

麦盖提斜坡东部构造带奥陶系岩相、成岩作用带与储层成因

钱一雄¹,余腾孝²,周凌方¹,岳勇²,乔桂林¹,尤东华¹,邵志兵¹,金婷¹

(1. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所,江苏 无锡 214151;

2. 中国石化西北油田分公司 石油勘探开发研究院,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:通过对塔里木盆地麦盖提斜坡碳酸盐岩2口区探井断裂样式、地层特征、沉积亚(微)相、成岩作用、储集体特征等详细研究,得出以下认识。鹰山组为一套开阔台地的台内滩-滩间海的沉积,蓬莱坝组为局限台地的云坪、云灰坪及粒屑滩沉积。中、下奥陶统成岩作用主要有海底胶结、早期大气淡水溶解与胶结、压实与压溶、两期表生大气水岩溶、埋藏作用和热液改造作用等。受多期构造运动影响,开放与相对封闭的成岩相带可存在于同一碳酸盐岩层段中,前者厚度小、层段多,后者厚度大、层段少。储层受多期不整合面、断裂、裂隙以及水-岩相互作用等因素的控制,有效储集体的成岩序列为海底胶结作用-压实、压溶作用-二期表生大气水岩溶作用-埋藏溶蚀及热水(液)作用等。岩溶相带储层主要发育于在断褶带顶部、褶皱翼部断裂带或断裂与高频层序界面的叠加带,是一种多期构造控制下的渗流带与落水洞叠加的岩溶模式。

关键词:沉积亚相;成岩作用带;碳酸盐岩;奥陶系;麦盖提斜坡;塔里木盆地

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Lithofacies, diagenesis zone and reservoir origin of the Ordovician in eastern tectonic belt of the Maigaiti slope

Qian Yixiong¹, Yu Tengxiao², Zhou Linfang¹, Yue Yong², Qiao Guilin¹, You Donghua¹, Shao Zhibing¹, Jing Ting¹

(1. Wuxi Institute of Geology, Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China;

2. Exploration & Production Research Institute, Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: Through the detailed research of fracture style, strata feature, sedimentary facies (microfacies), diagenesis process and reservoir characteristics of two exploratory wells in carbonate rocks of Maigaiti slope, the following conclusions can be obtained. The Yingshan Formation consists of a set of intra-platform beaches-inter-beach seas of open platform, and the Penglaiba Formation consists of dolomite flat, dolomite-limestone flat and granule shoal. The diagenetic processes in Lower and Middle Ordovician mainly include submarine cementation, early atmospheric fresh water dissolution and cementation, compaction and pressure solution, two periods of atmospheric water karstification, burial and hydrothermal modification. Due to the influence of multiphase tectonic movements, open and relative closed diagenetic facies could co-exist in the same limestone. The open diagenetic facies feature in small thickness and multiple intervals. In contrast, the closed diagenetic facies is characterized by large thickness and less intervals. The quality of reservoir was controlled by multi-phases unconformities, faults, fractures and water-rock interaction, so the effective reservoir diagenetic sequences were submarine cementation, compaction and pressure solution-two periods atmospheric water karstification, buried dissolution and hydrothermal reformation. Karst reservoir facies zones were mainly distributed in the superimposed tectonic belt between fault fold top, folding wing or fracture with high frequency sequence boundary, and show a karstification model featuring in superimposition of vadose zone and water hole under the control of multiphase tectonic movements.

Key words: sedimentary subfacies, diagenetic belt, carbonate, Ordovician, Maigaiti slope, Tarim Basin

与沉积间断面或不整合面有关的古岩溶型油气储层在世界范围内大量存在。前人对岩溶系统的演

化途径、溶蚀几何学进行了深入的研究,探讨了气候、地下水溶解、矿物组成、暴露长短、先存孔洞系

收稿日期:2014-11-19;修订日期:2014-11-29。

第一作者简介:钱一雄(1962—),男,博士、教授级高级工程师,碳酸盐岩沉积与储层。E-mail:qianyx_syky@sinopec.com。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2012CB214802);国家科技重大专项(2011ZX05005-002,2011ZX05008-003)。

统、沉积相和地层特征、水文系统、出露规模和地形特征、基准面改变、构造沉降特征等多个因素对岩溶作用的影响^[1-2]。Eduard K^[3]和 Julia F W^[4]则强调了同生及构造期(后)的断裂作用对岩溶作用的影响^[3-4]。

典型喀斯特可分为削截不整合有关的潜山-斜坡及内幕型^[5]。塔河油田中、下奥陶统发育了典型的喀斯特^[6-7],以不整合面-古地貌-大气水基准面为主要控制因素,具有垂向上分带、平面上分区的主要特点。塔河油田发育了地表峰林、峰丛、封闭洼地、地表径流、地下大型洞穴及巨晶方解石沉积等;而在地层发育序列较完整地区,早期或后期构造断裂作用或沿潜山高部位的向斜坡渗透层的大气水流体作用十分重要^[8-9]。对塔河-轮南南部、英买地区的中、下奥陶统碳酸盐岩研究^[10-11]认为,表生大气水可沿裂缝带向下流动、或承压水(层)沿断裂上升发生岩溶作用,形成大型缝洞型储层。

前人对麦盖提斜坡奥陶系碳酸盐岩的构造作用、储集体类型、岩溶作用及主控因素等均进行了一系列研究^[12-21]。认为本区岩溶作用的发育受控于加里东早期、中期和晚期以及较弱的海西晚期^[17,19]的构造叠加作用;也有学者认为其主要与加里东中-晚期、海西晚期构造隆升与剥蚀有关^[18],发育了加里东中期、晚期与海西早期等3期大型风化岩溶作用^[12-13]。储层类型主要有裂缝、裂缝-孔隙、孔隙和洞穴等,主要受断裂、不整合及岩溶作用等控制^[20-24]。综上所述,将构造、岩相、成岩作用与储集体进行综合分析的研究较少,故而难以深入揭示多期构造、岩相、成岩作用及储层发育之间的关系。本文尝试将麦盖提斜坡东部北东向构造带中的玉北1井(YB1)和玉北3井(YB3)的构造样式、奥陶系取心段的碳酸盐岩沉积岩相、成岩作用、孔隙度、渗透率和孔、洞、缝发育带相结合进行综合研究,探究其储层成因及模式。

1 地质背景

自下而上,北东向构造带为下奥陶统蓬莱坝组(O_{1p})、中下统鹰山组(O_{1-2y}),往塘古巴斯凹坳,向东的两翼会出现上统恰尔巴克组(O_{3q})、却尔却克组(O_{2+3q});而往西则出现良里塔格组(O_{3l})和桑塔木组(O_{3s})。东部可能缺失中统一间房组(O_{2yj});上覆为石炭系巴楚组(C_1b)下泥岩段至中泥岩段、卡拉沙依组(C_1kl)和二叠系等。其中,蓬莱坝组(O_{1p})下部为黑白相间的中薄层细-中晶云岩、藻云岩(微生物岩)夹多层硅质结核(渗流豆?);中、上部为中层与中薄层粉细晶云岩-中晶云岩、中部夹有硅质条带。

而鹰山组下段为中薄层泥晶灰岩、砂屑亮晶灰岩夹薄层粉细晶云岩、藻灰岩;中上段为厚层-巨厚层粉砂屑灰岩(局部具风暴沉积的粒序层理)、含硅质团块的泥晶灰岩、局部夹有藻云岩;顶部为中薄层泥晶灰岩与砂屑亮晶灰岩。

麦盖提东段自东向西主要有:①玉北3东构造带(NE向);②玉北3构造带(NE向);③玉北3西构造带(NNE向);④玉北1东构造带(NNE向)-玛东构造带;⑤玉北1构造带(NE向)等构造带和⑥玛南构造带(近EW向)。在构造潜山上,由石炭系的巴楚组泥岩削截超覆于鹰山组(YB1)或下奥陶统蓬莱坝组(YB3)碳酸盐岩上;而在构造斜坡带,则是由上奥陶统良里塔格组中含泥质条带灰岩段覆盖于鹰山组(胜和2井)碳酸盐岩上;而志留系与泥盆系自北向南依次被剥蚀(图1)。

麦盖提东段的NNE向和NE向构造带均表现出2至3期构造叠加作用。无论是玉北1构造带、还是玉北3构造带,古生界至少有3种构造层:①在加里东早、中期(I幕),中、上寒武统(相当于 T_8^2)存在膏盐层段的挤压滑脱构造、局部形成与膏盐岩有关的盐背斜、盐滚构造;②加里东中、晚期(II-III幕),中、下奥陶统(T_4^4)至中寒武统(T_8^2)为挤压-逆冲及压扭走滑构造叠加带,顶部破碎、减薄^[10],以玉北3井为例,存在3个地层重复的构造逆冲岩片;③在石炭纪一二叠纪的海西期(相当于 T_5^7 至 T_5^0),发育等厚褶皱变形、断弯褶皱及逆冲-走滑构造(图2)。

2 地层与沉积

为了进一步了解玉北1井及玉北3井的地层特征、沉积相(亚)及微相^[22]、成岩作用及孔缝洞发育情况,反映两者储集空间及其分布的异同性、揭示其多期构造作用下对岩溶作用控制,在此,对玉北1井和玉北3井的奥陶系各为5个回次、共计55m岩心进行了1:100的详细描述。采集了161件岩石铸薄片、阴极等各类样品,并收集了录井中的15件薄片、牙形石鉴定结果和Th/k分析资料。

2.1 地层特征

资料表明,在距 T_7^4 界面顶(埋深5593m)下131.9m和121m的玉北1井奥陶系碳酸盐岩中,发现了奥陶纪的第4个牙形化石带的*Paroistodus proteus*(原始拟箭牙形石)、第6个牙形化石带的*Scolopodus bicostatus*(双棱尖牙形石);而在埋深5715~5725m发现了*S. tarimensis*(塔里木尖牙形石)和*Scolopodus rex oistodiform*(华美尖牙形石箭状亚种)。

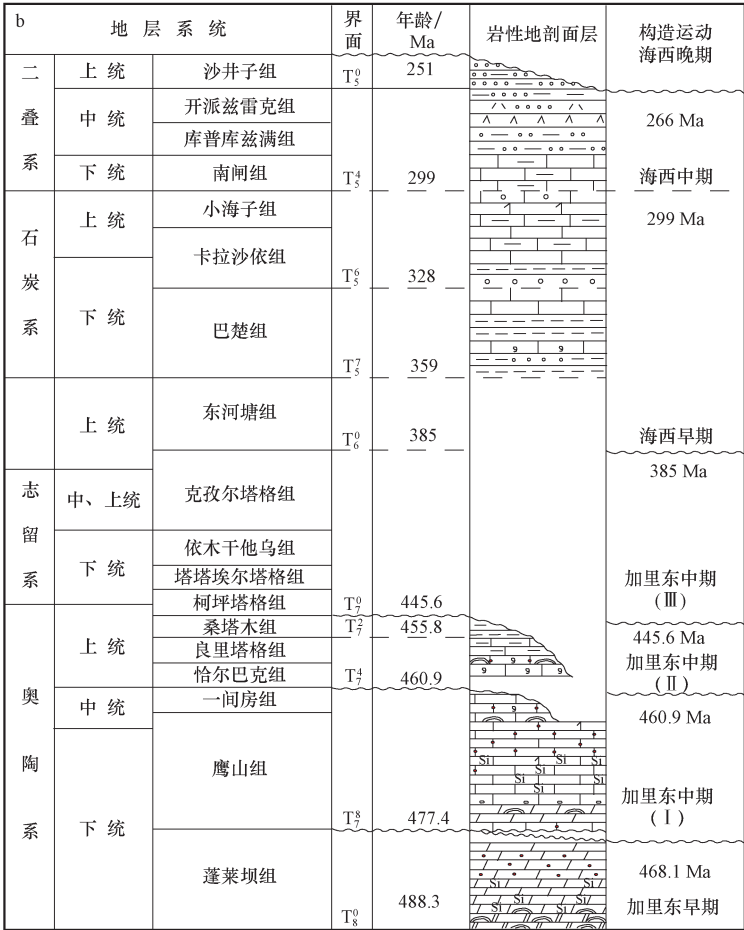
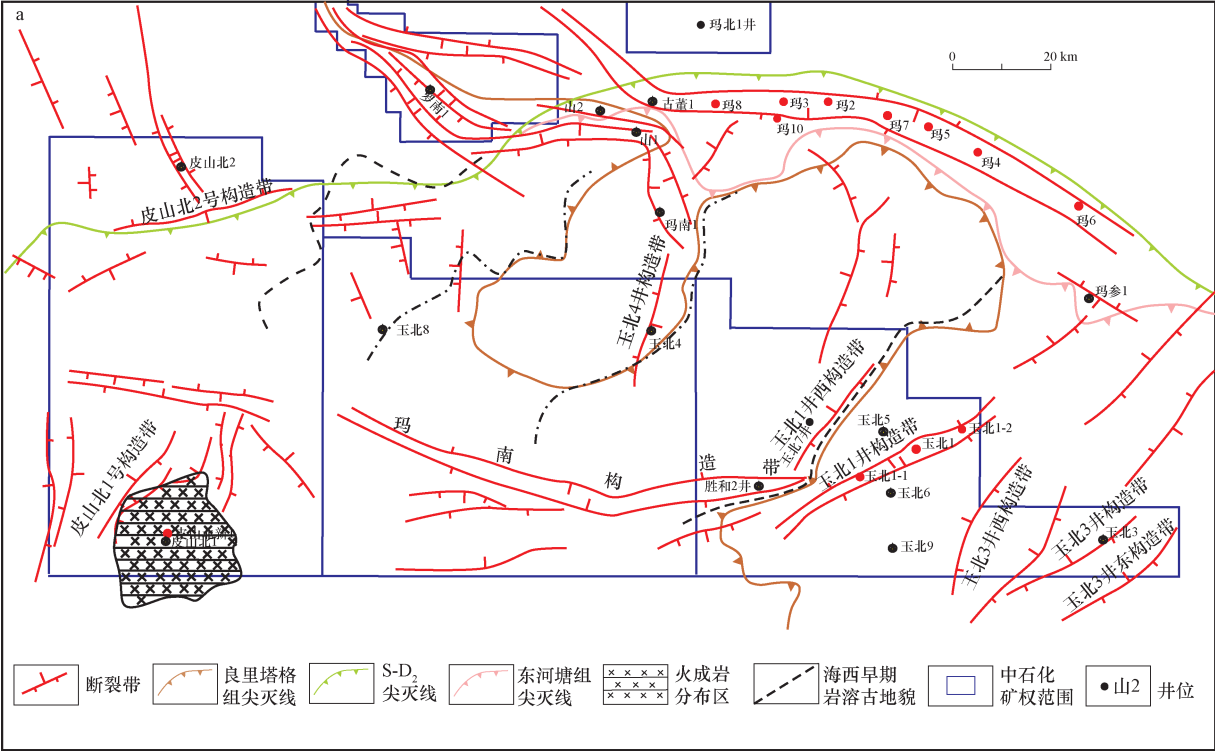


图 1 麦盖提中东部构造纲要(a)及综合地层柱状图(b)(其他图例详见图 4)

Fig. 1 Structure outline map of eastern Maigaiti slope (a) and composite columnar section (b)

上述牙形石(带)地层时代相当于华南的红花园阶至大湾阶下部,与华北下奥陶统治里组至马家沟组对应。

同样,在玉北 3 井,在距奥陶系碳酸盐岩地层顶(距 T₇⁴ 界面下的 94 m)第 1 回次埋深为 5 258.82 ~ 5 258.9 m 的粉细晶云岩中,找到了 *Scolopodus sun*

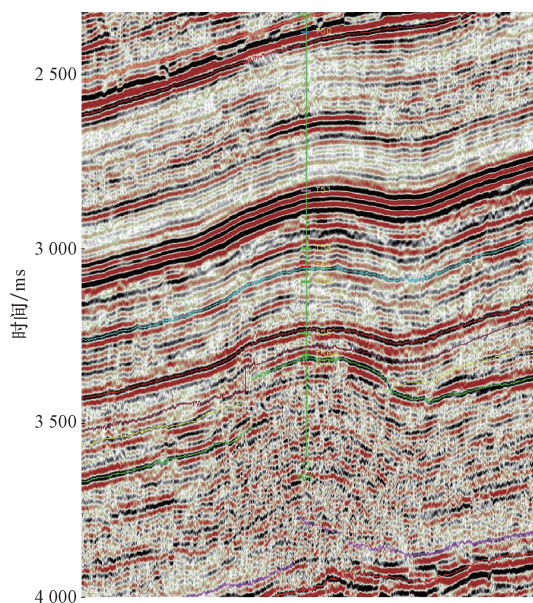


图2 麦盖提东段过玉北1井、玉北3井3D地震剖面及其构造解释

Fig. 2 Seismic sections tied to YB1 and YB3 wells and their interpretation results in Eastern Maigaiti slope

anensis(苏南尖牙形石);而在埋深5 261.9~5 262 m的粉细晶云岩中,发现了 *Scolopodus tarimensis*(塔里木尖牙形石);埋深为5 360 m亮晶藻砂屑灰岩中,见到了 *Protopanderodus gradatus Serpagli*(逐渐原潘德尔牙形石);它们分别相当于红花园阶上部至大湾阶-牯牛潭阶的牙形石带。

从玉北3井的碳酸盐岩岩性(段)分布来看,云岩段或灰云段互层出现于上部,而灰岩出现于下段,与区域内中下奥陶统正常的沉积岩性段序列相反。可将埋深5 364 m以上的灰云岩或云岩段定为下奥陶统蓬莱坝组;而从测井曲线及逆冲推覆样式等综合分析,玉北3井在奥陶系存在3个地层重复层段:①5 164~5 256 m(视厚92 m);②5 256~5 340 m(视厚84 m);③5 340~5 459 m(视厚119 m),这再次佐证上述地层划分的合理性。

2.2 沉积亚相

本区在奥陶纪早、中期,随着海平面的上升,从先期的局限台地向开阔台地演化。从玉北3井揭示的第1回次至第3回次(埋深5 258~5 266 m)岩心可以看出(图3),蓬莱坝组主要为潮上-潮间的云坪、云灰坪及粒屑滩相的粉晶云岩、中-细晶云岩、亮晶砂屑灰岩及硅化的中-细晶云岩及埋藏或热液改造作用下的粗晶云岩及鞍形白云石等(图3);而第4至第5回次(埋深5 356.75~5 364.20 m)岩心揭示一套夹潮道砾屑-砂屑滩-潮上低能带(云坪)沉积,可能属于蓬莱坝组的上段。玉北1井鹰山组

揭示了以下主要沉积组合:①砂屑滩-藻滩-灰泥丘;②砾屑滩-砂砾屑滩夹潮道-砂屑滩(图3f);③夹潮道砂砾屑滩-低能滩-藻丘,以台内滩为主要特征;而玉北3井的鹰山组沉积组合主要为:①潮上藻席(或灰泥丘)-砂屑滩;②砂屑滩-潮间藻席;③潮间砂屑滩-潮下藻席(丘)-潮下低能带。

测井曲线上Th/K含量的比值时显的指示出沉积环境和水体深浅的变化。研究认为^[23],浅水潮坪中的泥岩与深水盆地泥岩自然伽马放射性强度(SGR)都是高值,自然伽马不能区分水体深浅变化,而铀易于溶解并在成岩过程中发生迁移,不利于判断原始沉积状况。而Th/K含量比值从高到低反映沉积矿物的化学成熟度和风化程度逐渐降低。在远离陆源的海相碳酸盐岩沉积区,高Th/K含量比值代表风化暴露(Th/K>20,特征矿物为风化残积的铝土矿等),低Th/K含量比值代表低能深水环境(Th/K<2,特征矿物为海绿石),中等Th/K含量比值则代表深浅过渡环境(2<Th/K<20)。

从玉北1井、玉北3井共17个回次的GR及Th/K曲线分析(图4,图5),Th/K值相对高的往往对应于砂屑滩、灰云坪及潮上藻席等亚微相;但也有对应于低能的藻滩及灰泥丘(如玉北1井埋深5 715.50~5 716.50 m);同时基本上对应于大气水岩溶作用带,如玉北3井埋深5 363.00~5 364.20和5 368.80~5 369.50 m;玉北1井埋深5 604.00~5 604.50,5 613.00~5 614.00,5 618.50~5 619.00 m、5 719.00~5 719.50 m等;但也有少数对应于海底胶结带,如玉北3井埋深5 443.50~5 444.50 m;玉北1井埋深5 721.60~5 722.20 m或海底胶结与大气水作用过渡带,如玉北3井埋深5 447.80~5 449.20 m。

3 成岩作用

3.1 成岩作用

碳酸盐岩的成岩环境大致可划分出海底、大气水及埋藏成岩环境或混合水成岩环境,不同成岩环境具有典型的组构。

2口井中的176件薄片、铸体及阴极发光等观察表明,以海底胶结作用及大气水渗、潜流带的成岩作用为主,且叠加了埋藏或热液作用特征。其中,海底胶结作用较为常见的有泥晶套、泥晶化颗粒、泥晶壳、凝块、等厚纤状环边(图5a)以及少量新月形胶结、硬化粪球粒、硬化的鲕粒等。大气水渗、潜流带中渗流粉砂(图5b)、粒状方解石胶结物(图5a,c)、悬垂状胶结物、不发光的铁方解石(图5e)以及部分硅化及非组构溶解形成的孔洞与洞穴。埋藏或热液作用成岩

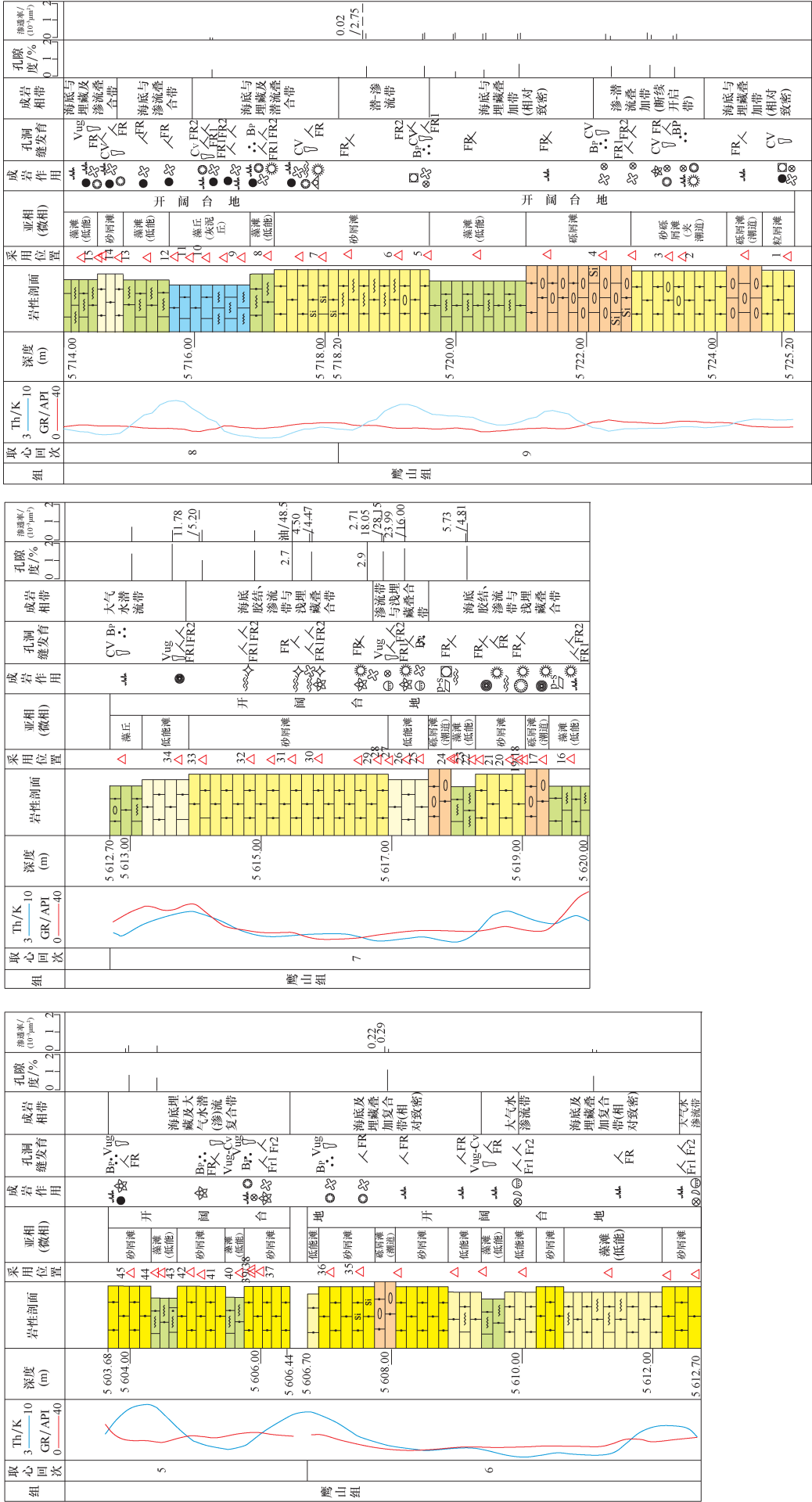


图3 王北1井鹰山组第5-第9回次地层、岩相、成岩及储集物性发育综合柱状图(图例见图4)
Fig. 3 Composite columnar section of cores from the Yingshan Formation in well YB1 including stratigraphic, sedimentary facies, diagenetic facies and reservoir properties

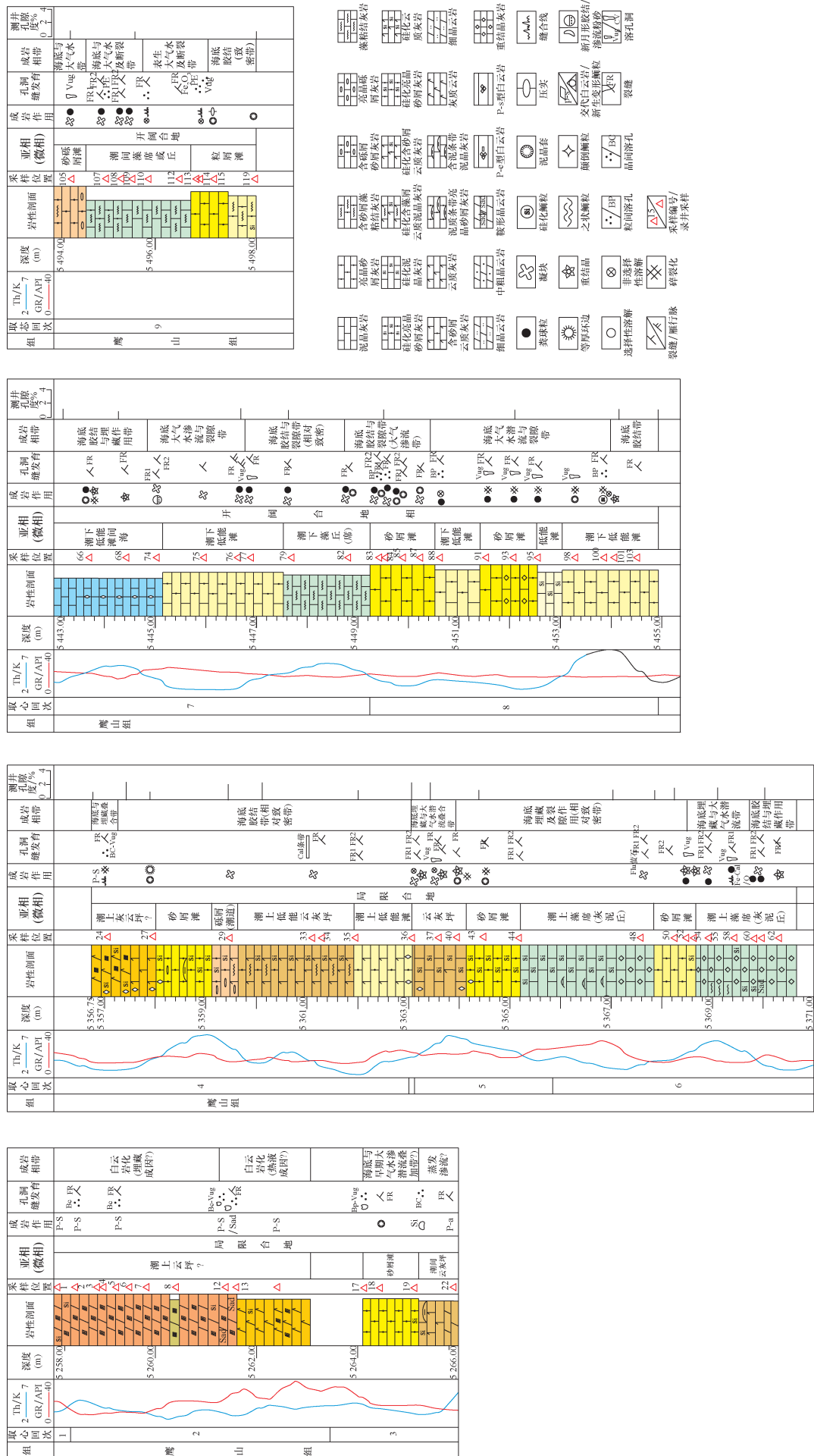


图4 玉北3井蓬莱坝组(1—5回次)—鹰山组(6—9回次)地层、岩相、成岩及储集物性发育柱状图
Fig. 4 Composite columnar section of cores from the Yingshan and Penglaiba Formations in well YB3, including stratigraphic, sedimentary facies, diagenetic fabrics and type of reservoirs

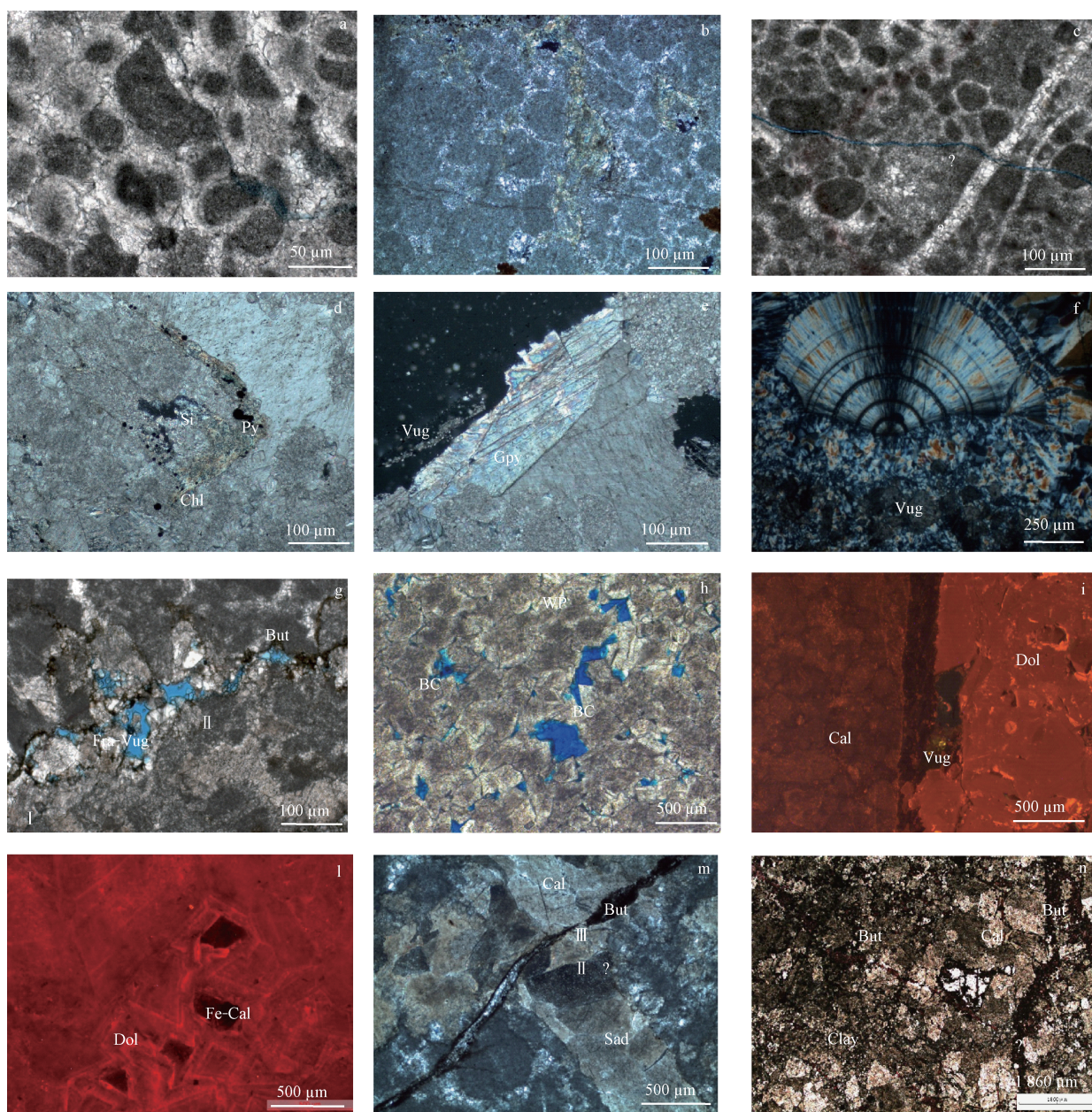


图5 麦盖提东部中、下奥陶统鹰山组-蓬莱坝组碳酸盐岩主要成岩作用、孔隙类型微观特征

Fig. 5 Major diagenesis and pores of reservoir (casting-thinning) for Yingshan Formation in Eastern Maigaiti slope

a. 玉北1井,埋深5 614.86 m,亮晶扭亚藻,藻鲕粒灰岩,纤状与粒状胶结,海底胶结与其潜流带胶结;b. 玉北1井,埋深5 613 m,微粉晶砂屑灰岩,绿黄色渗滤泥质,大气水渗流带;c. 玉北1井,埋深5 603.99 m,亮-粉晶藻凝块、藻砂屑灰岩,两期裂隙,早期裂隙(I)方解石所充填,晚期(IV)开启;d. 玉北1井,埋深5 722.25 m,粉泥晶藻凝块含屑砂屑灰岩,裂隙与溶孔中渗滤粉砂、绿泥石化(Chl)、硅化(Si)或黄铁矿(Pyrr),大气水与热液作用叠加;e. 玉北1井,埋深5 719.45 m,硬石膏(Gpy)充填溶洞(Vug),细粒状黄铁矿,;f. 玉北3井,埋深5 360 m,孔洞中(Vug)的放射状硅质交代;g. 玉北1井,埋深5 606.06 m,泥-粉晶凝块状粒屑灰岩,沿裂隙(II)-溶孔部分充填为沥青(But);h. 玉北1-2X井,埋深5 130.46 m,中-粗晶云岩,晶间孔(BC)、晶间及粒内溶孔(WP);i. 玉北1井,埋深5 714.73 m,粉亮晶藻凝块藻粉砂屑灰岩,溶洞中方解石(Cal)不发光或斑块状亮黄红光,白云石(Dol)发亮橙黄红色,二期充填,Cal;l. 玉北3井,埋深5 261.38 m,中-粗晶白云岩,早期铁方解石(Fe-Cal)不发光,环带状的中-粗晶白云石(Dol)发亮红色光,二期充填,Cal;m. 玉北3井,埋深5 361.0 m,云质泥微晶砂屑灰岩,异型白云石(Sad)被裂缝中的方解石、沥青穿过(But);n. 玉北3井,埋深5 364.59 m,粗-中晶含灰云岩,碎裂化,裂隙中先后被方解石和白云石、粘土(Clay)及沥青(But)充填

现象也较普遍,主要有粒状方解石、镶嵌状、缝合线以及中粗晶(环带状)云化(图5h,i)、放射状硅化(图5f)、鞍形白云石(图5m)、硬石膏(图5e)、绿泥石(图5d,n)、立方体黄铁矿及沥青充填(图5d,g,m,n)和少量萤石、之状或颠倒鲕粒等现象。另外,与断裂-裂隙带及有关的流体也是常见的组构,构成网状或碎裂构

造,重结晶作用较强。

玉北1井取心段的成岩组构分析如下(图3)。

①在第5至第6回次(埋深5 603.78~5 612.70 m)中,有2层,单层厚为2.3~2.5 m,普遍发育以泥晶套、凝块为典型特征的海底胶结作用为主,另外有3层、单层厚度为0.3~1.2 m的渗流砂、非组构溶解

及缝洞发育的大气渗潜流带。②在第7回次(埋深5 612.70 ~ 5 620.00 m)中,主要由2层、单层厚2.5 ~ 3.0 m之状或颠倒鲕粒、重结晶、云化为特征的埋藏成岩作用带,下部叠加了厚2.5 m的泥晶套、凝块和等厚纤状为特征的海底胶结带;同时还伴有2层、单层厚0.30 ~ 0.60 m、渗流砂、非组构溶解及缝洞的大气渗潜流带发育。③第8回次(埋深5 714.00 ~ 5 718.20 m)中,总体为低能藻滩-灰泥丘-砂屑滩亚相,主要发育了泥晶套、凝块、泥晶化颗粒和等厚纤状环边的海底胶结为主的成岩带,夹有3层、单层厚为0.20 ~ 0.30 m、溶孔洞方解石充填的早期大气水作用带,但其下部还夹有新生颗粒变形、之状或颠倒鲕粒、缝合线为代表的埋藏成岩作用带。④第9回次(埋深5 718.20 ~ 5 725.20 m)中,夹有一薄层低能藻滩、总体为中高能砂砾屑滩-潮道旋回,向上变浅的沉积序列,发育了4层、单层厚为0.20 ~ 0.45 m、非组构溶解及缝洞发育的大气渗潜流带,但其中、下部仍保留了泥晶套、凝块和等厚纤状为特征的海底胶结带。总体反映了玉北1井相互叠加的海底、大气水及埋藏作用。但海底、埋藏作用带的单层厚度较大,而大气水岩溶作用带主要呈多层、中薄层,且受高能沉积相带、裂隙带及其扩溶作用的控制。

玉北3井取心段的成岩组构分析如下(图4)。①第1至第3回次((埋深5 258.10 ~ 5 266.00 m),主要为中粗晶云岩夹有一套亮晶砂屑灰岩构成的砂屑滩(埋深5 264.00 ~ 5 265.10 m)。其中,白云石晶体大小为0.25 ~ 0.50 mm,自形晶-半自形晶,镶嵌结构,含硬石膏和重晶石,主要为P-S型白云岩,并有一些强烈硅化中粗晶云岩和鞍形白云石晶体。②第4至第6回次(埋深5 356.75 ~ 5 370.02 m)主要为潮上灰云坪-潮上低能滩-藻席或灰泥丘夹砂屑滩沉积。岩性上可分为上、下两段,上段(埋深5 356.75 ~ 5 363.00 m)发育了泥晶套、凝块以及P-S型白云岩化的海底胶结作用带;下段(埋深5 363.00 ~ 5 370.02 m)同样发育了以泥晶套、凝块、泥晶化颗粒的海底胶结带,但重结晶现象较普遍,发育有多期裂隙及铁方解石、石英和萤石等。而在上、下段之间,岩石的碎裂化明显、非组构溶解普遍,反映断裂-裂隙及其扩溶作用较发育。③第7至第8回次(埋深5 443 ~ 5 455 m)主要为一套潮下低能滩、藻丘(席)及砂屑滩沉积,仍以泥晶套、凝块、泥晶化颗粒的海底胶结作用为主,但夹有单层厚0.10 ~ 0.25 m的5层溶孔洞、1层渗流砂或2层非组构溶解与裂隙。④第9回次(埋深5 494 ~ 5 498 m)以潮间的砂屑滩与潮间藻丘为主,以泥晶套、凝块的海底胶结作用为主,存在2层非组构溶解的薄层。总体来看,玉北3井的海底胶结作用较强,大气水的渗潜流带呈多层、

薄层,与沉积亚微相关系不明显,但与多期裂隙、碎裂化作用及扩溶作用关系密切、且伴有后期热液作用及其矿物的充填。

另外,缝洞方解石与灰岩基质的碳氧同位素及包裹体等研究表明,缝洞中的方解石与基质的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值较为相似,具有一定的继承性,反映了同生期或早期的大气水溶蚀特征。部分缝洞方解石比灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显偏负($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -2.5\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} = -11.8\text{‰}$),反映了表生期的大气淡水淋滤作用。至少有四期左右的缝洞方解石充填过程,其中,I期:均一温度平均为62.7℃,盐度为17.6 wt%;II期:均一温度平均为110.4℃,盐度为1.65% ~ 2.47%;裂隙II期:均一温度平均为94.8℃,盐度为7.96% ~ 10.48%;裂隙III-IV期:均一温度平均为125.2℃,盐度分别为7.25% ~ 8.74%和13.4% ~ 14.47%。

3.2 成岩序列、成岩体系划分及孔隙演化

一般认为,叠合盆地中的古生代碳酸盐岩经历了多期成岩作用的改造,形成复合成岩段^[25]。综上所述,玉北1井、玉北3井的奥陶系鹰山组及蓬莱坝组上部碳酸盐岩可划分出以下成岩阶段:①海底胶结;②大气淡水溶解及早期硅化;③伴有云化压实与压溶;④表生大气水岩溶,以氧化铁、方解石、泥质、硅化等为标志;⑤浅埋藏作用,主要表现为重结晶、硬石膏化、黄铁矿化、进一步压实与压溶等;⑥沿不整合面和断裂-裂隙的表生大气水岩溶,基本同④,但可能有早期烃类的细菌作用及水洗氧化沥青及烃类充注;⑦深埋藏作用段;⑧热液改造作用段,以重结晶、铁方解石、鞍形白云石、萤石、早期泥质充填的粘土的伊利石化和绿泥石化等为标志。纵向成岩环境与成岩体系可划分为以下3种情况。

1) 海底胶结与埋藏成岩作用叠加带,裂隙不发育或早期孔隙被胶结物充填,位于构造变形的中和面以下或低能的中厚层沉积中,是早期相对开放、后期封闭的成岩亚系统。

2) 海底胶结、大气水岩溶及埋藏作用叠加带,它们往往沿高能沉积相带、二期或多期不整合面、褶皱构造变形的中和面之上、层序界面以及裂隙-碎裂化作用带发育。其中,海底胶结、埋藏作用带的单层厚度较大;而大气水岩溶作用带呈多薄层、或沿断裂-裂隙追踪性发育,且往往叠加了后期构造-热液作用,属于开放体系的成岩亚体系。

3) 介于上述二者之间的叠加作用带,以海底胶结和埋藏作用叠加为主,发育一些规模较小的微裂隙及其扩溶带,属于半封闭成岩亚体系。

综上所述,第2类沿构造褶皱轴部-翼部断裂发

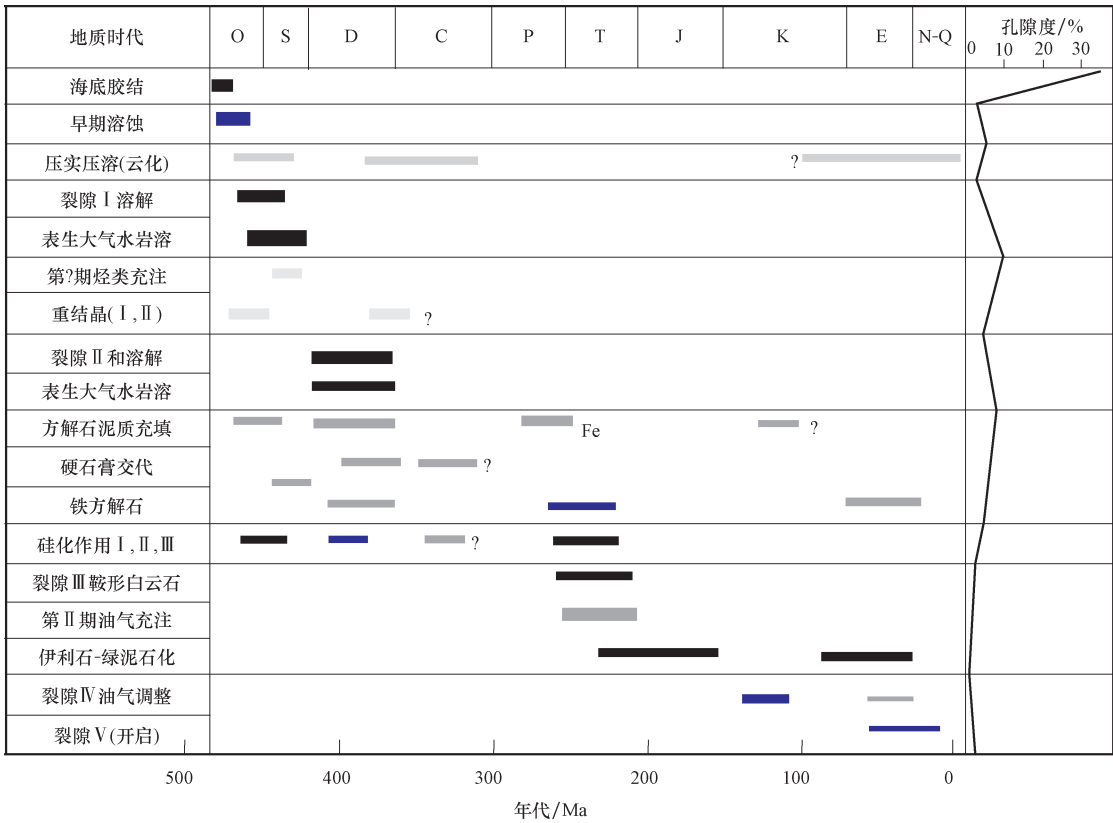


图 6 麦盖提东部鹰山组碳酸盐岩成岩作用及孔隙形成与演化示意图

Fig. 6 Major diagenesis and formation & filling of pores for the Yingshan Formation in Eastern Maigaiti slope

育带为主相对开放的成岩环境有利储层发育,主要成岩作用过程或阶段可归纳为以下过程(图 6):海底胶结(泥晶套-纤状胶结)-新月或悬垂状及渗滤粉砂-早期微裂隙 I-粒间局部溶蚀、充填及重结晶-压实压溶(缝合线)及准同生期云化-早期裂缝 II、大气水表生岩溶孔洞-方解石及泥质充填-铁方解石、硬石膏化、埋藏云化、重结晶及热液溶蚀及充填作用-孔洞中(铁)方解石+异型白云石+萤石+硅化、裂缝 III、烃类运移与调整及相态或蚀变-重结晶-粘土绿泥石化、裂缝 IV 及油气调整和晚期开启裂缝 V。建设性的成岩作用及过程是扩溶裂隙-孔洞发育的表生大气水作用、早期大气水作用和多期构造裂缝等;而广泛分布的早期海底成岩作用、重结晶作用、硅化作用以及包括泥质、方解石等充填作用是储层致密化的主要原因(图 6)。

4 储集空间、物性及储层分布

依靠玉北 1 井、玉北 3 井等奥陶系岩心观察、测井资料以及玉北 1 井 23 件实测的岩石孔、渗参数等综合分析,鹰山组储集空间类型主要有裂缝、裂缝-孔洞以及少量洞穴-孔洞。而在蓬莱坝组中,除了上述类型外,还存在溶孔型,主要是白云岩(化)的晶间孔、晶间及粒间溶孔。

玉北 1 井发育了 3~4 期裂隙及溶蚀孔洞。①近平行排列或树枝状裂隙,细粉晶方解石全充填(埋深 5 716.38 m 和 5 603.99 m)(图 5 c),但被后期开启裂隙穿过(埋深 5 606.30 m 和 5 717.68 m)。②扩溶裂隙呈网状或弯曲状、与缝合线类似,一是被细粉晶方解石、沥青、黄铁矿充填(埋深 5 618.57 m);另外由细粉晶方解石、沥青、粘土充填,粘土边缘常发生绿泥石化、黄铁矿(埋深 5 713.75 m)。③扩溶裂隙及溶洞,被细粉晶方解石全充填后再溶蚀,发育了粒间孔隙+沥青(埋深 5 607.56 m 和 5 606.06 m)(图 5 g)。④相对晚期的较平直、平行的水平开启裂隙(图 5 c)。详见文献[21]。

玉北 3 井发育了 4~5 组裂隙及溶孔洞。①低角度(10°~15°)裂隙(图 5 c)或共轭裂隙(图 5 i)及孔洞;充填或半充填棕红色与灰绿色的方解石、灰绿色泥及渗滤粉砂,后被高角度透明的方解石充填有裂隙所切割。②中低、中高角度(30°~60°)裂隙及扩溶缝洞(图 5 b, d)中,由灰绿色泥、渗滤粉砂、沥青、红棕色方解石条带、石英、铁方解石、白云石等充填(图 6 e)。③高角度裂隙,由褐黄方解石、渗滤粉砂、灰绿色泥、黄铁矿以及重结晶作用带(图 3 h)。④网状或共轭裂隙,分别由沥青、硅化;其次为渗流砂、白色方解石充填(图 3 g)。⑤平行或直立及共轭的开启裂隙。



图7 玉北3井及玉北1井部分岩心段上的多期裂隙、缝洞充填特征

Fig. 7 Multi-stage fractures and vugs and their fillings in the cores from Well YB3 and Well YB1

a. 硅化的中-粗晶云岩,方解石全充填孔洞, O_{1p} ; b. 重结晶云质灰岩中3组裂隙,灰绿色泥质、沥青或开启未充填, O_{1p} ; c. 粗晶云岩中的低角度、网状及中-高角度开启裂隙, O_{1p} ; d. 硅化、重结晶亮晶砂屑灰岩中的中-高角度裂隙及溶孔、低角度与近水平缝及少量孔洞,绿色泥质充填,渗流-淋滤带, O_{1-2y} ; e. 强烈硅化的微晶灰岩,高角度裂隙与网状裂隙, O_{1-2y} ; f. 亮晶砾屑灰岩、砾屑呈扁平长轴状、直径大小为2~5 mm,倾角近70°,砾屑的长轴近直立,与压溶缝合线一致,反映了压溶后地层褶皱变形, O_{1-2y} ; g. 角砾状重结晶的硅化灰岩,网状裂隙中沥青充填, O_{1-2y} ; h. 不规则块状硅化亮晶砂屑灰岩,沿二组裂隙中的褐黄色斑块方解石、黄铁矿等充填,淋滤带, O_{1-2y} ; i. 藻粘结灰岩、二组共轭裂隙,沥青充填, O_{1-2y}

玉北1井23件鹰山组实测的孔、渗参数(图3)分析表明,孔隙度变化范围为0.1%~2.9%,平均为1.1%;垂直渗透率变化为 $0.001 \times 10^{-3} \sim 2.71 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $0.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;但其中有5件样品的水平(I)渗透率变化为 $4.8 \times 10^{-3} \sim 23.99 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $12.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;水平(II)变化为 $4.7 \times 10^{-3} \sim 28.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $11.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;反映了局部的水平裂隙较为发育。对玉北3井24岩心段的测井孔隙率解释表明,孔隙度变化范围为0.4%~4.7%,平均为1.88%。

从孔、渗发育段与不同的岩相、成岩作用段等关系可见(图3,图4):①玉北1井的鹰山组埋深为5612~5620 m是孔渗相对较好的层段,对应为砂屑滩沉积为主、大气水潜、渗流带发育带及裂隙-(孔洞)发育带;②玉北1井的鹰山组埋深为5714~5718.20 m、玉北3井鹰山组-蓬莱坝组埋深为5364.00~5368.30 m等是孔渗性较差的层段,对应为低能的藻滩和灰泥丘、海底胶结与埋藏成岩为主,孔隙不发育但裂隙相对发育;③玉北1井的鹰山组埋深为5603~5612.70 m和5718.20~5725.20 m及玉北3井鹰山组埋深为5443~5455 m介于上述成岩相带之间,由砂屑滩和低能藻(丘)等组成,以海底胶结、埋藏成岩和薄层的大气水作用带为特点,孔渗物性一般至较差。

5 储层发育模式

基于麦盖提东段中、下奥陶统鹰山组-蓬莱坝组碳酸盐岩中的钻井录井以及岩心等综合资料提出储层发育模式如下。

1) 玉北3井钻揭的奥陶系碳酸盐岩出现下奥陶统蓬莱坝组云岩或云灰岩出现于上部,而鹰山组颗粒灰岩出现在下部,反映了断裂逆冲作用导致了地层的层序倒置。

2) 玉北1井鹰山组中的亮晶砾屑灰岩(埋深5608 m左右)以及玉北3井(埋深5494 m左右)高角度斜列分布的砾屑呈扁平长轴状,长宽为(10~15)mm×(2~5)mm,倾角近70°,砾屑的长轴近直立,与斜向的压溶缝合线一致;可能反映了鹰山组碳酸盐岩浅埋藏(约0.7 km)压溶后,发生了加里东晚期至海西早期的褶皱或断裂逆冲作用。

3) 多组开启的直立裂隙;中低角度、网状裂隙中往往伴生有反映氧化-大气水作用的棕红色方解石、渗滤砂及灰绿色泥的充填;反映了与断裂-裂隙有关的大气水渗流带的存在。

4) 据成像、钻井录井资料等判断,玉北1井有两个相对规模较大的裂缝-孔洞发育带,一是埋深为5604~5620 m,为裂隙-孔洞及洞穴发育带-潜流带;二是埋深为5714~5730 m白云岩中溶孔-裂

隙带,可能相当于潜流带中的弥散流(带)。而玉北3井发育有多个裂缝-孔洞带:埋深5 182~5 192 m;5 220~5 227 m;5 273~5 274 m;5 281~5 282 m;5 374~5 379 m;5 423~5 434 m;5 455~5 456 m;5 474~5 479 m;5 482~5 488 m,反映了玉北3井的断裂-裂隙或其扩溶作用更发育。

5) Loucks^[26]总结了6种古岩溶相类型,即未受影响地层相、受影响地层相、强烈影响地层相、混杂角砾岩相(坍塌角砾岩和搬运角砾岩)和沉积物充填相。据此判断,玉北1及玉北3井揭示主要岩心段属于受影响-强烈影响的地层相。未发现塔河油田的巨晶方解石充填洞穴、多旋回的渗、潜流流和机械沉积物^[6];反映了玉北1、玉北3井的渗、潜流分带不明显;可能是加里东中期地貌平缓、水动力不强或已遭受剥蚀;也可能是因为后期受逆冲构造影响,地层倾角较大,大气水沿高陡层的快速流动、不利于发生大规模的溶蚀。

6) 东段断褶带上由于缺失志留系至泥盆系,翼部残留上奥陶统,较难区分加里东晚期或海西期形成的构造潜山-岩溶风化壳,但平台区的 T_7^0 和 T_6^0 总体呈削截、局部为上超特征。反映了继承性发育的特征;玉北1井鹰山组顶部风化壳的碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年龄最小值为442 Ma,也反映了加里东中、晚期的构造不整合有关的岩溶作用可能存在。

综上所述,推测主要经历了以下过程:①加里东早期至加里东中期,由于中(下)寒武统盐膏层的塑性变形,形成与盐相关的盐拱背斜、重力滑脱及小型盐穿刺的花状构造,或引起局部沉降,构成具有一定起伏的地貌,为台内滩-台间海发育提供了基本条件;受层序界面或海平面变化的控制^[27],早期发育大气水的溶解作用;②加里东中期一幕(T_7^4)碳酸盐岩台地处于和田古隆起的北部缓坡,缺失中奥陶统一间房组,岩溶作用主要受断层相关褶皱背斜中和面上部及向斜中和面下部高角度或低角度断裂^[24]、挤压-弱伸展的高角度裂隙及构造抬升(尤其是断裂上盘)作用的控制;③加里东中期二幕(T_7^2)受北东向基底卷入逆冲构造控制,断展构造或断裂上盘、地貌高地发生的岩溶作用,叠加形成大气水渗流带及潜流带;晚奥陶世,大部被淹没;④加里东晚期(T_7^0)-海西早期(?),玉北北东向构造带发生进一步逆冲推覆及抬升剥蚀,在高部位或逆冲断裂上盘,局部地层产状变陡,加里东中、晚期大气水岩溶形成的地表渗流带-部分潜流带遭受剥蚀,后期沿断褶带顶部及翼部叠加发育高角度断裂-裂隙,发育了由多期裂隙-大气水扩溶共同作用控制的“落水洞”;以地貌差异较大、单层至多层段渗、潜流残留分带叠加改造

为特征;⑤海西晚期弱伸展-走滑构造,出现一些高角度开启裂隙(图8)。

6 结论与讨论

综上所述,麦盖提斜坡东部的北东构造带奥陶系碳酸盐岩经历了多期构造运动,其岩溶作用及储集体分布的主要特征如下。

1) 鹰山组以开阔台地的台内滩-滩间海沉积为主,蓬莱坝组为潮上-潮间的云坪、云灰坪及粒屑滩沉积。地貌较平缓、早期大气水作用下发生溶解及充填;后期受逆冲断裂影响,地层局部产状变陡甚至造成地层倒置。

2) 可划分出8种成岩段:包括海底胶结、大气淡水溶解及早期硅化、伴有云化压实与压溶、表生大气水岩溶、浅埋藏作用、沿不整合面和断裂-裂隙的表生大气水岩溶、深埋藏作用段和热液改造作用段。

3) 海底胶结、大气水岩溶及埋藏成岩作用往往在纵向上叠加。但海底胶结、埋藏作用带往往是单层厚度较大,而大气水岩溶作用带主要呈多薄层分布。在构造相对平缓区、受高能沉积相带控制的早期大气水作用较为发育;沿断裂-裂隙发育带的表生大气水作用与沉积亚相不明显,且常伴有后期构造热液作用的叠加改造。

4) 与褶皱-逆冲断裂有关的碳酸盐岩大气水成岩作用强度与受所处的构造部位有关。位于背斜中和面以下的海底胶结作用强,为早期开放、后期封闭的成岩亚系统;位于构造变形中和面之上的褶皱顶部及翼部、多期不整合面或层序界面、断裂上盘的裂隙及碎裂化作用较发育或以高能沉积相带的大气水作用为主;早期海底成岩、埋藏作用及后期构造-热液作用往往叠加,属于的开放体系的成岩亚相。

5) 岩溶相带属于受影响-强烈影响的地层相。大气水主要有两种流动方式,一是沿裂隙、倾斜(地)层的渗流;二是沿相对高的渗透层的高频层序界面-高能相(带)体的弥散流;褶皱轴部的地表渗流带一部分潜流带常受遭剥蚀,沿高角度断裂-裂隙的追踪性大气水作用形成了以多期裂隙-大气水扩溶缝洞为特征的“落水洞”;并与早期潜流残留带相叠加,导致了岩溶带中的渗、潜流分带不明显,以缝为主,少数洞穴的特点。

笔者认为,针对叠合盆地中的古生代碳酸盐岩岩溶作用的系统研究,关键在于对岩溶动力系统研究^[28],包括古水动力、古气候、古地貌等因素的分析,但可能更为重要的是与构造不整合有关的抬升-剥蚀(量)、多期断裂相关褶皱-裂隙和古潜水作用面-流

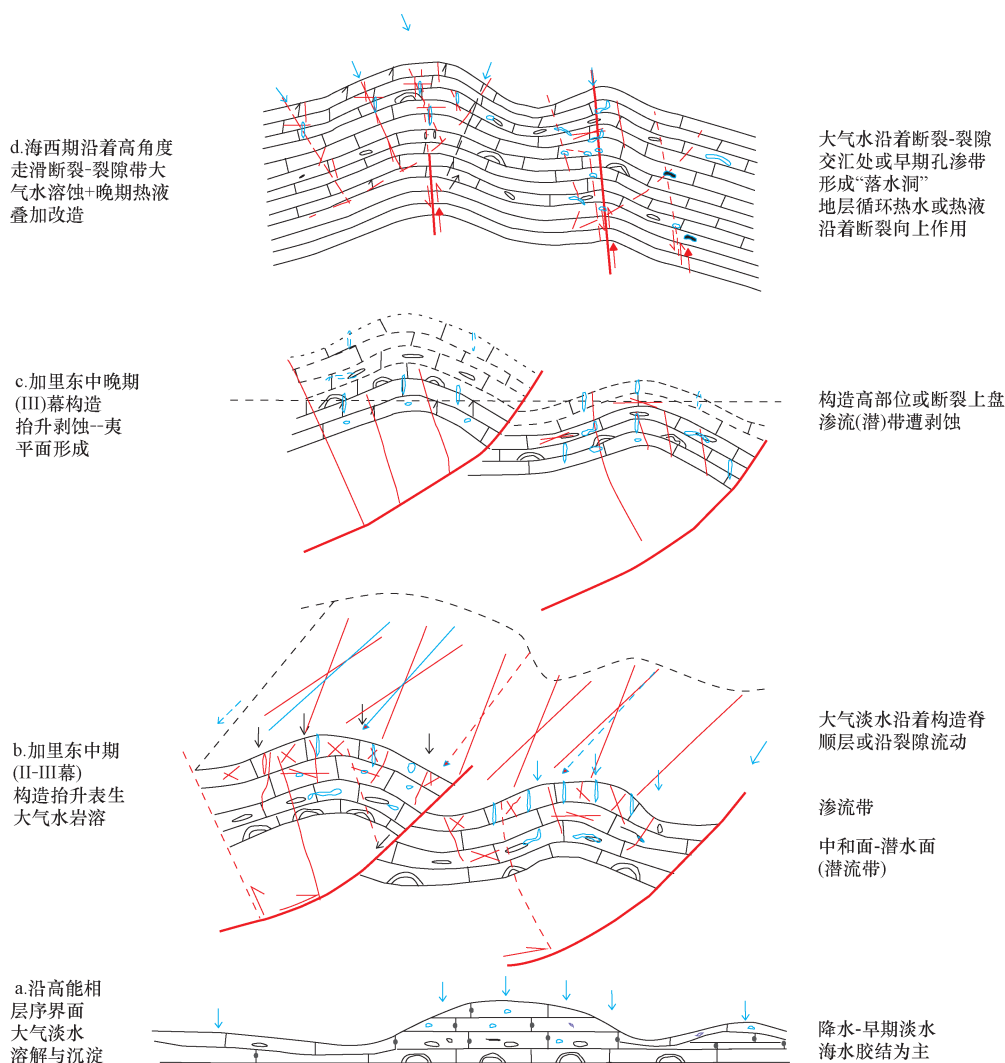


图8 麦盖提东段古生代构造演化与奥陶系碳酸盐岩储层发育模式

Fig. 8 Diagram showing the evolution of the Early Paleozoic tectonic and development model for the Ordovician carbonate reservoirs in Eastern Maigaiti slope

体性质及水-岩反应等方面的研究,进而更好地解释复杂的成岩体系,揭示储集体发育的非均质机理及时空分布。

参 考 文 献

- [1] Robert G. I. Paleocave carbonate reservoirs: origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications [J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(6): 1795 - 1831.
- [2] Budd D A, Saller A H, Harris P M. Unconformities and porosity in carbonate strata [J]. AAPG Bulletin, 1995, 63(1): 35 - 123.
- [3] Eduard Kosa, David W Hunt. Heterogeneity in fill and properties of karst-modified syn-deposition faults: Upper Permian Capitan platform, New Mexico, U. S. A [J]. Journal of Sedimentary Research, 2006, 76(1): 131 - 151.
- [4] Julia F W, Gale, Leonel A, et al. Late opening-mode fractures in karst-brecciated dolostones of the Lower Ordovician Ellenburger Group, west Texas: recognition, characterization, and implications for fluid flow [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(7): 1005 - 1023.
- [5] 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.
- [6] 陈洪德, 张锦泉, 叶德胜, 等. 新疆塔里木盆地北部古岩溶储集体特征及控油作用 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1994: 27 - 77.
- [7] 张涛, 蔡希源. 塔河地区加里东中期古岩溶作用及分布模式 [J]. 地质学报, 2007, 81(8): 1125 - 1134.
- [8] Sean A, Guiday, Mark Grasmueck, et al. Karst and early fracture networks in carbonates, Turks and Caicos islands, British West Indies [J]. Journal of Sedimentary Research, 2007, 77(3): 508 - 524.

- [9] 罗开平,范明,刘运黎,等. 受力状态下白云岩溶蚀实验及其地质意义[J]. 石油实验地质,2012,34(4):451-453.
Luo Kaiping, Fan Ming, Liu Yunli, et al. Experiment of dolomite dissolution in stress state and its geologic significance[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(4):451-453.
- [10] 乔占峰,沈安江,邹伟宏,等. 断裂控制的非暴露型大气水岩溶作用模式—以塔北英买2构造奥陶系碳酸盐岩储层为例[J]. 地质学报,2011,85(12):2070-2083.
Qiao Zhenfeng, Shen Anjiang, Zou Weihong, et al. A fault-controlled Non-exposed Meteoric karstification—A case study of Ordovician Carbonate Reservoir at structure YM2 in Northern Tarim Basin[J]. Northwestern China, 2011, 85(12):2070-2083.
- [11] 马晓强,侯加根,胡向阳,等. 塔里木盆地塔河油田奥陶系断控型大气水岩溶储层结构研究[J]. 地质论评,2013,59(3):521-532.
Ma Xiaoliang, Hou Jiagen, Hu Xiangyang, et al. Framework of fault controlled Meteoric Palaeokarst Ordovician reservoirs in Tahe Oil-field, Tarim Basin[J]. Geological Review, 2013, 59(3):521-532.
- [12] 吕海涛,张仲培,邵志兵,等. 塔里木盆地巴楚—麦盖提地区早古生代古隆起的演化及其勘探意义[J]. 石油与天然气地质,2010,31(1):76-83.
Lv Haitao, Zhang Zhongpei, Shao Zhibin, et al. Structural evolution and exploration significance of the Early Paleozoic palaeouplifts in Bachu—Maigaiti area, the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1):76-83.
- [13] 崔海峰,卫平生,张年春,等. 麦盖提斜坡西段奥陶系岩溶储层分布特征及勘探意义[J]. 中国石油勘探,2010,(6):34-39.
Cui Haifeng, Wei Pingsheng, Zhang Nianchun, et al. The distribution and exploration significance of Ordovician Karst reservoir in Western Maigaiti slope[J]. China Petroleum Exploration, 2010, (6):34-39.
- [14] 张年春,黄思静,崔海峰,等. 塔里木盆地麦盖提斜坡西段奥陶系古潜山储层研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2011,38(2):169-174.
Zhang Nianchun, Huang Sijing, Cui Haifeng, et al. Research on seismic features of Ordovician Paleo-buried hill of the west section of Maigaiti slope, Tarim Basin[J]. Journal of ChengDu University of technology (Science & Technology Edition), 2011, 38(2):169-174.
- [15] 张仲培,刘士林,杨子玉,等. 塔里木盆地麦盖提斜坡构造演化及油气地质意义[J]. 石油与天然气地质,2011,32(6):909-918.
Zhang Zhongpei, Liu Shilin, Yang Ziyu, et al. Tectonic evolution and its petroleum geological significances of the Maigaiti Slope, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(6):909-918.
- [16] 郭光辉,李洪辉,张立平,等. 塔里木盆地麦盖提斜坡奥陶系风化壳成藏条件[J]. 石油勘探与开发,2012,39(2):144-153.
Wu Guanghui, Li Honghui, Zhang Liping, et al. Reservoir-forming conditions of the Ordovician weathering crust in the Maigaiti slope, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2):144-153.
- [17] 丁文龙,漆立新,云露,等. 塔里木盆地巴楚—麦盖提地区古构造演化及其对奥陶系储层发育的控制作用[J]. 岩石学报,2012,28(8):2542-2556.
Ding Wenlong, Qi Lixin, Yun Lu, et al. The tectonic evolution and its controlling effects on the development of Ordovician reservoir in Ba-
- chu-Markit, Tarim basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(8):2542-2556.
- [18] 云金表,周波,王书荣. 塔里木盆地玉北1井背斜带变形特征与形成机制[J]. 石油与天然气地质,2013,34(2):215-19.
Yun Jinbiao, Zhou bo, Wang Shurong. Deformation characteristics and forming mechanism of the Well Yubei 1 anticline belt in the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(2):215-219.
- [19] 黄太柱. 塔里木盆地玉北地区断裂系统解析[J]. 石油与天然气地质,2014,35(1):98-106.
Huang Taizhu. Analysis on the fault system of Yubei region, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1):98-106.
- [20] 刘忠宝,吴仕强,刘士林,等. 塔里木盆地玉北地区奥陶系储层类型及主控因素[J]. 石油学报,2013,34(4):638-646.
Liu Zhongbao, Wu Shiqiang, Liu Shilin, et al. Types and main controlling factors of Ordovician reservoirs in Yubei area, Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 34(4):638-646.
- [21] 乔桂林,钱一雄,曹自成,等. 塔里木盆地玉北地区奥陶系鹰山组储层特征及岩溶模式[J]. 石油实验地质,2014,36(4):416-421.
Qiao Guilin, Qian Yixiong, Cao Zicheng, et al. Reservoir characteristics and karst model of the Ordovician Yingshan Formation in Yubei area, Tarim basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(4):416-421.
- [22] Erik Flugel. Microfacies of carbonate rocks[M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004:657-724.
- [23] 中国石油勘探与生产分公司. 碳酸盐岩油气藏测井评价技术及应用[M]. 北京:石油出版社,2009:105-123.
The exploration and production company of PetroChina. Application for the logging technology of carbonate reservoirs[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009:105-123.
- [24] 余和中,钱玲,韩守华,等. 张裂型褶皱下中和面顺层张裂区:一类有利储层发育区——兼谈塔里木盆地碳酸盐岩溶蚀储层的发育特征[J]. 海相油气地质,2013,18(2):51-55.
Yu Hezhong, Qian Ling, Han Shouhua, et al. Bedding tensional zone of the lower neutral plane in tensional fold: a favorable reservoir development area, also on development characteristics of karst reservoirs Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2013, 18(2):51-55.
- [25] 王琪,史基安,陈国俊. 塔里木盆地西部碳酸盐岩成岩演化与储层形成关系[J]. 沉积学报,2001,19(4):548-555.
Wang Qi, Shi Jian, Chen Guojun. Characteristics of diagenetic environments of carbonate rocks in western Tarim basin and their controls on the reservoir property[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(4):548-555.
- [26] Loucks R G. Understanding the development of breccias and fractures in Ordovician carbonate reservoirs[J]. Texas Geological Society Publication, 2001, 03:231-252.
- [27] Moore C H. Carbonate reservoirs: porosity evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework[M]. Amsterdam: Elsevier Publication, 2001.
- [28] 蒲俊兵,袁道先. Karst Hyporheic Zone 及其研究进展[J]. 中国岩溶,2013,32(1):7-13.
Pu Junbing, Yuan Daoxian. Karst Hyporheic Zone and the scientific progress[J]. Carsologica Sinica, 2013, 32(1):7-13.