

深层碳酸盐岩差异成岩作用对油气分层聚集的影响

——以塔里木盆地塔中隆起北斜坡鹰山组为例

吕修祥^{1,2}, 陈佩佩^{1,2}, 陈坤^{1,2}, 张杰³, 钱文文^{1,2}[1. 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;
中国石油塔里木油田研究院, 新疆 库尔勒 841000]

摘要:塔中隆起北斜坡鹰山组碳酸盐岩厚度大、埋藏深,经历了多期、多种成岩作用改造。基于岩心和岩石薄片观察、测井资料解释及地震属性反演识别裂缝,结合录井和试油资料统计分析,发现鹰山组岩溶储集层段经历了多期溶蚀作用和构造破裂作用,储集空间建设性改造强烈,相对应的胶结-充填作用相对较弱;相邻致密段的形成主要源于强烈的胶结作用和充填作用,而相对应的溶蚀作用明显偏弱,该段的电阻率明显高于相邻储集层段,故称为“高阻层”,构成识别致密层的重要标志。相邻碳酸盐岩储集层段与致密层段在成岩作用方面存在着显著的差异,正是差异成岩作用导致了厚层碳酸盐岩内幕多套储-盖组合的形成。垂向上多个缝洞发育段(储集层)与致密段(盖层)间互,形成叠置分布的多套储-盖组合,由此导致厚层碳酸盐岩内幕发育多个含油气层段。横向上,受制于碳酸盐岩的非均质性以及走滑断裂的分割作用,岩溶储集层段及致密高阻层延展性受到制约。因此,鹰山组油气分布不仅具有纵向分层,同时具有横向分区的特点。

关键词:差异成岩作用;致密段(高阻层);碳酸盐岩;鹰山组;塔中隆起北斜坡;塔里木盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Effects of differential diagenesis of deep carbonate rocks on hydrocarbon zonation and accumulation: A case study of Yingshan Formation on northern slope of Tazhong uplift, Tarim Basin

Lyu Xiuxiang^{1,2}, Chen Peipei^{1,2}, Chen Kun^{1,2}, Zhang Jie³, Qian Wenwen^{1,2}[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;
2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;
3. Research Institute of Tarim Oilfield Company Ltd., PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China]

Abstract: The carbonate rock reservoir on the northern slope of Yingshan Formation, Tazhong uplift, has undergone multi-stage diagenetic modifications of various kinds, featuring large thickness and deep burial depth. Based on the observation of core and thin section, the interpretation of well-logging data and the fracture identification by seismic attribute inversion, combined with the statistical analysis of logging and formation testing data, we found that the karst reservoir of the Yingshan Formation has gone through multistage dissolution and tectonic fracturing, and the reservoir space has experienced intensive, constructive rework, while the destructive cementation-filling is relatively weak. In comparison, the adjacent tight interval is mainly caused by intensive cementation and filling, and because the interval is remarkably weak in dissolution, its electric resistivity is significantly higher than that of adjacent reservoir intervals. So it is called “high-resistivity interval”, a diagnostic character to identify tight layers. There are significant differences in diagenesis between the carbonate reservoirs and its adjacent tight caprocks. It is the differential diagenesis that results in the formation of multiple reservoir-caprock assemblages inside thick-bedded carbonate units. Vertically, multiple fracture-cavity sections (reservoir) alternate with tight sections (caprocks), having formed multiple superimposing reservoir-caprock assemblages. This has led to multiple hydrocarbon-bearing zones in the thick-bedded carbonate unit. Horizontally, due to the heterogeneity of

收稿日期:2018-08-14;修订日期:2019-05-27。

第一作者简介:吕修祥(1963—),男,教授、博士生导师,油气藏形成机理与分布规律。E-mail:luxx@cup.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41572100);国家油气重大专项(2017ZX05008-03,2017ZX05005-02)。

carbonate rocks and the segmentation of strike-slip faults, the distribution of both karst reservoirs and tight high-resistivity caprock is restricted, leading to the hydrocarbon accumulation pattern in the Yingshan Formation characterized by vertical zonation and lateral compartmentalization.

Key words: differential diagenesis, tight layer (high-resistivity interval), carbonate rock, Yingshan Formation, northern slope of Tazhong uplift, Tarim Basin

自1989年在塔里木盆地开展大规模油气勘探会战以来,塔中隆起奥陶系海相碳酸盐岩的勘探经历了三个认识阶段,即受构造高点控制的潜山块状油气藏、受礁滩储层控制的岩性油气藏、受碳酸盐岩内幕岩溶储层控制的准层状油气藏^[1-5]。其中碳酸盐岩内幕岩溶储层分布范围广、发现储量区块多、也是近期增储上产的主要领域^[6-7]。但其油气水分布关系极为复杂:同一口井,含油、含气层之上有含水层;同一储集层段,相邻的几口井,油气井之间有含水井。这些事实说明在厚层鹰山组碳酸盐岩内幕发育多套储盖组合,导致多个含油、气、水层在纵向上叠置;同时,鉴于碳酸盐岩非均质性强,储集层、致密段盖层横向延展性差,碳酸盐岩内幕多套储盖组合在横向上发生渐变,致使油、气、水层在空间分布上看起来十分复杂^[8-13]。因此,研究厚层碳酸盐岩内幕储盖组合形成的控制因素,有助于准确认识巨厚碳酸盐岩内幕油气聚集规律,为碳酸盐岩勘探选区、选层提供参考。

本文以塔中隆起北斜坡奥陶系鹰山组为研究对象,通过钻井岩心及岩石薄片观察、地震属性裂缝识别、测井资料解释、岩石样品突破压力测试、录井及测

试数据统计分析,研究鹰山组内幕碳酸盐岩的成岩作用及其差异性,研究岩溶储集层段、致密层段(即高电阻层,为局部盖层,双侧向电阻率曲线上表现出典型的高阻值)对成岩作用的响应特征,分析不同成岩作用对岩溶储层与致密盖层分异产生的控制作用,开展储层、内部高阻层封闭能力的评价,分析油气分层聚集、分区聚集的特点及控制因素。

1 区域地质背景

塔中隆起位于塔里木盆地中部,是一个比较完整的由许多次级构造带组成的大型台背斜构造,走向北西西,在现今构造上呈现东高西低之势^[14]。塔中隆起北斜坡奥陶系鹰山组发育斜坡相、台地边缘相和开阔台地相^[15]。鹰山组沉积后遭受过抬升剥蚀,现今埋深主体在5 000~6 900 m。主要钻遇的地层是鹰山组一段(鹰一段)和鹰山组二段(鹰二段)(图1a),在鹰二段至鹰一段沉积时期,沉积环境水体能量向上逐渐增强,其中鹰一段沉积晚期是滩体形成的主要时期,以中高能相砂屑滩为主^[16-18]。鹰二段可细分为3个亚段,

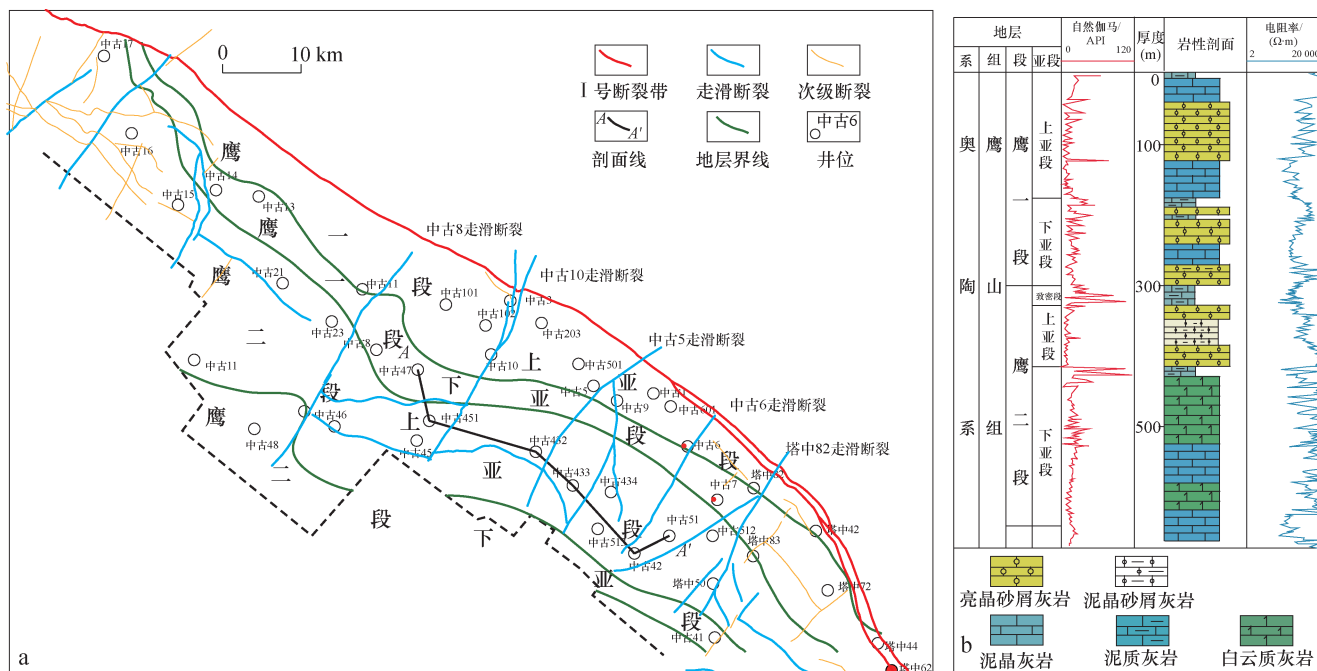


图1 塔中隆起北斜坡地质结构与鹰山组岩性分段

Fig. 1 The geological structure of the northern slope of the Tazhong uplift and the lithologic segmentation of the Yingshan Formation

自下而上依次为:鹰二下亚段、鹰二上亚段和致密灰岩段(图1b)。鹰二下亚段岩性主要为泥晶灰岩、泥晶砂屑灰岩和白云质灰岩^[19],鹰二上亚段主要发育泥晶灰岩、泥晶砂屑灰岩和亮晶砂屑灰岩,顶部致密灰岩段主要发育泥质灰岩、泥晶灰岩。鹰一段可细分为2个亚段,自下而上分别为:鹰一下亚段、鹰一上亚段。鹰一下亚段岩性为泥晶砂屑灰岩,中间夹厚层状泥晶灰岩,下部发育灰质白云岩;鹰一上亚段岩性主要为泥晶灰岩,含泥晶砂屑灰岩。鹰山组沉积后经历了长达10 Ma的抬升剥蚀^[20],剥蚀厚度达400~600 m^[21-22],使北斜坡鹰一段和鹰二段残余厚度在30~360 m,平均厚度180 m。长期暴露风化剥蚀形成的古岩溶是储层发育的有利勘探层位^[23]。

2 鹰山组主要成岩作用对储/盖层形成的影响

塔中隆起在鹰山组沉积之后经历了抬升剥蚀过程,在漫长的地质历史时期,鹰山组碳酸盐岩经历了多种成岩作用的改造,包括胶结-充填作用、溶蚀作用、热液白云岩化以及构造破裂作用等^[24-26]。岩溶作用对深层鹰山组碳酸盐岩储层的形成至关重要,鹰山组从沉积初期的表生岩溶到沉积之后抬升出露地表的喀斯特化^[27]、再到深埋溶蚀^[28-29],为形成孔洞型储层发挥了关键性作用。从流体来源看,有沉积时期的海水、出露地表时期的大气淡水,也有埋藏时期的深部热液,深部热液不仅对母岩产生溶蚀作用^[30-31],同时形成热液白云岩^[32-34],极大地改善了鹰山组的储集性能。由于碳酸盐岩的非均质性,鹰山组内部胶结作用强而溶蚀作用弱的部分层段相对致密,构成了岩溶储层的直接盖层^[35-36]。

2.1 岩溶作用对储集层的建设性改造

鹰山组自沉积后便开始经历同生岩溶作用,在成岩作用后,被抬升到暴露地表接受大气淡水淋滤的鹰山组内幕岩溶,溶蚀强度受到加里东构造旋回幕次中的古隆起、海平面下降^[37-39]、大气降水量、碳酸盐岩出露地表规模及古地貌起伏的控制;在埋藏后,埋藏岩溶与热液岩溶对碳酸盐岩进行改造,溶蚀强度受到富含有机酸、CO₂、H₂S等酸性地层水、热液流体的供给、酸性流体运移通道及遮挡层的控制,加上鹰山组东西埋藏深度差近2 000 m,使得埋藏岩溶差异更大^[40-42]。针对鹰山组各亚段储层及东西向不同区块典型井的分析,发现各种岩溶作用对鹰山组碳酸盐岩岩溶储集层

的形成具有明显的建设性改造作用,主要体现在岩心上溶蚀孔洞发育、钻进过程中有泥浆漏失。

按照孔隙度、渗透率的大小,将塔中地区碳酸盐岩储层分为三级,鹰一段储层以Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类相互叠置组合而成,而鹰二段储层评价以Ⅲ类为主,鹰一段储层评价明显好于鹰二段(图2)。从出露地层分布看,内幕岩溶的差异是影响鹰一段与鹰二段储层物性差异的重要因素:在塔中隆升剥蚀阶段,鹰二上亚段更靠近塔中10号构造带,主要是岩溶高地与溶峰古地貌,受岩溶分带性影响,主要发育表层岩溶带、垂向渗滤带,因此内幕岩溶溶蚀鹰二上亚段,以形成小型溶洞与溶孔为主,中古42井5 547.6 m处岩心观察,岩性为含砾砂屑灰岩,缝合线发育,未见大型溶孔或溶洞(图2p);而鹰一段下亚段所处岩溶古地貌在岩溶斜坡,除了发育表层岩溶带、垂向渗滤带以外,更加发育径流岩溶带,因此内幕岩溶溶蚀强度较鹰二段上亚段大,在鹰一段下亚段溶蚀形成两套大型缝洞系统,如中古9井6 241.5~6 427.7 m深度处可见溶蚀孔洞和高角度裂缝(图2a—c),6 431.0 m深度处更见大型溶洞发育(图2d),中古111井6 105.06~6 109.4 m深度处可见大型溶蚀洞穴及高角度裂缝(图2e—g)。内幕岩溶形成的缝洞是鹰山组优势储层发育的基础,更加有利于后期的次生溶蚀改造,因此内幕岩溶差异使得鹰一下亚段储层相较于鹰二上亚段储层发育厚度更大,储层物性更好。

内幕岩溶形成的溶洞在埋藏后坍塌,继而被充填和胶结后成为物性较差的Ⅱ类或Ⅲ类储层,如果没有后期的埋藏岩溶,鹰山组仅靠内幕岩溶难以成为Ⅰ类优质储层。如中古9井埋深6 431.0 m的溶洞因被方解石充填-半充填而变为Ⅱ类储层(图2d),埋深6 241.5~6 249.29 m处因被方解石完全充填,后被构造裂缝与压溶缝改造而变为Ⅲ类储层(图2h,j),在胶结作用更强的鹰二段,先期内幕岩溶形成的缝洞储层甚至因胶结作用成为致密的高阻层。

塔中发育多期次、不同规模的埋藏岩溶作用,来自下古生界富含有机酸、H₂S、CO₂、F⁻、Cl⁻、HCO₃⁻的酸性地层水沿着深大断裂与走滑断裂交汇处进入鹰山组后,一方面会优先进入早期内幕岩溶的缝洞体系,对储层进行溶蚀改造形成优质储层^[40]。埋藏岩溶溶蚀强度差异影响着内幕岩溶形成的孔洞的二次溶蚀改造:如中古111井鹰一下亚段6 105.06~6 109.4 m深处是具有高角度缝洞的坍塌溶蚀洞穴(图2f,g),虽然后期被泥质和方解石充填,但是经过埋藏岩溶溶蚀改造形成了Ⅰ类优质储层,而中古42井鹰二段5 547.6~5 595.5 m深处高孔隙度的含砾砂屑灰岩虽然后期被

方解石胶结(图 2p—r),但是后期埋藏岩溶较弱,总体发育为Ⅲ类储层,只局部发育Ⅱ类储层。另一方面,塔中鹰山组发育的大规模优质灰岩储层中普遍发育裂缝

或开启的缝合线,这些早期缝合线是埋藏溶蚀流体重要的运移通道,溶蚀流体沿着裂缝进行扩容溶蚀,同时形成与裂缝伴生的高孔隙度粒间溶孔,形成优质的裂

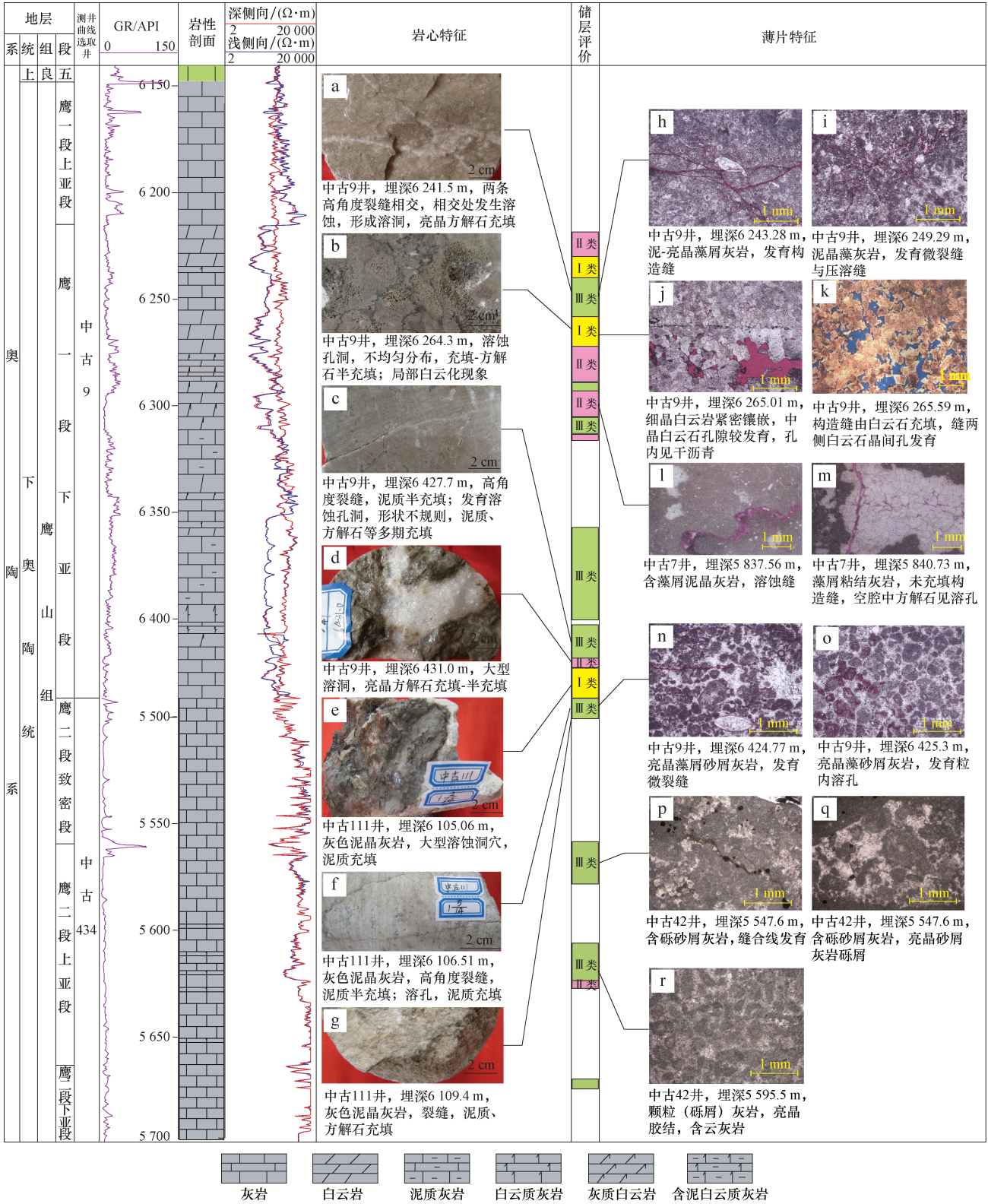


图2 塔中隆起北斜坡鹰山组多个溶蚀缝洞型储层段纵向分布

Fig. 2 The vertical distribution of multiple sections of dissolved fracture-cavity reservoirs in the Yingshan Formation, the northern slope of the Tazhong uplift

缝-孔洞型储层。由于埋藏溶蚀后常伴随着油气的充注,因此这些经埋藏岩溶改造而成的裂缝-孔洞型储层往往是油气高产储层,如中古7井5 837.56~5 840.73 m深处的含藻屑泥晶灰岩发育由压溶作用形成的溶蚀缝和由构造破裂产生的构造缝(图2l,m),酸性流体沿压溶缝扩容并沿着构造缝对先期胶结的方解石进行溶蚀,形成优质的Ⅱ类储层。

除了内幕岩溶、埋藏岩溶外,火山热事件带来的热液流体对储层发育也极为有利^[43-44],热液岩溶是碳酸盐岩发育第二高孔隙带的重要因素,热液岩溶大多沿断裂、构造裂缝分布,海西期的断裂活动导致深部热流体沿走滑断裂上涌^[45],塔中北东-南西向走滑断裂发育地带有利于热液溶蚀流体的注入,热液流体的流动使得深部储层次生溶蚀孔洞发育^[46],改善储集层物性。此外热化学硫酸盐还原作用(TSR)会对白云岩进行溶蚀,是对热液溶蚀的重要补充^[47],TSR产物 H_2S 和 CO_2 酸性流体对储层物性的改善有较大贡献^[48-49]。如中古9井6 264.3~6 265.59 m深处(图2h-k),鹰一下亚段发育与热液岩溶相关的白云岩储层,这些白云岩是热液注入鹰山组后,因鹰一上亚段致密段遮挡,热液能够与鹰一下亚段储层充分反应,使灰岩发生热液白云岩化^[50],进而在热液岩溶下发生溶蚀形成的优质储层,由于热液岩溶作用差异,这些白云岩储层物性远远优于相邻灰岩储层,在岩心上可见针状溶孔与溶洞,在薄片下观察,发现了与构造缝相关的晶间孔,且孔内可见干沥青。

2.2 构造破裂作用对储集层的建设性改造

塔中鹰山组岩溶储层的形成除了与岩溶作用、充填-胶结作用的发育程度相关之外,区内发育的走滑断裂构造作用对其改造作用也不容忽视^[51-55]。鹰山组经历的多期构造运动可形成多期裂缝,而在同一期的构造运动中又可产生不同的裂缝类型,并随其形成的先后顺序又可互相改造、切割,塔中北斜坡地区被主干走滑断裂分割的多个断块间的破裂作用主要受主干走滑断裂的影响。通过统计地震可识别裂缝的条数(图3a),对裂缝条数和断裂距离之间的关系进行拟合分析,发现距塔中走滑断裂越近,发育裂缝数量越多,而距走滑断裂越远,裂缝数量发育越少。其中在距离主干走滑断裂1.5~2 km范围内,随着距离的增大,裂缝发育数量骤减;在距离主干走滑断裂2.5 km之后,随着距离的增大,裂缝发育数量递减缓慢,进入区域构造作用控制的裂缝区。

走滑断裂对储层的积极改造利于形成相互连通的大型缝洞系统。首先,断裂系统所产生的裂缝扩展了储

层的储集空间,改善储层物性;其次,断裂作为流体的运移通道,可以使流体对早期缝洞进行进一步的溶蚀改造,深化各种岩溶作用,对储层改造起到建设性作用。

在多期活动断裂附近,岩溶储层发育深度最深。统计塔中中古5-7井区(12口井)、中古8-21井区(10口井)、塔中83井区(8口井)、中古43井区(4口井)三维地震资料、测井资料解释的储层厚度(图3b),发现在距离走滑断裂0.2~1.5 km范围内,随着距离的增大,地震串珠状储层的纵向发育深度越深,测井解释储层厚度越厚,距离主干走滑断裂1.5 km左右,串珠状储层发育深度最深可达305 m,测井解释储层发育厚度最厚可达180 m;距离主干走滑断裂1.5~4.5 km范围内,距离越远,地震串珠状储层的纵向发育深度和测井解释储层厚度都呈下降趋势。由此可见,走滑断裂构造运动差异影响了串珠状岩溶储层的纵向发育深度。

构造断裂与裂缝是埋藏溶蚀流体与热液流体垂向运移通道,有利于碳酸盐岩的后期改造^[56]。根据中古5-7井区(12口井)、中古8-21井区(10口井)、塔中83井区(8口井)、中古43井区(4口井)岩心物性分析与泥浆漏失统计,在距走滑断裂0.2~1.5 km范围内,岩心分析平均孔隙度较低,构造裂缝与内幕岩溶溶洞形成裂缝-洞穴型储层造成的钻井泥浆漏失量跨度范围大;在距走滑断裂1.5~4 km范围内,平均孔隙度呈增大趋势,埋藏岩溶与构造破裂的共同作用形成的裂缝-孔洞型储层,最大孔隙度接近10%,泥浆漏失量较裂缝-洞穴型储层有所下降,但数值依然较高;在大于4 km,由于埋藏溶蚀减弱,构造裂缝和裂缝的减少,岩心孔隙度降低至未经次生作用的内幕岩溶孔隙值,泥浆漏失量呈对数关系下降,由此可见,走滑断裂构造运动差异影响了碳酸盐岩储层孔隙度。

2.3 充填-胶结作用对致密段盖层形成的影响

充填作用和胶结作用会降低岩石的孔隙度和渗透率,在碳酸盐岩中部分发育为非渗透性隔层^[57]。塔中隆起北斜坡鹰山组内部发育了多个致密段隔层,其在电阻率测井曲线上普遍表现为比相邻层段电阻率高的特点,简称为“高阻层”。其中鹰一段发育两套高阻层,分布在鹰一上亚段与鹰一下亚段中部;鹰二段发育3套高阻层,分别是鹰二段致密段高阻层和鹰二上亚段发育的两套高阻层。这些高阻层是在充填作用与胶结作用下形成的,但各个高阻层充填作用与胶结作用强度的不同,使得不同高阻层对油气的封闭能力也有所不同(图4)。

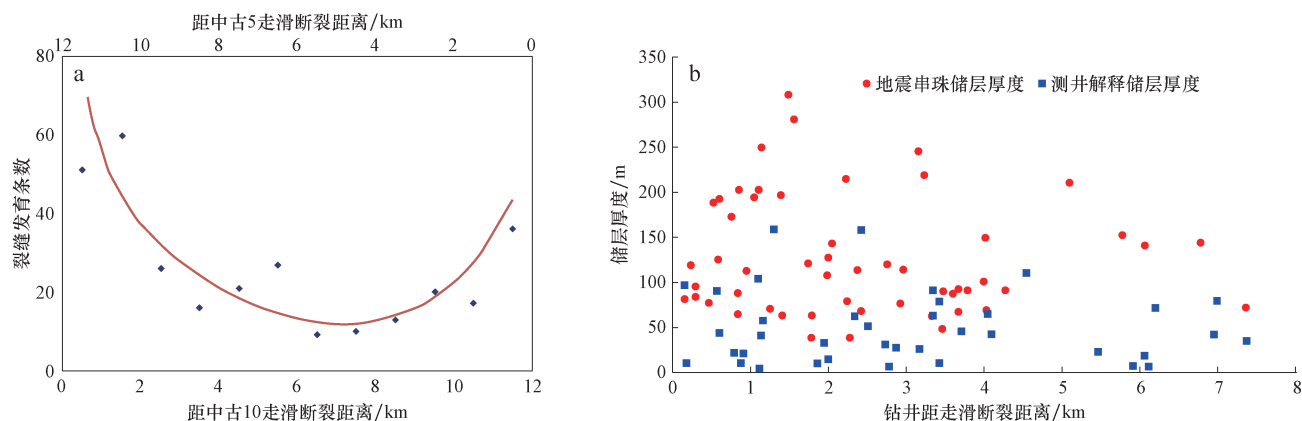


图3 塔中隆起北斜坡走滑断裂对鹰山组碳酸盐岩储层裂缝、厚度影响统计

Fig. 3 Statistical analysis of the impact of strike-slip fault on fracture distribution and thickness of reservoir in the Yingshan Formation, the northern slope of the Tazhong uplift

a. 储层裂缝发育条数距走滑断裂距离与关系(各走滑断裂发育的平面位置见图1); b. 储层厚度与走滑断裂距离关系(地震剖面上串珠状反射段厚度)

高阻层在在双侧向电阻率曲线上表现出典型的高阻值($\geq 1\,000\ \Omega \cdot \text{m}$),远大于相邻储层段的电阻率,在成像测井图像上显示亮黄色特征,在自然伽马测井曲线上,伽马值较低、多小于10 API,为泥晶灰岩特征,测井解释为渗透率极低的非储集层。

鹰一上亚段高阻层岩性主要为泥晶灰岩,厚度为20~50 m,自然伽马值相对于其他高阻层更高,高阻层成因是泥质充填和泥晶胶结,如中古3井6 755.39 m深处(图4d,e),薄片下观察颗粒灰岩的缝合线被泥质充填,生物颗粒灰岩角砾被泥晶胶结,裂缝不发育,对饱和标准盐水排替压力均值在9.19 MPa,对油气的封盖能力相较于其他高阻层都好。

鹰一下亚段中部高阻层岩性为泥晶灰岩、颗粒灰岩,厚度为10~30 m,高阻层成因是泥质充填和方解石充填,测井解释裂缝孔隙度小于0.001%,所占比例为64.01%,相较于其他高阻层高角度裂缝与缝合线更为发育。如中古7井5 836.0~5 840.9 m深处,岩心和薄片观察见方解石沿晶洞壁生长,高角度裂缝、缝合线和溶孔多被泥质充填和方解石充填且局部发生重结晶(图4f-j);塔中79井4 939.5 m(图4k)与中古41井5 602.74 m(图4l)深处,发现缝合线和裂缝被泥质和方解石充填,其主要成因是岩溶作用过程中,大气水携带的泥质对裂缝进行充填,饱和碳酸钙地层水对泥晶灰岩进行充填-胶结。泥质充填和胶结作用高阻层由于裂缝的发育,其对饱和标准盐水排替压力有所降低,均值在7.94 MPa,对油气的封盖能力较鹰一上亚段弱。

鹰二段致密段高阻层岩性主要为泥质灰岩、泥晶灰岩,厚度为20~60 m,自然伽马曲线上多小于15

API,具有少数峰值,深浅侧向测井相比于鹰一段更高,成像测井较于相邻储层呈现出亮黄色致密块状特征,以中古51井,5 083~5 250 m深处为例(图4a),成像测井动态图像上识别出裂缝与小型溶洞,属于裂缝-孔洞型储层,但是孔洞被泥质充填并发生方解石胶结,使自然伽马因泥质充填而具有峰值,强胶结作用使深浅侧向电阻率较鹰一段更高,对饱和标准盐水排替压力均值在达8.31 MPa,对油气的封盖能力较好。

鹰二上亚段两套高阻层岩性以泥晶灰岩、泥晶砂屑灰岩为主,厚度为10~30 m,平均厚度约15 m,以中古461井5 605~5 642 m,5 750~5 775 m深处为例(图4b,c),在成像测井上相较于鹰二段致密段静态平衡图像更亮,自然伽马更低,电阻率更高,说明泥质含量低,方解石胶结更强^[58]。而测井解释裂缝孔隙度小于0.001%,所占比例为55.92%,裂缝相对发育,对饱和标准盐水排替压力均值在6 MPa,相比其他高阻层,对油气的封盖能力最差。

3 碳酸盐岩内幕储-盖组合叠加分布

3.1 储层与盖层分布

鹰山组差异成岩作用形成的内部高阻层与多期岩溶作用形成的储层构成良好的空间配置关系,可以形成多套储-盖组合,但这些储-盖组合具有高阻盖层横向厚度变化大、储层横向连续性差、厚度发育不均一、物性差异大等特点。以中古8-10井区、中古5-7井区的鹰一段为例(图5),鹰一上亚段和鹰一下亚段中部分别发育两套高阻层,与两套内幕岩溶缝洞系

统构成了两套储 - 盖组合。鹰一上亚段高阻层分布比

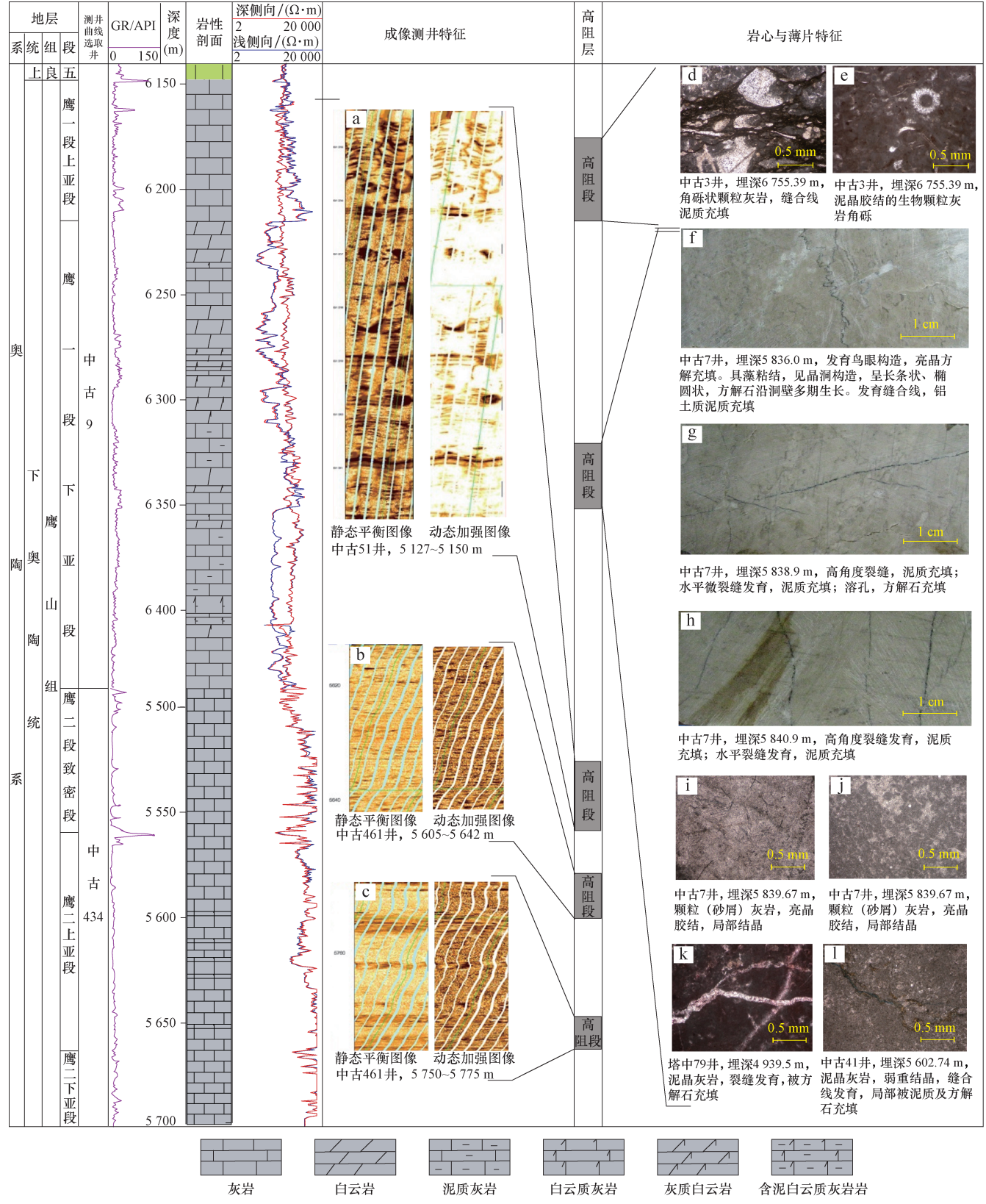


图 4 塔中隆起北斜坡鹰山组致密段(高阻层)岩石及成像测井特征

Fig. 4 Diagenesis and imaging logging characteristics of high-resistivity carbonate layers in the Yingshan Formation, the northern slope of the Tazhong uplift

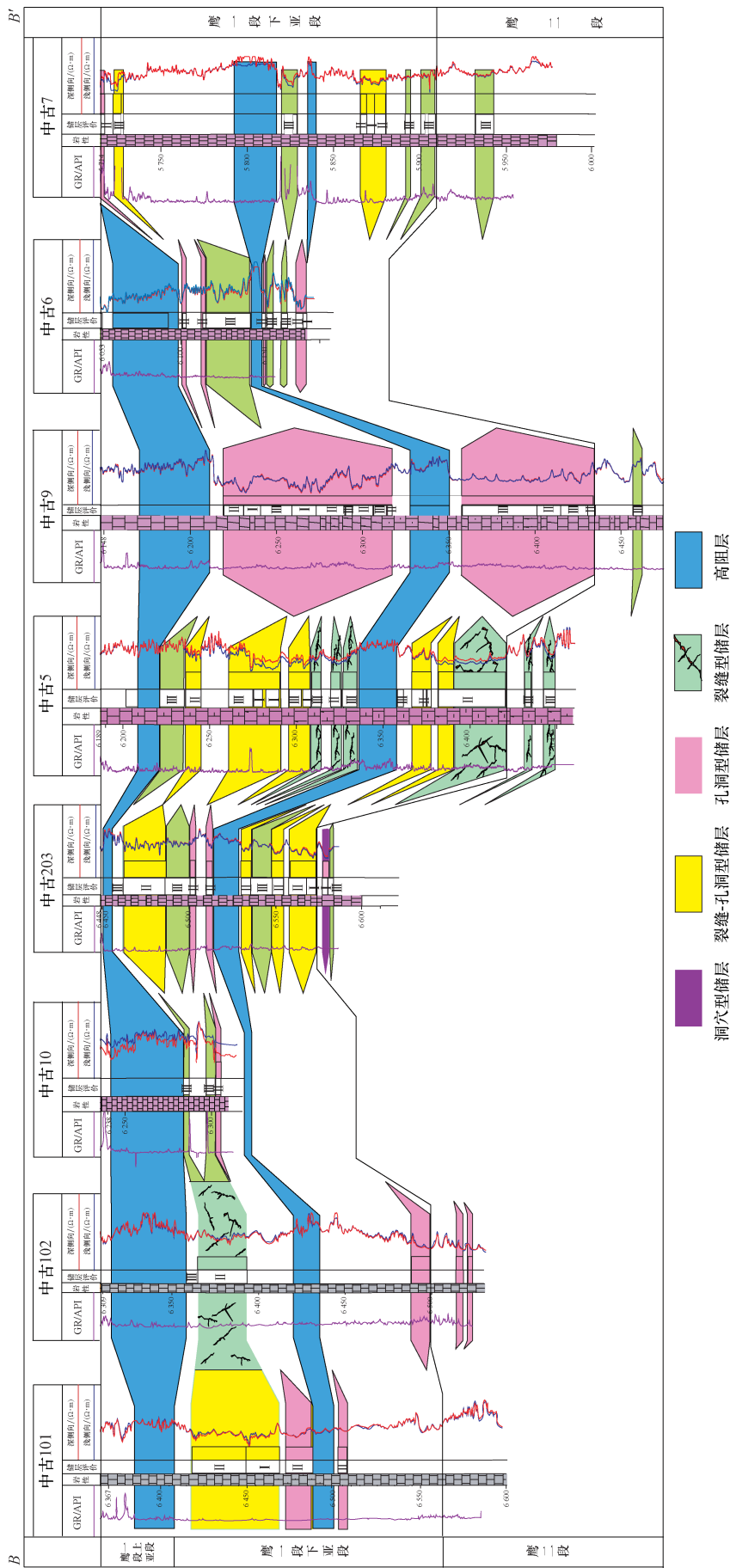


图5 塔中隆起北斜坡鹰一段岩溶储层与高阻层盖层连井剖面 (剖面位置为图1中B—B' for the cross-section location)

Fig.5 The well-tie cross-section of the karst reservoir and high-resistivity caprock in the 1st member of the Yingshan Formation, the northern slope of the Tazhong uplift (see Fig. 1 B-B' for the cross-section location)

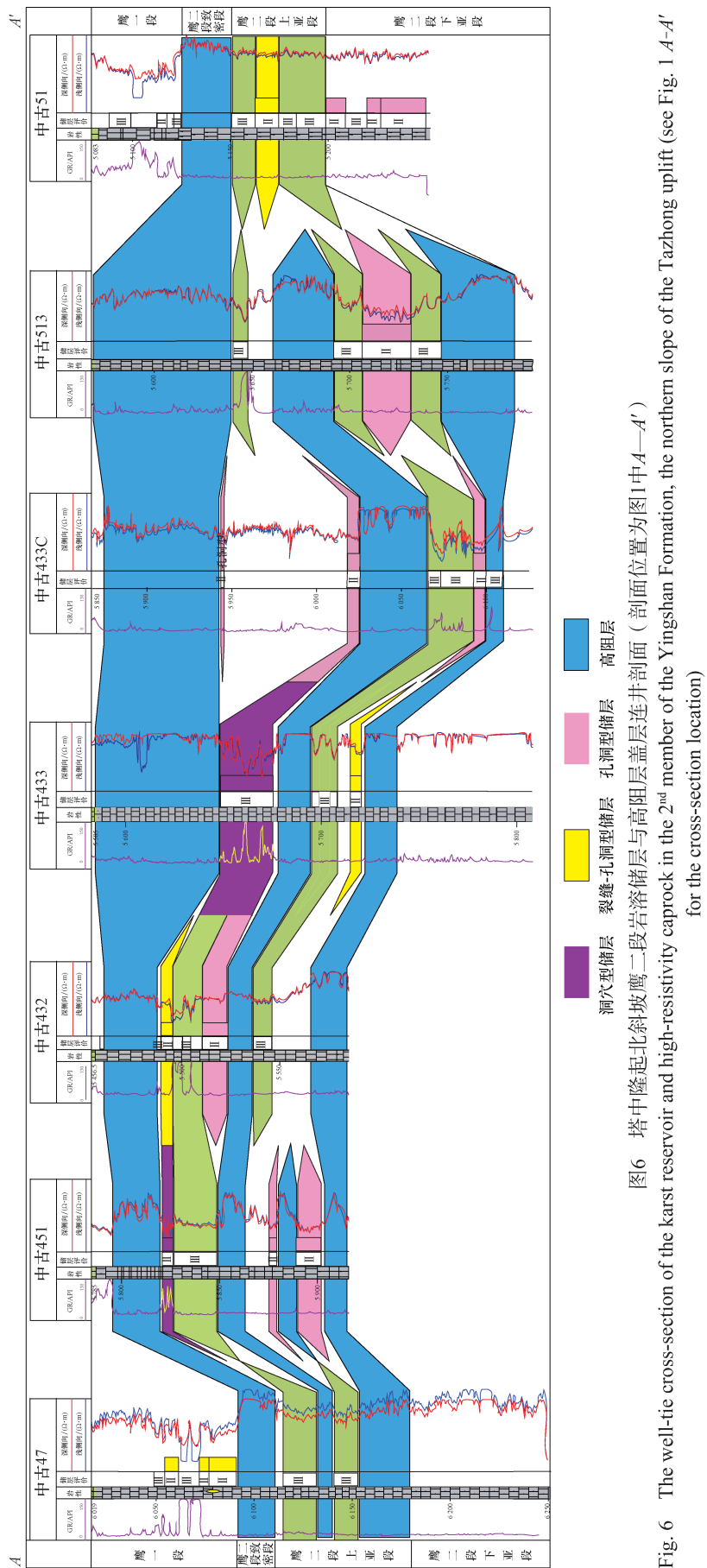


图6 塔中隆起北斜坡鹰二段岩溶储层与高阻层盖层连井剖面 (剖面位置为图1中4—4' for the cross-section location)

较稳定,厚度是20~50 m,占鹰一段上亚段总厚度的80%以上,横向连续性好,但在中古7井被剥蚀殆尽;鹰一下亚段中部高阻层厚度是10~30 m,虽然横向对比性较好,但是整体厚度较薄且裂缝更发育。

鹰一下亚段内幕岩溶形成的“准层状”、横向可对比的两套大型缝洞系统在充填与胶结作用下储层物性较差,表现为Ⅲ类储层。埋藏岩溶、热液岩溶和构造破裂叠加作用下可形成Ⅱ类储层,甚至Ⅰ类储层。在纵向上,鹰一下亚段第一套储层后期岩溶作用较第二套储层更强,使得第一套缝洞系统储层物性更好。而在横向上由于断层分隔,构造裂缝发育不均一,岩溶溶蚀强度不同,使得储层间连通性差。对比中古8~10井区与中古5~7井区(图5),中古5~7井区储层是由多种岩溶,构造破裂作用叠加而成的裂缝-孔洞型与孔洞型储层,岩溶储层厚度更大,储层类型多,储层物性更好,在Ⅲ类储层的背景上,更多的发育Ⅰ类和Ⅱ类储层。如中古5井发育内幕岩溶、强构造裂缝和埋藏岩溶形成的裂缝型、裂缝-孔洞型储层,中古9井发育内幕岩溶、构造裂缝和强热液岩溶形成的孔洞型储层。中古8~10井区储层以内幕岩溶叠加单一成岩因素形成裂缝型、孔洞型和裂缝-孔洞型储层,储层评价以Ⅱ类和Ⅲ类为主,如中古102井是内幕岩溶与构造裂缝形成的裂缝型储层,中古10井是内幕岩溶叠加埋藏岩溶形成的孔洞型储层。

靠近10号构造带,鹰一段被剥蚀殆尽,鹰二段致密段、鹰二上亚段的高阻层与鹰二上亚段岩溶储层构成了两套储-盖组合系统。以中古43井区、中古51井区的鹰二段为例(图6),鹰二段致密段厚度是20~60 m,横向发育稳定,是先期缝洞型储层在强碳酸盐岩胶结和泥质充填作用下形成的,使得在岩溶溶峰如中古451井、中古432井处发育相对较薄,在岩溶上斜坡如中古433井、中古513井处发育较厚。鹰二上亚段中部与底部发育两套性质相似的高阻层,厚度是10~

30 m,横向连续性好,但是厚度薄,由深部潜流带胶结作用而成。鹰二上亚段储层是内幕岩溶储层在充填与胶结作用下,经弱埋藏岩溶而成,储层评价主要为Ⅲ类储层,如中古433井由内幕岩溶形成的储层物性较差的Ⅲ类洞穴型储层,中古451井、中古432井受到埋藏岩溶改造发育的物性稍好的Ⅱ类孔洞型储层。

3.2 储-盖组合有效性

储-盖组合的有效性主要表现在岩溶储层与上覆高阻盖层的排替压力差值上。结合试油资料统计,认为当高阻盖层与下伏岩溶储层排替压力差均值大于2 MPa时,高阻层可对下伏储层中油气起到封盖作用,使储-盖组合有效^[36]。针对塔中四套储-盖组合有效性进行研究(表1),认为鹰一上亚段高阻层排替压力大,下伏鹰一段是层间岩溶作用形成的优质储层,孔隙度高、排替压力小,高阻盖层与储层排替压力差均值在6.88 MPa,远大于临界值2 MPa,因此是一套有效的储-盖组合。鹰一下亚段内部高阻层由于裂缝发育,排替压力相对鹰一段上亚段较小,但是下伏鹰一下亚段储层是一套多期岩溶形成的优质储层,孔隙度高、排替压力小,使得高阻盖层与储层排替压力差均值达到4.53 MPa,依然是一套有效的储-盖组合。鹰二段致密段虽排替压力高,但是下伏的鹰二上亚段储层因为胶结作用和埋藏岩溶的不发育,使得排替压力相对较高,高阻盖层与下伏储层组合排替压力差均值为2.96 MPa,大于储盖有效性界限值2 MPa,但是一定数量的井的排替压力差小于2 MPa,最小只有0.09 MPa,因此鹰二段致密段与下伏储层的储-盖组合整体上对油气具有有效的封盖作用,但在部分区域对油气不具备封盖性。鹰二上亚段高阻层排替压力平均值在6 MPa左右,与鹰二上亚段储层段排替压力差均值为0.65 MPa,小于储盖有效性界限值2 MPa,因此鹰二段高阻层对油气封盖能力有限,整体上难以形成有效的储-盖组合。

表1 塔中隆起北斜坡鹰山组储层与盖层排替压力差

Table 1 The differences of displacement pressure between reservoirs and caprocks in the Yingshan Formation, the northern slope of the Tazhong uplift

储盖组合	孔隙度/%		排替压力/MPa		压力差/MPa	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值
鹰一上亚段高阻层	0.10~1.20	0.40	3.86~17.94	9.19	1.50~13.72	6.88
鹰一上亚段储层	1.70~8.58	4.02	0.02~5.57	2.31		
鹰一下亚段高阻层	0.15~1.40	0.45	3.68~12.82	7.94	1.60~11.93	4.53
鹰一下亚段储层	1.20~6.89	3.12	0.36~8.45	3.41		
鹰二段致密段高阻层	0.10~1.02	0.39	4.09~17.94	8.31	0.09~9.81	2.96
鹰二上亚段储层	0.80~2.87	1.94	2.74~13.35	5.35		
鹰二上亚段高阻层	0.38~0.58	0.45	5.21~6.58	6		

4 鹰山组油气分层聚集特征

在塔中隆起北斜坡,岩溶作用和破裂作用为主导成岩作用,形成了鹰山组内幕多个缝洞型储集层段;以胶结作用和充填作用为主导的成岩作用在鹰山组内幕形成了多个致密段(高阻层)盖层^[59],对油气差异富集起着分隔或直接封盖的作用。致密高阻层与岩溶储层垂向上叠置分布,横向上受控于碳酸盐岩非均质性,储集层段、致密碳酸盐岩盖层段延展性较差,因此在横向上具有分区分块的特点。

4.1 多套储-盖组合控制下的油气纵向分层聚集

大量的钻井资料揭示,塔中隆起北斜坡鹰山组碳酸盐岩受不整合面影响的岩溶储集层一般发育在不整合面以下 220 m 范围内,内幕岩溶受到与层序界面相关的不整合面、岩溶时所处的风化淋滤带的共同控制,形成了多个近于层状分布的缝洞型储集层段。在储集层段之间是胶结作用之后充填作用、沉淀作用较为强烈的致密层(高阻层),构成缝洞型储集层的直接盖层。因此,斜坡背景上多套储-盖组合奠定了多个含油气层形成的基础。鹰一上亚段与鹰一下亚段中部发育的高阻层相对于下伏的岩溶储层排替压力差大,对油气都具有纵向分隔性,在碳酸盐岩内幕发育多个含

油气层(图7)。

断裂与缝洞型储集体是油气运移的重要通道,油气沿走滑断裂、溶蚀缝洞带向构造高部位运移,并聚集在内幕岩溶缝洞经后期溶蚀改造形成的有效圈闭中。塔中隆起北斜坡鹰山组经历了晚加里东期—早海西期和晚海西期原油的充注,印支期—喜马拉雅期原油裂解气沿断裂从下向上侵入。原油裂解气会首先在下部储层中溶解聚集,在侵入的油气质轻量大,充注速度大于逸散速度时,过多的、新的油气注入使早期聚集的原油反溶于天然气中,从而形成凝析气藏或干气藏。当压力过大,天然气携带着轻质油则突破封闭能力相对较差的高阻层向上运移,或者多余的轻质油气通过断裂向上部油层运移,从而形成上部含较多溶解气的油藏。

4.2 多层油气分区聚集及其控制因素

宏观上看,在大的斜坡构造背景下,厚层非均质碳酸盐岩内幕油气水的分布十分复杂。但总体上看,在斜坡高部位,油气井产能普遍好,斜坡低部位,也不乏高产井,但出水井比例增加,如中古 601 井、中古 1 井、中古 9 井。特别是,当纵向上划分出几个致密段(高阻层),其在碳酸盐岩内幕区分出几个独立的含油气层;横向上,以走滑断裂为边界划分出几个区块后,油气水的分布格局就比较清晰了,在一个独立的油气运聚单元内油、气、水发生正常分异。在缝洞单元内部,储层

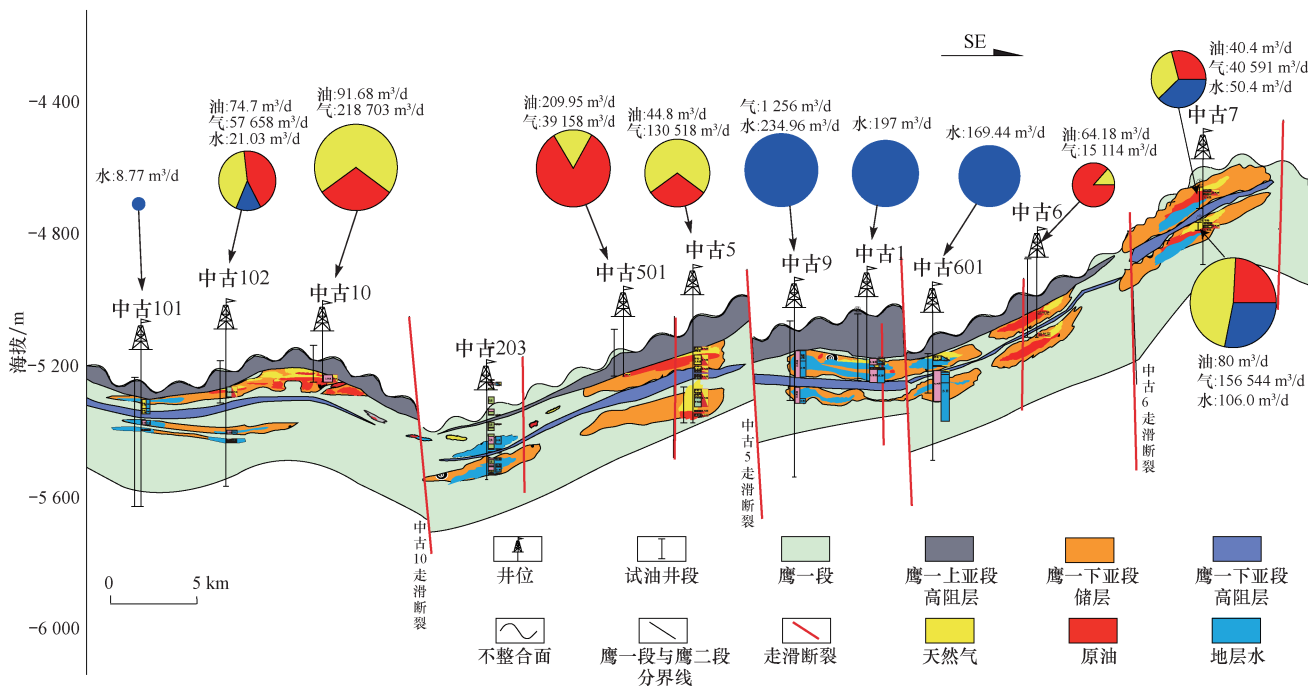


图7 塔中隆起北斜坡鹰山组油、气、水分层聚集剖面(以鹰一段为例)

Fig.7 The profile of the oil-gas-water distribution in the Yingshan Formation, the northern slope of the Tazhong uplift (taking the 1st member of Yingshan Formation as an example)

物性好且均质性相对较好,油气水分布状态便如同传统的模式:最上部位为气,其下为油,高部位气油比较低部位更高。如中古10井气油比较中古102井更高,中古5井气油比较中古501井更高。

塔中隆起北斜坡发育多条近于平行的北东向走滑断裂,走滑断裂将塔中隆起北斜坡分割成多个区块,对多个储盖组合在横向上的延展性具有分割作用,如中古8-10井区与中古5-7井区储盖组合的横向延续性就受到了边界断裂的约束。鹰山组碳酸盐岩裂缝非常发育,断裂和裂缝网络形成油气运移通道,来自下伏烃源岩的油气沿北西走向逆冲断裂与北东走向走滑断裂的交汇处以点状注入方式注入储集层。走滑断裂的多期活动对油气的运移聚集具有很好的控制作用,长期活动的断裂为油气垂向运移提供了良好的运移通道,邻近断裂的储集体,其遭受改造更为强烈、缝洞更为发育,单井产量也更高。如中古8-10井区的中古10井、中古102井与中古101井,距离中古10走滑断裂越近,产量越高。统计塔中中古5-7井区、中古8-21井区、塔中83井区、中古43井区探井距主干走滑断裂的距离与试油结果的相关性,在距走滑断裂0.2~4.5 km范围内,探井离走滑断裂越近,日产油气当量越高。在距离走滑断裂大于4.5 km范围内,日产油气当量仍然居高的探井,其油气运聚的主控因素可能为逆冲断裂或者其他因素。

5 结论

1) 差异成岩作用与储盖组合形成。鹰山组内部不同层段的差异成岩作用影响着缝洞型优质储层和致密段(高阻层)的形成。鹰山组优质储层发育的关键控制因素有两个,一是与不整合面相关的表生岩溶以及后期沉积埋藏岩溶、热液溶蚀等多起岩溶作用,二是与断裂活动(走滑和逆冲)相关的构造破裂作用。多期构造作用形成的断裂及伴生裂缝,作为溶蚀流体通道进一步的扩溶,增加了储集空间,改善了储集层物性,对储层改造起到建设性作用。泥质充填、方解石充填与胶结作用是鹰山组内幕发育多套高阻层的关键控制因素,鹰二段致密段为方解石胶结和泥质充填,导致其电阻率较相邻层段高。

2) 储盖组合叠加分布与多油气层形成。鹰山组差异成岩作用形成的缝洞型岩溶储集层与层间致密段高阻层构成良好的储-盖组合空间配置关系,并且是多套储-盖组合在垂向上叠置分布。这些储-盖组合的有效性受控于岩溶储层与上覆高阻盖层的排替压力差

均值,当排替压力差均值大于2 MPa时,高阻层可对下伏储层中油气起到封盖作用,形成有效的储盖组合。鹰一段储-盖组合排替压力差均值大于临界值,故有鹰一上亚段高阻层和下伏鹰一段储层、鹰一下亚段高阻层和下伏鹰一下亚段储层两套有效的储-盖组合;而鹰二段储-盖组合只有鹰二段致密段高阻层与鹰二段上亚段储层排替压力差均值大于临界值,故只发育一套有效储-盖组合。

3) 致密段控层、走滑断裂控区。塔中隆起北斜坡油气来源于深层,断裂构成油气垂向运移的重要通道,油气在向上运移过程中遇到缝洞层便会沿上倾方向,形成一个运移的“支流”,在层内运移并在相对高的部位聚集,所以纵向上的多个致密段高阻层将各含油气层分隔开,形成了纵向上的多个含油气层段。走滑断裂的分割与岩溶作用的强弱导致的非均质性控制着鹰山组储层横向分区,充填-胶结作用的强弱控制着鹰山组致密段高阻层的横向分区。碳酸盐岩非均质性导致储盖层横向延展性差,加之走滑断裂分割作用的共同控制,决定了鹰山组碳酸盐岩油气聚集具有“纵向分层,横向分区”的特征。

参 考 文 献

- [1] 韩剑发,王招明,潘文庆,等. 轮南古隆起控油理论及其潜山准层状油气藏勘探[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(4): 448-453.
Han Jianfa, Wang Zhaoming, Pan Wenqing, et al. Petroleum controlling theory of Lunnan Paleohigh and its buried hill pool exploration technology, Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration & Development, 2006, 33(04): 448-453.
- [2] 杨海军,朱光有,韩剑发,等. 塔里木盆地塔中礁滩体大油气田成藏条件与成藏机制研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1865-1885.
Yang Haijun, Zhu Guangyou, Han Jianfa, et al. Conditions and mechanism of hydrocarbon accumulation in large reef-bank karst oil/gas fields of Tazhong Area, Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1865-1885.
- [3] 赵文智,沈安江,潘文庆,等. 碳酸盐岩岩溶储层类型研究及对勘探的指导意义——以塔里木盆地岩溶储层为例[J]. 岩石学报, 2013, 29(9): 3213-3222.
Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Pan Wenqing, et al. A Research on carbonate karst reservoirs classification and its implication on hydrocarbon exploration: cases studies from Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(9): 3213-3222.
- [4] 华晓莉,吕修祥,华侨,等. 缝洞型碳酸盐岩油气分布规律及成藏条件:以塔中北斜坡东部鹰山组为例[J]. 现代地质, 2013, 27(2): 346-355.
Hua Xiaoli, Lü Xiuxiang, Hua Qiao, et al. Oil-gas distribution and play elements of the fracture-vug type carbonate reservoir bed: Take yingshan Formation in the Eastern of Northern Slope in Tazhong Area for an Example[J]. Geoscience, 2013, 27(2): 346-355.

- [5] 赵宽志,淡水,郑多明,等. 塔北哈拉哈塘地区奥陶系潜山岩溶储层发育特征及控制因素[J]. 中国岩溶,2015,34(2):171-178.
Zhao Kuanzhi, Dan Yong, Zheng Duoming, et al. Characteristics of karst reservoirs in the Ordovician buried hills of the Kalahatang Area, Northern Tarim Basin[J]. *carsologica Sinica*, 2015, 34(2): 171-178.
- [6] Du J, Zhou X, Li Q, et al. Characteristics and controlling factors of the large carbonate petroleum province in the Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration & Development*, 2011, 38(6): 652-661.
- [7] Lü X X, Wang X, Han J, et al. Hydrocarbon play of ordovician carbonate dominated by faulting and karstification—a case study of Yingshan Formation on Northern Slope of Tazhong Area in Tarim Basin, NW China[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2011, 29(6): 743-758.
- [8] 韩剑发,梅廉夫,杨海军,等. 塔里木盆地塔中地区奥陶系碳酸盐岩礁滩复合体油气来源与运聚成藏研究[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(03): 426-435.
Han Jianfa, Mei Lianfu, Yang Haijun, et al. The study of hydrocarbon origin, transport and accumulation In Tazhong Area, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(3): 426-435.
- [9] 杨海军,韩剑发,陈利新,等. 塔中古隆起下古生界碳酸盐岩油气复式成藏特征及模式[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(6): 784-790.
Yang Haijun, Han Jianfa, Chen Lixin, et al. Characteristics and patterns of complex hydrocarbon accumulation in the Lower Paleozoic carbonate rocks of the Tazhong Palaeouplift[J]. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28(6): 784-790.
- [10] 韩剑发,韩杰,江杰,等. 中国海相油气田勘探实例之十五 塔里木盆地塔中北斜坡鹰山组凝析气田的发现与勘探[J]. 海相油气地质, 2013, 18(3): 70-78.
Han Jianfa, Han Jie, Jiang Jie, et al. Cases of discovery and exploration of marine fields in China, Part 15: Ordovician Yingshan Condensate gas field in North Slope of Tazhong Uplift, Tarim Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2013, 18(3): 70-78.
- [11] 胡昊,王振宇,张云峰. 塔中北斜坡鹰山组碳酸盐岩层间岩溶储集层特征[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(3): 277-281.
Hu Hao, Wang Zhenyu, Zhang Yunfeng. Characteristics of carbonate interlayer karst reservoir of Yingshan Formation in Tazhong Northern Slope, Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2013, 34(3): 277-281.
- [12] 邹婧芸,马晓强,侯加根. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层古溶洞充填特征与垂向物性分布[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2014, 33(3): 64-67+74.
Zou Jingyun, Ma Xiaoqing, Hou Jiagen. The ancient karst cave filling characteristics and physical property distribution of the fracture-cave reservoirs in Ordovician of Tahe Oilfield[J]. *Journal Of Yanan University(Natural Science Edition)*, 2014, 33(3): 64-67+74.
- [13] 兰晓东,吕修祥,朱炎铭,等. 走滑断裂与盖层复合成藏模式——以塔中东部中古51井区鹰山组为例[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 107-115.
Lan Xiaodong, Lü Xiuxiang, Zhu Yanmin, et al. Hydrocarbon accumulation pattern jointly controlled by strike-slip faults and cap rocks: a case from Yingshan Formation in ZG-51 wellblock of eastern Tazhong area, Tarim Basin[J]. *Oil&Gas Geology*, 2014, 35(1): 107-115.
- [14] 吕修祥,周新源,杨海军,等. 塔中北斜坡碳酸盐岩岩溶储层油气差异富集特征[J]. 中国岩溶, 2012, 31(4): 441-452.
Lü Xiuxiang, Zhou Xinyuan, Yang Haijun, et al. Differential enrichment of oil and gas in carbonate karst reservoir on Northern Slope of Tazhong Uplift, Tarim Basin[J]. *Carsologica Sinica*, 2012, 31(4): 441-452.
- [15] 何长坡,王振宇,张云峰,等. 塔中北斜坡中下奥陶统鹰山组沉积相类型及分布研究[J]. 新疆石油天然气, 2009, 05(2): 11-17.
He Changpo, Wang Zhenyu, Zhang Yunfeng, et al. Study on sedimentary facies types and distribution of the middle-Lower Ordovician in the North Ramp of Tazhong Area[J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2009, 05(2): 11-17.
- [16] 王成林,邹光辉,崔文娟,等. 塔里木盆地奥陶系鹰山组台内滩的特征与分布[J]. 沉积学报, 2011, 29(6): 1048-1057.
Wang Chenglin, Wu Guanghui, Cui Wenjuan, et al. Characteristics and distribution of intra-platform beach of the Lower-Middle Ordovician Yingshan Formation Carbonate in Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(6): 1048-1057.
- [17] 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.
- [18] 任凭,林畅松,韩剑发,等. 塔中北斜坡鹰山组碳酸盐岩沉积微相特征与演化[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(2): 241-251.
Ren Ping, Lin Changsong, Han Jianfa, et al. Microfacies characteristics and depositional evolution of the Lower Ordovician Yingshan Formation in North Slope of Tazhong Area, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(2): 241-251.
- [19] 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.
- [20] 赵宗举,潘文庆,张丽娟,等. 塔里木盆地奥陶系层序地层格架[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(1): 175-188.
Zhao Zongju, Pan Wenqing, Zhang Lijuan, et al. Sequence stratigraphy in the Ordovician In the Tarim Basin[J]. *Geotectonica Et Metallogenia*, 2009, 33(1): 175-188.
- [21] 陈新军,蔡希源,纪友亮,等. 塔中奥陶系大型不整合面与风化壳岩溶发育[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(8): 1122-1127.
Chen Xinjun, Cai Xiyuan, Ji Youliang, et al. Relationship between large scale unconformity surface and weathering crust karst of Ordovician in Tazhong[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2007, 35(8): 1122-1127.

- [22] 苗继军,贾承造,邹才能,等.塔中地区下奥陶统岩溶风化壳储层特征与勘探领域[J].天然气地球科学,2007,18(4):497-500.
Miao Jijun, Jia Chengzao, Zou Caineng, et al. Characteristics and exploration fields of paleo-karst reservoirs at the top of Early Ordovician in Central Tarim Uplift[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(4):497-500.
- [23] 刘迪,张哨楠,谢世文,等.塔里木盆地塔中地区奥陶系鹰山组层序地层特征[J].矿物岩石地球化学通报,2014,33(1):55-64.
Liu Di, Zhang Shaonan, Xie Shiwen, et al. Characteristics of sequence stratigraphy of the ordovician Yingshan Formation in the central part of Tarim Basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2014, 33(1):55-64.
- [24] Wu Maobing, Wang Yi, Zheng Menglin, et al. The hydrothermal karstification and its Effect on Ordovician carbonate reservoir in Tazhong Uplift of Tarim Basin, Northwest China[J]. Science in China, 2007, 50(2):103-113.
- [25] 刘红光,刘波,曹鉴华,等.塔里木盆地玉北地区中-下奥陶统储层发育特征及控制因素[J].石油与天然气地质,2018,39(1):107-118.
Liu Hongguang, Liu Bo, Cao Jianhua, et al. Characteristics and controlling factors of Lower-Middle Ordovician reservoirs in Yubei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(1):107-118.
- [26] 朱光有,张水昌,王欢欢,等.塔里木盆地北部深层风化壳储层的形成与分布[J].岩石学报,2009,25(10):76-90.
Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Wang Huanhuan, et al. The formation and distribution of deep weathering crust in North Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(10):76-90.
- [27] 邹元荣,郭书元.塔中地区奥陶系碳酸盐岩表生岩溶分布特征及主控因素[J].新疆地质,2005,23(2):209-212.
Zou Yuanrong, Guo Shuyuan. The distribution characteristics and main controlling factors of carbonate rocks in ordovician carbonate rocks in Tarim Region[J]. Xinjiang Geology, 2005, 23(2):209-212.
- [28] 胡明毅,蔡习尧,胡忠贵,等.塔中地区奥陶系碳酸盐岩深部埋藏溶蚀作用研究[J].石油天然气学报,2009,31(6):49-54.
Hu Mingyi, Cai Xiyao, Hu Zhonggui, et al. Deep buried dissolution of Ordovician Carbonates in Tazhong Area of Tarim Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(6):49-54.
- [29] 李忠,李佳蔚,张平童,等.深层碳酸盐岩关键构造-流体演变与成岩-成储——以塔中奥陶系鹰山组为例[J].矿物岩石地球化学通报,2016,35(5):827-838.
Li Zhong, Li Jiawei, Zhang Pingtong, et al. Key structural-fluid evolution and reservoir diagenesis of deep-buried carbonates: An example from the Ordovician Yingshan Formation in Tazhong, Tarim Basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2016, 35(5):827-838.
- [30] 潘文庆,刘永福, Dickson J A D, 等.塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩热液岩溶的特征及地质模型[J].沉积学报,2009,27(5):983-994.
Pan Wenqing, Liu Yongfu, Dickson J. A. D, et al. The geological model of hydrothermal activity in outcrop and the characteristics of carbonates hydrothermal karst of lower Paleozoic in Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5):983-994.
- [31] 杨海军,李开开,潘文庆,等.塔中地区奥陶系埋藏热液溶蚀流体活动及其对深部储层的改造作用[J].岩石学报,2012,28(3):783-792.
Yang Haijun, Li Kaikai, Pan Wenqing, et al. Burial hydrothermal dissolution fluid activity and its transforming effect on the reservoirs in Ordovician in Central Tarim[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(3):783-792.
- [32] 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 Petrologica Sinica, 2009, 30(5):698-704.
- [33] 焦存礼,何治亮,邢秀娟,等.塔里木盆地构造热液白云岩及其储层意义[J].岩石学报,2011,27(1):277-284.
Jiao Cunli, He Zhiliang, Xing Xiujuan, et al. Tectonic hydrothermal dolomite and its significance of reservoirs in Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1):277-284.
- [34] 王振宇,王二伟,杨薇,等.塔中地区下奥陶统鹰山组热液白云岩内幕型储层形成机制及其分布特征[J].石油天然气学报,2011,33(12):41-45.
Wang Zhenyu, Wang Erwei, Yang Wei, et al. The forming mechanism and its distribution characters of hydrothermal dolomite reservoirs in Tazhong Area[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(12):41-45.
- [35] 赵越,杨海军,刘丹丹,等.塔中北斜坡致密碳酸盐岩盖层特征及其控油气作用[J].石油与天然气地质,2011,32(6):890-896, 908.
Zhao Yue, Yang Hai-jun, Liu Dan-dan, et al. Characteristics of tight carbonate cap rock and its control on hydrocarbon accumulation in the north slope of Tazhong Uplift[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(6):890-896, 908.
- [36] 吕修祥,屈怡倩,于红枫,等.碳酸盐岩盖层封闭性讨论——以塔里木盆地塔中北斜坡奥陶系为例[J].石油实验地质,2014,36(5):532-538.
Lü Xiuxiang, Qu Yiqian, Yu Hongfeng, et al. Sealing capacity of carbonate cap rocks: A case study of Ordovician in northern slope of central Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(5):532-538.
- [37] Xu Xiaosong, Du Baiwei. The Palaeoweathering crust-type karst reservoir rocks in Carbonate Rocks[J]. Sedimentary Geology & Tethyan Geology, 2005, 25(3):1-7.
- [38] 张恒,蔡忠贤,漆立新,等.塔中地区西北部鹰山组成岩早期岩溶作用类型及其特征[J].石油与天然气地质,2016,37(2):291-303.
Zhang Heng, Cai Zhongxian, Qi Lixin, et al. Types and characteristics of eogenetic karst in the Yingshan Formation in northwestern Tazhong area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2):291-303.
- [39] 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(S1):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 Petrologica Sinica, 2012, 33(S1):80-88.

- [40] 吕修祥,杨宁,解启来,等. 塔中地区深部流体对碳酸盐岩储层的改造作用[J]. 石油与天然气地质,2005,26(3):284-289.
Lü Xiuxiang, Yang Ning, Xie Qilai, et al. Carbonate reservoirs transforms by Deep Fluid in Tazhong Area[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(3):284-289.
- [41] Lü X X, Xie Q L, Yang N, et al. Hydrocarbon accumulation in deep fluid modified carbonate rock in the Tarim Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(1):184-192.
- [42] 焦伟伟,吕修祥,周园园,等. 塔里木盆地塔中地区奥陶系碳酸盐岩储层主控因素[J]. 石油与天然气地质,2011,32(2):199-206.
Jiao Weiwei, Lü Xiuxiang, Zhou Yuanyuan, et al. Main controlling factors of the ordovician carbonate reservoirs in Tazhong Area, the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(2):199-206.
- [43] Lü X, Yang H, Xu S, et al. Petroleum accumulation associated with volcanic activity in the Tarim Basin—Taking Tazhong-47 Oilfield as an Example[J]. Petroleum Science, 2004, 1(3):30-36.
- [44] 杨宁,吕修祥,郑多明. 塔里木盆地火成岩对碳酸盐岩储层的改造作用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2005,20(4):1-4.
Yang Ning, Lü Xiuxiang, Zheng Duoming. Alteration of the igneous rock on the carbonate reservoirs in Talimu Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2005, 20(4):1-4.
- [45] 张艳萍,吕修祥,于红枫,等. 塔中隆起两组走滑断裂对岩溶储层发育的控制机制[J]. 石油与天然气地质,2016,37(5):663-673.
Zhang Yanping, Lyu Xiuxiang, Yu Hongfeng, et al. Controlling mechanism of two strike-slip fault groups on the development of the Ordovician karst reservoirs in the Tazhong Uplift, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5):663-673.
- [46] 李开开,蔡春芳,蔡缪璐,等. 塔河地区下古生界热液流体及储层发育主控因素探讨——以 S88 和 TS1 井为例[J]. 石油实验地质,2010,32(1):46-51.
Li Kaikai, Cai Chunfang, Cai Liulu, et al. Hydrothermal fluid activities and main controlling factors of deep reservoir development in the Lower Paleozoic of the Tahe Oilfield—Taking Wells S88 and TS1 as Examples[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(1):46-51.
- [47] 李开开,蔡春芳,蔡缪璐,等. 塔中地区上奥陶统热液流体与热化学硫酸盐还原作用[J]. 石油与天然气地质,2008,29(2):217-222.
Li Kaikai, Cai Chunfang, Cai Liulu, et al. Hydrothermal fluid activity and the rmochemical sulfate reduction in the Upper Ordovician, Tazhong area[J]. Oil & Gasgeology, 2008, 29(2):217-222.
- [48] 马红强,王恕一,雍洪,等. 塔里木盆地塔中地区奥陶系碳酸盐岩埋藏溶蚀特征[J]. 石油实验地质,2010,32(5):434-441.
Ma Hongqiang, Wang Shuyi, Yong Hong, et al. Burial karst characteristics of Ordovician carbonate reservoirs in central Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(5):434-441.
- [49] Zhang S Y, Yingtao L I, Meiyang F U, et al. Thermochemical sulfate reduction in bioclastic limestone section of Bachu Formation in Bashentuo Region[J]. Computing Techniques for Geophysical & Geochemical Exploration, 2015, 37(3):388-396.
- [50] 张学丰,胡文瑄,张军涛,等. 塔里木盆地地下奥陶统白云岩化流体来源的地球化学分析[J]. 地学前缘,2008(02):80-89.
Zhang Xuefeng, Hu Wenxuan, Zhang Juntao et al. Geochemical analyses on dolomitizing fluids of Lower Ordovician carbonate reservoir in Tarim basin[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(2):080-089.
- [51] 吕修祥,杨宁,周新源,等. 塔里木盆地断裂活动对奥陶系碳酸盐岩储层的影响[J]. 中国科学,2008,38(S1):48-54.
Lü Xiuxiang, Yang Ning, Zhou Xinyuan, et al. The influence of faults activities on Ordovician Carbonate Reservoir in Tarim Basin[J]. Science in China Press, 2008, 38(S1):48-54.
- [52] Lan X, Lü X, Zhu Y, et al. Characteristics and differential accumulation of Oil/Gas in Lower Paleozoic marine carbonate on Northern slope of Tazhong Low Rise, Tarim Basin, NW China: A case study of Lower Ordovician Yingshan Formation[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014, 7(11):4487-4498.
- [53] Lan X, Lü X, Zhu Y, et al. The geometry and origin of strike-slip faults cutting the Tazhong low rise megaanticline(Central Uplift, Tarim Basin, China) and their control on hydrocarbon distribution in carbonate reservoirs[J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2015, 22(3):633-645.
- [54] Shen W, Pang X, Jiang F, et al. Accumulation model based on factors controlling ordovician hydrocarbons generation, migration, and enrichment in the Tazhong Area, Tarim Basin, NW China[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(5):1-23.
- [55] 宁飞,金之钧,张仲培,等. 塔中北坡走滑断裂成因机理与油气成藏[J]. 石油与天然气地质,2018,39(1):98-106.
Ning Fei, Jin Zhijun, Zhang Zhongpei, et al. Mechanism of strike-slip faulting and hydrocarbon accumulation in northern slope of Tazhong area[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(1):98-106.
- [56] Lü X X, Ning Y, Zhou X Y, et al. Influence of Ordovician carbonate reservoir beds in Tarim Basin By Faulting[J]. Science in China (Series D:Earth Sciences), 2008, 51(S2):53-60.
- [57] 钱一雄,何治亮,陈强路,等. 塔里木盆地塔中地区奥陶系碳酸盐岩封盖性能[J]. 石油与天然气地质,2012,33(1):1-9.
Qian Yixiong, He Zhiliang, Chen Qianglu, et al. Sealing capacity of the Ordovician carbonate rocks in Tazhong Area, the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology. 2012, 33(01):1-9.
- [58] 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.
- [59] 华晓莉,罗春树,吕修祥,等. 塔中北斜坡奥陶系鹰山组碳酸盐岩高层层分布特征及其意义[J]. 石油与天然气地质,2013,34(3):323-331.
Hua Xiaoli, Luo Chunshu, Lü Xiuxiang, et al. Distribution and significance of high-resistivity carbonates of Ordovician Yingshan Formation of Northern Slope of Tazhong Area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(3):323-331.