

文章编号: 1000-0550(2006)01-0056-12

# 济阳坳陷古近系湖相生物礁油气藏研究<sup>①</sup>

李 勇<sup>1,2</sup> 钟建华<sup>1,3</sup> 温志峰<sup>3</sup> 王海侨<sup>3</sup>

1(中国科学院广州地球化学研究所 广州 510640) 2(中国科学院研究生院 北京 100039)

3(石油大学地球资源与信息学院 山东东营 257061)

**摘 要** 济阳坳陷局部地区古近系发育以藻礁为主的生物礁,作为一种高产油气的储集体,礁体呈复式,可分为礁核、礁前及礁后相。礁体在成分上以枝管藻、龙介虫等构成的藻白云岩为主,具有良好的储集性能。根据组成礁体的岩性特征,生物礁可分为藻礁、藻礁丘及藻生物层三种类型。其中藻礁储集性能最佳,对生物礁储层影响较大的成岩作用有白云岩化、同生胶结、大气渗流溶蚀及深埋藏溶蚀作用。生物礁油藏主要产于邻近洼陷的构造台地或边缘地区。根据构造、岩性及地层的匹配关系,可分为礁型地层、断块—岩性及岩性三种类型。

**关键词** 济阳坳陷 生物礁 岩石学 储层 油藏

**第一作者简介** 李勇 男 1977 年出生 博士 构造地质学

**中图分类号** P618.13Q.27 **文献标识码** A

“生物礁”指的是一种由生物形成的原地碳酸盐沉积<sup>[1]</sup>,具有特殊的生物结构,且常认为它是环境条件的敏感指示器<sup>[2]</sup>。到目前为止,在中国境内仅发现三处古近系及新近系生物礁,其形成环境多少与海相有关,即便是在全世界古近系及新近系陆相湖泊生物礁也不多见,目前仅在美国蛇河平原东南的早新近世有湖泊藻礁的报道,报道者也明确指出目前对这种类型的生物礁了解甚少<sup>[3]</sup>。因此,这一研究具有重要的意义,无论是对古近系及新近系陆相湖泊生物礁,还是对于济阳坳陷古近系及新近系(古)气候、(古)地理、及(古)构造运动的研究具有更重要的意义<sup>[3]</sup>。

生物礁和相关的碳酸盐岩中蕴含着大约一半的世界石油储量,其高孔渗的特性是高产油气井、大油气田的极好储集体,另外,生物礁还是大量矿藏的载体<sup>[4~10]</sup>。上个世纪初(1916)随着墨西哥湾黄金巷环礁带区高产油井的钻探和开发,生物礁的研究进入了高潮,有关成果大量涌现。国内对生物礁与油气田的关系也进行了深入讨论<sup>[4,5]</sup>,并在胜利油田、川东地区以及塔里木地区发现了许多生物礁储层,其储集特征和油气显示都非常好。但相对其它的储层类型以及国外的研究水平,生物礁储层的研究在我国还比较滞后。

济阳坳陷在第三纪始新世晚期,古湖泊水体的性质与泻湖类似,这样的沉积背景有利于生物礁的发育。济阳坳陷自 1967 年钻遇平方王生物礁储层获得高产油气流以来,已打出四口日产超千吨的油井,生物礁油气藏作为一种特殊的油气藏类型日益受到关注,其油气产量也不断提高,目前在济阳坳陷日产千吨以上的高产井中,产自生物礁储层的已达四分之一以上<sup>[4]</sup>。因此,对其成因、分布及油气藏特征进行研究,意义重大也势在必行。

济阳坳陷第三纪生物礁主要以藻礁为主或以藻作为重要组分,一般呈藻生物层、藻礁丘等产状,主要分布于滨县凸起单家寺南的平方王油田、沾化凹陷义和庄东及其东南部的义东油田、邵家油田、东营凹陷的东辛油田及孤岛油田西部等地区(图 1)<sup>[5]</sup>。

## 1 礁体结构与相带特征

济阳坳陷古近系的礁体通常为复式礁体,厚度从几米到十几、上百米,由若干个较小的单礁体组成。单礁体至少可分为三个相带,即礁核相、礁前相及礁后相(图 2 图 3)。

**礁核相:**岩石组分主要为中国枝管藻管体组成的藻白云岩,龙介虫管组成的虫管、藻团粒白云岩,富藻介形虫灰岩、白云岩等。骨架孔隙及次生溶孔发育,

<sup>①</sup>国家重点基础研究发展规划项目(批准号:G1999043603)、国家自然科学基金项目(批准号:49972037)、高校博士点基金项目(批准号:20010425004)、山东省自然科学基金项目(批准号:Q99E01)联合资助。  
收稿日期:2005-01-18 收修改稿日期:2005-04-13

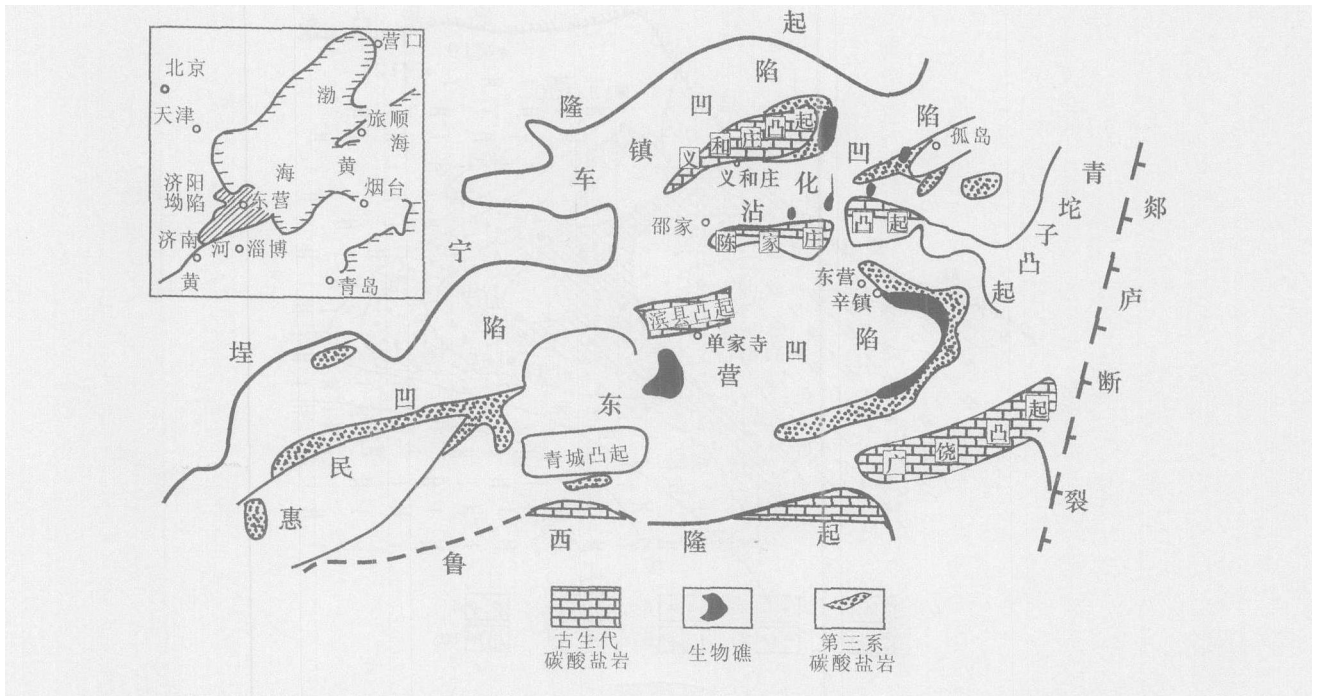


图 1 济阳拗陷古近系生物礁分布图 (据杜焜华, 1996)

Fig 1 Distribution of palaeogene reefs in Jiyang Sag( after Du Yunhua 1996)

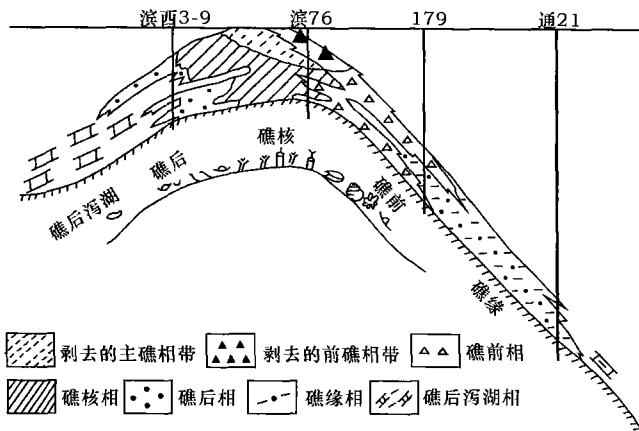


图 2 济阳拗陷平方王油田沙四段礁体剖面图 (据杜焜华, 1996)

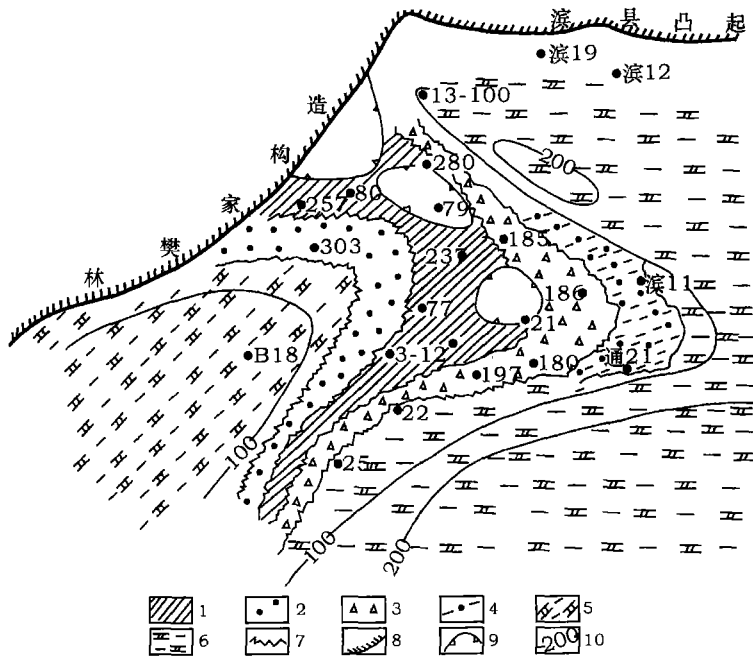
Fig 2 Reef cross section corresponding to the No 4 member of the Shahejie Formation in the Pingfangyang reef-type oil field showing the reef core back reef fore reef and reef margin facies

孔隙度可高达 35% ~42%，具备良好的储集空间。

礁前相: 岩石组分主要为角砾状泥晶灰岩、生物屑灰岩等。岩石中颗粒含量可达 72%，偶见泥岩夹层，反映了礁前相下倾方向尖灭带的特征。生物屑大小由砾级至粉屑级。孔隙为粒间孔及粒内孔，孔隙度可达 30%。

礁后相: 主要由藻屑白云岩、介形虫白云岩、含生物碎屑白云岩等组成，孔隙度一般为 7% ~20%，礁后相向岸方向可过渡为泻湖相，或与陆源碎屑相带为邻。

由于地壳和水面的小幅度升降，水体、岸线的频繁进退，使各相带频繁迁移，单个相带规模小，各相带在纵向上变化明显，小型单礁体可在不同相带相互迭加。水进时，上层礁前相可迭置在早期形成的下层礁体的礁核相乃至礁后相之上；水退时，与前者相反，后成礁体的礁后相可能迭置在先成礁体的礁核乃至礁前相之上，导致形成复式礁体，面积可达数十平方千米。这种湖相礁体不论在横向上还是在纵向上岩性变化都较快，并且纵向上不同岩性组合可多次重复出现，横向上井距数百米，其岩性常不可对比。如西 3-9 井碳酸盐岩总厚度 30 m，由礁后及礁后湖泊两个相重复 12 次；西 3-12 井碳酸盐岩总厚度 42 m，礁核、礁后及礁前湖泊三个相重复 10 次<sup>[4, 10]</sup>。横向上岩性变化大，300 m 左右井距岩性、岩相差别较大，且具有明显的过渡性。因此礁体是在水体进退、升降较为频繁的条件下，不同时期沉积的礁体以不同相带相互叠加而成的复式礁体<sup>[11]</sup>。由于三个相带储集性、连通性较好，因此复式礁体整体上呈块状储油。如平方王礁体残存厚度约 50 m，具有统一的油气水界面，油气富集且高产。



1. 礁核相; 2 礁后相; 3 礁前相; 4. 礁缘相; 5. 礁后泻湖相; 6 礁前湖泊相; 7. 相带界线; 8. 陆地; 9 沉积后剥蚀区; 10. 等厚线 (m)

图 3 济阳拗陷平方王油田沙四段礁体相带平面分布图 (据杜温华, 1996)

Fig 3 Distribution of various facies belts in the Pingfangwang reef type oil field. The reef horizon is equivalent to the No. 4 member (Early Eocene) of the Shahejie Formation

## 2 生物礁形成时的沉积环境及其演变

济阳拗陷发现的生物礁主要产于始新统晚期海侵层段。中生代末期以来, 济阳拗陷经历了张裂、断陷、区域沉降, 脉动调整和充填, 消亡几个阶段。中生代末期是一张裂断陷发生期, 而古近纪则是济阳拗陷沉积发育的主要阶段。该阶段早期, 以始新统孔店组红色砂泥岩夹暗色泥岩, 含膏泥岩为特征。从始新世晚期(沙四段)至始新世中期(沙三段)气候温暖潮湿, 生物繁盛。其间, 沙四段晚期湖泊水体的性质, 一度曾与泻湖类似, 处于盐湖后期或盐湖强烈淡化期。这可能是短期海侵的影响, 也可能是由于周围古生界海相岩层及蒸发作用的影响。沙三段早、中期, 厚层生油岩广泛分布, 拗陷处于沉降期。从沙三段沉积晚期至东营组沉积时期, 物源区隆起剥蚀加剧, 陆源碎屑供应充分, 河流三角洲沉积发育, 致使湖盆迅速萎缩。但由于脉动沉降作用, 在沙一段时期盆地又大面积沉降, 沉积大面积超覆, 碳酸盐岩普遍发育。到了中—上新世馆陶组和明化镇组沉积时, 盆地迅速夷平补齐, 不可逆转地走向消亡。

实践证明, 具有石油意义的龙介虫—中国枝管藻生物礁灰岩全部发现于曾一度受海侵影响的沙四段。

这说明在盆地内, 生物礁的纵向分布具有明显的地层属性。济阳拗陷发现的生物礁中主要有两种造礁生物, 即多毛类的龙介虫和藻类中的中国枝管藻, 都以适应泻湖环境为特征(表 1)。中国枝管藻是一种造岩的绿藻, 这种绿藻多分布于热带、亚热带的浅海, 水深一般不超过 12 m, 尤以低于湖面以下居多, 营底栖固着生活, 为泻湖(或淡化泻湖)浅水礁后和浅滩沉积物的重要组成部分。而龙介虫, 无论现代的还是古代的, 都曾见于泻湖环境, 前者如百慕大泻湖及东京湾, 水深一般小于 10 m, 后者如俄罗斯托尔屯地区<sup>[12]</sup>。这些情况说明这类礁体适宜生于泻湖环境中, 尤以淡化泻湖为佳。济阳拗陷内四个凹陷中已有三个凹陷见泻湖相生物组合, 如个体小, 变异强, 属种单调的有孔虫。沾化凹陷的垦 26 井在 2798.40~2809.35 m 井段中连续 11 m 见有孔虫; 义和庄地区局部碳酸盐岩厚度约 150 m, 其中生物礁体厚度约 100 m, 也见到有孔虫, 数量多但个体较小, 平均 0.05 mm 左右, 20 克样中多于 100 个<sup>[10]</sup>。总体来看, 呈现分异度低, 属种单调的特点, 主要是小粟米虫、诺宁虫和圆盘虫, 在东营凹陷只见一属一种, 沾化凹陷有三属三种。

共生化石较特殊, 既有淡水介形虫、轮藻, 也有大量常生于泻湖及海水中的多毛类、绿藻类, 还有淡水

表 1 济阳拗陷藻礁及龙介虫发育情况

Table 1 Development of a lgal reefs and Serpula in Jiyang Sag

井号	井段 m	厚度 m	中国枝管藻	龙介虫
滨 214 井	1466.00 ~ 1468.15	2.15	群体丛生	有发现
西 3-12 井	1555.90 ~ 1587.05	11.05	群体丛生	断续大量发现
滨 16 井	1439.25 ~ 1444.25	4.50	簇状、枝状丛生	较多
滨 246 井	1531.15 ~ 1531.55	0.40	枝状放射状、放射状、蛛网状	较多
	1531.65 ~ 1532.05	0.40		交织排列
滨 80 井	1451.10 ~ 1452.25	1.25	丛生	较多
辛 68-35 井	2022.80 ~ 2042.00	19.20	管状丛生	较多

属种的, 甚至在多毛类栖管内还发现淡水化石, 如中国枝管藻等<sup>[5]</sup>。其它化石也有咸淡共生现象, 如滨县椎实螺 (*Lymnaea binxianensis*)、东营琥珀螺 (*Succinea dongyingensis*) 与大量淡水腹足类、介形类的共生等。在地球化学特征方面也表现出泻湖相特征, 胶磷石、海绿石频繁出现, 天青石含量之高, 有时可达重矿的百分之几十。锶 钡比值可达 2~4 古盐度常在 20%~40%。

上述事实说明, 生物礁的地层属性是由造礁生物对环境的适应性及水体性质泻湖化阶段的相对单一性决定的。由于这种地层属性的认识, 使对生物礁油气藏的勘探对象明确, 目标集中, 针对始新世末期的海侵层位开展研究, 这对整个华北地区古近系的油气

勘探具有指导意义。

### 3 礁体发育的古构造—地貌背景

济阳拗陷生物礁产于邻近洼陷的古构造台地上或洼陷边缘地区。古近系礁体的构造—地貌分布具有规律性, 主要有三种情况:

第一种情况是在邻近深水区的水下平缓隆起顶部, 这些构造位置受较大断裂控制, 例如, 平方王礁体所在的平方王地区被 NW、NE 两组大断裂切割, 生物礁沉积时是个明显的平缓构造台地, 岩心上见有明显的冲刷面, 说明水体不深, 古生物资料证实水深一般在 10m 以内。礁体向东和向南延伸不远, 就是大断层下降盘的水深区了 (图 4a)。另外, 发现造礁生物

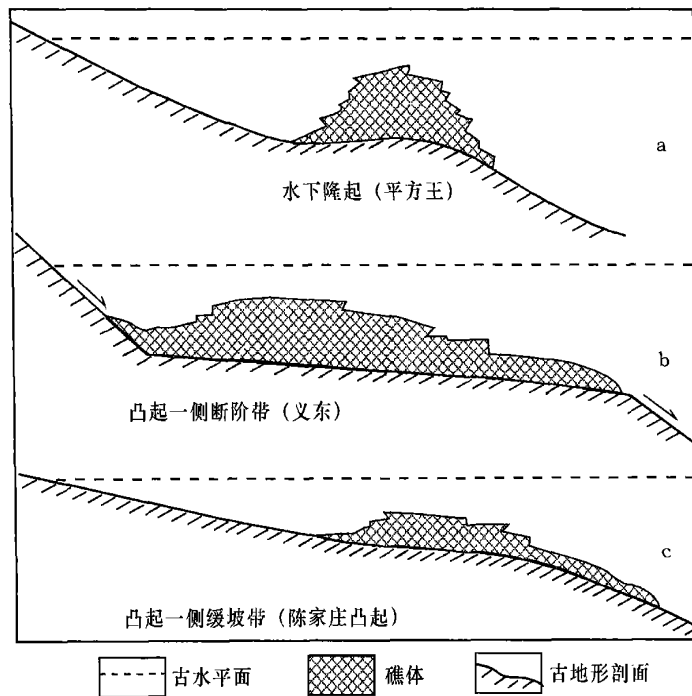


图 4 济阳拗陷生物礁发育的三种古构造—地貌部位

Fig 4 Three paleotectonic or paleotopographic uplifts for the growth of the algal reefs developed in the Jiyang sag, eastern Shandong Province

的垦 25 井地区, 情况类似, 该区位于孤南、孤北两条大断层夹持的孤岛凸起向西倾没的部位, 突出于南北两个较深水域之间, 也属于水下隆起部位。

第二种情况是凸起边缘的断阶带, 如义和庄东坡, 这里是凸起向深凹陷过渡区, 断层发育, 形成阶梯状构造台地, 平台向东紧临深水区, 这里也是适宜造礁生物生活的地区(图 4b)。

第三种情况见于陈家庄北坡, 如义 42 井所见, 藻礁所处的部位与义东的不同是在于该处坡度特别平缓, 而且没有断阶。平缓古隆起边坡没有与断层伴生的构造台地, 因为地形起伏很小, 加之水体盐度较高, 生物礁分布范围及厚度均较小, 仅沿古隆起边缘呈狭窄条带状分布, 分布面积仅有 0.5 km<sup>2</sup>(图 4c)。

济阳拗陷古近系生物礁的这种构造古地貌分布, 有两个原因, 一是位于断层上升盘平台上的造礁生物易于吸收断层下降盘深水区域上涌的未被分解的氮、磷、钾等养分; 二是本区泻湖环境, 生物不如海洋那样丰富, 因而不能通过生物沉积而迅速营造出碳酸盐岩台地, 只能借居构造台地。根据以上特点, 可以预测与大断层有关的台地, 尤其是 NE、NW, 向南跌落或向东跌落二级大断层下降盘, 大多数都有台阶、台地或平台, 是寻找生物礁的有利地区。当然, 在预测生物礁油气藏位置时, 还要参考其它因素, 如油源问题等。

### 4 生物礁的类型及其岩石学特征

济阳拗陷古近系生物礁可分为三种类型: 藻礁、藻礁丘和藻生物层。现分别叙述如下:

(1) 藻礁位于东营凹陷西部, 钻遇最大残余厚度 49.5 m。埋深 1 400 m, 范围约 100 km<sup>2[4]</sup>。藻礁及其邻区分为 6 个相带: 礁核、礁前、礁缘、礁后、礁前湖泊及礁后湖泊(图 3), 各相带的岩石类型及沉积特征列于表 2。

礁核相岩石类型有中国枝管藻白云岩、龙介虫栖管一枝管藻白云岩、球粒白云岩及白垩等, 其中枝管藻呈丛状, 单体呈枝状, 断面呈蜂窝状, 管长 5~10 mm, 管径 0.1~0.25 mm, 管壁厚 0.03 mm。以 B 西 3-12 井最典型, 厚度最大, 约 28.05 m。B16、76、246 及 B80 等井都有(表 1)。礁核部位最宽约 4 km。礁后相以泥晶白云岩为主, 含部分管状藻屑、生物碎屑及藻灰结核等, 反映礁后部位由于受到礁核的遮挡, 水动力条件较弱。礁前相以亮晶藻砾屑白云岩、亮晶腹足类灰岩为主, 腹足类壳壁较厚, 个体完整, 该相带水体活跃, 适宜喜迎风坡繁殖的腹足类生活。同时该

处发育礁核迎风一侧的滑塌堆积物, 碳酸盐颗粒大小混杂, 分选差。礁缘相以泥晶粒屑灰岩及含粒屑泥晶灰岩、夹泥岩薄层为特征, 孔隙性相对较差。礁后湖泊及礁前湖泊相是礁体外的邻近相区<sup>[10]</sup>。

表 2 藻礁各相带的岩石类型、沉积特征和生物组合  
(据杜韞华, 1996)

Table 2 Rock types sedimentary characteristics and organism assemblages in various facies belts of the algal reefs developed in the Pingfangwang reef type oil field Jiyang sag eastern Shandong Province( after Du Wenhua 1996)

岩石、组构、生物	相带	礁后湖泊	礁后	礁核	礁前	礁缘	礁前湖泊
钙质泥岩							
泥灰岩							
亮晶白云质砂屑灰岩							
亮晶灰质砾屑白云岩							
中国枝管藻白云岩							
龙介虫枝管藻白云岩							
含藻介形虫白云岩							
泥晶粒屑白云岩							
泥晶白云岩							
泥晶含铁白云岩							
泥晶含铁灰岩							
德弗兰藻							
介形虫							
腹足类							
双壳类							
龙介虫							
枝管藻							
线纹状藻							
弯管虫							
生物碎屑							
球粒							
砾屑							
砂屑							
鲕粒							
藻团块							
块状构造							
皮壳结构							
结壳结构							
水平层理							
冲刷构造							
干裂构造							
鸟眼构造							
细分散黄铁矿							

(2) 藻礁丘是藻礁与泥丘的过渡产物, 由藻类碳酸盐岩、颗粒灰岩及泥晶灰岩组成<sup>[13]</sup>。主要分布于沾化凹陷义和庄凸起的东部陡坡带, 该凸起由奥陶系碳酸盐岩组成, 缺乏铝硅酸盐岩的陆源碎屑干扰, 坡陡水清, 有利于厚层碳酸盐沉积。藻丘呈扁平的透镜体, 埋深 3 019.50~3 191.00 m, 厚 160 m。泥晶灰岩(含粒屑)厚 90 m, 占 56%, 泥晶藻屑白云岩厚 39 m, 占 24%; 亮晶藻屑(包括球粒)白云岩厚 14 m, 占 9%, 枝管藻(骨架岩, 包括龙介虫栖管)白云岩厚 17 m, 占 11%。由此可见岩石类型以泥晶灰岩为主, 骨架岩为辅。这

种以静水沉积为主且含骨架岩的扁平透镜体是藻丘的特点。藻礁丘的相带划分及沉积特征如图 5 每一藻丘的岩性序列为细→粗→细, 这反映藻丘大致发育过程<sup>[2]</sup>。义东陡坡的藻类发育到一定程度失去平衡, 滑塌后堆积于深水灰泥之上, 随着堆积物增加, 水体变浅, 枝管藻类又开始繁殖, 但很快又下沉, 被细粒沉积物覆盖, 完成一个藻丘的沉积过程。

(3) 藻生物层以济阳拗陷沙一段“针孔灰岩”层最为典型。分布在东营凹陷的北部陡坡和南部缓坡带(图 1)。陈家庄凸起南坡, 由前震旦系铝硅碳酸盐岩组成, 由于碎屑大量搬入湖中形成浑水区, 含盐度低, 对藻类碳酸盐岩的发育不利, 只能形成 2~5 m 厚的藻白云岩。东营凹陷南临鲁西隆起, 该隆起由奥陶系石灰岩组成, 入湖水质较好, 但沉积区坡度较小, 也只能形成生物层。生物层以枝管藻白云岩为主(图 6), 呈层分布, 发育鲕粒及生物残体。藻生物层目前只发现于义 129 井区(5 m)、孤西桩 57 井、65 井、垦 25 井、义 42 井、邵 4 井及辛 68-35 井等井区。

根据礁体相带岩性特征可将济阳拗陷钻遇的生物礁剖面分为三种类型。

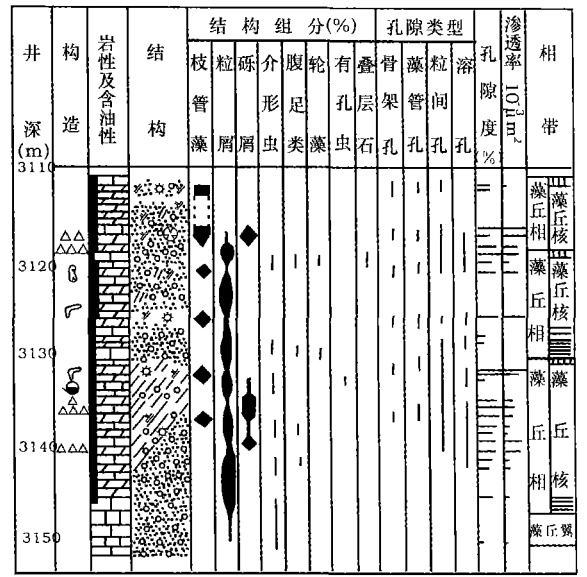


图 5 藻礁丘相带划分及其特征(据杜韞华, 1996)

Fig 5 Various sedimentary components and porosity types in the algal reef mounds developed in the eastern steep slope of the Yezhuang uplift

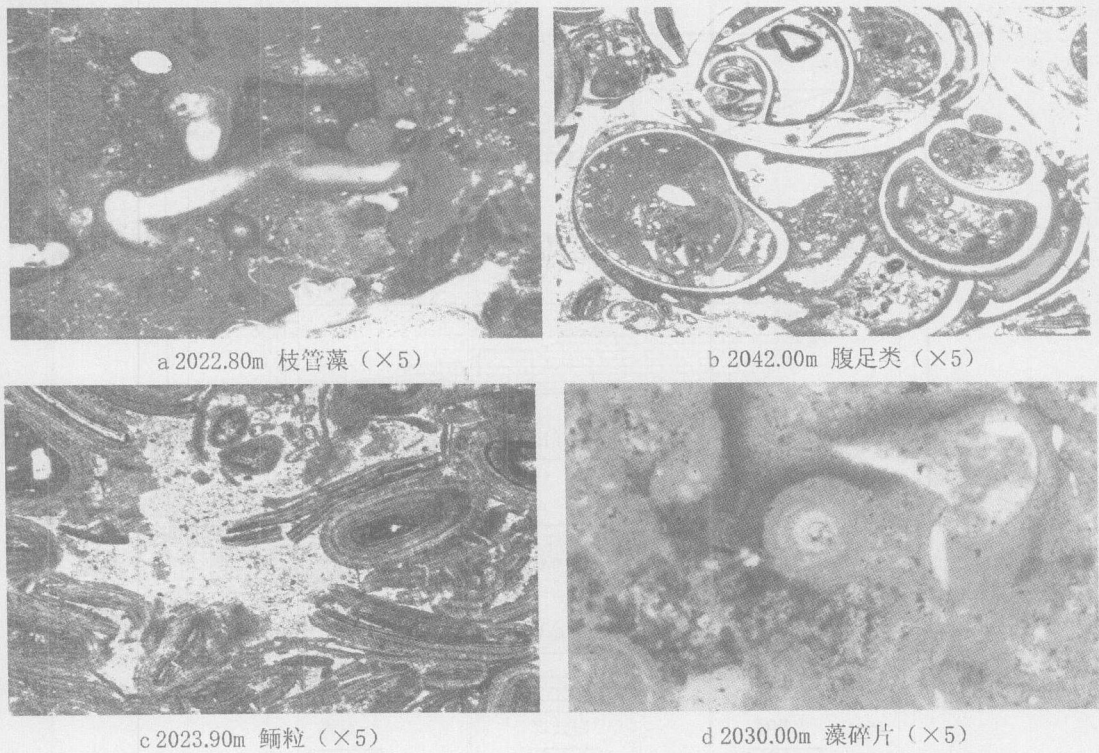


图 6 东营凹陷辛 68-35 井藻生物层镜下照片

Fig 6 Various organisms (tube like green algae, gastropods and unidentifiable algal fragments) or sedimentary components (ooids) observed under the microscope in the algal biostromes developed in the Dongying depression, eastern Shandong Province

### 4 1 清水型剖面

泥晶灰岩—生物礁—钙质泥岩(图 7a)。平方王礁体是这种类型的典型例子,这里的生物礁体远离物源区,其礁后为清水泻湖沉积,其岩石主要为泥晶灰岩,含泥质泥晶灰岩、白云岩、铁白云岩、泥灰岩等,多含分散状黄铁矿,有的具纹层。水体盐度 3.8‰~21.9‰,生物数量少,种类单调,常见薄壳介形虫,一般小于 5%。所有泥晶白云岩都是准同生的,说明其环境不适宜生物生长<sup>[14]</sup>。礁前相主要为清水区,其沉积物主要由泥质岩、纹层状泥岩、泥灰岩夹薄层灰岩组成。

### 4 2 浊水—清水型剖面

主要岩性为砂岩、砂质灰岩—生物礁—泥岩组合,与前述剖面的显著不同在于礁后区域与陆源碎屑呈过渡关系,岸边为砂砾岩、砂岩发育区,近礁体部分变为砂屑灰岩。礁体生长时,礁体近岸侧水体较混浊,但还不足以威胁造礁生物的生长,只是从一侧限制了礁体的发育,而另一侧,即礁体向湖盆中心一侧则为清水区,这类剖面可称为浊水—半清水型剖面,如义东地区的阶梯状台地上的礁体就属于该类型(图 7b)。

### 4 3 咸水型剖面

在垂直岸线的剖面上可以看到,石膏岩—生物礁—泥膏岩组合,而在平行岸线的剖面上,则为泥膏岩—生物礁—泥灰岩组合,造成这种组合的原因是因为一侧向上有淡水区域的存在。礁体所处的水体较咸,礁体较小,义 42 礁体就属于此种类型(图 7c)。

上述三种剖面以清水型礁体规模最大,半清水型次之,咸水型最小。从勘探角度看,生物礁在地震时间剖面上也有典型特征。在礁后相靠近凸起部位,礁前相为深水区的剖面上,主礁体有类似冲积扇的反射特征,即生物礁的顶、底均为密集较强反射,两组反射由凸起斜插入洼陷,相交形成楔型反射体,插入湖相水平密集反射层段中间,成为一个“穿时体”,即沙四段礁体反射“切入”沙三段水平反射中。

## 5 生物礁油气储层

### 5 1 礁的孔隙度和渗透率

藻礁、藻礁丘和藻生物层具有良好的油气储集空间,其中以藻礁储集性最好,尤以礁核相最佳,平均孔隙度 37.9%,最高可达 42.5%,渗透率一般为  $(100 \sim 380) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。原生孔隙及次生孔隙都较发育,骨

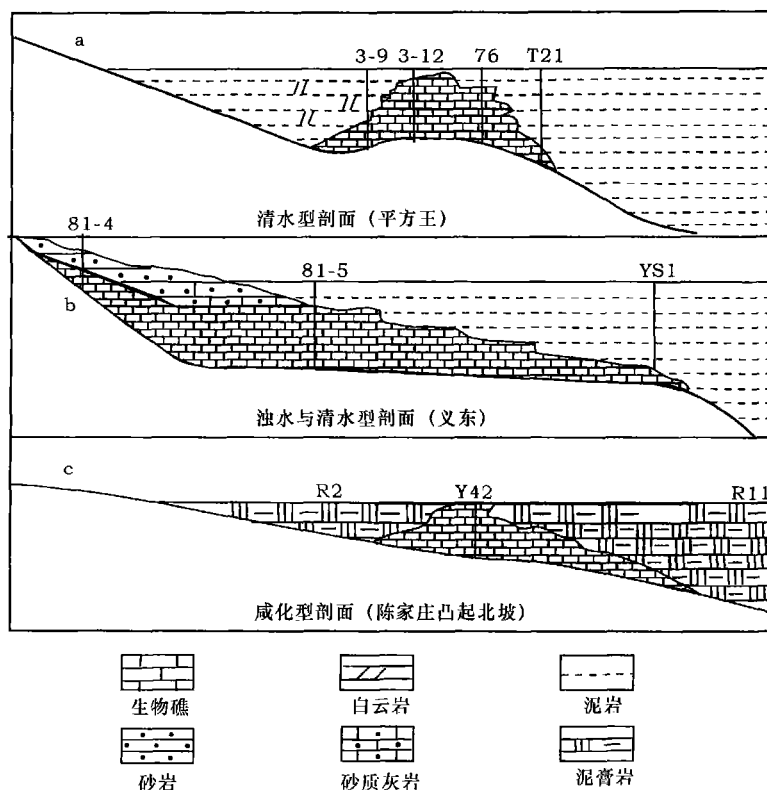


图 7 济阳拗陷生物礁岩性剖面类型

Fig. 7 Three types of reef cross section formed during the different sedimentary environment



架孔隙及生物体腔孔隙是最有效的储集空间。礁前相的储集性仅次于礁核相, 平均孔隙度 36.7%, 渗透率  $(10 \sim 100) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。即使储集性相对较差的礁后相, 孔隙度也达 20%, 渗透率  $(5 \sim 10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。湖相藻礁是复式礁体, 纵向上相邻相带交互叠加, 使储集体厚度增大, 有利于藻礁油气富集高产。藻礁丘的储集性能仅次于藻礁, 藻礁核相的孔隙度一般为 10% ~ 25%, 最高 41.9%, 除生物体腔孔及骨架孔外, 还有粒内孔、粒间孔、溶孔以及溶洞等, 渗透率为  $(8 \sim 100) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 最高  $687 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。藻生物层的储集性能变化较大, 孔隙度一般也可达 8% ~ 20%, 由于泥晶碳酸盐岩较多, 孔隙连通性差, 因此渗透率较低。若藻生物层与粒屑碳酸盐岩组成厚层储集体, 也可高产, 如邵 10 井的藻生物层中腹足类富集层段, 原油日初产量达千吨。

## 5.2 礁的成岩作用

生物礁体经历的成岩作用主要有浅埋藏环境的充填、交代作用、成缝作用、深埋藏溶蚀作用等。充填、交代作用表现为由泥晶、细晶铁方解石形成的多世代胶结物, 这些胶结物可充填渗流带形成铸模孔隙; 成缝作用发育于始新世及其以后的多期构造运动, 致密的碳酸盐岩比孔隙发育的碳酸盐岩更容易产生张性构造缝, 如营 84 井的藻生物层, 经历淡水胶结, 岩性致密, 构造裂缝较发育; 深埋藏溶蚀作用以铁方解石、铁白云石被溶蚀为标志, 沉积盆地中巨厚的泥质生油岩在成岩阶段脱水和脱羧基过程产生酸性溶剂, 通过构造缝、原生层间缝、原生孔隙等通道形成粒间溶孔、粒内溶孔、铸模孔等, 这些溶蚀孔隙的分布不受沉积相带的控制<sup>[15~18]</sup>。

当深埋藏溶蚀孔隙形成以后, 烃类在孔隙中大量聚集, 形成储油岩体<sup>[19, 20]</sup>。在构造条件及油水关系

不变的情况下, 储油体的成岩作用趋于终止, 储集空间得以保存<sup>[21, 22]</sup>。济阳拗陷平方王礁体沙四段储层和义东藻丘沙四段储层的原油来自沙三段生油岩; 义 129 井沙一、四段生物层的原油分别来自沙一、四段, 因此是自生自储组合(表 3)。与礁伴生的泥质生油岩为碳酸盐岩储集体提供了酸性水溶液和烃类, 酸性水溶液作为油气运移的先驱, 可溶蚀岩石、产生孔隙, 为成藏提供运移通道和储集空间。自生自储的组合说明油气生、储配合密切, 较早占据储集空间, 有效地利用和保存了油气。

济阳拗陷生物礁经历同生、淡水渗流、淡水潜流、浅埋藏及深埋藏等五种成岩环境的改造(图 8)。对储集性影响较大的成岩作用是白云岩化、同生胶结、大气渗流溶蚀及深埋藏溶蚀作用<sup>[19]</sup>。下面重点论述生物成因白云石化, 据杜焜华所做的碳、氧同位素分析(图 9), 礁核部位的藻管、藻团粒、球粒和栖管壁的稳定同位素成分相近,  $\delta^{13}\text{C}$  的变化区间为 1.58‰ ~ 6.00‰,  $\delta^{18}\text{O}$  的变化区间为 -11‰ ~ -1.5‰<sup>[31]</sup>。与海相碳酸盐岩相比, 与绿藻成因的  $\delta^{13}\text{C}$  一致, 而  $\delta^{18}\text{O}$  较低。这是由于枝管藻白云岩处于深埋藏环境所致<sup>[9]</sup>, 因此济阳拗陷的藻礁、藻礁丘及藻生物层的白云石化属于生物成因。此外, 还发育同生交代、埋藏交代白云石化, 这三种白云石化不受沉积相控制, 产生大量白云石晶间孔, 孔径 0.5 ~ 2.0  $\mu\text{m}$ , 可作为油气储层<sup>[19]</sup>。

## 6 生物礁油气藏成藏特征及类型

构造—岩性—地层圈闭油气藏是济阳拗陷生物礁油气藏主要成藏类型, 这种成藏模式以平方王沙四段为代表(图 10)。平方王油田位于东营凹陷西部。

表 3 生物礁储层的原油与生油岩生物标记化合物对比表

Table 3 Contrasts of crude oils associated with reservoirs in the Paleogene reefs with biological marker compounds in source rocks

凹陷	层位	生油岩		原油	
		Pr/Ph	$\gamma$ 蜡烷 $C_{30}$ 霍烷	Pr/Ph	$\gamma$ 蜡烷 $C_{30}$ 霍烷
沾化	E <sub>s1</sub>	0.72	0.38~0.73	0.69~0.99	0.27~0.70(沙一段藻生物层)
	E <sub>s3</sub>	1.79	0.07~0.12		
	E <sub>s4</sub>	0.42	0.92	0.39 0.79	0.25(义 129 井) 0.09(义东藻礁丘)
东营	E <sub>s3</sub>	1.32~3.34	<0.2		
	E <sub>s3</sub>	1.0~0.5	<0.2		
	E <sub>s4</sub>	<0.5	>0.5	0.58~0.84	0.02~0.14(藻礁)



成岩环境	泥晶化	纤维状等厚环边	互层状胶结物	假球粒	叶片状方解石	粒状方解石	铁方解石	巨晶方解石	重结晶作用	泥晶	显微晶	铁白云石	粒状白云石	硬石膏	天青石	萤石	微裂缝	溶蚀	对储层的影响
同生																			早期石化作用形成藻礁
潜水																			以世代胶结为主
淡水																			以溶蚀为主
浅埋藏																			胶结为主
深埋藏																			形成各种孔隙

图 8 济阳坳陷生物礁成岩作用及其对储层影响示意图(据杜搢华, 1996)

Fig 8 Diagenesis of the Palaeogene algal reefs developed in the Jiyang sag and their effects on reservoir potentials for oil and gas ( after Du Yunhua 1996)

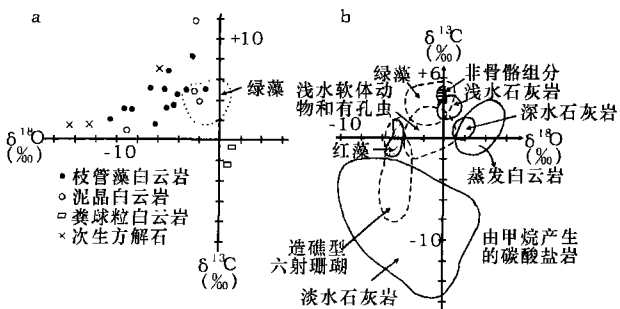


图 9 济阳坳陷湖相藻礁、海相碳酸盐岩中的  $\delta^{18}O$  和  $\delta^{13}C$  的分布 (据杜搢华, 1996)

Fig 9 Measurements of  $\delta^{18}O$  and  $\delta^{13}C$  isotopic values in the lacustrine algal reefs developed in the Jiyang sag eastern Shandong Province and comparisons with those values measured in normal marine carbonates

沙四段沉积晚期, 此处为一水下隆起, 水域清澈, 温度及盐度适中, 龙介虫属和中国枝管藻等造礁生物繁盛形成生物礁。沙四段沉积末期, 济阳运动使该区再次抬升并出露水面, 构造顶部礁核遭受剥蚀。残存部分经风化及后期白云岩化, 溶蚀孔隙发育构成蛛网状。沙三段沉积时期, 该区重新被湖水淹没, 生物礁剥蚀面之上超覆沉积沙三段湖相暗色泥岩, 成为良好的盖层, 形成背斜形态的地层圈闭。圈闭长 8 km, 宽 6 km, 面积 31 km<sup>2</sup>, 闭合幅度 150 m。圈闭的东、南分别

与利津、博兴生油洼陷相邻, 并以高青—平南断层作为油气疏导体系。洼陷中沙三、沙四段生成的油气运移到圈闭中, 形成大型气顶油藏, 气藏高度 100 m, 油藏高度 50 m, 含油面积 29.5 km<sup>2</sup>, 气顶面积 19.8 km<sup>2</sup>。由于生物礁储集性能良好, 产能较高, 曾出现 5 口日产千吨的油井。岩性、地层、构造因素对生物礁油气成藏具有重要作用, 它们的良好匹配是成藏的关键。

济阳坳陷生物礁油气藏主要有以下三种类型。

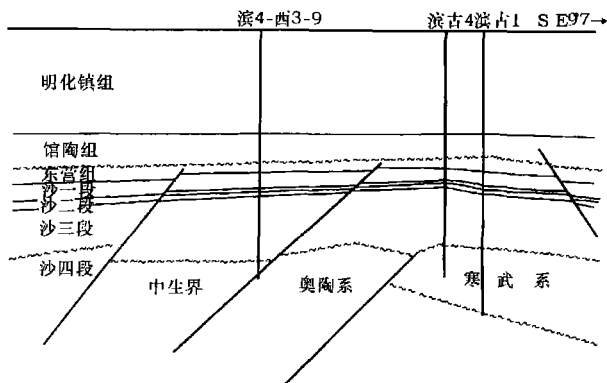


图 10 平方王油田构造剖面图

Fig 10 Structure section of Pingfangyang Oilfield

### 6.1 礁型地层圈闭油藏

平方王生物礁在古隆起上生成, 分布范围大, 厚度大。经过后期剥蚀还残留 50 m 厚的生物礁灰岩。

后期沙三段生油层超覆沉积其上, 形成了一个被生油层超覆覆盖的地层—构造圈闭。这种构造是由古隆起及生物礁本身的隆起形态决定的, 因而也可以称为礁型地层油藏。沙三段生成的烃类通过不整合及断层运移到礁体中, 形成了具有统一油气和油水界面的块状油气藏, 油层厚度达数十米, 日产可达千吨以上, 同时产量较稳定 (图 11)<sup>[4]</sup>。

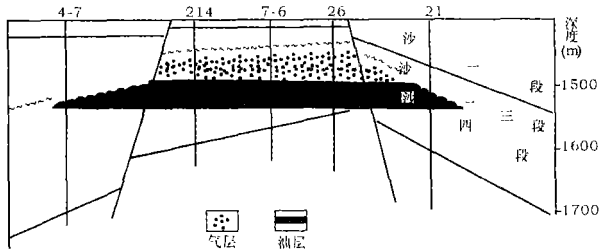


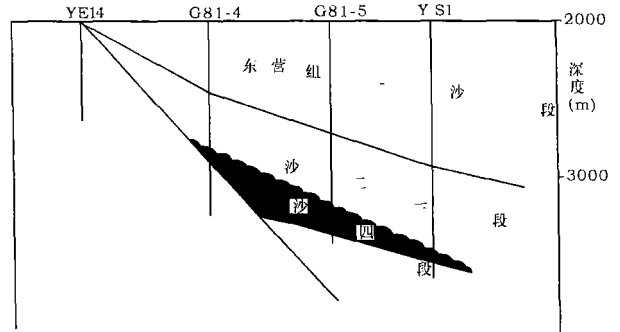
图 11 礁型地层圈闭油藏 (平方王)

Fig 11 Reef-stratigraphic trap reservoirs in the Pingfangwang oil field south of Binxian uplift central Jiyang sag eastern Shandong Province

### 6.2 断层—岩性圈闭油藏

这类油气藏指断层形成的阶梯状台地上生长的礁体靠断层及岩性变化形成圈闭。如义东生物礁油气藏。这类油气藏油源充足, 紧邻深水区一侧便是生油洼陷, 生物礁又有“穿时”特征, 因此, 油气直接进

入礁体内, 其礁后有断层使较老而致密岩层与礁体接触, 形成封堵油气的隔层, 礁体外围变成致密的岩性, 这样使礁体形成一个良好的储集空间。这种油气藏呈块状, 油层厚、产量高, 但岩性变化快使油气产量的稳定性受到影响 (图 12)。



(YE14 井下为新生界孔店组至中生界地层)

图 12 断块—岩性圈闭油藏 (义东)

Fig 12 Fault block lithological trap reservoir developed to the east of Yihezhuang locality

### 6.3 岩性圈闭油藏

这类油气藏主要靠生物礁周围泥灰岩、膏泥岩、石膏岩等致密岩层封堵。如罗家鼻状构造上的义 42 生物礁油藏。油层较厚, 初期高产, 是个典型的小而肥油藏 (图 13)<sup>[4]</sup>。

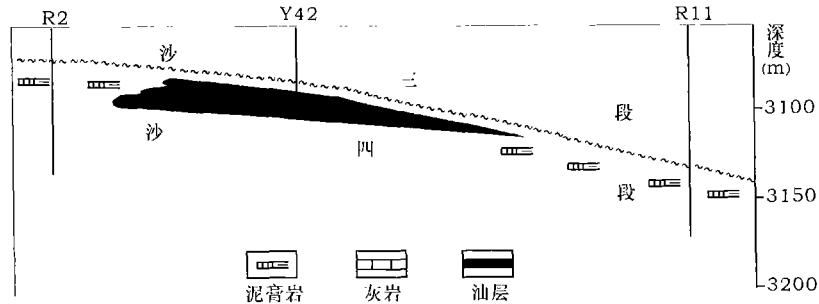


图 13 岩性圈闭油藏 (陈家庄北坡)

Fig 13 Lithological trap reservoir developed in northern slope of Chenjiazhuang area

上述三种类型的油气藏在济阳拗陷中均曾获高产, 尽管高低有别, 却不失为重要的勘探对象。

## 7 结论

(1) 济阳拗陷古近系生物礁一般为复式礁体, 由单个小礁体不同相带叠加而成。因此各相带孔隙度和渗透率较高, 是高产储油岩体。

(2) 济阳拗陷礁体主要分布于水下低隆起之上

和凸起一侧的台阶上, 这是寻找生物礁油藏的有利方向。具体地说, 生物礁主要生长于二级 NE、NW 向断下降盘的台地上。

(3) 济阳拗陷生物礁剖面有三种类型, 远离物源区的“清水型”礁体规模大。济阳拗陷 (除惠民外) 区域性物源来自东部, 因此在各盆地西部水下低隆起是寻找清水型礁体十分有利的地区。其次在二级 NE、NW 向南跌落或东跌落的正断层下降盘寻找半清水

型剖面。

(4) 济阳坳陷生物礁储层具有良好的油气储集空间,其中以礁核相最佳。经历同生、淡水渗流、淡水潜流、浅埋藏及深埋藏等五种成岩环境的改造,对储集性影响较大的成岩作用是白云岩化、同生胶结、大气渗流溶蚀及深埋藏溶蚀作用。

(5) 生物礁油气藏一般呈块状,礁体一般较厚,构造、岩性、地层等因素对成藏起到重要作用,生物礁发育部位及礁体自身性质使油气生、储、盖条件得天独厚,成藏条件优越,因此生物礁油藏易高产。

#### 参考文献 (References)

- Riding R. Structure and composition of organic reefs and carbonate mud mounds: Concepts and categories. *Earth Science Reviews* 2002, 58: 163~231
- Zhong Jianhua, Wen Zhifeng. Paleogene and early Neogene lacustrine reefs in the western Qaidam Basin, China. *Journal of the Geological Society of China* 2004, 78(3): 736~743
- Garrett P. Phanerozoic stromatolites: Noncompetitive ecological restriction by grazing and burrowing animals. *Science* 1970, 169: 171~173
- 钱凯, 王淑芬. 济阳坳陷下第三系礁灰岩及礁灰岩油气藏. 石油勘探与开发, 1986, 13(5): 1~7 [Qian Kai, Wang Shufen. Low Tertiary reef limestone and the oil pool of such reef in Jiyang Depression. *Petroleum Exploration and Development* 1986, 13(5): 1~7]
- 范嘉松. 中国生物礁与油气. 北京: 海洋出版社, 1996. 275~291 [Fan Jiasong. The ancient organic reefs of China and their relations to oil and gas. Beijing: Ocean Press, 1996. 275~291]
- Dean W E, Eggleston J R. Comparative anatomy of marine and freshwater algal reefs, Bermuda and central New York. *Geology Society of America Bulletin* 1975, 86: 665~676
- Aiken J D. Classification and environmental significance of cryptalgal limestone and dolomites with illustration from the Cambrian and Ordovician of Southwestern Alberta. *Journal of Sedimentary Petrology* 1967, 37: 1163~1178
- Straccia F G, Wilkinson B H, Smith G R. Miocene lacustrine algal reefs, southeastern Snake River Plain, Idaho. *Sedimentary Geology* 1990, 67: 7~23
- Reid R P, Browne K M. Intertidal stromatolites in a fringing Holocene reef complex, Bahamas. *Geology* 1991, 19: 15~18
- 吴花果, 李纯, 钱峥. 义东油田大 8#4 块咸化湖泊生物礁储集层特征. 石油勘探与开发, 2003, 30(4): 43~46 [Wu Huaguo, Li Chun, Qian Zheng. Saline lacustrine biohermal reservoir characters in Block Da 8#4 of Yidong Oilfield, East China. *Petroleum Exploration and Development* 2003, 30(4): 43~46]
- Frances G, Straccia *et al*. Miocene lacustrine algal reef, southwestern Snake River Plain, Idaho. *Sedimentary Geology* 1990, 67: 7~23
- 孙岩, 沈安江, 朱国华. 柴达木盆地跃进地区藻丘灰岩储层特征. 沉积学报, 2002, 20(1): 61~69 [Sun Yan, Shen Anjiang, Zhu Guohua. Algal mound limestone reservoir features of Yuejin area, Qaidam Basin. *Acta Sedimentologica Sinica* 2002, 20(1): 61~69]
- Gherardi D F M. A windward coralline algal ridge on Rocas Atoll, Atlantic Ocean. *Journal of the International Society for Reef Studies* 1995, 14(1): 24~34
- Litter M M, Litter D S. Living stromatolites built by the cyanobacterium *Schizothrix gebekensis* from enduring modern reef structures. *Journal of the International Society for Reef Studies* 2001, 19: 252~258
- Paul Blanchon, Brian Jones. Hurricane control on shelf edge reef architecture around Grand Caym. *Sedimentology* 1997, 44: 479~506
- 王多云, 李凤杰, 王峰. 储层预测和油藏描述中的一些沉积学问题. 沉积学报, 2004, 22(2): 193~197 [Wang Duoyun, Li Fengjie, Wang Feng. Some sedimentological problems on reservoir prediction and oil pool characterization. *Acta Sedimentologica Sinica* 2004, 22(2): 193~197]
- Soja Constance M, Arma I. Coeval development of Silurian stromatolite reefs in Alaska and the Ural Mountains: Implications for paleogeography of the Alexander terrane. *Geology* 1997, 25(6): 539~542
- Braga Juan C, José M. Internal structure of segment reefs, Halimeda algal mounds in the Mediterranean. *Miocene Geology* 1996, 24(1): 35~38
- Rasmussen K A, Macintyre I G, Pruefert L M. Modern stromatolite reefs fringing a back-reef coastline, Chetumal Bay, Belize. *Geology* 1993, 21(3): 199~202
- 赵贤正, 陈子焯, 陈洪德, 等. 柴达木盆地西部地区第三系湖相藻(蓝细菌)灰岩储层成因类型. 沉积学报, 2004, 22(2): 216~224 [Zhao Xianzheng, Chen Ziliao, Chen Hongde, *et al*. Genetic types of Tertiary lacustrine algal (cyanobacteria) limestone reservoirs in the western Qaidam Basin. *Acta Sedimentologica Sinica* 2004, 22(2): 216~224]
- 张德武, 冯有良, 邱以钢, 等. 东营凹陷下第三系层序地层研究与隐蔽油气藏预测. 沉积学报, 2004, 22(1): 67~72 [Zhang Dewu, Feng Youliang, Qiu Yigang, *et al*. Lower Tertiary sequence stratigraphy study and the forecast of subtle reservoir in Dongying Depression. *Acta Sedimentologica Sinica* 2004, 22(1): 67~72]
- Abu Dhabi Emirate. Coralline algal reef flat, trochoid, southern Arabian Gulf. *Journal of the International Society for Reef Studies* 1993, 12(1): 12~18

# The Study on the Palaeogene Lacustrine Reefs in Jiyang Sag Eastern Shandong Province

LI Yong<sup>1 2</sup> ZHONG Jian-hua<sup>1 3</sup> WEN Zhi-feng<sup>3</sup> WANG Hai-qiao<sup>3</sup>

1(Guangzhou Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences Guangzhou 510640)

2(Postgraduate School of the Chinese Academy of Sciences Beijing 100039)

3(Earth Science and Information College Petroleum University Dongying Shandong 257061)

**Abstract** The reefs mainly constructed by algae and with high production reservoir for oil and gas are developed in several areas of Jiyang Sag in the form of composite deposition, that is reef core, fore reef and back reef. Taking into account of the biogenic components, the algal dolomite is the main component of algal reefs, consisted of *Caldosiphonia sinensis*, *Serpula shandongensis* etc., and be of favorable storage capability. Based on the lithological characteristics of reef rocks, the reef types can be divided into algal reefs, algal reefmounds and algal biostrones, among which the algal reefs are of the best reservoir property. Dolomitization, consortium cementation, atmosphere seepage corrosion and deep embedding effect have great influence on the property of reef reservoir. The reef reservoirs are developed mainly in the neighboring structural platform or basin, according to the matching relation of structure, lithology and stratum, reef reservoirs can be divided into reef stratum, fault block lithology and lithology types.

**Key words** Jiyang Sag reef lithology rock reservoir