

文章编号: 0253-2697(2013)04-0701-11 DOI:10. 7623/syxb201304010

# 苏北盆地金湖凹陷碳酸盐岩沉积特征及演化模式

邵先杰<sup>1</sup> 王彩凤<sup>1</sup> 黄 伟<sup>2</sup> 钟思瑛<sup>2</sup> 刘金华<sup>2</sup> 廖光明<sup>2</sup> 陈 军<sup>2</sup>

(1. 燕山大学石油工程系 河北秦皇岛 066004; 2. 中国石化江苏油田分公司 江苏扬州 225012)

**摘要:**根据对大量薄片和岩心的观察,金湖凹陷西斜坡碳酸盐岩的颗粒类型主要有生物碎屑、鲕粒、球粒、藻叠层石和陆源砂。生物碎屑含量丰富,以蠕虫动物中的环节动物门龙介虫科(Serpulidae)含量最高,占生物碎屑颗粒的 70% 以上,其他也见藻类、介形虫、腕足、腹足、硅藻、有孔虫、苔藓等化石。生物数量虽然比较多,但种属单调,耐盐度比较窄,为半咸水海洋生物组合。微量元素硼的质量分数平均为  $77.6 \times 10^{-6}$ ,硼与镓的比值(B/Ga)平均为 3.6,也显示为半咸水环境。结合沉积物特征、生物组合和特殊矿物分析,认为金湖凹陷在古新统阜宁组二段第Ⅱ油组(E<sub>1</sub>f<sub>2</sub><sup>2</sup>)沉积时期,发生了海侵或与海洋有通道沟通、具有半咸水潟湖环境特征。水体清澈,构造活动相对平静,湖盆沉降和沉积速率缓慢且补偿适中,因此在西斜坡沉积了一套厚度为 10~20 m、分布广阔的碳酸盐岩。根据颗粒类型和沉积特征,划分出 4 种沉积相带,包括陆源碎屑-碳酸盐混合相、鲕粒滩相、生物碎屑滩相、泥晶灰岩相,各相带在纵向和横向出现有规律的交替分布。生物碎屑灰岩溶孔发育,含油气丰富,已作为产能接替区投入了开发,并取得了一定效果。

**关键词:**碳酸盐岩;鲕粒;生物碎屑灰岩;演化模式;金湖凹陷

中图分类号:TE 112.2

文献标识码:A

## Sedimentary characteristics and evolutionary patterns of carbonates in Jinhu depression, Subei Basin

SHAO Xianjie<sup>1</sup> WANG Caifeng<sup>1</sup> HUANG Wei<sup>2</sup>  
ZHONG Siying<sup>2</sup> LIU Jinhua<sup>2</sup> LIAO Guangming<sup>2</sup> CHEN Jun<sup>2</sup>

(1. Department of Petroleum Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;  
2. Sinopec Jiangsu Oilfield Company, Yangzhou 225012, China)

**Abstract:**Based on observations of a large number of cast thin sections and rock cores, grain types of carbonates in the west slope of the Jinhu depression were identified to be mainly composed of bioclast, oolite, spherulite, algal stromatolite and arenite. Of which bioclast is abundant and predominated by Annelida Serpulidae of vermes, which account for over 70 percent of the bioclast. And the other bioclast consists of algal, ostracod, brachiopod, gastropod, diatom, foraminifera and moss fossils. Although the amount of organisms is large, their species, composed mainly of brackish halobios, are relatively monotonous with narrower salt tolerance. The mass fraction of boron in microelements averages  $77.6 \times 10^{-6}$  and the ratio of boron to gallium averages 3.6, indicating a brackish environment. The combination of sedimentary characteristics with analyses of organism assemblages and special minerals indicated a feature of a brackish lagoon environment as well, suggesting transgression or channels connecting with ocean during the deposition of the E<sub>1</sub>f<sub>2</sub><sup>2</sup> interval in the Jinhu depression. At that time, a suite of carbonates with 10~20 m in thickness was deposited widely in the west slope, indicating clear waters, relatively tranquil tectonic activities, slow lake-basin subsidence and deposition rate, and moderate compensation. Based on grain types and depositional characteristics, this suite of carbonates can be classified into four different sedimentary microfacies, i. e. mixed facies of terrigenous clastics and carbonates, oolite beach facies, bioclastic beach facies and cryptite facies. Vertically and horizontally each facies appears alternately. Dissolved pores are well-developed in bioclastic limestones which contain plenty of hydrocarbons. These carbonate reservoirs have been developed as a block of production succession in the Jinhu depression and certain deliverability has been obtained.

**Key words:**carbonate; oolite; bioclastic limestone; evolutionary pattern; Jinhu depression

自 20 世纪 20 年代在碳酸盐岩中零星发现油气藏之后<sup>[1]</sup>,经过地质学家们的不断探索,到 1945 年,在碳酸盐岩储集层中又相继发现了大批油气藏<sup>[2]</sup>,自此,碳酸盐岩油气储集层在世界油气储集层分布中占有重要

地位,成为油气勘探的一个重要方向<sup>[3-5]</sup>。中国东部地区,特别是渤海湾盆地广泛分布着碳酸盐岩储集层<sup>[6]</sup>。随着砂岩储层含水率的上升,开发效果变差,原来较难开采的碳酸盐岩油藏作为接替资源,越来越受到

基金项目:国家重大科技专项(2011ZX05038)资助。

第一作者及通信作者:邵先杰,男,1964 年 2 月生,1988 年获中国地质大学(武汉)学士学位,2004 年获中国地质大学(北京)博士学位,现为燕山大学石油工程系教授,主要从事油藏描述、油气田开发、煤层气工程方面的教学与科研工作。Email:shaonianjie6@qq.com

重视。苏北盆地金湖凹陷西斜坡古新统阜宁组阜二段( $E_1f_2$ )发育了一套厚度为 10~20 m、分布广泛的生物碎屑灰岩,在有利的圈闭中含油气丰富,具有工业开采价值<sup>[7]</sup>。

江苏油田于 1991 年 4 月开始对金湖凹陷西斜坡的范庄碳酸盐岩油田投入试采,由于湖盆碳酸盐岩储层孔隙发育存在不均一性,厚度变化大,纵向、横向连通性差,注水效果不明显,生产中表现出的特点是:常规投产后产能比较低,经过酸化、压裂等措施后产量一般可以提高 3 倍以上;初期产量高,但稳产时间短,递减速度快。截至 2011 年 12 月,共有油井 10 口,产油量在 1994 年达到高峰,为 8 650 t/a,采油速度 0.753%,之后进入递减期,维持在约 3 500 t/a,采油速度 0.305%。造成生产效果不理想的主要原因是:对储层的类型、分布规律、储层性质等认识不清,开发方案针对性不强,措施不到位。

由于受湖盆碳酸盐岩储层发育规模小和产能低的影响,关于湖盆碳酸盐岩的研究资料比较少并且也不系统和深入<sup>[8]</sup>。特别是对于苏北盆地碳酸盐岩的研究也存在分歧和争议。张国栋等认为苏北盆地在古近纪曾经多次遭受海侵,碳酸盐岩的形成与海侵有关,主要证据是地层中存在有孔虫化石<sup>[9]</sup>,并认为有孔虫完全是海洋生物,内陆湖盆中不会有有孔虫生物。但李守军等认为,在中国西部现代盐湖中发现了有孔虫生物,有孔虫化石仅仅是盐度的指标,而非单一指示海洋环境<sup>[10]</sup>,认为苏北盆地古近系中有孔虫的生活环境是陆相咸水湖泊<sup>[10]</sup>。笔者对苏北盆地金湖凹陷大量薄片资料进行了观察和生物碎屑颗粒鉴定,分布最多的是蠕虫动物中的环节动物门龙介虫科(Serpulidae),其他化石有藻类、介形虫、腕足类、腹足类、硅藻、有孔虫、苔藓等。根据生物组合、沉积物特征、微量元素、特殊矿物等资料分析,认为在阜宁组阜二段第Ⅱ油组( $E_1f_2^2$ )沉积时期发生了海侵或曾经与海洋沟通,金湖凹陷转化为半咸水湖,具有潟湖环境的特征。分析了西斜坡碳酸盐岩微相类型、沉积特征以及控制因素,在此基础上建立了沉积演化模式,以期对该区以及中国东部含油气盆地类似的碳酸盐岩储集层的滚动勘探开发提供依据。

## 1 区域地质背景

区域上金湖凹陷是苏北盆地内部最大的一个次级凹陷,位于苏北盆地中西部。北部以建湖隆起与洪泽凹陷相隔,东与柳堡低凸起相连,南部以菱塘桥凸起与高邮凹陷相隔,西至张八岭隆起(图 1),面积 5 500 km<sup>2</sup>。金湖凹陷是在晚白垩世仪征运动和新生

代喜马拉雅期吴堡运动作用下形成的南断北超的箕状断陷盆地。受南部边界 NE 向断层——杨村断裂的控制,凹陷总体上呈 NE 向展布,由于长期受南部边界断层拉张活动的影响,凹陷东南深西北浅,东南部为断阶带,中部为深洼带,西北部为斜坡带(习惯称西斜坡)。

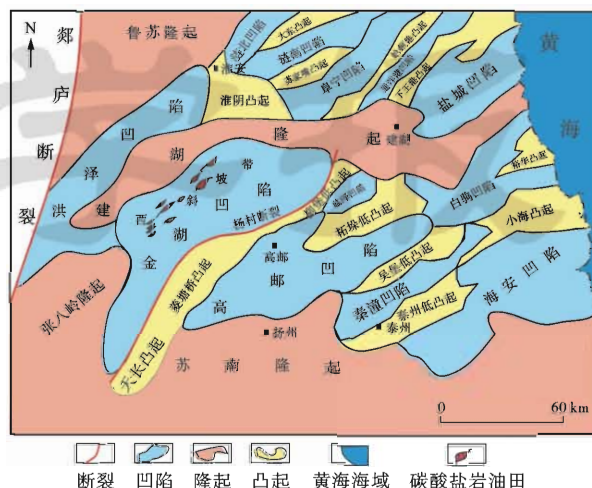


图 1 金湖凹陷区域构造背景

Fig. 1 Structural location of Jinhu depression

受区域构造运动的控制,盆地经历了 3 个发育阶段,包括形成期、拉张断陷期与坳陷期<sup>[11]</sup>。

(1) 形成期:在白垩纪早期,由于太平洋板块向北俯冲,引起了大陆地壳 NW—SE 方向松弛,地壳形成拉张应力环境,郯庐断裂由左旋扭动转变成右旋扭动,导致下扬子区应力场由之前的挤压转变为拉张—走滑,从而造成了苏北盆地的沉降,在该区域称作仪征运动。这一时期自上而下发育了赤山组( $K_2c$ )、浦口组( $K_2p$ )(图 2),沉积了一套含膏盐的红色地层建造。

(2) 拉张断陷期:晚白垩世—古新世的吴堡运动使杨村断裂活动加剧,盆地拉张断陷,快速下沉。这一时期自上而下发育的地层为始新统三垛组( $E_2s$ )和戴南组( $E_2d$ )、古新统阜宁组( $E_1f$ )、上白垩统泰州组( $K_2t$ )(图 2)。由于受构造间歇性活动的影响,经历了多次沉积基准面的升降旋回,形成了多旋回的河流三角洲—湖泊沉积体系,曾多次发生间歇性海侵。

(3) 坳陷期:古近纪晚期的三垛运动后,盆地由断陷进入坳陷期,变得比较平缓,这一时期沉积的盐城组( $Ny$ )发育了一套河流—冲积平原相。

金湖凹陷中生界、新生界沉积厚度超过了 7 km,目的层段是古新统阜宁组二段(简称为阜二段),阜二段自上而下划分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 3 个油组,其中Ⅲ油组( $E_1f_2^3$ )是以滨浅湖滩坝和滩砂沉积为主;Ⅱ油组

( $E_1f_2^2$ )为浅湖(潟湖)碳酸盐岩沉积,沉积末期发生了大面积的湖侵,碳酸盐岩沉积结束;Ⅰ油组( $E_1f_2^1$ )为深湖泥岩沉积,也是凹陷沉降幅度较大时期。在阜二段Ⅱ油组( $E_1f_2^2$ )沉积时期,发生了海侵,由于气候、水

深、含盐度等环境适宜,生物繁盛,沉积了一套碳酸盐岩,厚度为10~20 m,分布宽度达20 km,以生物碎屑灰岩为主,分布少量鲕粒灰岩、砂质灰岩、泥晶灰岩,并且在部分岩相中孔隙较发育,具有比较高的油气产量。

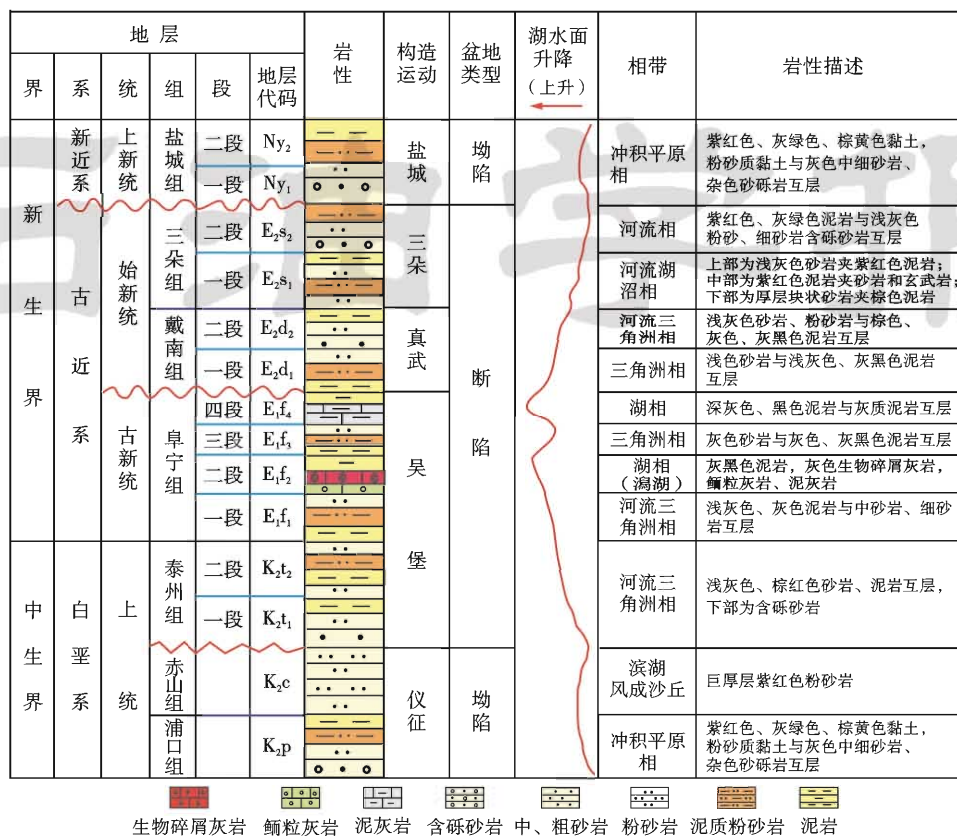


图2 金湖凹陷地层层序及沉积演化柱状剖面

Fig. 2 Stratigraphic sequence and sedimentary evolution in Jinhu depression

## 2 碳酸盐岩颗粒类型及特征

根据大量岩心资料和微观铸体薄片的观察,阜二段Ⅱ油组( $E_1f_2^2$ )碳酸盐岩虽然厚度不到20 m,但由于受构造、气候、水深和盐度的影响,颗粒类型比较丰富,主要有鲕粒、生物碎屑颗粒、球粒、藻叠层石和陆源碎屑颗粒等。

### 2.1 鲕粒

鲕粒个体一般小于1.0 mm[图3(a)],很少有超过1.5 mm,含量为20%~75%。以正常鲕为主,见放射鲕、放射一同心圆鲕、表皮鲕、藻鲕、变形鲕等。

正常鲕呈同心圆状、球形和椭球形,鲕核多为生物碎屑和陆源砂,鲕核直径与包壳厚度比为1/2~1/6,包壳由微晶方解石和含有机质比较高的暗色纹层交替组成[图3(b)与图3(c)],在磨光面上滴酸后,显微镜下观察呈差异腐蚀。部分鲕粒被微晶化,同心圆结构变模糊,但仍能辨别出内部的原始结构。

放射鲕呈放射状,形似“菊花”[图3(b)与图3(c)],

球形、近球形。鲕核多为生物碎屑,包壳由柱状的微晶方解石构成,鲕核直径与包壳厚度比为1/3~1/6。

放射一同心圆鲕为过渡类型,内包壳呈放射状,由放射状生长的方解石组成,外包壳由同心圆状的微晶方解石组成[图3(b)与图3(c)]。

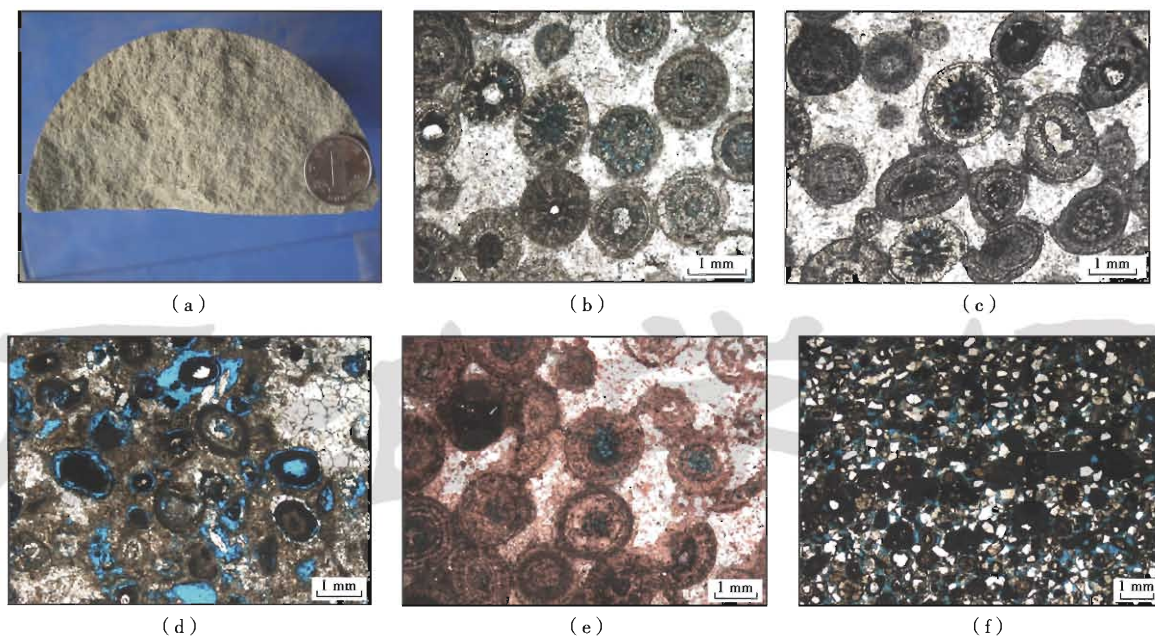
藻鲕的个体相对较小,多为椭球状,鲕核多为藻屑或生物碎屑,有机质含量高,包壳圈层数少,单个圈层厚度大。内部圈层为有机质,外部圈层为微晶方解石,所以外圈层多被溶蚀,形成环带状溶孔[图3(d)]。

变形鲕是由于受压实作用的影响<sup>[12]</sup>,鲕粒塑性变形拉长,两端变尖;另一种是成岩后期受构造应力的作用<sup>[13]</sup>,鲕粒破碎变形,甚至出现包壳与核剥离的现象[图3(e)]。

表皮鲕多呈椭球状、不规则状,其形状受鲕核影响较大,鲕核多为较大的陆源砂颗粒,包壳一般只有1~2层[图3(f)],鲕核直径与包壳厚度比为1/1~3/1。

溶蚀作用受成分和结构控制<sup>[14]</sup>,方解石多被部分溶蚀,有机质含量高的部分残留,因此溶蚀孔多呈同心圆状、环带状、放射状[图3(d)]。





(a) 鲕粒白云岩, 鲕粒小于 0.5 mm, 含量 40%, 分布均匀, 分选好, 高 7 井, 1734.44~1738.48 m; (b) 同心圆鲕、放射鲕, 范 13 井, 1409.34 m; (c) 放射鲕、同心圆鲕、变形鲕, 鲕粒压扁变形, 范 13 井, 1409.34 m; (d) 藻鲕, 个体小, 西 1 井, 1567.10 m; (e) 变形鲕, 挤压变形、破碎, 包壳剥离, 范 13 井, 1409.34 m; (f) 表皮鲕, 砂质灰岩, 颗粒由陆源砂和鲕粒组成, 钙质胶结, 溶孔发育, 高 7-7 井, 1774.30 m。

图 3 鲕粒灰岩、砂质灰岩中鲕粒形态特征

Fig. 3 Characteristics of oolite in oolitic limestone and sand-clastic limestone

## 2.2 生物碎屑

研究区的生物碎屑颗粒主要为蠕虫动物化石, 也见藻化石、介形虫化石、腕足碎屑化石、腹足化石、硅藻化石、有孔虫和苔藓化石等。

(1) 蠕虫动物化石: 主要以环节动物门中的龙介虫科(Serpulidae)为主, 个体呈管状, 壳管长一般为 5~20 mm, 直径为 2~5 mm。外表面平滑或带比较浅、细的横纹饰, 纹饰宽度为 0.5~1.0 mm, 纹饰的深度为 0.05~0.10 mm。壳管无根, 呈锥状、柱状、弯曲状[图 4(a)~图 4(c)], 壳壁厚度为 0.3~1.0 mm。在磨光面上可以看出, 壳管致密, 管腔的结构较疏松。壳管由高镁方解石、文石或方解石构成, 颜色多较浅, 滴酸起泡剧烈, 也可能全由几丁质或几丁质和磷酸盐混合构成, 这类颜色较深, 滴酸后起泡较弱。

薄片观察, 横切面呈圆形或椭圆形, 有些被挤压完全变形, 甚至破碎。内外表面为明显的管状, 壳管截面呈双层壳壁结构: 内壳为同心圆状的微晶粒状结构, 宽度均匀; 外壳颜色深, 微粒更细, 宽度不均匀, 表面略显凹凸不平[图 4(d)~图 4(f)]。管腔被微晶方解石充填, 暗色多为有机质含量较高部分。部分颗粒的体腔孔、粒间和粒内溶蚀孔发育。

化石中除了龙介虫科外还有蛭龙介虫科和双栉虫科。龙介虫科包括锥状中华角管虫(*Sinoditrupe conica*)、簇状簇管虫(*Accerotruba aggregata*)、四沟耶

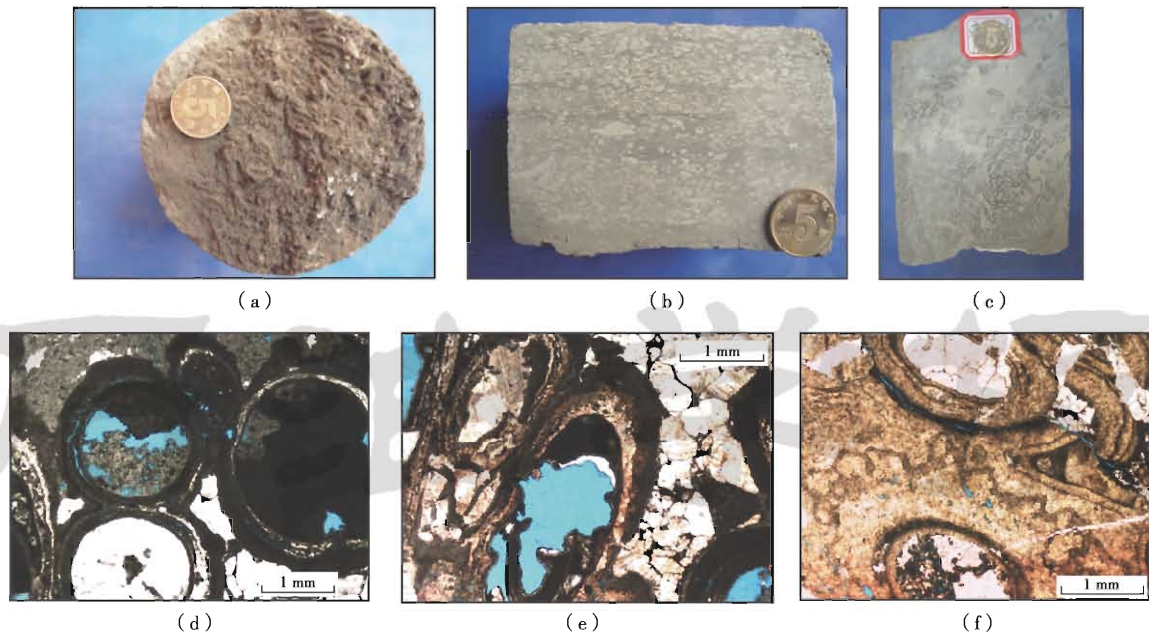
雷虫(*Jereminaella quadrisulcata*)、江苏右旋虫(*Spirorbis jiangsuensis*)等; 蛭介龙科(Terebellidae)有金湖蛭介龙(*Terebella jingwuensis*); 双栉虫科(Amphictenidae)有规则筛管虫(*Ethmonaria regularis*)。

蠕虫生物通常生活在硬底结壳上<sup>[15-16]</sup>, 在微超盐度环境中可形成小型礁块<sup>[17]</sup>。研究区的龙介虫壳管大多为孤立个体, 也有形成交生的集合体, 相邻壳管之间相互粘附着[图 4(a)], 正是基于这样的结构, 结壳龙介虫可以形成细小却十分稳固的抗波浪侵蚀的点礁。龙介虫属海生、管穴固着生活的动物。

(2) 藻类化石: 主要以绿藻门中的米齐藻和叶状藻为主。米齐藻属于粗枝藻科的一种<sup>[15]</sup>, 中空部分为髓腔, 被方解石晶体颗粒部分充填, 茎有 3 层结构: 内层呈同心圆状[图 5(a)与图 5(b)]; 中层可见残留的粗枝藻科典型的辐射状维管束, 环状整齐排列; 外层由略呈放射状的微晶方解石构成。有些个体受到外力的挤压变形, 维管也变形。粗枝藻指示暖海环境<sup>[16]</sup>。

叶状藻, 呈叶片状、条带状、薯片状[图 5(c)], 内部格子状组织保存较好。粒内溶孔极其发育。

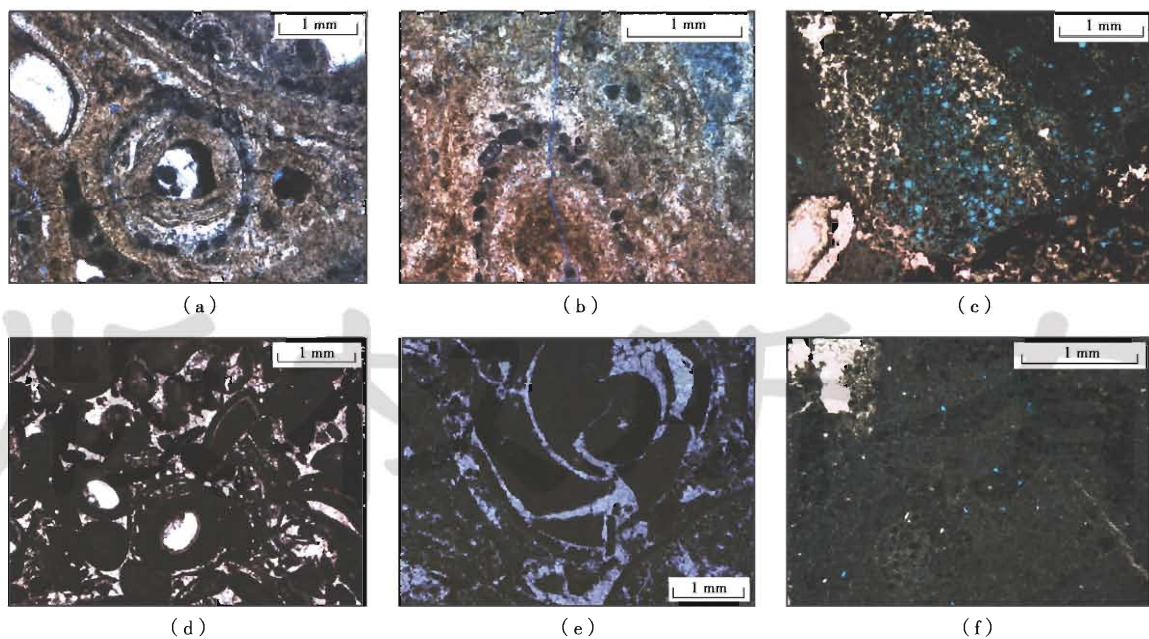
(3) 介形虫化石: 有破碎的, 也有保存相对完整的, 略呈定向排列, 部分个体壳壁的两瓣完整, 呈铰合状, 壳壁为微晶方解石, 体腔被亮晶方解石充填或被有机质含量高的隐晶质充填。



(a)生物碎屑灰岩,龙介虫化石,含量超过70%,簇状分布,孔隙发育,油浸,高6-8井,1906.59 m;(b)生物碎屑白云岩,龙介虫化石,含量约30%,颗粒呈长柱状,椭圆状,长3~5 mm,顺层分布,西1井,1524.74 m;(c)生物碎屑灰岩,龙介虫化石,含量超过45%,壳管剖面呈锥状、柱状、弯曲状,截面呈圆状、椭圆状,壳壁厚度0.3~1.0 mm,高2井,1715.82 m;(d)龙介虫化石,横切面呈圆形,内外表面为管状,壳管截面呈双层壳壁结构,内壳为同心圆状的微晶粒状结构,宽度均匀,外壳颜色深,微粒更细,宽度不均匀,表面略显凸凹不平。管腔被微晶方解石充填,暗色多为有机质含量较高部分,西1井,1531.10 m;(e)龙介虫化石被挤压完全变形,甚至破碎,粒间为亮晶方解石胶结,体腔内溶孔发育,西1井,1531.10 m;(f)龙介虫化石被挤压呈椭圆形,破碎变形,粒间和粒内均被白云石充填,胶结物含量高,孔隙不发育,南1井,1467.50 m。

图4 生物碎屑灰岩中的龙介虫科化石

Fig. 4 Serpulidae fossil in bioclastic limestone



(a)绿藻门中的米齐藻化石,高14井,1999.02 m;(b)绿藻门中的米齐藻,挤压成椭圆状,高14井,1999.02 m;(c)叶状藻,薯片状,内部格子状组织保存较好,粒内发育,高7-7井,1798.16 m;(d)化石碎屑丰富,有腕足动物的棘刺、介形虫等,高6-8井,1903.20 m;(e)腹足化石,范13井,1405.39 m;(f)硅藻化石,范21井,1485.21 m。

图5 藻类、腕足、腹足、介形虫、硅藻化石碎屑

Fig. 5 Fossil debris of algae, brachiopoda, gastropod, ostracoda and diatom



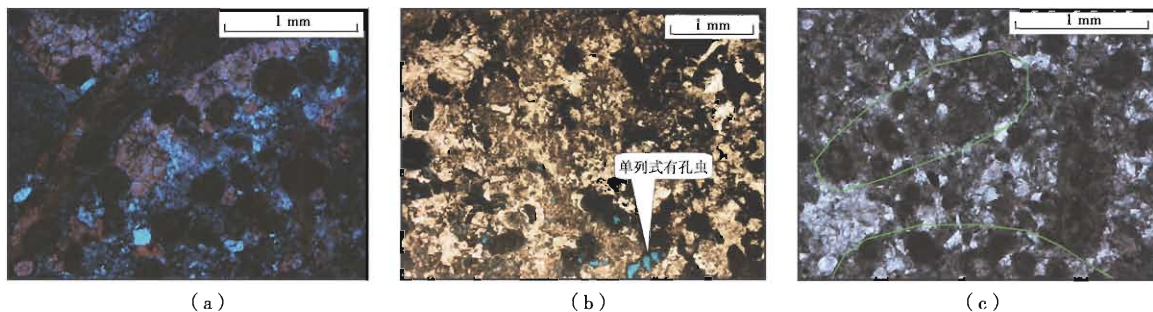
(4) 腕足碎屑化石: 主要保存有腕足动物的棘刺[图 5(d)], 具有明显的中心空腔和同心双层壳壁结构, 内层厚度大, 同心圆状, 外层厚度薄, 呈放射状。同龙介虫化石的区别是壳壁厚度大, 中心空腔直径相对小。腕足类是海生底栖、单体群居无脊椎动物<sup>[16]</sup>, 在低盐度和超盐度中都能生存<sup>[15]</sup>。

(5) 腹足化石: 椭圆形, 壳小, 螺旋状, 由 4~5 个螺环构成[图 5(e)]。螺壳是一个不分隔的螺旋空壳(这也是区别于有孔虫的一个特征), 由内向外空间越来越阔。壳壁主要为微晶白云石, 腔内为隐晶质, 壳壁内圈厚度薄, 最外圈厚度明显加大。

(6) 硅藻化石: 个体较小, 单圆形[图 5(f)], 筛孔呈放射状排列, 内部筛孔直径大, 向外逐渐减小。存在一个明显的外壳(这一特征区别于有孔虫中的环圈虫), 外壳厚度薄, 由微晶或隐晶方解石构成, 呈放射状。硅藻化石多分布在隐晶质碳酸盐岩、泥灰岩以及湖相泥岩中。

(7) 有孔虫化石: 由于有孔虫个体小, 镜下放大倍数小, 不太容易识别, 只观察到 3 种有孔虫。刀马属有孔虫巨大的无孔瓷状钙质隔壁呈琥珀色、微红色[图 6(a)], 房室环绕状排列。单列底栖有孔虫的房室软组织腐烂后留下串珠状孔隙[图 6(b)]。双列有孔虫不仅选择碳酸盐岩颗粒, 而且也选择了细小的石英颗粒构成了壳壁和隔壁[图 6(c)]。

(8) 苔藓化石: 观察到的主要是裸唇纲(*Gymnolaemata*), 薄片显示的是一个弦切面, 外形呈叶片状, 能识别出枝、横枝、窗孔、虫室[图 7(a)]。卵圆形的大孔是窗孔, 小孔是虫室, 大部分被方解石充填后又部分溶蚀, 主要发育粒内溶孔。苔藓虫是一种水生固着生活的群体动物, 大部分生活在海洋中, 其骨骼多为钙质, 容易保存化石。只有极少数生活在淡水中, 无硬体骨骼, 不能保存为化石<sup>[17]</sup>。



(a) 生物碎屑灰岩, 刀马属有孔虫横切面, 南 1 井, 1 463.70 m; (b) 单列式有孔虫, 房室已溶蚀成为孔隙, 南 1 井, 1 447.70 m; (c) 双列式有孔虫, 南 1 井, 1 463.70 m。

图 6 有孔虫化石碎屑

Fig. 6 Fossil debris of foram

### 2.3 球粒、似球粒及钙球

球粒和似球粒多与介形虫伴生, 分布在隐晶质灰岩和泥灰岩中, 呈球形、卵形、杆形和不规则的弯曲形[图 7(b)], 大小不均匀, 不受层理影响, 没有分选。有机质含量比较高, 呈暗色, 隐晶质。根据内部结构和形态特征分析, 认为以化学凝聚和生物成因的粪团粒为主。

钙球多分布在水体较深的泥灰岩层中<sup>[17]</sup>, 为灰白色, 颗粒细小, 呈圆球形、椭圆形[图 7(c)]、长条形, 主要由微晶方解石或白云石构成, 多沿纹层分布, 以原生为主。由于颗粒太小, 增大了成因解释难度, 推测可能是一些生物壳壁上的碎屑颗粒和绿藻的生殖器官等。

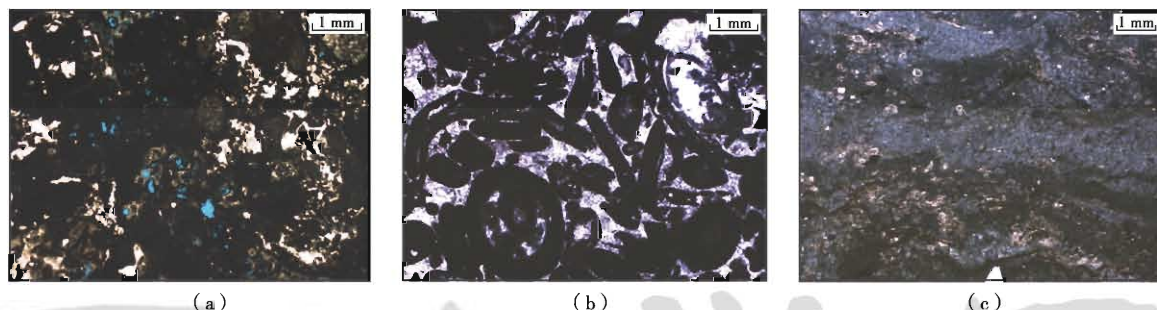
### 2.4 叠层石

叠层石是蓝绿藻等低等植物生命活动造成的、具有一定形态特征的生物沉积结构<sup>[18]</sup>。外形上有层状、

丘状、波状、变形状(图 8)。纹层清晰, 纹层厚度为 2~10 mm, 变化较大, 最大纹层厚度可以是最小纹层厚度 5 倍以上, 纹层颜色深浅呈周期性变化, 反映了季节性的变化, 深色部位有机质含量高, 是参与形成叠层石的生物活动旺盛期。由于构造运动的挤压, 常见纹层发生变形。纹层内部偶见一些细小的溶蚀孔, 但连通性差。虽然叠层石的形成与蓝绿藻有关, 但蓝绿藻化石颗粒细小<sup>[19]</sup>, 并不容易观察到。层状叠层石一般形成于海洋环境的潮间带<sup>[20]</sup>。

### 2.5 陆源碎屑

主要为石英颗粒, 少量长石, 粒度 0.01~0.10 mm, 次圆一次棱角状, 含量 10%~50%, 呈分散状分布在鲕粒及其他碳酸盐颗粒之间[图 3(f)]。粒间溶孔发育, 也见粒内溶孔。



(a) 苔藓化石,裸唇纲,叶片状,可见枝、横枝、窗孔、虫室,卵圆形的大孔是窗孔,小孔是虫室,高 7-7 井,1798.16 m;  
(b) 球粒、似球粒和介形虫化石伴生,球粒和似球粒呈圆形、卵形、杆形和不规则的弯曲形,一般没有内部结构,介形虫呈卵形,两瓣壳完整,呈铰合状,高 6-8 井,1903.20 m;(c) 钙球,颗粒细小,呈圆球形、椭圆形、长条形,无内部结构,多沿纹层分布,范 1 井,1418.20 m。

图 7 苔藓化石、球粒、似球粒及钙球的形态特征

Fig. 7 Morphological characteristics of moss fossil, spherulite, peloid and calcisphere

### 3 沉积相带及特征

以显微镜和岩心观察为基础,综合测井及化验分析等资料,把研究区碳酸盐岩划分了 4 种相带,包括陆源碎屑-碳酸盐混合相、鲕粒滩相、生物碎屑滩相和泥晶灰岩相。

#### 3.1 陆源碎屑-碳酸盐混合相

混合相是由滨湖到浅湖碳酸盐岩相的过渡地带<sup>[21]</sup>,岩性为砂质灰岩,见纹层比较细的波状交错层理、波状层理,滴酸起泡严重。微观上,明显可以看到鲕粒与石英颗粒混杂[图 3(f)],胶结物为灰质,粒间溶孔发育。鲕粒和陆源砂的比例是变化的:当水体浅时,陆源砂含量增加,鲕粒和灰质含量降低;当水体逐渐加深时,陆源砂含量降低,灰质含量增加。过渡相纵向分布在  $E_1f_2^2$  油组 4 小层的下部,碳酸盐岩与砂岩的过渡段,厚度一般为 2~3 m,平面上宽度一般为 300~1000 m,大部分层段物性比较好,是有效储层。

#### 3.2 鲕粒滩相

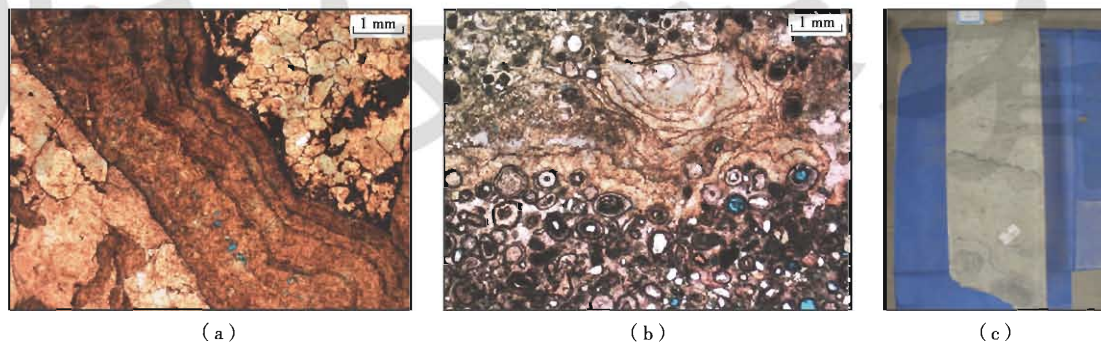
鲕粒滩主要由亮晶鲕粒灰岩组成,发育在  $E_1f_2^2$  油组下部的 4 小层和 3 小层,厚度为 2~4 m,岩石呈灰色、灰白色,见块状和波状层理,局部夹叠层石灰岩薄层[图 8(b)]。

同正常海相鲕粒灰岩相比,该地区的鲕粒颗粒小,含量低,基质含量高,层薄,这可能与湖相水动力相对弱,环境不稳定,更替快有关。

鲕粒灰岩中大部分不是有效储层,只有当鲕粒含量超过 60%、溶蚀孔比较发育、孔隙之间连通性比较好时,才能成为有效储层。

#### 3.3 生物碎屑滩相

生物碎屑滩主要由生物碎屑灰岩组成,发育在  $E_1f_2^2$  油组顶部的 1、2 小层,厚度 5~10 m。颜色多为灰色、深灰色,颗粒多呈柱状、球状。主要以蠕虫生物碎屑为主,含有少量的藻类、介形虫、腕足、有孔虫和其他生物的介壳化石。



(a) 叠层石,层状,上下为结晶白云石,南 1 井,1467.50 m;(b) 叠层石,丘状,分布在鲕粒灰岩中,高 7-7 井,1798.67 m;(c) 叠层石,呈丘状、层状、波状,范 13 井,1401.14 m。

图 8 叠层石的宏观、微观形态特征

Fig. 8 Morphological characteristics of stromatolite in cast thin sections and rock cores



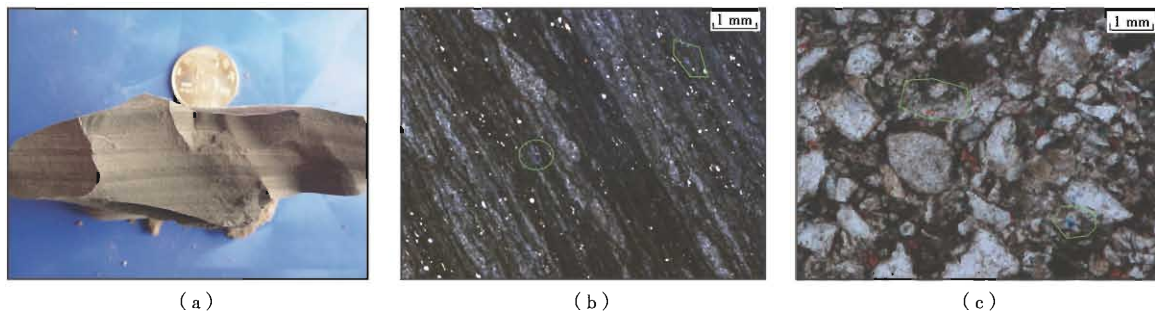
根据沉积环境能量和生物碎屑含量的多少以及保存状态,生物碎屑滩可进一步划分为 3 个沉积单元,分别为生物碎屑滩上边缘、生物碎屑滩坝、生物碎屑滩下边缘。生物碎屑滩上边缘是指生物碎屑滩水体最浅的边缘部位,生物碎屑颗粒含量一般小于 50%,通常 10%~30%,由于水体波动能量较高,碎屑颗粒常常沿层面定向排列[图 4(b)],隐晶质含量高,孔隙不发育。生物碎屑滩坝是指生物碎屑滩的主体部位,在该位置无论是水深、地势、光照条件、温度、盐度、水动力条件等都适合生物的生存和繁殖,生物密度高,死亡后遗体原地保存,几乎没有经过改造,生物碎屑呈簇状保存[图 4(a)]。生物碎屑颗粒含量一般高于 50%,通常可以达到 70%以上,生物体腔内溶孔和粒间溶孔发育,物性好,是主要的储集体。生物碎屑滩下边缘是指生物碎屑滩水体最深的边缘部位,由于水体较深,光照不足,温度低,生物数量和密度降低,生物碎屑颗粒含量一般为 10%~30%,水体比较平静,生物死亡后,遗体呈原

始状态保存,没有明显被波浪改造过的痕迹[图 4(c)],由于沉积时基质含量高,孔隙不发育,一般不能形成大面积的有效储层。

生物滩的发育受气候、构造、水深、盐度等条件影响大<sup>[22]</sup>,湖盆往往稳定性差,构造变动频繁,所以生物碎屑滩的单层厚度薄,一般只有 1~2 m。常常是生物碎屑滩上边缘、生物碎屑滩坝和生物碎屑滩下边缘,甚至与泥晶灰岩相反复交替,因此,岩心观察其含油层段中存在比较多的夹层条带。

### 3.4 泥晶灰岩相

泥晶灰岩相处于水体相对较深的部位,水体平静,岩石类型主要为泥晶灰岩和泥灰岩,见硅藻、介形虫、球粒以及从浅水带来的细小介壳碎屑。主要发育在  $E_1f_2^2$  油组顶部,  $E_1f_2^2$  内部也有发育。常与深湖泥岩呈互层状,灰色、深灰色,呈水平纹理,常见灰、白相间的纹理,这是由于季节变化造成的,纹理厚度 2~4 mm [图 9(a)],纹理比较细,说明当时水体较深,比较平静。



(a)深灰色泥晶灰岩,水平纹理,纹理厚度 2~4 mm,西 1 井,1 524.28 m;(b)条带状灰岩中见海绿石,呈浸染状分布在基质中,范 21 井,1 489.65 m;(c)在灰质砂岩中见海绿石,呈浸染状分布在胶结物中,高 3 井,1 990.59 m。

图 9 泥晶灰岩、海绿石矿物特征

Fig. 9 Characteristics of micritic limestone and glauconite mineral

## 4 沉积演化模式及控制因素

### 4.1 沉积演化模式

古生物化石主要为蠕虫管、绿藻、蓝绿藻、硅藻、介形虫、腹足类、腕足、有孔虫、苔藓等生物,虽然生物数量比较多,但种属单调,耐盐度比较窄,为典型的半咸水海洋生物组合<sup>[23]</sup>。 $E_1f_2^2$  油组硼质量分数为  $(50.7 \sim 105.8) \times 10^{-6}$ ,平均  $77.6 \times 10^{-6}$ ,硼镓比值(B/Ga)为 3.0~4.2,平均 3.6<sup>[9]</sup>,两参数均表明当时的水体含盐度低于正常海水,高于淡水湖,属于半咸水环境。

尽管国内一些学者认为内陆盐湖也会有有孔虫,但龙介虫、腕足、有孔虫、粗枝藻、苔藓虫化石以及叠层石同时存在于一套沉积地层中,说明这套碳酸盐岩具有海洋环境的特征<sup>[23]</sup>。另外,在条带状灰岩[图 9(b)]和灰质砂岩薄片[图 9(c)]见到海绿石矿物,呈翠绿色、淡绿色,浸染状分布在基质和胶结物中。

从生物组合、含盐度指标和海绿石矿物等分析,认为金湖凹陷在  $E_1f_2^2$  沉积时期发生过海侵或有通道与古黄海沟通,湖泊具有潟湖特征。

从早白垩世的仪征运动开始,金湖凹陷形成,到晚白垩世的吴堡运动,拗陷转化为断陷盆地。从上白垩统泰州组( $K_2t$ )到古新统阜一段( $E_1f_1$ )、阜二段( $E_1f_2$ )、阜三段( $E_1f_3$ ),沉积体系经历了河流—扇三角洲—河流三角洲—滨浅湖—潟湖—湖泊沉积体系的演化,构成了一个完整的湖进—海侵序列。在  $E_1f_2^3$  沉积末期,构造活动加剧,苏北盆地开始大范围快速沉降,东部古黄海与盆地内的次级凹陷沟通,发生大面积海侵。到  $E_1f_2^1$  顶部层段沉积时期,盆地达到最大沉降,处于欠补偿状态,甚至在西斜坡也沉积了一套厚度近 50 m 的深灰色、暗色泥岩。 $E_1f_2^2$  就是在盆地达到最大沉降之前,构造活动处于稳定沉降期,金湖凹陷由正常淡水湖转化为半咸水潟湖时期形成的。相邻的其



他次级凹陷在该时期也都沉积有生物碎屑灰岩,只是因凹陷规模和构造背景的差异,造成不同次级凹陷中生物碎屑灰岩的厚度、面积不同。

利用区域上的钻井资料,针对金湖凹陷西斜坡的古地形特征,建立了相应的沉积模式(图 10)。滨湖地区沉积了一套分选比较好,以细砂、粉砂岩为主的滩坝、滩砂体;随着海侵程度的加剧、水体的加深,进入混合相,沉积了一套砂质灰岩,多见波状层理、波状交错层理,相带比较窄。在浪基面之上,碎屑供应量逐渐减少,形成鲕粒滩相带,沉积了厚度为 2~4 m 的鲕粒灰岩,多见波状层理、块状构造,局部夹叠层石灰岩。随着水深的变化,水体更加清澈,温度适宜,适合蠕虫生物中环节动物和腹足、腕足、藻类等生物繁殖,形成了生物繁茂的

生物滩,生物死亡后遗体堆积,形成了一定厚度的生物碎屑灰岩。由于湖盆(潟湖)稳定性差,不同种类的对水体的深度、温度、水动力等环境因素要求比较严格,在最适宜的深度,生物大量繁殖,形成了较厚的生物碎屑堆积层,向浅部位和深部位厚度均减薄,生物碎屑滩呈坝状平行湖岸线分布。随着水体的进一步加大,逐渐过渡为泥晶灰岩相,沉积了一套灰色、深灰色泥晶灰岩、泥灰岩,发育水平纹理,多见硅藻、介形虫等生物化石。向深部位逐渐过渡为深湖泥岩。

研究区整体上为一比较典型的水进序列,不同类型的岩性和碳酸盐岩岩相构成了规律性明显的纵向序列。自下而上为滩砂、砂质灰岩、鲕粒灰岩、生物碎屑灰岩、隐晶质灰岩、泥灰岩、泥岩(图 11)。

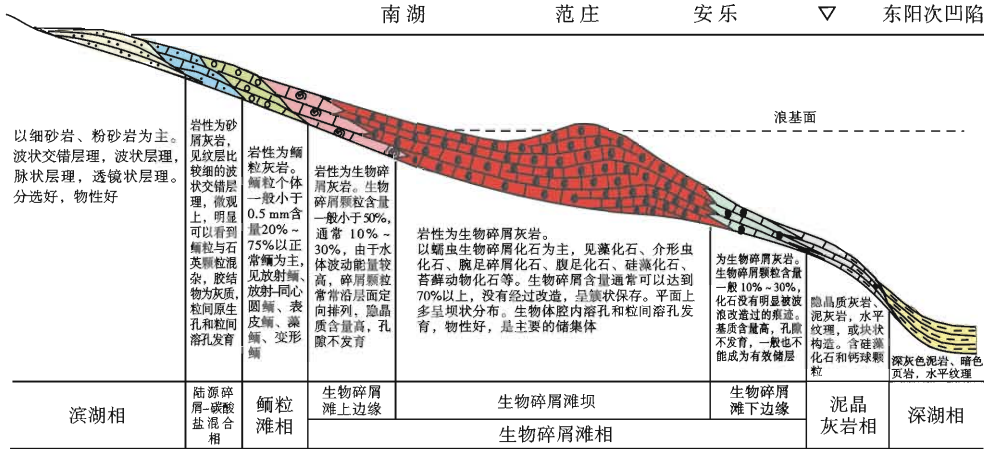


图 10 金湖凹陷阜二段碳酸盐岩沉积模式

Fig. 10 Carbonate deposition model of the 2nd Member of Funing Formation in Jinhu depression

4.2 控制因素

根据金湖凹陷碳酸盐岩沉积特征和分布规律的研究,认为湖盆碳酸盐岩的形成、沉积主要受以下几个地质因素控制。

(1) 海侵是金湖凹陷形成大规模生物灰岩的重要条件。虽然湖盆在一定条件下可以形成碳酸盐岩,但像金湖凹陷这样的小型断陷湖盆,如果没有与海洋沟通,就不会形成丰富、稳定的碳酸盐岩造岩生物群落,水体中很难持续稳定地提供高的碳酸盐产率,要形成大规模、具有储集性能的生物碎屑灰岩是比较困难的。

(2) 构造活动强度的影响。构造活动和缓,湖盆沉降与沉积作用处于均衡补偿条件下最有利于碳酸盐岩的形成。沉降速度过慢多形成薄层碳酸盐岩,往往以砂岩中的岩性夹层形式出现;沉降速度过快则形成欠补偿性的深水沉积。E<sub>1</sub>f<sub>2</sub>层段沉积时期,构造活动相对平静,湖盆沉降速率和沉积速度缓慢且补偿适中,因此形成了本区厚度较大的生物碎屑灰岩。

(3) 古地形的影响。金湖凹陷的碳酸盐岩主要分

布在西部缓坡区,东南部的陡坡带几乎没有分布。根据国内的研究,湖盆碳酸盐岩主要分布在盆地的缓坡区和水下古隆起区(如渤海湾盆地中的渤中 13-1 油田)。陡坡带坡降大,构造活动强烈,水深变化大,环境不稳定,陆岩碎屑物供应充分,一般不能形成有效的碳酸盐岩储层。某些湖盆的陡坡区也有碳酸盐岩分布,但相带窄,相变快,厚度薄,一般缺少生物碎屑灰岩。缓坡区地势平缓、开阔,构造活动相对稳定,水深波动小,适宜生物繁殖,多能形成宽度比较大、相带齐全、纵向上有一定厚度的碳酸盐岩储层。

(4) 水体清澈程度的影响。碳酸盐岩是原地沉积物,与陆源碎屑之间存在着相互消长的关系,当陆源碎屑颗粒物供应充分时,水体中的碳酸盐浓度往往比较低,不易形成碳酸盐岩沉积,因此碳酸盐岩的大量沉积还需要一个水体清澈的环境。金湖凹陷在 E<sub>1</sub>f<sub>2</sub>层段沉积时期,西斜坡几乎没有河流和三角洲发育,陆源碎屑颗粒供应量很少,水体清澈,为大面积的碳酸盐岩沉积创造了条件。

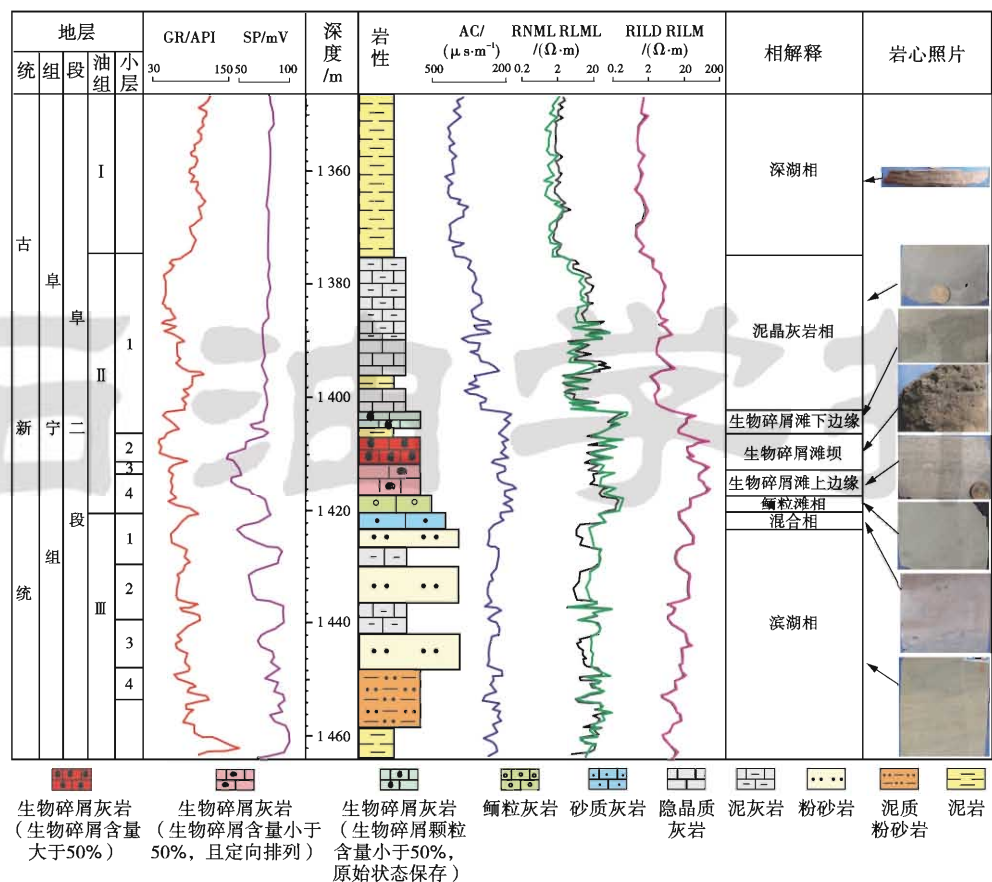


图 11 金湖凹陷碳酸盐岩垂向沉积序列

Fig. 11 Vertical sedimentary succession of carbonates in Jinhu depression

5 结 论

(1) 金湖凹陷的碳酸盐岩中生物碎屑颗粒含量丰富, 主要以蠕虫动物中的环节动物门龙介虫科(Serpulidae)含量最高, 占生物碎屑颗粒的 70% 以上, 也见有藻类、介形虫、腕足碎屑、腹足、有孔虫、硅藻、苔藓等化石。生物数量虽然比较多, 但种属单调, 耐盐度比较窄, 为半咸水的海相生物组合。

(2) 根据沉积物特征、生物组合、微量元素以及特殊矿物的分析结果, 认为金湖凹陷在  $E_1f_2^{2-2}$  层段沉积时期, 发生了海侵, 有通道与东部的古黄海沟通, 具有半咸水潟湖特征。陆源碎屑物供应量减少, 水体清澈, 构造活动相对平静, 湖盆沉降速率和沉积速度缓慢且补偿适中, 这些因素都为宽缓的西斜坡大面积沉积碳酸盐岩提供了适宜的条件。

(3) 根据碳酸盐岩颗粒类型和沉积特征, 划分出了 4 种相带, 包括陆源碎屑-碳酸盐混合相、鲕粒滩相、生物碎屑滩相、泥晶灰岩相, 各相带在纵向和横向出现有规律的交替分布。在生物碎屑滩沉积的生物碎屑灰岩, 厚度相对大, 面积广, 生物体腔内溶孔和粒间溶孔发育, 含油气最丰富, 是勘探开发的重点目标区段和层位。

参 考 文 献

[1] 白国平. 世界碳酸盐岩大油气田分布特征[J]. 古地理学报, 2006, 8(2): 241-250.  
Bai Guoping. Distribution patterns of giant carbonate fields in the world[J]. Journal of Palaeogeography, 2006, 8(2): 241-250.

[2] 林忠民. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层特征及成藏条件[J]. 石油学报, 2002, 23(3): 3-4.  
Lin Zhongmin. Reservoir characteristics and forming condition of Ordovician in Tahe Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(3): 3-4.

[3] 朱光有, 张水昌, 张斌, 等. 中国中西部地区海相碳酸盐岩油气藏类型与成藏模式[J]. 石油学报, 2010, 31(6): 871-878.  
Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Zhang Bin, et al. Reservoir types of marine carbonates and their accumulation model in western and central China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(6): 871-878.

[4] Balossino P, Pampuri F, Bruni C, et al. An integrated approach to obtain reliable permeability profiles from logs in a carbonate reservoir[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2008, 11(4): 8-9.

[5] Aynur Gecer Biiyukutku. Reservoir properties of Karaisah formation in the Adana Basin, Southern Turkey[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2009, 65(1/2): 11-12.

[6] 王英华, 周书欣, 张秀莲. 中国湖相碳酸盐岩[M]. 徐州: 中国矿



- 业大学出版社,1993:1-30.
- Wang Yinghua, Zhou Shuxin, Zhang Xiulian. Lacustrine carbonate rocks in China[M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 1993: 1-30.
- [7] 居春荣, 黄杏珍, 闫存凤, 等. 湖相碳酸盐岩在建立苏北盆地第三系层序地层格架中的作用[J]. 沉积学报, 2005, 23(1): 113-121.
- Ju Chunrong, Huang Xingzhen, Yan Chunfeng, et al. Role of lacustrine carbonate rock in establishment of sequence stratigraphy framework of Lower Tertiary in Subei Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(1): 113-121.
- [8] 王广利, 王铁冠, 张林峰. 济阳拗陷南洼陷湖相碳酸盐岩成烃特征[J]. 石油学报, 2007, 28(2): 62-68.
- Wang Guangli, Wang Tiegun, Zhang Linye. Hydrocarbon-generation characteristics for lacustrine carbonate source rocks in Bonan Sag of Jiyang Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2): 62-68.
- [9] 张国栋, 王慧中. 中国东部早第三纪海侵和沉积环境[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 12-50.
- Zhang Guodong, Wang Huizhong. Eocene transgression and sedimentary environment in Eastern China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 12-50.
- [10] 李守军, 吴智平, 马在平. 中国东部早第三纪有孔虫的生活环境[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1997, 21(2): 1-7.
- Li Shoujun, Wu Zhiping, Ma Zaiping. Foraminifer's living environment in Eocene in Eastern China[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1997, 21(2): 1-7.
- [11] 赵澄林, 朱平, 陈方鸿. 高邮凹陷高分辨层序地层学及储层研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001: 1-10.
- Zhao Chenglin, Zhu Ping, Chen Fanghong. High resolution sequence stratigraphy and reservoir study in Gaoyou sag[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001: 1-10.
- [12] 吕钊伟, 张宁, 夏文臣. 山东省长清县寒武统张夏组的微观组分、微相类型及沉积相分析[J]. 地质科技情报, 2009, 28(5): 47-52.
- Lü Zhaowei, Zhang Ning, Xia Wenchen. Types and composition of carbonate microfacies and analysis on sedimentary facies of Middle Cambrian Zhangxia Formation in Changqing, Shandong province[J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(5): 47-52.
- [13] 余素玉, 何镜宇, 杨慕华. 河北唐山地区中寒武统张夏组鲕粒灰岩的岩石学研究[J]. 地球科学, 1987, 12(3): 301-310.
- Yu Suyu, He Jingyu, Yang Muhua. Petrology study on oolitic limestone of Middle Cambrian Zhangxia Formation in Tangshan, Hebei province[J]. Earth Science, 1987, 12(3): 301-310.
- [14] 文华国, 郑荣才, 沈忠民. 四川盆地东部黄龙组碳酸盐岩储层沉积-成岩系统[J]. 地球科学, 2011, 36(1): 111-121.
- Wen Guohua, Zheng Rongcai, Shen Zhongmin. Sedimentary-diagenetic systems the Huanglong Formation of Carbonate reservoirs in eastern Sichuan Basin[J]. Earth Science, 2011, 36(1): 111-121.
- [15] 彼得 A. 肖勒, 达娜 S. 顾尔默—肖勒. 碳酸盐岩岩石学[M]. 姚根顺, 沈安江, 潘文庆, 等译. 北京: 石油工业出版社, 2010: 5-50.
- Peter A S, Dana S U S. A color guide to petrography of carbonate rocks[M]. Translated by Yao Genshun, Shen Anjiang, Pan Wenqing, et al. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 5-50.
- [16] 武汉地质学院古生物教研室编. 古生物学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1983: 52-169.
- Palaeontology Teaching and Research Section, Wuhan College of Geosciences. Principle of palaeontology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1983: 52-169.
- [17] Javid Hassanzadeh Azar, Abdolrahim Javaherian, Mahmoud Reza Pishvaei, et al. An approach to defining tortuosity and cementation factor in carbonate reservoir rocks[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2008, 60(2): 6-7.
- [18] 田树刚, 张永生, 王俊涛, 等. 兴安-内蒙古地区晚古生代生物礁及其构造和油气意义[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2011, 41(4): 493-503.
- Tian Shugang, Zhang Yongsheng, Wang Juntao, et al. Late Paleozoic reefs and their significance for tectonics and oil-gas exploration in the Hinggan-Inner Mongolia area[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2011, 41(4): 493-503.
- [19] 王伟峰, 杨少春, 金强, 等. 金湖凹陷西团地区阜宁组二段储层的微观特征[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 1996, 20(5): 12-16.
- Wang Weifeng, Yang Shaochun, Jin Qiang, et al. Reservoir microcharacteristics of Member II in Funing Formation at Xiyuan area of Jinhu Sag[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1996, 20(5): 12-16.
- [20] 华东石油学院岩矿教研室. 沉积岩石学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1982: 187-190.
- Rock-Mineral Teaching and Research Section, Huadong College of Petroleum. Principle of palaeontology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1982: 187-190.
- [21] 江茂生, 沙庆安. 碳酸盐与陆源碎屑混合沉积体系研究进展[J]. 地球科学进展, 1995, 10(6): 551-554.
- Jiang Maosheng, Sha Qing'an. Research advances in the mixed siliciclastic-carbonate sedimentary systems[J]. Advance in Earth Science, 1995, 10(6): 551-554.
- [22] 张廷山, 蓝光志, Kershaw S. 构造及海平面波动对四川盆地志留纪生物礁的控制[J]. 石油学报, 1999, 20(3): 19-24.
- Zhang Tingshan, Lan Guangzhi, Kershaw S. Tectonic and sealevel change influence on the Silurian reefs development of north and south margins of Sichuan basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 1999, 20(3): 19-24.
- [23] 孙永传, 李惠生. 碎屑岩沉积相和沉积环境[M]. 北京: 地质出版社, 1986: 6-11.
- Sun Yongchuan, Li Huisheng. Sedimentary facies and depositional environment of clastic rock[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986: 6-11.