

塔中地区西北部鹰山组成岩早期岩溶作用类型及其特征

张恒^{1,2,3}, 蔡忠贤^{1,3}, 漆立新⁴, 云露⁴

[1. 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074; 2. 美国德克萨斯大学奥斯汀分校经济地质调查局, 德克萨斯 奥斯汀 78713-8924; 3. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北武汉 430074; 4. 中国石化西北油田分公司, 新疆乌鲁木齐 830011]

摘要:根据塔中构造演化历史,厘定了鹰山组沉积-暴露时期均处于早期成岩阶段。基于大量的成像测井、岩心、薄片和部分分析化验资料,以及二维、三维地震数据,结合阴极发光技术、电镜扫描技术和地震属性提取技术,将塔中西北部鹰山组成岩早期岩溶作用划分为混合水岩溶和大气淡水岩溶两种基本类型,并阐述了岩溶发育特征,建立了岩溶作用模式。研究结果表明:①混合水岩溶为一期组构选择性的溶蚀作用,集中发育于塔中北坡折带顺7井,储层受到海岸带高能相带的控制。②大气淡水岩溶为一期非组构选择性的溶蚀作用,平面分布极为普遍。岩溶储层以裂缝型和裂缝孔洞型为主,岩溶垂向结构发育不完整,且储层在岩溶古地貌上的分异特征不显著,与北西西向断裂密切相关,反映了低幅度地貌控制下的开放系统“裂隙-渗流”型岩溶作用模式。

关键词:混合水岩溶;大气淡水岩溶;早期成岩阶段;岩溶作用;鹰山组;塔中地区

中图分类号:TE

文献标识码:A

Types and characteristics of eogenetic karst in the Yingshan Formation in northwestern Tazhong area, Tarim Basin

Zhang Heng^{1,2,3}, Cai Zhongxian^{1,3}, Qi Lixin⁴, Yun Lu⁴

[1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources Ministry of Education, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Bureau of Economic Geology, University of Texas at Austin, Austin, Texas 78713-8924, U. S. A.; 3. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 4. Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China]

Abstract: It is recognized that the Yingshan Formation was in eogenetic stage both in depositional and exposure period according to the tectonic evolution history in Tazhong area. Based on a large amount of image logging, cores, thin sections, geochemical data and 2D & 3D seismic data in combination with cathode luminescence, scanning electronic microscope and seismic attributes extraction, we identified two types of eogenetic karst in the Yingshan Fm. in northwestern Tazhong area, namely mixing water karst and meteoric karst, discussed their formation characteristics and built karstification models. The following results were obtained. ① The mixing water karst was formed by fabric-selective dissolution and controlled by high-energy sedimentary facies in coastal regions and occurs mainly in Well Shun7 in northern slope break zone; ② The meteoric karst was produced by non-fabric-selective dissolution, and is universal in areal distribution. Karst reservoirs are dominated by fractured reservoirs and fractured-vuggy reservoirs. The karst is incomplete in vertical architecture and the reservoirs are insignificant in differential characteristics in respect of paleogeomorphology and are controlled by the NWW-trending fault system. The karstification mode is “fissure-seepage” type in an open system under the control of low relief paleogeomorphology.

Key words: mixed water karst, meteoric karst, Eogenetic stage, karstification, Yingshan Formation, Tazhong area

Choquette 和 Pray 依据时间次序将成岩作用划分为早期成岩阶段、中期成岩阶段和晚期成岩阶段,并指出洞穴主要发育在早期和晚期成岩阶段^[1]。随后 20 多

年,该理论不仅在碳酸盐岩沉积学和岩石学中得到了广泛的应用,在碳酸盐岩岩溶学领域亦备受推崇,特别是与油气勘探相关的晚期成岩阶段、近地表古岩溶研

收稿日期:2015-07-15;修订日期:2015-12-30。

第一作者简介:张恒(1988—),男,博士研究生,碳酸盐岩储层地质。E-mail: cughzhang@163.com。

通讯作者简介:蔡忠贤(1963—),男,教授,碳酸盐岩沉积学、储层地质学和油藏描述。E-mail: zxc@cug.edu.cn。

基金项目:国家基础研究发展计划(973 计划)项目(2012CB214804);教育部重点实验室开放基金项目(TPR-2014-19)。

究^[2-4]。多数学者称其为非承压型大气淡水岩溶或表生岩溶^[5-6],国内部分学者称其为风化壳岩溶^[7-9]。该类岩溶与大型不整合面密切相关,发育于古老的碳酸盐岩地层中,多形成于内陆环境。岩石经历了深埋藏和构造变形,压实作用极强。原始基质孔隙度和渗透率极低,现存孔隙主要是裂缝网络和孔洞管道形成的双孔介质^[10]。我国塔河油田、轮南油气田、任丘油田即为该类岩溶的典型代表^[7]。

近年来,塔中地区中-下奥陶统鹰山组油气勘探取得了重大进展。塔中北斜坡地区已培育出大型凝析气田,探明储量 $2 \times 10^8 \text{ t}$ ^[11],塔中西北部中1井、中12CX井和顺7井亦获得了工业油气流^[12],塔中I号断裂带北侧下盘顺南—古城地区多口探井获得天然气流^[9,13-14]。围绕储层的成因机制,一种观点认为与塔河油田类似,鹰山组顶部暴露形成了广泛的风化壳岩溶储集体^[11,15-17]。另一种观点认为深部埋藏溶蚀作用是孔隙形成的主要机制,包括①埋藏阶段有机质热演化过程中生成的富含 CO_2 和 H_2S 的高温酸性流体沿着先期孔洞层和断裂与围岩发生水岩反应形成溶蚀孔隙^[18-21];②沿着断裂带上升的热液流体使围岩发生白云岩化作用,形成孔隙增生^[20,22];③埋藏白云岩化作用形成优质白云岩储集体^[23-24];④受到火山岩活动驱动的远端热液与地层卤水混合,并沿着断裂分布,形成上升型流体-岩石相互作用体制,发育热液改造型孔隙^[25-27]。这两种观点分别强调了晚期和中期成岩阶段的岩溶作用成因,然而对于早期成岩阶段的岩溶作用却少有提及。

实际上,20世纪80年代以来,与早期成岩阶段相关岩溶作用逐渐得到众多学者的重视^[28-32],学术界称之为成岩早期近地表岩溶或同生岩溶。该类岩溶多发生在海岸带和岛屿环境,受到大气淡水-海水混合岩溶作用的改造,也称海岸带岩溶、岛屿型岩溶或混合水岩溶^[5]。成岩早期岩溶作用主要发育在年轻的灰岩地层中,且接近沉积区。成岩作用仍在进行、尚未经过压实作用,岩石的基质孔隙度和渗透率较高,以粒间孔、铸模孔为代表,岩石固结作用和岩溶作用是同时进行的^[10]。

本次研究基于塔中地区西北部鹰山组大量成像测井、岩心和薄片以及二维、三维地震资料,结合阴极发光技术、电镜扫描技术和优化属性提取技术,从早期成岩阶段的新视角,识别和厘定了两种岩溶作用类型,并阐述了岩溶储层分布特征,建立了岩溶储层发育的水文地质模式。

1 地质概况

塔中西北部位于塔里木盆地卡塔克隆起带西北

端,区内覆盖顺西和卡1两个三维地震区。卡塔克隆起带北邻满加尔坳陷,南靠塘古巴斯凹陷,呈北西-南东向条带状展布。基于二维地震数据,计算了上奥陶统残留厚度($T_7^4 - T_7^0$),据此将卡塔克隆起带从北到南划分为5个构造单元:北坡折带、北斜坡带、中央主垒带、南斜坡带及南坡折带(图1)。其中,中央主垒带分布于塔中II号断裂带与塔中5号-10号断裂带围限的区域。北斜坡带和南斜坡带分别位于塔中I号断裂带与塔中5号-10号断裂带、塔中II号断裂带与南缘断裂带围限的区域。北坡折带和南坡折带分别位于塔中I号断裂带和南缘断裂带控制区域。该隆起于加里东中期受到区域性强烈的挤压作用,形成隆升雏形。海西早期塔中北带断褶构造几乎没有活动,中带和南带形成新的构造带,隆起基本定型。海西晚期以后,塔中地区构造形变相对薄弱,以局部继承性构造活动为主^[33]。

通过单井合成地震记录标定和 $T_8^0, T_7^4, T_7^2, T_7^0$ 及 T_6^0 等主要层位和断裂的精细解释,对跨越塔中地区主要构造方向的448SN剖面及跨越东西向的402EW剖面进行了构造演化重建(图2)。结合盆地区域构造背景,可以把塔中地区古生代的构造演化分为以下几个阶段:寒武纪—早奥陶世伸展沉降阶段、早奥陶世晚期—中奥陶世末隆起雏形阶段、晚奥陶世末期隆起基本定型阶段、中泥盆世末期最终定型阶段、中二叠世强烈岩浆活动侵入、海西晚期运动隆起强化阶段。

早奥陶世—中奥陶世塔中地区构造环境相对稳定,以拉张为主,发育张性正断裂^[34],中-下奥陶统稳定沉积,主要为局限台地-开阔台地相(图2)。

中奥陶世末期,加里东中期I幕构造运动造成区域性挤压,形成塔中I号断裂带等北西西向大型逆冲断裂体系^[35],同时使得良里塔格组沉积之前,中奥陶统遭受大量剥蚀,并强烈地隆升,卡塔克隆起初具雏形。

晚奥陶世,塔中I号断裂带继承性持续活动,碳酸盐岩台地在鹰山组古隆起的背景上发育,良里塔格组沿着塔中I号断裂带在台地边缘广泛发育礁滩型高能沉积相,桑塔木沉积期因大规模的海侵导致台地淹没,形成巨厚混积陆棚相^[36]。由此可知,鹰山组沉积之后直接被抬升至地表。

受到加里东中期构造运动的影响,鹰山组顶部遭受了长达10Ma的暴露和剥蚀^[11],不仅形成了广泛的不整合面,而且使得该区大部分缺失上奥陶统恰尔巴克组、中奥陶统一间房组以及鹰山组上段地层。奥陶系自上而下分别为桑塔木组、良里塔格组、鹰山组和蓬莱坝组。其中,良里塔格组与鹰山组呈平行不整合接触关系。鹰山组地层厚度自中央主垒带向两侧逐渐增厚,岩性以云质灰岩和白云岩为主。

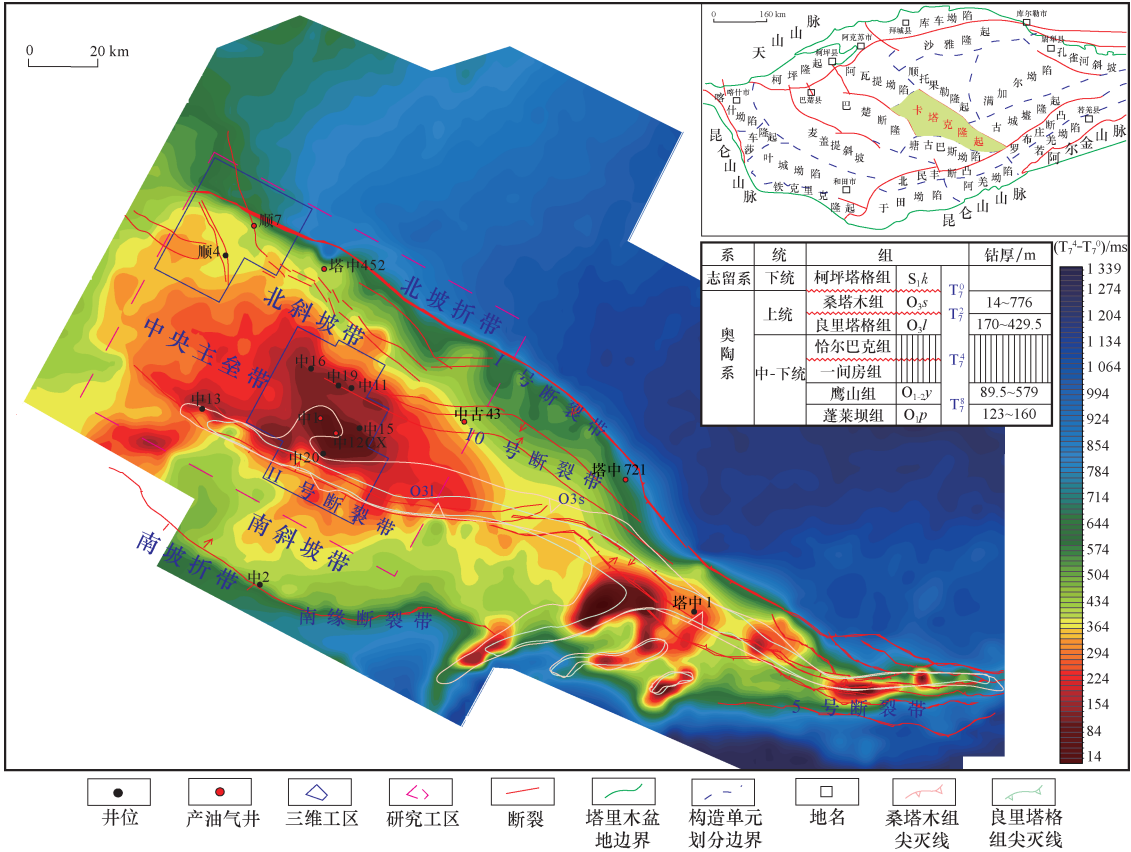


图1 塔中地区西北部构造及井位分布

Fig.1 Structural units,fault and well locations of northwestern Tazhong area

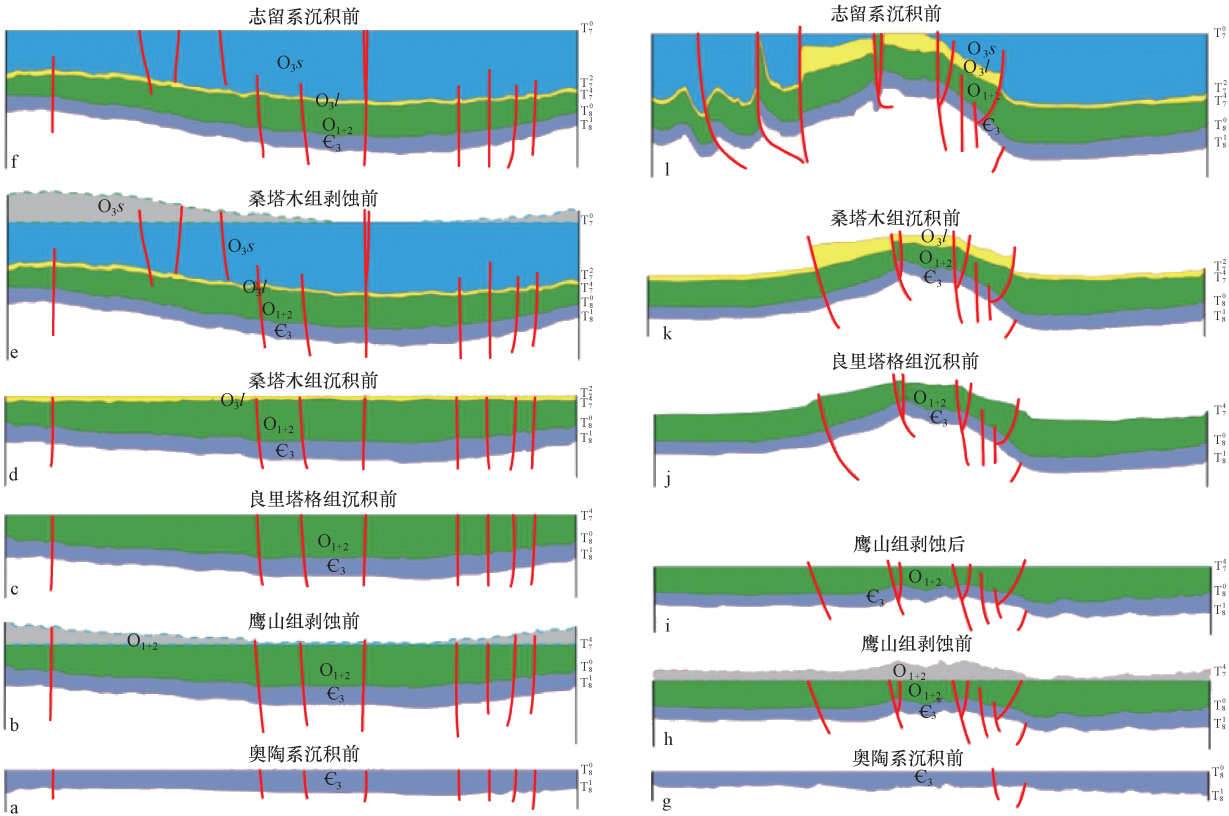


图2 塔中地区鹰山组构造演化剖面

Fig.2 Tectonic evolution profiles of Yingshan Formation in Tazhong area

€₃. 上寒武统;O₁₋₂. 中-下奥陶统;O_{3l}. 上奥陶统良里塔格组;O_{3s}. 上奥陶统桑塔木组

a—f. 402EW 剖面; g—l. 448SN 剖面

2 塔中地区早期成岩阶段厘定

前人在塔中隆起与塔河主体区中-下奥陶统岩溶作用对比研究中认为^[8-9,15,19-21,25-27,33,37]:①塔中隆起中-下奥陶统大部分被上奥陶统覆盖,塔河主体区石炭系直接超覆在中-下奥陶统之上;②中-下奥陶统大规模抬升和暴露的时间分别为加里东中期和海西早期,因此两个地区大气淡水岩溶作用分别以加里东中期、海西早期为主;③塔中隆起中下奥陶统暴露的时间及大气水岩溶作用规模远不及塔河主体区;④塔中隆起除了发育广泛的风化壳岩溶储集体以外,多期次、多类型埋藏溶蚀作用叠加改造对孔隙的形成和保存贡献极大。

然而,即便一些学者将构造演化差异纳入了岩溶认识范畴,塔中隆起和塔河主体区岩溶发育差异的本质并没有彻底地揭示^[33]。笔者认为其根本区别在于中-下奥陶统抬升暴露的时期分别对应于早期成岩阶段和晚期成岩阶段。主要依据如下:①塔中地区的构造演化表明,鹰山组沉积之后并没有经历中期成岩阶段,而是直接被抬升至地表,即由沉积期直接进入暴露期(图2)。因此,塔中地区鹰山组暴露之时,岩石结构尚未完全固结,属于年轻的灰岩地层。②塔中北斜坡地区上奥陶统与中-下奥陶统呈角度不整合接触关系^[11],而塔河南部上奥陶统与中-下奥陶统呈平行不整合接触关系^[38],说明塔中隆起和塔河主体区中-下奥陶统大规模的抬升分别在上奥陶统披覆之前和之后,即塔中隆起鹰山组抬升之前未经历埋藏阶段,而塔河主体区至少经历了上奥陶统沉积期的埋藏。③根据塔中鹰山组岩心薄片观察,颗粒的原始轮廓十分清晰并保存完整,颗粒之间的接触方式为点接触或者未接触(图3d,f),说明压实作用并不强烈,并且在顺7井发现了大量的粒内孔隙和局部铸模孔(图3f,g)。这种岩石结构特征和岩溶作用特征反映了早期成岩阶段的特点。

基于上述分析,并结合 Choquette 和 Pray 成岩阶段的划分方案^[1],将塔中地区西北部鹰山组早期成岩阶段划分为沉积期和暴露期两个阶段。

3 成岩早期岩溶作用类型及其特征

根据岩溶作用时间和岩溶水类型的差异,并基于塔中西北部鹰山组早期成岩阶段的厘定,将该阶段岩溶作用划分为混合水岩溶和大气淡水岩溶两种基本类型,且分别对应于沉积期和暴露期。

3.1 混合水岩溶

3.1.1 混合水岩溶识别标志

混合水岩溶又称同生岩溶(syngenetic karst),发育于鹰山组沉积时期。受海平面升降影响,鹰山组地层间歇性暴露出地表,并接受大气淡水-海水混合作用改造^[10]。Vacher 和 Mylroie 认为其形成于年轻的灰岩中,发育由连通的孔道和优先发育的走廊带组成的双孔介质^[30]。Grime 指出该类岩溶作用与岩化作用是同期的^[31]。Moore 明确了该类岩溶作用形成于基质孔隙和渗透率较高的岩石中^[32]。

此外,近年来,国内外对该类岩溶作用的识别特征相继进行了报道^[39-46]。主要体现出以下特征:①围岩具有较好的孔渗性,孔隙发育明显受到岩相控制;②在海岸带或者岛屿环境的野外露头考察中发育侧翼边缘洞穴和孔洞层;③露头和岩心中发育似层状分布的溶蚀孔洞,且多呈现出花斑状、蜂窝状和海绵状的形态特征;④溶蚀孔洞与围岩界面模糊,往往呈过渡变化,并发育“易晕状”特征;⑤在显微镜下发育组构选择性溶蚀作用形成的铸模孔、粒内溶孔、粒间溶孔等;⑥发育渗流粉砂充填物和示顶底构造;⑦发育晶簇状、悬垂型、新月形等大气淡水胶结物;⑧发育纤维状、犬牙状等胶结物;⑨混合水成岩环境下方解石胶结物主要发暗色阴极发光;⑩由于大气淡水的影响,氧碳同位素较围岩整体偏负,锶同位素值往往大于同地区海相围岩值^[9]。

3.1.2 混合水岩溶发育特征

塔中西北部鹰山组混合水岩溶主要发育在顺西三维区斜坡地带,以顺7井最为典型。该井鹰山组井段6 820~6 912 m 为油气产能段,裸眼酸压测试4 mm 油嘴,油压56.2 MPa,日产油24 m³,日产气11.8×10⁴ m³。该产能段对应于第7~8回次取心(图3a),为一套高能相颗粒灰岩,发育极为丰富的蜂窝状溶蚀孔洞储集体,孔洞级别为毫米级,孔洞与围岩之间的界限并不明显(图3b);显微镜鉴定发现该套岩心的微观孔隙主要为组构选择性的铸模孔和粒内溶孔(图3d,f,g)。

同时,顺7井产能段的微观薄片识别了至少5种类型方解石胶结物:纤维状方解石胶结物、犬牙状方解石胶结物、晶簇状方解石胶结物、悬垂型方解石胶结物和新月形方解石胶结物。其中,纤维状方解石胶结物和犬牙状方解石胶结物分布于颗粒周缘,前者具有等厚环边结构,呈放射状(图3g),后者呈锯齿状,属于第一世代胶结物,反映了海水潜流或者渗流成岩环境。晶簇状方解石胶结物分布于颗粒之间,晶粒较小,具有镶嵌结构(图3d)。悬垂型和新月形方解石胶结物分布于颗粒下缘,阴极发光下发暗色光

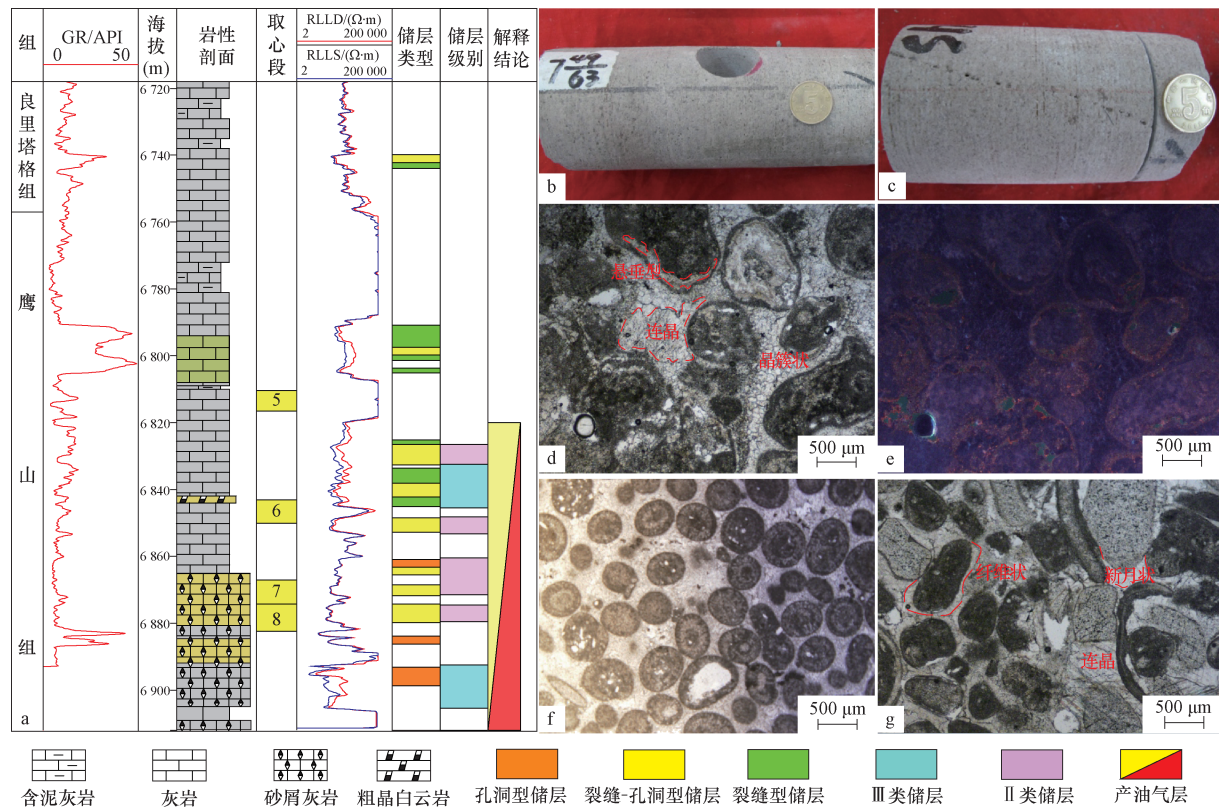


图3 塔中地区顺7井鹰山组岩溶发育特征

Fig. 3 Karstification characteristics of the Yingshan Formation in Shun-7 well in Tazhong area

a. 顺7井鹰山组单井综合柱状图; b. 第7回次, 埋深6 872.04 m, 砂屑灰岩, 密集分布的未充填溶蚀孔洞; c. 第8回次, 埋深6 879.30 m, 砂屑灰岩, 高角度裂缝扩容特征; d. 第7回次, 埋深6 873.42 m, 亮晶砂屑灰岩, 悬垂型、晶簇状和连晶方解石胶结物; e. 第7回次, 埋深6 873.42 m, 方解石胶结物阴极发光呈暗色发光; f. 第6回次, 埋深6 843.08 m, 亮晶鲕粒灰岩, 粒内溶孔; g. 第8回次, 埋深6 879.30 m, 亮晶砂屑灰岩, 新月形、纤维状和连晶方解石胶结物

(图3e), 属于第二世代胶结物, 是准同生期大气淡水渗流带的产物。

3.2 大气淡水岩溶

3.2.1 大气淡水岩溶识别

大气淡水岩溶是指可溶性岩层在大气淡水补给条件下形成的化学溶解及机械垮塌过程^[5]。该岩溶作用的识别标志体现在地震、钻井测井、岩心、薄片以及地化分析等资料上^[37,41-42,47]。混合水岩溶和大气淡水岩溶在识别特征上的差异性, 主要体现在溶解机制、水流样式、岩溶发育背景、岩溶作用机制、孔洞发育特征、储层控制因素、成岩环境、孔隙类型及规模、方解石胶结物特征等方面^[41-46,48](表1)。

塔中地区西北部鹰山组大气淡水岩溶作用识别证据包括以下几个方面:

1) 卡1三维工区单井T₁不整合附近的成像测井图像揭示了大量溶蚀孔洞和裂缝扩溶孔(图4), 顺7井鹰山组取心中发现连续的沿着高角度裂缝的扩溶现象(图3c, 图5k—n)。中101井的取心和顺4井的薄片发育高角度裂缝被先期方解石充填的特征, 可能

代表了与大气水岩溶伴生的裂缝(图5i, j)。

2) 中15井5 450 m和中19井5 470 m的取心中揭示了不整合面(图5a, b), 证实了鹰山组顶部的暴露特征。此外, 中20井鹰山组5 493.2 m的取心中发现角砾岩化现象(图5c)。

3) 塔中西北部鹰山组的微观薄片普遍发育连晶方解石(图3d), 代表大气淡水成岩环境下一期规模较大的非组构选择性溶蚀作用形成的孔隙被胶结充填。该胶结物往往具有双向解理结构、晶体表面较脏、连片生长, 阴极发光呈暗色发光(图3e, 图5h, 图5g), 为第三世代胶结物。

4) 中15井5 450.81 m和5 571.50 m的取心中分别发育方解石全充填孔洞和水平裂缝(图5f)。其中, 孔洞与围岩界面清晰; 裂缝中充填的方解石为连晶方解石, 且方解石胶结充填之后发生了沿着裂缝的扩溶作用(图5g)。

5) 中1井距离不整合面16 m的第18—19回次取心中发育白云岩溶蚀孔洞, 孔洞分布密集, 达到毫米级(图5o, p)。同时, 扫描电镜观察显示, 第18回次的白云岩段中发育大量的晶内溶孔(图5q), 局部晶间孔中可见粘土矿物充填(陆源碎屑)(图5r)。

表 1 塔中地区混合水岩溶和大气淡水岩溶作用差异性对比
Table 1 Comparasion of mixing karst and meteoric karst in Tazhong area

类型	混合水岩溶	大气淡水岩溶
溶解机制	组构选择性溶蚀作用	非组构选择性溶蚀作用
水流样式及效应	以散流和漫流为主,为非受限性流动,往往形成蜂窝状、海绵状等溶蚀孔洞	以裂隙流和地表径流为主,为限定性流动,往往沿着裂缝扩溶
岩溶发育背景	与海平面周期性变化相关(高级层序界面)	与不整合面相关
岩溶机理及效应	受到混合水岩溶作用的控制,以发育似层状溶蚀孔洞和侧翼边缘洞穴为典型特征	受到排泄基准面的制约,形成裂隙扩溶和管道扩溶孔洞,纵向分布具有分带性
孔洞发育特征	溶蚀孔洞与围岩界面模糊,充填物中含有基岩溶解离解、离散形成的颗粒和生物碎屑	溶蚀孔洞与围岩界面相对清楚,充填物以机械充填物和化学充填物为主
储层控制因素	受到岩相控制	受到裂隙和层理等因素的控制
成岩环境	早成岩阶段(准)同生成岩环境	近地表暴露成岩环境
孔隙类型及规模	溶蚀规模相对较小,以铸模孔、粒内溶孔为主	溶蚀规模较大,以溶蚀扩大孔为主
方解石胶结物特征	发育新月形、悬垂型等第二世代胶结物,且伴有渗流粉砂和示底构造特征	发育连晶方解石等第三世代胶结物

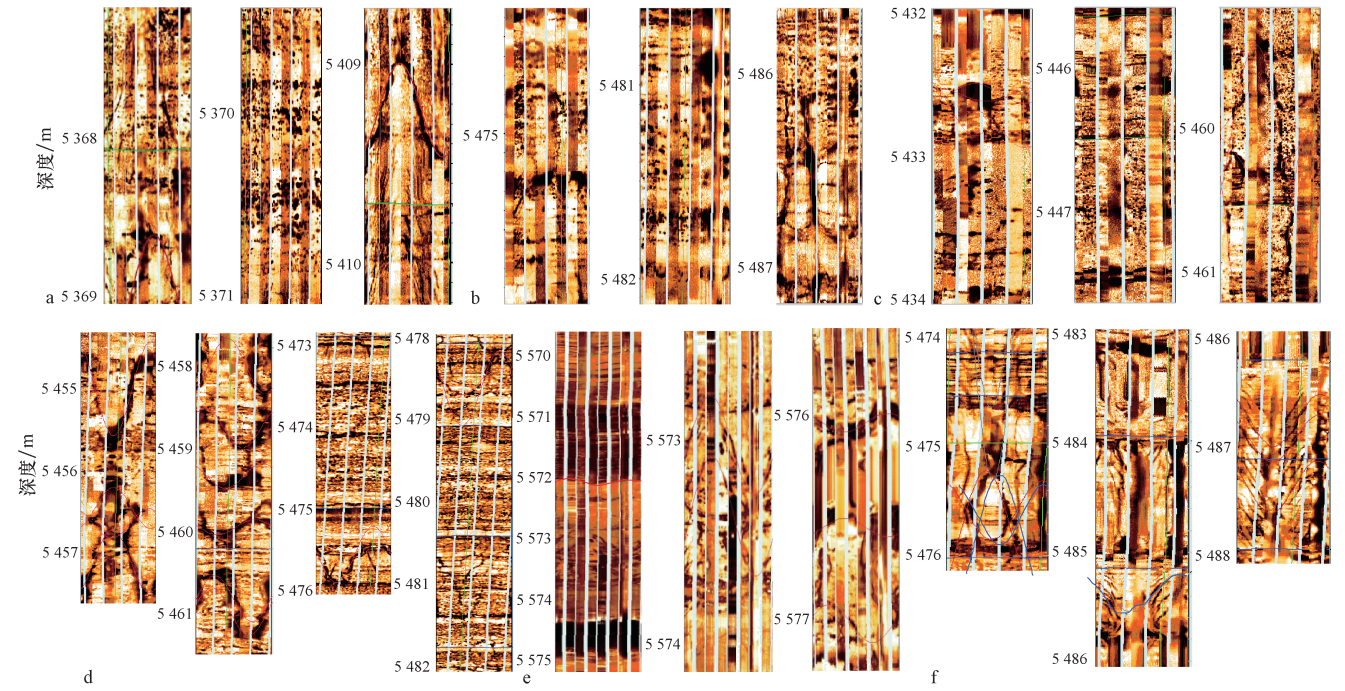


图 4 塔中地区西北部鹰山组储层成像测井响应特征

Fig. 4 Imaging logging characteristics of Yingshan Formation in northwestern Tazhong area

a. 中 1 井,埋深 5 368 ~5 371 m 为孔洞型储层,5 409 ~5 410 m 为裂缝-孔洞型储层;b. 中 11 井,埋深 5 475 m 和 5 481 m 为孔洞型储层,5 486 ~5 487 m 为裂缝-孔洞型储层;c. 中 13 井,埋深 5 433 m 和 5 446 m 为裂缝型储层,5 460 m 为裂缝-孔洞型储层;d. 中 15 井,埋深 5 455 ~5 461 m 为裂缝-孔洞型储层,5 473 ~5 482 m 为裂缝型储层;e. 中 16 井,埋深 5 573 m 为裂缝型储层,5 574 ~5 575 m 为孔洞型储层;f. 中 19 井,埋深 5 475 m 和 5 484 m 为裂缝-孔洞型储层,5 486 m 为裂缝型储层

6) 对顺 7 井和中 15 井中-下奥陶统碳酸盐岩中的孔洞和裂缝方解石进行了碳氧同位素和锶同位素的分析测试(表 2)。样品 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) 为 $-1.14\text{‰} \sim -1.68\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ (PDB) 为 $-6.85\text{‰} \sim -9.92\text{‰}$ (编号 C-01 至 C-04),与塔中地区奥陶系背景值(C-05)相比,氧同位素和碳同位素呈现整体偏负的特征,说明存在大气淡水成岩流体的影响^[49-50]。此外,顺 7 井和中 15 井裂缝方解石的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值分别为 0.710 068 和

0.709 897,大于奥陶系围岩的锶同位素比值,且大于 Veizer 等确定的奥陶系海相碳酸盐岩取值范围,进一步支撑了上述认识^[51]。

3.2.2 大气淡水岩溶储层垂向分布

结合中央断垒带鹰山组顶部裂缝-孔洞成像测井响应特征和中 1 井、中 12CX 井油气储集层段^[12],对不整合面附近大气淡水岩溶储集体进行了对比(图 7),

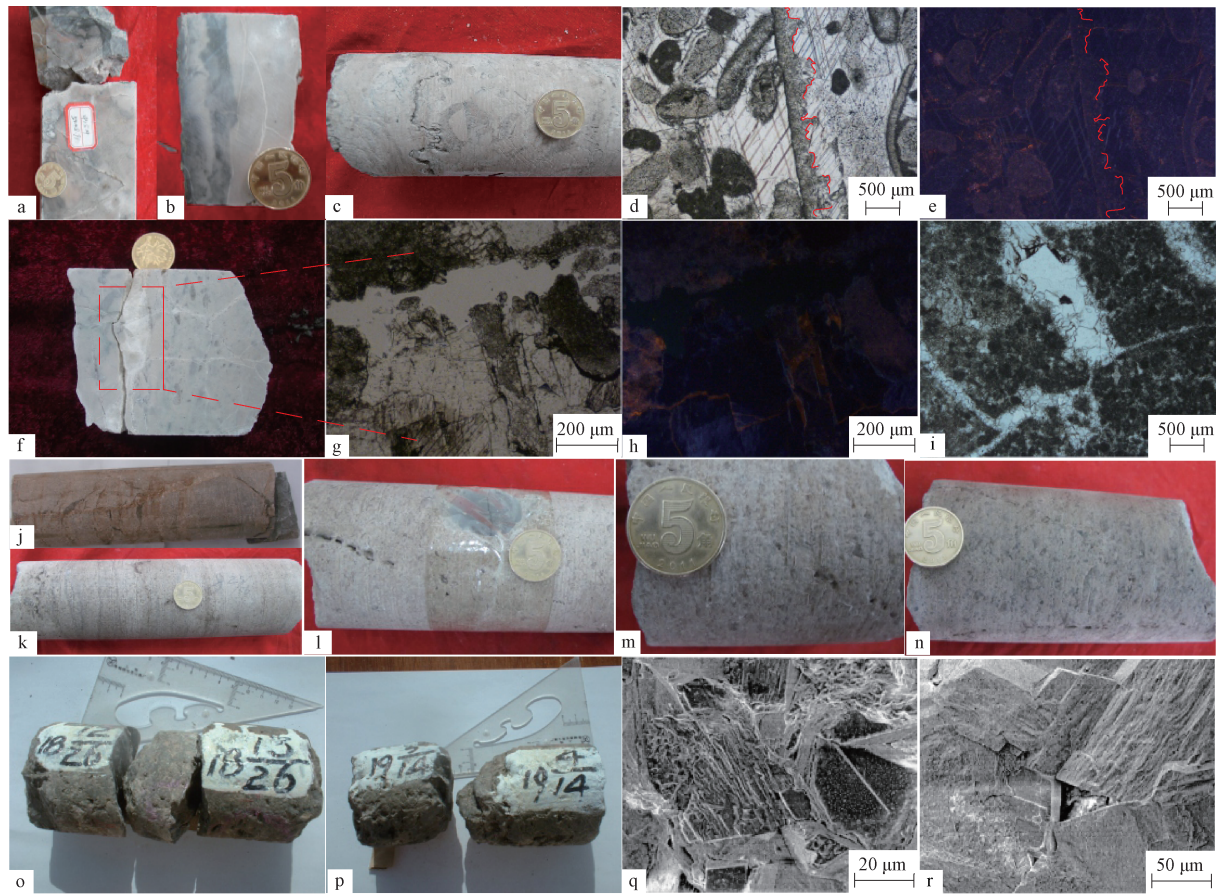


图 5 塔中西北部鹰山组大气水岩溶发育特征

Fig. 5 Meteoric karst evidences of Yingshan Formation in northwestern Tazhong area

a. 中 15 井,埋深 5 450 m,不整合面,界面上为含泥灰岩,下为泥晶灰岩;b. 中 19 井,埋深 5 470 m,不整合面,界面上为暗色含泥灰岩,下为泥晶灰岩;c. 中 20 井,埋深 5 493.2 m 浅灰色细晶灰岩,角砾岩化现象;d. 顺 7 井,埋深 6 879.66 m,亮晶生屑砂屑灰岩,连晶方解石胶结物,溶蚀边界清晰;e. 顺 7 井,埋深 6 879.66 m,阴极发光;f. 中 15 井,埋深 5 571.5 m,灰色泥晶灰岩,方解石全充填裂缝;g. 中 15 井,埋深 5 571.5 m,连晶方解石;h. 中 15 井,埋深 5 571.5 m,阴极发光;i. 顺 4 井,埋深 6 806.2 m,亮晶砂屑灰岩,多期次裂缝和扩溶裂缝被方解石胶结充填;j. 中 101 井,埋深 5 530.02 m,浅灰色云质泥晶砂屑灰岩,高角度裂缝被方解石胶结物充填,缝长 140 mm,缝宽 2~3 mm;k. 顺 7 井,埋深 6 877.45 m,沿着高角度裂缝扩溶特征;l. 顺 7 井,埋深 6 878.35 m,沿着高角度裂缝扩溶特征;m. 顺 7 井,埋深 6 881.52 m,沿着高角度裂缝扩溶特征;n. 顺 7 井,埋深 6 882.0 m,沿着高角度裂缝扩溶特征;o. 中 1 井,埋深 5 868.0 m,白云岩溶蚀孔洞段;p. 中 1 井,埋深 5 371.0 m,白云岩溶蚀孔洞段;q. 中 1 井,埋深 5 367.05 m,白云岩中细晶白云石晶体,表面可见溶蚀现象;r. 中 1 井,埋深 5 368.20 m,白云岩晶间孔见粘土矿物充填

表 2 塔中地区西北部鹰山组裂缝和孔洞方解石胶结物碳、氧、锶同位素分析测试结果

Table 2 Carbon, oxygen and strontium isotope values from fracture- and vug-filling calcites in Yingshan Formation in northwestern Tazhong area

样品编号	井名	取心回次	层位	深度/m	岩性	$\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})/\text{‰}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
C-01	顺 7 井	5-25/42	$\text{O}_{1-2}\gamma$	6 814.38	裂缝方解石	-1.14	-9.92	0.710 068
C-02	顺 7 井	6-41/90	$\text{O}_{1-2}\gamma$	6 845.80	孔洞方解石	0.13	-8.70	—
C-03	中 15 井	10-61/71	$\text{O}_{1-2}\gamma$	5 450.81	孔洞方解石	0.69	-6.85	—
C-04	中 15 井	13-6/62	$\text{O}_{1-2}\gamma$	5 571.50	裂缝方解石	1.68	-6.96	0.709 897
C-05			O		泥晶灰岩	1.12	-5.95	0.708 185

注:—表示没有测试数据。C-05 来自江茂生等(2002)对塔中奥陶系围岩测试数据平均值。

发现:①仅中 1 井、中 13 井和中 16 井紧贴不整合面分别发育了一套厚约 2.1 和 0.5 m 的孔洞段,其他单井孔洞发育程度较低;②裂缝和裂缝-孔洞为大气淡水岩溶储集体的主要类型;③高角度裂缝及其相关的溶蚀特征占主导,水平层状的溶蚀特征极为少见,仅出现

于中 1 井 5 369~5 371 m、中 13 井 5 432~5 434 m;④储层横向连续性强,主要分布在不整合面以下 0~60 m 范围的地层中。以上特征说明:中央断垒带鹰山组较为明显的垂向渗流特征。同时,裂缝对于大气淡水渗流的控制作用十分显著。然而,并没有识别出任何径

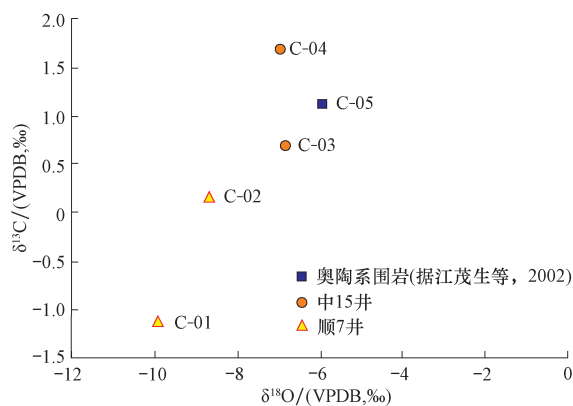


图6 塔中地区顺7井和中15井中-下奥陶统方解石胶结物碳、氧同位素投点图

Fig. 6 Cross-plot of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values of calcites in Lower-Middle Ordovician in S7 and Z15 wells in Tazhong area

流或者潜流的溶蚀迹象。

众所周知,岩溶具有垂向分带特征,以不同的角度认识这种分带性,其表述术语有所不同^[11,52]。按照水动力条件的不同,通常在岩溶剖面上,一个完整的岩溶旋回自上而下可以分为表层岩溶带、垂直渗滤带、水平径流带和深部潜流带。表层岩溶带在国外称为Epikarst^[53],即碳酸盐岩岩石浅层或表皮风化带,发育大量垂直的岩石节理、裂纹和裂隙,其深度从几米到几十米不等。它是蓄水、风化和渗流的子系统,往往通过竖井流与垂直渗滤带连通。因此,笔者认为中央断垒带以表层岩溶带为主体,其他分带结构缺失,为一套不完整的岩溶序列。

3.2.3 大气淡水岩溶储层横向分布

通常,岩溶储层在不同地貌单元中发育程度不同,且岩溶斜坡部位相对富集^[11]。为了进一步表征塔中西北部鹰山组表层岩溶带储层分布规律,基于三维地震资料,分别提取了卡1和顺西三维工区鹰山组不整合面以下0~10 ms平均绝对振幅属性,同时,基于残留厚度法($T_7^8 - T_7^4$)恢复了三维工区鹰山组古地貌,并将振幅属性与古地貌和断裂体系叠合(图8)。

卡1三维区鹰山组古地貌变化幅度在20 ms范围内,反映了较为平缓的地形起伏。其中,中1井—中12井—中20井控制的区域古地貌相对较高。实际上,这种地貌格局与塔中地区构造格局(图1)恰好吻合,卡1三维区整体处于中央断垒带平台区,因此古岩溶地貌在平面上的分异程度并不显著。

区内表层岩溶带储层主要呈“条带状”展布,东北部和东南部呈北西西向,中部和西部呈北北东向(图8a)。无论是中1井—中122井一线古地貌高部位,还是中11井—中19井一线古地貌低部位,储层发育程度差异极小。此外,条带状分布的岩溶储层与北西西和北北东向断裂的展布方向十分相符。

顺西三维工区鹰山组古地貌变化幅度较卡1三维区明显增大,在30~60 ms范围内。其中,顺4井—顺5井控制区域古地貌较高,顺6井—顺7井控制区域为古地貌低值区,反映了该区鹰山组暴露时期由台地向斜坡的过渡。该区断裂体系可以划分为北西西向加

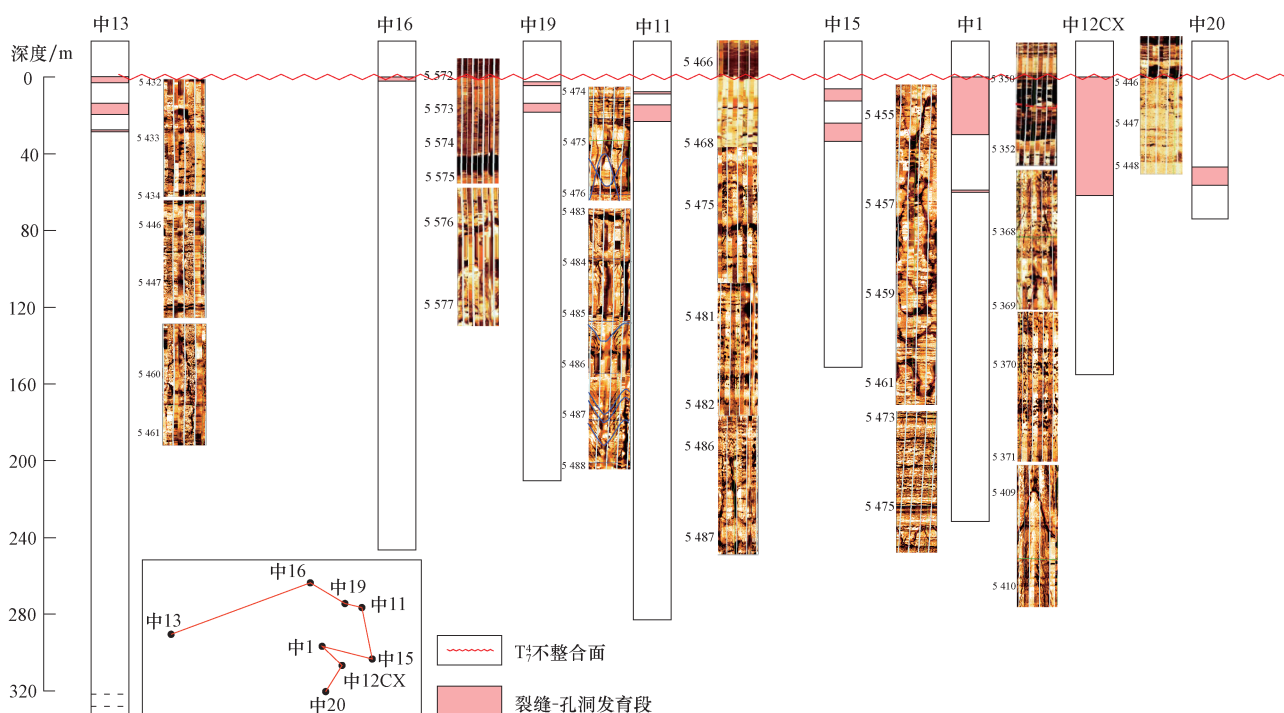


图7 塔中地区卡1三维区鹰山组不整合面附近裂缝-孔洞储层发育特征

Fig. 7 Correlation of fissure-vugs near the unconformity on the top of Yingshan Formation in Ka-1 Block in Tazhong area

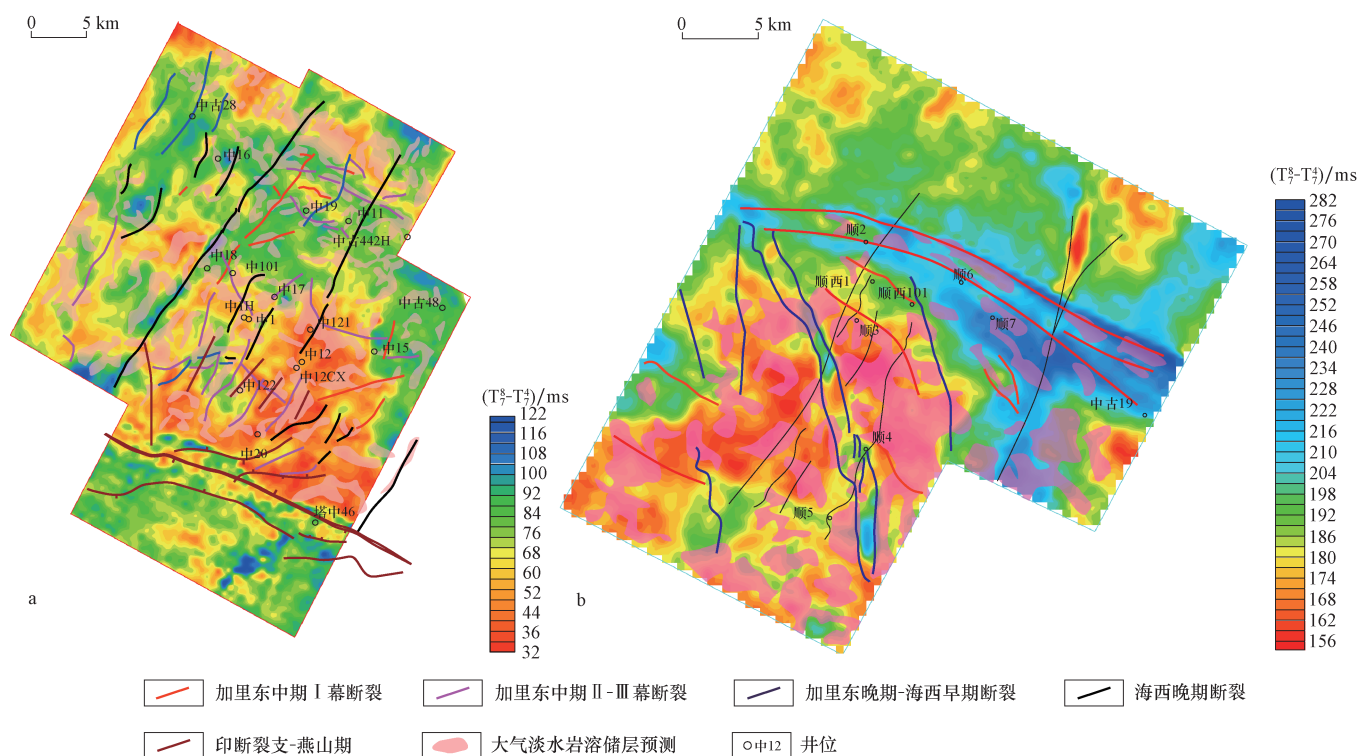


图8 塔中地区卡1(a)和顺西(b)三维区鹰山组0~10 ms平均绝对振幅与古地貌和断裂叠合图

Fig.8 Average absolute amplitude(0~10 ms) overlaid with paleomorphology and fault system in Ka-1(a) and Shunxi(b) Block in Tazhong area

里东中期断裂、北西向加里东中期-海西早期断裂和北北东向海西晚期等3期^[54]。

表层岩溶带储层呈“片状”和“条带状”展布,前者分布在工区中部和东南部,后者分布在工区东北部,呈北西西向(图8b)。与卡1三维区类似的是,岩溶储层在台地和斜坡上普遍分布,而斜坡带上“条带状”岩溶储层的展布方向与北西西向的断裂方向却正好一致,反映了北西西向断裂对岩溶的控制作用。

4 鹰山组岩溶作用模式

4.1 混合水岩溶模式

塔中西北部鹰山组仅在顺7井识别了一期较为强烈的混合水岩溶作用,且这种溶蚀特征主要发育和保存在第7~8回次的取心中,厚15 m(图9)。其中,第7回次为一套黄灰色亮晶砂屑灰岩-黄灰色油迹细晶砂屑灰岩段;第8回次为一套灰色油迹含砂屑灰岩-浅灰色微晶灰岩段(图10),是一套典型的砂屑滩沉积相。

顺7井第5回次为一套泥晶灰岩的低能相带沉积,岩心和薄片观察呈现的储集空间以方解石充填的高角度裂缝为主(图9),储层发育程度远不及第7~8回次,说明孔隙的发育位置受到岩性岩相的控制。此外,中奥陶世,顺7井处于塔中坡折带,具有先天的海岸带大气淡水-海水补给优势。因此,笔者认为该区

具备混合水岩溶作用发育的有利条件,同生期海岸带沉积的高能相带是储层发育的有利地区(图10)。

4.2 大气淡水岩溶模式

塔中西北部大气淡水岩溶储层表现出几个方面的特殊性:①以裂缝型和裂缝孔洞型储层为主导,而非孔洞型储层;②在全区分布极为普遍,集中发育于鹰山组浅层(0~60 m);③中央断垒带形成了一套以表层岩溶带为代表的完整的岩溶垂向序列;④岩溶储层在不同地貌部位的差异性并不显著,主要受控于北西西向和北北东向的断裂体系。因此,可以断定鹰山组暴露期大气淡水集中沿着裂缝向下渗流,并没有形成径流和潜流的排泄回路。

W. B. William 和 David C. Culver 明确指出^[10],岩溶地貌的幅度决定了岩溶水运动的样式和岩溶储层的发育特征。塔中西北部鹰山组处于中央断垒带和塔中北斜坡西北缘,岩溶古地貌平缓、地形起伏小,使得地表大气淡水流动的水力梯度较弱。因此,岩溶水的垂向侵蚀和溶解能力受到了极大制约。平面上普遍分布,纵向上地表和地下裂缝发育部位为岩溶水流动的优势通道,这是该区大气水岩溶储层体现出独特分布特征的本质原因。

Osborne 提出了岩溶挖掘及复活的理论^[55],认为岩溶发育的过程,实际上是岩溶挖掘(包括地貌瓦解)并向基准面逼近的过程。但是,岩溶向下挖掘在响应

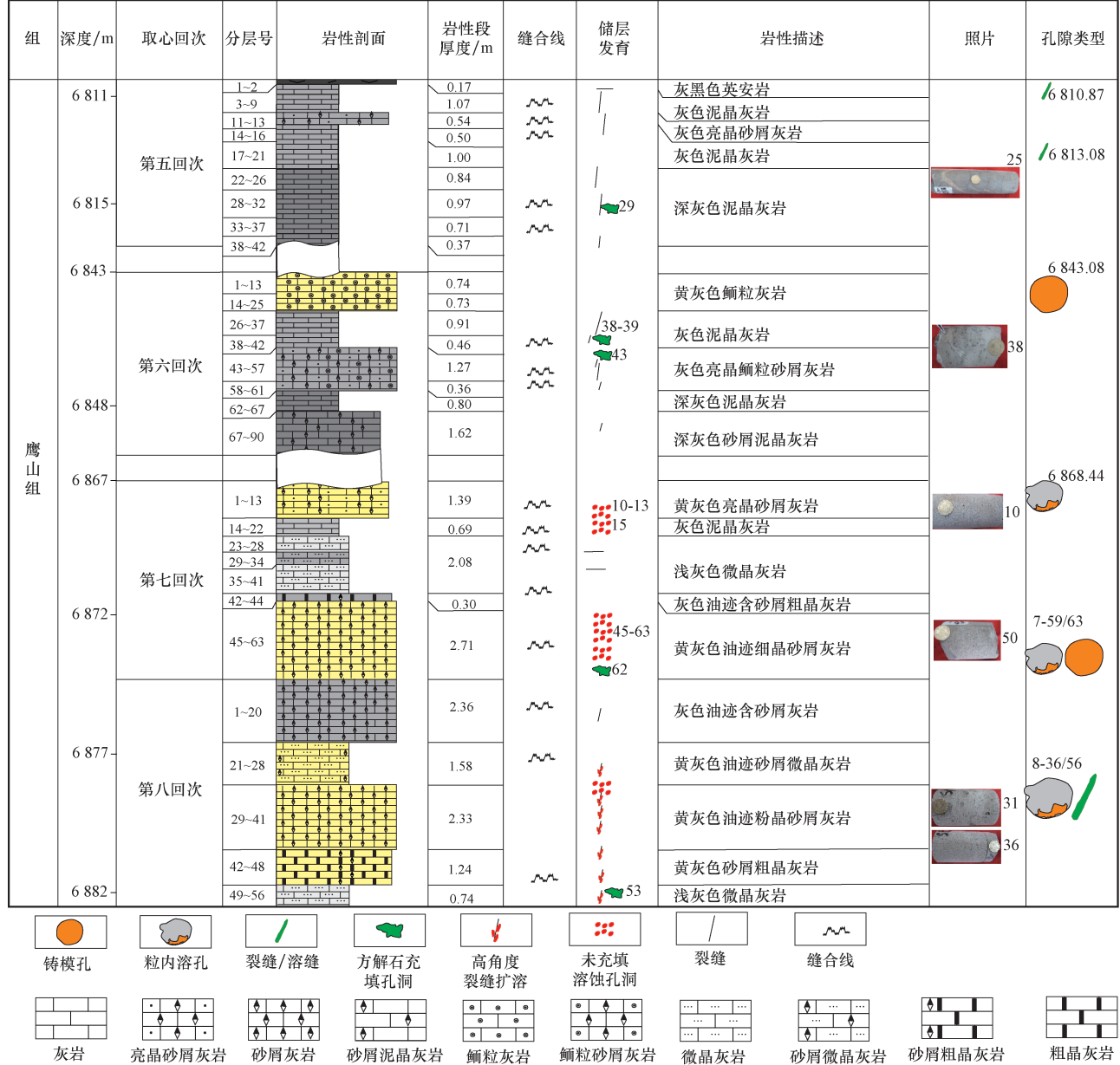


图 9 塔中地区顺 7 井鹰山组取心段岩性、储层和孔隙描述

Fig. 9 Lithology, reservoirs and pores description of cored intervals in Yingshan Formation of Shun-7 well in Tazhong area

排泄基准面变化的过程中具有滞后性。当排泄面不变时,这种滞后性会不断减小,最后达到理论基准面与实际基准面(岩溶挖掘面)重合。受到中-低幅度岩溶古地貌的制约,塔中西北部鹰山组大气水岩溶挖掘的滞后性并不强烈,甚至岩溶挖掘面与理论基准面趋于重合,形成了浅层开放系统下的“裂隙-渗流”型岩溶作用模式(图 10)。

5 结论

1) 塔中地区西北部鹰山组沉积之后即刻被抬升至地表,其暴露时期岩石尚未固结成岩,属于年轻的灰岩,岩化作用与岩溶作用是同期的,处于早期成岩阶段。

2) 塔中地区西北部鹰山组成岩早期的岩溶作用包括混合水岩溶和大气淡水岩溶两种基本类型,分别发育于鹰山组沉积期和暴露期。

3) 混合水岩溶是一期组构选择性的溶蚀作用,受到大气淡水和海水混合作用改造,主要集中在塔中西北部北坡折带顺 7 井鹰山组颗粒灰岩段。反映了海岸带高能相带控制的岩溶作用模式。

4) 大气淡水岩溶一期非组构选择性的溶蚀作用,全区分布十分普遍。岩溶储层以裂缝型和裂缝-孔洞型为主;岩溶垂向序列发育不完整,以表层岩溶带为主;在岩溶古地貌上的分异特征不显著,但与北西西向断裂体系密切相关。反映了低幅度地貌制约下的开放系统“裂隙-渗流”型岩溶作用模式。

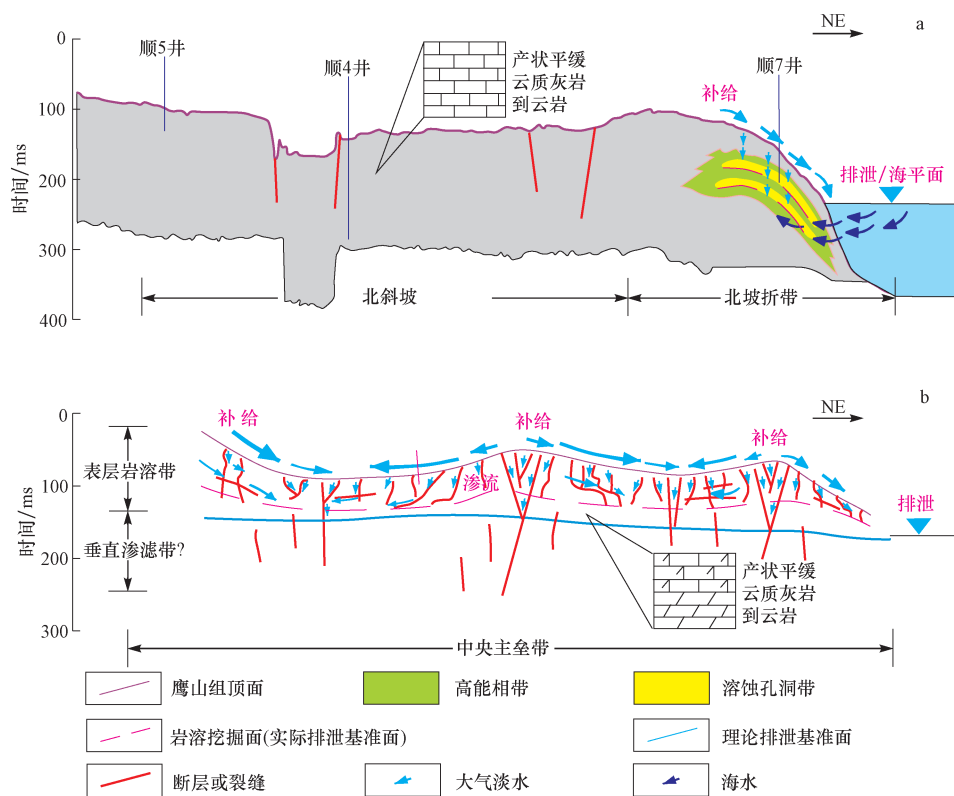


图10 塔中地区西北部鹰山组岩溶作用模式

Fig. 10 Karst development patterns of Yingshan Formation in northwestern Tazhong area

a. 中奥陶世(鹰山组沉积期)混合水岩溶模式;b. 中奥陶世末期(鹰山组暴露期)“裂隙-渗流”型大气淡水岩溶模式

参 考 文 献

- [1] Choquette P W, Pray L C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates [J]. AAPG Bulletin, 1970, 54 (2): 207-250.
- [2] Harris, P. M., S. H. Frost, G. A. Seglie, and N. Schneidermann. Regional unconformities and depositional cycles, Cretaceous of the Arabian peninsula [C]//J. S. Schlee, ed., Interregional Unconformities and Hydrocarbon Accumulation. AAPG Memoir 36, 1984: p. 67-80.
- [3] Fritz R D, Wilson J L, Yurewicz D A. Paleokarst related hydrocarbon reservoirs [M]. New Orleans: SEPM Core Workshop, 1993. No. 18.
- [4] Saller A H, Budd D A, Harris P M. Unconformities and porosity development in carbonate strata: Ideas from a Hedberg Conference [J]. AAPG bulletin, 1994, 78 (6): 857-872.
- [5] Ford, D. C., and Williams, P. W. Karst hydrogeology and geomorphology [M]. Chichester, Wiley, 2007, 562 p.
- [6] Klimchouk A. Morphogenesis of hypogenic caves [J]. Geomorphology, 2009, 106 (1): 100-117.
- [7] 贾振远, 蔡忠贤. 碳酸盐岩古风化壳储集层(体)研究 [J]. 地质科技情报, 2004, 23 (4): 94-104.
Jia Zhenyuan, Cai Zhongxian. Carbonate paleo-weathered crust reservoirs (Body) [J]. Geological Science and Technology Information, 2004, 23 (4): 94-104.
- [8] 王宏斌, 张虎权, 孙东, 等. 风化壳岩溶储层地质-地震综合预测技术与应用——以塔中北部斜坡带下奥陶统为例 [J]. 天然气地球科学, 2009, 20 (1): 131-137.
Wang Hongbin, Zhang Huquan, Sun Dong, et al. Application of integrated seismic-geology prediction techniques to weathering crust karst reservoir——An example from Lower Ordovician, Northern Slope of Tazhong area [J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20 (1): 131-137.
- [9] 马庆佑, 沙旭光, 李宗杰, 等. 塔里木盆地塔中北围斜中下奥陶统顶部暴露剥蚀的证据探讨 [J]. 石油实验地质, 2013, 35 (5): 500-504.
Ma Qingyou, Sha Xuguang, Li Zongjie, et al. Evidence of exposure erosion of Lower-Middle Ordovician top in Beiweixie region, middle Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35 (5): 500-504.
- [10] William K. J., William B. W. Karst [C]//White W. B. and Culver D. C., Encyclopedia of Caves. Academic Press, 2012: 430-438.
- [11] 杨海军, 韩剑发, 孙崇浩, 等. 塔中北斜坡奥陶系鹰山组岩溶型储层发育模式与油气勘探 [J]. 石油学报, 2011, 32 (2): 199-205.
Yang Haijun, Han Jianfa, Sun Chonghao et al. A development model and petroleum exploration of karst reservoirs of Ordovician Yingshan Formation in the northern slope of Tazhong palaeouplift [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32 (2): 199-205.
- [12] 任丽丹, 王保才, 刘军. 频率衰减梯度属性在塔中卡塔克1区块储层预测中的应用 [J]. 石油天然气学报, 2013, 34 (12): 59-63.
Ren Lidan, Wang Baocai, Liu Jun. Application of frequency attenuation gradient in reservoir prediction in block Kartake 1 of Tazhong area [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 34 (12): 59-63.
- [13] 王铁冠, 宋到福, 李美俊, 等. 塔里木盆地顺南-古城地区奥陶系鹰山组天然气气源与深层天然气勘探前景 [J]. 石油与天然气地质, 2014, 35 (6): 753-762.
Wang Tieguan, Song Daofu, Li Meijun, et al. Natural gas source and deep gas exploration potential of the Ordovician Yingshan Formation in the Shunnan-Gucheng region, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35 (6): 753-762.
- [14] 云露, 曹自成. 塔里木盆地顺南地区奥陶系油气富集与勘探潜力 [J]. 石油与天然气地质, 2014, 35 (6): 788-797.
Yun Lu, Cao Zicheng. Hydrocarbon enrichment pattern and exploration

- tion potential of the Ordovician in Shunnan area, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(6): 788–797.
- [15] 冯仁蔚, 欧阳诚, 庞艳君, 等. 层间风化壳岩溶发育演化模式——以塔中川庆 EPCC 区块奥陶系鹰一段—鹰二段为例[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(1): 45–54.
- Feng Renwei, Ouyang Cheng, Pang Yanjun, et al. Evolution modes of interbedded weathering crust karst: A case study of the 1st and 2nd members of Ordovician Yingshan Formation in EPCC block, Tazhong, Tarim Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(1): 45–54.
- [16] 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. Paleotopographic characterization and reconstruction of karst reservoirs in Yingshan Formation, Tazhong area, Tarim Basin: a research based on borehole image log interpretation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(2): 265–275, 293.
- [17] 耿晓洁, 林畅松, 韩剑发, 等. 塔中北斜坡中下奥陶统鹰山组岩溶储层成像测井相精细研究[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(2): 229–240.
- Geng Xiaojie, Lin Changsong, Han Jianfa, et al. FMI facies research in the karst reservoir of the Middle-Lower Ordovician Yingshan Formation in the northern slope of Tazhong area[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(2): 229–240.
- [18] 罗亚男, 罗新生, 张云峰, 等. 塔中北斜坡下奥陶统鹰山组热液岩溶特征及发育模式[J]. *重庆科技学院学报: 自然科学版*, 2012(3): 19–22.
- Luo Yanan, Luo Xinsheng, Zhang Yunfeng, et al. The Hydrothermal karst characteristics and developmental mode of Yingshan Formation of Lower-Ordovician of north slope of Tazhong [J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition)*, 2012(3): 19–22.
- [19] 孙崇浩, 于红枫, 王怀盛, 等. 塔里木盆地塔中地区奥陶系鹰山组碳酸盐岩孔洞发育规律研究[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(2): 230–236.
- Sun Chonghao, Yu Hongfeng, Wang Huaisheng, et al. Vugular formation of carbonates in Ordovician Yingshan reservoir in Tazhong northern slope of Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(2): 230–236.
- [20] 吉云刚, 韩剑发, 张正红, 等. 塔里木盆地塔中北斜坡奥陶系鹰山组深部优质岩溶储层的形成与分布[J]. *地质学报*, 2012, 86(7): 1163–1174.
- Ji Yungang, Han Jianfa, Zhang Zhenghong, et al. Formation and distribution of deep high quality reservoirs of Ordovician Yingshan Formation in the northern slope of the Tazhong area in Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(7): 1163–1174.
- [21] 郑剑, 王振宇, 杨海军, 等. 塔中地区奥陶系鹰山组埋藏岩溶期次及其对储层的贡献[J]. *现代地质*, 2015, 29(3): 665–674.
- Zheng Jian, Wang Zhenyu, Yang Haijun, et al. Buried karstification period and contribution to reservoirs of Ordovician Yingshan Formation in Tazhong area[J]. *Geoscience*, 2015, 29(3): 665–674.
- [22] 朱东亚, 金之钧, 胡文瑄. 塔中地区热液改造型白云岩储层[J]. *石油学报*, 2009, 30(5): 698–704.
- Zhu Dongya, Jin Zhijun, Hu Wenxuan. Hydrothermal alteration dolomite reservoir in Tazhong area [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(5): 698–704.
- [23] 李鹏春, 陈广浩, 曾乔松, 等. 塔里木盆地塔中地区下奥陶统白云岩成因①[J]. *沉积学报*, 2011, 29(5): 842–856.
- Li Pengchun, Chen Guanghao, Zeng Qiaosong, et al. Genesis of Lower Ordovician dolomite in central Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(5): 842–856.
- [24] 郑兴平, 刘永福, 张杰, 等. 塔里木盆地塔中隆起北坡鹰山组白云岩储层特征与成因[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(2): 157–161.
- Zheng Xingping, Liu Yongfu, Zhang Jie, et al. Characteristics and origin of dolomite reservoirs in Lower Ordovician Yingshan Formation, northern slope of Tazhong uplift, Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(2): 157–161.
- [25] 韩俊, 吕海涛, 曹自成, 等. 塔中北坡奥陶系鹰山组热液改造型储层特征及发育模式[J]. *石油实验地质*, 2014, 36(增刊1): 18–25.
- Han Jun, Lv Haitao, Cao Zicheng, et al. Characteristics and development model of hydrothermal alteration reservoir of Ordovician Yingshan Formation in northern slope of central Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(Sup. 1): 18–25.
- [26] 李映涛, 叶宁, 袁晓宇, 等. 塔里木盆地顺南4井中硅化热液的地质与地球化学特征[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(6): 934–944.
- Li Yingtao, Ye Ning, Yuan Xiaoyu, et al. Geological and geochemical characteristics of silicified hydrothermal fluids in Well Shunnan 4, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(6): 934–944.
- [27] 陈红汉, 鲁子野, 曹自成, 等. 塔里木盆地塔中地区北坡奥陶系热液蚀变作用[J]. *石油学报*, 2016, 37(1): 43–63.
- Chen Honghan, Lu Ziye, Cao Zicheng, et al. Hydrothermal alteration of Ordovician reservoir in northeastern slope of Tazhong uplift, Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(1): 43–63.
- [28] Meyers W. J. Paleokarstic features in Mississippian limestones, New Mexico [C]// James, Noel P., and Philip W. Choquette, eds. *Paleokarst*. Springer New York, 1988: 306–328.
- [29] Esteban M. Paleokarst: Practical Applications [C]// Wright V P, Esteban M, Smart P L(eds). *Paleokarsts and paleokarstic reservoirs*. P. R. I. S. Occasional Publication Series 2, 1991: 89–119.
- [30] Vacher, H. L., Mylroie, J. E. Eogenetic Karst from the Perspective of an Equivalent Porous Medium. *Carbonates and Evaporites*, 2002, 17: 182–196.
- [31] Ken G. Grimes. Syngenetic Karst in Australia: a review. *Helictite*, 2006, 39: 27–38.
- [32] Moore P J. Controls on the generation of secondary porosity in eogenetic karst: examples from San Salvador Island, Bahamas and north-central Florida, USA [D]. University of Florida, 2009.
- [33] 闫相宾, 李铁军, 张涛, 等. 塔中与塔河地区奥陶系岩溶储层形成条件的差异[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(2): 202–207.
- Yan Xiangbin, Li Tiejun, Zhang Tao, et al. Differences between formation conditions of Ordovician karstic reservoirs in Tazhong and Tahe Areas[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(2): 202–207.
- [34] 袁圣强, 贾承造, 高日胜, 等. 塔中北斜坡中—下奥陶统碳酸盐岩沉积储层特征及地质模式[J]. *石油学报*, 2012, 33(增刊1): 80–88.
- Yuan Shengqiang, Jia Chengzao, Gao Risheng, et al. Sedimentation characteristics and reservoir geological model of Mid-Lower Ordovician carbonate rock in Tazhong northern slope[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(S. 1): 80–88.
- [35] 丁长辉, 周红波, 路鹏程, 等. 塔中低凸起古生界构造特征及演化[J]. *大地构造与成矿学*, 2009, 33(1): 148–153.
- Ding Changhui, Zhou Hongbo, Lu Pengcheng, et al. The Paleozoic structural features and its evolution in the Tazhong Low Uplift, Xinjiang[J]. *Geotectonica ET Metallogenia*, 2009, 33(1): 148–153.
- [36] 左璠璠, 林畅松, 高达, 等. 塔中地区西北部良里塔格组沉积特征

- 及其演化规律[J]. 现代地质, 2014, 28(5): 1008 – 1016.
- Zuo Fanfan, Lin Changsong, Gao Da, et al. Sedimentary characteristics and their evolution of Lianglitage Formation in northwestern Tazhong area[J]. Geoscience, 2014, 28(5): 1008 – 1016.
- [37] 钱一雄, Taberner, C., 邹森林, 等. 碳酸盐岩表生岩溶与埋藏溶蚀比较——以塔北和塔中地区为例[J]. 海相油气地质, 2007, 12(2): 1 – 7.
- Qian Yixiong, Taberner, C., Zou Senlin, et al. Diagenesis comparison between Epigenetic karstification and burial dissolution in carbonate reservoirs: An instance of Ordovician carbonate reservoirs in Tabei and Tazhong regions, Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2007, 12(2): 1 – 7.
- [38] 严威, 王兴志, 张廷山, 等. 塔河油田加里东中期第Ⅲ幕岩溶作用[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 411 – 416.
- Yan Wei, Wang Xingzhi, Zhang Tingshan, et al. Investigations of the Karst during the Episode III of the Mid-Caledonian in the Tahe Oil-field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 411 – 416.
- [39] 王振宇, 李宇平, 陈景山, 等. 塔中地区中-晚奥陶世碳酸盐陆棚边缘大气成岩透镜体的发育特征[J]. 地质科学, 2002, 37: 152 – 160.
- Wang Zhenyu, Li Yuping, Chen Jingshan, et al. Characters of atmospheric diagenetic lens along Middle-Late Ordovician carbonate shelf margin in central Tarim area[J]. Chinese Journal of Geology, 2002, 37: 152 – 160.
- [40] 鲍志东, 金之钧, 孙龙德, 等. 塔里木地区早古生代海平面波动特征: 来自地球化学及岩溶的证据. 地质学报, 2006, 80(3): 366 – 373.
- Bao Zhidong, Jin Zhijun, Sun Longde, et al. Sea-Level Fluctuation of the Tarim Area in the Early Paleozoic Respondence from Geochemistry and Karst[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(3): 366 – 373.
- [41] 李慧莉, 钱一雄, 沙旭光, 等. 塔里木盆地卡塔克隆起西北倾没端良里塔格组碳酸盐岩储层发育特征与影响因素[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 69 – 75.
- Li Huili, Qian Yixiong, Sha Xuguang, et al. Development characteristics and influencing factors of carbonate reservoirs in the Ordovician Lianglitage Formation at the northwest pitching end of the Katake Uplift, the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 69 – 75.
- [42] 屈海洲, 王振宇, 杨海军, 等. 礁滩相碳酸盐岩岩溶作用及其对孔隙分布的控制——以塔中东部上奥陶统良里塔格组为例[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(5): 552 – 558.
- Qu Haizhou, Wang Zhenyu, Yang Haijun, et al. Karstification of reef-bank facies carbonate rock and its control on pore distribution: A case study of Upper Ordovician Lianglitage Formation in eastern Tazhong area, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(5): 552 – 558.
- [43] 谭秀成, 肖笛, 陈景山, 等. 早成岩期喀斯特化研究新进展及意义[J]. 古地理学报, 2015, 17(4): 441 – 456.
- Tan Xiucheng, Xiao Di, Chen Jingshan, et al. New advance and enlightenment of eogenetic karstification[J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(4): 441 – 456.
- [44] Mylroie J E, Carew J L. The flank margin model for dissolution cave development in carbonate platforms[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1990, 15(5): 413 – 424.
- [45] Smart P L, Beddows P A, Coke J, et al. Cave development on the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula, Quintana Roo, Mexico [C]// Harmon R S, Wicks C (eds.). Perspectives on Karst Geomorphology, Hydrology and Geochemistry. Geological Society of America Special Papers, 404, 2006: 105 – 128.
- [46] Baceta J I, Wright V P, Beavington-Penney S J, et al. Palaeohydrogeological control of palaeokarst macro-porosity genesis during a major sea-level lowstand: Danian of the Urbasa-Andia plateau, Navarra, North Spain [J]. Sedimentary Geology, 2007, 199(3): 141 – 169.
- [47] 王振宇, 李凌, 谭秀成, 等. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩古岩溶类型识别[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008, 30(5): 11 – 16.
- Wang Zhenyu, Li Ling, Tan Xiucheng, et al. Types and recognizable indicators of Ordovician carbonate rock karstification in Tarim Basin [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008, 30(5): 11 – 16.
- [48] Barnett A J, Wright V P, Chandra V S, et al. Distinguishing between eogenetic, unconformity-related and mesogenetic dissolution: A case study from the Panna and Mukta fields, offshore Mumbai, India [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2015, 435: SP435. 12.
- [49] 江茂生, 朱井泉, 陈代钊, 等. 塔里木盆地奥陶纪碳酸盐岩碳、锶同位素特征及其对海平面变化的响应[J]. 中国科学: D 辑, 2002, 32(1): 36 – 42.
- Jiang, Maosheng, Zhu, Jingquan, Chen Daizhao, et al. Carbon and strontium isotope variations and responses to sea-level fluctuations in the Ordovician of the Tarim Basin [J]. ScienceChina Series D-Earth Science, 2002, 32(1): 36 – 42.
- [50] 刘存草, 李国蓉, 朱传玲, 等. 塔河油田中下奥陶统岩溶缝洞方解石碳、氧、锶同位素地球化学特征[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2008, 33(3): 377 – 384.
- Liu Cunge, Li Guorong, Zhu Chuanling, et al. Geochemistry characteristics of carbon, oxygen and strontium isotopes of calcites filled in karstic fissure-cave in Lower-Middle Ordovician of Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2008, 33(3): 377 – 384.
- [51] Veizer J, Ala D, Azmy K, et al. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ evolution of Phanerozoic seawater [J]. Chemical Geology, 1999, 161(1): 59 – 88.
- [52] 任美镔, 刘振中, 王飞燕, 等. 岩溶学概论 [M]. 北京: 商务印书馆, 1983.
- Ren Meie, Liu Zhenzhong, Wang Feiyan, et al. Introduction to karstology [M]. Beijing: The Commercial Press, 1983.
- [53] Klimchouk, A. B. Towards defining, delimiting and classifying epikarst: Its origin, processes and variants of geomorphic evolution [C]//W. K. Jones, D. C. Culver & J. S. Herman (Eds.), Epikarst. Leesburg, VA: Karst Water Institute Special Publication, 2004: 23 – 35.
- [54] 马中远, 黄苇, 任丽丹, 等. 顺西地区良里塔格组裂缝特征及石油地质意义[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2014, 36(2): 1 – 10.
- Ma Zhongyuan, Huang Wei, Ren Lidian, et al. Fracture characteristics and petroleum geological significance of fractures of Lianglitage Formation in Shunxi area [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2014, 36(2): 1 – 10.
- [55] Osborne R A L. Paleokarst: cessation and rebirth? [J]. Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, 2003, 1(2): 1 – 11.

(编辑 张玉银)