

引用: 赵文智, 沈安江, 乔占峰, 等. 中国碳酸盐岩沉积储层理论进展与海相大油气田发现 [J]. 中国石油勘探, 2022,27(4):1-15.
Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Qiao Zhanfeng, et al. Theoretical progress in carbonate reservoir and discovery of large marine oil and gas fields in China[J]. China Petroleum Exploration, 2022,27(4):1-15.

中国碳酸盐岩沉积储层理论进展与 海相大油气田发现

赵文智^{1,2} 沈安江^{2,3} 乔占峰^{2,3} 张建勇^{2,3} 倪新锋^{2,3}

(1 中国石油勘探开发研究院赵文智院士工作室; 2 中国石油天然气集团有限公司碳酸盐岩储层重点实验室; 3 中国石油杭州地质研究院)

摘要: 与国外相比, 中国海相碳酸盐岩具有克拉通地块小、年代老、埋藏深、改造强等特点, 面临台内、内幕、台缘与深层古老层系油气勘探潜力评价等理论技术难题。文章依托国家油气重大专项“十一五”至“十三五”碳酸盐岩项目和中国石油天然气集团有限公司碳酸盐岩储层重点实验室, 围绕碳酸盐岩沉积储层开展了有针对性的理论技术攻关, 取得 4 项认识创新: (1) 小克拉通台内普遍发育裂隙, 沉积分异助推勘探领域由台缘拓展至台内; (2) 发现内幕岩溶储层新类型, 助推勘探领域由局部潜山区拓展至广泛的内幕区; (3) 深层碳酸盐岩储层具相控性, 决定储层分布的规模性和可预测性, 推动勘探领域由浅层拓展至深层; (4) 古老微生物碳酸盐岩具“三元”控储控分布特征, 推动拓展了中—新元古界和寒武系盐下油气勘探新领域。上述理论进展填补了国内外碳酸盐岩沉积储层研究的认识空白, 同时为塔里木盆地塔中、轮古、哈拉哈塘、顺北和四川盆地普光、元坝与安岳等大型油气田的发现所证实。

关键词: 小克拉通; 台地; 台内裂隙; 内幕岩溶储层; 深层礁滩储层; 微生物白云岩储层; 中国

中图分类号: TE122.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2022.04.001

Theoretical progress in carbonate reservoir and discovery of large marine oil and gas fields in China

Zhao Wenzhi^{1,2}, Shen Anjiang^{2,3}, Qiao Zhanfeng^{2,3}, Zhang Jianyong^{2,3}, Ni Xinfeng^{2,3}

(1 ZWZ Academician Research Studio, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development; 2 CNPC Key Laboratory of Carbonate Reservoirs; 3 PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology)

Abstract: Different from foreign countries, the marine carbonate rocks in China are featured by development in small craton block, old geologic age, deep burial depth, and strong transformation, and the theory and technology are faced with problems in the evaluation of oil and gas exploration potential in the intraplatform, intra-carbonate strata, platform margin and old strata in deep formations. By relying on the carbonate reservoir project of national oil and gas special projects during the 11th and 13th Five-Year Plan periods and CNPC Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, the targeted theoretical and technological researches on carbonate reservoir have been conducted, and innovative understanding has been achieved in four aspects, including: (1) The rifts are generally developed in the intraplatform of small cratons and the geological knowledge of sedimentary differentiation promotes the expansion of exploration field from platform margin to the intraplatform; (2) The discovery of new types of intra-carbonate karst reservoir promotes the expansion of exploration field from the local

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2016ZX05004-002); 中国石油天然气股份有限公司直属院所基础研究和战略储备技术研究基金项目“古老海相碳酸盐岩定年、定温与示踪技术研发与应用”(2018D-5008-03); 中国石油天然气股份有限公司科技项目“深层碳酸盐岩—膏盐岩组合沉积建模、成储机理研究与储层实验技术研究”(2019D-5009-16)。

第一作者简介: 赵文智 (1958-), 男, 河北昌黎人, 博士, 2003 年毕业于中国石油勘探开发研究院, 中国工程院院士, 主要从事油气勘探地质综合研究工作。地址: 北京市海淀区学院路 20 号中国石油勘探开发研究院 910 信箱, 邮政编码: 100083。E-mail: zwz@petrochina.com.cn

通信作者简介: 沈安江 (1965-), 男, 浙江兰溪人, 博士, 1998 年毕业于成都理工学院, 教授级高级工程师, 主要从事碳酸盐岩沉积储层研究工作。地址: 浙江省杭州市西湖区西溪路 920 号中国石油杭州地质研究院, 邮政编码: 310023。E-mail: shenaj_hz@petrochina.com.cn

收稿日期: 2022-03-28; 修改日期: 2022-05-18

buried hill to the broad intra-carbonate strata; (3) The deep carbonate reservoir is controlled by sedimentary facies, consolidating the large scale and predictability of reservoir, which understanding promotes the expansion of exploration field from shallow to deep formations; (4) The geological understanding of "ternary" reservoir controlling and distribution of the ancient microbial carbonate rocks promotes the expansion of new exploration fields in the Meso-Neoproterozoic and subsalt Cambrian. The above theoretical progress supports to fill the gap in the field of carbonate reservoir study at home and abroad, and is confirmed by the discovery of large oil and gas fields such as Tazhong, Lungu, Halahatang, Shunbei in Tarim Basin, and Puguang, Yuanba, and Anyue in Sichuan Basin.

Key words: small craton, platform, intraplate rift, intra-carbonate karst reservoir, deep reef beach reservoir, microbial dolomite reservoir, China

0 引言

20 世纪碳酸盐岩沉积储层研究归结起来, 可分为 3 个阶段: (1) 50 年代聚焦于碳酸盐岩成因和岩石分类研究, 标志性成果有 Folk 等的碳酸盐岩分类^[1]、Ginsburg 等的碳酸盐岩沉积作用研究^[2-3]; (2) 60—90 年代初聚焦于碳酸盐岩沉积建模^[3-4]、成岩作用和白云石化机理研究^[5-11], 各种岩石地球化学分析手段被应用于沉积环境解释和成岩作用研究中, 为 70—80 年代碳酸盐岩油气储量增长高峰期的到来提供了有力支撑, 尤其是 80 年代末至 90 年代初层序地层理论的提出给碳酸盐岩研究带来了一场变革^[12-14]; (3) 90 年代出现了通过露头层序地层解释和追踪进行储层地质建模的高潮^[15-17], 目的是对碳酸盐岩储层非均质性进行表征。

进入 21 世纪以来, 碳酸盐岩沉积储层研究的方法和手段更为综合, 认识也进一步深化和升华, 表现在 4 个方面: (1) 层序地层理论技术为碳酸盐岩储层成因和分布预测提供了手段与途径, 尤其是海平面变化对早期孔隙发育带的控制, 为深层碳酸盐岩有利储集相带分布预测奠定了理论基础; (2) 基于构造史、岩石特征、水文地质与层序地层综合分析和岩石地球化学的综合应用, 对埋藏环境中储层成岩—孔隙演化特征的认识, 既更为深入, 也出现了理论升华; (3) 白云岩成因、白云石化对孔隙发育的贡献再次引起人们研究的兴趣^[18-20]与理论认识的发展, 认识到白云石化作用是一种胶结现象, 白云岩中的孔隙是残留和继承的问题; (4) 受油气勘探实践的驱动, 地质、录井、试油、测井、岩石地球化学和地震资料被综合应用于碳酸盐岩沉积储层研究与分布预测中, 使认识精度大为提高。

中国碳酸盐岩沉积储层研究始于 20 世纪 70 年代, 以冯增昭的译著《地质历史时期碳酸盐岩沉积相》为标志, 通过引进和消化吸收, 跟跑国际研究前沿, 为 20 世纪 70 年代至 21 世纪初中国碳酸盐岩油气勘探的发现和发展做出了重要贡献, 如 20 世纪 70—80 年代发现的任丘、尚店、苏桥和静安堡等油田, 20 世纪 90 年代至 21 世纪初发现的靖边、五百梯、和田河、塔河、

罗家寨、千米桥、桩西、铁山坡、渡口河等多个油气田。这些油气田以小型、中型为主, 主要为潜山岩溶风化壳储层, 少量为台缘礁滩白云岩储层, 最老的层位为奥陶系, 埋藏深度大多小于 5000m。

中国海相碳酸盐岩分布面积大于 $455 \times 10^4 \text{ km}^2$, 勘探领域广。据全国第四轮油气资源评价结果, 石油地质资源量为 $340 \times 10^8 \text{ t}$ 、截至目前已探明 $15.50 \times 10^8 \text{ t}$, 天然气地质资源量为 $24.30 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 、已探明 $3.20 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。总体来看, 油气资源探明率极低, 勘探潜力很大。与国外相比, 中国海相碳酸盐岩具克拉通台地面积小、年代老、埋藏深、改造强等特点。要进一步扩大勘探成果, 剩余勘探领域面临四大理论难题: (1) 全球碳酸盐岩油气勘探实践证实, 台缘带是规模储层发育区, 但由于中国克拉通台地面积小, 台缘带大多数被破坏或被俯冲至造山带之下, 台内储层规模和分布规律认识不清; (2) 中国海相碳酸盐岩往往位于叠合盆地下构造层, 埋深多大于 5000m, 经历复杂构造—成岩改造, 深层碳酸盐岩储层规模、发育主控因素和分布规律不详; (3) 除礁滩(白云岩)储层和潜山岩溶风化壳储层外, 中国巨厚碳酸盐岩层系内幕受多旋回构造运动和断裂活动作用及影响, 储层发育与分布特征知之不多; (4) 中国碳酸盐岩层系年代老, 尤其是中—新元古界和下古生界盐下微生物白云岩十分发育, 古老微生物碳酸盐岩储层是否有效与有效储层保持机理不明。

围绕上述诸多挑战, 依托国家油气重大专项“十一五”至“十三五”碳酸盐岩项目和中国石油天然气集团有限公司碳酸盐岩储层重点实验室, 有针对性开展了碳酸盐岩沉积储层攻关研究, 取得 4 项理论认识创新, 相关理论进展为塔里木盆地塔中、轮古、哈拉哈塘和顺北及四川盆地普光、元坝、安岳等大型油气田的发现既有指导意义, 也为相关发现所证实。

1 对多个小克拉通内裂陷带的识别评价推动碳酸盐岩勘探领域由台缘拓展至台内

与岩溶储层相比, 礁滩(白云岩)储层是在均质性与分布范围方面更为优质的储层。全球已探明的 80%

碳酸盐岩油气储量均与礁滩(白云岩)储层有关^[21]。在过去数十年里,全球碳酸盐岩油气勘探发现的大油气田主要集中在台缘带,因为台缘带礁滩储层规模大,沉积相带分布规律,侧向连续性好,而且与烃源灶紧邻,具有良好的成藏条件。中国海相碳酸盐岩位于叠合盆地地下构造层,克拉通台地面积小,台缘带大多被造山作用破坏或被俯冲到造山带之下。在21世纪初之前,中国在碳酸盐岩层系发现的大油气田以潜山岩溶风化壳储层为主,如塔里木盆地的塔河油田、鄂尔多斯盆地的靖边气田与渤海湾盆地任丘大油田等;在台内发现的礁滩(白云岩)型油气田的储量规模均比较小,如四川盆地的五百梯、罗家寨、铁山坡、渡口河等气田。而且对台内礁滩(白云岩)储层分布规律与侧向连续性的认识远不如台缘礁滩(白云岩)储层,且储层质量也较差,能否找到大型礁滩(白云岩)型油气田成为台内拓展勘探领域与资源潜力评价面临的重要挑战。

受“十一五”期间发现普光大气田的启发,板块边缘由三叉裂谷系伸向台地内部的一支“衰亡臂”,在其周缘也可以发育有规模的礁滩(白云岩)储层,台地

内部如果存在类似隆洼相间的构造—古地理背景,洼陷周缘也会发育有规模的礁滩(白云岩)储层。据此将台地内部拓展勘探领域聚焦于台内隆洼格局的刻画上,在震旦系—寒武系发现了德阳—安岳台内裂陷带,这为安岳龙王庙组缓坡颗粒滩(白云岩)型大气田的发现所证实,探明天然气地质储量 $4400 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

1.1 台内裂陷的识别与演化特征

台内裂陷是指碳酸盐台地内由基底断裂的拉张或走滑拉分作用,诱发盆地基底发生差异沉降而形成的带状沉降区域,基底为陆壳,深度达数百米至千米,宽度达数十至上百千米,长度达百千米至数百千米^[22]。台内裂陷具以下5个识别标志:(1)裂陷和台地具明显不同的地层序列和沉积特征;(2)裂陷与台地的地层厚度有明显差异;(3)裂陷与台地的过渡带具明显的台缘带或分界断裂;(4)台地边缘进积型沉积体特征明显;(5)裂陷带常引起重力负异常。这些标志为台内裂陷识别提供了依据,图1为四川盆地灯影组—龙王庙组厚度图,揭示了四川盆地德阳—安岳台内裂陷的分布。

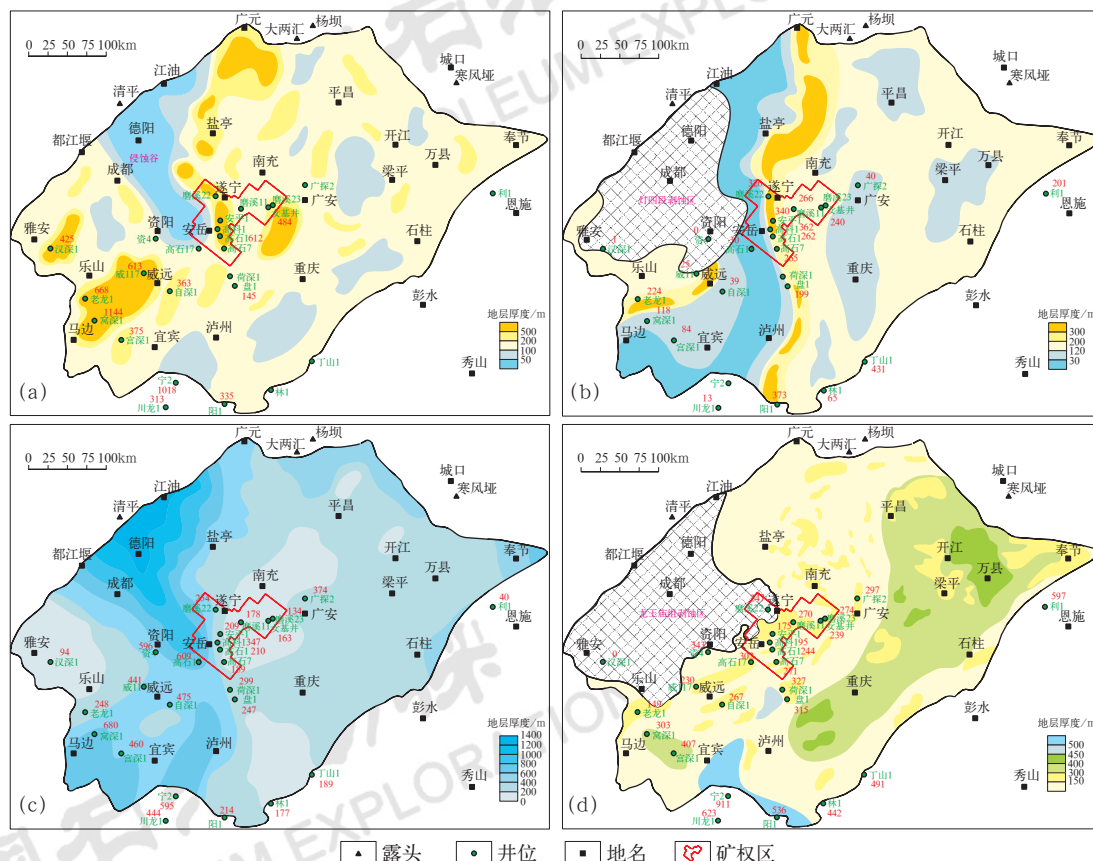


图1 四川盆地灯影组—龙王庙组厚度图

Fig.1 Strata thickness maps of the Sinian Dengying Formation—Lower Cambrian Longwangmiao Formation in Sichuan Basin

(a) 灯一段—灯三段厚度图,德阳—安岳台内裂陷雏形阶段;(b) 灯四段厚度图,德阳—安岳台内裂陷鼎盛期;(c) 下寒武统麦地坪组+筇竹寺组厚度图,德阳—安岳台内裂陷进入填平补齐阶段;(d) 下寒武统沧浪铺组+龙王庙组厚度图,德阳—安岳台内裂陷消亡,进入碳酸盐缓坡发育阶段

德阳—安岳台内裂陷经历了初始裂陷、裂陷鼎盛和裂陷填平补齐 3 个阶段。灯二段沉积期为小克拉通浅水台地发育阶段，在四川盆地西北缘的江油一带发育台内裂陷的雏形；灯二段沉积之后由于灯影组沉积期的拉张环境，发育南北向断裂，形成北西—南东向的侵蚀谷和台内裂陷，由江油向南可延伸到德阳—安岳一带，甚至一直延伸到蜀南地区。灯四段沉积期进入台内裂陷发育鼎盛阶段，裂陷内的灯四段为欠补偿深水沉积，裂陷周缘的台缘带发育礁滩（白云岩）储层。早寒武世进入填平补齐阶段，裂陷内地层厚度明显大于同期裂陷周缘和台内地层厚度，也是麦地坪组和筇竹寺组两套烃源岩发育的重要阶段。

1.2 台内裂陷关联的成藏组合

德阳—安岳台内裂陷发育和演化控制了台内两大类成藏组合。

(1) 控制两套规模优质储集体发育。一是灯影组，与台内裂陷发育相关的裂陷周缘丘滩白云岩储层；二是龙王庙组，与台内裂陷演化末期填平补齐相关的碳酸盐缓坡颗粒滩白云岩储层，并建立了“两类台缘”和“双滩带”沉积模式（图 2）。

(2) 控制生烃中心发育（图 2、图 3）。筇竹寺组烃源岩沿裂陷展布方向沉积厚度最大，一般为 300~350m，裂陷两侧厚度明显减薄，一般为 100~300m，

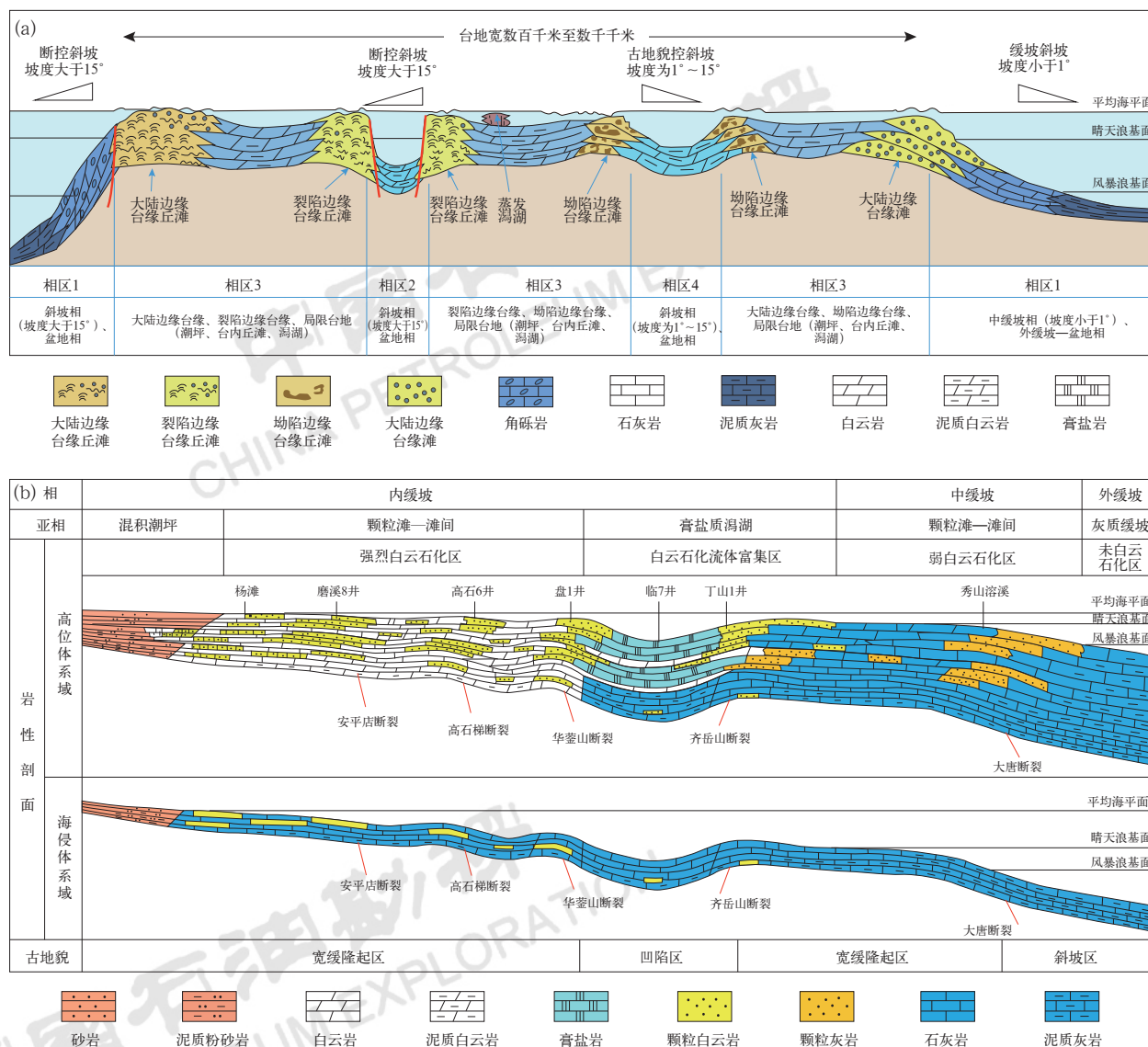


图 2 “两类台缘”和“双滩带”沉积模式

Fig.2 Deposition modes of “two types of platform margins” and “bi-shoal facies zones”

(a) 灯影组与台内裂陷相对应的“两类台缘”沉积模式；(b) 龙王庙组与台内裂陷演化末期填平补齐相对应的“双滩带”沉积模式

裂隙主体部位筇竹寺组烃源岩厚度是邻区的2~5倍。麦地坪组烃源岩主要分布在裂隙内,厚度为50~100m,而周缘地区仅为1~5m,两者相差10倍以上。

烃源岩和储集体的时空配置构成两类成藏组合(图3)。一是麦地坪组、筇竹寺组烃源岩与灯二

段和灯四段储集体构成旁生侧储型成藏组合(烃源岩与储层对接)或上生下储型成藏组合(不整合面和断层是油气运移的通道);二是麦地坪组、筇竹寺组烃源岩与龙王庙组碳酸盐缓坡颗粒滩白云岩储层构成下生上储型成藏组合,断层是油气运移的主要通道。

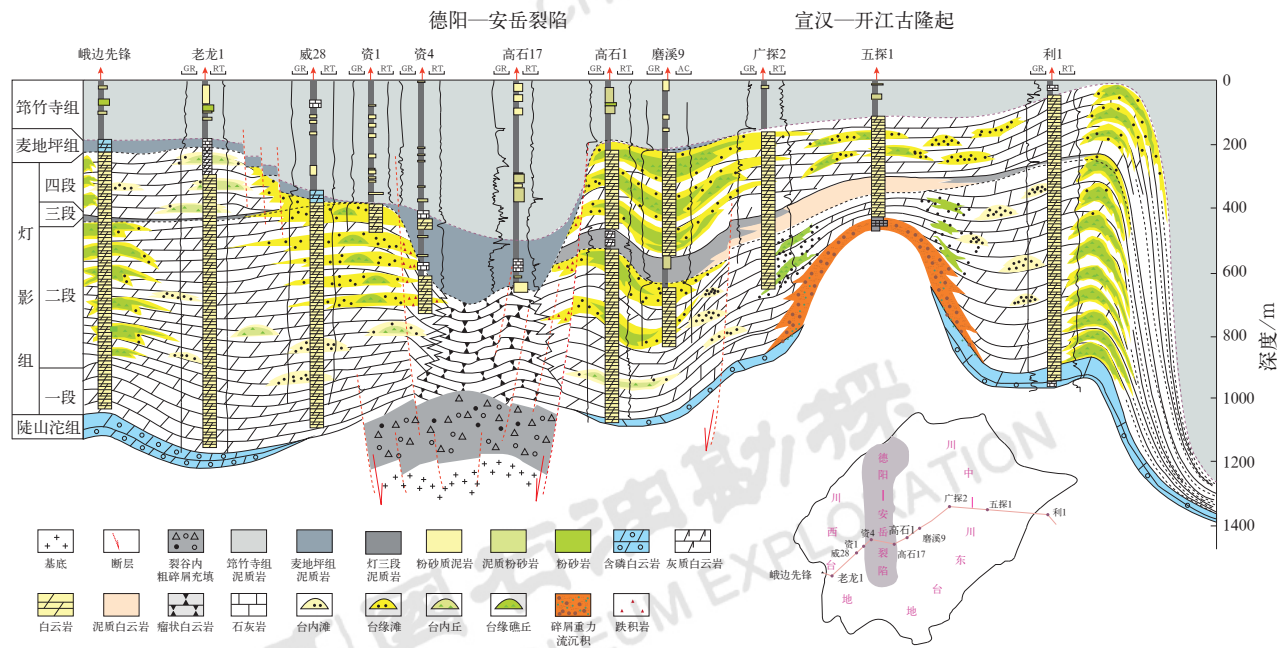


图3 四川盆地灯影组一下寒武统成藏组合示意图^[23]

Fig.3 Schematic hydrocarbon accumulation assemblages of the Sinian Dengying Formation–Lower Cambrian in Sichuan Basin^[23]

1.3 台内裂陷成因及对勘探的启示

泛大陆裂解是小克拉通内裂陷发育的主要控制因素,是基底断裂拉张或走滑拉分作用的驱动力。罗迪尼亚(Rodinia)泛大陆裂解与新元古代晚期兴凯地裂运动的发生为德阳—安岳台内裂陷的发育提供了基本地质背景,南盘江地区泥盆纪—石炭纪台内裂陷的发育与冈瓦纳(Gondwana)泛大陆裂解有关,开江—梁平台内裂陷的发育则受控于潘基亚(Pangea)泛大陆的裂解。

塔里木盆地晚震旦世—奥陶纪发育巨厚层碳酸盐岩层系,受罗迪尼亚泛大陆裂解影响,也发育台内裂陷。根据现有地震资料揭示,已初步识别出晚震旦世库满裂陷和塔西南裂陷。四川盆地晚震旦世—中三叠世发育大套巨厚层碳酸盐岩层系,经历了罗迪尼亚、冈瓦纳和潘基亚泛大陆裂解事件,震旦纪—寒武纪、泥盆纪—石炭纪、二叠纪—早中三叠世均发育台内裂陷。鄂尔多斯盆地中—新元古代—奥陶

纪发育大套巨厚层碳酸盐岩层系,经历了哥伦比亚(Columbia)、罗迪尼亚泛大陆裂解事件,长城纪、蓟县纪和震旦纪—寒武纪也发育台内裂陷,已初步识别了长城纪—蓟县纪贺兰、定边、晋陕和豫陕4个裂陷。中国小克拉通台内裂陷的发育具有普遍性。

德阳—安岳台内裂陷带的勘探实践,证实中国小克拉通台内具有较大勘探潜力,值得期待。除台缘带外,具备裂陷发育的台内区同样可以发现大油气田。基于台内裂陷演化建立的“两类台缘”和“双滩带”沉积模式,不但丰富了碳酸盐岩沉积学内涵,而且为勘探领域由台缘拓展至台内奠定了理论基础。

2 内幕岩溶储层新类型的发现助推勘探领域由潜山区拓展至内幕区

岩溶作用是指水对可溶性岩石的化学溶蚀、机械侵蚀、物质迁移和再沉积的综合地质作用过程,以及由此所产生的地质现象的统称。岩溶作用往往形成规模不等的溶孔、溶洞及溶缝。岩溶储层储集空间以溶孔、

溶洞及溶缝为特征,具有极强的非均质性^[24]。传统意义上的岩溶储层均与明显的地表剥蚀和峰丘地貌有关,或与大型角度不整合面有关,岩溶缝洞沿大型不整合面或峰丘地貌呈准层状分布^[25-26],集中分布在不整合面之下 0~50m 的范围内。如塔里木盆地塔北地区轮南油田和塔河油田,奥陶系鹰山组潜山岩溶储层上覆石炭系陆相砂泥岩,之间代表长达 120Ma 的地层剥蚀和缺失;又如鄂尔多斯盆地靖边气田,奥陶系马家沟组白云岩风化壳储层上覆石炭系本溪组陆相砂泥岩,之间代表长达 100Ma 的地层剥蚀和缺失。

中国海相碳酸盐岩分布面积虽广,但按传统岩溶储层的概念去定义和评价,岩溶储层的勘探范围仅限于潜山区,分布面积有限。塔里木盆地塔北哈拉哈塘大油田和顺北大油田的发现证实,碳酸盐岩岩溶缝洞的分布不仅仅限于潜山区,广大的碳酸盐岩内幕区同样发育岩溶缝洞,与中短期的地层剥蚀作用有关,被称为层间岩溶作用,如在后期构造演化期形成斜坡地貌,还可叠加顺层岩溶作用改造,形成的顺层岩溶规模更大。碳酸盐岩内幕区还发育一类特殊的岩溶储层,即受断裂控制的断溶体储层,如塔北哈拉哈塘、顺北地区和英买 1-2 井区均发育这类储层。基于塔里木盆地奥陶系岩溶勘探实践提出的岩溶储层细分方案和分布规律认识列于表 1,不但丰富了碳酸盐岩储层地质学内涵,而且使勘探领域由潜山区拓展到内幕区,由原来寻找与大型角度不整合面相关的潜山区岩溶缝

洞储层,拓展到寻找碳酸盐岩内幕区层间岩溶储层、顺层岩溶储层和断溶体储层,使勘探领域明显扩大,并为塔里木盆地塔北南斜坡哈拉哈塘油田、顺北油田的发现所证实。实际上,多类型不整合面、构造斜坡和大型基底断裂带均可控制岩溶作用类型(层间岩溶作用、顺层岩溶作用、潜山岩溶作用和断溶作用)和岩溶缝洞体的发育,是评价落实有规模的岩溶储集体分布、勘探发现新储量的重要方向。

塔里木盆地岩溶储层勘探可划分为 3 个阶段:一是 2008 年之前的潜山岩溶储层勘探阶段,勘探领域集中在潜山区;二是 2008—2015 年的碳酸盐岩内幕层间(顺层)岩溶勘探阶段,认识到除潜山岩溶外,碳酸盐岩内幕受层间岩溶作用改造,同样发育岩溶储层,勘探领域由潜山区拓展到内幕区,推动整个塔北隆起南斜坡成为勘探的主战场,并为勘探发现所证实(图 4);三是 2016—2020 年的断溶体储层勘探阶段,发现沿断裂系统同样可以发育岩溶缝洞体,不受潜山或层间岩溶面的控制,并为哈拉哈塘油田和顺北油田的发现所证实(图 5)。

尽管内幕岩溶储层的成因还有争议,但内幕岩溶储层的发现与勘探突破,推动岩溶储层只分布于潜山区的传统认识发生重大改变,而且层间岩溶储层更具规模,勘探潜力更大。这一认识创新不但填补了国内外岩溶储层研究的空白,而且对中国小克拉通台地碳酸盐岩油气勘探具有重要的指导意义。

表 1 塔里木盆地、四川盆地和鄂尔多斯盆地岩溶储层分类

Table 1 Classification of karst reservoirs in Tarim Basin, Sichuan Basin, and Ordos Basin

序号	岩溶储层亚类			定义	实例
1	潜山区	潜山(风化壳)岩溶储层	石灰岩潜山岩溶储层	分布于碳酸盐岩潜山区,与中长期的角度不整合面有关,准层状分布,围岩为石灰岩,峰丘地貌特征明显,潜山岩溶作用时间早于上覆地层、晚于下伏地层的形成时间	轮南低凸起奥陶系鹰山组
			白云岩风化壳储层	分布于碳酸盐岩潜山区,与中长期的角度不整合面有关,准层状分布,围岩为白云岩,地貌平坦,峰丘特征不明显,潜山岩溶作用时间早于上覆地层、晚于下伏地层的形成时间	①靖边奥陶系马家沟组五段;②牙哈—英买力寒武系;③龙岗三叠系雷口坡组
2	内幕区	层间岩溶储层		分布于碳酸盐岩内幕区,与碳酸盐岩层系内部中短期的平行(微角度)不整合面有关,准层状分布,垂向上可多套叠置,层间岩溶作用时间介于上覆地层和下伏地层形成时间之间	塔中北斜坡奥陶系鹰山组
3		顺层岩溶储层		分布于碳酸盐岩潜山周缘具斜坡背景的内幕区,环潜山周缘呈环带状分布,与不整合面无关,顺层岩溶作用时间与上倾方向潜山区的潜山岩溶作用时间一致,岩溶强度向下倾方向逐渐减弱	塔北南斜坡奥陶系鹰山组
4		断溶体储层		分布于断裂发育区,尤其是背斜的核部,与不整合面及峰丘地貌无关,没有地层的剥蚀和缺失,受断裂控制导致缝洞发育跨度大,沿断裂呈栅状分布,断裂诱导岩溶作用时间发生于断裂形成之后	顺北、富满地区奥陶系一间房组—鹰山组

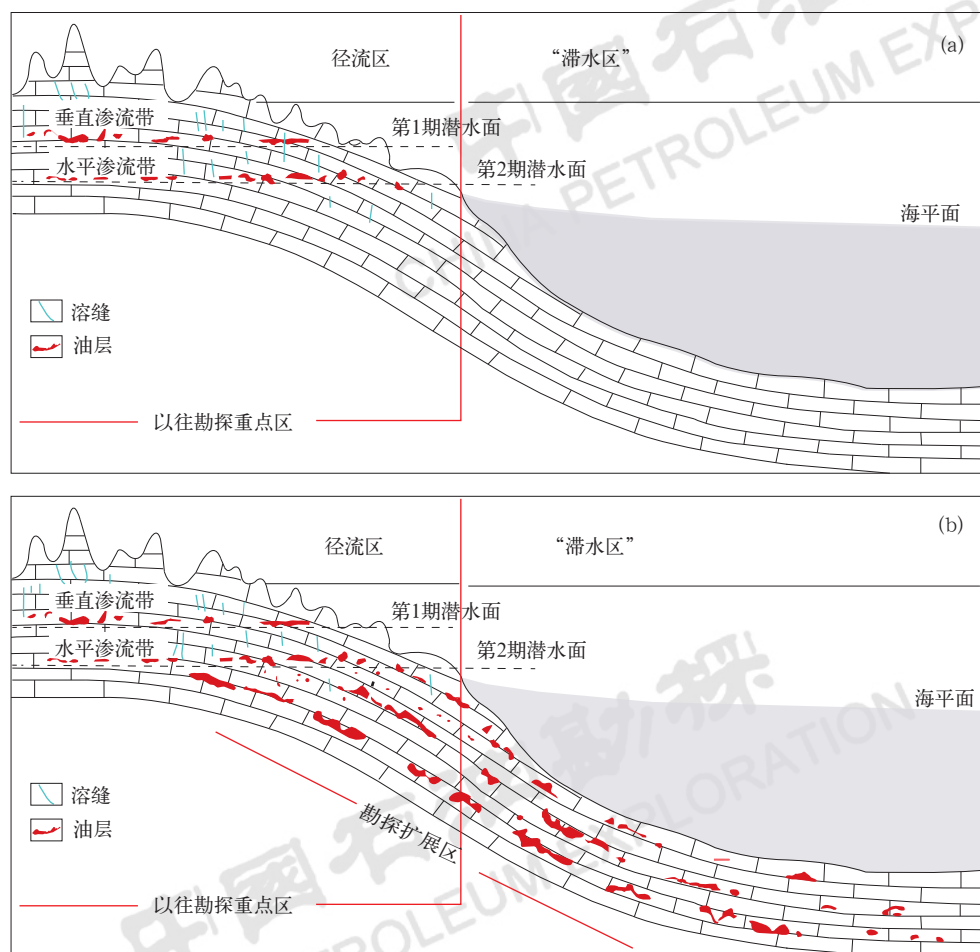


图4 塔里木盆地岩溶模式图与油气勘探领域

Fig.4 Karstification modes and corresponding exploration fields in Tarim Basin

(a) 潜山岩溶储层模式指导下的油气勘探, 勘探领域局限于潜山区; (b) 内幕岩溶储层模式指导下的油气勘探, 勘探领域由潜山区拓展到内幕区

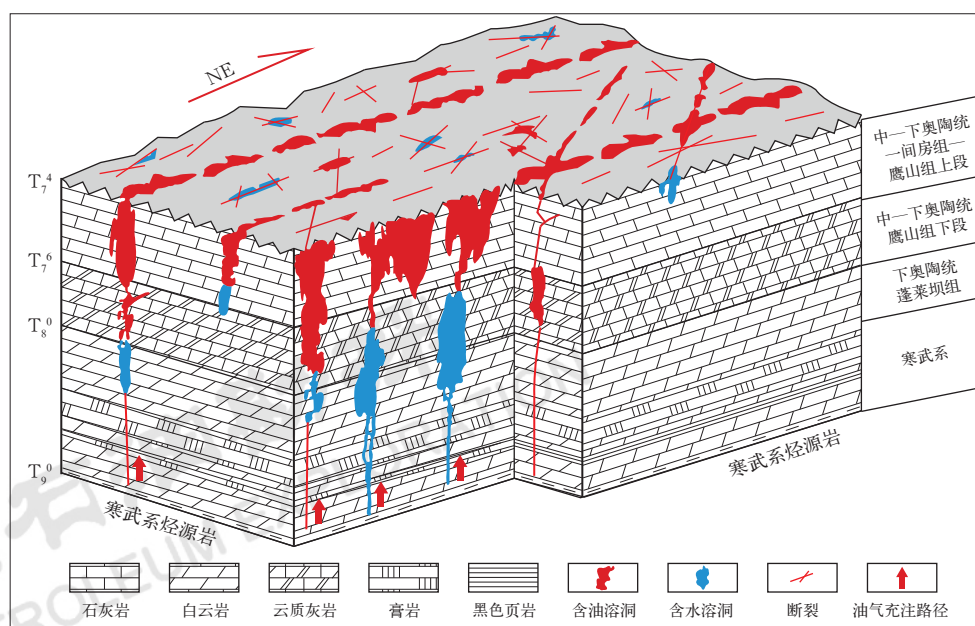
图 5 顺北油田断溶体储层分布图^[27]

Fig.5 Distribution of fault karst reservoir in Shunbei Oilfield in Tarim Basin^[27]

表2揭示了塔里木盆地、四川盆地和鄂尔多斯盆地各类岩溶储层的勘探现状,其中塔里木盆地塔北轮南低凸起鹰山组石灰岩潜山岩溶储层、牙哈—英买力地区寒武系断隆区白云岩风化壳储层、塔中北斜坡鹰山组层间岩溶储层、塔北南缘斜坡区一间房组及鹰山组顺层岩溶储层,以及英买1-2井区、富满和顺北地区一间房组及鹰山组断溶体储层已取得重大勘探发现;四川盆地三叠系雷口坡组和鄂尔多斯盆地马家沟

组盐上白云岩风化壳储层也有较大规模的勘探发现。

四川盆地加里东期的乐山—龙女寺古隆起、印支期的开江古隆起和泸州古隆起及周缘具备潜山(风化壳)岩溶储层及顺层岩溶储层发育的地质背景;川东高陡构造带石炭系及川西南地区茅口组和嘉陵江组具备断溶体储层发育的地质条件;四川盆地震旦纪末、寒武纪末和奥陶纪末均发生大规模的海平面下降,为层间岩溶储层的发育提供了地质背景。

表2 中国海相含油气盆地岩溶储层类型及分布

Table 2 Types and distribution of karst reservoirs in marine prolific basins in China

序号	岩溶储层亚类			塔里木盆地	四川盆地	鄂尔多斯盆地
1	潜山区	潜山(风化壳)岩溶储层	石灰岩潜山岩溶储层	主要见于塔北轮南低凸起鹰山组	未发现此类储层的油气藏,潜在发现领域	未发现此类储层的油气藏,潜在发现领域
			白云岩风化壳储层	主要见于牙哈—英买力地区寒武系断隆区	主要见于三叠系雷口坡组顶	主要见于奥陶系马家沟组五段盐上层系
2	内幕区	层间岩溶储层		主要见于塔中北斜坡鹰山组	未发现此类储层的油气藏,潜在发现领域	未发现此类储层的油气藏,潜在发现领域
3		顺层岩溶储层		主要见于塔北南缘斜坡区一间房组及鹰山组	未发现此类储层的油气藏,潜在发现领域	未发现此类储层的油气藏,潜在发现领域
4		断溶体储层		主要见于英买1-2井区、富满和顺北地区一间房组及鹰山组	茅口组、嘉陵江组、石炭系与高陡构造相关的裂缝型小气藏	未发现此类储层的油气藏,潜在发现领域

鄂尔多斯盆地除马家沟组顶发育白云岩风化壳储层外,盆地西缘奥陶系具备与塔北南斜坡奥陶系相似的地质背景,有利于顺层岩溶储层的发育;此外,天1井、天深1井、李1井、鄂6井、鄂8井及鄂9井在奥陶系克里摩里组、桌子山组均见不同程度的钻井液漏失和放空,揭示顺层岩溶作用的存在。

3 深层碳酸盐岩储层分布具有相控性,助推勘探领域由浅层拓展至深层—超深层

中国小克拉通海相碳酸盐岩位于叠合盆地最底部构造层,具有年代老和埋藏深的特点,由于碳酸盐岩强化学活动性和经历漫长的成岩改造作用,大多数学者^[28-32]认为深层碳酸盐岩以埋藏溶蚀孔洞为主,有机酸溶蚀、硫酸盐热化学还原反应(TSR)、热液活动是埋藏溶蚀孔洞发育的关键。深层碳酸盐岩通过有机酸溶蚀、TSR、热液活动可以形成埋藏溶蚀孔洞,已被众多科学家普遍接受,但这种储层成因观点显然没有回答勘探家所关注的深层碳酸盐岩储层的规模性和可预测性问题,对指导深层油气勘探有局限性。通过“十三五”研究攻关,提出了深层碳酸盐岩储层成因新

认识,即深层碳酸盐岩优质储层分布的相控论,这一新认识为深层碳酸盐岩储层规模发育和可预测性提供了理论基础,也确立了深层碳酸盐岩油气勘探的地位和信心。

3.1 深层碳酸盐岩储层具有相控性,原岩为礁滩沉积体

前已述及,深层碳酸盐岩发育颗粒型储层和溶蚀孔洞型储层两大类。其中,溶蚀型储层中既有颗粒碳酸盐岩储层被溶蚀改造的亚类,也有受断裂和不整合淋滤作用形成的溶蚀储层。关于颗粒型碳酸盐岩储层,不论是经过溶滤的还是经过深成岩作用叠加改造的,其原岩沉积的原始孔隙性特征均对深层规模储层发育具有重要控制作用。

白云岩储层可分为两类,一类是保留或残留原岩礁滩结构的白云岩储层,另一类是晶粒白云岩储层。前者的原岩应为礁滩相沉积(图6a、b),沉积原生孔为主,少量溶蚀孔洞;后者通过“锥光”“荧光”等原岩结构恢复技术,发现原岩也为礁滩相沉积,最为典型的案例是四川盆地二叠系栖霞组细一中晶白云岩储层(图6c、d),原岩为砂屑生屑灰岩,晶间孔

和晶间溶孔实际上是对原岩粒间孔、粒内孔（体腔孔）和溶孔的继承和调整，并非为白云石化作用的产物。塔里木盆地英买力地区下奥陶统蓬莱坝组细一中晶白云岩储层的原岩同样为礁滩相沉积。值得探索的是，细一中晶白云岩的原岩颗粒结构易于恢复，而中一粗晶、粗晶、巨晶白云岩的原岩结构难以恢复，

这可能受控于以下两个方面的原因：一是原岩颗粒粒度大于白云石晶体粒度时，原岩颗粒结构易于恢复（图 6e），原岩颗粒粒度小于白云石晶体粒度时，原岩颗粒结构难以恢复（图 6f）；二是晶粒粗的白云石晶体经历了更强烈的重结晶作用，或者本身就是沉淀形成的，不存在原岩组构恢复的问题。

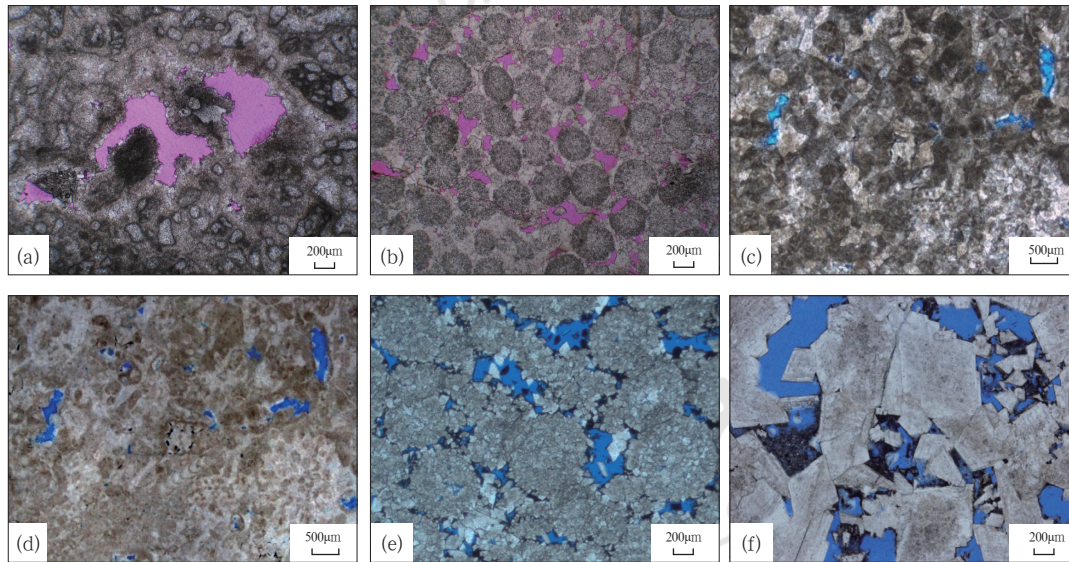


图6 两类白云岩的原岩特征

Fig.6 Microscopic characteristics of parent rocks of the two types of dolomites

(a) 藻格架白云岩，保留原岩结构，原生藻格架孔，下寒武统，塔里木盆地巴楚地区，方1井，4600.50m，铸体薄片，单偏光；(b) 颗粒白云岩，保留原岩结构，粒间孔，中寒武统，塔里木盆地牙哈地区，牙哈7X-1井，5833.20m，铸体薄片，单偏光；(c) 细晶白云岩，晶间孔和晶间溶孔，栖霞组，川中地区，磨溪42井，4656.25m，铸体薄片，单偏光；(d) 视域同(c)，为原岩结构恢复后照片，原岩为生屑灰岩，粒间孔、铸模孔和体腔孔；(e) 鲕粒白云岩，粒间孔，白云石晶体粒度小于鲕粒，下三叠统飞仙关组，四川盆地龙岗地区，龙岗26井，5626.00m，铸体薄片，单偏光；(f) 块状粗晶白云岩，白云石被溶蚀成港湾状，晶间溶孔和溶蚀孔洞发育，池67井，茅口组二段，3311.69m，铸体薄片，单偏光

溶蚀模拟实验证实岩溶缝洞的发育具有岩性选择性^[33]，主要发育于泥粒灰岩中，颗粒灰岩、粒泥灰岩和泥晶灰岩中少见，并为塔里木盆地一间房组—鹰山组岩溶缝洞（孔洞）围岩的岩性统计数据所证实。岩溶缝洞的发育离不开不整合面、层间岩溶面和断裂，但岩溶缝洞的富集受岩性控制。

3.2 沉积和表生环境对深层碳酸盐岩储层孔隙发育具有重要控制作用

碳酸盐岩储层孔隙有3种成因：一是原生沉积孔隙，二是早表生成岩环境不稳定矿物（文石、高镁方解石等）溶解形成的组构选择性溶孔，三是晚表生成岩环境碳酸盐岩溶蚀形成的非组构选择性溶蚀孔洞。尽管碳酸盐岩的强化学活动性贯穿于整个埋藏过程，但最为强烈的增孔事件多发生在表生环境，因为只有表生环境才是完全的开放体系，且富含CO₂的大气淡水能够得到及时补充，溶解产物能及时被搬运，

为规模溶蚀创造了优越条件，而且这些溶蚀孔洞为埋藏成岩流体提供了运移通道。尽管碳酸盐岩原生孔隙难以保存或因溶蚀扩大而难以识别，但粒间孔、格架孔等原生孔隙在塔里木盆地和四川盆地深层碳酸盐岩储层中是很常见的。

3.3 埋藏环境是深层碳酸盐岩储层孔隙贫化和富集调整的重要环境场所

埋藏环境通过溶蚀作用可以增加孔隙空间这一观点已为地质学家所接受。本文通过塔里木盆地、四川盆地和鄂尔多斯盆地碳酸盐岩储层实例解剖，认为埋藏期碳酸盐岩孔隙的改造作用主要是通过溶蚀（有机酸、TSR及热液等作用）和沉淀作用，使先期存在的孔隙得到富集或贫化，先期存在的孔隙发育带控制埋藏溶孔的分布。在开放体系中处于高势能区的孔隙会发生建设性增大过程，是孔隙建造的主要场所，而低势能区是孔隙被堵塞破坏的部位；封闭体

系则是先存孔隙得以保存的场所。通过先存孔隙的富集或贫化,使深层优质储层得以形成或被劣质化。在建设性埋藏作用发生部位,其意义远大于原生孔隙的地位^[33]。

3.4 白云石化与热液作用在深层碳酸盐岩储层孔隙发育中的地位

有关白云石化在孔隙建造和破坏中的作用,长期以来均是争论的焦点^[34-35]。由于深层碳酸盐岩储集空间主要发育于礁滩(白云岩)中,白云石化被认为对孔隙发育有重要贡献^[7,11,18-19]。然而,白云石化作用对孔隙的贡献有些被夸大,因为白云岩中的孔隙实际上是对原岩原始孔隙的继承和调整,一部分是原始孔隙的保持,一部分是在原始孔隙基础上通过溶蚀作用孔隙增大^[36],如果没有原始孔隙的存在,则白云石化的增孔作用也有限。但白云石化作用对早期孔隙的保存还是具有重要作用,这一点值得特别强调。与石灰岩相比,白云岩具有更大的脆性和抗压实—压溶能力,缝合线不发育,这些特性为深层白云岩孔隙(原生孔、表生溶孔和埋藏溶孔)的保存提供了刚性格架,减小了被压实和进一步被胶结充填的可能性。

热液是指从外部(一般来自地壳深部)进入碳酸盐岩地层,且温度明显高于围岩($>5^{\circ}\text{C}$)的矿化流体^[37],一般均与切割较深的大断裂密切相关。在拉张断裂的上盘、走滑断裂及拉张断裂和走滑断裂的交叉部位,往往是热液活动的集中分布区。热液对围岩的改造作用体现在3个方面:一是“热液岩溶作用”^[20,38-39]在围岩中形成溶蚀孔洞,甚至可造成岩层的局部垮塌和角砾岩化,形成体积更大的储集空间;二是交代围岩或沉淀白云石形成热液白云岩;三是热液矿物在先存孔隙、断裂/裂隙中沉淀,堵塞孔隙空间。所以,热液活动在局部范围可以形成溶蚀孔洞,但规模与分布存在不确定性,受控于热液活动规模,也可以对先存孔隙产生破坏作用。热液活动需要有断裂、不整合面和高渗透层存在以作为热液流动的通道,其对先存储集空间的存在具有指示意义,但对深层孔隙发育的建设性作用则变化较大,需视具体情况而有不同评价。

深层碳酸盐岩储层主要以礁滩(白云岩)为主,分布具有相控性和可预测性。明确了礁滩沉积、蒸发潮坪、层序界面、暴露面、不整合面、古隆起和断裂系统控制深层碳酸盐岩规模优质储层的分布。基于上述认识进展,近几年在三大克拉通海相盆地分布区,

围绕深层碳酸盐岩部署了一批风险探井,如塔里木盆地的和田2、楚探1、轮探1、柯探1、乔探1、中寒1和红探1等井,四川盆地的双探1、双探2、双探3、磨溪56、五探1、楼探1、角探1、蓬探1、充探1等井,以及鄂尔多斯盆地的桃77、桃59、桃90、统99、统74、莲92、靳6和靳12等井,钻探证实深层碳酸盐岩规模优质储层的存在,进一步坚定了深层碳酸盐岩勘探的信心。

4 古老微生物碳酸盐岩具备“三元”控储特征,推动中—新元古界和寒武系盐下油气勘探发展

中国海相碳酸盐岩除具有埋藏深、改造强的特点外,还有年代古老、成岩演化程度高的问题。四川盆地新元古界震旦系、塔里木盆地震旦系及寒武系盐下、鄂尔多斯盆地寒武系盐下及蓟县系等层系均广泛发育微生物白云岩,这些经历漫长成岩作用改造的古老微生物碳酸盐岩是否发育有效储层,是制约勘探能否取得突破发展的关键问题之一。本文通过对现代微生物沉积物、现代盐湖沉积物研究和微生物有机质早期低温降解生酸模拟实验、微生物有机质晚期热解生酸模拟实验与微生物诱导原生白云石沉淀模拟实验等,揭示微生物碳酸盐岩储层成因及其发育特征。研究取得的重要进展是,微生物碳酸盐岩沉积要形成有效储层取决于三要素的有机配合:一是具备高初始孔隙度;二是富含微生物有机质;三是易于发生早期白云石化。为此提出微生物碳酸盐岩“三元”控储新认识。

4.1 叠层石和凝块石沉积是微生物碳酸盐岩储层发育的基础

微生物碳酸盐岩包括叠层石、凝块石、树枝石、均一石、核形石和纹石6类^[40]。中国中—新生代微生物碳酸盐岩储层主要发育于陆相沉积湖盆中,如中国东部众多盆地及柴达木盆地、塔里木盆地的古近系微生物碳酸盐岩储层^[41-49]。既有叠层石和凝块石灰岩,也有叠层石和凝块石白云岩,手标本呈蜂窝状产状,储层物性极佳。叠层石和凝块石白云岩储层主要分布于碳酸盐岩—膏盐岩沉积体系中,从已有观察研究看,白云石化对储层的发育似乎没有实质性影响。中国前寒武纪、古生代及早—中三叠世海相微生物碳酸盐岩储层以叠层石和凝块石白云岩为主,也主要分布于碳酸盐岩—膏盐岩沉积体系,如四川盆地灯影组、

嘉陵江组、雷口坡组一段至三段及塔里木盆地寒武系盐下叠层石和凝块石白云岩储层等; 未发生白云石化的叠层石和凝块石灰岩往往致密无孔, 如四川盆地雷口坡组四段^[50], 这些古老的微生物碳酸盐岩的白云石化似乎对储层发育的控制作用更明显, 显然与陆相微生物碳酸盐岩有所不同。

无论是叠层石和凝块石灰岩储层, 还是叠层石和凝块石白云岩储层, 储集空间均以原生藻格架孔为主, 白云石化对孔隙的增加没有实质性贡献^[51]。巴哈马台地现代微生物沉积物研究也揭示, 叠层石灰岩具有很高的初始孔隙度, 初始孔隙一部分为沉积原生孔, 一部分为微生物有机质腐烂以后形成的孔隙。这些孔隙既是中国中—新生代湖相微生物碳酸盐岩储层发育的主要储集空间, 也是前寒武纪及古生代海相微生物碳酸盐岩储层发育的主要孔隙空间。所不同的是, 古老微生物碳酸盐岩储层中存在的孔隙空间大多是在初始孔隙基础上, 经过建设性改造成岩作用, 部分得到继承, 部分发生调整, 部分孔隙空间增大, 也有部分孔隙空间缩小, 即初始孔隙发育的叠层石和凝块石沉积是储层发育的基础。对于中国古老海相叠层石和凝块石白云岩储层而言, 这些初始孔隙是如何在经历漫长埋藏历史过程而得以保存下来, 后文在讨论微生物碳酸盐岩储层成因的控制因素时会具体说明, 在此不再赘述。

4.2 微生物有机质降解和热解生酸是初始孔隙得以保持的关键因素

前人对巴哈马台地现代微生物沉积物特征研究, 不但揭示了叠层石灰岩具有很高的初始孔隙度, 而且发现微生物碳酸盐岩富含有机质, 这些有机质的腐烂不但可以释放出大量的初始孔隙, 而且早期低温降解和晚期热解生成的有机酸也对碳酸盐沉积物具有溶蚀作用, 也有利于初始孔隙在漫长埋藏过程中的保持甚至增大, 这是微生物碳酸盐岩储层发育的第二个主控因素^[33]。

微生物有机质降解和热解生酸模拟实验也揭示了这一特征。由于叠层石和凝块石沉积的微生物有机质含量丰富, 在生物降解和热裂解阶段的生酸量较大, 使叠层石和凝块石长期处于酸性环境中, 除有机酸溶蚀成孔外, 也有利于初始孔隙的保持, 模拟实验很好地解释了古老叠层石和凝块石白云岩储层为何能像古近系叠层石、凝块石储层一样发育优质储层的原因。这些古老的微生物碳酸盐岩储层不仅孔隙发育, 而且

孔隙中很少有亮晶方解石或白云石胶结物。

同时, 碳酸盐岩—膏盐岩沉积体系, 因石膏的沉淀会导致硫酸根(SO_4^{2-})浓度降低, 这有利于硝酸盐还原生酸过程和Fe氧化物还原生酸作用的发生, 使生酸强度明显提高, 更有利于初始孔隙的保持和扩容。埋藏环境石膏溶解产生的硫酸根(SO_4^{2-})也有利于硫酸盐热化学还原反应的发生, 因而对溶蚀孔洞的发育也是一个建设性因素。

4.3 古老碳酸盐岩—膏盐岩沉积体系中微生物碳酸盐岩易发生早期白云石化, 有利于优质储层集中于叠层石和凝块石白云岩层系

现代盐湖沉积物特征研究及微生物诱导原白云石沉淀模拟实验, 均揭示碳酸盐岩—膏盐岩沉积体系易于发育沉淀和交代两类早期低温白云岩。虽然白云石化对储集空间的增加没有实质贡献^[52], 但早期白云石化使微生物白云岩在埋藏环境中经历的成岩改造与石灰岩完全不同, 总体看对初始孔隙的保存是有利的^[53-54], 表现在4个方面: 一是早期白云石化导致早期固结(巴哈马台地现代微生物碳酸盐沉积已发生固结或半固结), 使密度加大, 抗压实能力增强, 这是微生物白云岩能保留更多原生孔的原因之一; 二是微生物白云岩的抗压溶能力远大于石灰岩, 而压溶作用的产物往往为孔隙中的方解石充填提供物质, 这是埋藏环境下微生物白云岩先存孔隙得到更多保留的重要原因; 三是深埋环境中白云岩比石灰岩更容易被有机酸溶解形成次生溶孔^[55-57]; 四是白云岩比石灰岩具有更大的脆性, 易于形成机械破碎裂缝和砾间孔。

4.4 古老微生物碳酸盐岩储层主要分布于叠层石和凝块石沉积相带, 主要发育于碳酸盐岩—膏盐岩沉积体系

前人^[51, 58-59]对微生物碳酸盐岩的研究集中在岩石特征和分类上, 对微生物碳酸盐岩岩石类型及组合的环境意义、岩相古地理特征及沉积模式的认识还不够深入。通过对鄂尔多斯盆地靳2井、金粟山露头及四川盆地鸭深1井、西桑托斯盆地RJS井这4条剖面微生物碳酸盐岩岩石特征及组合序列研究^[60], 建立了缓坡沉积体系和镶边沉积体系两类沉积模式(图7), 为叠层石和凝块石碳酸盐岩有利相带分布预测提供了依据。

从缓坡微生物碳酸盐岩沉积模式看, 叠层石碳酸盐岩主要分布在正常浪基面与平均低潮线之间的内缓坡相带, 凝块石碳酸盐岩则主要分布在风暴浪基面

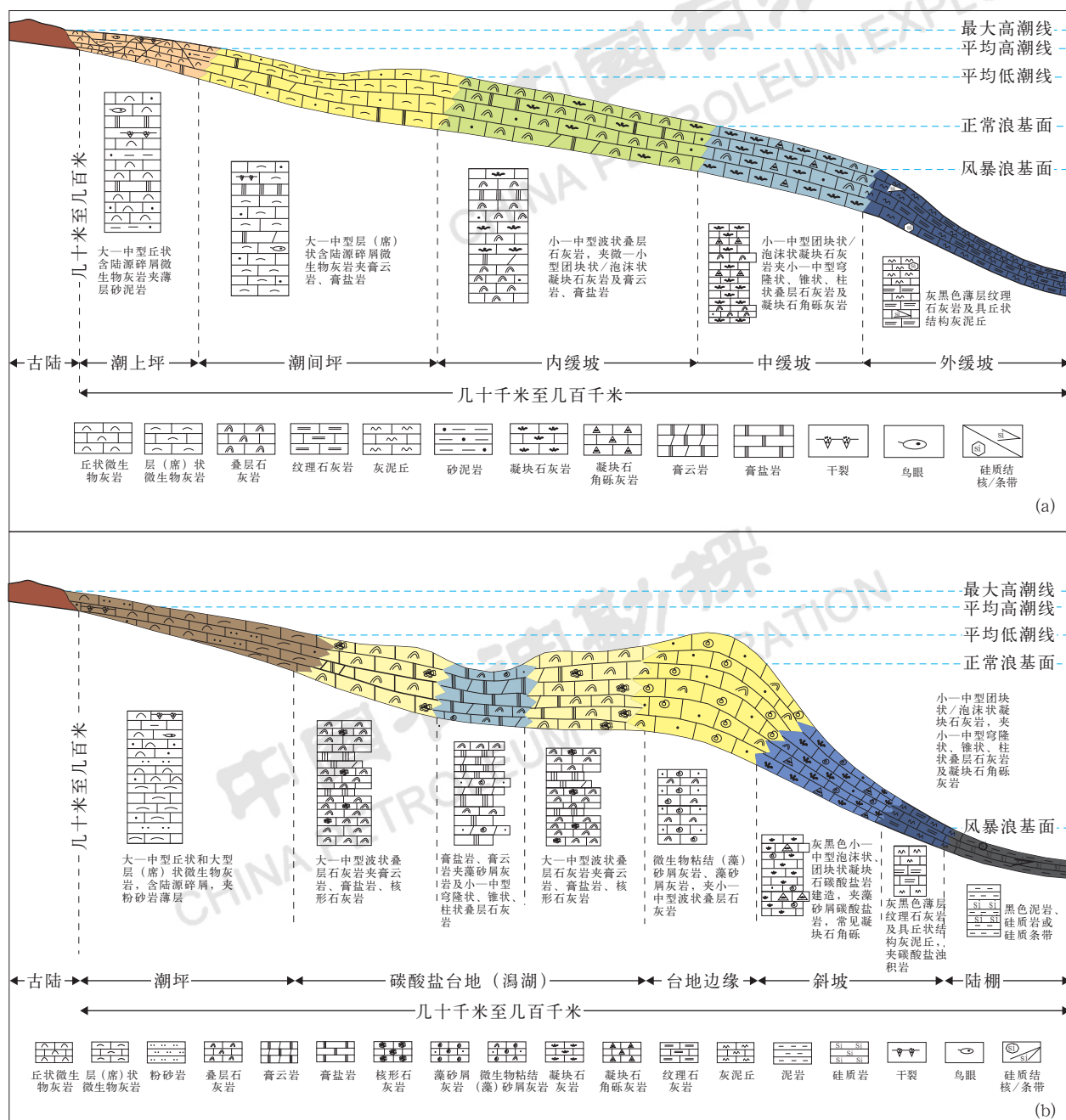


图7 微生物碳酸盐岩沉积模式

Fig.7 Deposition mode of microbial carbonate rocks

(a) 缓坡沉积体系; (b) 镶边沉积体系

与正常浪基面之间的中缓坡相带,凝块石沉积水体的深度大于叠层石沉积^[61],这样的缓坡微生物碳酸盐岩沉积模式以四川盆地震旦系叠层石和凝块石白云岩储层为代表。从镶边沉积体系微生物碳酸盐岩沉积模式看,叠层石碳酸盐岩主要分布在正常浪基面与平均低潮线之间的碳酸盐台地(泻湖),凝块石碳酸盐岩主要分布在风暴浪基面与正常浪基面之间的台缘前斜坡,以塔里木盆地寒武系肖尔布拉克组、四川盆地雷

口坡组叠层石和凝块石白云岩储层发育分布为代表。

不同类型的微生物碳酸盐岩可以出现在同一沉积环境中,同样的不同沉积环境也可以出现同一类型的微生物碳酸盐岩。在尺度上,小环境中出现的沉积物及组合与大环境形成的沉积特征也具相似性。不同地质历史时期均可以发育缓坡和镶边微生物碳酸盐岩沉积,但隐生宙以缓坡沉积体系为主,显生宙则以镶边沉积体系为主。

有研究认为^[62],碳酸盐岩—膏盐岩沉积体系随气候由潮湿向干旱迁移,碳酸盐岩沉积由下往上依次出现凝块石白云岩、藻砂屑白云岩、叠层石白云岩、席(丘)状微生物白云岩、膏云岩、膏盐岩、盐岩组合序列,反之亦然。气候突变会导致某些岩性段的缺失,这为通过古气候研究,预测碳酸盐岩—膏盐岩沉积组合中储层的分布提供了依据。

缓坡沉积体系随气候由潮湿向干旱迁移,碳酸盐岩沉积由下往上依次发育凝块石白云岩储层和叠层石白云岩储层,气候的多期次旋回变化可以使储层在垂向发生多层叠置。镶边沉积体系由于镶边台缘的存在,增加了一套藻砂屑白云岩储层,随气候由潮湿向干旱迁移,由下往上依次发育凝块石白云岩储层→藻砂屑白云岩储层→叠层石白云岩储层,气候的多期次旋回变化也可以导致储层在垂向上多套叠置。

上述理论认识有力推动了四川盆地震旦系灯影组储量规模达万亿立方米气藏群的发现和塔里木盆地寒武系盐下风险勘探的突破。中国陆上克拉通盆地区发育的海相层系存在3套碳酸盐岩—膏盐岩组合:一是灯影组—中下寒武统,以塔里木盆地和四川盆地为代表;二是下奥陶统,以鄂尔多斯盆地为代表;三是中一下三叠统,以四川盆地为代表。同时,中国东部众多陆相沉积盆地,以及柴达木盆地和塔里木盆地的古近系也发育碳酸盐岩—膏盐岩组合,其中发育的微生物白云岩储层不仅有规模,而且品质也较好,值得下一步勘探期待。

5 结论

经过10余年探索总结,中国碳酸盐岩沉积储层研究已经取得了重要进展,这些认识进展有效指导了陆上三大克拉通盆地区围绕碳酸盐岩层系的油气勘探,发现了数个大中型油气田,有力支撑了中国陆上油气储量、产量增长。但是,也应该清醒地认识到,想要对中国陆上广泛发育的碳酸盐岩沉积储层有一个更为客观的认识和评价,仍有很长的路要走。概括起来,主要有以下5个方面:(1)个性化沉积相模式的建立及其在指导生产实践中的应用,就是要系统建立基于年代学、反映纬度特征和有尺度涵义的沉积相模式,并应用于相应层系(年代)、盆地(纬度)和区块(尺度)的岩相古地理研究与编图中,从而避免简单套用前人的沉积相模式,前期攻关建立的“两类台缘”和“双滩带”沉积模式就是很好的创新案例;(2)储层成因和分布规律的认识有待深化,尤其是白云石

化对成储贡献量化评价问题,因为深层碳酸盐岩储层主要是白云岩,白云石化对储层孔隙空间的贡献比例值得未来研究求证;(3)多尺度碳酸盐岩储层表征、建模与应用,包括宏观尺度、油藏尺度和微观尺度3个层面的储层非均质性表征、分布评价与建模,这是实现碳酸盐岩有利储层分布预测、探井井位优选和高效开发井部署的重要保证;(4)相关实验新技术开发,尤其是涉及储层地球化学和储层溶蚀模拟的实验新技术,将为储层成因研究提供有效途径;(5)地球物理技术的升级发展将为碳酸盐岩岩相识别和储层预测提供利器,包括测井岩相和储层识别技术(常规和成像测井)及基于储层地质模型的地震岩相识别与储层预测技术等。

参考文献

- [1] Folk R L. Practical petrographic classification of limestone[J]. AAPG Bulletin, 1959,43:1-38.
- [2] Ginsburg R N. Environmental relationships of grain size and constituent particles in some south Florida carbonate sediments[J]. AAPG Bulletin, 1956,40:2384-2427.
- [3] Ginsburg R N, Lowenstam H A. The influence of marine bottom communities on the depositional environments of sediments[J]. Journal of Geology, 1958,66(3):310-318.
- [4] Willson J L. Characteristics of carbonate platform margins[J]. AAPG Bulletin, 1974,58:810-824.
- [5] Tucker M E. Sedimentary petrology: an introduction[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1981.
- [6] Adams J E, Rhodes M L. Dolomitization by seepage refluxion[J]. Bulletin American Association of Petroleum Geologists, 1961,44:1920-1921.
- [7] Bush P R. Some aspects of the diagenetic history of the sabkha in Abu Dhabi, Persian Gulf[C]. The Persian Gulf, Springer, 1973:395-407.
- [8] Badiozamani K. The dorag dolomitization model, application to the middle Ordovician of Wisconsin[J]. Journal of Sedimentary Research, 1973,43(4):965-984.
- [9] McKenzie J A, Hsu K J, Schneider J F. Movement of subsurface waters under the sabkha Abu Dhabi, UAE, and its relation to evaporative dolomite genesis[J]. SEPM Special Publication, 1980,28:11-30.
- [10] Mattes B W, Mountjoy E W. Burial dolomitization of the upper devonian miette buildup, Jasper National Park, Alberta[J]. SEPM Special Publication, 1980,28:259-297.
- [11] Hardie L A. Dolomitization; a critical view of some current views[J]. Journal of Sedimentary Research, 1987,57(1):166-183.
- [12] Sarg J F. Carbonate sequence stratigraphy[J]. SEPM Special Publication, 1988,42:155-181.
- [13] Schlager W. Drowning unconformities on carbonate platforms[J]. SEPM Special Publication, 1989,44:15-25.
- [14] Tucker M E. Carbonate diagenesis and sequence stratigraphy[M]. Spring - Verlag, 1993.
- [15] Kerans C, Lucia F J, Senger R K. Integrated characterization carbonate ramp reservoirs using Permian San Andres Formation

- outcrop analogs[J]. AAPG Bulletin, 1994,78(2):181-216.
- [16] Lucia F J. Rock-fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization[J]. AAPG Bulletin, 1995,79(9):1275-1300.
- [17] Tinker S W. Building the 3-D jigsaw puzzle: applications of sequence stratigraphy to 3-D reservoir characterization, Permian Basin[J]. AAPG Bulletin, 1996,80(4):460-485.
- [18] Montanez I P. Late diagenetic dolomitization of Lower Ordovician, Upper Knox Carbonates: a record of the hydrodynamic evolution of the southern Appalachian Basin [J]. AAPG Bulletin, 1994,78(8):1210-1239.
- [19] Vahrenkamp V C, Swart P K, Purser B, *et al.* Late Cenozoic dolomites of the Bahamas: metastable analogues for the genesis of ancient platform dolomites[C]//Purser B, Tucker M, Zenger D, eds. Dolomites. International Association of Sedimentologists Special Publication, 1994,21:133-153.
- [20] Davis G R, Smith Jr L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: an overview[J]. Bulletin American Association of Petroleum Geologists, 2006,89:1636-1684.
- [21] 穆龙新, 万仑昆. 全球油气勘探开发形势及油公司动态 (勘探篇·2017) [M]. 北京: 石油工业出版社, 2017.
- Mu Longxin, Wan Lunkun. Global Petroleum E&D trend and company dynamics (exploration·2017)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2017.
- [22] Linden W J M. Passive continental margins and intra-cratonic rifts, comparison[M]// Tectonics and geophysics of continental rifts. Heidelberg: Springer Netherlands, 1978.
- [23] 杜金虎, 汪泽成, 邹才能, 等. 上扬子克拉通内裂陷的发现及对安岳特大型气田形成的控制作用 [J]. 石油学报, 2016,37(1):1-16.
- Du Jinhu, Wang Zecheng, Zou Caineng, *et al.* Discovery of intra-cratonic rift in the Upper Yangtze and its control effect on the Formation of anyue giant gas field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016,37(1):1-16.
- [24] 张宝民, 刘静江. 中国岩溶储集层分类与特征及相关的理论问题 [J]. 石油勘探与开发, 2009,36(1):12-29.
- Zhang Baomin, Liu Jingjiang. Classification and characteristics of karst reservoirs in China and related theories[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009,36(1):12-29.
- [25] James N P, Choquette P W. Paleokarst[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1988.
- [26] Lohmann K C. Geochemical patterns of meteoric diagenetic systems and their application to studies of paleokarst[M]. New York: Springer-Verlag, 1988.
- [27] 鲁新便, 杨敏, 汪彦, 等. 塔里木盆地北部“层控”与“断控”型油藏特征: 以塔河油田奥陶系油藏为例 [J]. 石油实验地质, 2018,40(4):461-469.
- Lu Xinbian, Yang Min, Wang Yan, *et al.* Geological characteristics of “strata-bound” and “fault-controlled” reservoirs in the northern Tarim Basin: taking the Ordovician reservoirs in the Tahe Oil Field as an example[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018,40(4):461-469.
- [28] Surdam R C, Crossey L J, Gewan M. Redox reactions involving hydrocarbons and mineral oxidants: a mechanism for significant porosity enhancement in sandstones[J]. AAPG Bulletin, 1993,77(9):1509-1518.
- [29] 蔡春芳, 梅博文, 马亭. 塔里木盆地有机酸来源、分布及对成岩作用的影响 [J]. 沉积学报, 1997,15(3):103-109.
- Cai Chunfang, Mei Bowen, Ma Ting. The source, distribution of organic acids in oilfield waters and their effects on mineral diagenesis in Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997,15(3):103-109.
- [30] Bildstein R H, Worden E B. Assessment of anhydrite dissolution as the rate-limiting step during thermochemical sulfate reduction[J]. Chemical Geology, 2001,176:173-189.
- [31] 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. TSR对深部碳酸盐岩储层溶蚀改造: 四川盆地深部碳酸盐岩优质储层形成的重要方式 [J]. 岩石学报, 2006,22(8):809-826.
- Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, *et al.* Dissolution and alteration of the deep carbonate reservoirs by TSR: an important type of deep-buried high-quality carbonate reservoirs in Sichuan Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(8):809-826.
- [32] 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): 2182-2194.
- Zhang Shuichang, Zhu Guangyou, He Kun. The effects of thermochemical sulfate reduction on occurrence oil-cracking gas and reformation of deep carbonate reservoir and the interaction mechanisms[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011,27(3):2182-2194.
- [33] 沈安江, 赵文智, 胡安平, 等. 海相碳酸盐岩储集层发育主控因素 [J]. 石油勘探与开发, 2015,42(5):545-554.
- Shen Anjiang, Zhao Wenzhi, Hu Anping, *et al.* Major factors controlling the development of marine carbonate reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015,42(5):545-554.
- [34] Moore C H. Carbonate reservoirs: porosity evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework[M]. New York: Elsevier, 2001.
- [35] Lucia F J. Carbonate reservoir characterization[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1999.
- [36] 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]. Scientia Sinica Terrae, 2014,44(9):1925-1939.
- [37] White D E. Thermal waters of volcanic origin[J]. Geological Society of America Bulletin, 1957,68:1637-1658.
- [38] Dzulynski S. Hydrothermal karst and Zn-Pb sulfide ores[J]. Annales Societatis Geologorum Poloniae, 1976:217-230.
- [39] Sass-Gustkiewicz M. Internal sediment as a key to understanding the hydrothermal karst origin of the Upper Silesian Zn-Pb ore deposits [C]//Sangster D F. Carbonate-hosted lead-zinc deposits. Society of Economic Geologists Special Publication, 1996,4:171-181.
- [40] 梅冥相. 微生物碳酸盐岩分类体系的修订: 对灰岩成因结构分类体系的补充 [J]. 地学前缘, 2007,14(5):221-234.
- Mei Mingxiang. Revised classification of microbial carbonates: complementing the classification of limestones[J]. Earth Science Frontiers, 2007,14(5):221-234.
- [41] 张长好, 郭召杰, 崔俊, 等. 柴达木盆地南翼山浅层油藏岩石类型及沉积模式 [J]. 天然气地球科学, 2012,23(5):903-908.
- Zhang Changhao, Guo Zhaojie, Cui Jun, *et al.* Lithotype and sedimentation model of Nanyishan shallow oil pools[J]. Natural Gas Geoscience, 2012,23(5):903-908.
- [42] 张振城, 孙建孟, 马建海, 等. 花土沟油田下油砂山组—上干柴沟组藻灰岩储层特征 [J]. 石油与天然气地质, 2004,25(6):703-706, 712.
- Zhang Zhencheng, Sun Jianmeng, Ma Jianhai, *et al.* Characteristics of algal limestone reservoirs in Xiayoushashan - Shangganchaigou Formations in Huatugou Oilfield, western

- Qaidam Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2004,25(6):703-706,712.
- [43] 徐斐, 陆廷清, 马青. 塔西南山前古近系沉积相分析与研究[J]. *化工设计通讯*, 2020,46(12):195-196.
- Xu Fei, Lu Tingqing, Ma Qing. Analysis and study on sedimentary facies of piedmont Paleogene in southwest Tarim Basin[J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2020, 46(12):195-196.
- [44] 林春明, 王兵杰, 张霞, 等. 渤海湾盆地北塘凹陷古近系湖相白云岩地质特征及古环境意义[J]. *高校地质学报*, 2019,25(3):377-388.
- Lin Chunming, Wang Bingjie, Zhang Xia, *et al.* Geological characteristics and paleoenvironmental significance of the paleogene lacustrine dolomite in the Beitang Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2019, 25(3): 377-388.
- [45] 张永胜. 歧口凹陷古近系沙一段沉积环境及白云岩成因机理分析[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- Zhang Yongsheng. The Sedimentary environment of the first member of the Paleogene Shahejie Formation in the Qikou Sag and its dolomite genesis[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [46] 沈安江, 张友, 冯子辉, 等. 塔东古城地区碳酸盐岩储层地质认识与勘探领域[J]. *中国石油勘探*, 2020,25(3):96-106.
- Shen Anjiang, Zhang You, Feng Zihui, *et al.* Geological understandings and exploration prospects of carbonate reservoirs in the Gucheng area, Tadong, Tarim Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020,25(3): 96-106.
- [47] 田瀚, 王贵文, 段书府, 等. 四川盆地中三叠统雷口坡组储层特征及勘探方向[J]. *中国石油勘探*, 2021,26(5):60-73.
- Tian Han, Wang Guiwen, Duan Shufu, *et al.* Reservoir characteristics and exploration target of the Middle Triassic Leikoupo Formation in Sichuan Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021,26(5):60-73.
- [48] 李明隆, 谭秀成, 罗冰, 等. 四川盆地西北部中二叠统栖霞组相控早期高频暴露岩溶特征及启示[J]. *中国石油勘探*, 2020,25(3): 66-82.
- Li Minglong, Tan Xiucheng, Luo Bing, *et al.* Characteristics of facies-controlled and early high-frequency exposed karstification in the Qixia Formation of Middle Permian in the northwest of Sichuan Basin and its significance[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020,25(3):66-82.
- [49] 赵文智, 贾爱林, 王坤, 等. 中国天然气“十三五”勘探开发理论技术进展与前景展望[J]. *石油科技论坛*, 2021,40(3):11-23.
- Zhao Wenzhi, Jia Ailin, Wang Kun, *et al.* Theoretical and technological progress and development prospect of China's natural gas exploration and development in the 13th Five-Year Plan period[J]. *Petroleum Science and Technology Forum*, 2021,40(3):11-23.
- [50] 王浩. 四川盆地西部雷口坡组四段微生物碳酸盐岩储层特征及其主控因素[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- Wang Hao. Characteristics and main controlling factors of microbial carbonate reservoir in the Leikoupo Formation in western Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [51] 陈娅娜, 沈安江, 潘立银, 等. 微生物白云岩储集层特征、成因和分布: 以四川盆地震旦系灯影组四段为例[J]. *石油勘探与开发*, 2017,44(5):704-715.
- Chen Ya'na, Shen Anjiang, Pan Liyin, *et al.* Features, origin and distribution of microbial dolomite reservoirs: a case study of 4th member of Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017,44(5):704-715.
- [52] 赵文智, 沈安江, 乔占峰, 等. 白云岩成因类型、识别特征及储集空间成因[J]. *石油勘探与开发*, 2018,45(6):923-935.
- Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Qiao Zhanfeng, *et al.* Genetic types and distinguished characteristics of dolomite and the origin of dolomite reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018,45(6):923-935.
- [53] 李开开, 张学丰, 贺训云, 等. 川东北飞仙关组白云岩化作用对鲕粒滩储层的孔隙改造效应[J]. *石油与天然气地质*, 2018,39(4): 706-718.
- Li Kaikai, Zhang Xuefeng, He Xunyun, *et al.* Modification of dolomitization on pores in oolitic shoal reservoirs of the Feixianguan Formation in the northeastern Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018,39(4):706-718.
- [54] 熊鹰. 蒸发环境中孔洞型薄储层的形成与保存[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
- Xiong Ying. Formation and preservation of vuggy thin carbonate reservoirs in the evaporitic environment[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [55] 郑剑锋, 沈安江, 黄理力, 等. 基于埋藏溶蚀模拟实验的白云岩储层孔隙效应研究: 以塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组为例[J]. *石油实验地质*, 2017,39(5):716-723.
- Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Huang Lili, *et al.* Pore effect of dolomite reservoirs based on burial dissolution simulation: a case study of the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation in the Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2017,39(5):716-723.
- [56] 贾连奇, 蔡春芳, 李红霞, 等. 塔中地区热化学硫酸盐还原作用对深埋白云岩储层的改造[J]. *沉积学报*, 2016,34(6):1057-1067.
- Jia Lianqi, Cai Chunfang, Li Hongxia, *et al.* Thermochemical sulfate reduction-related mesogenetic dissolution of deeply buried dolostone reservoirs in the Tazhong area[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016,34(6):1057-1067.
- [57] 余敏, 寿建峰, 沈安江, 等. 埋藏有机酸性流体对白云岩储层溶蚀作用的模拟实验[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2014,38(3):10-17.
- She Min, Shou Jianfeng, Shen Anjiang, *et al.* Experimental simulation of dissolution and alteration of buried organic acid fluid on dolomite reservoir[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2014,38(3):10-17.
- [58] Riding R. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms[J]. *Sedimentology*, 2000,47(S1):179-214.
- [59] Shapiro R S. A comment on the systematic confusion of thrombolites [J]. *Palaaios*, 2000,15:166-169.
- [60] 胡安平, 沈安江, 郑剑锋, 等. 微生物碳酸盐岩分类、沉积环境与沉积模式[J]. *海相油气地质*, 2021, 26(1):1-15.
- Hu Anping, Shen Anjiang, Zheng Jianfeng, *et al.* The classification, facies and sedimentary models of microbialites [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2021,26(1):1-15.
- [61] 由雪莲, 孙枢, 朱井泉, 等. 微生物白云岩模式研究进展[J]. *地学前缘*, 2011,18(4):52-64.
- You Xuelian, Sun Shu, Zhu Jingquan, *et al.* Progress in the study of microbial dolomite model[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011,18(4):52-64.
- [62] 胡安平, 沈安江, 杨翰轩, 等. 碳酸盐岩—膏盐岩共生体系白云岩成因及储盖组合[J]. *石油勘探与开发*, 2019,46(5):916-928.
- Hu Anping, Shen Anjiang, Yang Hanxuan, *et al.* Dolomite genesis and reservoir cap rock assemblage in carbonate evaporite paragenesis system[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019,46(5):916-928.