

中国海相油气田形成的地质基础

张水昌 梁狄刚 朱光有 张兴阳 张宝民 陈建平 张 斌

(中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心, 北京 100083. E-mail: sczhang@petrochina.com.cn)

摘要 塔里木盆地、四川盆地和鄂尔多斯盆地古生界地层是中国海相油气勘探的重要层系之一, 广泛发育以泥质岩为主的优质烃源岩, 烃源岩的深埋藏决定了海相盆地以天然气为主, 但不同盆地烃源岩有机质演化程度的不同又导致油气相态的差异; 富含蒸发盐的碳酸盐岩地层中的硫酸盐热化学还原作用(TSR)对原油裂解成气具有明显的促进作用. 海相储层以碳酸盐岩和碎屑岩为主, 沉积相、白云石化作用、溶蚀作用、TSR 和断裂裂缝作用控制了碳酸盐岩储层的发育. 由于海相地层经历了多期构造旋回, 导致了多套生储盖组合的发育, 圈闭和油气藏类型也多种多样; 油气藏普遍具有多期成藏、晚期为主或晚期定型的特点; 古隆起对油气富集有重要的控制作用. 由于三大盆地海相主力烃源层的不同, 油气富集层位、油气藏的类型与分布、油气成藏的特点也各不相同.

关键词 海相 碳酸盐岩 古生界 塔里木盆地 四川盆地 鄂尔多斯盆地

中国海相盆地在地史发展的各个阶段均有分布, 新元古代 90%以上为海相沉积环境, 早古生代约 80%为海相沉积环境, 晚古生代是海域向陆相沉积的剧烈转化时期, 海西与印支运动后海水大面积退出, 各盆地逐渐转化为陆相沉积. 海相沉积无论是分布范围还是体积规模在中国均有相当大的比重. 多年来, 许多学者都对中国海相地层的石油地质特征及生成藏条件进行了大量的研究^[1~8], 尤其对碳酸盐岩有机质下限值的研究和讨论更是深入细致^[9~15]. 近年来, 随着研究和勘探程度的不断深入, 人们逐渐认识到, 中国与世界其他地区海相碳酸盐岩在优质烃源岩、储层类型及规模、碳酸盐台地规模等方面均具有相似的油气地质条件, 具备形成大型油气田的地质基础. 在经历了漫长曲折的油气勘探历程之后, 经过对中国海相盆地石油地质与成藏条件的长期攻关与研究, 近 10 年来, 中国海相油气勘探在三大盆地相继获得重大突破. 在塔里木盆地, 不仅发现了塔河-轮南大油田和哈得逊油田, 而且在塔中的石油和天然气勘探也取得重大进展; 四川盆地继川东石炭系获得成功后^[16], 在川东北下三叠统飞仙关组鲕滩勘探亦取得重大突破, 发现了一批大气田^[17~19], 预计近期飞仙关组与长兴组天然气的探明储量可达万亿立方米. 这些重大成果的取得, 显示了中国海相古老层系的巨大勘探潜力, 同时也为进一步深化认识海相油气地质条件与富集规律提供了很好的机遇. 海相

油气田的形成明显受优质烃源岩、大规模储层、区域盖层及大型古隆起的联合控制^[20]. 本文拟立足于中国海相三大盆地——塔里木盆地、四川盆地和鄂尔多斯盆地, 系统探讨和总结中国海相油气田形成的地质基础.

1 海相地层发育多套优质烃源层, 以泥质岩为主

优质烃源岩的发育为大型油气田的形成提供了必要的物质基础. 如中东阿拉伯盆地侏罗系生油岩(TOC>1%)最厚可达 150 m, 目前发现的大型、特大型油气田大多数位于该套烃源岩分布范围内. 俄罗斯地台莫斯科-萨拉托夫-古比雪夫-乌法地区碳酸盐岩油气田也都分布于上泥盆统沉积有机碳 TOC>0.5%的烃源岩范围内.

海相烃源岩的岩石类型主要是页岩和泥灰岩. 根据全球的统计分析, 页岩是最主要的烃源岩, 占到烃源岩总数的 55.1%; 其次是泥灰岩, 占到烃源岩总数的 25.5%, 它们的有机质丰度普遍较高. 而碳酸盐岩只占到烃源岩总数的 13.6%, 且有机质丰度普遍较低, 纯碳酸盐岩难以作为有效烃源岩^[14].

海相烃源岩的发育与古气候、古环境和古构造密切相关^[20]. 烃源岩并非在所有沉积环境中都有发育, 优质烃源岩主要发育于被动大陆边缘背景下的裂谷、克拉通内裂谷、克拉通内拗陷盆地和克拉通边缘拗陷

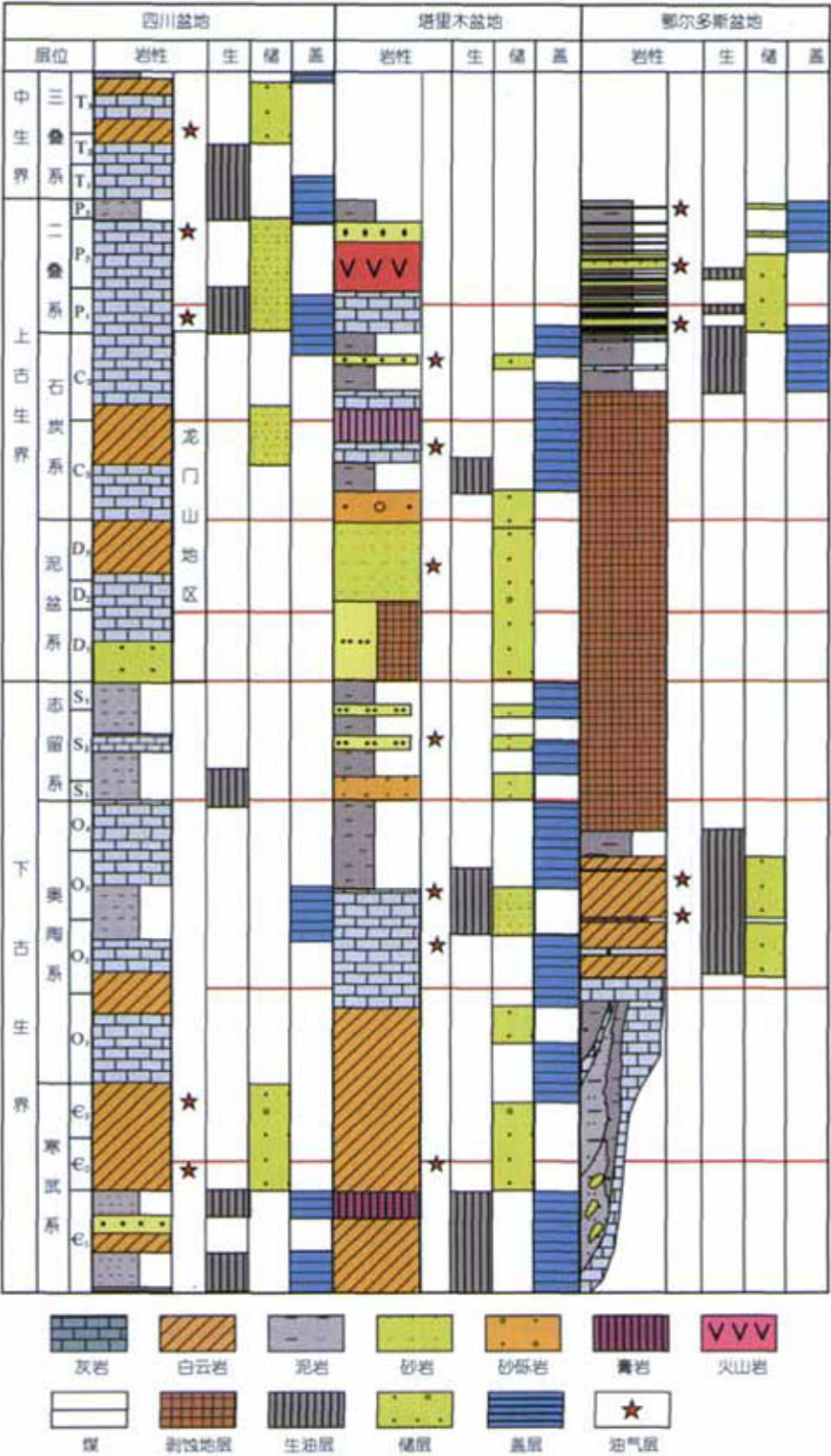


图 1 三大盆地生储盖分布特征

盆地. 根据国外 200 余个油田统计分析, 烃源岩发育最为有利的沉积相带为台内洼地和台缘斜坡. 其中, 42.6%的烃源岩发育在台内洼地, 36.6%的烃源岩发育在台缘斜坡, 另外有 20.8%的烃源岩发育在其他沉积环境中, 如盆地相.

中国海相沉积体系不缺乏高有机质丰度的优质烃源岩, 且分布广泛(图 1 和图 2), 主要分布在古生界, 以泥质烃源岩为主; 碳酸盐岩丰度普遍较低, 生油潜力也相对有限. 烃源岩的发育环境主要是盆地相、斜

坡相和台内洼地相, 其中塔里木盆地海相烃源岩主要发育在寒武纪、奥陶纪^[21,22]; 四川盆地发育在早寒武世、早志留世和晚二叠世^[23]; 在贵州和广西地区, 泥盆纪也有很好的烃源岩发育; 鄂尔多斯盆地除发育石炭-二叠系海陆交互相煤系烃源岩外, 奥陶系马家沟组可能也是一套不可忽视的烃源岩.

2 海相烃源岩埋深大, 以生成天然气为主, 但不同盆地油气相态各有差异

海相烃源岩发育时代老, 基本上都在古生代. 这些烃源岩的埋深多已达 5000 m 以上, R_o 普遍 $> 2\%$, 主要分布在 2.5%~3.8%范围内, 处于高-过成熟阶段. 无论是干酪根, 还是原油和可溶有机质, 在这个阶段都以裂解成气为主. 因此, 海相地层的烃类型主要是天然气.

但是, 三大盆地海相烃源岩由于发育位置、层系的不同, 经受的热历史和成熟度也不同, 导致油气的相态分布也各不相同. 表 1 列出了 3 个盆地陆相中生界与海相古生界各套烃源层的 R_o 值, 可以看出: 四川和鄂尔多斯盆地海相古生界烃源岩都已高-过成熟, R_o 普遍 $> 2\%$, 早期生成的油也都裂解为气, 海相地层中有气无油; 塔里木盆地则不同, 它比四川和鄂尔多斯盆地古生界多了一套在盆地中部及隆起斜坡上埋藏较浅、 R_o 只有 0.8%~1.3%、现今正处在生油高峰阶段的中、上奥陶统海相烃源岩, 因而成为中国惟一具有海相成因的大油田的盆地; 同时它又发育一套高-过成熟的寒武系烃源岩, 所以海相天然气也很丰富(图 3). 由于受烃源岩分布及其成熟度的控制, 塔里木盆地海相石油主要分布在盆地中部南北延伸的长方形区块内, 东、西两侧以气为主(图 3).

由此可见, 海相烃源岩的成熟度, 对三大盆地油气的相态分布起着关键作用. 四川和鄂尔多斯盆地过成熟海相古生界只能找气, 不能找油; 而塔里木盆地的海相勘探应当油气并举, 中部找油, 东西找气.

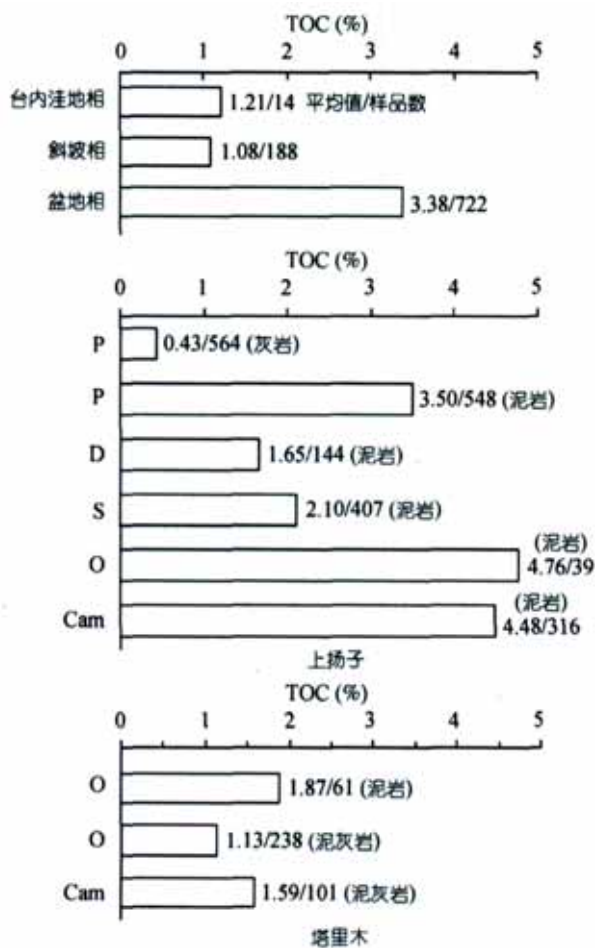


图 2 中国海相烃源岩发育的主要环境和岩性

表 1 三大叠合盆地海、陆相烃源岩的成熟度比较

塔里木				四川				鄂尔多斯			
烃源层	相	R_o (%)	油、气	烃源层	相	R_o (%)	油、气	烃源层	相	R_o (%)	油、气
J_{1+2} T_{3y}	陆相 ^{a)}	1.6~2.8	K, E, N 以产气为主	J_1 T_{3x}	陆相	1.04~1.11 1.4~2.6	油 气	J_{1y} T_{3y}	陆相	0.57~0.84 0.75~1.10	产油
O_{2+3}	海相	0.8~1.3 (凹陷中 $>3\%$)	产油为主	P		2~2.5		C, P	海陆相	1.6~2.8	产气
ϵ		2~4	产气为主	S_1	海相	2~3.5	产气	O_{1m}	海相	2~3.5	产气
				1		3~4.5					

a) 分布在库车、塔西南前陆盆地

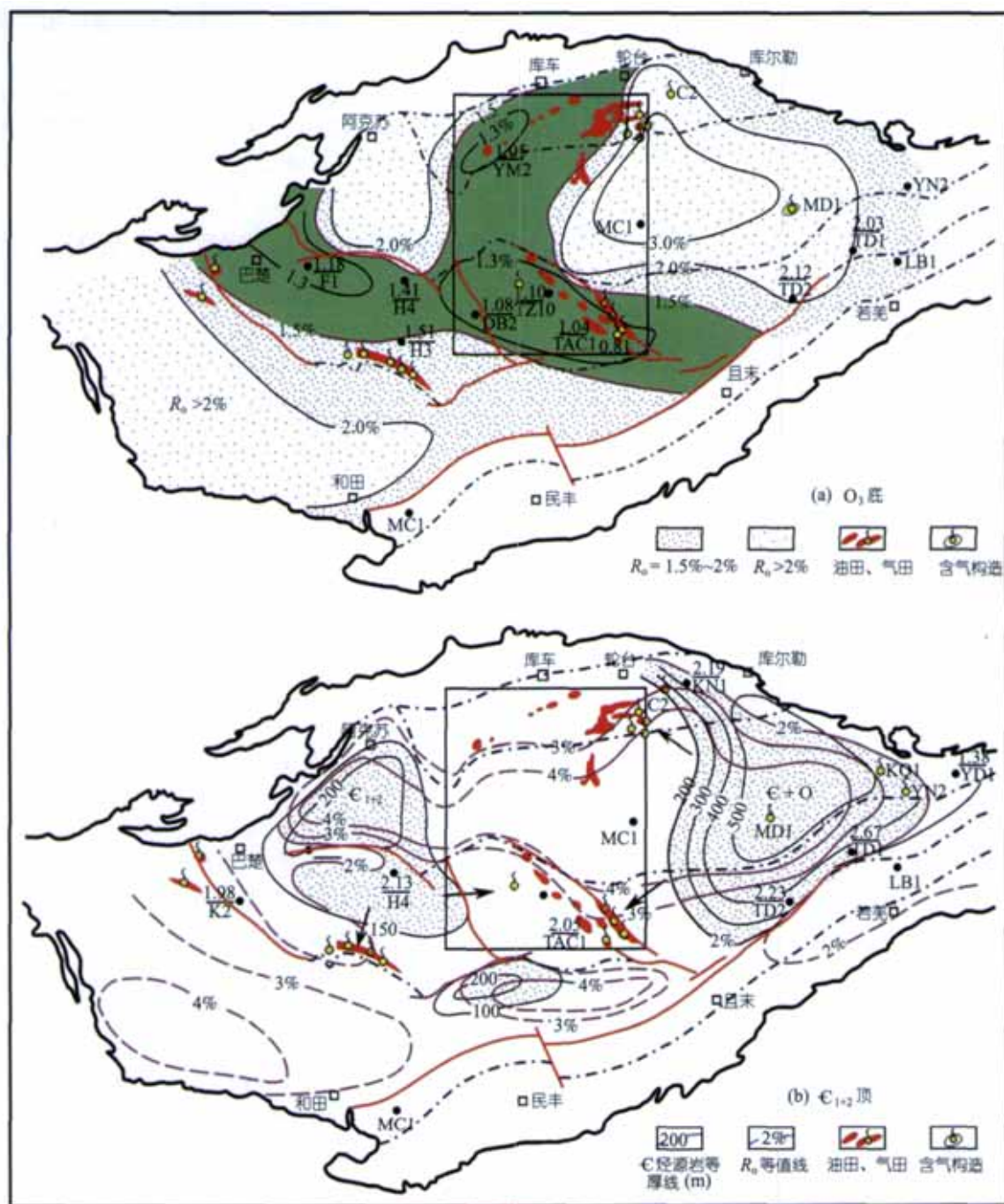


图3 塔里木盆地上奥陶统底(a)、中寒武统顶(b)现今 R_o (%)等值线图

3 海相盆地储层以碳酸盐岩和碎屑岩为主, 各盆地海相碳酸盐岩储层发育的主控因素与分布特征不同

中国海相盆地发育碎屑岩储层和碳酸盐岩储层^[24], 其中碎屑岩储层发育在滨岸、浅海陆棚(浅滩、

砂坝、潮汐砂脊)、三角洲三大沉积体系, 位于三级层序的海侵体系域, 具有单砂层厚度大、连续性好的特点, 而高位体系域砂体单砂层厚度较薄。碎屑岩优质储集体包括滨岸海滩、潮坪、海相三角洲、海陆过渡相三角洲以及辫状河三角洲等类型, 发育的主控因素是微相、粒径、碎屑组分、填隙物含量和压实作用、

压溶作用及胶结作用,特别是油气早期充注、溶蚀作用、低地温场对其形成有重要的建设性作用。

中国海相碳酸盐岩沉积体于镶边陆架、缓坡和陆表海型台地三大沉积体系,碳酸盐岩储层发育的主控因素是沉积相、白云石化作用、溶蚀作用、热硫酸盐还原作用和断裂裂缝作用,形成台缘礁滩、岩溶风化壳和白云岩等碳酸盐岩储集体,目前的勘探对象主要为台缘礁滩及岩溶风化壳两类储集体。

不同类型储层在地史时期、层序格架及各盆地内的分布特征及控制因素各不相同。中国下古生界海相地层以碳酸盐岩岩溶储层为主,主要受中国海相克拉通构造活动强、经历过多期隆升剥蚀作用控制;上古生界以孔隙性碎屑岩及碳酸盐岩储层为主,构造-沉积-成岩古地理背景与演化为其广泛发育提供了条件。层序地层格架内,碳酸盐沉积体系演化主要受二级层序控制,高能礁滩相带分布主要受三级层序海平面变化与沉积断裂活动控制;岩溶风化壳储集体分布主要受二级或三级层序界面控制,同生岩溶储集体分布主要受四级或五级高频海平面下降时的沉积高地貌控制。

海相碳酸盐岩储层在各盆地的分布规律及主控因素也各不相同(图 4)。塔里木盆地轮南-塔河奥陶系储层岩石类型主要是石灰岩,储层发育的主控因素是风化壳岩溶作用,它具有不受潜山面残丘构造形态和闭合度控制的特点,纵向上分带,平面上分区,形成裂缝型、孔洞-裂缝型等多种储层。较好的储层纵向上发育在侵蚀面以下 100m 的岩溶发育带,平面上发育在岩溶斜坡区。塔中地区上奥陶统良里塔格组碳酸盐岩储层发育的主控因素是台缘生屑礁滩沉积

相带的分布;在礁滩相带内,储层发育不受局部构造高点控制,而受高能礁滩沉积体高地貌控制,礁滩体受准同生期岩溶、风化壳岩溶、埋藏岩溶及深部热液岩溶及构造裂缝多期次叠加作用,形成深部优质储层,沿台缘成带分布。

四川盆地发育石炭系和下三叠统飞仙关组两套孔隙性白云岩,优质储层发育受准同生期渗透回流白云石化、埋藏白云石化及 TSR 作用控制,主要分布于台内蒸发潟湖边缘的滩坝相和潮间带碳酸盐砂坪等高能相带。

鄂尔多斯盆地奥陶统马家沟组五段碳酸盐岩优质储层发育的主控因素是潟湖盆缘膏云坪相带与古岩溶阶地的叠加;含硬石膏白云岩的发育为古风化壳岩溶作用奠定了基础,石膏斑点的蜂窝状溶蚀,造就了孔隙型碳酸盐岩优质储层。

由此可见,三大盆地不同层系海相碳酸盐岩储层发育的主控因素各不相同,没有一个通用的发育模式。总体上看,白云岩储层比石灰岩好;孔隙型储层比裂缝性好;高能相带、白云石化作用及多期岩溶作用是碳酸盐岩储层发育的三个主控因素。

4 TSR 为原油裂解成气和碳酸盐岩储层的改善提供了有利条件

中国海相沉积层系一般富含硫酸盐类(膏盐)。如四川盆地寒武系、石炭系和三叠系,塔里木盆地寒武系及鄂尔多斯盆地奥陶系等均发育有厚层的膏盐层,而对应的储集层往往位于膏盐层的下面或上面,碳酸盐岩储层本身(主要是白云岩)一般也含有一定的膏质盐类,特别是地层水中通常富含硫酸根离子,这就为 TSR 的发生提供了条件^[25]。

储层发育模式								
沉积期气候	干旱				潮湿			
岩石类型	白云岩				灰岩			
储集体类型	斜坡塔礁	环潟湖 滩		岩溶风化壳		岩溶 风化壳	台缘 礁滩	
主控因素	沉积相 白云石化	沉积相 白云石化		淡水淋 滤溶蚀		淡水淋 滤溶蚀	沉积相 多期 溶蚀	
勘探实例	川东北 长兴组	川东北 飞仙关组		靖边 马家沟组		塔北 奥陶系	塔中良 里塔格组	

图 4 中国西部三大海相盆地碳酸盐岩储集体发育模式图

TSR (Thermochemical sulfate reduction, 硫酸盐热化学还原作用)是在热动力条件驱动下烃类与硫酸盐岩之间发生的化学反应,是指烃类在高温条件下将硫酸盐还原生成 H_2S 和 CO_2 等酸性气体的过程^[26~33],是高含 H_2S 天然气形成的主要途径. 中国海相沉积组合多数地区具备这些条件,也成为中国目前海相层系天然气中不同程度地含有 H_2S 的重要原因. 由于 H_2S 的巨毒和强腐蚀性,在石油天然气工业中的危害一直备受人们的关注,对 H_2S 和 TSR 的评价一直是负面的^[34]. 最近的研究发现,TSR 作用对天然气生成和储层的改善也具有积极作用.

4.1 TSR 促进了原油裂解成气

虽然多数学者认为原油裂解成气主要受温度控制^[35],但 TSR 对原油裂解的促进作用也不容忽视. 最新的实验室模拟实验和对四川盆地天然气的研究发现, H_2S 与 CH_4 的生成之间可能存在某种成因联系(图5),在 TSR 作用下,原油裂解温度降低,生成甲烷量明显增加. 热动力固然对原油的裂解举足轻重,但导致高 H_2S 生成的 TSR 作用对驱动原油发生裂解和加速裂解起到了一种不可忽视的作用. TSR 反应可以消耗重烃,但同时会以一种特殊的反应途径促使 CH_4 的大规模生成. 四川盆地石炭系气藏群、飞仙关组气藏群以及国外的实例等碳酸盐岩大中型气田中甲烷气的大规模富集和高含量的 H_2S 的共生充分证实了

这一点. 在一定条件下,TSR 可作为烷烃气生成的一个重要机理.

4.2 TSR 和 H_2S 促进了碳酸盐岩次生孔洞的发育和优质储集层的形成

TSR 的发生,首先需要硫酸盐类溶解提供 SO_4^{2-} , 储集空间得到初步改善;其次 TSR 反应形成的 H_2S , 溶于水后显示出较强的酸性溶蚀作用,对白云岩储层具有明显的溶蚀效果. 在高温和储层中地层水的作用下, H_2S 与白云岩发生较强烈的酸性流体——岩石矿物之间相互作用(水岩反应),促进了白云岩次生孔洞的发育和高孔高渗优质储集层的形成,使油气储层保存下限增大和深部天然气聚集成藏成为可能^[36]. 而目前飞仙关组高含 H_2S 气藏普遍压力系数小、充满度低,就可能与 TSR 及 H_2S 对储层溶蚀导致储集空间增容有关^[37]. 四川盆地油气勘探结果证实,所有高含 H_2S 天然气藏均对应于次生孔隙十分发育的优质储层,岩性主要以白云岩为主,储层埋藏深度超过 6000 m 时依然发育优质储层.

5 海相盆地的多旋 发展导致多套储盖组合发育,形成多种圈闭和油气藏类型

中国海相盆地形成早,发育历史长,由于构造运动的多旋迴性,导致了多套储盖组合的发育,同时也形成多种圈闭和油气藏类型.

5.1 海相层系多套储盖组合

海相盆地往往发育多套烃源层,如前所述,塔里木盆地最重要的是寒武、奥陶系泥质岩烃源层,四川盆地下寒武统、下志留统和上二叠统,以及鄂尔多斯盆地石炭-二叠系等,这些海相烃源层母质好,有机碳含量较高. 各套烃源层或与本层碳酸盐岩、砂岩储层组成自生自储式生储盖组合(如:英买1和2号,塔中45);或向下运移,与下伏碳酸盐岩储层组成上生下储式组合,如鄂尔多斯奥陶系靖边气田和四川威远震旦系气田等;或与上覆碳酸盐岩和砂岩储层组成下生上储式组合,例如塔中隆起志留系、泥盆、石炭系油藏、和田河、塔北隆起石炭系、三叠侏罗系油田;还有复合交叉(如:轮南、塔河)等多种模式. 另外,多套生储盖组合也是海相盆地一大特点,还有一套源岩多产层构成的气藏,如和田河气田、卧龙河气田等,这些油气藏一般位于古隆起部位,为大型隆起的勘探提供了多套目的层. 储盖组合在塔里木盆地可分为6种类型(图6),其中奥陶系与石炭系之间的不

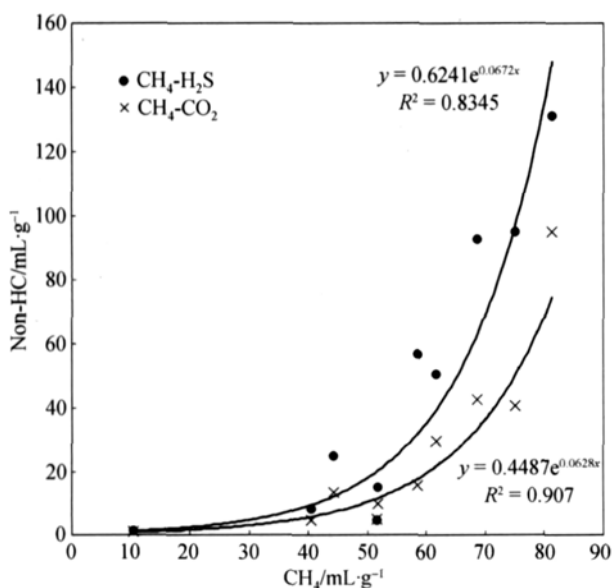


图5 在 TSR 作用下原油裂解甲烷气与非烃气之间的关系
MgSO₄ 水溶液参与下加热 622.5 h

整合最为重要。

在几大隆起的储集层中,海相碳酸盐岩储层占有重要的地位。目前发现的碳酸盐岩储层多与古风化壳上的岩溶作用有关,既有溶洞裂缝型(塔北奥陶系)和裂缝型储层(泸州二叠系、三叠系),也有孔隙型储层,如鄂尔多斯奥陶系马五段岩溶孔隙性白云岩和塔中隆起上奥陶统颗粒灰岩储层。在西部各隆起中,上奥陶统、石炭系、上三叠统、上侏罗统 4 套区域盖层,对油气保存起着很重要的作用。

5.2 海相层系多种圈闭和油气藏类型

中国海相盆地圈闭类型也多种多样,在塔里木盆地就发育三类 10 种圈闭。如轮南-塔河大油田属风化壳岩溶圈闭,和田河气田属冲背斜圈闭,塔中 1 号坡折带中的台缘礁滩体岩性圈闭,塔北隆起志留系地层的削蚀圈闭;内幕背斜圈闭多见于隆起上的寒武系、中-下奥陶统和志留系之中,圈闭规模较大,形成时间也较早。

海相油气藏按圈闭类型可分为构造型、地层型、岩性型以及复合型,每一种类型又可分为若干亚类。油气藏类型受地质构造背景的控制(图 7): (1) 在构造带或断裂带上的油气藏主要以构造型为主,部分构

造带以构造-地层(岩性)复合型为主。如四川盆地川东高陡构造带,地层-构造复合型气藏是主要的气藏类型;川东北部飞仙关组鲕滩气藏基本上属于岩性-构造复合型气藏;川南、川西南地区二叠系-三叠系气藏以断块型为主; (2) 克拉通拗陷平缓构造区以岩性油气藏为主,如鄂尔多斯盆地上古生界气藏基本上属于岩性气藏,受河道砂体控制; (3) 区域性不整合面附近的风化壳,以不整合地层型油气藏为主,如鄂尔多斯盆地奥陶系气藏、四川盆地威远气藏、塔里木盆地奥陶系油气藏等;在不整合面之上的地层超覆带,发育砂体上倾尖灭型油气藏,如塔里木盆地哈得逊石炭系油田等。当然,不同盆地,油气藏类型也存在明显差异。

塔里木盆地海相大油气田的油气藏类型,是不整合面上风化壳岩溶控制的地层-岩性油气藏(轮南-塔河油田),其次是受生物礁滩复合体控制的岩性油气藏(塔中 1 号坡折带);构造及地层-构造型砂岩、碳酸盐岩油气藏也很重要(哈得逊油田、和田河气田)。

四川盆地海相气田主要是构造型气田。但是近年来发现的普光飞仙关组鲕滩气田^[37,38],却是不完全受局部构造控制的构造-岩性复合型气田;石炭系

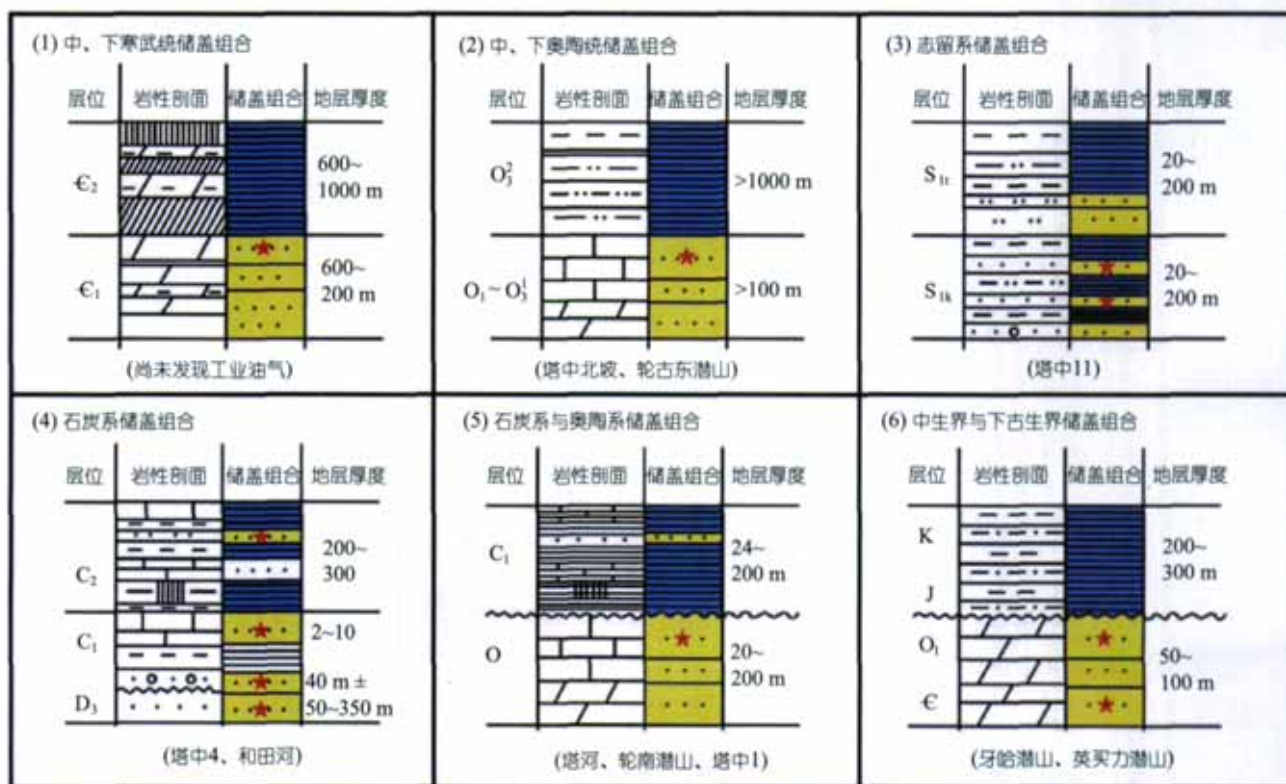


图 6 塔里木大型隆起的六类储盖组合

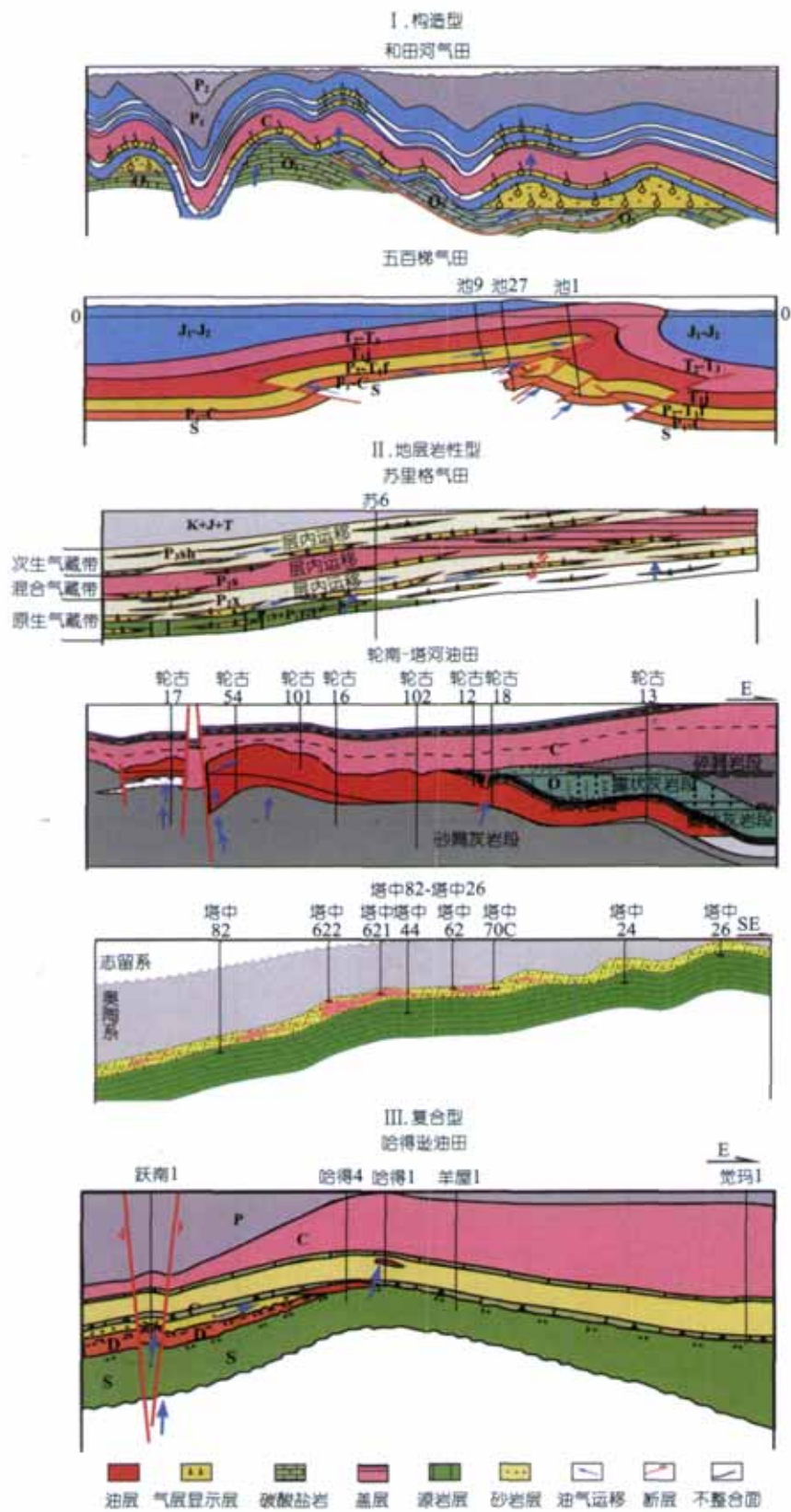


图 7 海相盆地主要油气藏类型(据油田公司图件改编)

最大的五百梯气田也是与尖灭线有关的地层-构造复合型气田。这种趋势表明,四川盆地海相大气田可能赋存于地层、岩性与构造复合的大型圈闭之中。

鄂尔多斯盆地是中国最稳定的克拉通盆地,区域构造从深层到浅层都是西倾大斜坡,局部构造很不发育。除盆地西缘推覆带前缘一批中小型油气田外,几乎所有大油气田,不论是海相还是陆相,是古生代还是中生代,是砂岩还是碳酸盐岩储层,一律属于岩性油气田,受控于海湖三角洲砂体、古岩溶阶地和膏云坪相带的分布,局部构造几乎不起控制作用。

6 海相盆地的复杂性决定了油气成藏的多期性

海相盆地一般发育多套烃源层,在多期构造运动的影响下,古生代海相层系烃源岩的埋藏史可分为早期快速演化生烃型、晚期快速演化生烃、持续演化生烃型、多次演化生烃型四类^[39]。多套烃源岩在空间上的叠加与生烃演化的多样性,使得海相盆地往往具有多期成藏的特点。塔里木盆地几大隆起的成藏期主要有加里东、晚海西-燕山和喜山期三期;乐山-龙女寺隆起有加里东、印支和喜山期三期,泸州隆起有燕山、喜山两期,但天然气则富集在喜山期构造之中。

海相盆地的多期成藏是由于一套或多套烃源层受多期构造运动的影响导致多期成熟排烃的结果,油气藏混源现象也比较普遍;而强烈的喜山期构造运动,既使早期形成的油气藏发生调整再分配,又为晚期成藏提供了圈闭条件。由于三大盆地构造演化、主要烃源岩的生烃期各不相同,多期成藏的特点也各不相同。总结起来有两种模式,一种是多期成藏、晚期为主;另一种是多期成藏、晚期定型。

多期成藏、晚期为主,是指在多期成藏背景下以晚期充注为主,如塔里木盆地塔中、轮南、哈得逊等油田,虽然多种地质地球化学数据和多种多样的油气性质都指示普遍存在多期油气聚集,但目前保留下来的主要源自中、上奥陶统源岩的可流动的石油^[40,41],其充注期主要发生在喜山期。也就是说,喜山期较大规模的油气充注是塔里木盆地能够发现并找到商业性油藏的最主要的原因。

多期成藏、晚期定型,是指早期形成的油气藏由于受构造运动的影响,在晚期发生调整、破坏、改造、定型。这种类型的油气藏多属次生油气藏。如四川盆地威远气田,就是早期聚集在乐山-龙女寺古隆起顶

部的震旦系资阳古油藏和原油裂解古气藏在喜山期大部分天然气转移到今隆起顶部威远构造上形成的气田;再如川东地区的石炭系气藏群,也是古油藏在中侏罗世末—早第三纪时发生裂解形成古气藏,后在喜山期调整到局部构造中,形成今气藏。因此,多期成藏、晚期定型是四川盆地气藏形成的主要模式。

塔里木盆地和四川盆地之所以在油气成藏模式上存在差异,主要是由盆地的构造活动性质决定的。塔里木克拉通最活动,表现为早古生代剧烈沉降,晚古生代至三叠纪强烈抬升,先后发育六大区域性角度不整合,代表着 6 次区域构造运动。在这种背景下形成的油气藏多已遭到破坏,如加里东剥蚀面之下的志留系沥青砂古油藏,能够保留下来的油气藏不会太多,至少气藏的保留会十分困难。因此目前发现的油气藏应多为晚期再充注的产物。

四川上扬子克拉通的活动性远不如塔里木克拉通,各层系之间多为假整合,构造运动表现为大面积整体升降,古油藏形成后不致因抬升剥蚀而破坏,在以后的继续深埋中裂解成气;而且各主力储层之间发育有多套厚度大、封闭性好的膏盐盖层,聚集起来的油气也难以散失。因此,四川盆地的海相天然气多属原油裂解气。裂解形成的天然气一般不会运移太远,就近聚集在喜山期形成的局部构造中,这与塔里木盆地明显不同。在塔里木盆地,喜山运动主要在周缘形成再生前陆盆地及山前构造带,但对盆地内部的影响较小,并未形成多少局部构造;而在四川盆地,喜山运动是其局部构造形成的主要时期,在盆地内部形成大量成排成带的高陡、梳状、箱状、膝状、甚至直立和倒转背斜,也有丘状、穹窿及短轴背斜;各期古隆起上的古气藏随之解体,转移或调整到喜山期局部构造中成藏,喜山期局部构造控制了今气藏的定型。

7 大型古隆起控制着油气富集

大量的勘探实践已经证实,不同盆地油气的富集规律各不相同。总体而言,大型隆起、有利沉积相带以及古断裂带等因素,对海相油气的富集起着重要的控制作用。其中,对于古老的海相盆地而言,隆起对油气藏的形成与分布起着关键的作用^[42,43]。这主要是由于:(1)海相隆起形成时间早,延续时间有的很长,是油气运移长期的有利指向区;(2)海相隆

起规模大, 隆起的面积多在 $(1\sim4)\times 10^4\text{ km}^2$, 为海相地层油气勘探提供了广阔领域; (3) 海相隆起具有良好的生储盖组合, 多期成藏; (4) 隆起晚期构造活动相对较强, 利于油气的聚集与调整。

三大克拉通盆地大型隆起的发育史不同, 它们对油气富集的控制作用也不同。塔里木盆地几乎所有海相油气田都集中在三大隆起及其斜坡上; 四川盆地的海相天然气富集在具古隆起背景的喜山期局部构造上; 鄂尔多斯庆阳古隆起可能并不直接控制迄今发现的天然气藏的分布。

7.1 塔里木盆地长期发育、邻近生烃凹陷的大型隆起, 控制海相油气富集

塔里木盆地迄今探明的 21 个海相(成因)油气田, 其中 19 个分布在塔北、塔中、巴楚三大隆起上, 分布在塔北隆起有 9 个, 塔中隆起有 8 个, 巴楚隆起有 2 个。另有 2 个油气田, 一个是哈得逊油田, 实际上位于塔北隆起轮南潜山向南延伸入满加尔凹陷的斜坡部位; 另一个是巴什托普油气田, 位于巴楚隆起南斜坡(麦盖提斜坡)之上; 这 2 个油气田看似不在隆起范围内, 其实都属于与隆起密切相关的斜坡带油气田。塔里木盆地海相油气田(藏)如此集中分布在三大隆起及其斜坡之上, 说明塔里木古生代克拉通盆地中的大型隆起是油气运移的指向, 是海相油气富集的主控因素。

塔北、塔中、巴楚三大古隆起都具有长期发育、持续隆起的特点(图 8), 又都有一侧紧邻寒武系和中、上奥陶统生烃中心(图 3), 所以富集了海相油气。相比之下, 塔北、塔中两个隆起形成早, 又邻近两套海相烃源岩的生烃中心, 始终是多期油气运移的指向, 既可接受寒武系早期生成的油, 形成古油藏, 又可接受中、上奥陶统中晚期生成的油和寒武系晚期生成的天然气, 以及古油藏的晚期原油裂解气; 其中包括满西低隆在内的南北向延伸的长方形区域(图 2), 是塔里木找寻海相原油的重点区。巴楚隆起只有一套高过成熟中、下寒武统烃源岩供气, 隆起形成又较晚, 构造定型也晚, 有利于形成晚期成藏的大气田, 包括古油藏裂解气。

至于塔东、塔南隆起未获突破则是由多种因素造成的。塔东隆起位于寒武系—下奥陶统生烃中心区内, 又有几个面积在 $900\sim 1700\text{ km}^2$ 、幅度达 $500\sim 600\text{ m}$ 的大型构造, 但至今未获工业油气。它有几个不利的条件: 它在中、上奥陶统快速剧烈地沉降, 深达

6000 m, 以至寒武系烃源岩在奥陶纪末就过早进入到干气带; 塔东 2 井试获的 52 L 重油, 已经证明是高温裂解残余油^[44]; 在随后的志留纪末又强烈抬升, 中、上奥陶统和志留系的剥蚀厚度达 4300 m, 中新界的再次沉降又未达到抬升前的最大埋深; 不存在“二次生烃”; 侏罗系直接覆盖在中、上奥陶统之上, 这样的“大起大落”, 不利于油气生成和保存; 隆起上只有一套震旦—寒武系碳酸盐岩, 又是含泥质的生烃相, 与上覆巨厚的中、上奥陶统砂泥岩连续沉积, 风化壳岩溶不发育, 缺少好储层。因此, 塔东隆起的找油前景不容乐观, 但有可能找到气。

塔南隆起两侧未见海相烃源岩分布, 隆起主体由元古代变质岩组成, 大部分地区盖层为新近系, 隆起太老, 盖层太新, 烃源不明, 圈闭不发育, 成藏条件不清, 海相油气勘探前景不好预测。

7.2 四川盆地古隆起控制古油藏、古气藏的形成; 隆起上的喜山期局部构造控制今气藏的分布

四川盆地海相已发现的一些大型气藏与古隆起也都具有十分密切的关系(表 2)。震旦系资阳古油藏和原油裂解古气藏, 聚集在乐山—龙女寺古隆起顶部; 而大部分天然气则转移到喜山期今隆起顶部的威远构造上, 形成大气田, 因此加里东时期形成的乐山—龙女寺古隆起, 延续时间长, 隆起幅度大, 分布面积广, 是下古生界储层聚集油气成藏的最有利场所, 对威远气田的形成具有重要意义。晚三叠世—早侏罗世的开江古隆起, 控制石炭系储层沥青的富集和古油藏的形成; 中侏罗世末—早第三纪时古油藏裂解, 形成古气藏; 喜山运动后调整到局部构造中, 形成今气藏。可以说加里东期古隆起控制了四川盆地下古生界及上元古代的气田和含气构造分布, 海西—印支期发育的开江古隆起控制了石炭系气藏群的分布。开江古隆起的继承性发展, 是上二叠统生物礁和下三叠统鲕粒滩气田成藏群的形成的重要基础。川东北地区罗家寨—普光一带的飞仙关—长兴组富含 H_2S 气田群的分布, 在印支—早燕山期总体位于开江古隆起的西北上斜坡, 燕山早期捕获了一定的志留系生成的油气, 在燕山中期古油藏开始裂解成气, H_2S 也开始大量生成; 而此时龙潭组烃源岩也开始进入生气高峰并向构造高部位储层充注; 在燕山晚期—喜山期, 随着构造运动气藏也开始发生调整改造, 圈闭类型由原来的岩性油气藏变为构造—岩性双重控制的复合圈闭, 此时二叠系龙潭组烃源岩仍继续向飞仙关

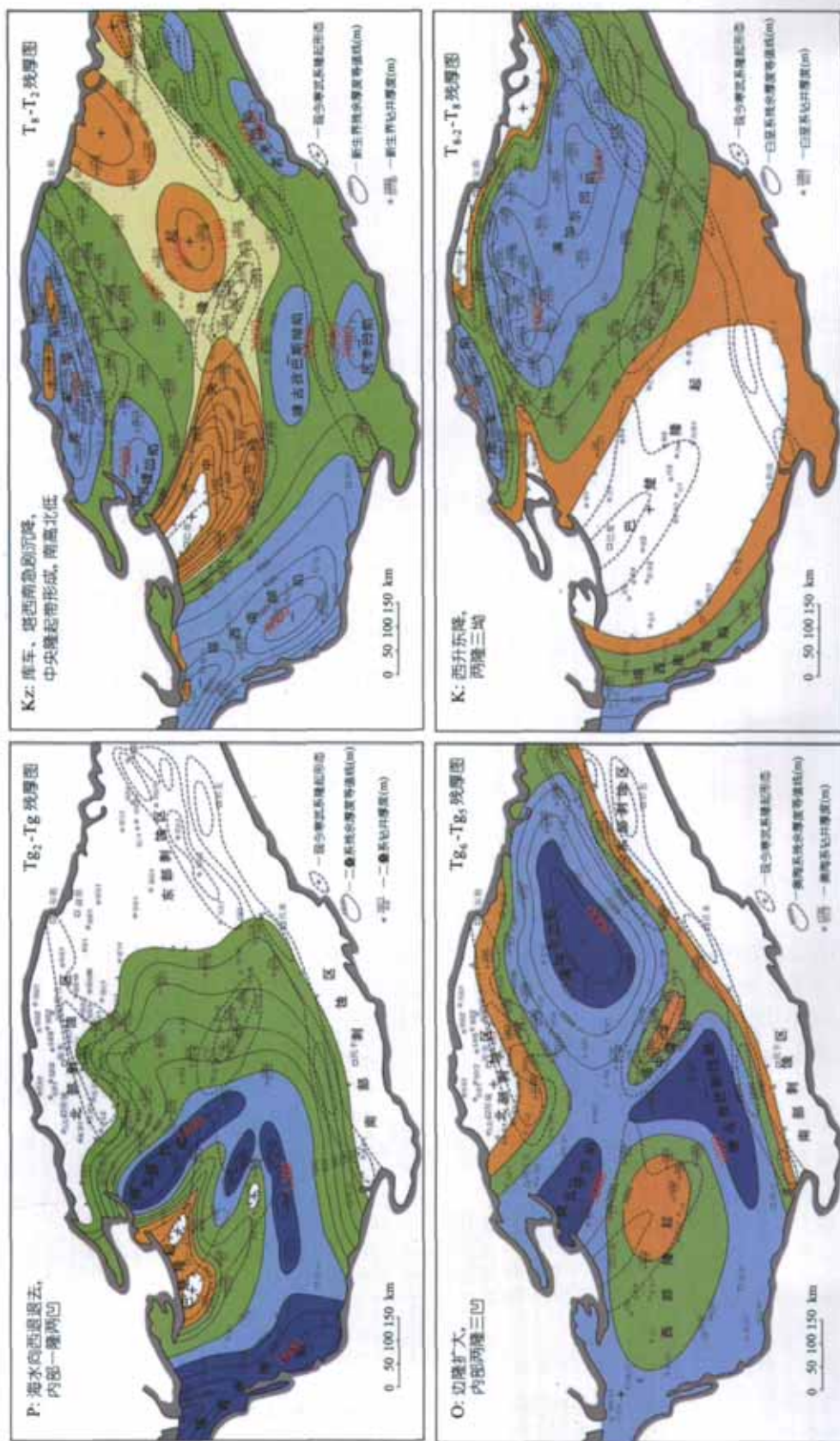


图 8 塔里木盆地关键构造期隆拗变迁图(残厚图)

表2 四川盆地古隆起与大型气藏

古隆起	古隆起形成时间	主要烃源岩	生烃高峰	典型气藏	气藏类型	成藏特征
乐山-龙女寺	S末	C ₁	D	威远	构造	资阳古油藏和原油裂解古气藏在喜山期转移至今隆起顶部的威远构造形成威远气田
泸州	T ₂ 末	P	J ₁		构造	泸州古隆起中三叠世起嘉陵江组古油藏裂解成气, 喜山期调整至成排成带的背斜中
开江	C末	S ₁	T ₃ 末	五百梯、沙坪场、卧龙河	地层-构造	开江古隆起控制的石炭系古油藏在中侏罗末-古近纪时裂解形成古气藏, 喜山运动后调整到局部构造中形成今气藏
开江古隆起斜坡	T ₃ 末	P ₂	J ₁₋₂	罗家寨、普光、渡口河、铁山坡	构造-岩性	川东北在印支末期位于开江古隆起斜坡, 燕山早期捕获了志留系油气, 燕山中期古油藏开始裂解; 同时龙潭组烃源岩进入生气高峰并充注; K-E期圈闭类型变化, 气藏发生调整

组-长兴组复合圈闭中供气。可见四川盆地的古隆起对油气聚集具有重要的控制作用。

古隆起形成早, 与附近的主力烃源层生油高峰期相匹配, 成为古油藏聚集的有利场所。例如, 乐山-龙女寺古隆起形成于志留纪末, 而下寒武统的生油高峰在泥盆纪; 泸州古隆起形成于中三叠世末, 而二叠系的生油高峰在早侏罗世; 开江古隆起形成于石炭纪末, 而早志留统的生油高峰在中三叠世末; 川东北飞仙关古隆起形成于晚三叠世末, 而二叠系的生油高峰在早中侏罗世, 等等。

如前所述, 四川盆地喜山期局部构造的控气作用十分明显, 这是因为喜山运动期是四川盆地和局部构造形成的主要时期。古隆起控制古油、气藏; 喜山期局部构造控制今气藏。这是四川盆地海相天然气富集的一大特点。

8 讨论

通过对塔里木、四川和鄂尔多斯三大海相盆地油气形成与分布的地质基础研究, 可以看出它们有某些共同点: 生烃中心控制油气富集, 碳酸盐岩是三大盆地海相油气田的主力储层, 古隆起对油气富集有重要作用。

但是, 三大盆地海相主力烃源层的不同, 油气富集层位和勘探主要目的层也不同。鄂尔多斯盆地发育上、下古生界上石炭—下二叠统和下奥陶统马家沟组两套海相烃源层, 其生烃中心基本重叠, 形成自生自储式生储组合, 产气层位于烃源层之中或其上下, 两个层系的大气田位于生烃中心范围内并相互邻近, 形成近源式含气系统。

四川盆地发育上、下古生界下寒武统、下志留统、二叠系三套海相烃源层, 3个生烃中心互相错位, 互不重叠, 形成下生上储、上生下储及自生自储式生储组合。产气层在纵向上直接位于几套烃源层上、下;

在平面上储层发育带和气田与生烃中心相重叠, 形成近源式含气系统。下寒武统生烃中心只分布在川西南, 下志留统烃源岩在盆地中大面积剥蚀, 生烃中心分布在川东和川南, 范围都有限; 惟独二叠系烃源岩分布最广, 在川东北、川中和川南有几个生烃中心, 其结果, 海相天然气探明储量的2/3集中在以二叠系为气源的二叠、三叠系两个层系中, 成为盆地海相天然气勘探的主要目的层。

塔里木盆地只发育下古生界寒武系和中、上奥陶统两套海相烃源层。寒武系(下奥陶统)生烃中心在盆地东、西两侧, 中、上奥陶统生烃中心在盆地中部, 互相错位, 互不叠置(图3), 形成下生上储、自生自储式组合。寒武系生烃中心内上、下古生界都缺少好储层, 生成的油气必须通过断层和不整合面作较长距离的纵横向运移, 到达大型隆起及斜坡上的奥陶系、志留系、石炭系储层发育带上聚集, 形成源外(远源)含油气系统。中、上奥陶统生烃区本身就有储层(例如塔中北坡和塔北南坡), 又邻近隆起上的下奥陶统风化壳和志留系、石炭系砂岩储层, 形成近源式含油气系统, 还可接受来自寒武系的远源油气。

参 考 文 献

- 1 邱中建, 龚再升, 主编. 中国油气勘探, 第二卷, 西部油气区. 北京: 石油工业出版社, 地质出版社, 1999. 195—275, 362—425
- 2 梁狄刚, 张水昌, 张宝民, 等. 从塔里木盆地看中国海相生油问题. 地学前缘, 2000, 7(4): 534—547
- 3 贾承造, 主编. 塔里木盆地石油地质与勘探丛书. 北京: 石油工业出版社, 2004
- 4 赵文智, 张光亚, 何海清, 等. 中国海相石油地质与叠合含油气盆地. 北京: 地质出版社, 2002, 62—214
- 5 李国玉. 海相沉积岩是中国石油工业未来的希望. 海相油气地质, 2005, 10(1): 5—12
- 6 李晋超, 马永生, 张大江, 等. 中国海相油气勘探若干重大科学问题. 石油勘探与开发, 1998, 25(5): 1—2

- 7 金之钧. 中国海相碳酸盐岩层系油气勘探特殊性问题. 地学前缘, 2005, 12(3): 15—22
- 8 汪泽成, 赵文智, 张林, 等. 四川盆地构造层系与天然气勘探. 北京: 地质出版社, 2002
- 9 傅家谟, 汪本善, 史继扬, 等. 有机质演化与沉积学矿床成因——(1) 油气成因与评价. 沉积学报, 1983, 1(3): 40—58
- 10 郝石生, 高岗, 王飞宇, 等. 高-过成熟海相烃源岩. 北京: 石油工业出版社, 1996. 1—147
- 11 刘宝泉, 梁狄刚, 方杰, 等. 华北地区中上元古界、下古生界碳酸盐岩有机质成熟度与找油前景. 地球化学, 1985, (2): 150—162
- 12 程克明, 王兆云, 钟宁宁, 等. 碳酸盐岩油气生成理论与实践. 北京: 石油工业出版社, 1996. 294—303
- 13 夏新宇, 戴金星. 碳酸盐岩生烃指标及生烃量评价的新认识. 石油学报, 2000, 21(4): 36—41
- 14 张水昌, 梁狄刚, 张大江. 关于古生界烃源岩有机质丰度评价标准. 石油勘探与开发, 2002, 29(2): 8—12
- 15 刘德汉, 付金华, 郑聪斌, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相碳酸盐岩生烃性能与中部长庆气田气源成因研究. 地质学报, 2004, 78(4): 542—550
- 16 胡光灿, 谢姚祥. 中国四川盆地东部高陡构造石炭系气田. 北京: 石油工业出版社, 1997. 63—130
- 17 张水昌, 朱光有. 四川盆地海相天然气富集成藏特征与勘探方向探讨. 石油学报, 2006, 27(5): 1—8
- 18 冉隆辉, 陈更生, 张健, 等. 四川盆地东北部飞仙关组鲕滩储层分布研究与勘探潜力分析. 中国石油勘探, 2002, 7(1): 46—55
- 19 马永生, 蔡勋育, 李国雄. 四川盆地普光大型气藏基本特征及成藏富集规律. 地质学报, 2005, 79(6): 858—865
- 20 张水昌, 张宝民, 边立曾, 等. 中国海相烃源岩发育控制因素. 地学前缘, 2005, 12(3): 39—48
- 21 张水昌, 梁狄刚, 张宝民, 等. 塔里木盆地海相油气的生成——塔里木盆地石油地质特征丛书. 北京: 石油工业出版社, 2004
- 22 张水昌, 张保民, 王飞宇, 等. 塔里木盆地两套海相有效烃源层: 有机质性质、发育环境及控制因素. 自然科学进展, 2001, 11(3): 261—268
- 23 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 四川盆地天然气特征及其气源. 地学前缘, 2006, 13(2): 234—248
- 24 顾家裕, 贾进华, 方辉. 塔里木盆地储层特征与高孔隙、高渗透率储层成因. 科学通报, 2002, 47(增刊): 9—15
- 25 朱光有, 张水昌, 李剑, 等. 中国高含硫化氢天然气田的特征及其分布. 石油勘探与开发, 2004, 31(4): 18—21
- 26 Orr W L. Changes in sulfur content and isotopic ratios of sulfur during petroleum maturation—Study of the Big Horn Basin Paleozoic oils. AAPG Bull, 1974, 50: 2295—2318
- 27 Krouse H R, Vial C A, Eliuk L S, et al. Chemical and isotopic evidence of thermochemical sulphate reduction by light hydrocarbon gases in deep carbonate reservoirs. Nature, 1988, 333(2): 415—419
- 28 Worden R H, Smalley P C, Oxtoby N H. Gas souring by thermochemical sulfate reduction at 140 °C. AAPG Bull, 1995, 79(6): 854—863
- 29 Machel H G. Gas souring by thermochemical sulfate reduction at 140 °C: discussion. AAPG Bull, 1998, 82: 1870—1873
- 30 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 川东北地区飞仙关组高含 H₂S 天然气 TSR 成因的同位素证据. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35(11): 1037—1046
- 31 Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. Discussion on origins of the high-H₂S-bearing natural gas in China. Acta Geol Sin, 2005, 79(5): 697—708
- 32 Zhang Shuichang, Zhu Guangyou, Dai Jinxing, et al. TSR and sour gas accumulation: A case study in the Sichuan Basin, SW China. Geochem Cosmochim Acta, 2005, 69(10): A562—A562
- 33 朱光有, 张水昌, 梁英波. 川东北飞仙关组 H₂S 的分布与古环境的关系. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 65—69
- 34 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. TSR(H₂S)对石油天然气工业的积极性研究. 地学前缘, 2006, 13(3): 141—149
- 35 Dahl J E, Moldovan J M, Peters K E, et al. Diamondoid hydrocarbons as indicators of natural oil cracking. Nature, 1999, 399(6731): 54—57
- 36 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. TSR & H₂S 对深部碳酸盐岩储层的溶蚀改造作用——四川盆地深部碳酸盐岩优质储层形成的重要方式. 岩石学报, 2006, 22(8): 1814—1826
- 37 马永生, 郭旭升, 郭彤楼, 等. 四川盆地普光大型气田的发现与勘探启示. 地质论评, 2005, 51(4): 477—480
- 38 Zhao W Z, Luo P, Chen G S, et al. Origin and reservoir rock characteristics of dolostones on the early Triassic Feixiangan Formation, NE Sichuan Basin, China: Significance for future gas exploration. J Petrol Geol, 2005, 28(1): 83—100
- 39 张斌, 赵喆, 张水昌, 等. 塔里木盆地和四川盆地海相烃源岩成烃演化模式探讨. 科学通报, 2007, 52(增刊): 108—114
- 40 Zhang S C, Hanson A D, Moldovan J M, et al. Paleozoic oil-source rock correlations in the Tarim basin, NW China. Org Geochem, 2000, 31(4): 273—286
- 41 张水昌, 梁狄刚, 黎茂稳, 等. 分子化石与塔里木盆地油源对比. 科学通报, 2002, 47(增刊): 16—23
- 42 王庭斌. 中国大中型气田分布的地质特征及主控因素. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 1—8
- 43 徐国盛, 赵异华. 川东开江古隆起区石炭系气藏成藏机理剖析. 石油实验地质, 2003, 25(2): 158—164
- 44 张水昌, 王招明. 塔里木盆地塔东 2 油藏形成历史——原油稳定性与裂解作用实例研究. 石油勘探与开发, 2004, 31(6): 25—31