

中国海相碳酸盐台地的多台槽结构与油气生储组合

寿建峰^{1,2}, 沈安江^{1,2}, 李俊³, 吴兴宁^{1,2}, 周进高^{1,2}, 郑兴平^{1,2}

(1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油天然气集团公司碳酸盐岩储层重点实验室)

(3 中国石油青海油田分公司)

摘要 中国大陆构造稳定性差及小型或微型板块发育的特点决定了中国海相碳酸盐台地结构的非均质性较强、台地内水体较深、处于还原或弱还原环境的台槽比较发育,从而形成了多台槽结构。台槽结构使台地的沉积格局和岩相分布变得多样,台槽的存在及槽缘礁滩的发育使台缘障壁岛后缘进一步形成次级障壁体系,包括次级障壁岛以及次级障壁岛前缘和后缘。多台槽结构有利于储集体类型的多样化,如台缘礁滩、槽缘礁滩、台内礁滩和台内白云岩潮坪、缓坡滩和钙屑油积岩等储集体在时空上的复合-叠置。与多台槽结构有关的多级障壁岛引起的沉积环境的封闭性为障壁岛后缘的准同生白云石化作用创造了条件,由此可形成有规模的准同生白云岩,它所形成的晶间孔又为后期溶蚀提供了流体运移通道。台内高地是准同生溶蚀作用最先发生也是溶蚀最强的地区,而台槽的发育使槽缘也成为准同生溶蚀的场所,使溶蚀型储层变得更发育。多台槽结构可使烃源岩更加丰富,并可形成台缘生储组合、槽缘生储组合、台内生储组合、缓坡生储组合和斜坡-盆地生储组合等多种生储组合。除了台缘生储组合外,槽缘生储组合也是重要的油气生储组合类型。

关键词 多台槽结构; 碳酸盐台地; 油气生储组合; 海相盆地; 中国

中图分类号: TE111.3

文献标识码: A

国内外学者对碳酸盐岩沉积相已作了大量研究,提出了很多种沉积模式^[1-3],这些模式很好地指导了中国海相碳酸盐岩沉积学的研究和油气勘探。由于中国大陆板块从元古宙以来经过多次大陆的解体和拼合,即以塔里木板块、华北板块和扬子小型板块为核心,与20多个微地体拼贴而成,所以这些小型或微型板块规模较小,而造山带规模较大,决定了中国大陆构造的稳定性差,特别是中国中西部地区具有强烈的构造活动性^[4]。这种区域构造背景使中国海相碳酸盐台地易裂解成多个“小台地”,形成“盆中有台、台中有槽”的沉积格局,如中国南方地区、塔里木盆地及四川盆地均发育碳酸盐台地的这种多台槽结构。

关于台槽的含义,一些学者理解为台间的断陷海槽,为台地上张裂作用形成的深水海槽,即台槽相当于海槽^[5];还有一些学者认为海槽在环境的概念上是指水深在最大浪基面(风暴浪底)之下的线状展布的深水沉积区,并将四川盆地晚二叠世至早三叠世的开江—梁平的深水沉积区称为海槽^[6]。本文提出的“台槽”,则指台内水体较深(浪基面以

下)、一般为还原或弱还原的沉积区,它可以是线状展布的、由台内延伸至盆地相的深水海槽,也可以是限于台内不同形状的、水体较深(浪基面以下)的沉积区,但这类台槽并未将一个台地分裂为两个或多个台地。

本文通过对我国塔里木盆地和四川盆地的海相碳酸盐沉积环境与台地发育特征的研究,认为我国海相碳酸盐台地普遍具有多台槽结构的特点,即一个台地内可发育多个水体较深的“槽”,在此称之为“台槽”。中国南方地区晚古生代碳酸盐台地具典型的多台槽结构,如黔南和桂中地区泥盆纪的棋盘格状台地和海槽^[5,7]以及四川盆地晚二叠世至早三叠世的开江—梁平海槽^[6]。初步研究表明,塔里木盆地寒武纪和奥陶纪也发育多个“台槽”,四川盆地除了开江—梁平海槽外可能还发育云安—马槽坝台槽。

碳酸盐台地的多台槽结构与油气生储组合有密切联系,“台槽”内不仅可沉积烃源岩(丰富了油气的来源),也可使储层更加发育(除了台缘礁或滩储层外,还可发育槽缘礁或滩储层、台内礁或滩储层、台

收稿日期: 2011-03-02; 改回日期: 2011-04-23

寿建峰: 1958年生,教授级高工。主要从事储层沉积学研究。通讯地址: 310023 浙江省杭州市西溪路 920 号; 电话: (0571) 85224909

内白云岩坪储层等);同时,与多台槽结构有关的多级障壁体系利于准同生白云石化作用,形成分布较广的白云石化储层。这种多台槽结构还可形成多种生储组合,包括台缘生储组合、槽缘生储组合、台内生储组合、台或槽侧翼的斜坡生储组合和盆地生储组合,前三者是目下主要的油气生储组合,塔里木盆地在台缘生储组合中发现了大型油田,在台内组合中有新的油气发现,四川盆地在槽缘生储组合中发现了大型气田,台内生储组合中也有气田发现。因此,本文提出的多台槽结构,对进一步认识我国海相碳酸盐岩的台地结构及生储组合特征是有益的,对拓展油气勘探领域也有实际意义。

1 多台槽结构的普遍性

中国海相碳酸盐台地的多台槽结构具有普遍性。如上所述,前人对中国南方地区古生代岩相古地理已作大量研究^[5-7],南方地区晚古生代均发育碳酸盐台地的多台槽结构,如黔南和桂中地区泥盆纪的棋盘格状的台地、台盆或海槽以及四川盆地晚二叠世至三叠纪的开江—梁平海槽。初步研究表明,塔里木盆地早古生代发育多台槽结构,四川盆地二叠纪和三叠纪除开江—梁平海槽外还发育其他台槽。塔里木盆地从早寒武世至奥陶纪鹰山期发育台洼和台槽,早期可能为水体较浅的台洼,晚期为水体较深的台槽。不同时期的台洼或台槽的位置有所变化。如图1和图2所示,塔里木盆地晚寒武世

的镶边台地内发育2个台槽和2个台洼,奥陶纪鹰山早期发育1个台槽。地震地层解释剖面(图3)也揭示了塔里木盆地上寒武统至下奥陶统鹰山组的台槽结构,其槽缘均明显表现出沉积加厚现象,由地震反射时间估算的每个层段槽缘顶至槽底的地层厚度约在50~100 m之间,上寒武统和鹰山组的槽缘顶与槽底的地层厚度差异最大,反映晚寒武世和鹰山晚期的台槽规模最大;鹰山组上段沉积后的槽缘与槽底的地层厚度约为300~400 m,表明该台槽在鹰山晚期的规模是较大的。至于该槽的平面分布有待于进一步确定。

塔里木盆地塔中5井鹰山组发育深灰色至黑灰色的泥晶白云岩和白云质崩塌角砾岩。崩塌角砾岩的角砾呈棱角状,大小混杂,砾间有碳酸盐胶结物充填,这些角砾岩反映斜坡相或盆地相沉积。泥晶白云岩的有机碳含量为0.3%~1.5%。鹰山组深灰色至黑灰色的岩石颜色及较高的有机碳含量表明鹰山期沉积的水体较深。初步研究表明,塔中5井所在地区在鹰山组沉积前可能为一台槽,鹰山组沉积期间该台槽逐渐扩大和分离,使古城4井所在的台地成为孤立台地(图2)。

四川盆地晚二叠世至三叠纪早期除发育开江—梁平海槽外,岩石学证据显示在云安—马槽坝地区可能还发育另一个台槽,至少为台洼(图4)。云安12井、14井和18井等井中的二叠系长兴组发育灰色和深灰色含骨针和硅质的泥晶灰岩,反映较深的沉积水体。至于是否为台槽及其平面分布,则需进一步地认识。

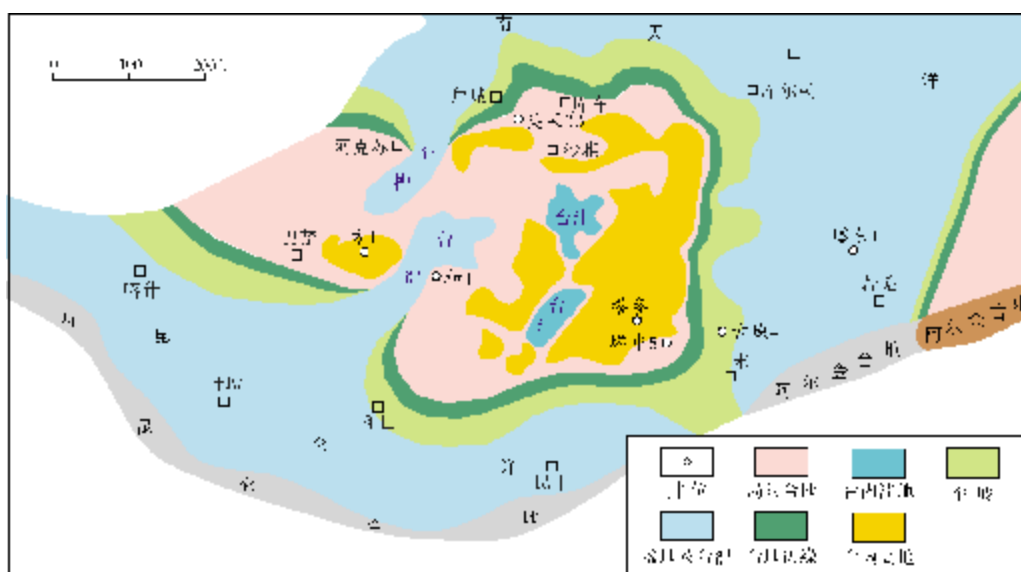


图1 塔里木盆地晚寒武世沉积相图

图示台地内发育2个台槽和2个台洼

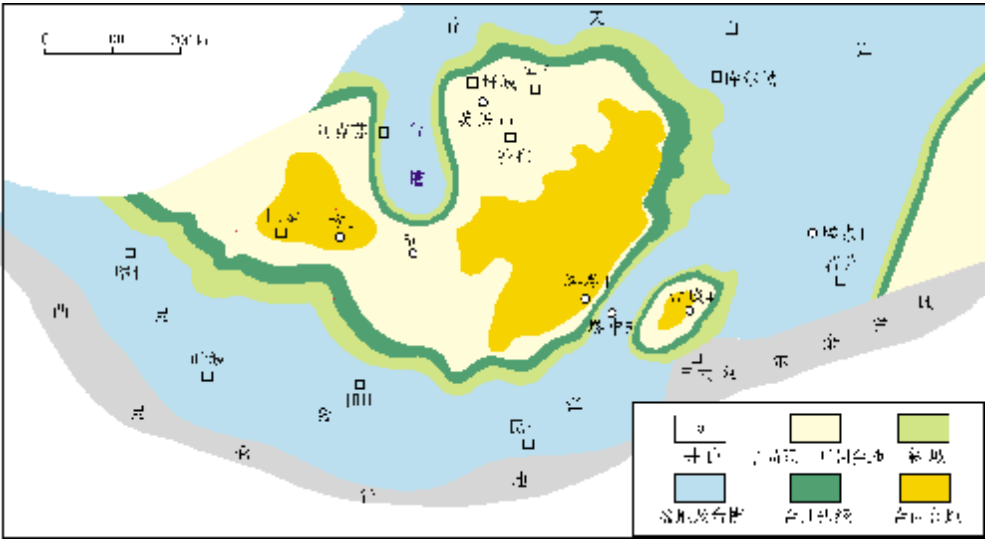


图2 塔里木盆地早奥陶世鹰山组沉积早期沉积相图
图示台地内发育1个台槽

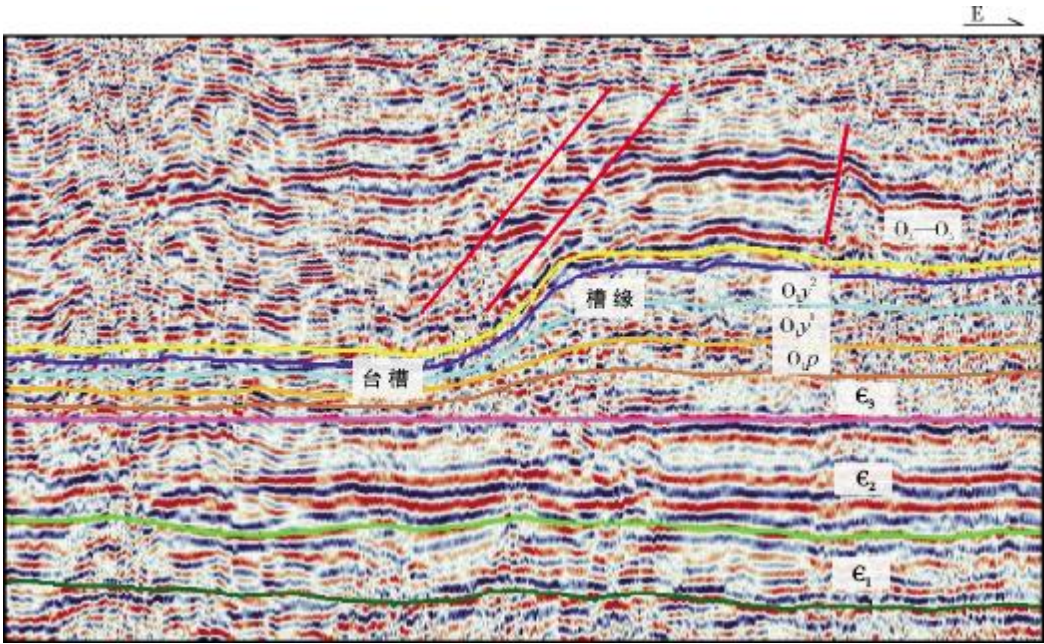


图3 塔里木盆地台槽结构的地震反射特征
 O_{1p} 蓬莱坝组; O_{1y} 鹰山组

2 多台槽结构与储集体

2.1 多台槽结构与沉积

与多台槽结构有关的多级障壁体系使台地的沉积格局和岩相分布变得多样。这里的“障壁”，指碳酸盐台地由于沉积或构造因素形成的障壁岛（或岛链），使台地与盆地或台地内部的海水流动受到抑止。障壁体系则是障壁岛（或岛链）、障壁岛后缘及障

壁岛前缘组成的碳酸盐岩沉积复合体。由于台槽的存在及槽缘礁滩的发育，使台缘障壁岛的后缘进一步形成次级障壁体系，包括次级障壁岛、次级障壁岛前缘和次级障壁后缘三部分。本文将台缘或台内礁滩生长或构造因素形成的高地称为障壁岛（或岛链），台缘后的槽缘或台内礁滩形成的高地称为次级障壁岛（或岛链）（图5）。

障壁体系的类型有沉积障壁体系、构造障壁体系和复合障壁体系（表1）。

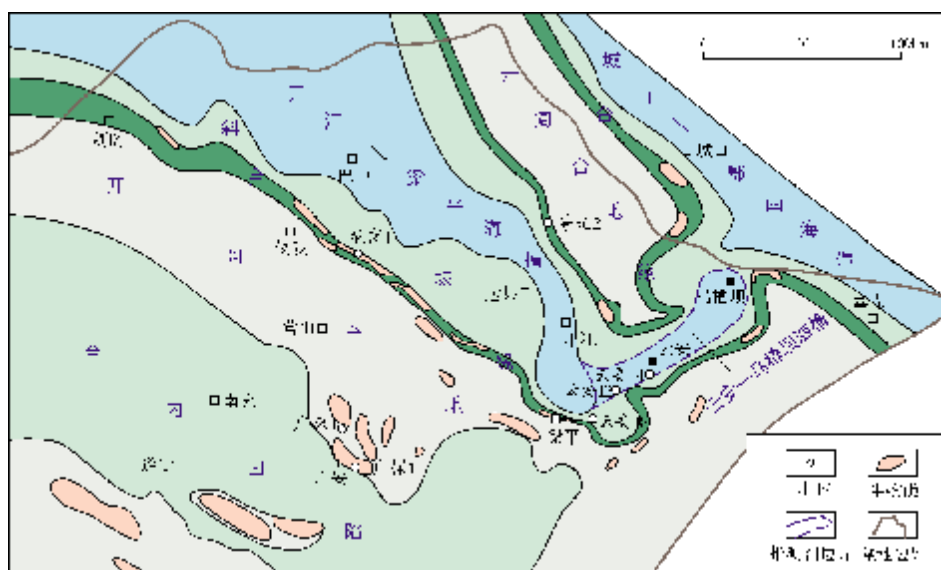


图4 四川盆地环开江—梁平海槽晚二叠世长期早期沉积相图

图示海槽两侧发育槽缘和斜坡

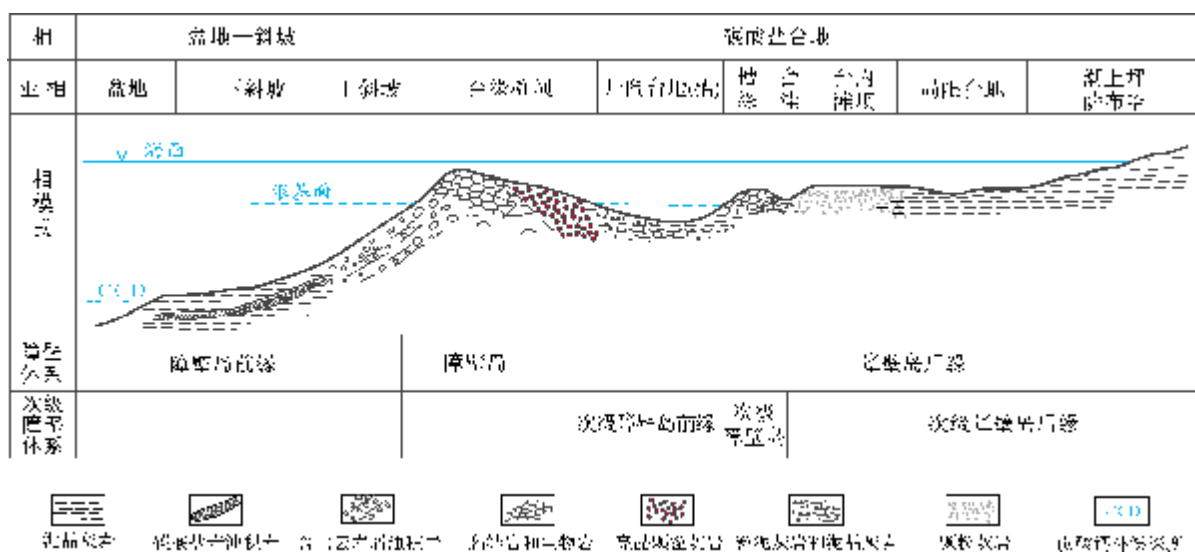


图5 碳酸盐台地结构与障壁体系关系示意图

表1 中国海相碳酸盐沉积多级障壁体系分类表

一级	二级	三级	实例
障壁体系	沉积障壁体系	弱镶边障壁体系	塔里木盆地中寒武世—奥陶纪, 四川盆地三叠纪
		强镶边障壁体系	
	构造障壁体系	古隆起障壁体系	鄂尔多斯盆地奥陶纪
		断层障壁体系	
	复合障壁体系	古隆起—镶边障壁体系	鄂尔多斯盆地奥陶纪, 塔里木盆地奥陶纪良里塔格期
		断层—镶边障壁体系	

沉积障壁体系 指沉积作用形成的障壁岛,如台缘礁滩、槽缘礁滩、台内礁滩等。根据障壁岛的发

育程度又可分为弱镶边障壁体系和强镶边障壁体系。塔里木盆地中寒武世至奥陶纪和四川盆地三叠纪均发育此类型。

构造障壁体系 指构造作用形成的障壁岛,包括暴露于海面之上或伏于水面之下的构造障壁岛。据构造成因又可分为古隆起障壁体系和断层障壁体系。鄂尔多斯盆地奥陶纪发育此类型。构造障壁体系的障壁岛或次级障壁岛的规模往往较大,利于形成封闭沉积环境而使白云岩潮坪广泛发育,尤其在干旱气候下。

复合障壁体系 指构造与沉积作用复合形成的障壁体系,鄂尔多斯盆地奥陶纪和塔里木盆地奥陶

纪良里塔格期发育此类型。

多级障壁体系使台地的沉积格局和岩相分布变得复杂,也使得储集体类型呈现多样化。障壁岛的前缘沉积灰泥和垮塌物。障壁岛和次级障壁岛是礁或滩的发育区,障壁岛和次级障壁岛的后缘为石灰岩(白云岩)潮坪、灰泥丘、礁或滩沉积区。当台地开阔时或障壁岛不发育时,坡度对沉积的控制作用似乎显得重要:坡度较大时,高能相带发育于内缓坡,相带窄,滩的面积较小;坡度较小时,高能相带发育于中缓坡,相带较宽,滩的面积较大,并逐渐加积和进积而演变为镶边台地。当障壁岛发育时,海水流通受阻,局限海或半局限海发育,限制了障壁岛后缘滩或礁的发育,而以灰(云)坪为特征;在干旱气候条件下发育含膏灰(云)岩和膏盐岩等,并促进白云石化作用。

2.2 多台槽结构与白云石化储层

中国海相碳酸盐岩储层的成因可以分为白云石化作用、溶蚀作用和应力作用三大类。这里的“应力作用”指构造应力作用下的裂缝形成作用,它在海相碳酸盐岩储层形成中有重要的作用,这种作用形成的裂缝可作为油气的储集空间和运移通道,而且还是溶蚀型储层(包括岩溶型储层)的重要形成条件。

在三类成因储层中,白云石化作用是一种很重要的储层成因机理,它包括准同生白云石化、埋藏白云石化和热液白云石化,后两者的作用范围会有一定局限性,而且对储层孔洞的保存而言,会有减小孔隙或充填孔洞的作用。而准同生白云石化作用是规模储层形成的重要机理和前提,这是因为准同生白云石化的规模较大,具有区域性,它可以发育在障壁岛和次级障壁岛上,也可以发育在障壁岛和次级障壁岛后缘广大的潮坪发育区;二是因为准同生白云石化形成的晶间孔为后期溶蚀提供了重要的流体运移通道。

与多台槽结构有关的多级障壁体系的发育促进了准同生白云石化作用,同时这种成因机理的白云石化作用往往与准同生溶蚀作用有关(见下述)。如四川盆地龙岗地区下三叠统飞仙关组鲕粒滩通常从鲕粒本身开始白云石化,且从鲕粒滩的边缘往中央,白云石化作用趋于增强。这种成岩现象可能与鲕粒滩中央的准同生溶蚀作用最强并释放出 Mg^{2+} 离子有关。

多级障壁体系也为障壁岛后缘的准同生白云石化作用创造了有利条件,多级障壁岛的存在使沉积环境的封闭程度进一步提高,为准同生白云石化作用提供了更加有利的条件。构造障壁岛或大规模沉

积障壁岛可以发生大规模的准同生白云石化作用,如渗透回流白云石化作用,在干旱气候下还可发生蒸发泵白云石化作用,使储层更加发育。障壁岛后缘往往发育藻坪或藻席,而海百合、红藻等富含高镁方解石,镁离子摩尔数高达 10% 以上,为白云石化提供大量的 Mg^{2+} [8],使白云石化作用得以规模化发生。

2.3 多台槽结构与溶蚀型储层

溶蚀型储层的形成机理主要有大气水溶蚀、埋藏溶蚀和热液溶蚀。大气水溶蚀是溶蚀型储层的最重要形成机理,而埋藏溶蚀和热液溶蚀往往是局部性的,并常常与断层和裂缝的发育密切相关。大气水溶蚀分为表生溶蚀和准同生溶蚀,前者与古地貌、古断裂及古水文地质有关,后者与台地内的古地貌及海平面变化有关。(次级)障壁岛或台内古高地是准同生溶蚀最先发生也是最强的地区,如台缘和台内礁滩,而台槽的发育使得槽缘也成为准同生溶蚀的场所。

台地内的障壁岛(礁、滩或沉积高地)处于较高古地貌位置,是最先受到海平面下降而暴露于地表的地区。当海平面下降时,障壁岛沉积物受到准同生大气水的溶蚀,并且其溶蚀的时间最长,因此障壁岛是准同生溶蚀发育或优先发育的部位。莫尔[8]也认为在绝大多数海平面升降旋回过程中,通过方解石和文石在大气淡水淋溶作用下发生溶解而使孔隙度增加的潜力是非常大的。中国海相碳酸盐台地内的准同生溶蚀作用较普遍,准同生溶蚀型储层较发育。初步研究表明,塔里木盆地寒武系和奥陶系至少发育有 12 套溶蚀型储层(图 6),其中 9 套溶蚀型储层可能与准同生溶蚀作用有关或受到了准同生溶蚀作用的影响。四川盆地三叠系准同生溶蚀现象也较普遍,如开江—梁平海槽西侧的龙岗地区,下三叠统飞仙关组鲕粒滩储层与准同生溶蚀作用的关系密切,飞仙关组沉积期海平面总体趋于下降,为(准)同生期的大气水淋溶作用创造了条件,伴随溶蚀还发生白云石化作用(如前所述),形成有规模的、储层物性和连通性较优的晶间孔和溶孔储层(图 7)。

3 多台槽结构与生储组合

多台槽结构可以形成多种类型的生储组合,展示了广阔的勘探领域。由于槽内可发育良好的烃源岩,多台槽结构使烃源条件更加优越。如四川盆地开江—梁平海槽二叠系发育优质烃源岩,塔里木盆地塔中 5 井奥陶系有机碳含量为 0.3%~1.5%(为良好

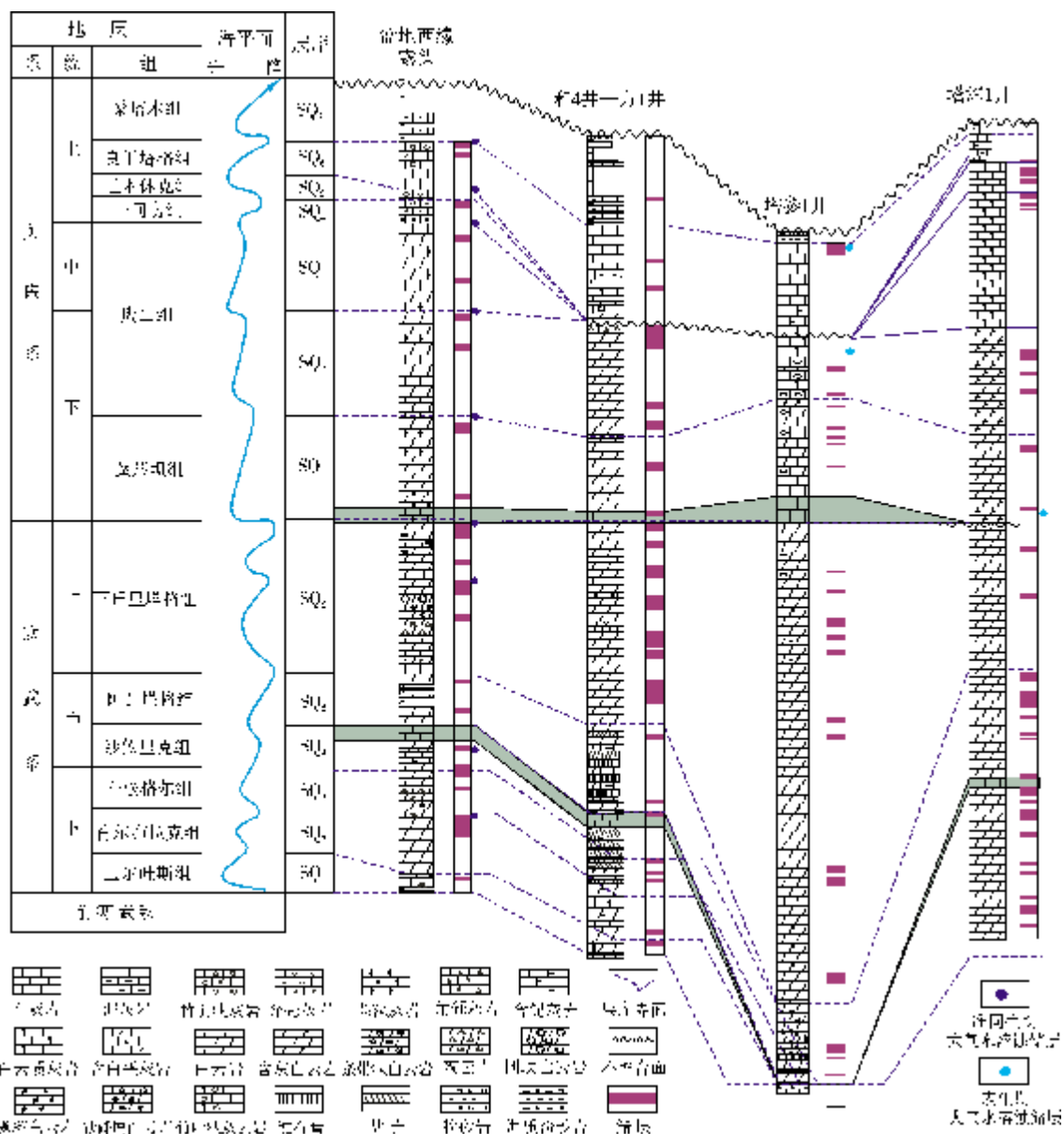


图6 塔里木盆地寒武系和奥陶系层序格架与储层分布对比剖面图

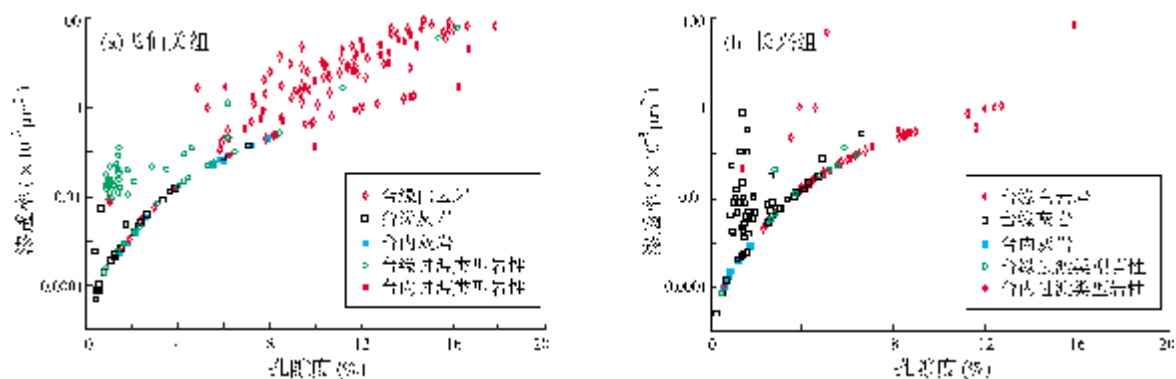


图7 四川盆地龙岗地区上二叠统长兴组和下三叠统飞仙关组碳酸盐岩储层物性分布图

图示除裂缝性储层外,白云岩储层物性优于石灰岩储层

的烃源岩)。多台槽结构可使多类储集体在时空上形成复合-叠置,规模储层发育,如台缘礁滩、槽缘礁滩、台内礁滩、台内白云岩坪、缓坡滩和钙屑浊积岩等储集体的时空复合-叠置以及多个障壁岛及后缘准同生白云石化和溶蚀形成的规模储层。

多台槽结构可形成多种生储组合,包括台缘生储组合、槽缘生储组合、台内生储组合、缓坡生储组合和斜坡-盆地生储组合,展示了广阔的勘探领域。台缘生储组合是重要的成藏组合,也是目前主要的勘探领域,障壁岛与盆地相和斜坡相可形成优质的空间生储配置。槽缘生储组合也是重要的成藏组合和勘探领域,具有较大的勘探潜力,如四川盆地已在槽缘生储组合中发现了大型气田。台内生储组合的勘探范围广,有良好的勘探潜力,台内可发育多种类型的储集体,油气可来源于台槽或盆地相,因此成藏的主要控制因素是油气输导条件,断层或裂缝在烃源岩与储集体之间的沟通变得十分重要。缓坡生储组合和斜坡-盆地生储组合是需要重视或潜在的勘探领域,成藏的主要控制因素是有利储层的发育程度。

4 结论和讨论

多台槽结构是中国海相碳酸盐台地的明显特征,中国南方地区古生代、塔里木盆地寒武纪和奥陶纪以及四川盆地二叠纪均发育海相碳酸盐台地的多台槽结构。区域拉张构造背景是多台槽结构的有利发育条件。多台槽结构的石油地质意义较大,它可使烃源条件更加优越,储集体类型更多、发育更广,并在时空上

形成复合-叠置。多台槽结构可形成台缘生储组合、槽缘生储组合、台内生储组合、缓坡生储组合和斜坡-盆地生储组合等五种生储组合,展示了广阔的勘探领域。前两种组合是最重要的勘探领域,台内生储组合有良好的勘探潜力,而缓坡生储组合和斜坡-盆地生储组合是需要重视或潜在的勘探领域。

本文仅初步提出了中国海相碳酸盐台地具有多台槽结构的认识,尚需进一步明确中国海相碳酸盐台地多台槽结构的平面分布,深入研究多台槽结构不同沉积单元的成岩作用和储层特征,深化剖析多台槽结构与油气聚集的关系。

参考文献

- [1] Wilson J L. Carbonate facies in geologic history[M]. New York: Springer Verlag, 1975.
- [2] 冯增昭,杨玉卿. 中国南方二叠纪岩相古地理[J]. 沉积学报, 1996, 14(2): 1-10.
- [3] 冯增昭,杨玉卿,鲍志东. 中国南方石炭纪岩相古地理[J]. 古地理学报, 1999, 1(1): 75-85.
- [4] 魏国齐,李本亮,陈汉林,等. 中国中西部前陆盆地构造特征研究[M]. 北京:石油工业出版社, 2008.
- [5] 冯庆来,桂西北早石炭世台槽地区露头层序地层及海平面变化研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1994, 19(5): 609-619.
- [6] 王一刚,文应初,洪海涛,等. 四川盆地及邻区上二叠统一下三叠统海槽的深水沉积特征[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(5): 702-714.
- [7] 马永生,陈洪德,王国力,等. 中国南方层序地层与古地理[M]. 北京:科学出版社, 2009.
- [8] 莫尔 C L. 碳酸盐岩储层——层序地层格架中的成岩作用和孔隙演化[M]. 姚根顺,沈安江,潘文庆,等,译. 北京:石油工业出版社, 2008.

编辑:赵国宪

Multitrough Configuration of Marine Carbonate Platforms and the Relative Source-Reservoir Assemblages in China

Shou Jianfeng, Shen Anjiang, Li Jun, Wu Xinning, Zhou Jingao, Zheng Xingping

Abstract: The Chinese continent is characterized by weak tectonic stability and numerous small plates or microplates, which leads to heterogeneous textures of marine carbonate platforms and developing troughs in deepwater and reduced or weakly reduced environments within platforms and so it is easy to configure the multitroughs-in-platform in marine basins. The multitrough configuration may be favorable to diversify sedimentary patterns (further to form sub-barrier systems behind platform margin barriers), lithofacies distribution and reservoir bodies (to the penecontemporaneous dissolved dolostone reservoirs behind the back margins of barrier islands). The Multitrough configuration also advantages the development of source rocks and the formation of associated source-reservoir assemblages, such as the ones along platform margins, along trough margins, within platforms, in gentle slopes and in slope-to-basins. Besides the source-reservoir assemblage along platform margins, the ones along trough margins are also significant for the hydrocarbon accumulation.

Key words: Multi-trough configuration; Carbonate platform; Source-reservoir assemblage; Marine basin; China

Shou Jianfeng: male, Doctor, Senior Geologist. Add: PetroChina Hangzhou Institute of Petroleum Geology, 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang, 310023 China