

中国海相储层分布特征与形成主控因素

朱如凯 郭宏莉 高志勇 王雪松 张兴阳

(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: zrk@petrochina.com.cn)

摘要 中国海相储层分布广泛, 时代从前寒武系到中生界, 其中主要是古生界, 特别是下古生界, 主要包括碎屑岩和碳酸盐岩两类储层; 在平面上主要分布在中西部的塔里木、四川和鄂尔多斯盆地. 海相碎屑岩储层主要发育于海滩前滨-临滨、潮汐砂坝、潮汐水道、砂坪、三角洲分流河道、河口坝以及浅海陆棚等环境; 储层发育的沉积环境对储层性质具有极其重要的控制作用; 压实作用和压溶作用、胶结作用是减少孔隙的重要因素; 低地温场地质背景、早期油气充注、溶蚀作用对储层孔隙保存非常有利. 海相碳酸盐岩储层分为礁-滩型储层、岩溶型储层、白云岩储层、裂缝型储层四类; 白云石化作用、溶蚀作用、硫酸盐热化学还原反应作用、构造破裂作用是控制碳酸盐岩储层质量的重要因素.

关键词 海相 碳酸盐岩储层 碎屑岩储层 成因机理

中国海相储层分布广泛, 时代从前寒武系到中生界都有分布, 主要包括碎屑岩和碳酸盐岩两类储层, 同时也发育海相火山岩、火山碎屑岩储层. 与国外古生界海相储层比较, 中国海相储层具以下几个显著特征: (1) 下古生界以碳酸盐岩岩溶储层为主; (2) 上古生界以孔隙性碎屑岩及碳酸盐岩储层为主; (3) 碳酸盐岩储层类型多, 非均质性强, 埋深大; (4) 非常规储层占重要比例和礁储层不发育^[1].

据 C&C 公司统计, 在世界范围内, 碳酸盐岩中的油气储量约占油气总储量的 38%, 大油气田中海相碳酸盐岩所占的油气储量约为 60%, 海相碳酸盐岩是一个重要的勘探领域^[2]. 自 20 世纪 90 年代初以来, 中国海相油气勘探日益成为各大石油公司和学者关注的热点, 并取得了许多重大突破; 如轮南-塔河奥陶系油田、普光三叠系飞仙关组气田、塔中奥陶系油气田、鄂尔多斯中央气田等碳酸盐岩大油气田及国内第一个亿吨级海相碎屑岩大油田——哈得逊油田的发现, 但总体探明程度仍然很低; 这与中国海相油气地质的复杂性有密切关系. 要尽快实现海相油气探明储量的快速增长, 缓解国内油气供需矛盾, 必须加强海相油气富集与分布规律的理论研究和勘探技术攻关, 其中有效烃源岩、储层及保存条件评价是基础^[1,2].

针对海相储层分布与形成机理问题, 国内外学者从不同方面、不同地区已做过多方面的研究和探讨. 对于海相碎屑岩储层, Surdan 等人^[3,4]在 20 世纪 80 年

代就从有机-无机相互作用的角度研究了储层成岩作用和次生孔隙的形成与演化关系; 不同学者也相继探讨了海相碎屑岩优质储层形成的主控因素, 包括: 沉积环境、地温场、早期油气充注、绿泥石包膜、微晶石英包膜、异常高压和次生孔隙发育等^[5~13]. 海相碳酸盐岩储层形成的主控因素主要有: 有利的沉积相带、白云石化作用、不同期次溶蚀作用、构造破裂作用、硫酸盐热化学还原反应作用、烃类的早期注入等^[14~21].

本文主要讨论中国海相碎屑岩和碳酸盐岩储层发育的主要控制因素, 为中国海相油气勘探提供重要的基础地质资料.

1 海相碎屑岩储层分布与形成主控因素

1.1 中国海相碎屑岩储层分布特征

中国海相碎屑岩储层主要发育于海滩前滨-临滨、浅海砂坝、陆棚砂、潮汐砂坝、潮汐水道、砂坪、三角洲分流河道、河口坝等环境. 滨岸-浅海陆棚环境储层主要发育于塔里木盆地志留系下统柯坪塔格组、上泥盆统一下石炭统东河砂岩段、石炭系中泥岩段、四川盆地志留系、华北地台区的石炭系. 潮坪环境储层主要分布于塔里木盆地的志留系、石炭系砂泥岩段、华北地台区及河西走廊地区的石炭系. 三角洲储层主要发育于华北地台区-河西走廊地区的石炭-二叠系、塔里木盆地的石炭系砂泥岩段、志留系及四川盆地的志留系(表 1)^[22~26].

表 1 中国海相碎屑岩储层基本特征对比表

砂体类型	滨岸-浅海陆棚体系			三角洲体系	
	海滩砂体	潮坪砂体	陆棚砂体	辫状河三角洲砂体	浅水三角洲砂体
砂岩结构	干净、分选好，细砂	干净、分选好，极细砂	分选好，细砂、粉砂	中、粗砂，含砾	中、粗砂，滞留沉积常见
粒序结构	反粒序	正粒序	复合粒序	正、反粒序	正、反粒序
沉积构造	冲洗层理，平行至微斜纹层和波纹层理，虫孔少见	小-中型高角度交错层理，部分反向交错层理，虫孔少见	低角度斜层理、交错层理	底部冲刷，大型槽状交错层理、平行层理及沙纹层理	板状和槽状交错层理、平行层理常见
粒度特征	中、细粒 $\sigma < 0.7$	细粒、粉砂 $0.8 < \sigma < 1.4$	中细粒、粉砂 $0.5 < \sigma < 0.8$	中、粗粒	中、粗粒
测井相	曲线较光滑，漏斗型	曲线齿化明显，钟型为主	曲线较光滑，弓形、漏斗型	箱形、钟型、漏斗型	钟型、漏斗型
相序特征	以典型的前滨带冲洗层理为特征	以典型的潮间带潮汐层理组合为特征	以与典型的陆棚泥共生为特征	砂体底部较平整，砂层厚度大，大型槽状交错层理发育	常与煤、灰岩共生
砂体走向及分布	与沉积走向平行的建造	与沉积走向近垂直的延长的限制带	与沉积走向平行或斜交	与沉积走向近平行，前缘砂坝近垂直	与沉积走向近平行，前缘砂坝近垂直
岩石类型	中、细粒砂岩，以岩屑质石英砂岩和石英砂岩为主	粉砂、细粒岩屑砂岩	细粒石英砂岩、次长石岩屑砂岩和细粒岩屑砂岩	中细粒、中粗粒岩屑砂岩	含砾粗-中石英砂岩、中-粗粒石英砂岩、岩屑砂岩、细中粒岩屑石英砂岩
储集空间	(残余)原生粒间孔、粒间溶孔、粒内溶孔、超大孔隙、基质内孔隙	次生-原生孔隙型，原生-次生孔隙型，微孔隙型	剩余原生粒间孔，粒间溶孔，粒内溶孔	剩余原生粒间孔、颗粒溶孔、粒间溶孔、微孔隙等	(残余)粒间孔、超大孔隙、粒内溶孔、微孔及溶孔
储集性	平均 ϕ : 3.42%~17%, 平均 K: $(0.403\sim 385.6)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$	ϕ : 1.09%~11.55%/4.27% K: $(0.05\sim 87.293)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$	ϕ : 3.05%~19.9%/12.05% K: $(0.10\sim 29.5/5.36)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$	ϕ : 3.76%~14.53%/7.83% K: $(0.03\sim 21.4)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$	平均 ϕ : 9.1%~10.2% 平均 K: $(0.48\sim 1.02)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$
分布	塔里木盆地泥盆-石炭系东河砂岩，塔北志留系柯坪塔格组	塔里木盆地志留系塔塔格组	塔里木盆地志留系柯坪塔格组中下段	塔里木盆地塔东志留系	鄂尔多斯盆地 C—P

1.2 海相碎屑岩储层形成主控因素

影响海相碎屑岩储层储集性的因素主要有沉积环境、成岩作用等，但在具体的某一地区，往往是沉积相或成岩作用的某一个或几个因素起主要作用(图 1)。

沉积相所控制的储层的碎屑组分、粒级、分选性和泥质杂基含量等对储层质量具有极重要的控制作用。如塔中志留系海滩砂体、浅海砂坝砂体和陆棚砂体孔渗性优于潮下带砂体(图 2)^[10,23]。

同时压实作用和压溶作用、胶结作用对储层有重要影响，根据对塔里木盆地东河砂岩压实率的统计，总体看压实程度较弱，如东河塘地区东河砂岩压实作用为中—强，碳酸盐胶结物与压实损孔之和一般为 26%左右，东河砂岩埋深 5600 m 左右时，因压实而损失的孔隙度为 15%~22%，埋深大于 6000 m 时，损失孔隙度为 20%~25%。塔中地区东河砂岩段埋深 3500~3700 m 时，因压实而损失的孔隙度为 13%~26%，与东河塘地区埋深 5600 m 时压实强度相当，说明在相同条件下东河塘地区压实程度远远弱于塔中

地区，这可能与该地区在二叠纪—三叠纪末一直处于剥蚀浅埋藏和早期碳酸盐胶结作用有关。溶蚀作用是塔里木盆地东河砂岩优质储层形成的关键因素，与油气进入时酸性成岩流体对碳酸盐胶结物溶解、迁移和重新分配有关，被溶蚀的物质主要有不稳定颗粒(如长石、岩屑等)、碳酸盐胶结物(方解石、含铁方解石)、石盐和石膏等。早成岩阶段碳酸盐胶结物溶蚀量可达 15%，甚至可以达到 20%，而对储层影响最大的晚期溶蚀增孔量为 2%^[9,12]；但朱筱敏等人^[22]认为碳酸盐胶结物溶蚀对储集空间的贡献甚微。

其他如油气的早期充注、古地温等对成岩演化及储层孔隙保存均有重要的影响^[11]。如塔里木盆地(台盆区)进入晚古生代后成为一个“冷盆”，地温梯度很低，在塔中隆起区地温梯度平均约为 2.16 /100m。如志留系储层目前埋深 4000~5000 m，但其经受的最高古地温仅约 105~120 ，这种低地温场背景导致目前志留系储层尚处于中成岩期 A2 亚期，这对志留系储层孔隙的保存无疑非常有利^[10, 25]。

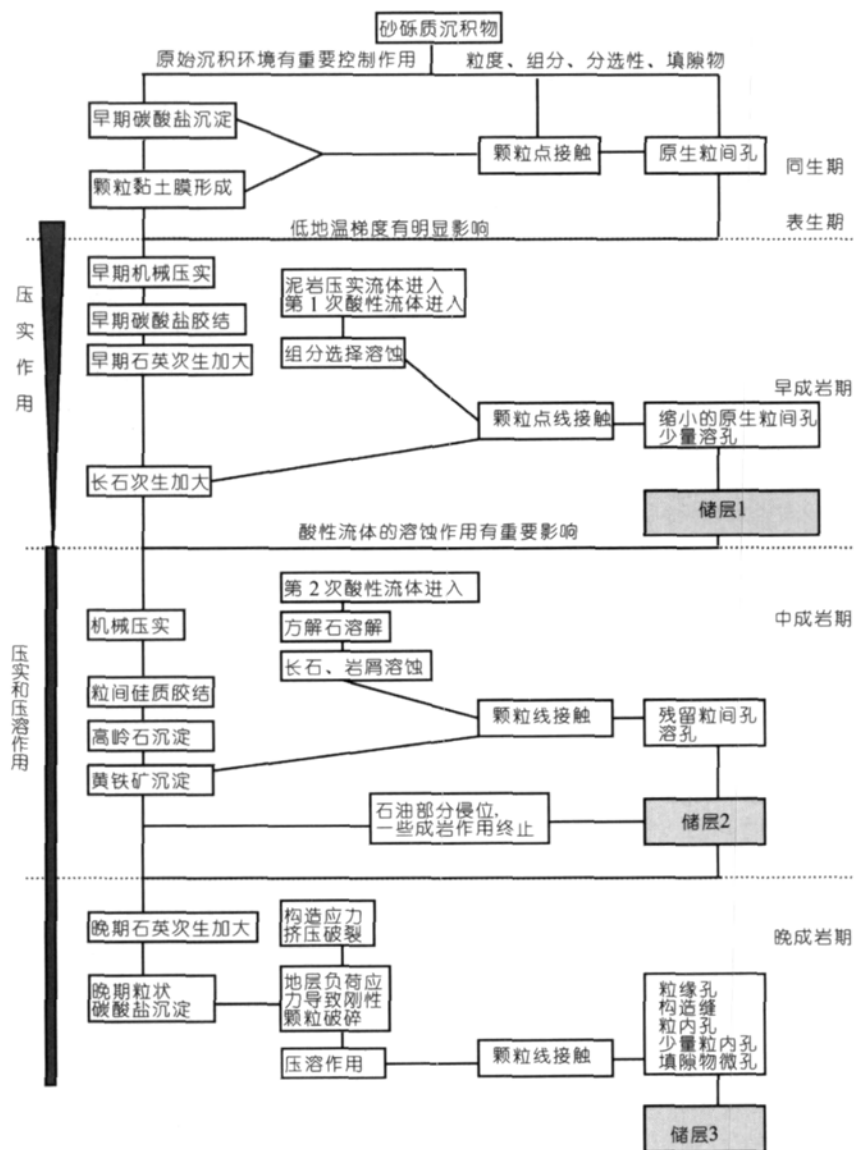


图 1 海相碎屑岩储层成岩演化与孔隙演化成因模式

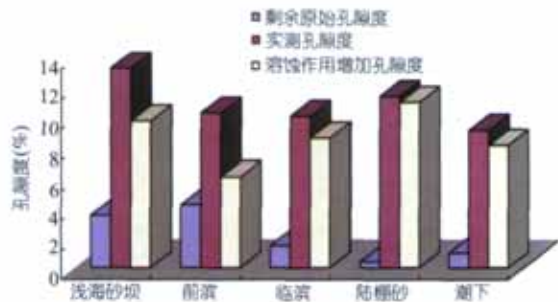


图2 不同沉积微相砂岩中剩余原始孔隙度与溶解作用增加的孔隙度

2 海相碳酸盐岩储层分布特征与形成主控因素

2.1 中国海相碳酸盐岩储层分布特征

碳酸盐岩储层相对碎屑岩储层具有更大的差异性、复杂性和多样化等特点。中国碳酸盐岩储层的年代比较老,地质历史复杂,在其形成及演化过程中,盆地的区域构造背景无疑是控制碳酸盐岩储集体类型及储层演化的最根本因素,但在特定条件下,在一定的成岩演化阶段,不同储层的孔隙演化特征不同^[14-21,27-30]。作者根据碳酸盐岩储层发育的沉积相

带、成岩作用及岩性组成, 将中国海相碳酸盐岩储层分为礁-滩型储层、岩溶型储层、白云岩储层、裂缝型储层四类(表 2)。中国海相生物礁储层在四川盆地上二叠统长兴组发育最为典型, 是重要的天然气产层^[30]; 鲕滩储层以四川盆地川东三叠系飞仙关鲕滩储层最为典型^[16~18,29]; 生屑滩、砂屑滩储层以塔里木盆地石炭系生屑灰岩段发育较为典型; 礁-滩复合体储层以塔里木盆地塔中地区中、上奥陶统最为典型。岩溶型储层以塔里木盆地轮南-塔河油田的寒武-奥陶系、四川盆地的震旦-古生界及鄂尔多斯盆地的奥陶系、渤海湾盆地的震旦-奥陶系较为典型^[15,27~28]。白云岩储层分布广泛, 如四川盆地的震旦系-寒武系、中和下三叠统雷口坡组及嘉陵江组, 塔里木盆地的震旦-奥陶系, 鄂尔多斯盆地奥陶系、渤海湾盆地的震旦系等。裂缝型储层分布于各盆地中, 如四川盆地的下三叠统飞仙关组、二叠系、石炭系及塔里木盆地轮南-塔河油田的奥陶系。

2.2 海相碳酸盐岩储层形成主控因素

碳酸盐岩储集性的控制因素很多, 作为其物质基础的岩石类型或沉积相以及时间是基本的控制因素; 白云石化作用、溶蚀作用对碳酸盐岩储层来说, 是尤为重要的控制因素, 而对古生代多旋回盆地的碳酸盐岩储层而言, 溶蚀作用和构造破裂作用显得尤为重要(图 3)。

首先沉积相带为储集空间的形成提供了岩性基础, 沉积相控制岩石的结构和岩性, 从而控制岩石原

生孔的发育程度, 并在很大程度上影响溶蚀孔隙的发育, 虽然储层孔隙主要为次生溶蚀孔隙, 但原生孔隙的存在是溶蚀作用发生的必要条件。从川东北地区二叠纪长兴期生物礁储层的储集性分析情况看, 以台地边缘礁滩相礁白云岩和颗粒白云岩储集性最好^[30]。

胶结、压实作用是碳酸盐岩储层减孔的最主要因素, 胶结作用发生于海底成岩作用环境、大气淡水成岩作用环境及埋藏成岩作用环境, 而压实作用主要发生于埋藏成岩作用环境, 可以分为机械压实和化学压实, 对于碳酸盐岩储层而言, 它们均是破坏性成岩作用, 减少孔隙度, 降低渗透率^[17,18,20,21,28]。

白云石化作用是改善储层质量的重要因素, 从四川盆地川东北飞仙关组鲕滩气藏储层岩性特征看, 具有一定规模的大中型气藏储层皆为白云岩。白云石化形成大量晶间孔, 最发育的时候晶间孔的孔隙度可达到 10%以上, 但随着后来白云石自形边的增厚, 晶间孔逐渐缩小, 有的甚至完全消失成为嵌晶白云岩^[17,18,20,21,29,30]。溶蚀作用是优质储层形成的根本原因, 碳酸盐沉积物的溶解作用可发生于沉积物埋藏历史的任一阶段, 溶蚀事件通常会增加孔隙空间; 相应地古岩溶的类型可归纳为表生成岩期古岩溶和

表 2 中国海相碳酸盐岩储层特征及成因类型综合表^{a)}

成因特征			礁、滩型储层	岩溶型储层	白云岩储层	裂缝型储层
地质环境			沉积环境、热演化、溶蚀作用	多期构造运动、沉积间断、表生成岩作用	沉积环境、热演化、溶蚀作用	局部构造破裂、埋藏成岩作用
主要岩性			生物碎屑灰(云)岩、礁灰(云)岩、鲕粒灰(云)岩	各种灰岩、白云岩	白云岩、粒屑云岩、藻云岩	各种灰岩、白云岩
主要沉积相			礁、滩相	各种环境	潮坪、局限、蒸发台地	各种环境
储集空间			孔隙型	裂缝-孔隙型、孔隙-裂缝型	孔隙型	裂缝-溶孔型
储集空间组合			粒间孔-粒间溶孔(洞)	溶孔-溶洞-裂缝组合	晶间孔-晶间溶孔组合	缝合线-微孔-裂缝组合
裂缝意义			不起控制作用	裂缝的作用主要是沟通孔洞, 决定产能		裂缝不仅是渗滤通道, 也是储集空间
孔隙演化	成岩	准同生	+	+	+	-
	早期	浅埋	+	+	+	-
	晚期	深埋	+	或 /	+	+
	表生期		+	或 /	+	+
主要成岩作用			压实作用、胶结作用、白云石化作用、溶解作用	多期淋滤、溶解作用	早期白云石化作用、溶解作用	构造破裂作用、晚期溶解作用
典型实例			塔中 O ₂₊₃ 、四川 T ₁ f	轮南-塔河 O、鄂尔多斯 O、华北 Z-O	四川 C, T ₁ j	四川 T ₁ j, C, P

a) + +: 代表强烈作用; +: 代表作用中等; /: 代表作用较弱; -: 代表不作用

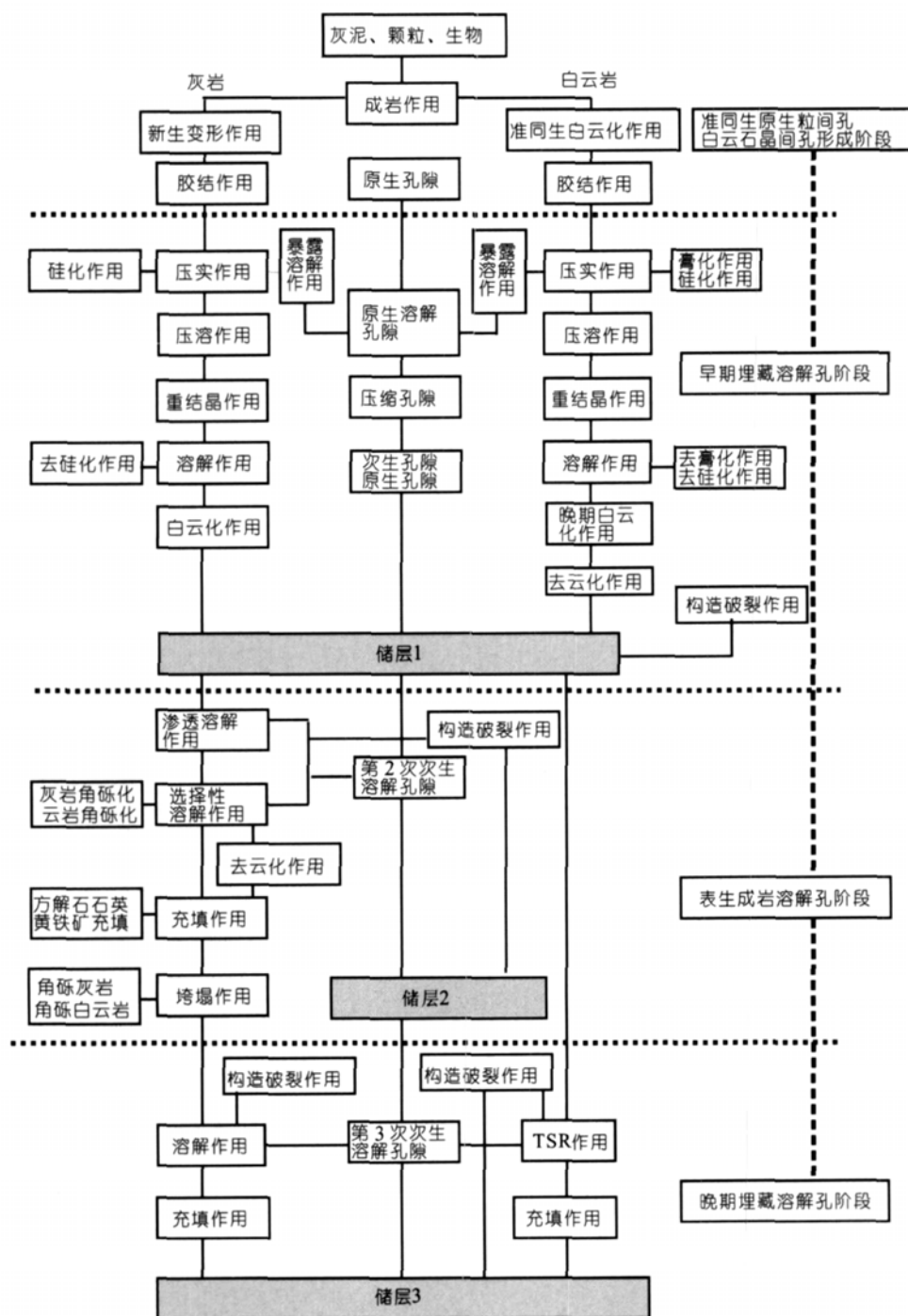


图3 海相碳酸盐岩储层成岩演化与孔隙演化成因模式

埋藏成岩期古岩溶两大类；表生成岩期古岩溶可进一步划分为同生期层间岩溶和暴露期风化壳岩溶，埋藏成岩期古岩溶可进一步划分为中-深埋藏期压释水岩溶和深埋藏期热水岩溶^[27]。埋藏溶蚀作用主要是与有机质成岩作用、盆地深部流体活动以及硫酸盐生物和/或热化学还原作用演化相联系的溶蚀作用现

象及过程。如在川东北飞仙关组储层中明显见到石膏、硬石膏结核部分被方解石交代与硫磺共生的现象，且石膏、硬石膏结核已完全被方解石交代；也有一些是仅外层被交代而结核内部仍然为石膏、硬石膏，表明确实发生过硫酸盐的还原过程^[16]，孔隙率一般可达5%~15%，局部可达25%。

3 结论

() 中国海相储层分布广泛, 下古生界主要发育碳酸盐岩储层, 上古生界以碎屑岩和碳酸盐岩储层共同发育为特征。

() 建立了中国海相碎屑岩储层成因模式, 储层的发育的沉积环境对储层性质具有极重要的控制作用, 压实作用和压溶作用、胶结作用是降低孔隙的重要因素, 低地温场地质背景、早期油气充注、溶蚀作用对储层孔隙保存非常有利。

() 建立了海相碳酸盐岩储层成因模式, 白云石化作用、溶蚀作用、TSR 作用、构造破裂作用是控制碳酸盐岩储层质量的重要因素。

参 考 文 献

- 丘东洲, 汪正江. 中国海相层序油气地质个性与勘探策略. 海相油气地质, 2005, 10(2): 9—16
- 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
- Surdam R C, Boese S W, Crossey L J. The chemistry of secondary porosity. AAPG Memoir, 1984, 37: 127—149
- Surdam R C, Crossey L J, Hagen E S, et al. Organic-inorganic and sandstone diagenesis. AAPG Bull, 1989, 73: 1—23
- Bloch S, Robert H L, Bonnell L. Anomalously high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: Origin and predictability. AAPG Bull, 2002, 86(2): 301—328
- Osborne M J, Swarbrick R E. Diagenesis in North Sea HPHT clastic reservoirs—consequences for porosity and overpressure. Mar Petrol Geol, 1999, 16: 337—353
- Pittman E D, Larese R E, Heald M T. Clay coats: occurrence and relevance to preservation of porosity in sandstones. D W House-knecht, E D Pittman. Origin, diagenesis, and petrophysics of clay minerals in sandstones. SEPM Special Publication, 1992, 47: 24—255
- 周东升, 刘光祥, 叶军, 等. 深部砂岩异常孔隙的保存机制研究. 石油实验地质, 2004, 26(1): 40—47
- 钟大康, 朱筱敏, 周新源, 等. 构造对砂岩孔隙度演化的控制——以塔里木中部地区东河砂岩为例. 地质科学, 2004, 39(2): 214—222
- 张惠良, 王招明, 张荣虎, 等. 塔里木盆地志留系优质储层控制因素与勘探方向选择. 海相油气地质, 2004, 9(1): 21—26
- 蔡春芳, 顾家裕, 蔡洪美. 塔中地区志留系烃类侵位对成岩作用的影响. 沉积学报, 2001, 19(1): 60—64
- 王招明, 王清华, 孙丽霞, 等. 东河砂岩钙结岩作用的主要特征. 地质科学, 2004, 39(4): 517—522
- 赵文智, 汪泽成, 王兆云, 等. 中国高效天然气藏形成的基础理论研究进展与意义. 地学前缘, 2005, 12(4): 499—506
- 赵文智, 汪泽成, 王一刚. 四川盆地东北部飞仙关组高效气藏形成机理. 地质论评, 2006, 52(5): 708—717
- 陈学时, 易万霞, 卢文忠. 中国油气田古岩溶与油气储层. 沉积学报, 2004, 22(2): 244—253
- 朱光有, 张水昌, 梁英波. 四川盆地深部海相优质储层的形成机理及其分布预测. 石油勘探与开发, 2006, 33(2): 161—167
- 苏立萍, 罗平, 胡社荣, 等. 川东北罗家寨气田下三叠统飞仙关组鲕粒滩成岩作用. 古地理学报, 2004, 6(2): 182—190
- 魏国齐, 杨威, 张林, 等. 川东北飞仙关组鲕粒滩白云石化成因模式. 天然气地球科学, 2005, 16(2): 162—167
- 朱莲芳. 中国天然气碳酸盐岩储层形成的成岩模式. 沉积学报, 1995, 13(2): 140—149
- Budd D A. Compaction, cementation, and permeability loss with depth in carbonate rocks. Annual AAPG-SEPM ConV, 2000, 4: 16—19
- Moore C H. Carbonate diagenesis and porosity. Amsterdam: Elsevier Science Publisher B.V. 1989
- 朱筱敏, 张强, 赵澄林, 等. 塔里木中部地区东河砂岩段沉积特征和沉积环境演变. 地质科学, 2004, 39(1): 27—35
- 朱如凯, 郭宏莉, 何东博, 等. 塔中地区志留系柯坪塔格组砂体类型及储集性. 石油勘探与开发, 2005, 32(5): 16—19
- 朱如凯, 邓兴梁, 张运东. 塔里木盆地巴楚-麦盖提地区石炭系碎屑岩储层评价. 新疆石油地质, 1999, 20(3): 258—274
- 郑秀娟, 于兴河, 赵德力, 等. 孔雀河斜坡志留系沉积特征及油气分布规律. 天然气工业, 2005, 25(2): 28—29
- 陈孟晋, 刘锐娥, 孙粉锦, 等. 鄂尔多斯盆地西北部上古生界碎屑岩储层的孔隙结构特征初探. 沉积学报, 2002, 20(4): 639—650
- 侯方浩, 方少仙, 沈昭国, 等. 白云岩体表生成岩裸露期古风化壳岩岩的规模. 海相油气地质, 2005, 10(1): 19—30
- 阎相宾. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层特征. 石油与天然气地质, 2002, 23(3): 43—49
- 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
- 马永生, 牟传龙, 郭旭升, 等. 四川盆地东北部部长期沉积特征与沉积格局. 地质论评, 2006, 52(1): 25—29