

文章编号: 0253-9985(2005)04-0518-06

流花 11-1 油田礁灰岩油藏沉积-成岩演化模式

岳大力¹, 吴胜和¹, 林承焰², 王庆如³, 衡立群³, 李 燕⁴

(1. 中国石油大学资源与信息学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学资源与信息学院, 山东东营 257061;

3. 中国海洋石油总公司南海东部研究院, 广东广州 510240; 4. 中国海洋石油总公司研究中心, 北京 100027)

摘要: 南海流花 11-1 油田发育生物礁、生物滩两种沉积相类型, 并可细分为珊瑚藻礁、珊瑚礁、珊瑚藻-珊瑚礁、有孔虫滩、生物碎屑滩及珊瑚藻屑-有孔虫滩 6 种沉积微相。岩心观察及薄片鉴定结果表明, 生物礁体在海底成岩环境、大气淡水成岩环境及区域地下水-埋藏成岩环境中发生的成岩作用包括粘结、溶解、胶结、压实-压溶、重结晶、白云化及“白堊化”作用等。结合沉积相分析结果及成岩作用各个阶段对储集性能的影响, 将礁灰岩油藏沉积-成岩演化过程划分为 8 个时期: iv 期成礁、早期暴露-溶蚀、③期成礁、中期暴露-溶蚀、早期成藏、晚期溶蚀、晚期成藏及区域地下水溶蚀。这种特有的演化模式形成了垂向上的 8 层储层结构, 即 4 个高孔渗段和 4 个中-低孔渗段间互沉积, 4 个中-低孔渗段 A、B₂、C 及 E 段以胶结作用为主, 岩性相对致密, 隔夹层广泛发育; 生物礁体暴露过程中, 处于渗流环境的 B₁、B₃ 及 D 段由于溶蚀作用形成高孔渗段, 区域地下水进一步溶蚀和“漂洗”形成的高孔渗段 F 段为水层。

关键词: 演化模式; 生物礁; 储集层; 成岩作用; 沉积微相; 流花 11-1 油田

中图分类号: TE112.3 **文献标识码:** A

Sedimentary and diagenetic evolution pattern of reef limestone reservoirs in Lihua 11-1 oilfield

Yue Dali¹, Wu Shenghe¹, Lin Chengyan², Wang Qingru³, Heng Liqun³, Li Yan⁴

(1. China University of Petroleum, Beijing; 2. China University of Petroleum, Dongying, Shandong;

3. Research Institute of Eastern South China Sea, CNOOC, Guangzhou, Guangdong; 4. Research Center of CNOOC, Beijing)

Abstract Two types of sedimentary facies (bioherm and organic bank) are developed in Lihua 11-1 oilfield. They can be subdivided into 6 microfacies including corallgal reef, coral reef, corallgal-coral reef, foraminiferal bank, bioclastic bank and corallgal debris-foraminiferal bank. Core observation and thin section analysis indicate that the diagenesis of reef complex in sea floor diagenetic environment, fresh water diagenetic environment and regional underground water-buried diagenetic environment include cohesion, dissolution, cementation, compaction-pressure solution, recrystallization, dolomitization and “chalkification”, etc. Based on the results of sedimentary facies analysis and the effects of various stages of diagenesis on poroperm characteristics of reservoirs, the sedimentary-diagenetic evolution of reef limestone reservoirs are divided into 8 periods, i.e. the early reef formation, early exposure-dissolution, late reef formation, middle exposure-dissolution, early reservoiring, late dissolution, late reservoiring and regional groundwater dissolution periods. This unique evolution pattern constitutes vertically 8-layer reservoir architecture, including the alternating of 4 high porous and permeable layers and 4 medium-low porous and permeable layers. Cementation is considered a major diagenetic factor in the 4 medium-low porous and permeable layers, namely layers A, B₂, C and E, which are relatively tight and have widely developed intercalations. The layers B₁, B₃ and D, being in percolation environment, have been turned into high porous and permeable layers through dissolution, while the high porous and permeable layer F formed

基金项目: 中国海洋石油总公司重点科技攻关项目 (SW-2001-002)

第一作者简介: 岳大力, 男, 31 岁, 博士生, 矿物学、岩石学和矿床学

收稿日期: 2005-07-19

by further dissolution of regional groundwater is an aquifer

Key words sedimentary microfacies; diagenesis; evolution pattern; reef reservoir; Lihua 11-1 oilfield

流花 11-1 油田位于中国南海北部海域,所在海域水深约 200~380 m,是中国海洋石油总公司和美国 AMOCO 东方石油公司合作勘探开发的一个大型生物礁油田,由流花 11-1、流花 4-1 和流花 11-1 东 3 个油藏组成。其中流花 11-1 油藏是该油田的主力油藏,也是唯一投入开发的油藏。油藏具有统一的油水界面,属底水驱动的块状油藏。

流花 11-1 油藏的储层为新近系中新统珠江组灰岩,埋深 1 162.5~1 247 m,由一套以溶蚀为主,经深度成岩作用改造的生物礁、滩组成。岩心平均孔隙度为 21.3%,平均渗透率为 $651 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙类型以次生孔隙为主,并发育部分微裂缝和溶洞。纵向上由上向下可划分为 A、B₁、B₂、B₃、C、D、E 和 F 8 个岩性段,其中 B₁、B₃ 和 D 段储层孔隙发育,物性较好,多为Ⅰ类和Ⅱ类储层;A、B₂、C 和 E 4 段储层岩性相对致密,但微裂缝较发育,多为Ⅲ类和Ⅳ类储层;F 段大多为水层^[1]。

流花 11-1 礁体在纵向上具有礁、滩间互的沉积特点,生物礁体在成岩过程中经历了多种成岩环境,如海底成岩环境、大气淡水成岩环境及区域地下水-埋藏成岩环境等^[2~7]。这种特有的沉积-成岩演化模式决定了油藏独有的垂向非均质特征,形成了明显的 4 个高孔渗段和 4 个中-低孔渗段间互沉积的储层结构。

1 沉积相

1.1 生物组合

礁体生物种类多,主要造礁生物是珊瑚藻,其生长形态多样。在礁体下部,分枝状、皮壳状和结核状珊瑚藻均发育,而在礁体上部,以结核状珊瑚藻为主。另外也存在珊瑚、海绵和苔藓虫等造礁生物,但含量较少。附礁生物以有孔虫为主,其含量仅次于珊瑚藻,局部地区有孔虫富集成层,有孔虫均为大型底栖型。此外还有棘皮、绿藻、腕足及腹足类等,但含量都很少,多以碎屑形式出现*。

1.2 沉积微相

在充分了解区域地质背景的基础上,综合应用岩性、沉积特征、储层物性特征、镜下特征、古生物、

岩石结构、电性特征以及地震响应等方面的资料对 3 口取心井进行了单井相分析,划分出生物礁相和生物滩相。根据生物及其碎屑含量将生物礁相进一步细分为珊瑚藻礁、珊瑚礁、珊瑚藻-珊瑚礁微相。生物滩相细分为有孔虫滩、生物碎屑滩及珊瑚藻屑-有孔虫滩微相。取心井纵向上具有非常相似的沉积旋回性,即礁、滩间互沉积(图 1)。

1.2.1 珊瑚礁微相

珊瑚礁微相主要发育珊瑚粘结岩、泥粒岩,珊瑚含量较多,一般大于 50%。珊瑚保存较完整,多被泥晶充填,局部被珊瑚藻缠绕,其他生物碎屑较少,仅见一些零星分布的细粉晶大小的生物屑。溶解作用发育,主要形成粒内溶孔。

1.2.2 珊瑚藻礁微相

珊瑚藻礁微相主要由红藻石粘结岩及泥粒岩、珊瑚藻粘结岩组成,珊瑚藻含量一般大于 50%,大多呈缠绕状,也见碎屑状和枝架状,有孔虫分布于藻团和藻屑之间,以底栖型为主,偶见浮游型。孔隙类型以藻架溶孔和粒间溶孔为主,藻架溶孔连通性较差,藻间有少量缝合线分布。

1.2.3 珊瑚藻-珊瑚礁微相

珊瑚藻-珊瑚礁微相是介于珊瑚礁和珊瑚藻礁之间的微相类型,发育珊瑚藻粘结岩、泥粒岩及珊瑚粘结岩、泥粒岩,珊瑚和珊瑚藻的含量均大于 20%。

1.2.4 珊瑚藻屑-有孔虫滩微相

有孔虫和珊瑚藻屑均呈碎屑状,两者含量均大于 20%。有孔虫为底栖型,棘皮多具次生加大边,溶解作用强烈,溶孔以粒间溶孔、基质溶孔、绿藻溶孔居多。

1.2.5 有孔虫滩微相

有孔虫滩微相由有孔虫泥粒、粒泥岩组成,有孔虫大多为底栖型,含量大于 30%。珊瑚藻为碎屑状,含量小于 10%。其他生物也均为碎屑状,胶结物含量较少,仅见纤维状和微粒状环边胶结。孔隙类型以粒间溶孔和有孔虫房室溶孔为主,见少量微裂缝。

* 中国海洋石油南海东部公司. 流花 11-1 礁(滩)型大油田地质规律与勘探经验. 1994

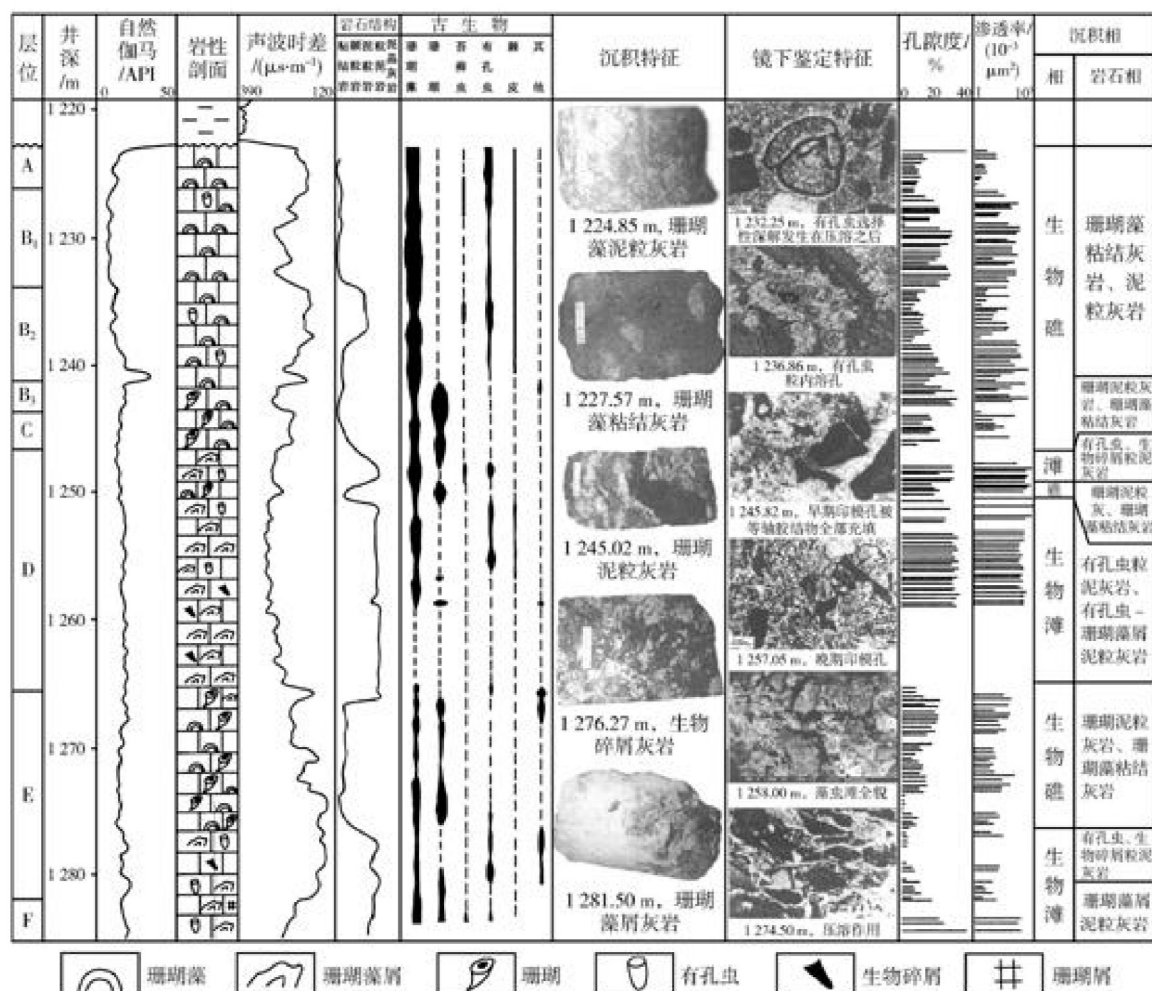


图 1 流花 11-13 井单井相分析图

Fig. 1 Single well facies analysis of LH 11-13 well

1.2.6 生物碎屑滩微相

生物碎屑滩微相由生物碎屑泥粒、粒泥岩组成,以碎屑状为主,极少数为皮壳状和支架状,有孔虫和珊瑚藻含量居多,棘皮具次生加大边,填隙物为泥晶基质,含极少量亮晶方解石胶结物,基质重结晶现象较为普遍。主要发育铸模孔、粒内溶孔和粒间溶孔,发育少量裂缝,粒间溶孔内径以 0.1~0.6 mm 居多,最大可达 2 mm。

2 成岩作用

2.1 粘结

粘结作用系指造礁珊瑚或珊瑚藻等底栖、固着生长的生物以其基部粘附、固着或包覆于硬底之上,以保持其稳定的抗浪生长状态的作用^[8]。造礁生物不断发育壮大,破碎的骨骼和介壳等碎屑汇集堆积于其间,并相互粘结形成珊瑚礁、珊瑚藻礁及珊瑚藻-珊瑚礁。由于它们所处的周围环

境基本相同,因而是一种典型的同生成岩作用。

2.2 溶蚀

早期大气淡水溶蚀作用。碳氧同位素分析结果表明,油藏存在一个稳定的同位素异常带,即碳氧同位素明显为负值, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-70\text{‰} \sim -40\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-60\text{‰} \sim -30\text{‰}$ (图 2), 表明在 B_2 和 B_3 段之间生物礁体有一次区域性暴露。原因是大气淡水的选择性淋滤及淡水成因的方解石充填使岩石的氧同位素降低,礁体暴露时间长,导致 CaCO_3 土壤化, HCO_3^- 和土壤有机质氧化生成 CO_2 渗入到方解石中,使碳同位素降低^{*}。这种含 CO_2 的大气水引起的溶蚀作用常形成溶孔、溶缝 (图 3A)、铸模孔及粒内溶孔。

中期 (海水溶蚀作用) 以选择性溶蚀为主,溶蚀作用不如淡水强烈,主要对某些文石颗粒溶解而形成中期铸模孔^[9~12] (图 3B)。

* 李希宗. 东沙隆起早、中新世氧碳同位素与古环境. 1989

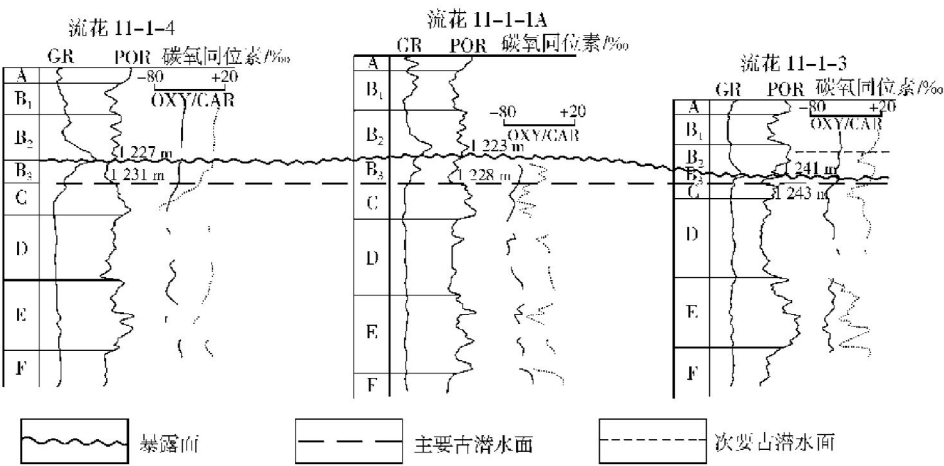


图 2 与礁体暴露有关的特征对比剖面图*

Fig. 2 Correlation profiles of exposure characteristics of reef

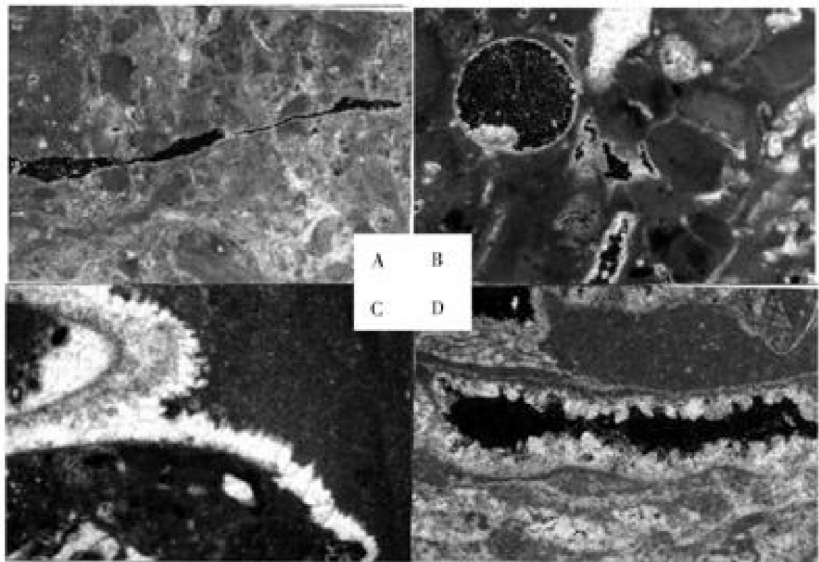


图 3 流花 11-1 油田成岩作用图版

Fig. 3 Chart board showing diagenesis in IH 11-1 oilfield

A—流花 11-1-1A, 深度 1 230. 72 m, 正交光 10×10 溶缝; B—流花 11-1-3 深度 1 241. 34 m, 正交光 10×10 铸模孔; C—流花 11-1-4 深度 1 249. 64 m, 正交光 10×10 世代胶结; D—流花 11-1-1A, 深度 1 237. 22 m, 正交光 10×10 多世代胶结

晚期 (有淡水渗入的区域地下水溶蚀作用) 溶蚀作用普遍强烈, 属非选择性溶解, 溶解的物质既有颗粒, 又有胶结物和基质, 从而形成非选择性溶孔、溶缝, 并在一定程度上改造了缝合线和裂缝。

2.3 胶结

研究区胶结作用以大气水潜流胶结及深埋胶结为主, 胶结作用世代清楚, 胶结物成分主要为亮晶方解石, 含量一般从微量到 5%。对相对致密层 A, B₂, C 和 E 4 个岩性段的物性影响较大。据薄片鉴定, 胶结类型主要有 5 种: 1) 颗粒周围等厚环边纤维状或叶片状胶结物 (一代胶结), 为海底

成岩环境特征 (图 3C)。2) 多世代向心变粗, 粒状方解石镶嵌胶结, 胶结物干净明亮 (图 3D), 是大气淡水潜流带特征。3) 次生加大胶结, 即棘皮及有孔虫加大边, 一般形成于大气潜流带成岩环境。4) 颗粒间的连晶胶结, 形成于区域地下水成岩环境。5) 充填型胶结, 充填于构造裂缝、溶洞壁、缝合线缝及非选择性溶孔中的粗大纯净亮晶方解石, 形成于晚期深埋成岩环境。

2.4 其他

压实-压溶作用的表现形式为颗粒的嵌合接触和缝合线。压实-压溶作用致使孔隙减少的现

* 李希宗, 东沙隆起早、中新世氧碳同位素与古环境, 1989

象在礁灰岩中较普遍,但在含有丰富红藻颗粒的层段(流花 11-1 13 井 B_1 段中部),通过颗粒的破碎也可使局部的孔隙增加。

白云化作用较弱,规模小,沿缝合线、缝隙、有孔虫及珊瑚体内有粉晶白云石充填,是淡水和生物作用的结果,对储层物性影响甚微。

重结晶作用亦较弱,主要表现为珊瑚骨骼的重结晶,在生物碎屑灰岩中偶尔也可见到重结晶,并形成一些晶间孔。

另外,在研究区还见“白垩状”灰岩,为油水界面以下水层中一种白色、松软的碳酸盐岩。它形成于高幅度缝合线及油藏形成后的埋藏晚期,是流动的、淡化的区域地下水对礁体的“漂洗”和溶蚀作用而形成的产物。

3 沉积-成岩演化

生物礁的发生、发展、消亡以及它们的最终形态和内部构造,都受区域大地构造、气候条件、海平面变化及自然地理条件等因素的控制^[13]。综合沉积相及成岩作用的研究结果,建立了流花 11-1 油藏的沉积-成岩演化模式,主要分为 8 个时期(图 4)。

3.1 iv 期成礁

这一时期大量的藻类、有孔虫及其他生物碎屑在浅水环境中发育形成生物滩,随环境变迁,珊瑚藻、珊瑚等造礁生物大量生长形成生物礁,从而在垂向上发育了两个由生物滩相到生物礁相的沉积旋回^{*}。

3.2 早期暴露-溶蚀

区域海平面下降,导致礁体大面积、较长时间出露(图 1),经受大气淡水的淋滤和溶蚀,并发生两次海平面波动。古潜水面以下的潜流环境发生胶结为主的成岩作用,形成了 C 段低孔渗层及 E 段不连续的低孔渗层,而处于渗流环境的 B_3 及 D 段由于溶蚀作用形成高孔渗带。

3.3 Ⅲ期成礁

海平面再度上升,礁体继续生长,但沉积环境的变迁导致造礁生物种属和生态发生明显变化,结核状珊瑚藻取代枝状珊瑚藻及珊瑚成为主要造礁生物。

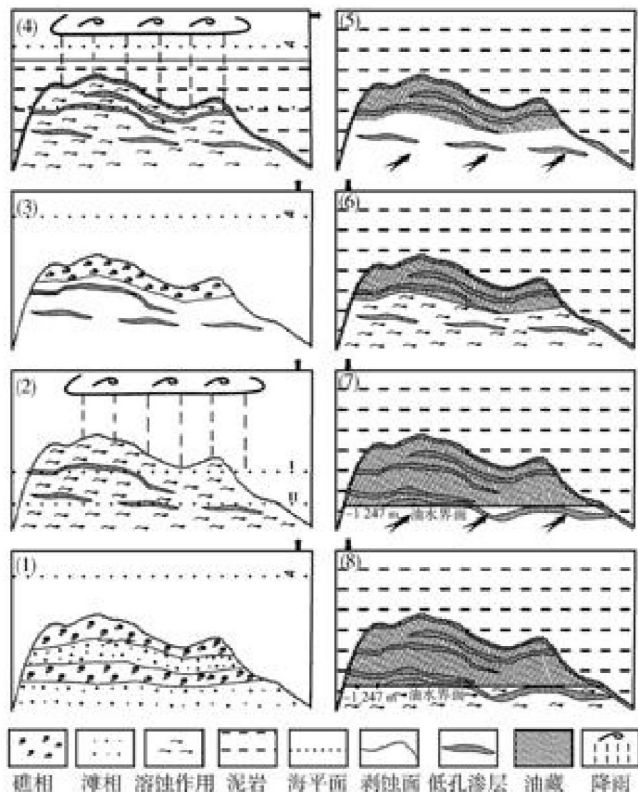


图 4 流花 11-1 油藏沉积-成岩演化模式

Fig. 4 Sedimentary and diagenetic evolution patterns of Lihua 11-1 oil reservoir

3.4 中期暴露-溶蚀

礁体顶面暴露,和第二时期相似,古潜水面下的潜流环境形成了 B_2 段低孔渗层,渗流环境形成 B_1 段高孔渗层。礁体在短暂暴露后,快速下沉,继而接受了上覆陆架泥岩沉积,形成了较好的盖层条件。伴随泥岩沉积压实,泥岩中的“再造水”侵入礁体,导致礁体内部中期溶蚀。同时,上覆层的泥质、海绿石及铁质渗入礁顶,形成了 A 段低孔渗层。

3.5 早期成藏

据流体包裹体分析结果,石蜡/(石蜡+环烷烃)的数值在 C 段上下存在明显的差异(图 5),表明原油不是同一时期进入圈闭^[14]。早期油气进入礁体,由于油源供给程度有限,仅充注 C 段以上,在古油藏油水界面附近胶结作用集中,从而加强了 C 段低孔渗层的形成。

3.6 晚期溶蚀

礁体随地壳下沉,深埋于有淡水渗入的区域地下水环境中, C 段以下的地层再次接受溶蚀。

* 中国海洋石油南海东部公司。流花 11-1 礁(滩)型大油田地质规律勘探经验, 1994

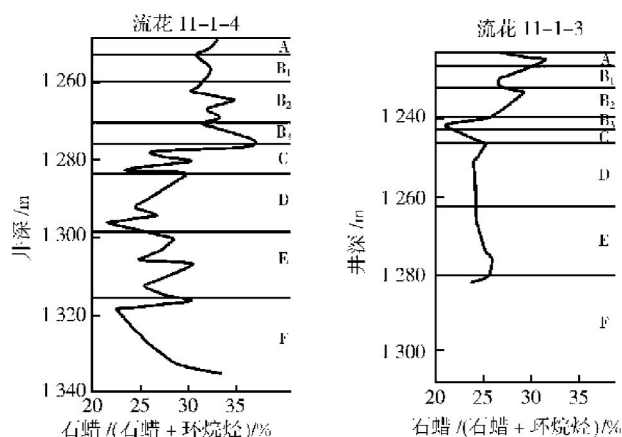


图5 流体包裹体分析结果*

Fig. 5 Analysis of fluid inclusion*

3.7 晚期成藏

油气再次进入礁体富集成藏,在油水界面附近发生深埋胶结作用,最终导致E段横向分布稳定的低孔渗层形成。

3.8 区域地下水溶蚀

油藏形成后,其下的水层仍处在淡化后的区域地下水环境中,进一步溶蚀和“漂洗”,使礁、滩灰岩“白垩化”,形成高孔渗层F段。

4 对储层的影响

沉积-成岩作用在流花11-1油藏孔隙体系形成和演化过程中起了重要作用。在有利沉积相带的基础上,成岩作用是礁灰岩油藏储层储集性能的主要控制因素。该油藏中的4个高孔渗段和4个中低孔渗段的形成与成岩作用密切相关,甚至在同一沉积微相中,部分层段位于暴露面以下的渗流带环境,由于淡水溶蚀作用形成高孔渗层(如流花11-1-11A和流花11-1-13井的B₃段);而另一部分处于潜流带环境,胶结作用使岩石致密,物性变差(如上述两口井的C段上部地层)。

复杂的沉积-成岩作用造就了流花11-1礁、滩灰岩的多种储集空间类型和孔隙结构,储集空间以粒间溶孔、粒内溶孔、非选择性溶孔、溶洞及各类溶蚀微裂缝为主,其次为铸模孔、晶间孔和骨架孔等,原生孔隙少见。孔隙结构大致可分为3类:1)宽短型喉道,孔喉比值较小,多分布在暴露面以下溶孔发育的高孔渗段;2)狭窄型喉道,喉道细而弯曲,在岩性相对致密段较发育;3)混合型喉

道,前面两种类型均有分布,且较难分开,在礁体上部B₁、B₂段比较常见。

参 考 文 献

- 侯连华, 无锡令, 林承焰, 等. 礁灰岩储层渗透率确定方法[J]. 石油学报, 2003, 24(5): 68
Hou Lianhua Wu Xiling Lin Chengyan et al Determination of permeability in ecologic reef reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica 2003, 24(5): 68
- 裴泽楠, 陈子琪. 油藏描述[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996. 227~231
Qiu Yinan Chen Ziqi Reservoir description[M]. Beijing Petroleum Industry Press 1996 227~231
- 马永生, 梅冥相, 陈小兵, 等. 碳酸盐岩储层沉积学[M]. 北京: 地质出版社, 1999. 31~69
Ma Yongsheng Mei Mingxiang Chen Xiaobing et al Carbonate reservoir sedimentology [M]. Beijing Geological Publishing House 1999. 31~69
- 钱峰, 黄先雄. 碳酸盐岩成岩作用及储层——以中国四川东部石炭系为例[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000. 24~34
Qian Zheng Huang Xianxiong. Carbonate diagenesis and reservoirs of the Carboniferous in the eastern part of Sichuan basin, China [M]. Beijing Petroleum Industry Press 2000. 23~34
- 刘林玉, 柳益群, 李文厚, 等. 吐哈盆地台北凹陷三角洲沉积与成岩作用[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(4): 402~405
Liu Linyu Liu Yiqun Li Wenhui et al Sedimentation and diagenesis of delta in Taibei Sag of Turfan Hami basin [J]. Oil & Gas Geology 2002, 23(4): 402~405
- 胡明毅, 龚文平, 肖传桃, 等. 湖北宜昌黄花场早奥陶世岩相和沉积环境[J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(4): 347~352
Hu Mingyi Gong Wenping Xiao Chuantao et al Facies and environment of Early Ordovician at Huanghuachang Yichang Hubei [J]. Oil & Gas Geology 1996, 17(4): 347~352
- 朱忠德, 刘秉理. 湖北松滋早奥陶世生物礁[J]. 石油与天然气地质, 1990, 11(4): 418~425
Zhu Zhongde Liu Bingli Early Ordovician organic reefs in Songzi Hubei [J]. Oil & Gas Geology 1990, 11(4): 418~425
- 王国忠. 南海珊瑚礁区沉积学[M]. 北京: 海洋出版社, 2001. 263~280
Wang Guozhong Reef sedimentology in the South China Sea [M]. Beijing Ocean Press 2001. 263~280
- 张廷山, 兰光志, Kershaw S 等. 四川盆地南北缘志留纪生物礁成岩作用及储层特征[J]. 沉积学报, 1999, 17(3): 374~380
Zhang Tingshan Lan Guangzhi Kershaw S et al Reef diagenesis and reservoir characteristics on north & south margins of Sichuan basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica 1999, 17(3): 374~380

(下转第529页)

* 中国海洋石油南海东部公司. 流花11-1礁(滩)型大油田地质规律勘探经验. 1994

气运聚的有利场所,是寻找大中型气田的重要领域,关键是有发育好且规模比较大的储层,给以水溶相注入的天然气造就一个良好的离析空间和输导系统,才有可能形成大规模的油气聚集。

参 考 文 献

- Huang B J, Xiao X M, Li X X. Geochemistry and origins of natural gases in the Yinggehai and Qiongdongnan basins offshore South China Sea [J]. Organic Geochemistry, 2003, 34: 1009–1025
- 许多,周瑶琪,朱岳年,等. 中国东部幔源 CO_2 气藏的 CO_2 ^3He 比率及形成机制 [J]. 石油与天然气地质, 1999, 20 (4): 290–294
Xu Duq, Zhou Yaoqi, Zhu Yuenian, et al. CO_2 ^3He ratio of mantle-derived CO_2 gas pool and its formation mechanism in eastern China. Oil & Gas Geology, 1999, 20 (4): 290–294
- Huang Baojia, Xiao Xianming, Zhu Weilin. Geochemistry, origin and accumulation of CO_2 in natural gases of the Yinggehai basin offshore South China Sea [J]. AAPG Bull, 2004, 88: 1277–1293
- Stahl W J. Carbon and nitrogen isotopes in hydrocarbon research and exploration [J]. Chemistry Geology, 1977, 20: 121–149
- Hoering T G, Moore H E. The isotopic composition of the nitrogen in natural gases and associated crude oils [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1958, 13: 225–232
- Hunt J M. Petroleum geology and geochemistry (2nd ed) [M]. San Francisco: Freeman and Company, 1996: 743
- Little R, Krooss B, Idiz E, et al. Molecular nitrogen in natural gas accumulation: generation from sedimentary organic matter at high temperatures [J]. AAPG Bull, 1995, 79: 410–430
- Schoell M. Isotope analysis of gas in gas field and gas storage operations [J]. SPE Production Engineering, 1993, 8: 337–344
- 董伟良,黄保家. 莺歌海盆地流体压裂与热流体活动及天然气的幕式运移 [J]. 石油勘探与开发, 2000, 27 (4): 36–40
Dong Weiliang, Huang Baojia. Overpressured fluid fracturing heat fluid flowing and episodic gas migration in the diapirs Yinggehai basin [J]. Petroleum Exploration & Development, 2000, 27 (4): 36–40
- 解习农,李思田,胡祥云,等. 莺歌海盆地底辟带热流体输导系统及其成因机制 [J]. 中国科学 (D辑), 1999, 29 (3): 247–256
Xie Xinong, Li Sitian, Hu Xiangyun, et al. Migration system of heat fluid and its formation mechanism in the diapir belt of the Yinggehai basin [J]. Science in China Series D (Geoscience), 1999, 29 (3): 247–256
- 施继锡. 有机包裹体及其与油气运移的关系 [J]. 中国科学 (D辑), 1987, 17 (3): 318–325
Shi Jixi. Organic fluid inclusions and their relationship with oil-gas migration [J]. Science in China (Series D), 1987, 17 (3): 318–325
- 柳少波,顾家裕. 包裹体在石油地质研究中的应用与问题讨论 [J]. 石油与天然气地质, 1997, 18 (4): 326–331
Liu Shaobo, Gu Jiayu. Application of fluid inclusions to petroleum geological study and discussion [J]. Oil & Gas geology, 1997, 18 (4): 326–331
- 肖贤明,刘祖发,刘德汉,等. 应用储层流体包裹体研究天然气藏的成藏时间 [J]. 科学通报, 2002, 47 (12): 957–960
Xiao Xianming, Liu Zufu, Liu Dehan, et al. Fluid inclusions of reservoirs: application to study of natural gas reservoir filling times. Chinese Science Bulletin, 2002, 47 (12): 957–960
- 杨克明,叶军,吕正祥. 四川西坳陷三叠统成藏年代学特征 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26 (2): 208–213
Yang Kaming, Ye Jun, Lu Zhengxiang. Chronological characteristics of Upper Triassic reservoirs in western Sichuan depression [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26 (2): 208–213
- Tang Y C, Perry J K, Jenden P D, et al. Mathematical modeling of stable carbon isotope ratios in natural gases [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64: 2673–2687
- Cramer B, Faber E, Gerling P, et al. Reaction kinetics of stable carbon isotopes in natural gas—insights from dry, open system pyrolysis experiments [J]. Energy & Fuels, 2001, 15: 517–532

(编辑 高岩)

(上接第523页)

- Freitas T, Ulrich M. Kilometre scale microbial in a rimmed carbonate platform succession, Arctic Canada: new insight on Lower Ordovician reef facies [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1995, 43 (4): 407–432
- 傅强. 成岩作用对储层孔隙的影响——以辽河盆地荣37块气田下第三系为例 [J]. 沉积学报, 1998, 16 (3): 94–96
Fu Qiang. Diagenesis effect on reservoir Pores—Taking the Rong-37 block of the Lower Tertiary Liaohe basin as an example. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16 (3): 94–96
- 蔡进功,谢忠怀,田芳,等. 济阳坳陷深层砂岩成岩作用及孔隙演化 [J]. 石油与天然气地质, 2002, 23 (1): 84–88
Cai Jingong, Xie Zhonghuai, Tian Fang, et al. Diagenesis and pore evolution of deep sandstones in Jiyang depression [J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23 (1): 84–88
- 冯增昭. 沉积岩石学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1993: 281
Feng Zengzhao. Sedimentology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993: 281
- 覃建雄,张长俊,李天生,等. 西昌盆地流体包裹体及其在油气勘探中的应用 [J]. 石油与天然气地质, 1994, 15 (3): 216–225
Qin Jianxiong, Zhang Changjun, Li Tiansheng, et al. Fluid inclusion in Xichang basin and its application to hydrocarbon exploration [J]. Oil & Gas Geology, 1994, 15 (3): 216–225

(编辑 高岩)