

东营凹陷沙一段薄层湖相碳酸盐岩成因研究

王夕宾, 郝延征, 姚军, 张建光, 吕爱民

(中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580)

摘要:通过岩心观察、薄片及古生物鉴定,结合岩相、电相及地球化学特征分析,对东营凹陷HB地区沙一段湖相薄层碳酸盐岩成因进行研究。结果表明:目的层纵向上可划分为早、中、晚3期沉积;中期沉积构成了碳酸盐岩的主体,细分为藻礁格架、礁间、礁前、礁后、陆源沙坝和浅湖泥坪等6个成因单元;早期到中期气候、水文条件的改变形成了有利于藻的生长环境,末期海侵作用发生,藻礁建造结束,而广盐性腹足类、介形类生物繁盛,形成了广泛的螺灰岩沉积。

关键词:东营凹陷;湖相碳酸盐岩;沉积成因;藻礁;沉积演化

中图分类号:TE 122 **文献标志码:**A

引用格式:王夕宾,郝延征,姚军,等. 东营凹陷沙一段薄层湖相碳酸盐岩成因研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(1):27-34.

WANG Xibin, HAO Yanzheng, YAO Jun, et al. Genetic research of flaggy lacustrine carbonate in the first Member of Shahejie Formation, Dongying Depression [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40 (1): 27-34.

Genetic research of flaggy lacustrine carbonate in the first Member of Shahejie Formation, Dongying Depression

WANG Xibin, HAO Yanzheng, YAO Jun, ZHANG Jianguang, LÜ Aimin

(School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: This study focused on the flaggy lacustrine carbonate reservoir in the first Member of Shahejie Formation of the HB area in Dongying Depression. The analysis of the carbonate genesis is through a combination of core observation, thin section and paleontology identification, integration of lithofacies, logging facies, and geochemical characteristics. The results show that the carbonate can be divided into early-stage, mid-stage and late-stage sedimentary bodies. The mid-stage sedimentary body, constituting the principal part of the carbonate, can be further subdivided into the algal frame reef, inter-reef, reef-front, back-reef, continental sandbar and mudflat genetic elements. The suitable environment, resulting from changes of climatic and hydrological conditions, contributes to the flourishing of the algal reef. Because of the transgression in the late depositional stage, the euryhaline snails and ostracoda thrive and widespread snail limestone develops in the late-term sedimentary body, leading to the finality of the algal reef.

Keywords: Dongying Depression; lacustrine carbonate; sedimentary genesis; algal reef; sedimentary evolution

生物礁和相关的碳酸盐岩中蕴含大约一半的世界石油储量,湖相碳酸盐岩储层广泛发育于世界各陆相含油气盆地,如美国绿河盆地、巴西坎波斯盆地、苏联滨里海盆地等^[1-2]。在中国,有渤海湾盆地

济阳拗陷古近系沙河街组一段和四段的生物礁灰岩^[3-4]、黄骅拗陷古近系沙河街组三段的碳酸盐岩^[5]、四川盆地中侏罗统大安寨组的介屑灰岩^[6]等。湖相碳酸盐岩是受生物化学反应控制以及古气

收稿日期:2015-07-21

基金项目:国家自然科学基金项目(41502131);山东省自然科学基金项目(ZR2013DL011);中央高校基本科研业务费专项资金(13CX02052A,13CX05015A)

作者简介:王夕宾(1964-),男,副研究员,博士,研究方向为储层沉积学、油藏描述。E-mail:wangxb@upc.edu.cn.

候、古地貌和古水文等环境因素影响的具有复杂的孔隙结构类型和储层特征的一类沉积体^[7-8],岩石成因较为复杂,而研究程度远远不如海相碳酸盐岩。湖相碳酸盐岩储层常与生物礁联系紧密,如中国东部渤海湾盆地与西部柴达木盆地古近纪地层中的藻类生物礁储层;对生物礁的生物组成、古生态特征和形成机制的研究对揭示湖相碳酸盐岩成因机制具有重要的意义,同时也对湖相碳酸盐岩油藏的勘探开发具有重要的意义,因此笔者依据目前东营凹陷沙一段湖相碳酸盐岩的勘探成果对湖相碳酸盐岩的成因进行研究。

1 地质背景

东营凹陷古近系沙河街组沙一段是沙二末期沉积间断剥蚀后再度沉降的大面积超覆沉积的产物^[9],沙一段中、下亚段主要为碳酸盐岩沉积,部分地区发育油页岩,上亚段主要为红色砂岩。以往对东营凹陷古近系沙河街组湖相碳酸盐岩的研究主要集中于沙四段,而对沙一段碳酸盐岩研究较少。研究区位于东营凹陷中北部(图1),目的层沙一段三砂层组1小层为一薄层碳酸盐岩沉积,其中发育枝管藻生物礁储层,厚度为0.2~7 m,含油面积约为5 km²,储量为430×10⁴ t,为研究区主力产油层。

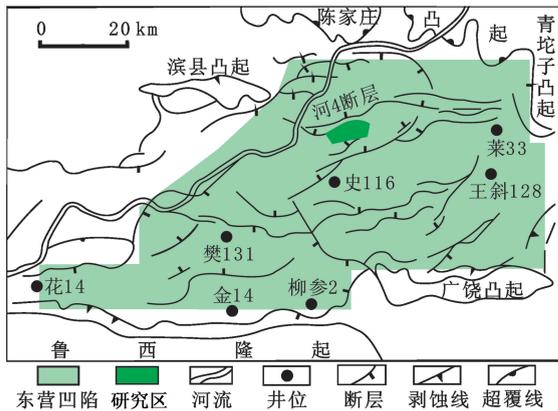


图1 研究区位置

Fig.1 Location of researched area in Dongying Depression, China

2 岩石学特征

根据 HB2、HB11、HB14 三口井岩心资料分析,薄层碳酸盐岩主要岩石类型为藻灰岩、螺灰岩、鲕粒灰岩、生物碎屑灰岩、泥晶灰岩、砂质灰岩和少量的砂岩,生物碎屑主要有藻类、螺类以及介形类的碎屑(图2)。图2(a)藻灰岩薄片可见枝管藻类的植物碎屑呈定向排列,枝管藻类内腔孔隙十分发育,并充

填大量烃类,呈黄色,可见埋藏成岩作用形成的块状方解石晶体;图2(b)中下部为蓝绿藻灰岩,上部为鲕粒灰岩,突变接触处具有叠层构造;图2(c)为正常鲕和表鲕等核心为石英颗粒和泥屑;图2(d)为以介形虫壳为核心的长条状表鲕,及以泥屑及泥屑重结晶为核心的椭圆形表鲕,并有螺的介壳。镜下薄片观察表明,研究区目的层藻灰岩中的枝管藻类属于绿藻门的管藻目,一种为中国枝管藻(*Cladosiphoniasinensis*),另一种为山东枝管藻(*Cladosiphoniashan-dongensis*),以中国枝管藻为主。

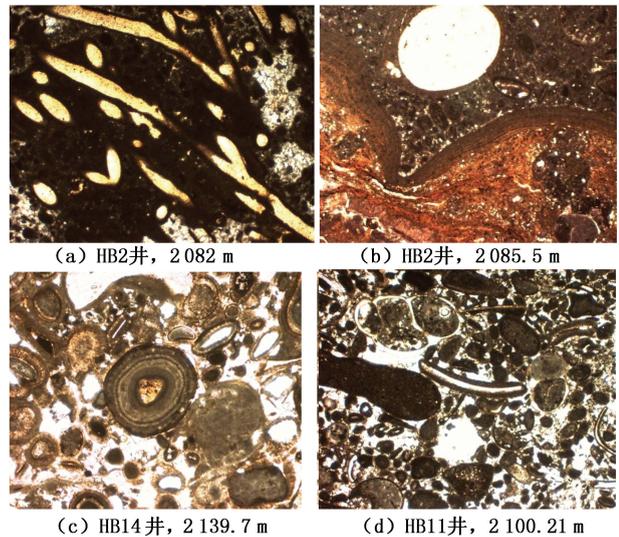


图2 取心井岩心薄片照片

Fig.2 Photos of thin sections of cored wells

2.1 藻灰岩

藻灰岩岩石类型包括藻格架灰岩和藻泥晶灰岩,藻格架灰岩中藻屑含量较高,一般为40%~60%,支撑方式为骨架支撑,藻泥晶灰岩中藻屑含量较低,岩石中藻屑相互毗邻但没有接触,为基质支撑。岩石中可见方解石晶体充填于颗粒之间,并含有介形类、螺类等生物碎屑。

2.2 螺灰岩

岩石中螺化石含量可达90%以上,主要为湖相的螺、介形虫壳体以及其碎片,在螺屑和介屑之间主要为泥晶方解石充填。

2.3 鲕粒灰岩

鲕粒灰岩以正常鲕、表鲕为主,核心主要为生物碎屑、石英颗粒、泥屑和泥屑重结晶,鲕粒含量一般为50%~85%。除鲕粒外,岩石中还有砂屑、介屑、螺屑、藻屑和砾屑等,岩石为亮晶胶结,胶结物为方解石和白云石。

2.4 泥晶灰岩

岩石主要由泥晶方解石组成,含量一般大于

85%,另外在泥晶方解石中还分布有砂屑、粉屑、砾屑、鲕粒以及介屑、螺屑、藻屑等生物碎屑,数量不等。

2.5 其他岩石类型

其他类型岩石包括如粉砂质灰岩、生物碎屑灰岩和砂岩等。粉砂质灰岩中石英含量一般为25%~30%;生物碎屑灰岩中含有藻屑、螺屑、介屑等生物碎屑,胶结物主要为方解石;砂岩中砂质含量为65%~85%,含有少量的藻屑、螺屑和介屑。

藻灰岩构成储层的主体,其成岩作用经历压实、填积、胶结、白云岩化和溶蚀等作用。孔隙类型有残余原生孔隙及次生孔隙,以次生溶蚀孔隙为主。藻灰岩中的有机碎屑在深埋热演化过程中生成的有机酸性流体对灰岩具有显著的溶蚀效应,特别是对提高渗透率具有异常明显的效果^[10]。

3 薄层碳酸盐岩沉积期次划分

根据取心井单井相分析(图3)及测井相研究,

将薄层碳酸盐岩纵向上划分为3个期次的沉积。

底层(早期)沉积为泥晶灰岩、粉砂质灰岩和生物碎屑灰岩。泥晶灰岩和粉砂质灰岩微电极为单个高幅尖峰,且微电位与微梯度幅度差很小或无幅度差,自然电位近乎平直;生物碎屑灰岩微电极有多个高幅尖峰,自然电位曲线幅度较小,呈低幅度钟形或棱形。

中间层(中期)沉积主要为藻灰岩、鲕粒灰岩、生物碎屑灰岩和砂岩等。藻灰岩在自然电位曲线上表现为高幅钟形或齿化钟形,微电极幅度差较大;鲕粒灰岩在微电极及电阻率曲线上易产生较高幅尖峰,微电极幅度差不明显或较小;砂质沉积电阻率稍低、声波时差稍高。

顶层(晚期)沉积为螺灰岩,在微电极及电阻率曲线上形成更高幅尖峰,微电极幅度差小或不明显,自然电位曲线起伏较小。

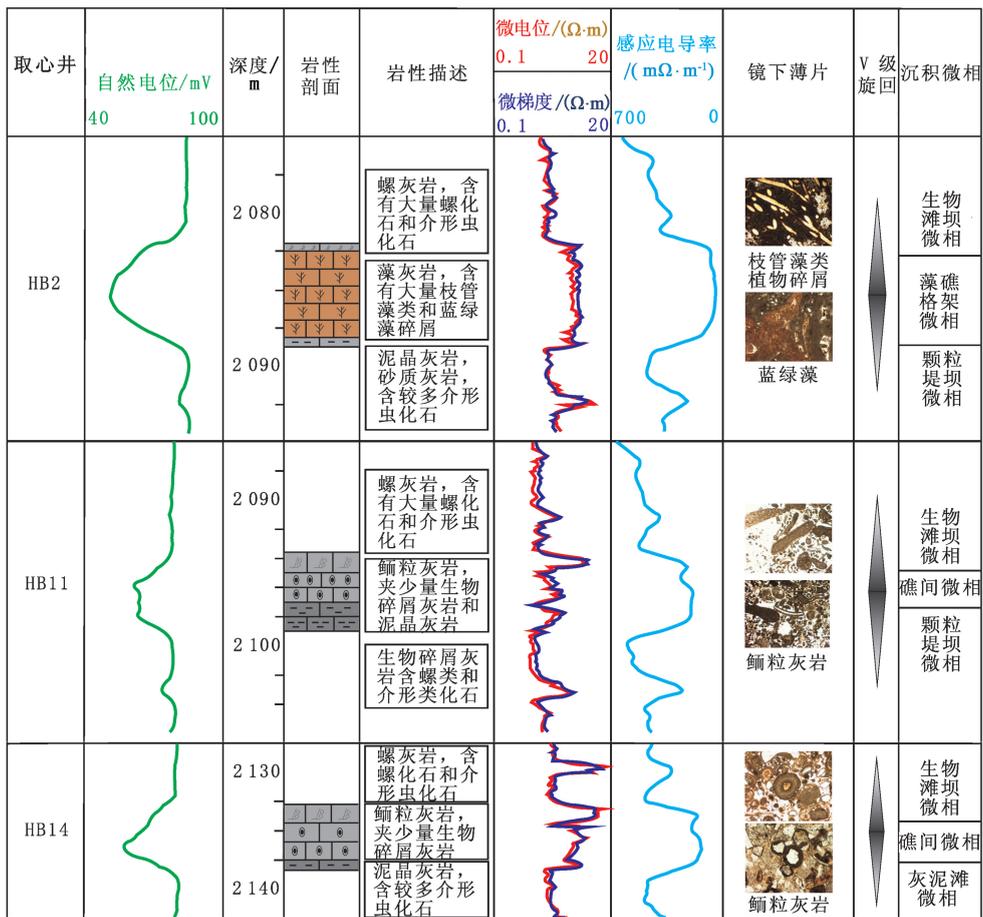


图3 HB2、HB11 和 HB14 井单井相分析

Fig.3 Analysis of single well facies in well HB2, HB11 and HB14

从时间尺度上考虑,底层泥晶灰岩、粉砂质灰岩和生物碎屑灰岩为目的层初期形成的“同期沉积单

元”,中层的藻灰岩、鲕粒灰岩、生物碎屑灰岩、砂岩和顶层的螺灰岩则分别为研究区在目的层中期和晚

期形成的“同期沉积单元”。

4 湖相碳酸盐岩成因

研究区湖相碳酸盐岩各期沉积体内发育不同的成因单元,对应于不同的沉积微相,代表着不同的古气候、古地貌、古水文和古生物等生态特征。

4.1 早期沉积环境及碳酸盐岩成因

早期沉积主要为泥晶灰岩、粉砂质灰岩和生物碎屑灰岩,对应于低能的灰泥滩及高能的颗粒堤坝沉积

环境,其间有一些孤立的浅湖泥岩沉积区(图4)。

泥晶灰岩和粉砂质灰岩对应浪基面以下的低能灰泥滩沉积环境,沉积时水位较深,沉积物粒度较细;因藻类等植物需要光照及CO₂进行光合作用,在水位较浅的地方则形成高能生物碎屑灰岩。从图4可以看出,在湖泊近岸浅水区及水下古隆起处沉积了高能生物碎屑灰岩,向湖盆方向则为低能灰岩沉积。

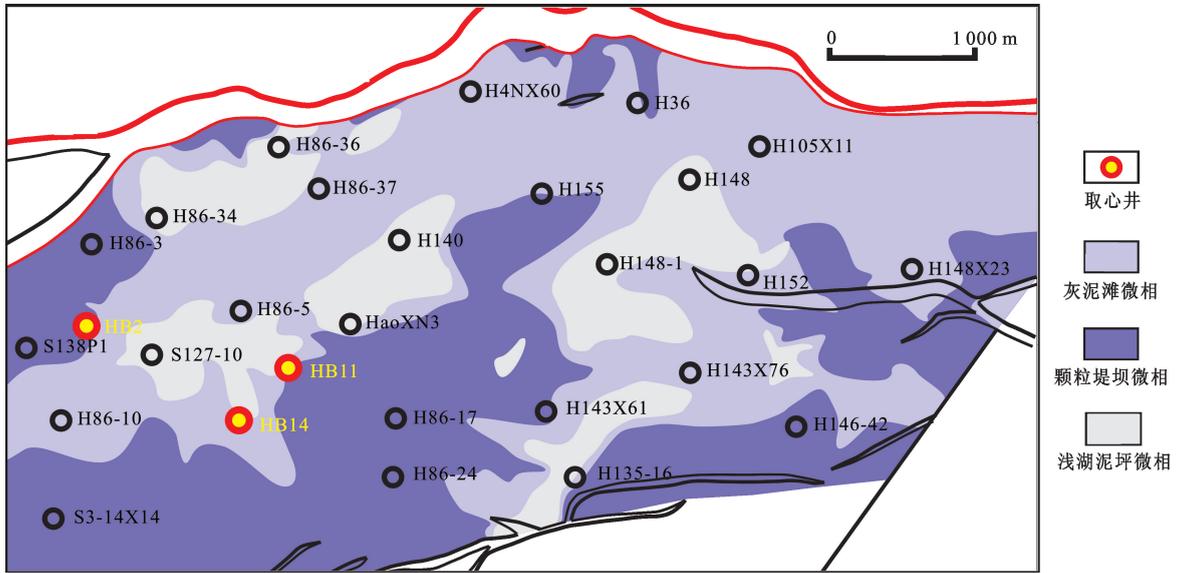


图4 早期沉积环境平面图

Fig. 4 Distribution of sedimentary microfacies in early-term sedimentation

4.2 中期沉积环境及碳酸盐岩成因

初期沉积的泥晶灰岩、粉砂质灰岩和生物碎屑灰岩为中期藻类的生长及藻礁的发育提供了良好的基底条件,枝管藻类易生长在各种碎屑滩上,基底条件一般介于软底和硬底之间,如果底质太软枝管藻类固定不住,太硬则无法扎根。藻类也使基底碎屑滩固定,形成稳定的成礁基底,随后枝管藻类大量发育成礁。早期气候条件由温暖潮湿向炎热干旱的过渡,也是促使本区早期成因环境向中期沉积成因环境转变的重要因素。随着气候趋向炎热干旱,水位下降,湖泊边缘浅水区面积增大,阳光透射量增多,促进了枝管藻类的繁衍^[11]。

切面呈弯曲管状,长约数厘米,多以群体共生形成骨架,骨架间常被烃类充填,呈黄色,还可以看到很多由埋藏成岩作用形成的方解石晶体充填于较大的孔洞与裂缝中。藻灰岩薄片可见枝管藻类的植物碎屑呈定向排列,说明枝管藻具有一定的强度和韧性,造架能力较强。在藻礁中常见一些介形虫、螺类的生物介壳,枝管藻丛能够为介形虫、螺类等居礁生物提供丰富的养料和适宜的生活空间。藻礁格架内溶蚀作用较强,孔渗性较好,油气充注保存储集空间形成有效储层^[12]。

中期沉积可以分为藻礁格架(礁核)、礁间、礁前、礁后、陆源沙坝和浅湖泥坪6个沉积微相(图5)。

4.2.2 礁间微相

4.2.1 藻礁格架微相

沙一段藻礁中的造架生物是枝管藻类,是研究区唯一的造架生物(图2(a))。生物礁中反映黏结作用的主要为由蓝绿藻粘结形成的藻纹层。镜下薄片,枝管藻横切面为同心圆状,直径约为2 mm,纵

随着藻礁格架的建造,在藻礁间形成较为动荡的沉积环境,形成鲕粒灰岩、生物碎屑灰岩等内碎屑灰岩,以鲕粒灰岩为主。钙质鲕粒的形成除需要充分的核来源、CaCO₃浓度达到饱和以及适当的水流搬运强度外,还需要一定的温度和盐度条件^[13]。在镜下薄片(图2(b))中,可以看到蓝绿藻灰岩向鲕粒灰岩的过渡,在突变接触处具有叠层构造作为两种岩性之间的分界线,象征沉积环境由安静变得

动荡。礁间的鲕粒以椭圆形表鲕与正常鲕最为常见,鲕粒的核心主要为介形虫壳、石英颗粒、泥屑及泥屑重结晶等,并可见大量的螺介壳。鲕粒灰岩的

形成与介形虫、螺等生物活动密切相关,可能为往复动荡的水体将生物介壳、内碎屑等颗粒搬运至礁间环境,并经水体反复涤荡形成鲕粒。

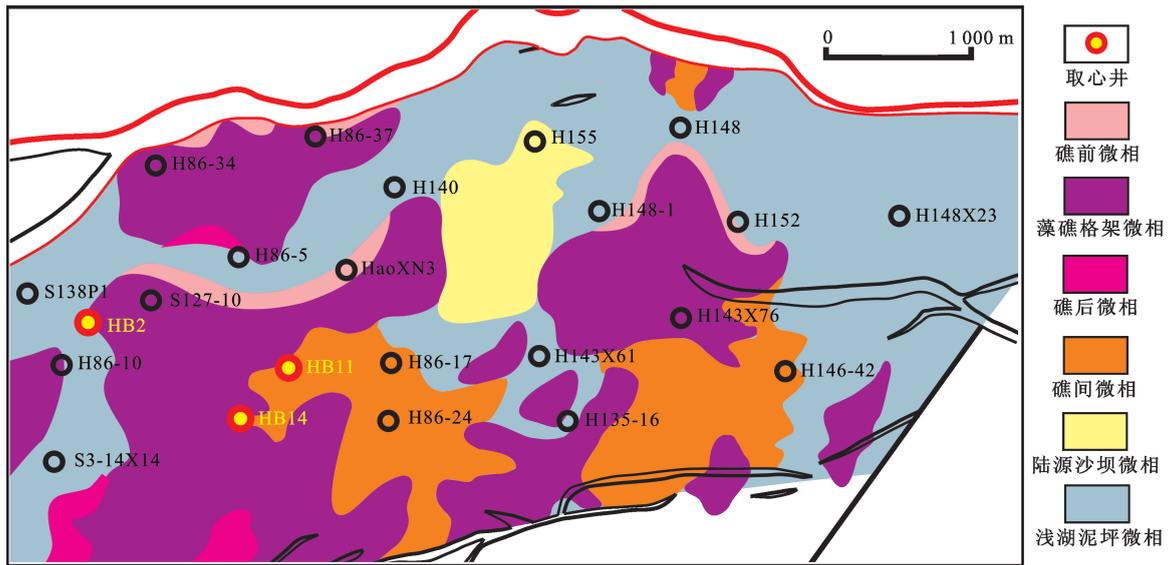


图5 中期沉积环境平面图

Fig. 5 Distribution of sedimentary microfacies in mid-term sedimentation

中期沉积时期,炎热干燥的气候与微咸水条件^[14]均为鲕粒灰岩的形成提供了良好的条件。礁间鲕粒—藻粒—鲕粒—藻粒的建造方式预示着沉积环境短暂稳定时藻类生长于鲕粒滩之上,随后被动荡沉积环境改造,而未形成一定规模的藻礁,或者由水体涤荡藻礁搬运所至。

4.2.3 礁前微相

礁前微相位于藻礁格架与湖盆之间的斜坡区,藻泥晶灰岩为其主要的沉积类型,基质岩性主要为泥晶灰岩,藻屑零星分布其间。该微相在外形上具有较低的突起构造,且显示出成层性,而藻格架灰岩一般内部不分区,构造上较复杂,表面形态也很复杂。由于礁前环境水体逐渐变深,已不太适宜藻类的大量生长,沉积物大多来自浅水区礁体的生物侵蚀和物理破坏作用,如研究区螺类的钻孔和啃噬作用,以及风浪等。由礁前向湖盆方向则为浅湖泥岩沉积。

4.2.4 礁后微相

礁后微相位于藻礁格架向岸一侧的斜坡区,礁后微相向岸方向可过渡为泻湖相。礁后沉积环境水动力能量相对较弱,水体盐度相对较高,主要的沉积类型为藻泥晶灰岩和生物碎屑灰岩,沉积物大多来自浅水区礁体的生物侵蚀和物理破坏作用,沉积厚度不大。

4.2.5 陆源沙坝微相

陆源沙坝微相位于研究区的中北部,呈席状分

布,厚度较薄,并含有一定量的生物碎屑等,由风浪作用携带而至。砂岩与两侧的藻礁分界明显,这是因为枝管藻类不能在坚硬的粗粒碎屑滩上扎根固着生长,或过急的水流容易折断藻茎,使枝管藻类不能稳定生长。

4.2.6 浅湖泥坪微相

浅湖泥坪微相广泛分布于研究区的北部、东部和西部,为静水环境下的泥质沉积。

4.3 晚期沉积环境及碳酸盐岩成因

晚期沉积环境为生物滩坝及浅湖泥坪微相,岩石类型主要为螺灰岩,向湖盆方向渐变为泥质沉积(图6),中期藻礁格架、礁间、礁前、礁后和陆源沙坝沉积区均被螺灰岩覆盖。螺灰岩中含有大量的螺类及少量的介形类生物碎屑,化石种类单一,但数量较多。螺类、介形类的繁盛,标志着枝管藻礁建造环境的终结。济阳拗陷沙一中、下亚段地层中原生海绿石矿物的发现^[15]和丰度极高的甲藻甾烷的发现^[16],为古近系沙河街组沉积时期的海侵提供了确凿的证据,与沙一早、中时期全球范围海侵^[17]契合。研究区枝管藻类生长的终结源于短暂海侵导致的湖泊水体盐度升高,超过了枝管藻类所能忍受的盐度范围,却为广盐性的腹足类、介形类的繁盛提供了良好的环境条件。

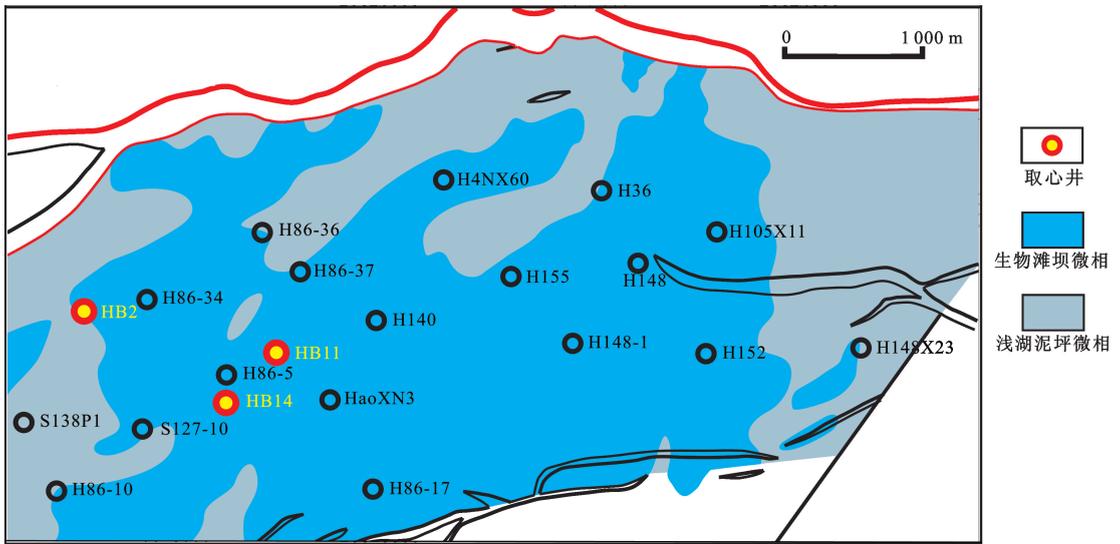


图6 晚期沉积环境平面图

Fig. 6 Distribution of sedimentary microfacies in late-term sedimentation

5 沉积模式

礁体一般由礁基、礁核和礁盖 3 部分组成^[18-19],也即生物礁奠基期、繁盛期和衰亡期,分别对应于研究区目的层早期、中期和晚期 3 期沉积(图 7)。早期沉积厚度较薄,生物碎屑灰岩主要分布于湖泊边缘,泥晶灰岩与粉砂质灰岩分布于水体相对较深的低能环境;中期沉积厚度相对较大,湖泊

边缘区面积增大,藻灰岩分布于近岸浅水区及水下古隆起处,并且在藻礁下倾方向或藻礁之间发育礁间微相,形成鲕粒灰岩和生物碎屑灰岩等;礁前主要为藻泥晶灰岩沉积,由礁前向湖盆方向为浅湖泥岩沉积;礁后主要的沉积类型为藻泥晶灰岩和生物碎屑灰岩,位于藻礁格架向岸一侧的斜坡区;晚期螺灰岩沉积厚度较薄,分布范围较大,中期沉积均被其覆盖。

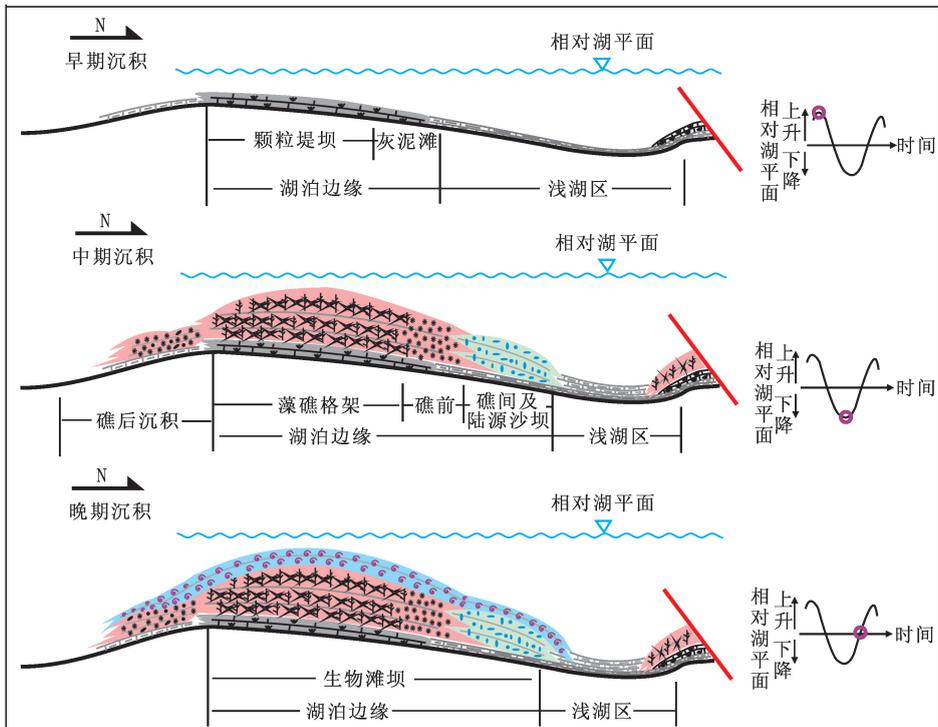


图7 沉积模式

Fig. 7 Sedimentary model

6 结 论

(1)研究区沙一段三砂层组1小层薄层湖相碳酸盐岩纵向上按成因划分为早、中和晚3期沉积,底层(早期)为泥晶灰岩、砂质灰岩和生物碎屑灰岩,中间层(中期)为藻灰岩、鲕粒灰岩、生物碎屑灰岩和砂岩,顶层(晚期)为螺灰岩沉积。

(2)3期沉积分别可进一步划分为多个沉积微相。早期沉积分为低能灰泥滩和高能颗粒堤坝微相。中期沉积可划分为藻礁格架、礁间、礁前、礁后、陆源沙坝和浅湖泥坪等6个微相。藻礁格架建造位于湖泊近岸浅水区及水下古隆起处,藻格架灰岩为主要的沉积类型;礁间位于水体动荡区,以鲕粒灰岩、生物碎屑灰岩沉积为主;礁前水体变深,以藻泥晶灰岩为主;礁后水动力相对较弱,主要的沉积类型为藻泥晶灰岩和生物碎屑灰岩;陆源沙坝与两侧的藻礁呈竞争关系,分界明显。晚期沉积中含有大量的螺类及少量的介形类生物碎屑,化石种类单一,但数量较多。

(3)早期到中期气候、水文条件的改变形成了有利于藻生长的环境。末期伴随着海侵作用的发生,藻礁建造结束,为广盐性腹足类、介形类的繁盛创造了条件,形成了发育广泛的螺灰岩沉积。

参考文献:

- [1] COHEN A S, THOUIN C. Nearshore carbonate deposits in Lake Tanganyika [J]. *Geology*, 1987, 15 (5): 414-418.
- [2] RYDER R T, FOUCH T D, ELISON J H. Early Tertiary sedimentation in the western Uinta Basin, Utah [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1976, 87 (4): 496-512.
- [3] 周自立, 杜韞华. 湖相碳酸盐岩的沉积相与油气分布关系: 以山东胜利油田下第三系碳酸盐岩为例 [J]. *石油实验地质*, 1986, 8(2): 123-132.
- ZHOU Zili, DU Yunhua. Relationship between sedimentary facies of lacustrine carbonate rocks and oil and gas distribution [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 1986, 8(2): 123-132.
- [4] 钱凯, 王淑芬. 济阳坳陷下第三系礁灰岩及礁灰岩油气藏 [J]. *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 [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1986, 13(5): 1-7.
- [5] 张服民, 简宗渝. 黄骅盆地早第三纪沉积史与环境特征 [J]. *石油与天然气地质*, 1981, 2(2): 141-156.

ZHANG Fumin, JIAN Zongyu. The sedimentation history and environmental characteristics of the early tertiary in Huanghua Basin [J]. *Oil and Gas Geology*, 1981, 2(2): 141-156.

- [6] 强子同, 杨植江, 王建民, 等. 大安寨石灰岩的成岩作用与成岩圈闭 [J]. *地球化学*, 1981, 10(3): 232-241.
- JIANG Zitong, YANG Zhijiang, WANG Jianmin, et al. Diagenesis and diagenetic trap of Daanzhai limestone [J]. *Geochimica*, 1981, 10(3): 232-241.
- [7] CORBETT P W M, BORGHI L. Lacustrine carbonates— for the purpose of reservoir characterization are they different? [C]. Houston: Offshore Technology Conference, 2013.
- [8] BOHACS K M, CARROLL A R, NEAL J E, et al. Lake-basin type, source potential, and hydrocarbon character: an integrated sequence-stratigraphic-geochemical framework [J]. *AAPG Studies in Geology*, 2000, 46: 3-34.
- [9] 冯增昭, 王英华, 刘焕杰, 等. 中国沉积学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 153-175.
- [10] 余敏, 寿建峰, 沈安江, 等. 埋藏有机酸性流体对白云岩储层溶蚀作用的模拟实验 [J]. *中国石油大学学报 (自然科学版)*, 2014, 38(3): 10-17.
- SHE Min, SHOU Jianfeng, SHEN Anjiang, et al. Experimental simulation of dissolution and alteration of buried organic acid fluid on dolomite reservoir [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2014, 38(3): 10-17.
- [11] 周建民, 王吉平. 河南泌阳凹陷含碱段的浅水蒸发环境 [J]. *沉积学报*, 1989, 7(4): 149-156.
- ZHOU Jianmin, WANG Jiping. Shallow evaporative environment for the formation of nahcalite-bearing series in the Biyang Basin, Henan [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1989, 7(4): 149-156.
- [12] 操应长, 杨田, 王健, 等. 东营凹陷南坡沙四上亚段滩坝砂岩有效储层成因 [J]. *中国石油大学学报 (自然科学版)*, 2013, 37(6): 1-9.
- CAO Yingchang, YANG Tian, WANG Jian, et al. Genesis of effective reservoirs of beach-bar sandstone in upper part of the fourth member of Shahejie formation in the southern slope of Dongying sag [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2013, 37(6): 1-9.
- [13] 颜佳新, 刘本培, 张海清. 滇西昌宁—孟连带内石炭纪—二叠纪鲕粒灰岩的古地理意义 [J]. *古地理学报*, 1999, 1(3): 13-18.
- YAN Jiaxin, LIU Benpei, ZHANG Haiqing. Palaeogeographic implications of carboniferous to Permian ooliti-

- limestones in the Changning-Menglianbelf of west Yunnan[J]. *Journal of Palaeogeography*, 1999, 1(3):13-18.
- [14] 胜利油田石油地质志编写组编. 中国石油地质志(卷六胜利油田)[M]. 北京:石油工业出版社,1993:35.
- [15] 葛瑞全. 济阳拗陷新生界海绿石的存在及其地质意义[J]. *沉积学报*,2004,22(2):276-279.
GE Ruiquan. Occurrence and geological significance of glauconite in cenozoic group of Jiyang depression[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004,22(2):276-279.
- [16] 袁文芳,陈世悦,曾昌民. 济阳拗陷古近系沙河街组海侵问题研究[J]. *石油学报*,2006,27(4):41-49.
YUAN Wenfang, CHEN Shiyue, ZENG Changmin. Study on marine transgression of paleogene Shahejie formation in Jiyang depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006,27(4):41-49.
- [17] HAQ B U, HARDENBOL J, VAIL P R. Mesozoic and Cenozoic sea-level chrono stratigraphy and cycles of sea-level change[M]. Houston: SEPM Special Publication, 1988.
- [18] 胡明毅,朱忠德,贺萍,等. 轮南-巴楚地区奥陶系生物礁储层特征[J]. *石油与天然气地质*,2002,23(2):179-182.
HU Mingyi, ZHU Zhongde, HE Ping, et al. Ordovician reef in Lunan-Bachu area and their reservoir characteristics[J]. *Oil & Gas Geology*, 2002, 23(2):179-182.
- [19] 胡明毅,魏欢,邱小松,等. 鄂西利川见天坝长兴组生物礁内部构成及成礁模式[J]. *沉积学报*,2012,30(1):33-41.
HU Mingyi, WEI Huan, QIU Xiaosong, et al. Reef composition and their forming models of Changxing formation in Jiantianba section of Lichuan, Western Hubei [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(1):33-41.

(编辑 徐会永)