

塔中地区深层寒武系盐下白云岩 储层特征及主控因素

倪新锋^{1,2}, 黄理力^{1,2}, 陈永权³, 郑剑锋^{1,2}, 熊益学³, 朱永进^{1,2}, 杨鹏飞³, 李 昌^{1,2}

(1. 中国石油 杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023; 2. 中国石油 碳酸盐岩储层重点实验室, 浙江 杭州 310023;

3. 中国石油 塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:塔中地区东部深层寒武系盐下白云岩勘探取得重大发现,但针对该层系白云岩储层的研究尚属空白。利用钻井、岩心、薄片、扫描电镜、测井及三维地震资料,对塔中寒武系盐下白云岩产层的储层类型、特征、主控因素及展布规律开展探索性研究,认为塔中寒武系盐下白云岩主要发育颗粒滩相白云岩储层和潮坪相膏云岩储层。颗粒滩相白云岩储层主要发育在下寒武统肖尔布拉克组以及中寒武统沙依里克组上段,岩性以台内藻砂屑滩相颗粒白云岩、藻白云岩及粉细晶白云岩为主,明显受岩相控制,形成于准同生期,并受后期层间岩溶作用改造优化。潮坪相膏云岩储层主要发育在中寒武统阿瓦塔格组及沙依里克组下段,岩性以含膏云岩、泥粉晶云岩、膏云质角砾岩为主,明显受岩相及裂缝控制,形成于准同生期,并受后期有机酸溶蚀作用形成微孔型储层。目前而言,下寒武统肖尔布拉克组台内藻砂屑滩相颗粒白云岩储层是最现实的勘探领域。

关键词:储层特征;盐下白云岩;寒武系;塔中地区;塔里木盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics and main controlling factors of the Cambrian pre-salt dolomite reservoirs in Tazhong Block, Tarim Basin

Ni Xinfeng^{1,2}, Huang Lili^{1,2}, Chen Yongquan³, Zheng Jianfeng^{1,2}, Xiong Yixue³, Zhu Yongjin^{1,2}, Yang Pengfei³, Li Chang^{1,2}

(1. Hangzhou Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou 310023, China; 2. Key Laboratory of Carbonate Reservoir, PetroChina, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 3. Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China)

Abstract: Studies on the Cambrian pre-salt dolomite reservoirs is still rare in eastern Tarim Basin, although the exploration there has made great discovery. Research on reservoir types and characteristics, main controlling factors and distributions of the Cambrian pre-salt dolomite reservoirs were presented on the basis of drilling data, cores, thin section SEPM, logging and 3-D seismic data. The results show that grain dolomite reservoir of beach facies and gypsodolomite reservoir of tidal flat facies are two main reservoirs in the pre-salt dolomite of Cambrian in Tazhong Block, Tarim Basin. The former exists in the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation and the Middle Cambrian Upper Shayilike Formation. Lithologies include algae granular dolomite from shoals in platform proximate, algae dolomite and silty crystalline dolomite, and were mainly controlled by facies. The reservoir quality are mostly inherited from deposition and the porosity was improved by the later interlayer Karst processes. The latter mainly exists in the Middle Cambrian Awatage Formation and Middle Cambrian Lower Shayilike Formation. Lithology include gypsiferous dolostone, silty crystalline dolomite, gypsodolomite breccia and they were controlled by both petrography and later fracturing. For its microporous reservoir, the matrix formed during deposition while micropores formed due to later organic acid dissolution. Nowadays, the favorable objectives are most likely to be grain dolomite reservoirs of beach facies in Lower Cambrian Xiaerbulake Formation.

Key words: reservoir characteristics, pre-salt dolomite, Cambrian, Tazhong Block, Tarim Basin

收稿日期:2015-12-31;修订日期:2017-01-16。

第一作者简介:倪新锋(1978—),男,博士,高级工程师,沉积学与含油气盆地分析。E-mail:nixf_hz@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05004-002);中国石油股份公司重大科技专项(2014E-32)。

塔里木盆地塔中地区东部深层寒武系盐下白云岩勘探取得重大发现,在中深1井中寒武统阿瓦塔格组和沙依里克组以及下寒武统肖尔布拉克组获高产工业油气流,连续生产407天,累产气约 $1.26 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。继中深1井之后,中深5井中寒武统沙依里克组再获油流,累计产气 $13\,173 \text{ m}^3$ 。由此,寒武系盐下白云岩领域将会成为最重要的勘探接替层系之一。

限于钻井和岩心资料(迄今全盆地钻遇中-下寒武统盐下白云岩井25口,取心累计193.63 m),前人通常将塔里木盆地寒武系—奥陶系白云岩储层合并到一起研究^[1-10],而目的层位主要集中在中寒武统阿瓦塔格组、上寒武统丘里塔格组以及中-下奥陶统鹰山组和蓬莱坝组,研究区以塔西南巴楚地区、塔北英买力-牙哈地区为主,少量涉及轮南-塔河地区及古城-古隆地区,而单独针对深度达到6 000~7 000 m的塔中地区中-下寒武统新突破的盐下白云岩储层研究尚属空白。

目前的研究进展主要来自于盐上白云岩层系储层的成因类型、储集空间类型及主控因素,且存在分歧,焦点主要为准同生成因形成的基质孔隙还是埋藏成因形成的后期溶蚀孔隙?哪种成因占主导?对于盐下白云岩是否适用?借鉴前人的研究成果,初步认为发育颗粒滩相白云岩储层、潮坪相膏云岩储层,关键问题有两个:①颗粒滩相白云岩储层钻井资料非常有限,储层类型、成因难以确定;②膏云岩储层段测试见部分产能,而该层岩心观察无显孔,孔隙类型不清,控制因素不明,而同层位的牙哈地区属于潜山区,储层的类型和主控因素是否适用于非潜山区的中深井区。本文将利用目前塔中地区中深井区钻遇盐下白云岩的3口井(中深1、中深5和塔参1)的录井资料、57.72 m岩心、636个普通和铸体薄片、测试分析、常规测井、成像测井及三维地震资料,对这套盐下白云岩产层的储层类型、特征、主控因素及展布规律开展探索性研究,以期对塔中乃至整个塔里木盆地寒武系盐下深层白云岩规模储层进行预测。

1 区域地质背景

塔中地区位于塔里木盆地中央隆起带上,是一个长期发育的继承性隆起。塔中隆起在震旦系沉积前已初现雏形,后经历柯坪、加里东及海西3次大型构造运动改造,于石炭系沉积前基本定型^[6-7,11]。前震旦纪,“东南高、西北低”的古地貌背景控制了寒武纪早期沉

积(图1a),中-下寒武统由西部向东部超覆减薄。晚奥陶世,塔中I号断裂构造带形成,古隆起由东高西低的格架演化为北西走向的断裂褶皱构造带。晚奥陶世—志留纪是塔中隆起得到进一步继承和发展的阶段,形成中央主垒带与塔中北斜坡10号构造带两排断裂构造带。泥盆纪晚期的早海西运动是盆地演化过程中发生的最重要的构造事件之一,塔中主垒带再次隆升,形成大量的石炭系披覆下的碳酸盐岩潜山。石炭纪以后,塔中古隆起持续深埋,构造活动弱。地层自下而上依次为:下寒武统玉尔吐斯组(ϵ_{1y})、肖尔布拉克组(ϵ_{1x})、吾松格尔组(ϵ_{1w}),中寒武统沙依里克组(ϵ_{2s})、阿瓦塔格组(ϵ_{2a})和上寒武统下丘里塔格组(ϵ_{3xq})。地层岩性以白云岩为主, ϵ_{1x} 和 ϵ_{3xq} 为颗粒白云岩和结晶白云岩, ϵ_{2s} 、 ϵ_{2a} 和 ϵ_{1w} 为膏质白云岩、云质膏岩和泥晶白云岩, ϵ_{1y} 为黑色泥岩和页岩,东部主垒带缺失(图1b)。塔中地区自 ϵ_{1y} 至 ϵ_{3xq} 整体经历了深水陆棚—开阔台地—局限台地—蒸发台地—半局限台地—开阔台地相的演化过程,寒武纪表现为水体由深变浅、再变深的过程。

2 白云岩储层类型及特征

2.1 白云岩储层类型

对于白云岩储层类型的划分标准主要有两种:一种是以储集空间为划分标准,另外一种是以成因为划分标准。从分类的角度看,以孔隙类型和成因类型为储层划分的方案皆可行,但从油气勘探来讲,塔中地区寒武系处于勘探前期,以成因类型为划分标准的分类方案更适用于生产,更具预测作用,故采用赵文智的分类方案^[1-2,5]。研究认为,塔中新突破区寒武系盐下白云岩主要发育颗粒滩相白云岩储层和潮坪相膏云岩储层两类。颗粒滩相白云岩储层主要发育在下寒武统肖尔布拉克组以及中寒武统沙依里克组上段,岩性以台内藻砂屑滩相颗粒白云岩、藻白云岩及粉细晶白云岩为主,明显受岩相控制,形成于准同生期,并受后期层间岩溶作用改造优化,区域规模分布。潮坪相膏云岩储层主要发育在中寒武统阿瓦塔格组及沙依里克组下段,岩性以含膏云岩、泥粉晶云岩、膏云质角砾岩为主,明显受岩相及裂缝控制,形成于准同生期,并受后期有机酸溶蚀作用形成微孔型储层,分布局限(图1b)。

2.2 白云岩储层特征

2.2.1 白云岩储层岩石类型

白云岩微观结构对储集空间的发育具有控制作

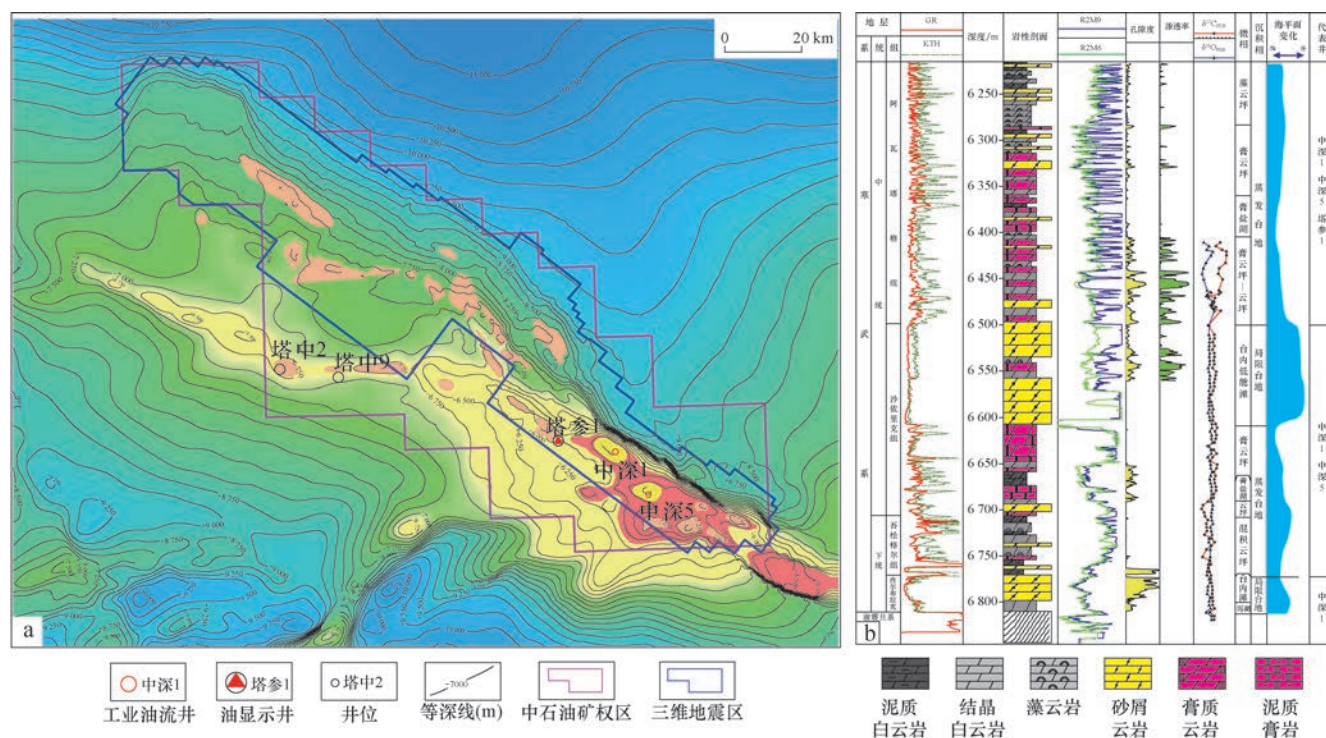


图1 塔中地区中-下寒武统地质背景

Fig. 1 Geological background of the Lower-Middle Cambrian in Tazhong Block

a. 塔中地区下寒武统顶面构造; b. 塔中地区中深井区中-下寒武统综合柱状图

用^[6-7,12]。根据白云岩中原岩结构保留程度的不同,将中深井区中-下寒武统盐下白云岩储层岩石类型分为保留残余结构的白云岩和无法识别原始结构的结晶白云岩。

保留原始结构的白云岩包括泥-粉晶白云岩和颗粒白云岩。中深井区的泥-粉晶白云岩主要分布在中寒武统与蒸发岩相伴生层段的潮坪相膏云岩储层中,部分角砾化严重(图2a-c),少量泥晶-粉晶白云岩还保留明显的藻纹层状结构(图2d)。白云石晶径0.001~0.05 mm,晶体细小,晶形较差,以它形为主,少量半自形,晶体之间多为致密镶嵌接触^[6]。常与膏岩层呈互层状或混合角砾化产出,缺乏晶间显孔,在扫描电镜和激光共聚焦下可见晶间微孔隙。在以往研究中,常把这类白云岩归属到结晶白云岩中^[1-2,6],但现在一般认为泥-粉晶白云岩是准同生期卤水快速交代的产物,形成时间比较早^[13-14],原始沉积环境具有水浅、低能和盐度较高的特点。此类中深井区白云岩另外一个特征就是成层性好,横向分布稳定,大量发育,且与石膏伴生,部分角砾化,故单独列出。中深井区的颗粒白云岩主要分布在下寒武统肖尔布拉克组以及中寒武统沙依里克组上段的颗粒滩相白云岩储层中,为一套保留了颗粒幻影的残余颗粒白云岩,主要以鲕粒白云岩和砂屑白云岩为主(图2e-g),指示原始沉积

环境为颗粒滩相沉积。与中寒武统膏云岩伴生的白云岩段也有少量薄层颗粒白云岩发育。

研究区无法识别原始结构的结晶白云岩主要为粉-细晶白云岩,少量中-粗晶白云岩赋存于孔缝边缘,发育层位下寒武统肖尔布拉克组以及中寒武统沙依里克组上段(图2h,i)。岩层呈薄-厚层状分布,厚度在5~25 m。该类白云岩中的白云石晶径分布范围较宽,介于0.01~0.2 mm,属粗粉晶-细晶级,以极细-细晶级为主,晶体形态从它形-自形晶均有,但以半自形晶为主。

2.2.2 白云岩储层储集空间类型

根据研究区57.72 m岩心观察、636个普通和铸体薄片、12个激光共聚焦和15个扫描电镜样品分析结果,认为塔中地区寒武系盐下白云岩发育晶间孔、晶间溶孔、晶间微孔、溶蚀孔洞、粒内溶孔、石膏铸模孔及裂缝等孔隙类型,其中晶间溶孔、溶蚀孔洞、晶间微孔和裂缝构成最主要的储集空间类型。

1) 晶间孔和晶间溶孔

主要发育于颗粒滩相的粉-细晶白云岩中。晶间孔属于组构选择性孔隙,处于较好形态的自形-半自形白云石晶体之间。但根据中深1和中深5井有限的薄片资料来看,纯粹由晶间孔组成的储层极为有限,大

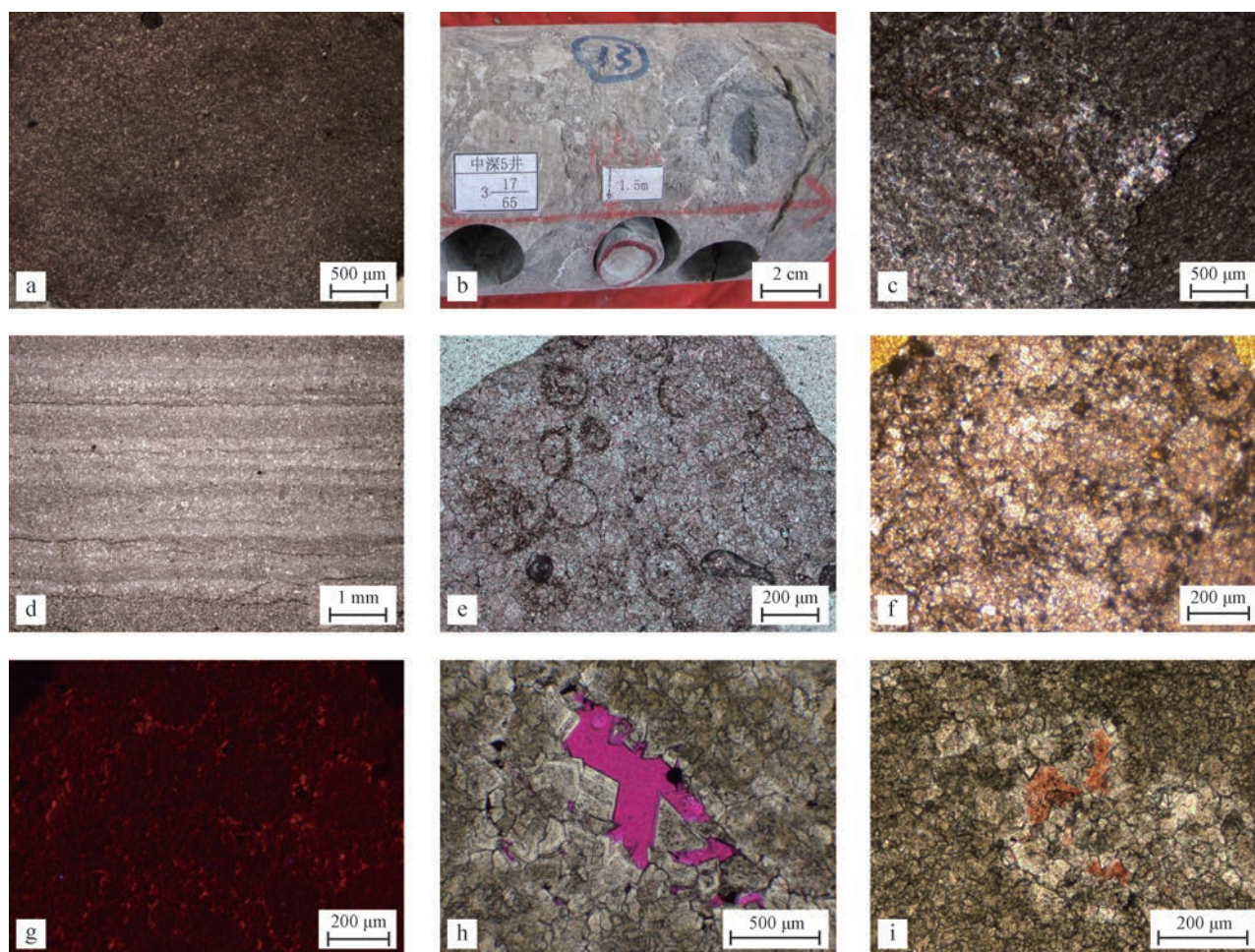


图2 塔中地区中深井区寒武系盐下白云岩储层岩石学特征

Fig. 2 Petrology characteristics of the Cambrian pre-salt dolomite reservoirs in Zhongshen region, Tazhong Block

- a. 中深1井,埋深6 380 m, ϵ_{2a} ,泥晶白云岩,岩屑薄片,单偏光;b. 中深5井,埋深6 193 m~6 193.27 m, ϵ_{2a} ,角砾化泥-粉晶白云岩,岩心;c. 中深5井,埋深6 193.18 m, ϵ_{2a} ,角砾化泥-粉晶白云岩,薄片,正交偏光;d. 中深1井,埋深6 714.8 m, ϵ_{1w} ,纹层状泥晶白云岩,岩屑薄片,单偏光;e. 中深1井,埋深6 786 m, ϵ_{1x} ,砂屑鲕粒白云岩,岩屑薄片,单偏光;f. 中深1井,埋深6 794 m, ϵ_{1x} ,砂屑鲕粒白云岩,岩屑薄片,单偏光;g. 中深1井,埋深6 794 m, ϵ_{1x} ,砂屑鲕粒白云岩,岩屑薄片,CL,与e同视域;h. 中深5井,埋深6 282.49 m, ϵ_{2s} ,细晶白云岩,晶体呈镶嵌状,铸体,单偏光;i. 中深5井,埋深6 708.65 m, ϵ_{1w} ,粉-细晶白云岩,晶体呈镶嵌状,溶蚀孔洞被方解石充填,铸体,单偏光

多与溶蚀作用有关形成晶间溶孔,印证了白云岩储集空间的形成主要与原岩特征和各种溶蚀作用有关的新观点^[1-2]。研究区晶间溶孔的白云石边缘具有明显溶蚀痕迹,孔隙形态不规则,呈港湾状或条带状分布(图3a,b),扫描电镜上能区别出白云石晶间未溶蚀的硬石膏(图3b)。通常是在晶间孔的基础上进一步溶蚀扩大形成的。

2) 溶蚀孔洞

是塔中寒武系盐下颗粒滩相白云岩储层中最常见的孔隙类型。在岩心上,溶蚀孔洞一般在2 mm以上,并达到厘米级,形态不规则,多呈串珠状、蜂窝状或拉长状分布(图3c,d),由多个白云石晶体部分或全部溶解而形成,其发育多与沿裂缝的后期扩溶改造有关。在显微镜下观察,溶蚀孔洞边缘具有港湾状特征,面向

孔隙中心方向可见方解石和鞍状白云石胶结物(图3c)。在成像测井图像上,未充填或泥质充填的孔隙一般表现为暗色高导斑点或斑块,常与FMI图像暗色高导正弦线曲线形态的裂缝相伴生,易识别(图3e)。同晶间溶孔一样,发育该类孔隙的白云岩通常具有较好的物性。

3) 晶间微孔

是塔中寒武系盐下白云岩新近发现的一种孔隙类型。这类储层发育在中深1井和中深5井的 ϵ_{2a} 和 ϵ_{2s} (图1b),测试效果良好。中深1井 ϵ_{2a} 日产油15.4~5.1 m³,日产气10 301~1 731 m³,累产油99.5 m³,气25 508 m³;中深5井 ϵ_{2s} 下段6 mm油嘴放喷,折日产油17.1 m³,日产气11 804 m³。但这类储层目前尚未形成工业性产能,仅放喷一段时间后即停产。这可能

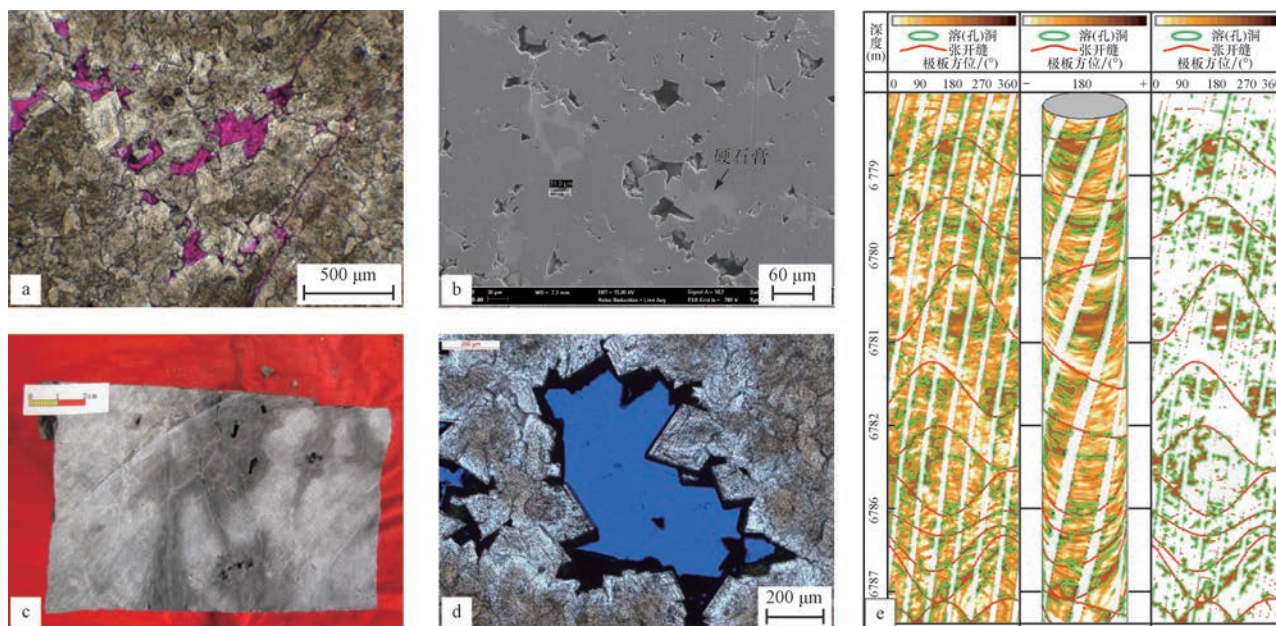


图3 塔中地区中深井区寒武系盐下白云岩储层常规孔隙特征

Fig. 3 Conventional porosity characteristics of the Cambrian pre-salt dolomite reservoirs in Zhongshen region of Tazhong Block

a. 中深5井,埋深6 282.63 m, ϵ_{2s} , 细晶白云岩,晶间溶孔发育,铸体,单偏光;b. 中深5井,埋深6 196.8 m, ϵ_{2a} , 含膏粉晶白云岩,晶间孔发育,白云石晶间残留硬石膏,SEM;c. 中深5井,埋深6 281.0 m, ϵ_{2s} , 砂屑白云岩,溶蚀孔洞发育,岩心;d. 中深5井,埋深6 282.78 m, ϵ_{2s} , 细晶白云岩,溶蚀孔洞发育,铸体,单偏光;e. 中深1井,埋深6 778~6 774.5 m, ϵ_{1x} , 溶蚀孔洞发育,孔洞和裂缝相伴生,成像测井

是由于该目的层埋深大,工程难度高,制约了完井测试。但单从储层的角度来看,对于这类储层的孔隙类型目前争议较大,本文做一些探索性研究。研究区晶间微孔主要发育于膏云坪相含膏云岩、纹层状泥-粉晶白云岩及角砾状含膏云岩中,分布均匀,孔隙小但连通性较好。按照 Choquette (1970) 的标准,将小于 $10\mu\text{m}$ 的孔隙称为微孔隙。通过场发射扫描电镜、激光共聚焦和岩石 CT 等表征新技术,结合镜下薄片观察,发现塔中寒武系盐下膏云岩储层中大量发育微孔隙,主要有3种赋存状态:破碎型晶间微孔、均匀型晶间微孔和晶内溶孔。破碎型晶间微孔分布于砾间和各类缝破碎带及周缘的云质或膏质中,宏观表现为与缝伴生(图4a—d),白云石他形-半自形,远离破碎带则孔隙发育急剧衰减,部分切割早期膏质条带(图4e)。工业 CT 扫描结果表明,此类孔隙与微缝伴生特征明显(图4f),孔喉连通性中等,连通体积百分比为45.4%,孔隙半径为 $0.4\sim 5.3\mu\text{m}$,喉道半径为 $0.4\sim 3.9\mu\text{m}$,孔喉半径呈典型正态分布。均匀型晶间微孔主要见于较纯的云岩、含膏云岩中,选择性发育在较纯的云质中,膏质含量高时不发育(图4g,h)。晶间微孔总体分布均匀,工业 CT 扫描结果表明,少量孔隙可达几十微米,宏观上呈团块状、缝状、带状富集。此类孔隙孔喉连通性较高,孔隙半径 $0.4\sim 4.7\mu\text{m}$,喉道半径 $0.4\sim 3.2\mu\text{m}$,孔喉半径呈双峰趋势(图4i)。晶内溶孔主

要发育于白云石中,几乎“有云必有孔”,与晶间微孔规律一致,孔径多为几百纳米(图4j—l)。

总体来讲,塔中中深井区盐下白云岩晶间微孔隙以破碎型晶间微孔为主,其次为均匀型晶间微孔,晶内溶蚀微孔虽然发育较多,但其较孤立,孔吼联通性差,若无微裂缝沟通,则难以形成规模联通孔隙。

4) 裂缝

是塔中地区中深井区盐下白云岩储层中常见的储集空间类型,主要发育在膏质泥晶白云岩、角砾膏质白云岩和云质膏岩以及颗粒白云岩中,多为构造细缝和微裂缝,溶蚀缝主要发育在颗粒白云岩中,泥晶白云岩中少见。在角砾膏质白云岩和云质膏岩中可见呈网状分布的破裂缝,可见泥质或沥青充填。在颗粒白云岩中常见沿裂缝经历溶蚀改造而成的溶缝、溶孔(图2h,图3e,图4a,图4c,图4d)。裂缝往往和其他孔隙类型组合形成复合型裂缝-孔隙型或裂缝-孔洞型储层。

2.2.3 白云岩储层物性特征

根据塔中寒武系盐下白云岩119个小柱塞样品和2个全直径样品的孔隙度及渗透率分析以及测井解释的储层物性(图5),主要有以下特征。

由于取心的局限性,孔渗小柱塞样品只分布于阿瓦塔格组(ϵ_{2a})、沙依里克组(ϵ_{2s})、吾松格尔组(ϵ_{1w})

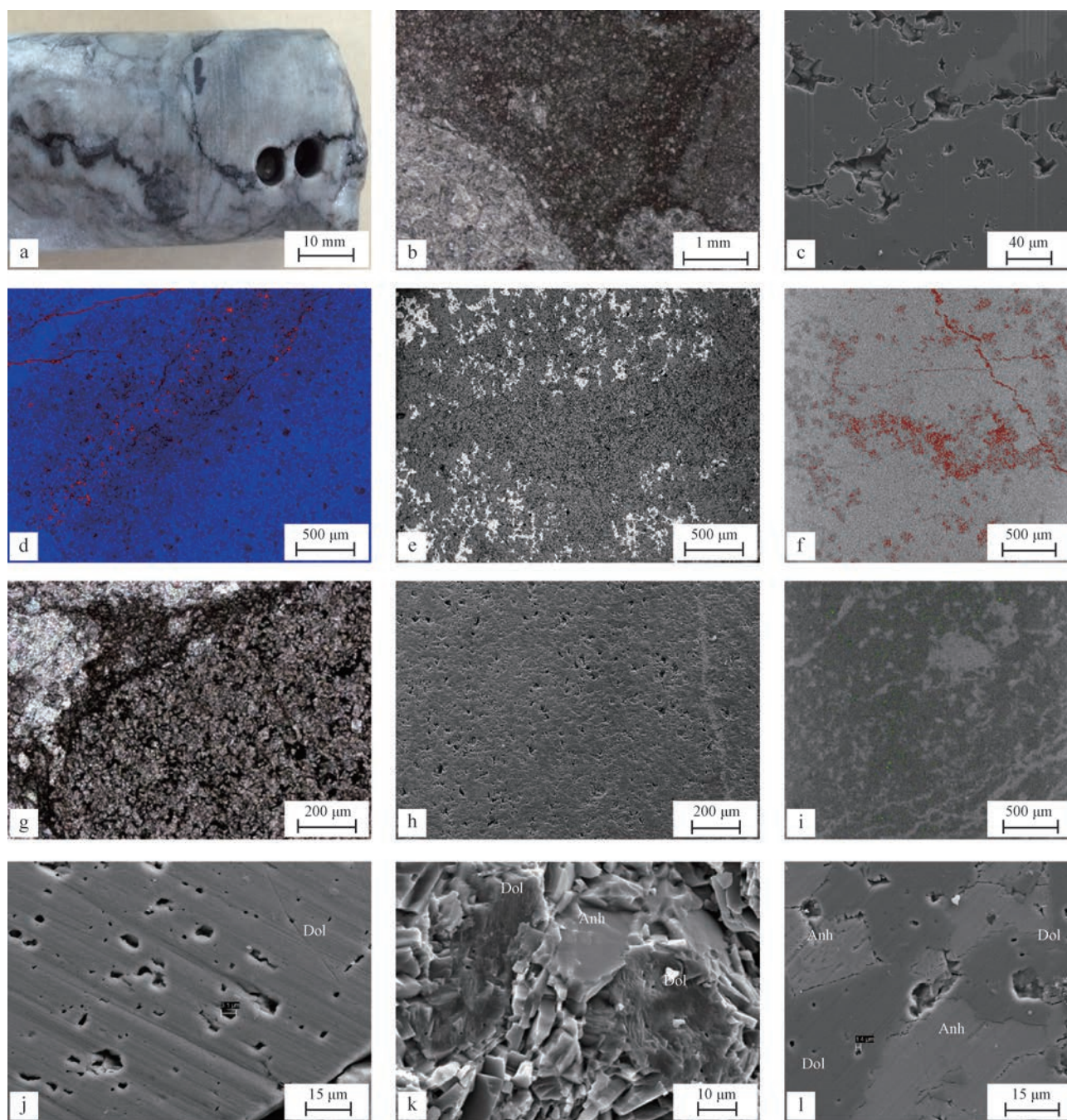


图4 塔中地区中深井区寒武系盐下白云岩储层微孔隙特征

Fig. 4 Micro-porosity characteristics of the Cambrian pre-salt dolomite reservoirs in Zhongshen region of Tazhong Block

a. 中深5井,埋深6 595.76 m, E_{2s} ,膏质角砾岩,砾间缝、微裂缝发育,25 mm岩心柱塞;b. 中深5井,埋深6 596.20 m, E_{2s} ,砾石间的破碎型微孔,普通薄片,单偏光;c. 中深5井,埋深6 600.02 m, E_{2s} ,含膏泥粉晶云岩,晶间微孔沿微裂缝发育,SEM;d. 中深5井,埋深6 600.1 m, E_{2s} ,孔隙沿微裂缝发育,红色为孔隙,激光共聚焦;e. 中深5井,埋深6 190.58 m, E_{2a} ,微孔隙带切割早期硬石膏胶结(白色),BSD;f. 中深5井,埋深6 595.76 m, E_{2s} ,微孔隙的分布与裂缝及较纯的云质有明显相关性,红色为提取的孔隙,CT扫描;g. 中深5井,埋深6 191.7 m, E_{2a} ,泥粉晶含膏云岩角砾,云质部分微孔隙发育,普通薄片,单偏光;h. 中深5井,埋深6 600.0 m, E_{2s} ,含膏云岩,均匀发育晶间微孔隙,SEM;i. 中深5井,埋深6 598.63 m, E_{2s} ,白云石晶间微孔较均匀分布于云质中(深灰色部分,灰白色部分为膏质,绿色为提取的孔隙,CT扫描;j. 中深5井,埋深6 600.52 m, E_{2s} ,晶内溶蚀微孔隙发育,SEM;k. 中深5井,埋深6 546.0 m, E_{2s} ,白云石普遍溶蚀形成晶内微孔隙,硬石膏晶体完整,SEM;l. 中深5井,埋深6 600.02 m, E_{2s} ,白云石普遍溶蚀形成晶内微孔隙,硬石膏晶体完整,SEM

和肖尔布拉克组(E_{1x})。从实测的数据来看,孔渗普遍偏小: E_{2a} 孔隙度在0.71%~2.85%,平均为

1.52%,平行渗透率为 $(0.106 \sim 84.7) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $3.57 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;岩性主要为角砾化的膏质泥晶

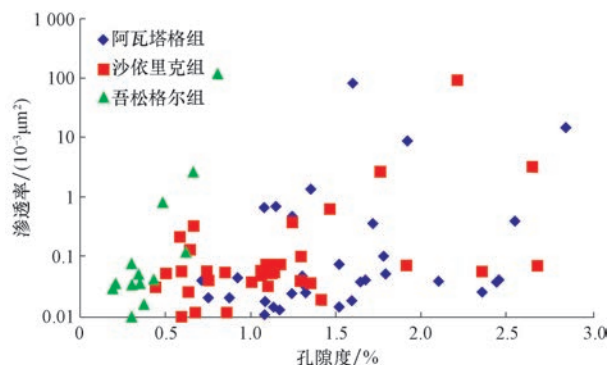


图5 塔中地区中深井区中深1—中深5井
中—下寒武统孔—渗关系

Fig. 5 Porosity vs. permeability in the Middle-Lower
Cambrian section of Wells Zhongshen1 and Zhongshen5
in Zhongshen region of Tazhong Block

白云岩和泥—粉晶白云岩以及云质膏岩。 ϵ_{2s} 孔隙度在 0.44% ~ 2.65%, 平均为 1.14%, 平行渗透率为 $(0.011\ 8 \sim 96.6) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $4.53 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 岩性主要为泥—粉晶白云岩, 部分晶体呈镶嵌状。 ϵ_{1w} 孔隙度在 0.19% ~ 0.81%, 平均为 0.42%, 平行渗透率为 $(0.005\ 1 \sim 124) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $6.63 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 岩性主要为纹层状泥晶白云岩。

从测井解释的物性数据来看, 中深1井 ϵ_{2a} 测井解释Ⅱ类储层 28m/6层, 平均孔隙度为 4.52%; 试井解释渗透率约 $0.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 表明孔隙连通性差; 该层段中深1侧钻井与直井距离 150 m, 但侧钻井储层欠发育, 直接表明该层段储层横向分布连续性差。中深1直井 ϵ_{1x} 测井解释Ⅰ类储层 1m/1层, 孔隙度为 12.6%, Ⅱ类储层 19m/3层, 孔隙度为 8.36%。中深1C试井解释渗透率为 $2.8 \sim 3.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。中深5井 ϵ_{2a} 测井解释Ⅱ类储层 33m/7层, 平均孔隙度为 5.32%。中深5井 ϵ_{2s} Ⅱ类储层 45.5m/8层, 平均孔隙度为 7.69%; 中深5井 ϵ_{1x} Ⅱ类储层 3m/1层, 平均孔隙度为 4.27%。

塔中地区中深井区测井解释具有较好的物性, 与岩心实测数据偏差较大, 造成岩心实测数据与测井解释如此大偏差可能与碳酸盐岩非均质性太强以及取样位置有关。从成像测井上也可看出 ϵ_{2a} 、 ϵ_{2s} 和 ϵ_{1x} 3个层位部分层段具有较好的储集空间(图3e)。以中深5井肖尔布拉克组为例, 本文基于储层均质, 沿井周面上孔洞分布规律与沿井周体积空间的一致的理论假设, 尝试性利用基于成像测井资料定量计算无效孔、有效基质孔和有效次生溶孔孔隙度。从计算的结果来看, 肖尔布拉克组 6 748.5 ~ 6 782.5 m, 有效溶蚀孔隙度范围在 0.04% ~ 7.1%, 平均为 2.2%, 有效基质孔

隙度范围在 0 ~ 1.47%, 平均为 0.44%, 与岩心实测数据吻合度较高。

3 白云岩储层主控因素

前人认为塔里木盆地寒武系深层白云岩储层的主控因素主要有原岩特征、有利的原始沉积相带、白云石化作用的程度与类型、各种溶蚀作用以及断裂作用等^[1-5, 15-23]。就目前研究程度非常低的塔中地区寒武系盐下白云岩储层来讲, 主要的控制因素为有利的原始沉积相带以及各种溶蚀作用。

3.1 有利沉积相带对储层孔隙发育的影响

岩相古地理研究表明, 塔里木盆地在早寒武世具有南高北低、西高东低的构造古地理面貌特点, 古地理格局南北分异, 发育“小礁大滩”缓坡弱镶边沉积模式, 以满西凹陷形成的台内洼地为界, 形成了塔北台缘及礁后滩以及巴东—塔中台内礁滩的泛滩沉积, 塔中高垒带沉积藻云坪及混积坪。中寒武世继承了早寒武世南北分异的沉积格局, 但由于古隆起的幅度降低, 海平面下降, 发育蒸发台地—强镶边台缘沉积模式, 满西凹陷区主要发育大型膏盐湖沉积, 围绕盐湖周缘沉积了一套膏云坪及薄层颗粒滩, 台地边缘的台地内侧方向, 主要分布蒸发台地潮坪亚相及少量颗粒滩。

全盆地的古地理格局决定了塔中地区的相带特征, 作为寒武系盐下白云岩储层发育的物质基础。塔中地区“东南高、西北低”的古构造背景形成了下寒武统肖尔布拉克组沉积总体具有南北分带的特征, 由南往北依次发育混积坪、藻云坪和砂屑滩、砂屑泛滩、潮下低能带及台内洼地。钻揭该套地层的中深1和中深5井位于藻云坪和砂屑滩交互沉积相带, 中深1井肖尔布拉克组累计厚度为 49.3 m, 其中砂屑滩相Ⅰ类储层 1 m/1层, 孔隙度为 12.6%, Ⅱ类储层 19 m/3层, 平均孔隙度为 8.36%。潮坪相测井解释为Ⅲ类储层和非储层, Ⅲ类储层 19.5 m/2层, 平均孔隙度为 2.05%, 非储层 5m/1层, 平均孔隙度只有 0.1%。中深1C井在该套地层的砂屑滩相颗粒白云岩储层中获得了千万方的累产气。因此可以认为, 储层受沉积相控制作用明显, 颗粒滩比潮坪相藻云坪沉积储层条件优越。此种现象也充分说明了有利沉积相带对储层发育具有较强的控制作用。预测有利储层分布区发育在中深1、中深5井区北部和西北部一线的构造斜坡区, 储层分布面积可达 3 175.7 km²。塔中地区中寒武统总体为

蒸发台地沉积,与下寒武统有一定的继承性,也具有南北分带的特征,由南往北依次发育泥云坪、膏云坪及膏盐湖(蒸发泻湖)沉积。钻揭该套地层的中深1和中深5井位于膏云坪相带,局部钻遇薄层砂屑滩,位于满西凹陷区大型膏盐湖沉积的周缘,具备形成规模性膏云岩储层发育的物质条件,分布面积可达2 552.9 km²。但目前而言,中寒武统膏质白云岩储层改造难,完井测试工程难度高,当前工业化规模开采比较困难。

3.2 各种溶蚀作用对储层孔隙发育的影响

研究表明,塔中寒武系盐下白云岩储层主要受3期溶蚀作用的影响:同生期大气淡水溶蚀作用、表生期层间岩溶作用和埋藏期有机酸溶蚀作用。

3.2.1 同生期大气淡水溶蚀作用

该期溶蚀作用通常发生在沉积物沉积后不久,但晚于同生期白云石化作用,多形成粒内溶孔和膏模孔等组构选择性溶蚀。研究区储层发育段下寒武统肖尔布拉克组为局限环境下的砂屑滩沉积,中寒武统为一套蒸发台地沉积,这两类沉积环境最有利于这类溶蚀作用的发生。如中深1井 ϵ_{1x} 6 782 m处岩屑片中见大量的粒内蜂窝状溶蚀孔,面孔率可达15%。粒内溶孔及铸模孔在中深1井6 770~6 794 m的岩屑薄片中所见较多(图2e,f),认为是目前中深1井已产层段的主力储层。这类溶蚀作用形成的孔隙作为后期二次溶蚀的先存孔隙,在 ϵ_{1x} 和 ϵ_{2s} 的颗粒白云岩段较为常见。中深1井和中深5井中-下寒武统与膏云岩伴生的层段中也经常可见膏模孔或粒内溶孔,如中深1井6 442 m处膏质粉晶白云岩中见未完全充填膏模孔。但由于膏云岩段往往是塑性地层,这类溶孔很容易被后期胶结物充填而难以形成有效储层。

3.2.2 表生期层间岩溶作用

除了有利相带之外,层序界面是控制白云岩规模储层发育的关键^[24]。由于研究区钻井及取心资料稀少,我们只能从十分有限的资料并结合区域资料寻找表生期层间岩溶的蛛丝马迹。有几点依据:①中深1井在寒武系碳氧同位素测定中发现了全球范围可等时对比的两期碳同位素负漂移,ROECE异常和AECE异常^[25-26](图1b),分别对应肖尔布拉克组顶部和沙依里克组底部,代表两期海平面下降和暴露,形成两期层间岩溶型白云岩储层。肖尔布拉克组整体背景值 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-0.88‰~0.06‰,平均值为-0.325 8‰;顶部

的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-1.21‰~1.4‰,平均值为-1.363 3‰。对应AECE异常,推测可能存在一个层间岩溶界面。②在薄片非组构选择性溶蚀明显,孔洞发育处白云岩多呈港湾状,且底部可见未被完全溶蚀的白云石堆积,阴极发光呈暗色,显示大气淡水的特征。③野外肖尔布拉克剖面肖尔布拉克组碳氧同位素测定也发现了两期碳同位素ROECE异常和AECE异常,与中深1井可对应。有限的证据表明塔里木盆地寒武系可能存在两期区域性层间暴露,形成表生期层间岩溶作用,特别是对于肖尔布拉克组颗粒滩型白云岩储层尤为明显。④对于阿克苏地区苏盖特布拉克剖面野外储层地质建模初步结果表明,肖尔布拉克组下段到上段共发育7个四级高频旋回以及若干次级单个高频岩性旋回,都具有孔隙总体向上逐渐增多的趋势,规模成层性储层主要发育在旋回的顶部,充分说明储层的发育与不同级别的海平面下降及暴露面有关。

3.2.3 埋藏期有机酸溶蚀作用

埋藏期有机酸溶蚀作用主要发生在膏云岩段。塔中地区中-下寒武统主要发育于这两种环境,藻白云岩和含膏盐白云岩分布较广泛。藻类有机质在一定的埋深条件下容易发生热演化而产生有机酸,对周围的岩石产生溶蚀作用。膏盐岩容易发生溶解作用,并与烃类发生热化学还原作用,促进溶蚀作用的进行而形成溶蚀孔洞。以膏云岩储层的微孔隙成因为例,认为膏云岩段的微孔隙为多种流体作用的结果,但主要为有机酸溶蚀,有几点依据:①微孔主要发育于云质中,膏质没有明显溶蚀且膏质沉淀(胶结)广泛发育,微孔隙的主要成因不是大气淡水作用下的膏质溶蚀。与未经过后期如牙哈地区潜山大面积大气淡水溶蚀改造不同,这套储层位于内幕区,主要为一套裂缝-微孔隙型储层;②微孔隙发育带“切割”膏质条带,即溶蚀作用发生于中-晚埋藏期,甚至是热流体影响之后;③微孔隙的发育与各类缝密切相关;④自生黄铁矿、热液溶孔少见,无明显高温流体地化特征响应;⑤所有孔、缝中都有沥青充填。由此推断膏云岩发育段具备有机酸溶蚀发育的条件。

需要指出的是,塔中地区经历多期构造活动,发育多期断裂,裂缝发育,对储层后期改造和物性改善具有控制作用。杨海军等^[27]认为埋藏热液溶蚀流体活动在塔中地区奥陶系碳酸盐岩储层中是具有规模的,并对储层的优化改造有积极的贡献。主要表现为埋藏期深部流体沿裂缝发育带、油气排泄有利区及先期形成的孔隙发育带发育,对成岩蚀变和扩溶缝洞具有重要

作用,是研究区一种重要的建设性成岩作用。由此可以推断,由下往上运移的深部热液流体势必会对奥陶系下伏的寒武系储层产生重要的影响,还有待进一步深化研究。

4 结论与认识

1) 塔中寒武系盐下白云岩主要发育颗粒滩相白云岩储层和潮坪相膏云岩储层两类。颗粒滩相白云岩储层主要发育在下寒武统肖尔布拉克组以及中寒武统沙依里克组上段,岩性以台内藻砂屑滩相颗粒白云岩、藻白云岩及粉细晶白云岩为主,明显受岩相控制,形成于准同生期,并受后期层间岩溶作用改造优化,规模分布。潮坪相膏云岩储层主要发育在中寒武统阿瓦塔格组及沙依里克组下段,岩性以含膏云岩、泥粉晶云岩和膏云质角砾岩为主,明显受岩相及裂缝控制,形成于准同生期,并受后期有机酸溶蚀作用形成微孔型储层,分布局限。

2) 目前而言,下寒武统肖尔布拉克组台内藻砂屑滩相颗粒白云岩储层是最现实的勘探领域。中寒武统潮坪相膏云岩储层具有较好的潜力,但目前储层改造难,完井测试工程难度高,尚不能工业化开采。

参 考 文 献

- [1] 赵文智,沈安江,胡素云,等.塔里木盆地寒武-奥陶系白云岩储层类型与分布特征[J].岩石学报,2012,28(3):758-768.
Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Hu Suyun, et al. Types and distributional features of Cambrian-Ordovician dolostone reservoirs in Tarim Basin, northwestern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(3):758-768.
- [2] 赵文智,沈安江,郑剑锋,等.塔里木、四川及鄂尔多斯盆地白云岩储层孔隙成因探讨及对储层预测的指导意义[J].中国科学:地球科学,2014,44(9):1925-1939.
Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Zheng Jianfeng, et al. The porosity origin of dolostone reservoirs in the Tarim, Sichuan and Ordos Basins and its implication to reservoir prediction[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(9):1925-1939.
- [3] 刘迪.塔里木盆地深层寒武系储层特征及形成机理研究[D].成都:成都理工大学,2013.
Liu Di. A research of the deep Cambrian reservoir formation mechanism in Tarim area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [4] 张新华,黄文辉,王安甲,等.塔里木盆地下古生界白云岩储层发育控制因素分析[J].西北大学学报(自然科学版),2009,39(2):288-292.
Zhang Xinhua, Huang Wenhui, Wang Anjia, et al. Analysis of the reservoir development controlling factors of the Cambro-Lower Ordovician dolomite in Tarim Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2009, 39(2):288-292.
- [5] 焦存礼,邢秀娟,何碧竹,等.塔里木盆地下古生界白云岩储层特征与成因类型[J].中国地质,2011,38(4):1008-1015.
Jiao Cunli, Xing Xiujuan, He Bizhu, et al. Characteristics and genetic types of Cambrian-Ordovician dolomite reservoirs in Tarim basin[J]. Geology in China, 2011, 38(4):1008-1015.
- [6] 黄擎宇,张哨楠,张斯杨,等.白云岩结构对储集空间发育的控制作用—以塔里木盆地中央隆起区寒武系-奥陶系白云岩为例[J].天然气地球科学,2014,25(3):341-350,470.
Huang Qingyu, Zhang Shaonan, Zhang Siyang, et al. Textural control on the development of dolomite reservoir: A study from the Cambrian-Ordovician dolomite, central Tarim Basin, NW China[J]. Natural gas geoscience, 2014, 25(3):341-350, 470.
- [7] 黄擎宇,张哨楠,孟祥豪,等.塔里木盆地中央隆起区寒武-奥陶系白云岩结构特征及成因探讨[J].沉积学报,2014,32(3):537-549.
Huang Qingyu, Zhang Shaonan, Meng Xianghao, et al. Textural types and origin of the Cambrian-Ordovician dolomite in the central Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(3):537-549.
- [8] 郑和荣,吴茂炳,邬兴威,等.塔里木盆地下古生界白云岩储层油气勘探前景[J].石油学报,2007,28(2):1-7.
Zheng Herong, Wu Maobing, Wu Xingwei, et al. Oil-gas exploration prospect of dolomite reservoir in the Lower Paleozoic of Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 28(2):1-7.
- [9] 邵龙义,何宏,彭苏萍,等.塔里木盆地巴楚隆起寒武系及奥陶系白云岩类型及形成机理[J].古地理学报,2002,4(2):20-31.
Shao Longyi, He Hong, Peng Supin, et al. Types and origin of dolostones of the Cambrian and Ordovician of Bachu uplift area in Tarim Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2002, 4(2):20-31.
- [10] 何莹,鲍志东,沈安江,等.塔里木盆地牙哈-英买力地区寒武系-下奥陶统白云岩形成机理[J].沉积学报,2006,24(6):806-818.
He Ying, Bao Zhidong, Shen Anjiang, et al. The genetic mechanism of dolostones of the Cambrian-Lower Ordovician in Yaha-Yingmaili region, Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(6):806-818.
- [11] 贾承造,魏国齐,姚惠君,等.塔里木盆地构造演化与区域构造地质[M].北京:石油工业出版社,1995,1-50.
Jia Chengzao, Wei Guoqi, Yao Huijun, et al. Structural evolution and tectonic geology characteristics of Tarim Basin, China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995:1-50.
- [12] 张学丰,蔡忠贤,李林,等.白云岩的残余结构及由此引发的孔隙分类问题[J].沉积学报,2011,29(3):475-485.
Zhang Xuefeng, Cai Zhongxian, Li Lin, et al. Relict textures of dolomite and the related porosity classification[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(3):475-485.
- [13] Warren J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations[J]. Earth-Science Reviews, 2000, 52(1-3):1-81.
- [14] 黄思静, Qing, Hairuo, 胡作维,等.封闭系统中的白云石化作用及其石油地质学和矿床学意义—以四川盆地东北部三叠系飞仙关组碳酸盐岩为例[J].岩石学报,2007,23(11):2955-2962.
Huang Sijing, Qing Hairuo, Hu Zuwei, et al. Closed-system geology: An example from Feixianguan carbonates, Triassic NE Sichuan basin of China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(11):2955-2962.

- [15] 胡九珍,刘树根,冉启贵,等.塔东地区寒武系-下奥陶统成岩作用特征及对优质储层形成的影响[J].成都理工大学学报,2009,36(2):138-146.
Hu Jiuzhen, Liu Shugen, Ran Qigui, et al. Diagenetic characteristics and their effect on the formation of good-quality reservoirs of the Cambrian System to Lower Ordovician in the east of Tarim Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2009, 36(2): 138-146.
- [16] 李朋威,罗平,陈敏,等.塔里木盆地西北缘上震旦统微生物碳酸盐岩储层特征与成因[J].石油与天然气地质,2015,36(3):416-428.
Li Pengwei, Luo Ping, Chen Min, et al. Characteristics and origin of the Upper Sinian microbial carbonate reservoirs at the northwestern margin of Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(3): 416-428.
- [17] 郑剑锋,沈安江,刘永福,等.塔里木盆地寒武系与蒸发岩相关的白云岩储层特征及主控因素[J].沉积学报,2013,31(1):89-98.
Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Liu Yongfu, et al. Main Controlling factors and characteristics of Cambrian dolomite reservoirs related to evaporite in Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(1): 89-98.
- [18] 马安来,金之钧,刘金钟.塔里木盆地寒武系深层油气赋存相态研究[J].石油实验地质,2015,37(6):681-688.
Ma Anlai, Jin Zhijun, Liu Jinzhong. Hydrocarbon phase in the deep Cambrian of the Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(6): 681-688.
- [19] 赵姗姗,张峭楠,万友利.塔中顺托果勒低隆区柯坪塔格组长石溶蚀及对储层的影响[J].石油实验地质,2015,37(3):293-299.
Zhao Shanshan, Zhang Shaonan, Wan Youli. Feldspar dissolution and its effect on reservoir in Kepingtage Formation, Shuntuoguole Low Uplift, central Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(3): 293-299.
- [20] 范兴燕,张研,肖高杰,等.轮深地区寒武系台缘礁滩相储层预测[J].石油与天然气地质,2015,36(5):793-803.
Fan Xingyan, Zhang Yan, Xiao Gaojie, et al. Reservoir prediction of the Cambrian reef flat facies of platform margin in Lunshen area[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(5): 793-803.
- [21] 陈强路,储呈林,杨鑫,等.塔里木盆地寒武系沉积模式与烃源岩发育[J].石油实验地质,2015,37(6):689-695.
Chen Qianglu, Chu Chenglin, Yang Xin, et al. Sedimentary model and development of the Cambrian source rocks in the Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(6): 689-695.
- [22] 韦东晓,沈安江,王莹,等.塔北地区奥陶系碳酸盐岩缝洞充填方解石的阴极发光特征及对成岩环境的指示意义[J].油气地质与采收率,2015,22(4):54-58.
Wei Dongxiao, Shen Anjiang, Wang Ying, et al. Cathodoluminescence features of the calcite filling in the Ordovician carbonate fractured-vuggy reservoir and its significance to instructions of diagenetic environment in Northern Tarim Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(4): 54-58.
- [23] 王大鹏,陆红梅,陈小亮,等.海相碳酸盐岩大中型油气田成藏体系及分布特征[J].石油与天然气地质,2016,37(2):363-371.
Wang Dapeng, Lu Hongmei, Chen Xiaoliang, et al. Petroleum accumulation systems and distribution of medium to large marine carbonate fields[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 363-371.
- [24] 李宇翔,李国蓉,顾炎午,等.塔中地区寒武系-下奥陶统白云岩层序不整合面控制的大气水溶蚀作用研究[J].岩性油气藏,2009,21(2):245-254.
Li Yuxiang, Li Guorong, Gu Yanwu, et al. Meteoric water karstification controlled by sequence unconformity of Cambrian-Lower Ordovician in Tazhong area[J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(2): 245-254.
- [25] Mao Yan Zhu, Loren E. Babcock, Shan Chi Peng. Advances in Cambrian stratigraphy and paleontology: integrating correlation techniques, palaeobiology, taphonomy and paleoenvironmental reconstruction[J]. Palaeoworld, 2006, 15: 217-222.
- [26] 王小林,胡文瑄,李庆,等.塔里木盆地蓬莱坝剖面寒武系第二统-第三统界线处碳同位素负异常及其地质意义[J].地质论评,2011,57(1):16-23.
Wang Xiaolin, Hu Wenxuan, Li Qing, et al. Negative carbon isotope excursion on the Cambrian Series 2-Series 3 boundary for Penglaiba section in Tarim Basin and its significances[J]. Geological Review, 2011, 57(1): 16-23.
- [27] 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集层的改造作用[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.

(编辑 张玉银)