

## 中国海相碳酸盐岩储层研究进展 及油气勘探意义

沈安江<sup>1,2</sup>, 陈娅娜<sup>1,2</sup>, 蒙绍兴<sup>1,2</sup>, 郑剑锋<sup>1,2</sup>, 乔占峰<sup>1,2</sup>,  
倪新锋<sup>1,2</sup>, 张建勇<sup>1,2</sup>, 吴兴宁<sup>1,2</sup>

1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室

**摘要** 中国海相碳酸盐岩具有克拉通台地小、位于叠合盆地下构造层、埋藏深和年代老的特点, 储层成因和分布是油气勘探面临的诸多科学问题之一。综述了近5年来中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室项目团队在中国海相碳酸盐岩沉积储层研究领域取得的3项创新性成果认识: ①通过对四川盆地震旦系—寒武系、二叠系长兴组—三叠系飞仙关组等层系构造—岩相古地理的解剖, 发现小克拉通台地台内裂陷普遍发育, 建立了“两类台缘”和“双滩”沉积模式, 揭示了台内同样发育烃源岩和规模储层, 这为勘探领域由台缘拓展到台内提供了理论依据, 并为安岳气田的发现所证实。②基于塔里木盆地勘探实践所提出的岩溶储层成因、内幕岩溶储层类型和分布规律的认识, 突破了岩溶储层主要分布于潜山区的观点, 创新提出碳酸盐岩内幕同样发育岩溶储层, 这使勘探领域由潜山区拓展到内幕区, 并为塔北南斜坡哈拉哈塘油田、顺北油田的发现所证实。③深层和古老海相碳酸盐岩储层仍具相控性, 继承性大于改造性的地质认识, 揭示了深层和古老海相碳酸盐岩储层的规模性和可预测性, 确立了深层和古老碳酸盐岩油气勘探的地位和勘探家的信心, 并为塔里木盆地、四川盆地油气勘探实践所证实; 礁滩(丘)相沉积、蒸发潮坪、层序界面、暴露面和不整合面、古隆起和断裂系统控制深层和古老海相碳酸盐岩规模优质储层的分布。这些认识不但对碳酸盐岩沉积储层学科发展具有重要的理论意义, 而且为勘探领域的拓展提供了依据。

**关键词** 台内裂陷; 沉积模式; 岩溶储层; 白云岩储层; 深层和古老储层; 储层相控性; 海相碳酸盐岩; 中国

**中图分类号**: TE121.1 **文献标识码**: A

### 0 前言

碳酸盐岩是油气勘探非常重要的领域, 全球剩余可采油气储量的47.5% (约 $2\,000\times 10^8\text{ t}$ ) 来自碳酸盐岩<sup>[1]</sup>。中国海相碳酸盐岩分布面积广, 总面积超过 $455\times 10^4\text{ km}^2$ , 其中的油气资源丰富, 原油资源量约为 $340\times 10^8\text{ t}$ , 天然气资源量为 $24.30\times 10^{12}\text{ m}^3$ , 探明率分别为4.56%和13.17%<sup>[2]</sup>, 勘探潜力巨大, 因此海相碳酸盐岩是中国非常重要的油气勘探接替领域。

由于中国海相碳酸盐岩具有克拉通台地小、位于叠合盆地下构造层、埋藏深、年代老和经历跨构造期复杂地质改造的特点, 油气勘探面临诸多科学

问题亟待解决, 在沉积储层领域主要表现在以下3个方面: ①台缘带礁滩储层规模发育, 距外海烃源岩近, 是碳酸盐岩油气勘探非常有利的领域, 但由于中国小克拉通台地的特殊性, 台缘带大多俯冲到造山带之下, 埋藏深、勘探难度大, 台内勘探潜力评价成为关键科学问题; ②中国的碳酸盐岩潜山主要发育在上、下构造层之间的古隆起区, 岩溶储层勘探面积有限, 但受小克拉通台地多旋回构造运动的控制, 碳酸盐岩内幕的暴露剥蚀和断裂系统多期次发育, 大面积分布, 其成储效应是碳酸盐岩内幕岩溶储层勘探潜力评价亟需解决的关键科学问题; ③深层和古老海相碳酸盐岩储层成因和分布规律、

收稿日期: 2019-08-16; 改回日期: 2019-09-16

本文受国家科技重大专项课题“寒武系—中新元古界碳酸盐岩规模储层形成与分布研究”(编号: 2016ZX05004-002)和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、定温与微量—稀土元素面扫描技术研发及应用”(编号: 2018D-5008-03)共同资助

**第一作者**: 沈安江, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事碳酸盐岩沉积储层研究。通信地址: 310023 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; E-mail: shenaj\_hz@petrochina.com.cn

**通信作者**: 陈娅娜, 博士, 高级工程师, 主要从事碳酸盐岩储层成因研究与地震储层预测工作。通信地址: 310023 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; E-mail: chenyn\_hz@petrochina.com.cn

储层的规模性和可预测性,是深层和古老海相碳酸盐岩勘探潜力评价亟需解决的关键科学问题。

笔者依托国家及中国石油集团科技重大专项,以塔里木盆地、四川盆地和鄂尔多斯盆地重点层系的碳酸盐岩构造-岩相古地理、储层成因和分布规律研究为切入点,以露头、岩心、薄片观察和储层地球化学、储层模拟实验为手段,综合利用露头、钻井和地震资料,围绕中国海相碳酸盐岩油气勘探面临的3个关键科学问题开展研究,取得3项创新性成果认识。这些成果认识为勘探领域的评价和拓展提供了依据,并为三大盆地的油气勘探发现所证实。

## 1 “两类台缘”和“双滩”沉积模式的建立及意义

Wilson<sup>[3]</sup>建立了镶边碳酸盐台地模式,把碳酸盐沉积划分为3大沉积区、9个相带和24个微相。Tucker<sup>[4]</sup>和Wright等<sup>[5]</sup>建立了碳酸盐缓坡沉积模式,将缓坡划分为内缓坡(浅缓坡)、中缓坡、外缓坡(深缓坡)和盆地4个相带。Friedman等<sup>[6]</sup>建立了孤立碳酸盐台地沉积模式:四周由深水包围的浅水碳酸盐台地,大小从几千平方米到几平方千米不等,台地边缘陡峭、发育礁滩,内部为潟湖。这些沉积模式为中国海相碳酸盐岩层系岩相古地理研究发挥了重要作用,但在实践中也存在机械地套用这些沉积模式的问题。

沉积模式具有年代效应、纬度效应和尺度效应。基于显生宙和现代沉积所建立的沉积模式不一定适用于前寒武纪古老碳酸盐岩层系——中—新元古代碳酸盐岩以微生物丘或微生物席白云岩为主,几乎没有高能颗粒滩和格架礁沉积,没有明显的镶边台缘,古地貌和板块分异远不如显生宙明显。这可能与前寒武纪全球缺氧环境,及前寒武纪共性大于差异性、显生宙差异性大于共性的地质旋回有关<sup>[7-8]</sup>。不同纬度的沉积物特征也会有很大的差异,现代沉积揭示碳酸盐岩主要分布于赤道两侧南北纬30°的范围内,而且不同纬度的生物和沉积物特征均有很大的差异,古纬度控制了沉积特征和组合<sup>[9]</sup>。受海岸带能量分带和古地形、古地貌的控制,不同尺度(板块尺度或局部)的沉积物和组合特征也会有很大的差异和不同层级<sup>[10]</sup>。因此,在解决具体地质问题时,不能简单地套用前人的沉积模式,需要建立个性化的沉积模式,以满足不同地质背景(年代、纬度、尺

度)的古地理研究需求。“两类台缘”和“双滩”沉积模式的建立就是一个典型的个性化沉积模式案例,它丰富了小克拉通台地沉积学内涵。

### 1.1 台内裂陷的识别、成因和演化

台缘是碳酸盐岩油气勘探非常重要的领域,全球70%的勘探活动集中在该领域<sup>[11]</sup>。但由于中国小克拉通台地的特殊性,台缘带大多俯冲到造山带之下,因此台内勘探潜力评价成为中国海相碳酸盐岩能否成为勘探接替领域面临的关键问题。通过对四川盆地晚震旦世—早寒武世德阳—安岳裂陷、晚二叠世长兴期—早三叠世飞仙关期开江—梁平裂陷的解剖,建立了“两类台缘”和“双滩”沉积模式,为勘探领域由台缘拓展到台内提供了理论依据,并为安岳气田、普光气田和元坝气田的发现所证实。

台内裂陷是指碳酸盐台地内由于基底断裂拉张或走滑拉分、差异沉降作用所形成的带状沉降区,基底为陆壳,裂陷深度为数百米至一千米,宽度为数十至一百千米,长度为一百至数百千米<sup>[12]</sup>。台内裂陷具以下5个识别标志:①裂陷与台地具有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的差异(图1);③裂陷与台地的过渡带具有明显的台缘带和(或)分界断裂;④台地边缘进积体特征明显;⑤裂陷内常具有重力负异常。

泛大陆裂解是基底断裂拉张或走滑拉分作用的驱动力,更是小克拉通台内裂陷发育的主控因素(图2)。罗迪尼亚(Rodinia)泛大陆裂解与新元古代晚期兴凯地裂运动是德阳—安岳台内裂陷发育的区域构造背景,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。塔里木盆地库满裂陷、塔西南裂陷的发育与罗迪尼亚泛大陆裂解有关,鄂尔多斯盆地靖边裂陷和晋陕裂陷的发育与中新元古代哥伦比亚(Columbia)泛大陆的裂解有关。因此,中国小克拉通台内裂陷的发育具有普遍性和层位的选择性。

德阳—安岳台内裂陷经历了初始裂陷期、裂陷鼎盛期、裂陷充填期和裂陷消亡期4个阶段。灯影组二段(简称灯二段)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开始发育台内裂陷的锥形和裂陷边缘小规模微生物丘滩体;灯二段沉积之后,在拉张环境下开始发育南北向的断裂,形成北西—南东向的侵蚀谷和台内裂

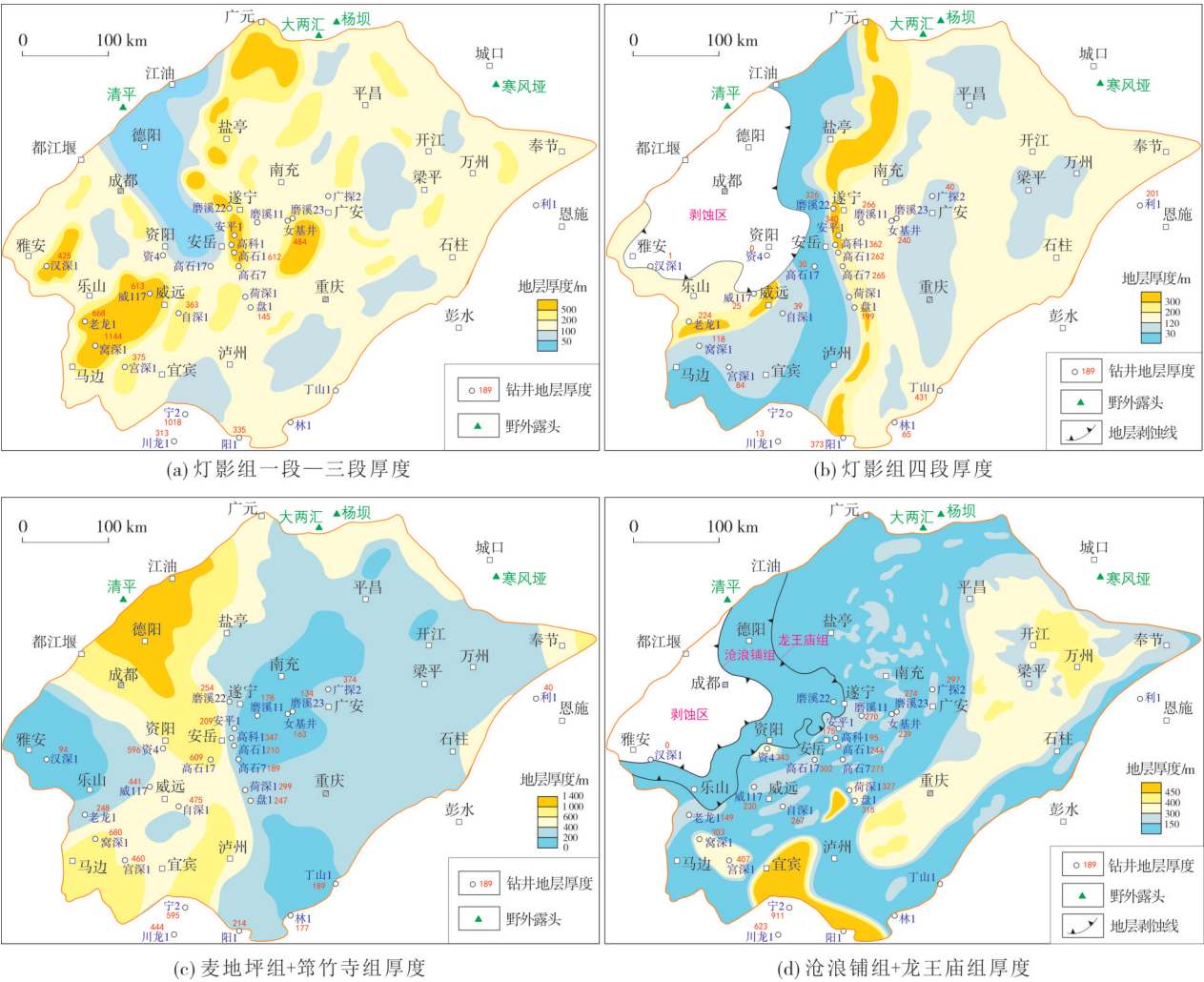


图1 四川盆地震旦系灯影组—寒武系龙王庙组地层厚度图

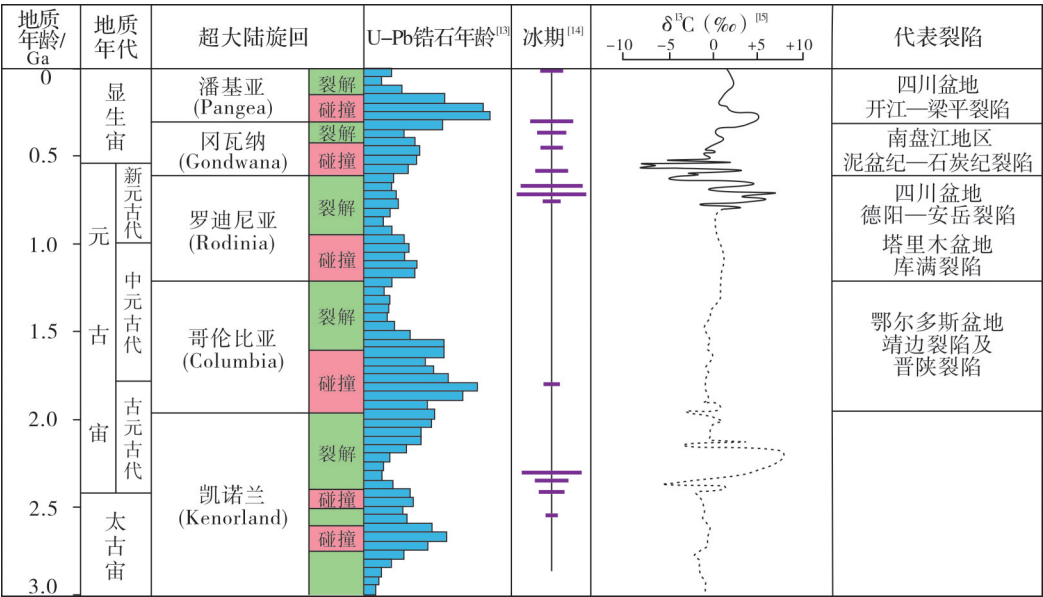


图2 地质历史时期超大陆旋回与台内裂陷发育的耦合关系(据文献[16]修编)



陷,由江油向南延伸到德阳—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期,裂陷内的灯四段为较深水沉积,裂陷周缘的台缘带发育2期丘滩体,呈进积式叠置。早寒武世进入裂陷充填阶段,裂陷内地层厚度明显大于同期裂陷周缘和台内的地层厚度,也是麦地坪组和筇竹寺组2套烃源岩发育的重要时期。之后,向上演变为龙王庙组沉积期的碳酸盐缓坡。

## 1.2 台内裂陷背景下的成藏组合

德阳—安岳台内裂陷的发育和演化控制了台内

2类成藏组合的发育。首先是控制2套规模优质储层的发育,即灯四段与台内裂陷发育鼎盛期相关的裂陷周缘丘滩白云岩储层,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,以这2套储层为实例建立了“两类台缘”和“双滩”沉积模式(图3)。同时也控制了生烃中心的发育:沿台内裂陷筇竹寺组烃源岩厚度最大,一般为300~350 m,裂陷两侧烃源岩厚度明显减薄,一般为100~300 m,裂陷主体部位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陷内,厚度在50~100 m之间,而周缘地区仅1~5 m,两者相差10倍以上。

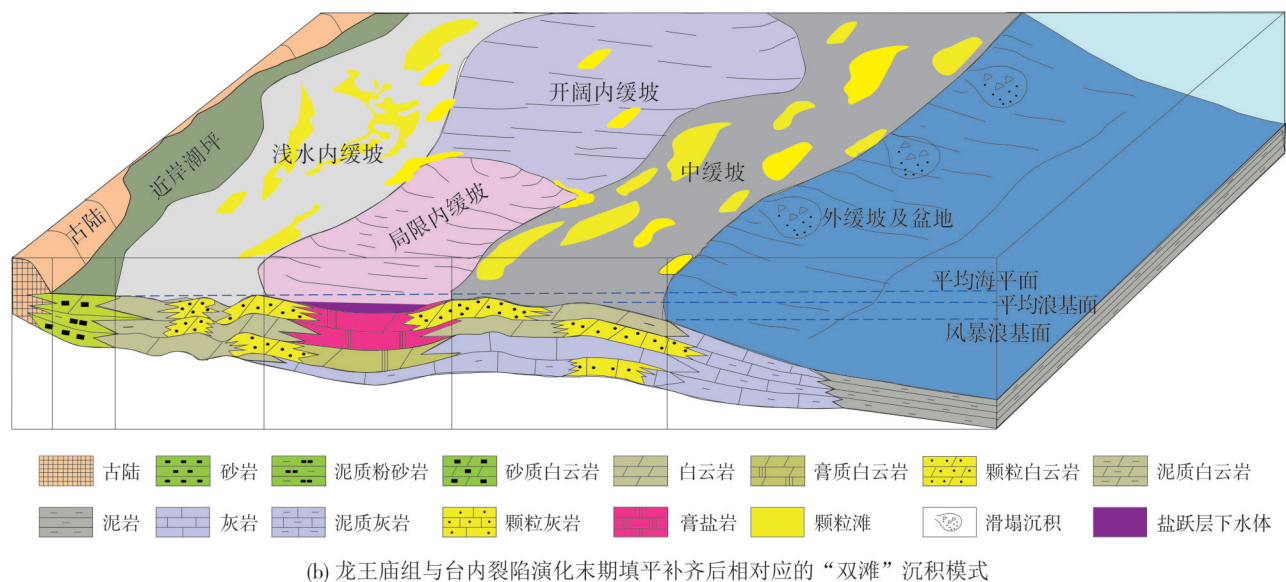
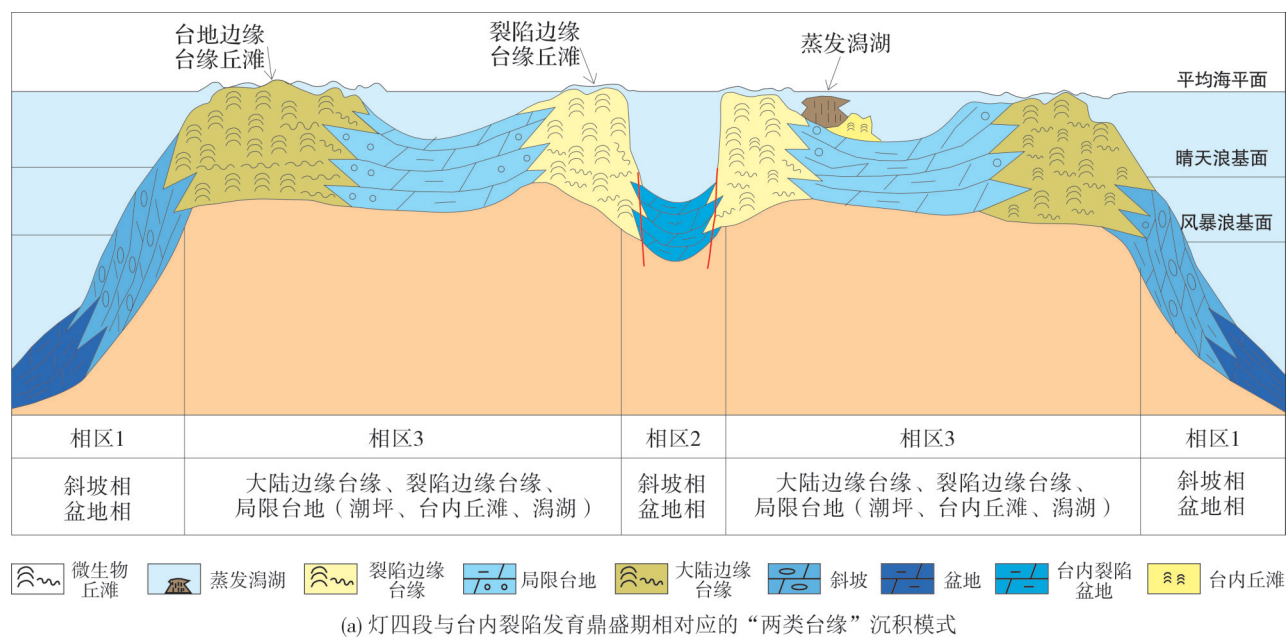


图3 中国海相碳酸盐岩“两类台缘”和“双滩”沉积模式



烃源岩和储层的时空配置构成2类成藏组合：一是麦地坪组、筇竹寺组烃源岩与灯二段和灯四段储层构成旁生侧储或上生下储型成藏组合，不整合面是油气运移的通道；二是麦地坪组、筇竹寺组烃源岩与龙王庙组缓坡颗粒滩储层构成下生上储型成藏组合，断裂是油气运移的通道。

2 碳酸盐岩规模储层成因和分布规律的认识创新

前人<sup>[11,17-19]</sup>在碳酸盐岩储层成因方面做了大量的研究工作,取得了很多地质认识。但是,对白云石化和热液作用对孔隙的贡献、深层碳酸盐岩储层的相控性和规模、碳酸盐岩储层孔隙保存机理、层间岩溶和断溶体等特殊储层类型和成因等的地质认识,还存在分歧和争议。笔者在碳酸盐岩储层成因和分布规律方面提出了颠覆性认识,丰富了储层地质学内涵,为勘探领域评价提供了

支撑。

2.1 碳酸盐岩储层类型

根据物质基础、地质背景和成孔作用等3个储层发育条件,考虑勘探生产的实用性,将海相碳酸盐岩储层划分为3大类11亚类<sup>[20]</sup>(表1),这一分类方案为绝大多数地质工作者所接受。

**沉积型储层** 沉积作用为主控因素,分布受相带控制,主要指礁滩储层和沉积型白云岩储层,以基质孔为主,原生孔和早表生溶孔发育,有较强的均质性。

**成岩型储层** 成岩作用为主控因素,分布受暴露面(不整合面)及断裂系统控制,主要指岩溶储层,储集空间以岩溶缝洞为主,有强烈的非均质性。

**复合型储层** 沉积和成岩作用共为主控因素,分布受相带(礁滩相带为主)和后期成岩叠加改造(埋藏-热液作用、白云石化作用)共同控制,主要指结晶白云岩储层,储集空间以晶间孔和晶间溶孔为主,非均质性介于沉积型和成岩型储层之间。

表1 中国海相碳酸盐岩储层成因分类

储层类型			定义	实例
沉积型	礁滩储层	镶边台缘礁滩储层	分布于碳酸盐台地边缘的礁滩相储层,呈条带状分布,厚度大,常受早表生岩溶作用改造	塔里木盆地塔中北斜坡上奥陶统良里塔格组
		台内裂隙周缘礁滩储层	分布于碳酸盐台地台内裂隙周缘的礁滩相储层,呈条带状分布,厚度大,常受早表生岩溶作用改造	四川盆地德阳—安岳台内裂隙周缘上震旦统灯四段
		碳酸盐缓坡颗粒滩储层	分布于碳酸盐缓坡的颗粒滩相储层,呈大面积准层状分布,为台内洼地或潟湖所分割,垂向上多套叠置	塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组、四川盆地寒武统龙王庙组
	白云岩储层	沉积型白云岩储层	由渗透回流白云石化作用形成的白云岩储层,原岩为礁滩相沉积,经历早期低温白云石化,保留原岩结构	塔北牙哈地区中下寒武统
		萨布哈白云岩储层	由萨布哈白云石化作用所形成的白云岩储层,经历早期低温白云石化,岩性主要为石膏质白云岩,发育膏模孔	鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组上组合
		埋藏-热液改造型白云岩储层	由埋藏-热液白云石化作用所形成的白云岩储层,经历埋藏期高温白云石化	四川盆地二叠统栖霞组—茅口组
成岩型	潜山(风化壳)岩溶储层	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,岩溶缝洞呈准层状分布,集中分布于不整合面下0~100 m的范围内,峰丘地貌特征明显,上覆地层为碎屑岩层系	轮南低凸奥陶系鹰山组
		白云岩风化壳储层	分布于碳酸盐岩潜山区,呈准层状,围岩为白云岩,古地貌平坦,峰丘特征不明显。实际上为白云岩储层,储集空间以晶间孔和晶间溶孔为主,岩溶缝洞不发育,但潜山岩溶作用可使储层物性变好,上覆地层为碎屑岩层系	靖边奥陶系马家沟组五段、塔北牙哈—英买力寒武系—蓬莱坝组
	岩溶储层	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	塔中北斜坡奥陶系鹰山组
		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
		断溶体储层	分布于断裂发育区,与不整合面及峰丘地貌无关,缝洞发育的跨度大(200~500m),沿断裂呈栅状分布,走滑断裂、沿断裂发育的深部岩溶作用被认为是岩溶缝洞发育的主控因素	塔北哈拉哈塘地区、顺北地区和英买1-2井区奥陶系一间房组—鹰山组
	内幕岩溶储层			

## 2.2 碳酸盐岩储层成因

大多数学者<sup>[21-22]</sup>认为礁滩储层主要受沉积相控制,岩溶储层和白云岩储层主要受成岩相控制。笔者认为碳酸盐岩储层均具有相控性,礁滩相沉积是储层发育的基础;孔隙主要形成于沉积和表生环境,埋藏环境是孔隙调整(贫化或富集)的场所,但对深层优质储层的发育具有重要的贡献;白云石化对孔隙的保存大于建设作用,热液对孔隙的破坏作用大于建设作用,但均指示了先存储层的存在。

### 2.2.1 岩溶储层和白云岩储层的原岩为礁滩沉积

白云岩储层可分为2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。前者的原岩显然为礁滩相沉积(图4a,4b),孔隙以沉积原生孔为主,发育少量溶蚀孔洞;后者通过锥光、荧光等原岩结构恢复技术,发现其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4c,4d),其原岩为砂屑生物碎屑灰岩,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。需要指出的是,细一中晶白云岩的原岩颗粒结构易于恢复,而中一粗晶、巨晶白云岩的原岩结构难以恢复,这可能是因为以下2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4e),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4f);二是晶粒粗的白云石晶体经历了更强烈的重结晶作用。

岩溶缝洞的发育除受潜山不整合面、层间岩溶面和断裂控制外,溶蚀模拟实验表明其还具有岩性选择性<sup>[23]</sup>。岩溶缝洞主要发育于泥粒灰岩中,而颗粒灰岩、粒泥灰岩和泥晶灰岩中较少见,这也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。因此,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。

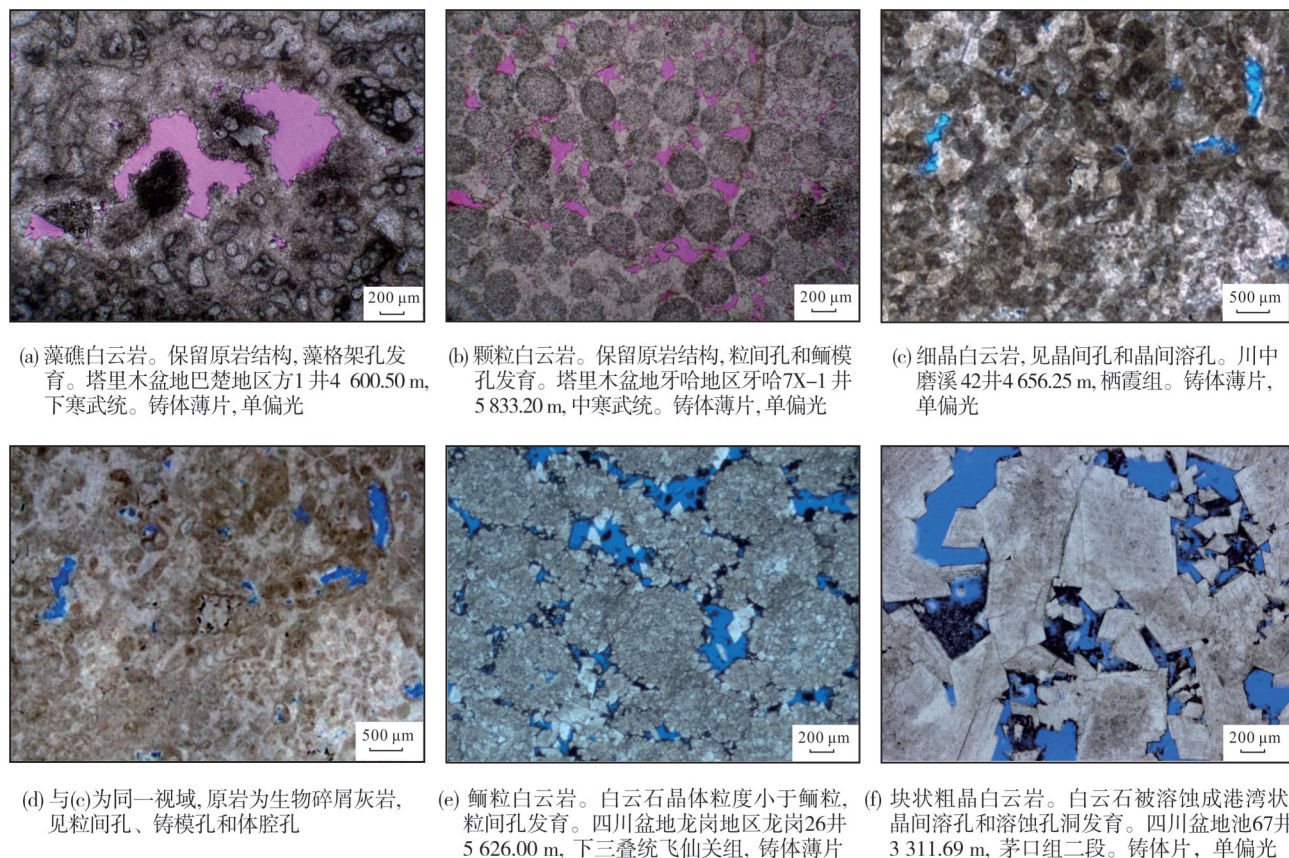


图4 保留礁滩结构的白云岩储层和晶粒白云岩储层的原岩特征



2.2.2 沉积和表生环境是储层孔隙发育的重要场所

碳酸盐岩储层孔隙有3种成因：①沉积原生孔隙；②早表生成岩环境不稳定矿物(文石、高镁方解石等)溶解形成组构选择性溶孔；③晚表生成岩环境中碳酸盐岩溶蚀形成非组构选择性溶蚀孔洞。表生环境是储集空间发育非常重要的场所,因为只有表生环境才是完全的开放体系,富含CO<sub>2</sub>的大气淡水能得到及时的补充,溶解的产物能及时地被搬运走,这为规模溶蚀创造了优越的条件。这些溶蚀孔洞为埋藏成岩流体提供了运移通道。

碳酸盐岩原生孔隙类型比碎屑岩复杂得多,除粒间孔外,还有其特有的粒内孔或体腔孔、窗格孔、遮蔽孔和格架孔等。但由于碳酸盐岩的高化学活动性和早成岩特征,原生孔隙大多通过胶结或充填作用被破坏,或被溶蚀扩大,失去原生孔隙的识别特征。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、格架孔等在塔里木盆地和四川盆地碳酸盐岩储层中也是很常见的。

碳酸盐岩的高化学活动性贯穿于整个埋藏史,但最为强烈的孔隙改造发生在早表生成岩环境。受层序界面之下的沉积物暴露于大气淡水并发生溶蚀所驱动,早表生成岩环境形成的孔隙以基质孔为主,具有强烈的组构选择性。塔里木盆地良里塔格组礁滩储层为早表生溶孔发育的典型示例:早表生期海平面下降导致良里塔格组泥晶棘屑灰岩暴露和遭受大气淡水溶蚀,形成组构选择性溶孔。塔中62井测试井段为4 703.50~4 770.00 m,日产油38 m<sup>3</sup>,日产气29 762 m<sup>3</sup>。测试段4 706.00~4 759.00 m有取心,经铸体薄片鉴定,有效储层岩性为泥晶棘屑灰岩,共3层10 m,与含亮晶方解石泥晶棘屑灰岩、含藻泥晶棘屑灰岩呈不等厚互层,上覆生物碎屑泥晶灰岩(图5)。

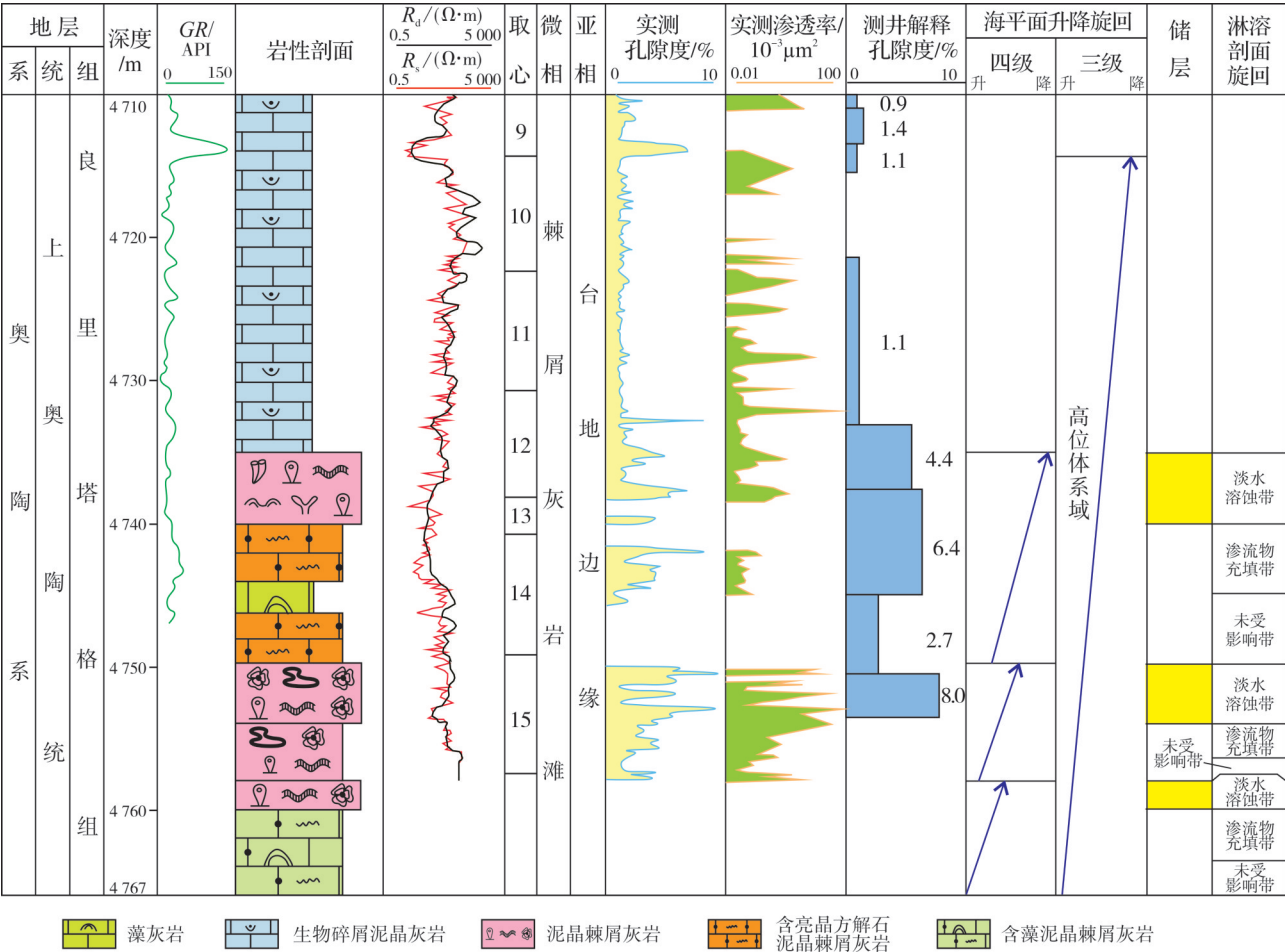


图5 塔里木盆地塔中62井4 710~4 767m井段(颗粒灰岩段)海平面升降旋回与储层发育特征(据文献[20])



高分辨率层序地层研究揭示,在高位体系域向上变浅准层序组上部发育的台缘礁滩沉积,最易暴露和受大气淡水淋滤形成溶孔,而且距三级层序界面越近的准层序组,溶蚀作用越强烈,储层厚度越大,垂向上呈多层段相互叠置分布。紧邻储层之下的含亮晶方解石泥晶棘屑灰岩段、含藻泥晶棘屑灰岩段,粒间往往见大量渗流沉积物,再往深处才变为未受影响带,构成完整的淡水溶蚀带—渗流物充填带—未受影响带的淋溶渐变剖面(图5)。塔中62井良里塔格组礁滩储层的垂向剖面表明,组构选择性溶孔主要是早表生期大气淡水溶蚀的产物。

晚表生岩溶作用的对象已经不是碳酸盐沉积物,而是被重新抬升到地表的碳酸盐岩,形成的岩溶缝洞、孔洞等非组构选择性溶蚀孔洞,具有强烈的非均质性。晚表生岩溶作用有3种形式:①沿大型的潜山不整合面分布,如塔北地区轮南低凸起奥陶系鹰山组上覆石炭系砂泥岩,之间代表长达120 Ma的地层剥蚀和缺失,鹰山组峰丘地貌特征明显,潜山高度可达数百米,储集空间以岩溶缝洞为主,集中分布在不整合面之下0~100 m的范围内。②沿碳酸盐岩内幕的层间间断面或剥蚀面分布,如塔中—巴楚地区大面积缺失一间房组和吐木休克组,鹰山组裸露区为灰质白云岩山地,上覆良里塔格组,代表了(14~20) Ma的地层缺失,储集空间以溶蚀孔洞为主,发育少量岩溶缝洞。塔北南缘围斜区一间房组和鹰山组具有类似的岩溶特征。③沿断裂分布,如塔北哈拉哈塘和顺北地区、英买1-2井区的鹰山组及一间房组,岩溶缝洞沿断裂带呈网状、栅状分布,之间没有明显的地层缺失和不整合,缝洞垂向上的分布跨度也大得多。

### 2.2.3 埋藏环境是储层孔隙保存和调整的场所

埋藏环境通过溶蚀作用可以新增孔隙这一观点已为地质学家们所接受<sup>[24-28]</sup>。笔者通过塔里木盆地、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)和沉淀作用导致先存孔隙的富集和贫化:先存孔隙发育带控制埋藏溶孔的分布;开放体系高势能区是孔隙建造的场所,低势能区是孔隙破坏的场所;封闭体系是先存孔隙的保存场所。通过先存孔隙的富

集和贫化形成深层优质储层,其作用和意义远大于新增孔隙<sup>[23]</sup>。

### 2.2.4 白云石化与热液作用对孔隙的贡献

白云石化在孔隙建造和破坏中的作用,长期以来都是争论的焦点<sup>[11,19]</sup>。由于碳酸盐岩储集空间主要发育于各类白云岩中——即使是礁滩储层,储集空间也主要发育于白云石化的礁滩相沉积中,尤其是经历了漫长成岩改造的碳酸盐岩尤其如此,因此,许多学者认为白云石化对孔隙有重要的贡献<sup>[29-32]</sup>,并建立了10余种白云石化模式解释白云岩的成因。然而,笔者认为白云石化作用对孔隙的贡献被夸大,白云岩中的孔隙部分是对原岩孔隙的继承和调整,部分来自溶蚀作用<sup>[33]</sup>,但白云石化作用对早期孔隙的保存具重要的作用。与灰岩地层相比,白云岩在表生环境遇弱酸几乎不溶,在埋藏环境具有更大的脆性和抗压实-压溶性,导致缝合线不发育,这些特性均有利于白云岩中先存孔隙(原生孔、表生溶孔和埋藏溶孔)的保存,白云岩为先存孔隙提供了坚固的格架<sup>[34]</sup>。

热液是指进入围岩地层且温度明显高于围岩(>5℃)的矿化流体<sup>[35]</sup>。拉张断层上盘、走滑断层、拉张断层和走滑断层的交叉部位是热液活动的活跃场所,热液对主岩的改造体现在3个方面:①“热液岩溶作用”<sup>[36-38]</sup>形成溶蚀孔洞,如果热液溶解作用足够强,甚至可造成岩层的局部垮塌和角砾岩化,形成储集空间;②交代围岩或沉淀白云石形成热液白云岩;③沉淀热液矿物充填先存孔隙和断裂/裂缝。所以,热液活动在局部范围可以形成溶蚀孔洞,但其规模具有不确定性,受控于热液活动的规模,而且总体以热液矿物沉淀破坏先存孔隙为主。但热液活动需要有断裂、不整合面和高渗透层作为热液的通道,其对先存储集空间的指示意义大于建设作用。

## 2.3 碳酸盐岩储层分布

综上所述,碳酸盐岩储集空间主要形成于沉积期和表生期,埋藏溶蚀孔洞主要沿先存孔隙发育带分布,继承性大于改造性。镶边台缘(包括台内裂隙周缘)、碳酸盐缓坡、蒸发台地、大型古隆起-不整合和断裂系统控制了储层的发育,储层分布有规模、有规律、可预测(表2)。

表2 碳酸盐岩储层发育主控因素和分布规律

储层类型				主控因素	分布规律
沉积型	礁滩储层	镶边台缘礁滩储层		镶边台缘或台内裂隙周缘礁滩相带沉积、表生暴露阶段是主要成孔期，受埋藏期成岩改造，继承性大于改造性	分布于台缘带，条带状，厚度大
		台内裂隙周缘礁滩储层			分布于台内裂隙周缘，条带状，厚度大
		碳酸盐缓坡颗粒滩储层		碳酸盐缓坡颗粒滩沉积、表生暴露阶段是孔隙的主要发育期，受埋藏期成岩改造，继承性大于改造性	分布于碳酸盐缓坡，准层状大面积分布，垂向上多套叠置
	白云岩储层	沉积型白云岩储层	回流渗透白云岩储层	蒸发台地或潟湖相带，小规模礁滩相沉积和大规模环带状膏质白云岩沉积、表生暴露阶段是主要成孔期，受埋藏期成岩改造，继承性大于改造性	蒸发台地或潟湖相带小规模礁滩，与萨布哈白云岩储层伴生
			萨布哈白云岩储层		沿膏盐湖周缘呈环带状分布
复合型	埋藏—热液改造型白云岩储层			沿断裂、不整合面分布的高渗透礁滩相沉积，受埋藏—热液改造发生白云石化，孔隙的继承性大于改造性	透镜状或斑状白云石化的礁滩体，沿断裂、不整合面分布
成岩型	岩溶储层	潜山（风化壳）岩溶储层	灰岩潜山岩溶储层	潜山不整合面和晚表生岩溶作用控制岩溶缝洞的发育，岩性（泥粒灰岩为主）控制岩溶缝洞的富集程度	分布于潜山不整合面之下0～100 m的深度范围
			白云岩风化壳储层	先存的白云岩储层，储集空间以晶间孔和晶间溶孔为主，潜山岩溶作用形成的孔洞使储层物性进一步改善	分布范围可以大于风化壳，内幕为先存的白云岩储层
		内幕岩溶储层	层间岩溶储层	碳酸盐岩地层内幕暴露剥蚀、岩溶作用形成岩溶缝洞，岩性（泥粒灰岩为主）控制岩溶缝洞的富集程度	碳酸盐岩地层内幕准层状大面积分布，垂向上多套叠置
			顺层岩溶储层	潜山周缘斜坡区沿碳酸盐岩内幕不整合面、高渗透层发生顺层岩溶作用形成岩溶缝洞，岩性（以泥粒灰岩为主）控制岩溶缝洞的富集程度	沿潜山带周缘的斜坡区呈环带状分布，向下倾方向岩溶作用逐渐减弱
			断溶体储层	走滑断裂和深部溶蚀作用控制岩溶缝洞的发育，岩性（以泥粒灰岩为主）控制岩溶缝洞的富集程度	沿断裂带成网格状、栅状分布，垂向跨度达200～500 m

3 对碳酸盐岩勘探领域评价的指导意义

小克拉通台地裂解和“两类台缘”、“双滩”沉积模式的建立，突破了传统沉积模式的束缚，不但丰富了沉积学内涵，而且在模式指导下识别发现了台内2类成藏组合，为油气勘探由台缘拓展到台内奠定了基础。储层相控性、继承性大于改造性地质认识，揭示了储层的规模性和可预测性，确立了古老深层海相碳酸盐岩的勘探地位。

3.1 勘探领域的拓展

3.1.1 岩溶储层成因和分布规律的认识创新使勘探领域由潜山区拓展到内幕区

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及由此所产生现象的统称，岩溶储层则为与岩溶作用相关的储层<sup>[39]</sup>。传统意义上的岩溶储层都与明显的地表剥蚀和峰丘地貌有关，或与大型的角度不整合有关，岩溶缝洞沿大型不整合面或峰丘地貌呈准层状

分布<sup>[40]</sup>。塔北地区轮南低凸起奥陶系鹰山组岩溶储层就属于这种类型。

塔里木盆地的勘探实践证实，碳酸盐岩内幕同样发育岩溶储层，其与层间中短期的地层剥蚀有关，被称为层间岩溶储层。如果后期形成斜坡背景，还可叠加顺层岩溶作用改造，如塔北南缘围斜区的一间房组和鹰山组就属于顺层岩溶储层。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勘探实践提出的岩溶储层细分方案(表1)和分布规律(表2)的认识，勘探领域由潜山区拓展到内幕区：由原先寻找大的角度不整合面之下潜山区的岩溶缝洞储层，拓展到寻找碳酸盐岩内幕区层间岩溶储层(图6)、顺层岩溶储层和断溶体储层。这一认识和拓展的正确性为塔北南斜坡哈拉哈塘油田、顺北油田的发现所证实。事实上，不整合面类型、斜坡背景和断裂均控制岩溶作用类型(层间岩溶作用、顺层岩溶作用、潜山岩溶作用和断溶体岩溶作用)和岩溶缝洞的发育。



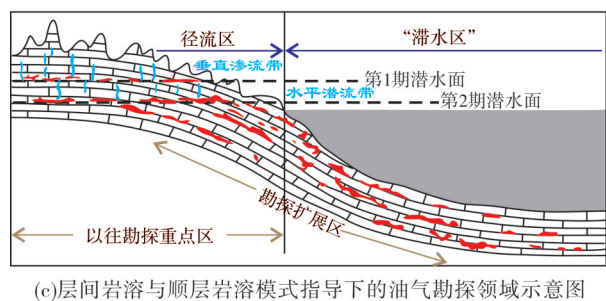
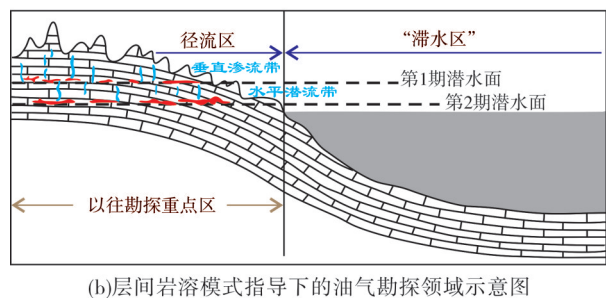
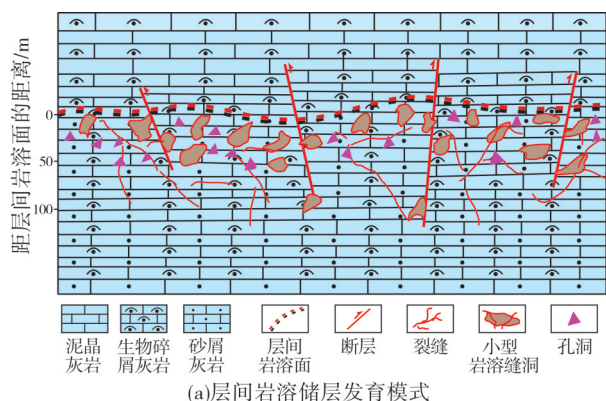


图6 岩溶储层发育模式及模式指导下的油气勘探领域示意图

塔里木盆地岩溶储层勘探可划分为3个阶段：  
① 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；② 2008—2015年之间的碳酸盐岩内幕岩溶储层勘探阶段，勘探领域由潜山区拓展到内幕区，整个塔北南斜坡均成为勘探的主战场；③ 2013—2018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，岩溶缝洞不受潜山或层间岩溶面的控制(图7)。

### 3.1.2 小克拉通“两类台缘”、“双滩”沉积模式的建立使勘探领域由台缘拓展到台内

基于 Wilson 等<sup>[3]</sup>的沉积相模式，台缘带礁滩储层规模发育，距外海烃源岩近，成藏条件优越，因此以往的碳酸盐岩油气勘探主要集中在台缘带。但由于中国海相小克拉通台地的特殊性，台缘带大多俯冲到造山带之下，勘探难度大，台内碳酸盐岩勘探潜力评价成为关键问题。

笔者通过四川盆地晚震旦世—早寒武世、晚二叠世长兴期—早三叠世飞仙关期构造-岩相古地理的解剖，发现小克拉通台内裂隙普遍发育，建立了台内裂隙鼎盛期的“两类台缘”沉积模式和台内裂隙填平补齐后的碳酸盐缓坡“双滩”沉积模式(图3)，揭示了台内同样发育烃源岩和规模储层，它们构成“侧生侧储”和“下生上储”2类成藏组合(图8)，这为勘探领域由台缘拓展到台内提供了理论依据，并为安岳气田、普光气田和元坝气田的发现所证实。

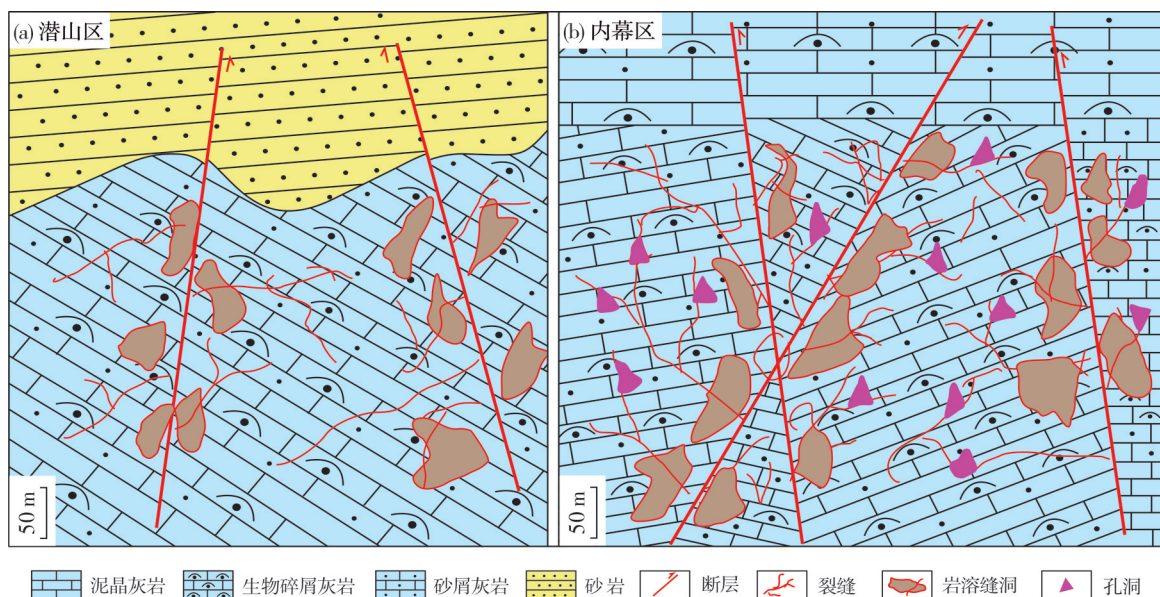


图7 断溶体储层发育模式图及模式指导下的岩溶储层勘探示意图



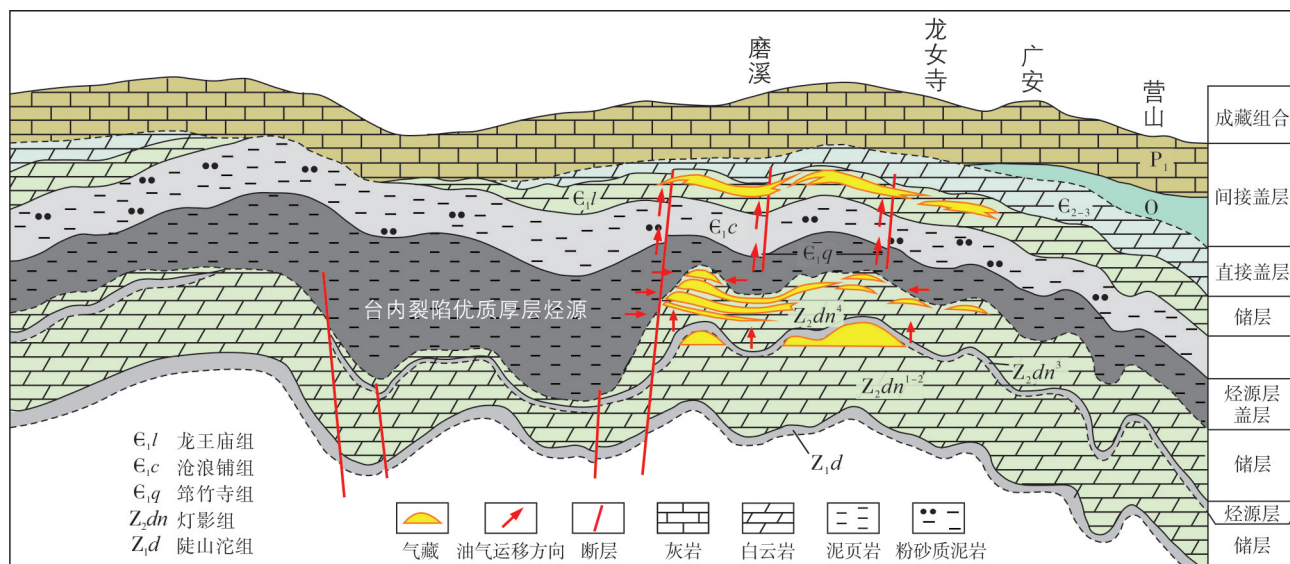


图8 四川盆地震旦纪—早寒武世台内裂陷演化控制的2类成藏组合(据文献[41])

塔里木盆地南华纪—早寒武世发育塔西南裂陷和阿满裂陷,鄂尔多斯盆地中元古代发育定边—榆林裂陷和铜川裂陷<sup>[42]</sup>,在裂陷的发育、演化及对成烃和成储的控制方面与四川盆地德阳—安岳台内裂陷有很多相似之处,勘探潜力值得期待。

### 3.2 勘探深度的拓展

中国小克拉通海相碳酸盐岩位于叠合盆地的下构造层,具有年代老和埋藏深的特点。勘探实践证明,储层物性与埋藏深度之间没有必然的关系,深层仍可发育优质储层<sup>[43]</sup>。但深层油气勘探和开发的投资大,储层的规模性和可预测性是深层碳酸盐岩油气勘探面临的关键科学问题之一。

由于碳酸盐岩的高化学活动性和古老深层碳酸盐岩经历的漫长成岩改造,大多数学者<sup>[24-28]</sup>认为深层碳酸盐岩的储集空间以埋藏溶蚀孔洞为主,有机酸、TSR、热液活动是埋藏溶蚀孔洞发育的关键。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。笔者提出了深层碳酸盐岩储层具有相控性,继承性大于改造性;储集空间主要形成于沉积和表生环境,埋藏环境是孔隙贫化和富集的场所,但对深层优质储层的发育具有重要的贡献;埋藏溶蚀孔洞主要沿先存孔隙发育带分布,这个作用和意义远大于孔隙的增加。这些认识揭示了深层碳酸盐岩储层的规模性和可预测性,确立了深层碳酸盐岩油气勘探的地位和信心。

基于深层碳酸盐岩储层有规模可预测的地质认识,近几年在3大海相盆地部署了一批风险探井:塔里木盆地部署了和田2、楚探1、轮探1、柯探1、乔探1、中寒1和红探1等井,四川盆地部署了双探1、双探2、双探3、磨溪56、五探1、楼探1、角探1、蓬探1和充探1等井,鄂尔多斯盆地部署了桃77、桃59、桃90、统99、统74、莲92、靳6和靳12等井。这些探井进一步证实了深层规模优质储层的存在,增强了深层碳酸盐岩勘探的信心,明确了礁滩相沉积、蒸发潮坪、层序界面、暴露面和不整合面、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。

### 3.3 勘探层系的拓展

全球范围内前寒武纪油气资源丰富,如西伯利亚地区中—新元古界发育晚里菲期和晚文德期沉积形成的2套微生物白云岩规模储层,至2005年发现油气田65个,探明原油储量 $5.25 \times 10^8$  t、天然气 $2.02 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>,探明总油气当量 $22.36 \times 10^8$  t<sup>[44]</sup>;阿曼新元古界探明原油储量 $3.5 \times 10^8$  t<sup>[45]</sup>;印度巴格哈瓦拉油田拥有地质储量约 $6.28 \times 10^8$  bbl的原油,层位为新元古界<sup>[46]</sup>。

中国前寒武纪碳酸盐岩广泛分布,岩性和全球一样以微生物白云岩为主,在四川盆地震旦系、华北任丘蓟县系也发现了大油气田。四川盆地灯影组四段微生物白云岩储层发育,具备万亿方天然气的储量规模,已探明天然气 $2200 \times 10^8$  m<sup>3</sup>。华北任丘蓟县系微生物白云岩储层是一套区域性优

质储层,孔隙度平均值在2.51%~9.94%之间,渗透率平均值在 $(8.8 \sim 8\,450) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间;牛东1井5 641.5~6 027.0 m井段日产油642.91 m<sup>3</sup>、天然气 $56 \times 10^4 \text{ m}^3$ ;在郑州、雁翎潜山的22口试油井中,日产油千吨以上的井有8口,最高日产量3 055 t(雁10井)。但是,中国前寒武纪碳酸盐岩的研究程度低,尤其是优质规模储层发育的潜力问题,是勘探领域评价的关键。

笔者研究认为微生物岩不但是储层发育的物质基础,也是原生孔隙的载体:微生物早期降解形成的酸性气体有利于孔隙发育和保存,微生物岩热解形成的CO<sub>2</sub>气体和有机酸有利于孔隙发育和保存;早期白云石化导致抗压实压溶能力提升和微孔隙发育,有利于早期孔隙的保存;显生宙岩溶作用是显著提高微生物碳酸盐岩储层品质的关键。这些认识揭示了古老微生物白云岩的相控性、规模性和可预测性:缓坡台缘、潮坪和碳酸盐缓坡是中新元古界微生物白云岩储层的有利发育区,古老层系的勘探值得期待,今后的碳酸盐岩油气勘探应积极向这些层系拓展。

## 4 结论和展望

综上所述,中国海相小克拉通碳酸盐岩沉积储层研究主要取得以下3项创新性成果认识,为勘探领域的拓展发挥了重要的作用:

### (1)“两类台缘”和“双滩”沉积模式

通过四川盆地晚震旦世—早寒武世、晚二叠世—早三叠世飞仙关期构造—岩相古地理的解剖,发现小克拉通台内裂陷普遍发育,建立了台内裂陷鼎盛期的“两类台缘”和填平补齐后的缓坡“双滩”沉积模式,这不但丰富了沉积学理论内涵,而且揭示了台内同样发育烃源岩和规模储层,它们构成“侧生侧储”和“下生上储”2类成藏组合,这些成果为勘探领域由台缘拓展到台内提供了理论依据,并为安岳气田、普光气田和元坝气田的发现所证实。

### (2)碳酸盐岩内幕岩溶储层成因和分布规律认识

基于塔里木盆地岩溶储层勘探实践提出的岩溶储层成因认识、碳酸盐岩内幕岩溶储层成因类型和分布规律的认识,突破了岩溶储层主要分布于潜山区、都与明显的地表剥蚀和峰丘地貌有关或与大型的角度不整合有关、岩溶缝洞沿大型不整合面或

峰丘地貌呈准层状分布的观点,提出碳酸盐岩内幕同样发育岩溶储层(层间岩溶、顺层岩溶和断溶体储层),这些认识丰富了储层地质学内涵,促使勘探领域由潜山区拓展到内幕区,并为塔北南斜坡哈拉哈塘油田、顺北油田的发现所证实。

### (3)古老和深层碳酸盐岩储层的相控性和可预测性认识

古老和深层碳酸盐岩储层仍具相控性,孔隙主要形成于沉积和表生环境;埋藏溶蚀孔洞沿先存孔隙发育带分布,并导致孔隙的富集和贫化及优质储层的发育,其意义远大于孔隙的增加;白云岩储层的原岩以礁滩相沉积为主,晶间孔和晶间溶孔主要是对原岩孔隙的继承和调整,部分来自溶蚀作用;白云石化对孔隙的保存大于建设作用,热液对孔隙的破坏大于建设作用,但指示了先存孔隙的存在。碳酸盐岩储层成因的认识创新不但丰富了储层地质学内涵,而且揭示了古老和深层碳酸盐岩储层的规模性和可预测性,确立了深层和古老碳酸盐岩油气勘探的地位和勘探家的信心,这些认识为塔里木盆地、四川盆地古老和深层碳酸盐岩油气勘探所证实。古老和深层碳酸盐岩发育优质规模储层,可以突破深度的限制,礁滩(丘)相沉积、蒸发潮坪、层序界面、暴露面和不整合面、古隆起和断裂系统控制古老和深层碳酸盐岩规模优质储层的分布。

碳酸盐岩沉积储层研究虽然取得了重要进展,但仍然有漫长的路要走,主要需要开展以下5个方面的研究工作:①个性化沉积相模式的建立与应用:系统建立基于年代效应、纬度效应和尺度效应的沉积相模式,并应用于相应层系(年代)、盆地(纬度)和区块(尺度)的岩相古地理研究中;②储层成因和分布规律的深化认识;③多尺度储层表征、建模与评价,包括宏观尺度、油藏尺度和微观尺度3个层次的储层非均质性表征、评价和建模,为有利储层分布区预测、探井和高效开发井部署提供支撑;④实验技术开发,尤其是储层地球化学和储层溶蚀模拟实验技术开发,为储层成因研究提供利器;⑤测井岩相和储层识别技术(常规和成像测井)、基于储层地质模型的地震岩相识别和储层预测技术的开发应用。

## 参考文献

- [1] 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.

- [2] 赵文智, 胡素云. 中国海相碳酸盐岩油气勘探开发理论与关键技术概论[M]. 北京: 石油工业出版社, 2016.
- [3] WILLSON J L. Carbonate facies in geologic history[M]. Berlin: Springer Verlag, 1975.
- [4] TUCKER M E. Shallow-marine carbonate facies and facies models [J]. *Sedimentology recent developments & applied aspects*, 1985, 18(1): 147-169.
- [5] WRIGHT V P, BURCHETTE T P. Carbonate ramps[M]. Special Publication No.149, London: Geological Society, 1998.
- [6] FRIEDMAN G M, SANDERS J E. Principles of sedimentology [M]. New York: John Wiley and Sons, 1978.
- [7] 沈树忠, 朱茂炎, 王向东, 等. 新元古代—寒武纪与二叠—三叠纪转折时期生物和地质事件及其环境背景之比较[J]. *中国科学: D辑 地球科学*, 2010, 40(9): 1228-1240.
- [8] 旷红伟, 柳永清, 耿元生, 等. 中国中新元古代重要沉积地质事件及其意义[J]. *古地理学报*, 2019, 21(1): 1-30.
- [9] TUCKER M E. Sedimentary petrology: an introduction [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1981.
- [10] BATHURST R G C. Carbonate sediments and their diagenesis [M]. 2nd ed. *Developments in sedimentology* 12, Amsterdam: Elsevier, 1975.
- [11] MOORE C H. Carbonate reservoirs: porosity evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework [M]. New York: Elsevier, 2001.
- [12] LINDEN W J M. Passive continental margins and intra-cratonic rifts, a comparison [M]//RAMBERG I B, NEUMANN E R. *Tectonics and geophysics of continental rifts*. Netherlands: Springer, 1978.
- [13] ROBERTS N M W. Increased loss of continental crust during supercontinent amalgamation [J]. *Gondwana research*, 2012, 21(4): 994-1000.
- [14] YOUNG G. Precambrian supercontinents, glaciations, atmospheric oxygenation, metazoan evolution and an impact that may have changed the second half of Earth history [J]. *Geoscience frontiers*, 2013, 4(3): 247-261.
- [15] OCH L M, SHIELDS-ZHOU G A, POULTON S W, et al. Redox changes in Early Cambrian black shales at Xiaotan section, Yunnan Province, South China [J]. *Precambrian research*, 2013, 225: 166-189.
- [16] MERDITH A S, WILLIAMS S E, BRUNE S, et al. Rift and plate boundary evolution across two supercontinent cycles [J]. *Global and planetary change*, 2019, 173: 1-14.
- [17] KERANS C. Karst-controlled reservoir heterogeneity in Ellenburger Group carbonates of west Texas [J]. *AAPG bulletin*, 1988, 72(10): 1160-1183.
- [18] JAMES N P, CHOQUETTE P W. Paleokarst [M]. New York: Springer-Verlag, 1988.
- [19] LUCIA F J. Carbonate reservoir characterization [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1999: 226.
- [20] 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.
- [21] 罗平, 张静, 刘伟, 等. 中国海相碳酸盐岩油气储层基本特征[J]. *地学前缘*, 2008, 15(1): 36-50.
- [22] 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.
- [23] 沈安江, 余敏, 胡安平, 等. 海相碳酸盐岩埋藏溶孔规模与分布规律初探[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(10): 1823-1830.
- [24] 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.
- [25] 蔡春芳, 梅博文, 马亭, 等. 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.
- [26] BILDSTEIN R H, WORDEN E B. Assessment of anhydrite dissolution as the rate-limiting step during thermochemical sulfate reduction [J]. *Chemical geology*, 2001, 176(1): 173-189.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] BUSH P. Some aspects of the diagenetic history of the sabkha in Abu Dhabi, Persian Gulf [M]//PURSER B H. *The Persian Gulf, Holocene carbonate sedimentation and diagenesis in a shallow Epicontinental Sea*. New York: Springer, 1973: 395-407.
- [30] HARDI L A. Dolomitization: a critical view of some current views [J]. *Journal of sedimentary petrology*, 1987, 57(1): 166-183.
- [31] 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.
- [32] VAHRENKAMP V C, SWART P K. Late Cenozoic dolomites of the Bahamas: metastable analogues for the genesis of ancient platform dolomites [M]//PURSER B, TUCKER M, ZENGER D. *Dolomites: a volume in honor of dolomieu*. Cambridge: Blackwell Scientific Publication, 1994, 21: 133-153.
- [33] 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: D辑 地球科学*, 2014, 44(9): 1925-1939.
- [34] 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.
- [35] WHITE D E. Thermal waters of volcanic origin [J]. *Geological Society of America bulletin*, 1957, 68(12): 1637-1658.
- [36] DZULYNSKI S. Hydrothermal karst and Zn-Pb sulfide ores [J]. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 1976, 46: 217-230.
- [37] 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 4, 1996: 171–181.
- [38] DAVIES G R, SMITH L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: an overview [J]. AAPG bulletin, 2006, 90(11): 1641–1690.
- [39] 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.
- [40] LOHMANN K C. Geochemical patterns of meteoric diagenetic systems and their application to studies of paleokarst [C]// JAMES N P, CHOQUETTE P W. Paleokarst. New York: Springer-Verlag, 1988: 58–80.
- [41] 杜金虎, 汪泽成, 邹才能, 等. 古老碳酸盐岩大气田地质理论与勘探实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2015.
- [42] BRUESEKE M E, HOBBS J M, BULEN C L, et al. Cambrian intermediate-mafic magmatism along the Laurentian margin: evidence for flood basalt volcanism from well cuttings in the Southern Oklahoma Aulacogen (USA) [J]. Lithos, 2016, 260: 164–177.
- [43] 李平平, 郭旭升, 郝芳, 等. 四川盆地元坝气田长兴组古油藏的定量恢复及油源分析[J]. 地球科学, 2016, 41(3): 452–462.
- [44] 王铁冠, 韩克猷. 论中—新元古界的原生油气资源[J]. 石油学报, 2011(1): 5–11.
- [45] 罗平, 王石, 李朋威, 等. 微生物碳酸盐岩油气储层研究现状与展望[J]. 沉积学报, 2013, 31(5): 807–823.
- [46] 吴林, 管树巍, 杨海军, 等. 塔里木北部新元古代裂谷盆地古地理格局与油气勘探潜力[J]. 石油学报, 2017(4): 17–27.

编辑: 张润合

## The research progress of marine carbonate reservoirs in China and its significance for oil and gas exploration

SHEN Anjiang, CHEN Ya'na, MENG Shaoxing, ZHENG Jianfeng, QIAO Zhanfeng, NI Xinfeng, ZHANG Jianyong, WU Xingning

**Abstract:** Marine carbonate rocks in China are characterized by aging, developing in small-scale cratons and locating in the lower tectonic layer of superimposed basins. Reservoir genesis and distribution are among the many scientific problems in hydrocarbon exploration. This paper summarizes three innovative achievements made by the project team of the Key Laboratory of Carbonate Reservoir in the past five years in the field of marine carbonate sedimentary reservoir research in China as follows: (1) based on the analysis of tectonic-lithophase paleogeography of the Sinian-Cambrian, Changxing Formation-Feixianguan Formation in Sichuan Basin, it is found that the intra-platform rifts in small-scale craton were generally developed, and thus the carbonate platform sedimentary models of bi-margin & bi-shoal were established. This discovery reveals that the source rocks and large-scale reservoirs can also develop in the intra-platform, which provides a theoretical basis for the exploration field expansion from the margin to the internal of the platform, and it was confirmed by the discovery of the Anyue gas field; (2) based on the exploration practice of karst reservoirs in the Tarim Basin, innovations in the genesis of karst reservoirs and the type & distribution of karst reservoirs of intra-carbonate rocks broke the traditional view that the karst reservoirs mainly develop in the buried hills. This view extends the exploration realm from the buried hill areas to intra-carbonate rocks areas, and it was confirmed by the discovery of Harahatang and Shunbei oilfield on the south slope of North Tarim Basin; (3) the old and deep-buried marine carbonate reservoirs are still facie-controlled and the pores are more inherited from pre-buried stage than modified in buried stage, which laid the foundation for the scale and predicatability for deep-buried and ancient marine carbonate reservoirs, which promote the exploration values of these reservoirs. This view was confirmed by the hydrocarbon exploration practice in Tarim and Sichuan Basins. Reef-shoal(mound) facies, evaporite tidal flats, sequence boundaries, exposure surfaces and unconformities, paleo-uplifts and fault systems control the distribution of high-quality and large-scale reservoirs of deep-buried and ancient marine carbonates. These understandings not only have important theoretical significance for the development of carbonate sedimentary reservoir discipline, but also provide basis for the expansion of exploration field.

**Key words:** intraplatform rifting; sedimentary model; karst reservoir; dolomite reservoir; deep ancient reservoir; facies controlling of reservoir; marine carbonate; China

**SHEN Anjiang**, First author: PhD, Professoriate Senior Engineer, mainly engaged in sedimentology and reservoir geology of carbonate. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., HangZhou, Zhejiang 310023, China

**CHEN Ya'na**, Corresponding author: PhD, Senior Engineer, mainly engaged in carbonate reservoir genesis research and seismic reservoir prediction. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., HangZhou, Zhejiang 310023, China