

深层-超深层优质碳酸盐岩储层形成控制因素

何治亮^{1,2},张军涛^{1,2},丁茜^{1,2},尤东华^{1,2,3},彭守涛^{1,2},朱东亚^{1,2},钱一雄^{1,2,3}

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室,北京 100083;

2. 中国石化石油勘探开发研究院构造与沉积储层实验室,北京 100083;

3. 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)

摘要:基于对前期工作的总结与前人研究工作的调研,提出了构造、层序、岩相、流体、时间五因素控储的概念模型。①构造对深层优质储层的影响可分为原型和变形两个方面,原型体现在构造对沉积格局的控制,构造变形如古隆起的形成演化、褶皱断裂的发育、裂缝组合等为后期的成岩改造提供了新的宏观背景,热体制以及新的流体的介入会建立全新的地质流体-岩石相互作用环境;②地层层序的结构与样式提供了储层发育与分布的宏观环境,较高级次的层序界面主要控制了规模性的岩溶型储层的形成,较低级次的层序界面与台缘、台内礁滩相储层发育分布关系密切,也是层间岩溶流体运移的通道;③岩相包括沉积相和成岩相,是后期流体改造的基础,也是储层最终赋存的场所,原始岩石矿物和结构可改造性的差异影响着储层的发育;④流体作用始终贯穿在碳酸盐岩建造与改造过程中,开放的地质流体环境形成储集空间,封闭的地质流体环境保持储集空间;⑤时间是指碳酸盐岩地层从沉积到成岩改造并最终定型的全过程,涉及上述4种要素各种地质作用的持续过程和相互之间的配置关系。构造-层序-岩相-流体-时间五种因素息息相关、相互制约,五要素在碳酸盐岩储层形成和保持过程中分别发挥着不同的、同时又是不可分割的作用。一般来说,优质的规模性碳酸盐岩储层是多种因素联合和多期复合作用的结果。

关键词:构造;层序;岩相;流体;时间;深层碳酸盐岩;储层成因

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Factors controlling the formation of high-quality deep to ultra-deep carbonate reservoirs

He Zhiliang^{1,2}, Zhang Juntao^{1,2}, Ding Qian^{1,2}, You Donghua^{1,2,3}, Peng Shoutao^{1,2}, Zhu Dongya^{1,2}, Qian Yixiong^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Accumulation Mechanism and Effective Development, Beijing 100083, China; 2. Laboratory of Structural and Sedimentological Reservoir Geology, Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

3. Wuxi Research Branch of Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China)

Abstract: Based on our preliminary works and previous researches, we proposed a conceptual model of five main factors controlling the formation of carbonate reservoirs, including tectonics, sequence, lithofacies, fluid and timing. Tectonics exerted influences on the reservoirs through prototyping and deformation. The former controlled the sedimentary pattern and the latter, such as the formation and evolution of ancient uplifts, the development of folds and fractures, and the combination of fractures, provide a new macro background for a late diagenetic transformation. A brand new geological fluid-rock interaction environment could be formed through the intervention of thermal events and new fluids. The structure and style of stratigraphic sequence provided a macroscopic environment for reservoir development and distribution. Boundaries of relatively higher order of sequence controlled mainly the formation of scaled karst reservoirs, while those of relatively lower order of sequence were closely related to the development and distribution of reef-facies reservoirs in platforms and their margins, which also acted as channels of inter-layer karst fluid migration. Lithofacies, including sedimentary and diagenetic facies, were the basis of a later fluid transformation and the place where reservoirs were finally sat. The differences of modifiability of different original mineral components and the structures could affect the development of reservoirs. The effects of fluids existed all the way through the formation and reconstruction of carbonate rocks. Open geological fluid environment contributed to the formation of reservoir spaces, while closed geological fluid environment contributed to the

收稿日期:2017-06-07;修订日期:2017-06-14。

第一作者简介:何治亮(1963—),男,博士、教授级高级工程师,石油地质。E-mail:hezl.syky@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(U1663209);国家科技重大专项(2017ZX05005);中国科学院A类战略性先导科技专项(XDAXX010200)。

preservation of reservoir spaces. Timing refers to the whole process of carbonate formation from sedimentation to diagenetic transformation and finalization, which involved the continuous processes of and the relationships between the geological effects controlled by the above four factors. Tectonics, sequence, lithofacies, fluid and timing were closely related to one another, and each played different and inseparable roles in the formation and preservation of carbonate reservoirs. In general, large-scale high-quality carbonate reservoirs are resulted from the combined effects of multiple factors through multi-stages.

Key words: tectonics, sequence, lithofacies, fluid, timing, deep carbonate reservoir, reservoir genesis

深层-超深层碳酸盐岩领域是未来寻找油气的重要方向。是否存在优质储层是深层-超深层油气勘探的关键之一。截至2010年,全球已发现目的层埋深超过4 500 m的含油气盆地200个以上,发现了1 477个深层油气藏^[1]。目前,已发现世界埋深最大的油气藏是墨西哥湾“下第三系区(Lower Tertiary Trend)”的Jack和St. Malo油气田,埋深8 839 m,油气储量 $6\,821 \times 10^4$ t油当量,测试产量 818 t/d ^[2]。而世界上已开发的最深气藏是美国西内盆地阿纳达科凹陷的米尔斯兰奇气田(Mills Ranch Field),目的层为下奥陶统白云岩,埋深7 663~8 103 m,孔隙度为5%~8%,平均渗透率为 $7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,单井产气量为 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,可采储量 $365 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[3]。

近20年来,我国在深层油气碳酸盐岩层系中陆续取得了一系列的重大突破。塔里木盆地北部的塔深1井在埋深8 408 m的中寒武统,仍发育优质白云岩储层,并见到液态原油^[4-6];顺托-古城地区的ST1井在7 658 m的中奥陶统一间房组也发育优质碳酸盐岩储层,测试折算日产气达 $358 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[2];哈拉哈塘油田奥陶系埋深达6 500~8 000 m,也发育缝洞型碳酸盐岩储层^[7];轮东1井在6 800 m深度仍存在高达4.5 m的大型溶洞^[8];塔中地区中深1井在深度6 400 m以深的中、下寒武统阿瓦塔格组和肖尔布拉克组中存在优质储层^[9-10]。在四川盆地,元坝气田储层为上二叠统长兴组礁白云岩,埋深6 200~7 300 m,目前已完成 $34 \times 10^8 \text{ m}^3$ 净化天然气产能建设^[2]。这些深层-超深层碳酸盐岩领域油气勘探的重大突破和成功开发,说明碳酸盐岩储层并不存在所谓的储层“死亡线”^[11],或者即便存在,其深度也远远大于以往学者所预测的深度。深层甚至超深层也具备优质储层发育的条件。

优质储层,尤其是深部优质碳酸盐岩储层,形成与保持受多种因素控制^[8],如早期油气充注、超压、生物礁发育、次生白云石化、裂缝发育和岩溶等多种作用等^[11]。一些特殊的成岩过程,如硫酸盐热化学还原反应作用(TSR)、一些不稳定矿物在特定物理化学环境

中的溶解和被带出等,也可能会促使新的孔-洞-缝的形成^[12]。

深层碳酸盐岩储层发育和控制的普遍规律是什么?学界尚无定论。本文基于研究团队近10年来在塔里木盆地、四川盆地和鄂尔多斯盆地三大海相盆地持续开展的碳酸盐岩储层研究工作,采用“建造与改造”、“静态与动态”两个相结合的理念,遵循地质方法描述储层发育特征并建立地质模式、地球化学手段阐释储层形成机理、地球物理预测储层分布的基本思路,逐渐形成了“区域地质学分析储层形成动力学背景—溶蚀实验及热力学分析矿物的溶解、沉淀机制—岩石学、矿物学、地球化学和构造、地层、沉积分析建立储层地质模型—基于地质模型建立针对性地球物理方法,评价并预测储层分布、储层物性与流体类型”的储层研究程序。在系统地调研国内外学者对优质碳酸盐岩储层成因与分布模式等大量成果的基础上,基于前期尝试性提出的构造、层序、流体、岩相、时间五因素控储的概念模型^[13],结合5年多来的大量实例的分析解剖,本文试图探讨并总结深层-超深层碳酸盐岩储层形成与分布的控制因素。

1 构造因素——盆地原型与变形改造

构造对深层优质碳酸盐岩储层的影响可分为区域地球动力学所控制的盆地原型和后期构造改造变形两个方面。对古构造背景的新认识,可能会发现新的勘探领域,并带动一系列的油气发现。

盆地原型主要体现在构造对沉积格局的控制。盆地的古构造格局与古气候、古海洋环境一起,决定了有利的沉积环境的组合以及沉积相带的分布,而沉积环境是碳酸盐岩储层形成的基础。四川盆地不同时期的古构造格局直接控制了碳酸盐岩储层的发育与分布,特别是礁滩型储层的分布^[14]。四川盆地晚二叠世—早三叠世的开江-梁平陆棚(海槽),是川东北普光气田、元坝气田和龙岗气田等一系列优质生物礁、颗粒滩型储层发育的宏观背景^[15-16]。安岳气田震旦系灯影

组、龙王庙组颗粒滩储层与震旦纪—早寒武世拉张槽及台洼形成演化所控制的相对古地貌高地密切相关^[17]。

塔里木盆地早古生代沉积古地理格局一直存在“东盆西台”的认识,即东部为塔东盆地相区,西部主体为台地相区,寒武纪—奥陶纪的高能礁滩相遍布台缘。寒武纪时期,台缘环绕着台地呈“U”字型分布;早—中奥陶世,塔西南地区的台缘斜坡带向盆内迁移^[18-19]。近期研究发现,塔里木盆地北部在早古生代也可能有台地边缘—斜坡相带存在(图1)。下寒武统玉尔吐斯组的黑色页岩由苏盖特布拉克剖面到阿克苏再到星火1井厚度逐渐增大,主要形成于中缓坡至下缓坡沉积环境^[20];之上的肖尔布拉克组中、上部见多套微生物礁体,在阿克苏附近的苏盖特布拉克等剖面可见到典型的台缘礁滩相储层^[21]。在鄂尔多斯盆地西南缘,寒武纪也可能有拗拉槽存在^[22],其两侧也有可能存在高能相带储层。

构造变形对碳酸盐岩储层的影响内涵丰富。盆地演化从早、中期的伸展或热衰退沉降阶段向挤压—走滑背景下沉降或隆升阶段的转化,盆地的应力场、热场、流体场都会产生巨大的变化,会强烈影响碳酸盐岩储层次生孔隙的发育和保存。碳酸盐岩地层地质结构

构造的变化,如古隆起的形成演化、褶皱断裂的发育、裂缝组合等为后期的成岩改造提供了新的宏观背景,热体制以及新的流体的介入,会建立全新的地质流体—岩石相互作用环境,碳酸盐岩储层的发育与分布会呈现出复杂且丰富多彩的图景。褶皱、古隆起与碳酸盐岩储层的关系过去讨论较多,本文主要讨论断裂活动对储层发育的影响。

塔里木盆地和四川盆地断裂对储层发育的控制已为众多学者所关注。后期断裂活动可以通过多种作用方式对碳酸盐岩储层进行改造^[23]。断裂活动导致次级断裂及裂缝发育,进而改善碳酸盐岩储集性能;断裂活动可作为深部流体运移通道。深部热流体上涌发生溶蚀作用改善碳酸盐岩储集性能^[24],流体中的某些化学成分还与碳酸盐岩发生交代作用,形成诸如萤石、闪锌矿、次生石英、重晶石等的次生热液矿床。塔里木盆地顺南地区中、下奥陶统鹰山组——一间房组多口井获得了高产油气流^[25-26],其储层的成因可能与热液溶蚀有关,走滑断裂及其伴生的裂缝系统为热液运移提供了重要通道,地层卤水经岩浆加热循环后可形成具有很强溶蚀作用的酸性热水,可形成大量的溶蚀孔隙^[27]。

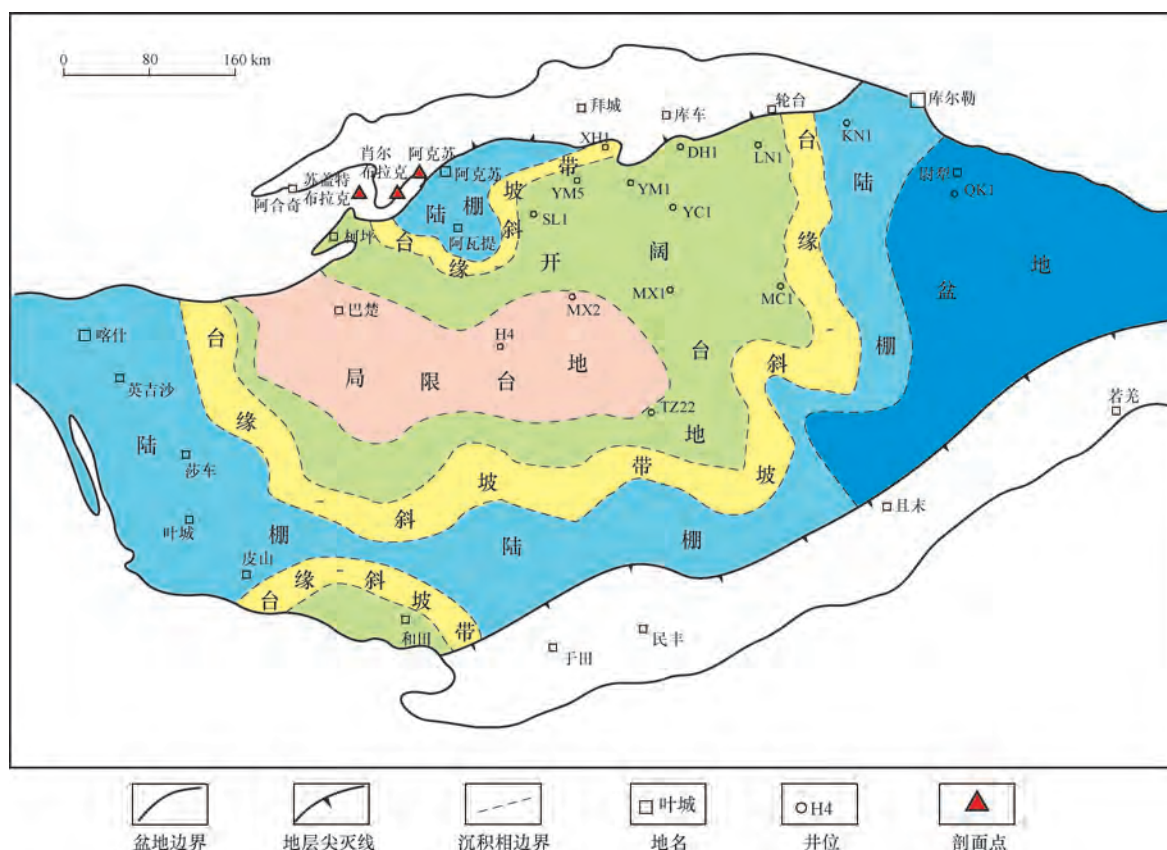


图1 塔里木盆地早寒武世肖尔布拉克组沉积相展布(修编自文献[18-19])

Fig. 1 Sedimentary facies distribution of the Early Cambrian Xiaerbulake Formation in Tarim Basin

序界面,使得盆地整体缺失志留系、泥盆系和下石炭统,控制了盆地内广泛分布的岩溶储层^[38-40]。由于暴露时间过长,溶蚀强烈,导致整体进入老年化岩溶阶段,地貌起伏小,洞穴基本被充填,有效储层发育与分布有别于幼年和青壮年期岩溶模式,增加了预测的难度。

较低级次层序界面对岩溶作用的影响相对较弱,储层分布总体较为局限,对特殊沉积相带,如台缘、台内礁滩相储层发育程度和分布范围影响很大^[41]。研究表明,普光、元坝等礁滩型优质储层其发育与分布主要受控于准同生期的溶蚀作用和白云石化作用^[42]。海平面短暂的下降,使碳酸盐岩台地大范围接受淋滤与侵蚀,发育大面积的层间岩溶作用,受这种低级次层序界面的影响,常常形成分布广、厚度薄、品质较差的储层,如果后期叠加其他有利因素,也能形成规模性的优质储层。这种低级次的界面可以作为后期溶蚀流体运移的通道,溶蚀流体既可能是下渗的大气降水,也可能是上涌的热流体,还可能是残余的地层水^[43]。如塔里木盆地在野外剖面、钻井岩心上都能发现的蓬莱坝组顶界面即属于较低级次的层序界面,界面之下溶蚀孔洞发育,在地震剖面上也能见到储层的特殊地震反射特征,有望成为今后有所突破的重要层系。

3 岩相及生物控储作用

碳酸盐岩岩相变化很大,分别受到沉积与成岩作用的深刻影响。深层碳酸盐岩储层的形成既离不开早期沉积作用的基础,也离不开后期成岩作用的改造。原始岩石类型及其可改造性是储层发育的根本性因素,主要体现在岩石的矿物成分与岩石结构可改造性的差异上。

碳酸盐岩中往往易溶的组分被溶蚀形成孔隙,难溶的部分形成骨架。两类矿物如果比例合适,在一定条件下就能形成良好的储层。由于碳酸盐岩中最主要的两类矿物白云石和方解石溶解度的差异,往往在过渡的岩性段容易形成较好的储层,如塔里木盆地中央隆起区下奥陶统含灰云岩与灰质云岩段常常发育储层^[44]。方解石和白云石的赋存状态对孔隙形成也具有重要的制约作用,两者可大致分为3个亚类,即粒间充填型、粒内包含型和包含-充填混合型,其中以“粒间充填型”分布的方解石最容易被溶蚀并形成次生孔隙^[45]。另外,碳酸盐岩中赋存的特殊易溶矿物也常常被溶蚀形成储层,如鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组五段中的膏溶铸模孔就是易溶组分硬石膏被溶解形成的^[40]。

碳酸盐岩丰富多彩的结构是由性质差异的微观组分所造成的。颗粒结构中的砂屑、鲕粒与胶结物、生物碎屑与胶结物、生物结构中生物与胶结物之间在后期的成岩过程中都存在微观组分上的差异。虽然对鲕粒的成因尚有争议,但是鲕粒内部、鲕粒与胶结物在成分和结构上都存在差异。流体-岩石相互作用的实验模拟表明,在后续的成岩过程中,通过对构造裂缝、鲕粒放射结合纹及颗粒晶体结合带等结构薄弱带的选择性溶蚀,可以形成各种溶蚀孔洞^[46-47]。

生物潜穴白云岩也是一种特殊结构类型。塔里木盆地奥陶统鹰山组中、上部以及华北地区奥陶系马家沟组常发育的斑状白云岩,其形成与生物潜穴关系密切^[48-49]。生物作用使得潜穴内的渗透性变好,有利于较高盐度的海水下渗,提供镁离子。潜穴生物在觅食过程中可通过物理和化学两种方式对沉积物基底进行改造,形成有利于白云石沉淀的微化学环境,进而发生准同生期的白云石化作用,巩固提升了原始岩石的孔隙度和渗透率,形成与生物潜穴有关的白云岩储层。

微生物碳酸盐岩是近期研究热点之一,与颗粒碳酸盐岩和生物礁碳酸盐岩一样,亦是一类特殊的岩石结构。微生物岩的结构决定了该类储层的孔隙类型及其结构特征,以及伴生的白云石化和溶蚀作用的结构选择性,因而对该类储层的储集空间类型及其结构具有决定性的作用。四川盆地西部雷口坡组的微生物岩发育在浅水潮下粘结与障积的微生物礁或席/丘滩、潟湖近滨一侧的潮坪以及藻纹层(叠层石)-球粒-凝块石等中、低能环境之中,溶蚀孔洞、残余藻结构云化的晶间孔或晶间溶孔以及微裂隙是主要储集空间,储集体主要受沉积亚微相、白云岩化、大气淡水淋滤与构造裂隙作用共同控制(图3)。塔里木盆地西北缘上震旦统一寒武统发育泡沫绵层白云岩、非叠层石球粒白云岩、凝块石白云岩和层状叠层石白云岩等多种微生物碳酸盐岩。层状叠层石以发育窗格孔为特征,并主要分布于亮色纹层内;非叠层球粒蓝细菌白云岩主要发育于球粒相对集中的区域,其溶蚀孔隙形状和大小与球粒类似;而非叠层蓝细菌泡沫绵层白云岩的孔隙一般分布于泡沫绵层腔内及其周边,以泡沫绵层腔内溶孔、铸模孔和超大溶孔为特征^[21,50]。

4 流体作用——类型、环境、强度

流体主要包括海水、大气淡水、地层中的成岩/成烃流体和深源热液等。在碳酸盐岩的建造与改造过程

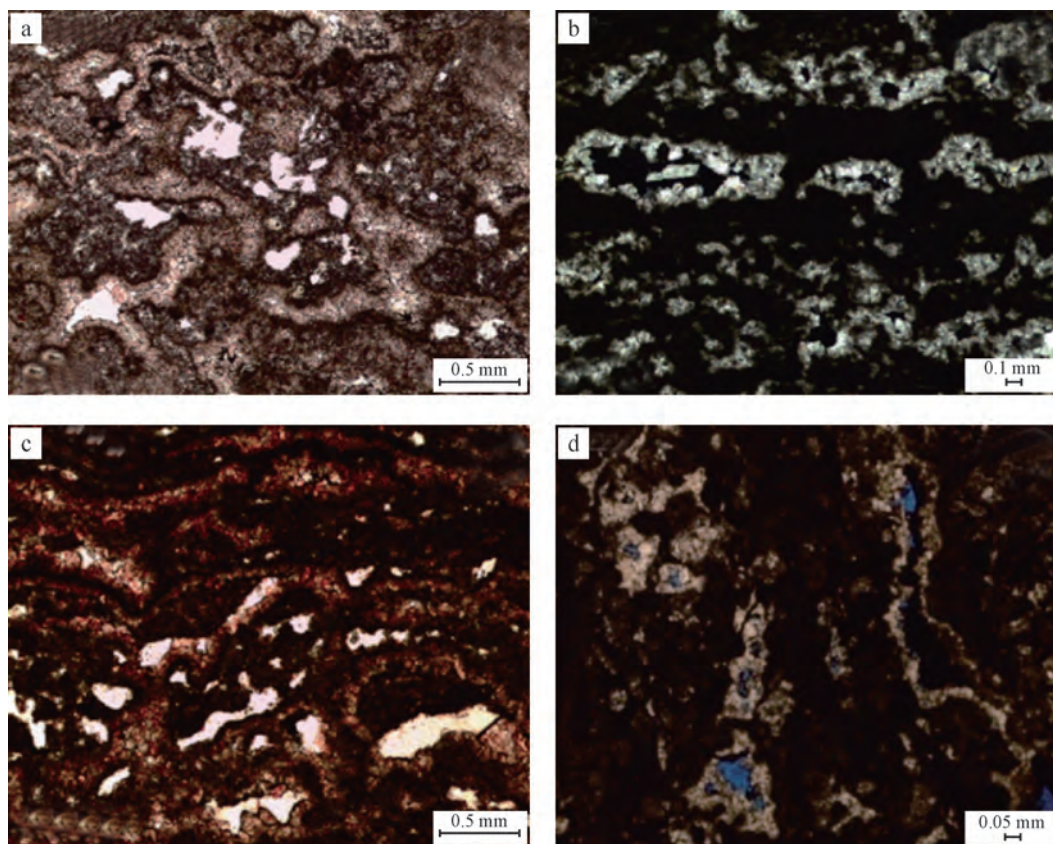


图3 四川盆地西部雷口坡组微生物岩显微照片

Fig. 3 Microbialite in the Leikoupo Formation, western Sichuan Basin

a. 残余“海绵状-泡沫状”藻团粒-藻纹层-球粒的灰质粉晶云岩, 纤状与粒状胶结物, 窗格溶孔, SYS1 井, 埋深 6 228.65 m; b. 残余藻纹层-球粒状泥微晶灰质云岩, 窗格孔洞, SYS1 井, 埋深 6 224.64 m; c. 残余泡沫状-海绵叠层泥微晶云岩, 窗格孔洞, SYS1 井, 埋深 6 219.96 m; d. 生物格架礁灰岩, YS1 井, 埋深 5 779.75 m

中, 流体作用贯穿始终^[13]。温度、压力和流体相态/属性, 构成了深层流体-岩石作用的环境条件^[51]。形成深层碳酸盐岩储层的地层流体环境可以分为3类: 开放环境、间歇性开放环境和封闭环境。

开放地质流体环境指碳酸盐岩地层中的流体与外界存在持续的能量和物质交换, 岩石-流体相互作用是一个基本连续的过程, 溶解-沉淀受到溶解动力学的控制。开放地质流体环境在地质历史时期主要发生在碳酸盐岩地层长期暴露的准同生作用期或构造抬升时的表生作用期, 前者如频繁暴露的礁、滩和潮坪环境, 后者如近地表的喀斯特环境及深循环的淡水溶蚀环境。长期、规模性的溶蚀作用, 可以形成大量的储集空间。开放地质流体环境尽管常常发生多种机械和化学、生物化学充填作用, 但仍然是形成优质碳酸盐岩储层最主要的环境。碳酸盐岩岩石类型(成分、结构), 开放性流体作用方式、强度和时间, 以及充填的方式与程度, 决定了储层的规模与品质, 如幼年期喀斯特环境溶蚀时间短、强度弱、储层分布局限, 老年期的喀斯特环境往往因为过度的溶蚀与充填而使储层品质变差,

青壮年的喀斯特环境易于形成优质的规模性岩溶缝洞型储层。

间歇性开放环境是指埋藏条件下有间歇性的新流体进入并随后封闭的碳酸盐岩地层系统。岩石-流体相互作用是一个断续的过程。溶蚀-沉淀受溶解动力学和热力学规律的共同控制, 溶蚀和沉淀共同存在, 流体体系的酸碱度以及碳酸钙饱和度决定溶蚀或沉淀的发生。在地质历史时期主要表现为阶段性的断裂、褶皱活动和盆地演化过程中的特殊的流体事件, 改变了原有的地层流体环境, 打破了地层内的化学平衡, 构成新的流体环境, 发生幕式流体-岩石相互作用。地层中物质与能量的交换会导致溶蚀、交代、白云岩化、重结晶和胶结等作用的发生, 部分地区孔隙度增加, 部分地区减少。伴随深埋过程, 地层中会发生生烃、BSR(硫酸盐细菌还原反应)、TSR(硫酸盐热化学还原反应)等作用; 岩浆活动也会导致部分酸(碱)性流体进入碳酸盐岩地层, 形成新的流体环境。参与流体-岩石反应的化学侵蚀性流体来自于有机质成熟、烃类降解或裂解过程中产生的酸性流体如 CO_2 、有机酸, 以及

含硫酸盐的碳酸盐岩地层通过微生物或者热化学还原作用产生的硫化氢气体等^[52-53]。烃源热流体对深部储集层的溶蚀改造有重要的意义^[54]。特殊的间歇性开放环境,如强烈的构造-热液作用也能形成特殊的优质碳酸盐岩储层。

封闭地质流体环境是指碳酸盐岩地层沉积后长期处于封闭的环境,地层与外界仅存在能量的交换,而基本没有物质交换^[55]。溶蚀-沉淀遵循溶解热力学规律,流体总量极为有限,不可能形成规模性的溶蚀与沉淀。前人研究认为,封闭体系随着温压升高碳酸盐岩倾向于沉淀^[56],也有相反的观点(降温沉淀)^[55],不论沉淀或者溶蚀其作用与产物均很有限。封闭环境主要效应体现在储集空间的保持作用,如果早期能够形成优质储层,后期长期具有稳定的封闭流体环境,储集空间就能够长期保存下来,在合适的条件下成为油气聚集和长期保存的场所。

一系列高温、高压物理模拟实验表明,开放地质流体环境是优质碳酸盐岩储层形成的重要环境^[57-58]。对比实验表明,在同样的温度和压力条件下,开放系统碳酸盐岩的溶蚀程度比间歇性开放系统碳酸盐岩的溶蚀程度更高(图4),更有利于溶蚀孔隙的形成。实验对象为方解石标准样品和白云石标准样品,酸性流体介质选择CO₂水溶液,CO₂水溶液中CO₂质量分数浓度为0.3%,pH为4.2左右。按照地表到地层深7 000 m(地温梯度25℃/km)匹配地层条件的温度和压力值,温度范围为25~200℃,压力范围为1~70 MPa。每个温度、压力的实验时间长度为3~4 h;流体中钙、镁离子浓度不再变化后,继续反应2 h,以确保水-岩反应达到平衡。反应完毕后,测试分析液体中的钙、镁离子浓度,称量样品质量损失,计算溶蚀率。实验中流体流速设置为1 mL/min及0 mL/min,分别对应开放

地质流体系统和间歇性开放地质流体系统。这些实验结果说明,准同生期和表生期长时间大气淡水淋滤,以及中、晚期深埋藏成岩阶段特殊酸性地质流体对储层的溶蚀,能显著改善储层物性^[59-60]。

不同环境下不同性质流体的流动方式、强度和作用时间决定了溶蚀强度和溶蚀速率,岩石结构、成分类型及流体-岩石接触面积影响储层的品质,不同流体通道类型分别形成溶蚀孔、缝、洞等储集空间。封闭流体环境对前期形成的储集空间的保持至关重要,地层的深埋或者抬升过程,会使储层内部发生微量的物质迁移和调整,孔隙度变化较小,但对渗透性与非均质性变化的影响更为明显。

5 时间——成储作用过程与规模

时间因素是碳酸盐岩储层形成与保持的最重要因素之一。碳酸盐岩储集空间的演化过程贯穿于整个地质演化过程之中^[13]。不同因素的持续时间和不同因素之间的组合关系制约着储层发育的程度。

岩溶作用的持续时间与储层发育有一定的联系。如四川盆地震旦系灯影组二段顶部的暴露时间较短,尚处于岩溶作用的早期,储层多为顺层发育,在晶洞四壁上形成纹层状环边或葡萄状构造^[37]。塔里木盆地奥陶系顶部岩溶在不同区域持续时间不尽相同,在塔河北部奥陶系暴露时间可达数千万至一亿年,处于岩溶青壮年期,储层以大型缝、洞为主^[61]。而鄂尔多斯盆地的奥陶系顶部岩溶持续时间更长,约为140 Ma,已到了岩溶中老年期,大部分洞穴已被破坏,地形已近夷平^[62]。

白云岩化作用持续时间也与孔隙有很大的联系。经典的理论认为,白云石交代方解石 $[2\text{CaCO}_3 + \text{Mg}^{2+} \rightleftharpoons \text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + \text{Ca}^{2+}]$ 的过程中,会造成方解石摩尔体积的减少(约13%),次生孔隙度增加。但是,随着白云岩化作用的持续,孔隙度并不一定会增加;在过度白云岩化作用(overdolomitization) $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + x\text{Mg}^{2+} + x\text{Ca}^{2+} + 2x\text{CO}_3^{2-} \rightarrow (1+x)\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ 的情况下,白云岩的孔隙度甚至会比灰岩更低,这种情况往往发生在基质交代白云石化作用之后,紧接着发生基质白云石增生(重结晶)和孔-缝系统内的胶结作用,从而降低孔径大小,特别是存在高通量蒸发回流渗透的区域^[63]和过度的热流体改造(重结晶、胶结作用)的区域。热液白云岩化储层形成的过程包括早期的溶蚀和白云岩化,后期则表现为鞍状白云石的充填^[64-65]。

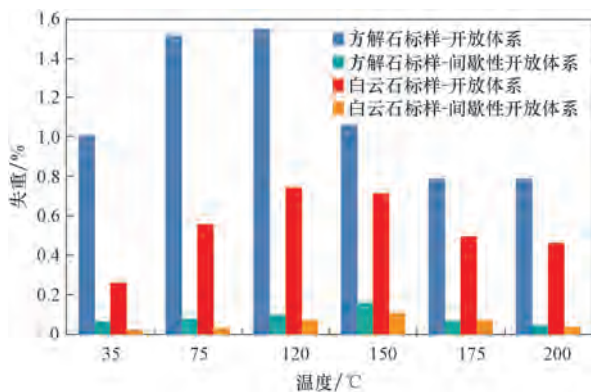


图4 开放系统和间歇性开放系统碳酸盐岩标样溶蚀率对比
Fig. 4 Comparison of dissolution mass losses between carbonate rock samples from an open system and a semi-open system

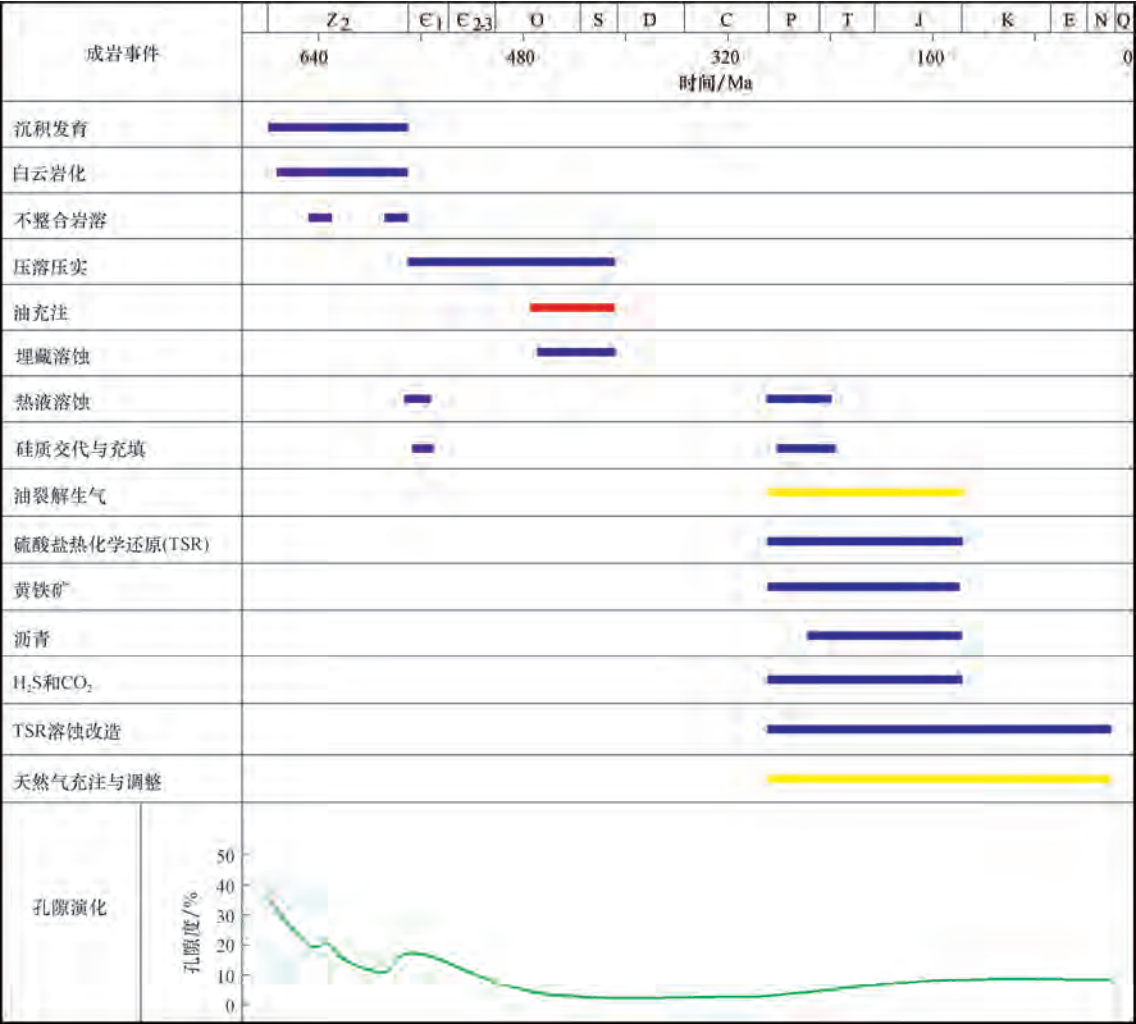


图 5 四川盆地灯影组储层成岩与孔隙演化史

Fig. 5 Reservoir diagenesis and pore evolution of the Dengying Formation, Sichuan Basin

不同成岩作用先、后组合关系决定了储层孔隙度的保持。先溶蚀后白云岩化可能是储层形成的一个较好的组合形式。准同生期的溶蚀作用,其后伴随浅埋藏期的白云岩化,是普光气田长兴组-飞仙关组优质礁滩储层的最佳搭配关系^[66-67];而塔里木盆地上丘里塔格群过早的广泛的准同生期白云岩化^[68-69],增加了后期成岩改造形成优质储层的难度。

孔隙形成之后的油气充注也是优质储层保存的主要机制^[70]。油气充注能够改变白云岩储层中的成岩流体环境,并抑制了后续成岩作用的发生,有利于储层的保存^[71]。

限定碳酸盐岩成岩作用发生时间难度较大,因而成岩定年一直是众多学者探索的方向。古地磁定年约束、Rb-Sr 同位素等时线定年等不断地应用于碳酸盐岩之中。对于岩溶作用发生的准确时间,我们建立了基于从“源”到“汇”的地球化学及年代学对比的思路,把不同类型原岩与来源区作为统一的研究对象,从多尺

度的沉积记录上进行对比,以确定其来源与形成时期。如塔河北部于奇 11 井在鹰山组溶洞中的灰绿色泥质粉砂岩锆石中测得最新的年龄为 399 Ma,说明从加里东晚期(晚志留世—早泥盆世)开始岩溶洞穴已开始发育^[72]。

塔河油田在空间上呈现出明显的分带性,不同地区的储层主控因素亦不相同。塔河北部地区在长期和多期的暴露过程中,发生了多期岩溶旋回的叠加,储层形成受控于构造-层序-流体多期的复合作用。塔河南部地区,只存在加里东中期第 I 幕和第 II 幕的岩溶作用,由于暴露时间短,岩溶作用相对较弱,有利储层的发育同时受层序(不整合面)、时间(暴露时间)、岩相(高能相带)、构造(断裂体系)和流体(大气淡水深循环和埋藏溶蚀)多种因素的联合作用所控制^[73]。

四川盆地震旦系灯影组也是多种因素联合、多期复合作用的结果。灯影组储层先是沉积于藻席、藻丘和颗粒滩环境(岩相)之中,存在准同生期暴露溶蚀作

用;灯二段与灯四段沉积末期,遭受了桐湾Ⅰ幕、Ⅱ幕运动隆升剥蚀和大气降水的溶蚀改造(层序与流体);灯影组白云岩储层在后期埋藏过程中分别经历了多期构造-流体耦合改造,包括早寒武世兴凯期以及二叠纪峨嵋期构造拉张环境下热液流体的溶蚀改造,志留纪末期开始有油气流体充注和相关的埋藏溶蚀作用,直至燕山期-喜马拉雅期再次发生天然气的充注及深埋溶蚀作用^[74-75]。由于地层时代老、埋藏深度大、成岩历史复杂,灯影组储层倾向于向两个极端发展。原始相带有利且位于古隆起的地区,后期聚集古油藏并经历深埋裂解和天然气充注过程,储层发育并且得到了长期有效保存,如位于川中古隆起上的威远、安岳气田的灯影组储层;许多地区的灯影组储层或者原始条件不利,或者后期成岩环境不好,表现为致密化的差储层或非储层。

6 结论

1) 构造对深层优质储层的影响可分为原型和变形两个方面。原型体现在构造对沉积格局和沉积环境的控制;构造变形如古隆起的形成演化、褶皱断裂的发育及裂缝组合等为后期的成岩改造提供了新的宏观背景,热体制以及新的流体的介入会建立全新的地质流体-岩石相互作用环境。

2) 地层层序的结构与样式提供了储层发育与分布的宏观环境。较高级次的层序界面主要控制了规模性的岩溶型储层的形成;较低级次的层序界面与台缘和台内礁滩相储层发育分布的关系密切,也是层间岩溶流体运移的通道。

3) 岩相包括沉积相和成岩相,是后期流体改造的基础,也是储层最终赋存的场所。原始岩石矿物和结构可改造性的差异,影响着储层的发育。

4) 流体作用始终贯穿在碳酸盐岩建造与改造过程中。开放的地质流体环境形成储集空间;封闭的地质流体环境保持储集空间。

5) 时间是指碳酸盐岩地层从沉积到成岩改造并最终定型的全过程,涉及上述4种要素中各种地质作用的持续过程和相互之间的配置关系。

6) 构造-岩相-层序-流体-时间五种因素息息相关、相互制约,五要素在碳酸盐岩储层形成和保持过程中分别发挥着不同的、同时又是不可分割的作用。一般来说,优质的规模性碳酸盐岩储层是多种因素联合和多期复合作用的结果。

致谢:本文研究工作由中国石化石油勘探开发研究院、中国石化西北油田分公司、中国科学院地质与地球物理研究所、中国地质大学(北京)、中国地质大学(武汉)、成都理工大学和南京大学组成的碳酸盐岩储层研究团队共同完成。文中采用了中国石化、中国石油相关单位的宝贵资料,在此一并表示诚挚的谢意!

参 考 文 献

- [1] 贾承造,庞雄奇. 深层油气地质理论研究进展与主要发展方向[J]. 石油学报,2015,36(12):1457-1469.
Jia Chengzao, Pang Xiongqi. Research processes and development directions of deep hydrocarbon geological theories[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 36(12):1457-1469.
- [2] 何治亮,金晓辉,沃玉进,等. 中国海相超深层碳酸盐岩油气成藏特点及勘探领域[J]. 中国石油勘探,2016,21(1):3-14.
He Zhiliang, Jin Xiaohui, Wo Yujin, et al. Hydrocarbon accumulation characteristics and exploration domains of ultra-deep marine carbonates in China[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(1):3-14.
- [3] 庞雄奇. 中国西部叠合盆地深部油气勘探面临的重大挑战及其研究方法意义[J]. 石油与天然气地质,2010,31(5):517-534.
Pang Xiongqi. Key challenges and research methods of petroleum exploration in the deep of super imposed basins in western China[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5):517-534.
- [4] Zhu D, Meng Q, Jin Z, et al. Formation mechanism of deep Cambrian dolomite reservoirs in the Tarim Basin, northwestern China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 59(1):232-244.
- [5] 翟晓先,顾忆,钱一雄,等. 塔里木盆地塔深1井寒武系油气地球化学特征[J]. 石油实验地质,2007,29(4):329-333.
Zhai Xiaoxian, Gu Yi, Qian Yixiong, et al. Geochemical characteristics of the Cambrian oil and gas in Well Tashen 1, the Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(4):329-333.
- [6] 云露,翟晓先. 塔里木盆地塔深1井寒武系储层与成藏特征探讨[J]. 石油与天然气地质,2008,29(6):726-732.
Yun Lu, Zhai Xiaoxian. Discussion on characteristics of the Cambrian reservoirs and hydrocarbon accumulation in Well Tashen-1, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(6):726-732.
- [7] 朱光有,杨海军,朱永峰,等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩油气地质特征与富集成藏研究[J]. 岩石学报,2011,27(3):827-844.
Zhu Guangyou, Yang Haijun, Zhu Yongfeng, et al. Study on petroleum geological characteristics and accumulation of carbonate reservoirs in Hanilcatan area, Tarim basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(3):827-844.
- [8] 孙龙德,邹才能,朱如凯,等. 中国深层油气形成、分布与潜力分析[J]. 石油勘探与开发,2013,40(6):641-649.
Sun Longde, Zou Caineng, Zhu Rukai, et al. Formation, distribution and potential of deep hydrocarbon resources in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(6):641-649.
- [9] 王招明,张丽娟,孙崇浩. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩岩溶分类、

- 期次及勘探思路[J]. 古地理学报, 2015, 17(5): 635–644.
- Wang Zhaoming, Zhang Lijuan, Sun Chonghao. Classification, period and exploration for carbonate karst in the Ordovician, Tarim Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(5): 635–644.
- [10] 宋到福, 王铁冠, 李美俊. 塔中地区中深1和中深1C井盐下寒武系油气地球化学特征及其油气源判识[J]. 中国科学: 地球科学, 2016, 46(1): 107–117.
- Song Daofu, Wang Tieguan, Li Meijun. Geochemistry and possible origin of the hydrocarbons from Wells Zhongshen1 and Zhongshen1C, Tazhong Uplift [J]. Science in China: Earth Science, 2016, 46(1): 107–117.
- [11] 张光亚, 马锋, 梁英波, 等. 全球深层油气勘探领域及理论技术进展[J]. 石油学报, 2015, 36(9): 1156–1166.
- Zhang Guangya, Ma Feng, Liang Yingbo, et al. Domain and theory-technology progress of global deep oil & gas exploration [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(9): 1156–1166.
- [12] 朱光有, 张水昌. 中国深层油气成藏条件与勘探潜力[J]. 石油学报, 2009, 30(6): 793–802.
- Zhu Guangyou, Zhang Shuichang. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential of deep reservoirs in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(6): 793–802.
- [13] 何治亮, 魏修成, 钱一雄, 等. 海相碳酸盐岩优质储层形成机理与分布预测[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(4): 489–498.
- He Zhiliang, Wei Xiucheng, Qian Yixiong, et al. Forming mechanism and distribution prediction of quality marine carbonate reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4): 489–498.
- [14] 韩克猷, 孙玮. 四川盆地海相大气田和气田群成藏条件[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 10–18.
- Han Keyou, Sun Wei. Conditions for the formation of large marine gas fields and gas field clusters in Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 10–18.
- [15] 王一刚, 洪海涛, 夏茂龙, 等. 四川盆地二叠、三叠系环海槽礁、滩富气带勘探[J]. 天然气工业, 2008, 28(1): 22–27.
- Wang Yigang, Hong Haitao, Xia Maolong, et al. Exploration of reef-bank gas reservoirs surrounding Permian and Triassic troughs in Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(1): 22–27.
- [16] 马永生, 牟传龙, 谭钦银, 等. 关于开江—梁平海槽的认识[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 326–331.
- Ma Yongsheng, Mou Chuanlong, Tan Qinyin, et al. A discussion on Kaijiang-Liangping ocean trough [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(3): 326–331.
- [17] 刘树根, 宋金民, 赵异华, 等. 四川盆地龙王庙组优质储层形成与分布的主控因素[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2014, 41(6): 657–670.
- Liu Shugen, Song Jinmin, Zhao Yihua, et al. Controlling factors of formation and distribution of Lower Cambrian Longwangmiao Formation high-quality reservoirs in Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2014, 41(6): 657–670.
- [18] 高志前, 樊太亮, 焦志峰, 等. 塔里木盆地寒武—奥陶系碳酸盐岩台地样式及其沉积响应特征[J]. 沉积学报, 2006, 24(1): 19–27.
- Gao Zhiqian, Fan Tailiang, Jiao Zhifeng, et al. The structural types and depositional characteristics of carbonate platform in the Cambrian-Ordovician of Tarmi Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(1): 19–27.
- [19] 高志前, 樊太亮, 杨伟红, 等. 塔里木盆地古生界碳酸盐岩台缘结构特征及其演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(3): 657–665.
- Gao Zhiqian, Fan Tailiang, Yang Weihong, et al. Structure characteristics and evolution of the Eopaleozoic carbonate platform in Tarim Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(3): 657–665.
- [20] 朱光有, 陈斐然, 陈志勇, 等. 塔里木盆地寒武系玉尔吐斯组优质烃源岩的发现及其基本特征[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(1): 8–21.
- Zhu Guangyou, Chen Feiran, Chen Zhiyong, et al. Discovery and basic characteristics of the high-quality source rocks of the Cambrian Yuertusi Formation in Tarim Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(1): 8–21.
- [21] 李朋威, 罗平, 陈敏, 等. 塔里木盆地西北缘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.
- [22] Yunlai B, Yuhu M, Yong H, et al. Properties of continental margin and its hydrocarbon exploration significance in Cambrian in the Southern Ordos kratogen of north China [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2013, 87(3): 777–803.
- [23] 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(D辑), 2008, 38(S1): 51–57.
- Lv Xiuxiang, Yang Ning, Zhou Xinyuan, et al. The influence of fracture activity on the carbonate reservoir in Ordovician of Tarim Basin [J]. Science in China (D Series), 2008, 38(S1): 51–57.
- [24] 朱东亚, 胡文瑄, 张学丰, 等. 塔河油田奥陶系灰岩埋藏溶蚀作用特征[J]. 石油学报, 2007, 28(5): 57–62.
- Zhu Dongya, Hu Wenxuan, Zhang Xuefeng, et al. Characteristics of burial dissolution in the Ordovician limestone of Tahe oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 57–62.
- [25] 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 potential of the Ordovician in Shunnan area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 788–797.
- [26] 漆立新. 塔里木盆地古生界碳酸盐岩大油气田勘探实践与展望[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 771–779.
- Qi Lixin. Exploration practice and prospects of giant carbonate field in the Lower Paleozoic of Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 771–779.
- [27] 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.

- [28] 钱一雄, 尤东华, 陈代钊, 等. 塔东北库鲁克塔格中上寒武统白云岩岩石学、地球化学特征与成因探讨——与加拿大西部盆地惠而浦(Whirlpool point)剖面对比[J]. 岩石学报, 2012, 28(8): 2525–2541.
- Qian Yixiong, You Donghua, Chen Daizhao, et al. The petrographic and geochemical signatures and implication of origin of the Middle and Upper Cambrian dolostone in eastern margin Tarim; Comparative studies with the Whirlpool point of the Western Canada Sedimentary Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(8): 2525–2541.
- [29] 钱一雄, 陈代钊, 尤东华, 等. 塔东北库鲁克塔格地区中上寒武统白云岩类型与孔隙演化[J]. 古地理学报, 2012, 14(4): 461–476.
- Qian Yixiong, Chen Daizhao, You Donghua, et al. Types of dolostones and pore evolution of the Middle and Upper Cambrian in Kuruk Tag area of northeastern Tarim Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(4): 461–476.
- [30] Dong S, Chen D, Zhou X, et al. Tectonically-driven dolomitization of Cambrian to Lower Ordovician carbonates of the Quruqtagh area, north-eastern flank of Tarim Basin, northwest China[J]. Sedimentology, 2017, 64(4): 1079–1106.
- [31] 陈轩, 赵文智, 刘银河, 等. 川西南地区中二叠统热液白云岩特征及勘探思路[J]. 石油学报, 2013, 34(3): 460–466.
- Chen Xuan, Zhao Wenzhi, Liu Yinhe, et al. Characteristics and exploration strategy of the Middle Permian hydrothermal dolomite in southwestern Sichuan Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 34(3): 460–466.
- [32] 舒晓辉, 张军涛, 李国蓉, 等. 四川盆地北部栖霞组-茅口组热液白云岩特征与成因[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 442–448.
- Shu Xiaohui, Zhang Juntao, Li Guorong, et al. Characteristics and genesis of hydrothermal dolomites of Qixia and Maokou Formations in northern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 442–448.
- [33] 何治亮, 高志前, 张军涛, 等. 层序界面类型及其对优质碳酸盐岩储层形成与分布的控制[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 853–859.
- He Zhiliang, Gao Zhiqian, Zhang Juntao, et al. Types of sequence boundaries and their control over formation and distribution of quality carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 853–859.
- [34] 漆立新, 云露. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶发育特征与主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 1–12.
- Qi Lixin, Yun Lu. Development characteristics and main controlling factors of the Ordovician carbonate karst in Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 1–12.
- [35] 钱一雄, Conxita Taberner, 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 epigenic 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.
- [36] 胡明毅, 邓猛, 胡忠贵, 等. 四川盆地石炭系黄龙组储层特征及主控因素分析[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 310–321.
- Hu Mingyi, Deng Meng, Hu Zhonggui, et al. Reservoir characteristics and main control factors of the Carboniferous Huang-long Formation in Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3): 310–321.
- [37] 王国芝, 刘树根, 李娜, 等. 四川盆地北缘灯影组深埋白云岩优质储层形成与保存机制[J]. 岩石学报, 2014, 30(3): 667–678.
- Wang Guozhi, Liu Shugen, Li Na, et al. Formation and preservation mechanism of high quality reservoir in deep burial dolomite in the Dengying Formation on the northern margin of the Sichuan Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(3): 667–678.
- [38] 方少仙, 何江, 侯方浩, 等. 鄂尔多斯盆地中部气田区中奥陶统马家沟组马五-马五亚段储层孔隙类型和演化[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2425–2441.
- Fang Shaoxian, He Jiang, Hou Fanghao, et al. Reservoirs pore space types and evolution in M₅₅ to M₅₁, submembers of Majiagou Formation of Middle Ordovician in central gasfield area of Ordos Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(10): 2425–2441.
- [39] 李振宏, 胡健民. 鄂尔多斯盆地构造演化与古岩溶储层分布[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 640–647.
- Li Zhenghong, Hu Jianmin. Structural evolution and distribution of paleokarst reservoirs in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5): 640–647.
- [40] 张军涛, 金晓辉, 李淑筠, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马五段孔隙充填物类型与成因[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(5): 684–690.
- Zhang Juntao, Jin Xiaohui, Li Shujun, et al. Types and origin of pore-fillings from the 5th member of the Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 684–690.
- [41] 郭彤楼. 川东北元坝地区长兴组-飞仙关组台地边缘层序地层及其对储层的控制[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 387–394.
- Guo Tonglou. Sequence strata of the platform edge in the Changxing and Feixianguan formations in the Yuanba area, northeastern Sichuan Basin and their control on reservoirs[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 32(3): 387–394.
- [42] 李国蓉, 武恒志, 叶斌, 等. 元坝地区长兴组储层溶蚀作用期次与机制研究[J]. 岩石学报, 2014, 30(3): 709–717.
- Li Guorong, Wu Hengzhi, Ye Bin, et al. Stages and mechanism of dissolution in Changxing reservoir, Yuanba area[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(3): 709–717.
- [43] 张军涛, 胡文瑄, 王小林, 等. 塔里木盆地西北缘寒武系中热水白云石团块特征及成因研究[J]. 地质学报, 2011, 85(2): 234–245.
- Zhang Juntao, Hu Wenxuan, Wang Xiaolin, et al. Character and origin of Cambrian hydrothermal dolomite conglomeration in the northwestern margin of Tarim Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(2): 234–245.
- [44] 张军涛, 胡文瑄, 钱一雄, 等. 塔里木盆地白云岩储层类型划分、测井模型及其应用[J]. 地质学报, 2008, 82(3): 380–386.
- Zhang Juntao, Hu Wenxuan, Qian Yixiong, et al. Classification and logging modes of dolomite reservoirs in the Tarim Basin, northwestern China[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(3): 380–386.

- [45] 王小林,胡文瑄,张军涛,等.白云岩物质组分与结构对微孔储集体系形成的制约——以塔里木盆地古生界白云岩为例[J].天然气地球科学,2008,19(3):320-326.
Wang Xiaolin, Hu Wenxuan, Zhang Juntao, et al. Dolomite composition and texture constrain the formation of micropore reservoir: An example from Lower Paleozoic dolomite, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(3): 320-326.
- [46] 张天付,鲍征宇,马明,等.鲕粒灰岩的溶解动力学特征和微观形貌的发育演化[J].沉积学报,2009,27(6):1033-1042.
Zhang Tianfu, Bao Zhengyu, Ma Ming, et al. Dissolution kinetic characteristics and morphology evolution of oolitic limestone[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(6): 1033-1042.
- [47] 方旸,谢淑云,何治亮,等.基于岩石薄片的鲕粒碳酸盐岩地球化学溶蚀[J].地球科学,2016,41(5):779-791.
Fang Yang, Xie Shuyun, He Zhiliang, et al. Thin section-based geochemical dissolution experiments of ooid carbonates[J]. Earth Science, 2016, 41(5): 779-791.
- [48] 郭川,陈代钊,董少峰,等.塔里木盆地鹰山组生物潜穴白云岩成因机理[C]//全国沉积学大会沉积学与非常规资源摘要文集.2015:316-317.
Guo Chuan, Chen Daizhao, Dong Shaofeng, et al. The genetic mechanism of the dolomite in Yingshan Formation, Tarim Basin[C]//A collection of sedimentology and unconventional resource abstracts in the national depositional science conference. 2015:316-317.
- [49] 王起琮,闫佐,宁博,等.鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组豹皮灰岩特征及其成因[J].古地志学报,2016,18(1):39-48.
Wang Qicong, Yan Zuo, Ning Bo, et al. Characteristics and genesis of leopard limestone of the Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2016, 18(1): 39-48.
- [50] 宋金民,罗平,杨式升,等.塔里木盆地寒武统微生物碳酸盐岩储集层特征[J].石油勘探与开发,2014,41(4):404-413.
Song Jinmin, Luo Ping, Yang Shisheng, et al. Reservoirs of Lower Cambrian microbial carbonates, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(4): 404-413.
- [51] 李忠.盆地深层流体-岩石作用与油气形成研究前沿[J].矿物岩石地球化学通报,2016,35(5):807-816.
Li Zhong. Research frontiers of fluid-rock interaction and oil-gas formation in deep-buried basins[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2016, 35(5): 807-816.
- [52] Cai C, Hu G, Li H X, et al. Origins and fates of H₂S in the Cambrian and Ordovician in Tazhong area: Evidence from sulfur isotopes, fluid inclusions and production data[J]. Marine & Petroleum Geology, 2015, 67: 408-418.
- [53] 张水昌,朱光有,何坤.硫酸盐热化学还原作用对原油裂解成气和碳酸盐岩储层改造的影响及作用机制[J].岩石学报,2011,27(3):809-826.
Zhang Shuichang, Zhu Guangyou, He Kun. The effects of thermochemical sulfate reduction on occurrence of oil-cracking gas and reformation of deep carbonate reservoir and the interaction mechanisms[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(3): 809-826.
- [54] 胡文瑄.盆地深部流体主要来源及判识标志研究[J].矿物岩石地球化学通报,2016,35(5):817-826.
Hu Wenxuan. Origin and indicators of deep-seated fluids in sedimentary basins[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2016, 35(5): 817-826.
- [55] Moore C H. Carbonate reservoirs: Porosity, evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework[M]. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2001.
- [56] 杨云坤,刘波,秦善,等.基于模拟实验的原位观察对碳酸盐岩深部溶蚀的再认识[J].北京大学学报(自然科学版),2014,50(2):316-322.
Yang Yunkun, Liu Bo, Qin Shan, et al. Re-recognition of deep carbonate dissolution based on the observation of in-situ simulation experiment[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2014, 50(2): 316-322.
- [57] 范明,何治亮,李志明,等.碳酸盐岩溶蚀窗的形成及地质意义[J].石油与天然气地质,2011,32(4):499-505.
Fan Ming, He Zhiliang, Li Zhiming, et al. Dissolution window of carbonate rocks and its geological significance[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4): 499-505.
- [58] 范明,蒋小琼,刘伟新,等.不同温度条件下CO₂水溶液对碳酸盐岩的溶蚀作用[J].沉积学报,2007,25(6):825-830.
Fan Ming, Jiang Xiaoqiong, Liu Weixin, et al. Dissolution of carbonate rocks in CO₂ solution under the different temperatures[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(6): 825-830.
- [59] Morse J W, Arvidson R S. The dissolution kinetics of major sedimentary carbonate minerals[J]. Earth Science Reviews, 2002, 58(1): 51-84.
- [60] Biehle B C, Reuning L, Schoenherr J, et al. Impacts of hydrothermal dolomitization and thermochemical sulfate reduction on secondary porosity creation in deeply buried carbonates: A case study from the Lower Saxony Basin, northwest Germany[J]. AAPG Bulletin, 2016, 100(4): 597-621.
- [61] 康志宏,陈琳,鲁新便,等.塔河岩溶型碳酸盐岩缝洞系统流体动态连通性研究[J].地学前缘,2012,19(2):110-120.
Kang Zhihong, Chen Lin, Lu Xinbian, et al. Fluid dynamic connectivity of karst carbonate reservoir with fracture and cave system in Tahe oilfield[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 110-120.
- [62] 侯方浩,方少仙,何江,等.鄂尔多斯盆地靖边气田区中奥陶统马家沟组五¹—五⁴亚段古岩溶型储层分布特征及综合评价[J].海相油气地质,2011,16(1):1-13.
Hou Fanghao, Fang Shaoxian, He Jiang, et al. Distribution characters and comprehensive evaluation of Middle Ordovician Majiagou 5¹-5⁴ submembers reservoirs in Jingbian gas field area, Ordos Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2011, 16(1): 1-13.
- [63] Lucia F J. Origin and petrophysics of dolostone pore space[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2004, 235(1): 141-155.
- [64] Davies G R, Smith Jr L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1641-1690.
- [65] Zhang J, Hu W, Qian Y, et al. Formation of saddle dolomites in Upper Cambrian carbonates, western Tarim Basin (northwest China): Implications for fault-related fluid flow[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(8): 1428-1440.

- dolomitization[M]. International Association of Sedimentologists Special Publication 1994, 325–341.
- [26] 杜金虎, 张宝民, 汪泽成, 等. 四川盆地下寒武统龙王庙组碳酸盐缓坡双颗粒滩沉积模式及储层成因[J]. 天然气工业, 2016, 36(6): 1–10.
- Du Jinhu, Zhang Baomin, Wang Zecheng, et al. Sedimentary model and reservoir genesis of dual grain banks at the Lower Cambrian Longwangmiao Fm carbonate ramp in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(6): 1–10.
- [27] 李宏涛. 河坝气藏飞仙关组三段储集岩特征及成岩作用[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 263–271.
- Li Hongtao. Diagenesis and characteristics of reservoirs in the member 3 of the lower Triassic Feixianguan formation in Heba gas field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 263–271.
- [28] 李宏涛. 台内鲕粒滩气藏成藏过程与模式——以川东北河坝地区下三叠统飞仙关组三段为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(5): 723–732.
- Li Hongtao. Accumulation process and pattern of oolitic shoal gas pools in the platform: a case from member 3 of lower Triassic Feixianguan formation in the Heba area, northeastern Sichuan basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(5): 723–732.
- [29] Morse, J W, Machenzie, F T. 1990. Geochemistry of sedimentary carbonates[M]. New York, Elsevier Scientific Publ. Co., 696.
- [30] 何治亮, 高志前, 张军涛, 等. 层序界面类型及其对优质碳酸盐岩储层形成与分布的控制[J]. 石油与天然气地质, 2016, 35(6): 853–859.
- He Zhiliang, Gao Zhiqian, Zhang Juntao, et al. Types of sequence boundaries and their control over formation and distribution of quality carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 35(6): 853–859.
- (编辑 张玉银)
-
- (上接第644页)
- [66] 高林. 碳酸盐岩成岩史及其对储层的控制作用——以普光气田为例[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(6): 733–739.
- Gao Lin. Diagenesis of carbonate rocks and their control over reservoirs—An example from the Puguang gas field[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(6): 733–739.
- [67] 王恕一, 蒋小琼, 管宏林, 等. 川东北普光气田下三叠统飞仙关组储层成岩作用研究[J]. 石油实验地质, 2010, 32(4): 366–372.
- Wang Shuyi, Jiang Xiaoqiong, Guan Honglin, et al. Diagenesis effects of Lower Triassic Feixianguan Formation reservoir in Puguang gas field, Northeast Sichuan[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(4): 366–372.
- [68] 吴仕强, 朱井泉, 王国学, 等. 塔里木盆地寒武—奥陶系白云岩结构构造类型及其形成机理[J]. 岩石学报, 2008, 24(6): 1390–1400.
- Wu Shiqiang, Zhu Jingquan, Wang Guoxue, et al. Types and origin of Cambrian-Ordovician dolomites in Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(6): 1390–1400.
- [69] 朱井泉, 吴仕强, 王国学, 等. 塔里木盆地寒武—奥陶系主要白云岩类型及孔隙发育特征[J]. 地学前缘, 2008, 15(2): 67–79.
- Zhu Jingquan, Wu Shiqiang, Wang Guoxue, et al. Types and porosity characteristics of the Cambrian-Ordovician dolostones in Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(2): 67–79.
- [70] 黄文明, 刘树根, 马文辛, 等. 深层海相碳酸盐岩优质储层的形成、保存和破坏机制——以四川盆地震旦系—志留系为例[J]. 地质科学, 2011, 46(3): 875–895.
- Huang Wenming, Liu Shugen, Ma Wenxin, et al. Formation, preservation and mechanism of marine deep carbonate high quality reservoir rocks: Illustrated by Sinian to Silurian System in Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2011, 46(3): 875–895.
- [71] 朱东亚, 张殿伟, 张荣强, 等. 深层白云岩储层油充注对孔隙保存作用研究[J]. 地质学报, 2015, 89(4): 794–804.
- Zhu Dongya, Zhang Dianwei, Zhang Rongqiang, et al. Role of oil charge in preservation of deep dolomite reservoir space[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(4): 794–804.
- [72] 彭守涛, 何治亮, 钱一雄, 等. 岩溶储层洞穴演化时限的沉积学、地球化学和年代学约束[C]//第五届中国石油地质年会文集, 2013: 157–158.
- Peng Shoutao, He Zhiliang, Qian Yixiong, et al. Evolutional time limit of karst reservoirs constraining from the sedimentological, geochemical and chronological data[C]//A collection of the Fifth Annual Meeting of China Petroleum and Geology, 2013: 157–158.
- [73] 何治亮, 彭守涛, 张涛. 塔里木盆地塔河地区奥陶系储层形成的控制因素与复合—联合成因机制[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 743–752.
- He Zhiliang, Peng Shoutao, Zhang Tao. Controlling factors and genetic pattern of the Ordovician reservoirs in the Tahe area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 743–752.
- [74] 朱东亚, 张殿伟, 张荣强, 等. 中国南方地区灯影组白云岩储层流体溶蚀改造机制[J]. 石油学报, 2015, 36(10): 1188–1198.
- Zhu Dongya, Zhang Dianwei, Zhang Rongqiang, et al. Fluid alteration mechanism of dolomite reservoirs in Dengying Formation, South China[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 36(10): 1188–1198.
- [75] 朱东亚, 张殿伟, 刘全有, 等. 多种流体作用下的白云岩储层发育过程和机制[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(11): 2053–2062.
- Zhu Dongya, Zhang Dianwei, Liu Quanyou, et al. Dynamic development process and mechanism of dolomite reservoir under multi-fluid alterations[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(11): 2053–2062.
- (编辑 李 军)