之间变化，X－7 井孔隙度在 0.01%～35.88%之间变化。综合来看，研究区储层孔隙度值分布在0.01%～35.88%之间，平均值为4.30%，平均孔隙度偏低，这是由于涠西南凹陷二号断裂带处于水系的汇聚区，水沿着前期裂缝进入碳酸盐岩并发生胶结作用，严重的胶结作用使得孔隙连通性变差。

基于现有的岩心、铸体薄片等统计资料分析，根据不同尺度裂缝分类标准(表 1)，将该区的裂缝分为微尺度裂缝、小尺度裂缝、中尺度裂缝、大尺度裂缝[22]，其中微尺度及小尺度裂缝占比较多(图 5a)。通过镜下观察不同深度的铸体薄片发现，该区以构造裂缝为主、溶蚀裂缝为辅，且裂缝全充填占比较高(图 5b、c)。

表 1　不同尺度裂缝分类标准[22]

Table 1　Classification criteria for cracks of different scales[22]

裂缝尺度	流态类型	裂缝开度/μm
微尺度裂缝	线性流	＜10
小尺度裂缝		10～300
中尺度裂缝	非线性流	300～1 000
大尺度裂缝		＞1 000

3　岩溶测井识别-成像测井解释

成像测井的基本原理是测量井筒中环井壁的微电阻率，然后在数据处理中将电阻变化配以一定的颜色。一般情况下用浅色代表高电阻率，深色代表低电阻率，这样电阻率曲线就被转换成合成的彩色

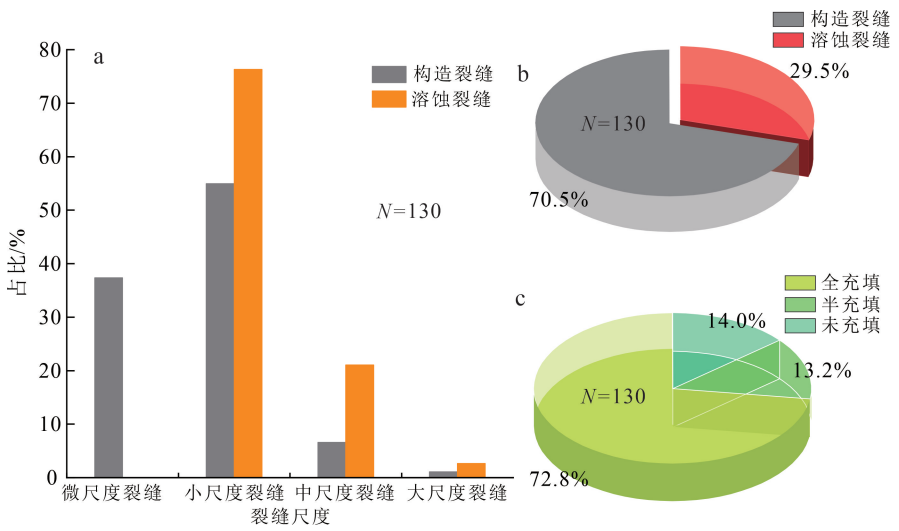


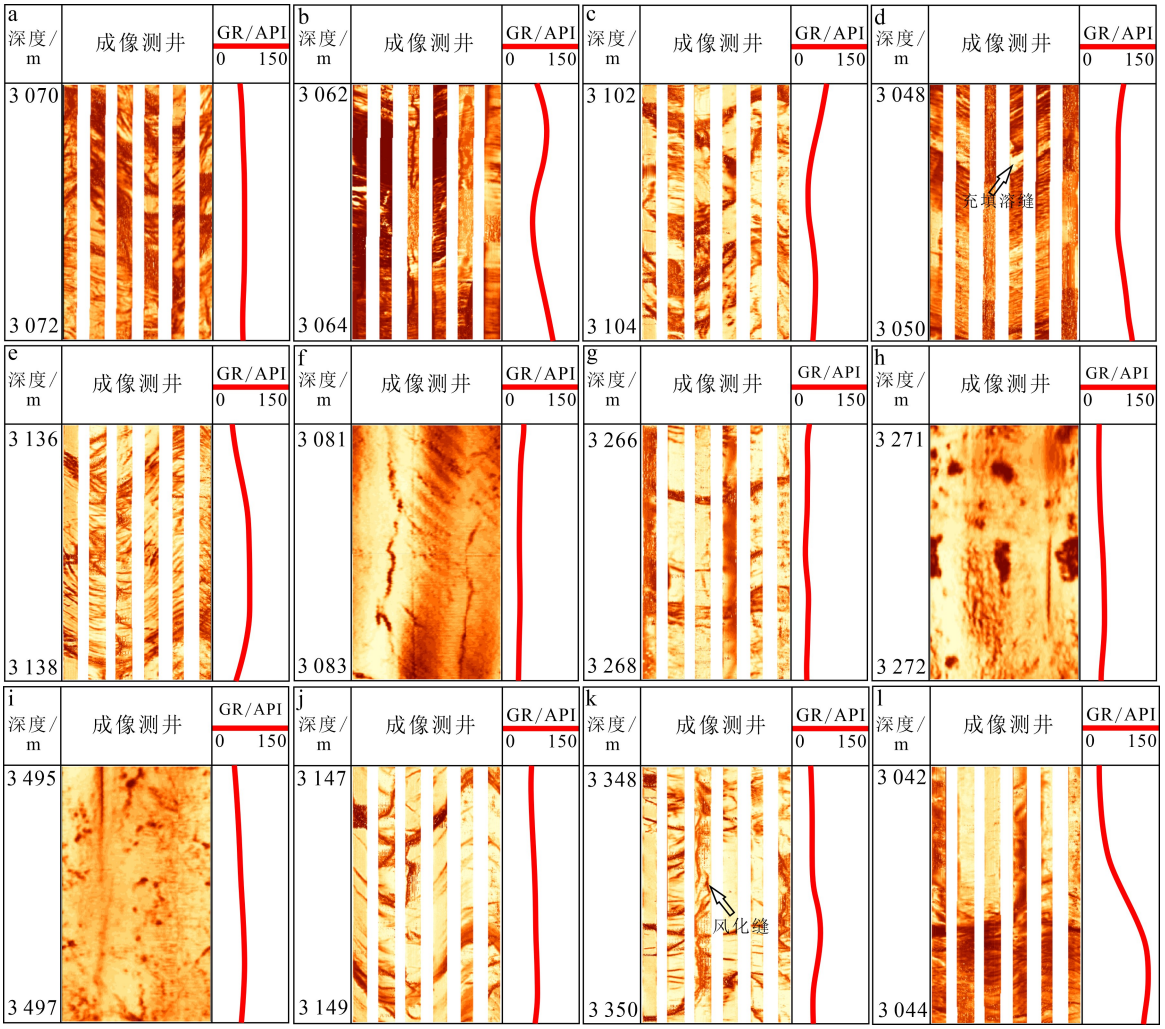
图 5　二号断裂带灰岩潜山薄片裂缝尺度统计(a)和 X 构造潜山储层裂缝特征统计(b、c)

Fig.5　Fracture scale statistics of thin section of buried limestone hill in fault zone No.2 (a) and fracture characteristics statistics of X structure buried hill reservoir (b, c)

图像,其具有高覆盖率、高分辨率、高直观性的特点[23-25]。前人已在各油田做了大量应用,在对沉积和储层特征的识别等方面取得了诸多成果[26]。由于该区仅X-1井成像测井资料最为齐全与清晰,因此本文结合微电阻率成像测井、岩心和常规测井资料,对X-1井岩溶特征进行精细识别。

3.1 岩溶要素响应特征

本文较多采用了动态标准化微电阻成像测井技术来识别研究区的岩溶特征,其优势在于能够有效地识别出研究区内非均质性较强的表生岩溶储层特征。同时本文也较少使用了静态标准化微电阻成像测井进行识别,它通过测量岩石的电阻率来生成图像,从而提供岩石的结构和性质信息,更适合观察较大的电阻率变化和进行岩性对比,具有高分辨率、快速成像、多参数测量和适应性强等特点。基于此,笔者综合动态图像、静态图像、常规测井及岩心对岩溶特征进行判别,识别多种表生岩溶要素:线状构造(扩溶构造缝、未扩溶构造缝、风化缝、层间缝等)、体状构造(如洞穴、角砾等)、斑状构造(如溶蚀孔洞)等。涠西南凹陷二号断裂带潜山储层的一些典型成像测井响应如图6所示。



a. 高角度扩溶构造缝,不规则正弦状暗线;b. 垂向充填溶缝,高阻亮白色条带;c. 低角度扩溶构造缝,不规则正弦状暗线;d. 充填溶缝,正弦状亮白色线;e. 未扩溶构造缝,规则组合正弦线;f. 纵向风化裂缝,不规则组合纵向暗线;g. 层间缝,较平直暗线;h. 层状溶孔,水平规则组合暗斑;i. 分散溶孔,分散暗色圆斑;j. 未扩溶构造缝,规则组合正弦线;k. 纵向风化裂缝,不规则组合纵向暗线;l. 古土壤层,不规则暗色条带状,整体呈明暗截切状。GR. 自然伽马。

图6 涠西南凹陷X构造潜山岩溶储层特征的成像测井响应

Fig.6 Imaging logging response of karst reservoir characteristics in buried hill of X structure in Weixinan sag

3.1.1　裂缝

按裂缝倾角可将裂缝分为垂直缝(75°～90°)、高角度斜交缝(45°～75°)、低角度斜交缝(15°～45°)、水平缝(0°～15°)。

1)扩溶构造缝

垂直和高角度的构造导致扩溶构造缝(扩溶缝)呈现出不规则的高角度正弦状暗线特征(图 6a)。部分溶解的缝隙中填充了化学胶结物，这些胶结物呈现出明亮的纵向条带(图 6b)。在水平潜流带，低角度且水平的溶缝一般呈现出较小的裂缝倾斜度，并在成像测井中展示为不规则、低角度的正弦状暗线(图 6c)。经过化学胶结物沉淀的部分溶缝在成像测井图像中显示为与裂缝形状相似的明亮带状特征(图 6d)。

2)未扩溶构造缝

未扩溶构造缝形成于岩溶地质体在埋藏之后的构造改造作用，表现为规则的组合暗色正弦线(图 6e、j)。

3)纵向风化缝

纵向风化缝表现为不规则的组合纵向暗线，多发育于垂直淋滤带(图 6f、k)。

4)层间缝

现代岩溶学认为层间缝是表生岩溶系统中十分重要的地下水疏导通道，地下水沿其扩溶初期形成层状孔洞，晚期形成洞穴，表现为较为平直的暗线(图 6g)。

3.1.2　溶孔

1)层状溶孔

在该研究区域内，经常可以观察到成层分布的溶蚀孔洞，在成像测井中表现为较为规则的、水平排列的组合暗斑 (图 6h)。

2)分散溶孔

分散溶孔分布较为杂乱，在成像测井上表现为杂乱或孤立分布的暗斑 (图 6i)。

3.1.3　洞穴

未充填洞穴一般会在钻井过程中出现放空、漏液等，易于识别。二号断裂带石碌子段、孟公拗段潜山钻井未见大型溶洞，钻、测井响应均不明显，X－1 井成像测井资料未见明显的洞穴响应特征。

3.1.4　古土壤层

不整合表面的古土壤层泥质含量较高，在成像测井图像上表现为不规则暗色条带状，相比于上、下基岩具有较高的 GR 值，且上、下地层差异较大截切关系在成像测井上清晰可见(图 6l)。

3.2　X－1 井储层分带及岩溶特征

受岩溶、风化淋滤等地质作用的影响，潜山储层的储集空间类型多样、孔隙分布复杂，多期构造运动为潜山型储层裂缝发育提供了条件，这些地质作用对储层的差异改造导致潜山型储层在纵向上呈现出明显的分带性，极强的储层非均质性导致储层空间展布预测难度较大。纵向上，潜山经受的地质作用不同，如潜山顶部受风化、淋滤等作用影响大，潜山底部受到地质作用的影响小，致使潜山在垂向上形成了具有不同储层性质的相带[27]。

通过对 X－1 井各井段成像测井响应特征和薄片岩石学特征的深入研究，发现该井的成像测井特征在纵向上呈现一定的分布规律，根据前人的研究成果[25-29]并以 X－1 井的实际情况为基础建立适用于本次研究的潜山储层分带依据(表 2)，并以此依据将 X－1 井潜山储层部分由上至下划分为：表层风化带、垂直渗流带、水平潜流带、深部缓流带 4 个部分(图 7)。

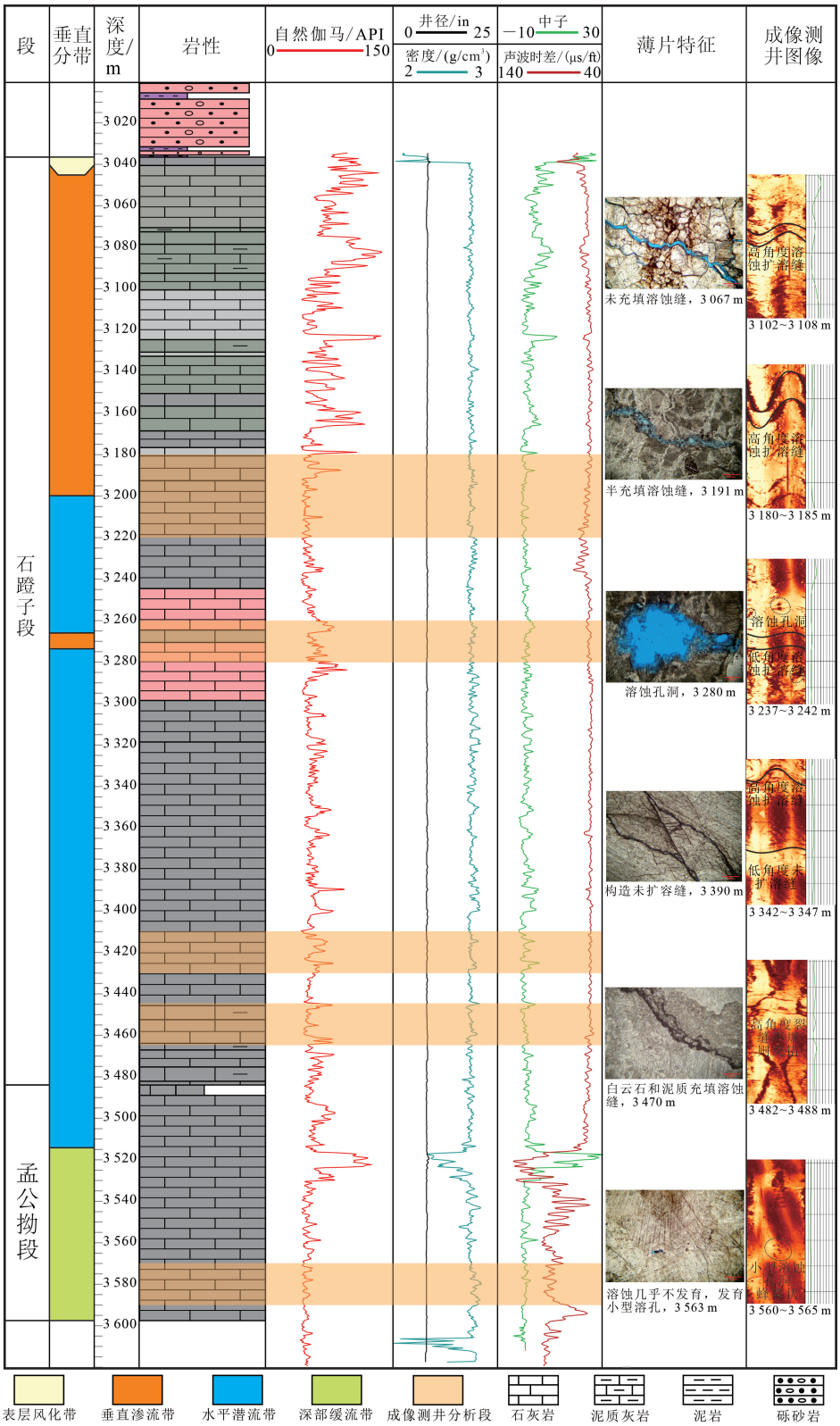
表层风化带(古土壤层)是岩石风化残积物，多为黏土状皮壳层，厚数十厘米，表面凹凸，上下地层岩性差异大，依岩石结构成像及高自然伽马、中低孔隙度、中高电阻率等特征进行识别，多数井此相带缺失或特征不明。垂直渗流带又称包气带，是地表下

表 2　涠西南凹陷二号断裂带灰岩潜山岩溶储层垂向分带划分依据

Table 2　Basis for vertical zonation of karst reservoirs in limestone buried hill in fault zone No. 2 of Weixinan sag

储层分带	测井响应特征					与潜山顶面距离/m	地下水流动方式
	自然伽马	钻速	密度	井径	声波时差		
表层风化带	微齿高值	加快	正高值	扩径	负高值	＜4	地表径流为主
垂直渗流带	平直低值	加快	相对低值	无扩径	平直	4～150	垂直渗流为主
水平潜流带	锯齿化低值	不加快	见极低峰	扩径	低值	150～450	水平径流为主
深部缓流带	平直低值		高值	不扩径	低值	450～650	潜流为主

注：据文献[25－29]。



ft(英尺)、in(英寸)为非法定计量单位。1 ft=12 in=0.304 8 m，下同。

图7 X－1井下石炭统碳酸盐岩古潜山岩溶储层分带综合柱状图

Fig.7 Comprehensive column diagram of karst reservoir zonation in carbonate buried hill of the Lower Carboniferous in Well X－1

潜水面上的地质介质，地表水沿裂缝孔隙下淋，水体因富含 CO_2 呈酸性，溶蚀碳酸盐岩，可依低自然伽马，低密度值进行识别。水平潜流带也称饱水带，在潜水面下，岩石空隙满是液态水，暗河发育，是地下河排泄主通道和岩溶作用中心，上下地层经断裂裂缝获得补给而发生岩溶作用，通过成像测井精细解析岩溶要素进行识别。深部缓流带在水平潜流带下部，地下水流缓，局部停滞，古岩溶作用弱，地层完整，低自然伽马且曲线平滑，主要有裂纹角砾、裂纹-镶嵌角砾岩，角砾未位移棱角明显，溶蚀缝洞被亮晶方解石充填[23]。

X－1 井的取心段为 900～3 600 m，成像测井分析的井段为 3 040～3 600 m，在岩心资料分析和岩溶要素识别的基础上，对响应特征明显的井段进行了岩溶特征的识别分析，并发现岩溶特征与分带情况耦合关系良好。现以 X－1 井为例，3 180～3 200、3 200～3 220、3 260～3 280、3 410～3 430、3 445～3 465、3 570～3 590 m 成像测井的细致化分析结果如图 8 所示。

1）3 180～3 200 m 为岩溶大量发育段，裂缝发育多，自浅至深发育大量的溶蚀裂缝，可见高角度扩溶缝、纵向风化缝、低角度扩溶缝、层间缝等并交替出现，其中伴随裂缝的扩容发育少许溶洞，少见分散溶孔。认为该段属于垂直渗流带。推测现今潜水面位于 3 200 m 附近，其上为垂直渗流带，其下为水平潜流带。

2）3 200～3 220 m 为岩溶发育段，发育较多的溶蚀缝，其中低角度扩溶缝较多，高角度扩溶缝较少，同时发育少量小型溶洞。此外还识别出泥质条带岩溶要素，附近上、下地层差异明显，在成像测井和 GR 曲线上均有响应，同时 GR 曲线也呈现较高值，说明泥质含量较高。综合判断认为该段属于水平潜流带。

3）3 260～3 280 m 为岩溶较发育段。该段上下部分发育较少的溶蚀裂缝，主要为低角度未扩溶缝和层间缝，且 GR 值偏高，泥质含量较高，认为该段上下部分为水平潜流带。该段中部发育大量串珠状溶洞以及层状溶洞，因此认为该段中部为垂直渗流带。推测古潜水面位于 3 270 m 附近。

4）3 410～3 430 m 为岩溶较发育段，发育少量溶蚀裂缝，主要为低角度扩溶缝、低角度未扩溶缝及层间缝，同时也见少量的低角度未扩溶缝。在该段中下部分可识别出分散溶洞，总体表现为低 GR，认为该段属于水平潜流带。

5）3 445～3 465 m 为岩溶发育段，发育较多的溶蚀缝，主要为低角度扩溶缝及少量层间缝，同时也见部分高角度扩溶缝和低角度未扩溶缝，伴随裂缝的溶蚀作用，在溶蚀缝周围形成较多的溶孔。该段整体表现为低 GR，认为该段属于水平潜流带。

6）3 570～3 590 m。该段岩溶发育一般，且具有集中分布的特点，溶蚀缝发育较差，发育部分溶洞且集中发育在中上部和中下部，可识别出层状溶孔和分散溶孔。认为该段属于深部缓流带。

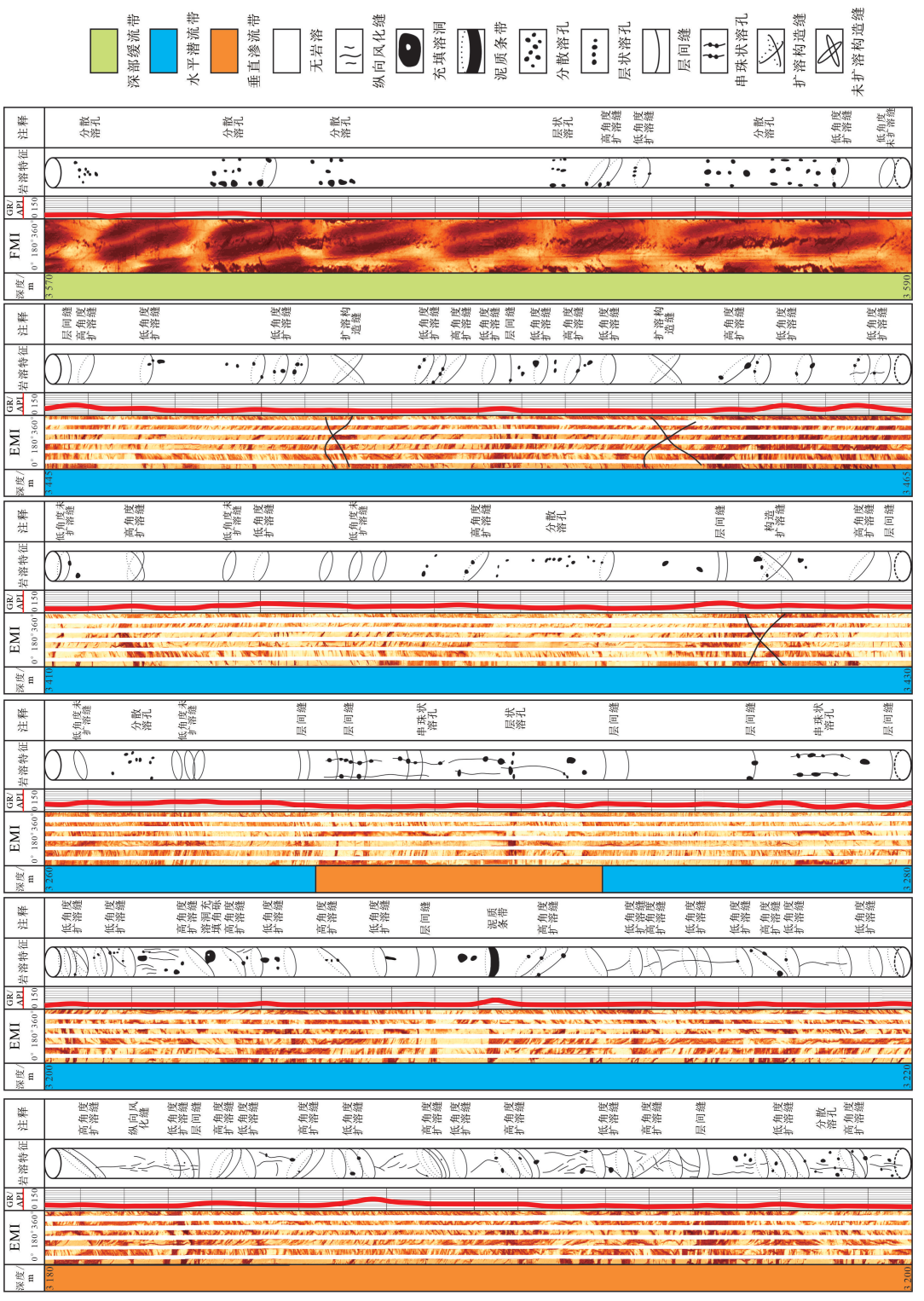
通过对成像测井响应特征的细致分析，推测认为古潜水面位于 3 270 m 附近，现今潜水面位于 3 200 m附近，由此认为涠西南二号断裂带古潜山至少发育了两期潜水面。第一期潜水面之下的水平潜流带的岩溶组构类型较单一，发育近水平的溶缝及孔洞。随着喜山期的拉张作用，古潜山发生沉降作用，从而导致潜水面发生变化，形成了第二期潜水面。

综合分析上述这 6 段的裂缝发育特征可以看出，X－1 井自浅至深溶蚀裂缝的发育程度呈减少趋势，溶洞溶孔发育程度呈增长趋势，认为该井自浅至深可分为表层风化带、垂直渗流带、水平潜流带和深部缓流带。

4　岩溶储层演化模式

4.1　潜山成山过程与岩溶储层演化的关系

北部湾盆地主要经历了加里东期、印支期和喜马拉雅期多期构造应力作用，形成了 NE 向、NW 向、EW 向和近 NS 向多组裂缝，沿大型断裂带和褶皱核部和转折端还派生了密集的裂缝带[30]，导致基底岩石顶面形成高角度网状裂缝带（图 9）。在潜山成山演化过程中，涠西南凹陷主要经历以下 3 个构造演化阶段[14,17-18,31-32]：①晚古生代—中生代的潜山初见雏形（图 9a、b、c）。在石炭纪末期，海西运动引发了碳酸盐岩地层的轻微褶皱、整体抬升并暴露于地表，随之出现了风化剥蚀现象，为未来的碳酸盐岩潜山奠定了基础。在二叠纪—白垩纪期间，受到印支运动影响，SE 方向的挤压应力逐渐增强，促使涠西南凹陷经历了一系列的褶皱和推覆作用，使得碳酸盐岩潜山初步形成。②在中生代晚期—新生代的早期，潜山经历了改造阶段（图 9d）。此时正值喜马拉雅运动的初期，伴随 SE 向的拉张应力，研究区域内出现了一系列近EW方向的张性断裂。这些



EMI. electric microimager; FMI. fullbore formation microimager。

图8 X－1井碳酸盐岩古潜山岩溶储层分带及成像测井岩溶要素识别

Fig.8 Zoning of karst reservoir in buried hill of carbonate rock and identification of karst elements by imaging logging in Well X－1

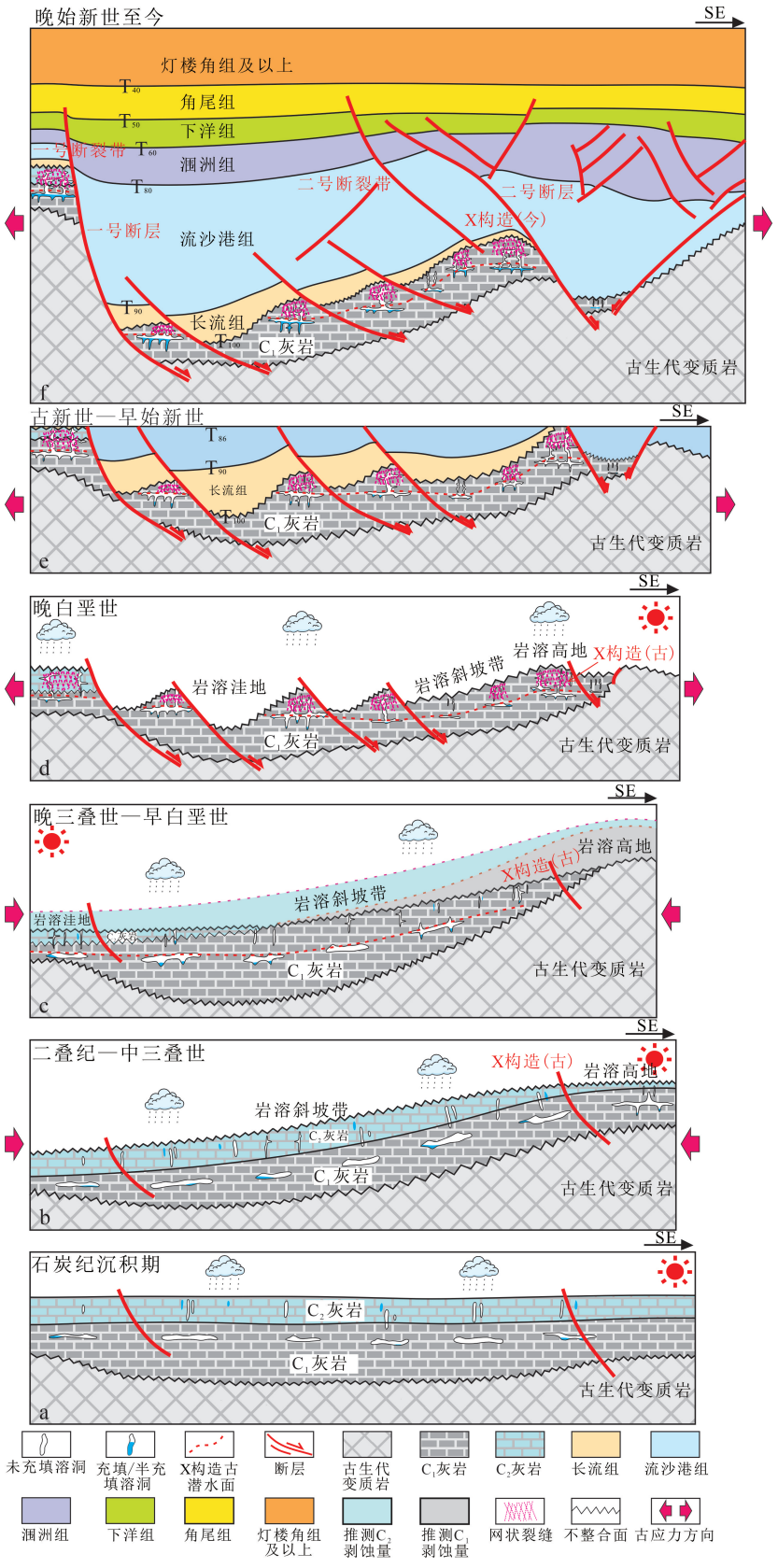


图 9　潜山成山过程与岩溶演化模式图

Fig.9　Model map of buried hill formation process and karst evolution

断裂的持续活动影响着凹陷的形成,导致断裂下降盘上的碳酸盐岩潜山沉积了长流组,而断裂上升盘则发生了抬升,并出现了部分地层缺失。③在新生代晚期,潜山进入形成定型阶段(图9e、f)。随着喜山运动的结束,断裂的活动逐渐减弱,碳酸盐岩潜山趋于稳定。涠西南凹陷经历了整体的下沉过程,形成了广泛分布的海相沉积层,如下洋组、角尾组和灯楼角组等。

在构造演化过程中,涠西南二号断裂带受到多期次的构造作用,经历了多种多样复杂的成岩作用。涠西南凹陷的碳酸盐潜山岩溶储层在沉降并被覆盖之前,经历了长时间的风化、剥蚀和地下水溶蚀等地质作用,同时还包括胶结作用、交代作用和重结晶作用等[19]。这些地质过程极大地提高了下伏碳酸盐岩的孔隙度和渗透率,从而形成了较大的孔隙、裂缝甚至是溶洞。在具备合适的生烃条件和封盖条件下,这些地质特征使得碳酸盐潜山岩溶储层能够成为优良的储集层,对油气资源的形成和保存具有重要意义。结合前人的研究[11-12,18,33],本文阐述X构造潜山岩溶储层的演化模式。

海西期(图9a),全区地层相对稳定,随着海平面升降变化,局部高部位受同生-准同生溶蚀作用,形成了早期溶蚀孔洞。至印支运动期间,NW向强烈挤压,原来加里东期NE向断裂重新激活,构造活动更加剧烈,整个地区出现显著抬升,构造破裂作用尤为明显,剥蚀及淋滤改造显著,形成风化壳表成岩溶带,尤其是二号断裂带邻近二号断层,垂直淋滤活动显著,处于垂向溶蚀孔洞溶缝的发育时期。在海西—印支时期,整个区域开始经历剥蚀作用(图9b),早期风化淋滤初步改造储层形成了垂直渗流带和水平潜流带。此外,断裂活动使得地块差异性抬升,断裂两侧潜水面出现落差,导致了垂直渗流带与水平潜流带的差异分布。

燕山期,由于区域构造运动的影响,地层自侏罗纪到白垩纪时期整体抬升(图9c、d),一号构造带和二号构造带等都在燕山期形成,接受表生岩溶作用,至新生界沉积前,一号断裂带和二号断裂带接受了长达约100 Ma的风化、淋滤与剥蚀,持续的风化剥蚀和淋滤使岩溶程度进一步增加,而后地层整体沉降,涠西南凹陷石炭系碳酸盐地层再次进入埋藏阶段。该阶段发育的建设性成岩作用有破裂作用、表生岩溶作用、白云石化作用;破坏性成岩作用包括一直持续的压实-压溶作用、胶结作用、重结晶作用和交代作用。

喜马拉雅山期,涠西南凹陷受到SE向拉张应力,产生大量的正断层(图9e、f)。同时,燕山期的古残山在区域拉张作用下,张性裂缝持续发育增大,此间一号断层在古新世开始反转回滑,二号构造带接受长流组沉积;始新世,一号断层持续活动,二号断层开始反转回滑,全区接受流沙港组沉积。在这一阶段,受块体差异沉降的影响,一号断裂带和二号断裂带被动地抬升至高位,水位波动频繁,导致水体通过断层向基岩进行横向溶蚀。同时,埋藏岩溶作用在这一时期持续发生。随着新近纪的到来,区域性沉降逐渐加剧,整个地区进入了坳陷的埋藏阶段,开始沉积新近系和第四系的物质,而埋藏岩溶的过程也持续至今。

4.2 X构造溶洞-裂缝型灰岩潜山储层发育模式

X构造溶洞-裂缝型灰岩潜山储层的发育程度主要受到以下3个方面的影响,原生的岩性-岩相控制储层基质;构造运动使地层产生大量的裂缝为后期的岩溶作用奠定了空间基础;古地貌控制了古潜水面相对位置,从而影响了岩溶作用的发育程度。研究区受到溶蚀、白云化等建设性成岩后期作用对储层改造也有显著影响。

在X构造区,岩性与构造活动是影响溶洞-裂缝型灰岩潜山储层形成的关键因素。结合岩石特性、构造特征与古地貌因素,通过综合分析,构建了“岩性筑基-裂缝拓容-岩溶改造”的三维互动模式(图10),以促进碳酸盐岩裂缝与溶洞储层的发育。在这种模式下,X构造区域普遍存在的灰岩等有利岩石组合为大规模的溶蚀储层的生成奠定了基础。此时,构造应力的多次积累以及构造地挤压与抬升成为裂缝频繁生成及多期溶蚀作用得以实现的决定性因素。研究显示,X构造区的南部和东侧遭受显著的构造应力,多次的断裂活动导致了众多伴生裂缝的形成,这些裂缝为地下流体的迁移提供了有利的溶蚀通道网络。在X构造区域,古地貌呈现出岩溶斜坡带的高地特征,水动力较为充沛,形成了岩溶发展的理想环境,且溶蚀和淋滤作用显著,有利于储层的形成。

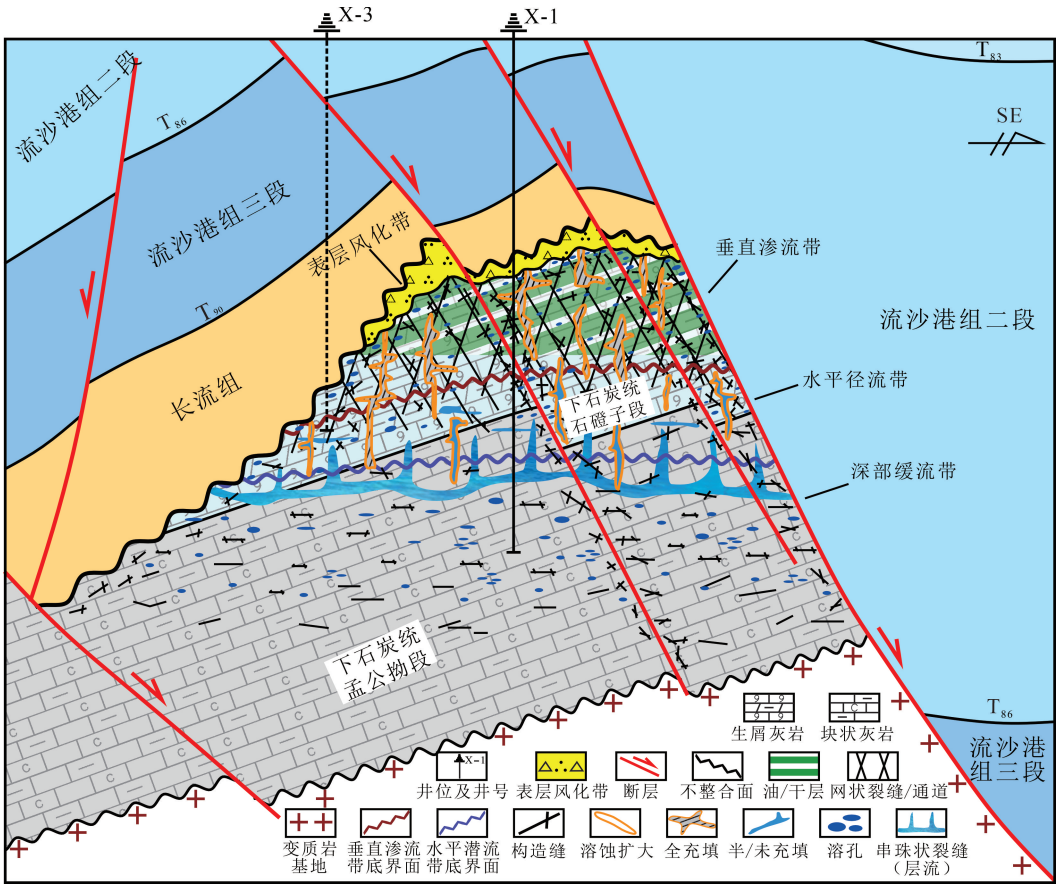


图 10　X 构造缝-洞型储层发育模式图

Fig.10　X structure fracture-cavity reservoir development model map

5　结论

1）涠西南凹陷 X 构造潜山主要发育白云质灰岩、泥晶灰岩、泥晶生屑灰岩、球粒灰岩、细-中晶白云岩、泥-粉晶灰质云岩、残余细-粉晶内碎屑云岩。溶蚀孔洞/缝、裂缝、基质孔等是主要的储集空间。

2）成像测井技术能够识别多种潜山岩溶的特征性要素，如构造扩溶缝、串珠状溶孔、层间缝、层状溶孔、洞穴及分散溶孔等。利用这些岩溶要素构建的岩溶结构，可以有效地分析出表层风化带、垂直渗流带、水平潜流带及深部缓流带的分布情况。

3）涠西南凹陷在潜山成山演化中主要经历雏形、改造、定型 3 个构造演化阶段，在成山演化过程中二号断裂带受到多期次应力叠加影响和复杂成岩作用。其中，建设性成岩作用包括同生-准同生期岩溶、破裂作用、表生岩溶作用、白云石化作用；破坏性成岩作用包括一直持续的压实-压溶作用、胶结作用、重结晶作用、交代作用。

4）X 构造溶洞-裂缝型灰岩潜山储层发育程度受岩相、古地貌及后期构造运动 3 个因素控制，其中岩相和构造作用影响显著。综合 3 个控制因素建立了“岩性筑基-裂缝拓容-岩溶改造”的三元联控碳酸盐岩缝-洞型储层发育模式。

参考文献（References）：

[1]　游君君，徐新德，李里，等.涠西南凹陷流沙港组二段烃源岩有机相研究[J].中国矿业，2012，21(11)：87－90.
You Junjun，Xu Xinde，Li Li，et al. Organic Facies of Source Rocks in the Second Member of Liushagang Formation，Weixinan Sag[J]. China Mining Industry，2012，21(11)：87－90.

[2]　徐新德，王碧维，李旭红，等.北部湾盆地涠西南凹陷流沙港组隐蔽油气藏油源及成藏特征[J].天然气地球科学，2012，23(1)：92－98.
Xu Xinde，Wang Biwei，Li Xuhong，et al. Oil Source and Reservoir Formation Characteristics of Subtle Oil and Gas Reservoirs in Liushagang Formation，Weixinan Sag，Beibuwan Basin [J]. Natural Gas

Geoscience,2012,23(1):92-98.

[3] 徐长贵,赖维成,张新涛,等.中国海油油气勘探新进展与未来勘探思考[J].中国海上油气,2023,35(2):1-12.
Xu Changgui, Lai Weicheng, Zhang Xintao, et al. New Progress in Oil and Gas Exploration of CNOOC and Thinking About Future Exploration[J]. China Offshore Oil and Gas,2023,35(2):1-12.

[4] 徐长贵,邓勇,范彩伟,等.北部湾盆地涠西南凹陷页岩油地质特征与资源潜力[J].中国海上油气,2022,34(5):1-12.
Xu Changgui, Deng Yong, Fan Caiwei, et al. Geological Characteristics and Resource Potential of Shale Oil in Weixinan Sag, Beibu Bay Basin[J]. China Offshore Oil and Gas,2022,34(5):1-12.

[5] 程光华,王丽.涠西南凹陷石炭系储集体岩溶特征识别[J].内蒙古石油化工,2012,38(13):147-148.
Cheng Guanghua, Wang Li. Karst Characteristics Identification of Carboniferous Reservoir in Weixinan Sag[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry,2012,38(13):147-148.

[6] 张宝民,刘静江.中国岩溶储集层分类与特征及相关的理论问题[J].石油勘探与开发,2009,36(1):12-29.
Zhang Baomin, Liu Jingjiang. Classification, Characteristics and Related Theoretical Problems of Karst Reservoirs in China[J]. Petroleum Exploration and Development,2009,36(1):12-29.

[7] 何治亮,魏修成,钱一雄,等.海相碳酸盐岩优质储层形成机理与分布预测[J].石油与天然气地质,2011,32(4):489-498.
He Zhiliang, Wei Xiucheng, Qian Yixiong, et al. Formation Mechanism and Distribution Prediction of High-Quality Marine Carbonate Reservoirs[J]. Oil & Gas Geology,2011,32(4):489-498.

[8] 师政,陆建林,王晔磊.渤海湾盆地南堡地区碳酸盐岩内幕储层特征及测井识别[J].世界地质,2018,37(4):1187-1196.
Shi Zheng, Lu Jianlin, Wang Yelei. Internal Carbonate Reservoir Characteristics and Well Logging Identification in Nanpu Area, Bohai Bay Basin[J]. World Geology,2018,37(4):1187-1196.

[9] 金强,张三,孙建芳,等.塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶相形成和演化[J].石油学报,2020,41(5):513-525.
Jin Qiang, Zhang San, Sun Jianfang, et al. Formation and Evolution of Ordovician Carbonate Karst Facies in Tahe Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica,2020,41(5):513-525.

[10] 吴丰,习研平,张亚,等.川东—川南地区茅口组岩溶储层分类识别及有效性评价[J].岩性油气藏,2020,32(2):90-99.
Wu Feng, Xi Yanping, Zhang Ya, et al. Classification and Validity Evaluation of Karst Reservoirs in Maokou Formation, Eastern Sichuan and Southern Sichuan[J]. Lithologic Reservoirs, 2019,32(2):90-99

[11] 徐守立,尤丽,代龙,等.北部湾盆地涠西南凹陷灰岩潜山储层特征及分布规律[J].海洋地质与第四纪地质,2020,40(1):94-103.
Xu Shouli, You Li, Dai Long, et al. Reservoir Characteristics and Distribution of Buried-Hill Limestone in Weixinan Sag, Beibu Bay Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology,2020,40(1):94-103.

[12] 王永辉,张友浩,高先志,等.北部湾盆地涠西南凹陷碳酸盐岩潜山表生岩溶储层特征与演化模式[J].地球学报,2022,43(5):676-688.
Wang Yonghui, Zhang Youhao, Gao Xianzhi, et al. Characteristics and Evolution Model of Epigenetic Karst Reservoir in Carbonate Buried-Hill in Weixinan Depression, Beibu Bay Basin[J]. Journal of Earth Sciences, 2012,43(5):676-688.

[13] 赵顺兰,赵亚卓,杨希冰,等.北部湾盆地涠西南凹陷碳酸盐岩潜山储层特征与主控因素分析[J].海洋学报,2018,40(9):43-53.
Zhao Shunlan, Zhao Yazhuo, Yang Xibing, et al. Characteristics and Main Controlling Factors of Carbonate Buried-Hill Reservoir in Weixinan Sag, Beibu Bay Basin[J]. Journal of Oceanography,2018,40(9):43-53.

[14] 李才,杨希冰,范彩伟,等.北部湾盆地演化及局部构造成因机制研究[J].地质学报,2018,92(10):2028-2039.
Li Cai, Yang Xibing, Fan Caiwei, et al. Study on the Evolution and Local Tectonic Mechanism of Beibu Gulf Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 92(10):2028-2039.

[15] 马云,李三忠,刘鑫,等.华南北部湾盆地的形成机制[J].吉林大学学报(地球科学版),2014,44(6):1727-1736.
Ma Yun, Li Sanzhong, Liu Xin, et al. The Formation Mechanism of the Beibu Gulf Basin, South China[J]. Journal of Jilin University (Earth Sciences Edition), 2014, 44(6): 1727-1736.

[16] 孙晓猛,张旭庆,张功成,等.南海北部新生代盆地基底结构及构造属性[J].中国科学:地球科学,2014,44

(6)：1312－1323.
Sun Xiaomeng，Zhang Xuqing，Zhang Gongcheng，et al. Basement Structure and Tectonic Properties of Cenozoic Basins in the Northern South China Sea[J]. Science China：Earth Sciences，2014，44(6)：1312－1323.

[17] 焦立波，杨希冰，邓勇，等.涠西南凹陷构造演化特征及潜山裂缝预测[J].长江大学学报(自然科学版)，2018，15(7)：9－13，4.
Jiao Libo，Yang Xibing，Deng Yong，et al. Tectonic Evolution Characteristics of Weixinan Sag and Prediction of Buried Hill Fractures[J]. Journal of Yangtze University(Natural Science Edition)，2018，15(7)：9－13，4.

[18] 赵顺兰，杨希冰，陈林，等.南海西部涠西南凹陷碳酸盐岩潜山油气成藏条件及勘探潜力[J].中国海上油气，2019，31(2)：51－61.
Zhao Shunlan，Yang Xibing，Chen Lin，et al. Hydrocarbon Accumulation Conditions and Exploration Potential of Buried Carbonate Hill in Weixinan Sag，West South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas，2019，31(2)：51－61.

[19] Yang X Y，Lü X X，Huang Y H，et al. The Depositional Environment of the Lacustrine Source Rocks in the Eocene Middle Number of the Liushagang Formation of the Weixinan Sag，Beibuwan Basin，China：Implications from Organic Geochemical Analyses[J]. Minerals，2023，13(4)：575.

[20] Ma X X，Wei L，Hou D J，et al. Geochemical Characteristics of Three Oil Families and Their Possible Source Rocks in the Sub-Sag A of Weixinan Sag，Beibuwan Basin，Offshore South China Sea[J]. ACS Omega，2022，7(28)：24795－24811.

[21] 张友浩.涠西南凹陷石炭系碳酸盐岩潜山储层特征与分布规律研究[D].北京：中国石油大学(北京)，2022.
Zhang Youhao. Study on Characteristics and Distribution of Carboniferous Buried Hill Reservoirs in Weixinan Sag[D]. Beijing：China University of Petroleum(Beijing)，2022.

[22] 张强.裂缝性碳酸盐岩储层网络发育模式及地震表征技术研究[D].青岛：中国石油大学(华东)，2020.
Zhang Qiang. Study on Network Development Model and Seismic Characterization Technique of Fractured Carbonate Reservoir[D]. Qingdao：China University of Petroleum (East China)，2020.

[23] 杨柳，李忠，吕修祥，等.塔中地区鹰山组岩溶储层表征与古地貌识别：基于电成像测井的解析[J].石油学报，2014，35(2)：265－275，293.
Yang Liu，Li Zhong，Lü Xiuxiang，et al. Karst Reservoir Characterization and Paleogeomorphology Recognition of Yingshan Formation in Tazhong Area：Analysis Based on Electrical Imaging Logging[J]. Acta Petrolei Sinica，2014，35(2)：265－275，293.

[24] 王招明，张丽娟，孙崇浩.塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩岩溶分类、期次及勘探思路[J].古地理学报，2015，17(5)：635－644.
Wang Zhaoming，Zhang Lijuan，Sun Chonghao. Classification，Stages and Exploration Ideas of Ordovician Carbonate Karst in Tarim Basin[J]. Journal of Palaeogeography，2015，17(5)：635－644.

[25] 张任风，张占松，张超谟，等.渤中 19－6 气田潜山变质岩储层类型特征与电成像测井识别[J].东北石油大学学报，2019，43(5)：58－65，122－123.
Zhang Renfeng，Zhang Zhansong，Zhang Chaomo，et al. Reservoir Type Characteristics and Identification of Metamorphic Rock in Buried-Hill in Bozhong 19－6 Gas Field[J]. Journal of Northeast Petroleum University，2019，43(5)：58－65，122－123.

[26] 侯明才，陈扬，王粤川，等.渤中 22－1 构造碳酸盐岩储层岩溶识别及影响因素[J].西南石油大学学报(自然科学版)，2021，43(1)：17－29.
Hou Mingcai，Chen Yang，Wang Yuechuan，et al. Karst Identification and Influencing Factors of Carbonate Reservoir in Bozhong 22－1 Structure[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition)，2021，43(1)：17－29.

[27] 申威，唐军，吴进波，等.潜山型储层纵向分带测井表征方法及应用[J].中国石油勘探，2023，28(2)：144－153.
Shen Wei，Tang Jun，Wu Jinbo，et al. Characterization Method and Application of Longitudinal Zonal Logging in Buried Hill Reservoir[J]. China Petroleum Exploration，2023，28(2)：144－153.

[28] 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. Characteristics of Ordovician Karst Zonation and Fissure Cavity Structure in Tahe Oil Field[J]. Acta Petrolei Sinica，2016，37(3)：289－298.

[29] 李英菊.塔河油田奥陶系古岩溶洞穴充填特征及其油气响应[D].荆州：长江大学，2020.
Li Yingju. Filling Characteristics and Oil-Gas Response of Ordovician Paleo-Karst Caves in Tahe

Oilfield[D].Jingzhou:Yangtze University,2020.

[30] 张勇,姚永坚,李学杰,等.中生代以来东亚洋陆汇聚带多圈层动力下的中国海及邻区构造演化及资源环境效应[J].中国地质,2020,47(5):1271-1309.
Zhang Yong, Yao Yongjian, Li Xuejie,et al. Tectonic Evolution and Resource and Environmental Effects of the China Sea and Its Adjacent Areas Under the Multi-Layer Dynamics of the East Asian Oceanic and Continental Convergence Belt Since the Mesozoic[J]. Geology of China, 2019,47(5):1271-1309.

[31] 刘一鸣,胡林,张强,等.渤西南凹陷流沙港组二段至一段构造特征及其对沉积的控制作用[J].东北石油大学学报,2018,42(6):52-61,8-9.
Liu Yiming, Hu Lin, Zhang Qiang,et al. Structural Characteristics of the 2nd to 1st Member of Liushagang Formation in Weishan Sag and Its Controlling Effect on Sedimentation[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2018, 42(6): 52-61,8-9.

[32] 卢林,汪企浩,黄建军.北部湾盆地涠西南和海中凹陷新生代局部构造演化史[J].海洋石油,2007,27(1):25-29,57.
Lu Lin, Wang Qihao, Huang Jianjun. Cenozoic Local Tectonic Evolution History of Weishan and Haizhong Depression in Beibu Bay Basin[J]. Offshore Oil, 2007,27(1):25-29,57.

[33] 王彬.涠西南凹陷基岩储层发育影响因素研究[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(23):125-127.
Wang Bin. Study on Influencing Factors of Bedrock Reservoir Development in Wexinan Sag[J]. China Petroleum and Chemical Standards and Quality,2023, 43(23):125-127.