

沾化凹陷长堤地区沙一段下部生物灰岩发育模式及分布特征

张娟

(中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东 东营 257015)

摘要:利用岩心、钻井、测井和地震等资料,对沾化凹陷长堤地区沙一段下部生物灰岩的发育及沉积演化模式进行研究。将长堤地区沙一段划分为1个三级层序,沙一段下部生物灰岩发育段划分为3个四级层序,并进一步划分为湖侵体系域和湖退体系域。生物灰岩的发育受古水深变化及古地貌特征影响,研究区沙一段下部古水深变化存在水退、高位和低位3种模式。通过古地貌恢复,明确研究区沙一段下部生物灰岩多发育于东南部斜坡及东部洼槽,并根据其发育套数及特征,将生物灰岩内幕结构分为3类,进而确定研究区具有缓坡生物灰岩和洼槽生物灰岩2种发育模式。由于湖平面的周期性变化,导致研究区沙一段下部生物灰岩的分布也发生相应的变化,在隆起周缘生物灰岩发育较厚,沿缓坡方向相对减薄,且平面上平行于潜山周缘呈条带状分布。

关键词:发育模式 内幕结构 体系域 生物灰岩 沙一段 长堤地区

中图分类号:TE112.221

文献标识码:A

Development mode and distribution characteristics of biolimestone at the lower Es₁ in Changdi area of Zhanhua Sag

ZHANG Juan

(Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

Abstract: Using core, drilling, logging and seismic data, the development and sedimentary evolution of biolimestone at the lower Es₁ in Changdi area of Zhanhua sag were researched. The Es₁ in Changdi area is defined as a third-order sequence, and the biolimestone developed in the lower Es₁ was divided into 3 fourth-order sequences. The lacustrine transgressive system tract and the lacustrine regressive system tract, where the biolimestone both developed, were also identified. The development of biolimestone is affected by paleo water depth and paleogeomorphology. There are 3 types of paleo water depth variation in the lower Es₁, namely the water withdrawal, the high position water and the low position water. Through paleogeomorphology restoration, it is clear that the biolimestone in the lower Es₁ is mainly distributed in the southeast and eastern slope trough. Based on the layers and its development characteristics, 3 types of interior structure were categorized in the biolimestone, and then it is determined that there are two development modes in the study area, which are the biolimestone developed in gentle slope and the biolimestone developed in trough. Due to the periodic change of the lake level, the distribution of the biolimestone in the lower Es₁ also changed correspondingly. The biolimestone is thicker around the uplift and thinner along the gentle slope direction, and its belt-like distribution is parallel to the periphery of the buried hill.

Key words: development mode; interior structure; system tract; biolimestone; Es₁; Changdi area

长堤地区位于沾化凹陷与黄河口凹陷之间,已完钻探井51口,截至2017年底,长堤一桩海地区已

收稿日期:2018-02-05。

作者简介:张娟(1980—),女,高级工程师,从事地震地质数据综合处理与解释方面的研究。联系电话:13864732292, E-mail:68405907@qq.com。

基金项目:国家科技重大专项“渤海湾盆地精细勘探关键技术”(2016ZX05006)。

探明石油地质储量 $3\ 378.34 \times 10^4$ t, 取得了良好的勘探效果。勘探实践证实, 沙一段是沾化凹陷长堤地区油气勘探的重要目的层系之一。长堤地区仅有3口探井(桩13、桩海6、桩海古1井)未钻遇沙一段生物灰岩, 有35口探井钻遇沙一段生物灰岩并见到油气显示, 其中试油试采井22口, 获工业油流井13口, 低产油流井4口, 出水井5口, 显示出长堤地区沙一段生物灰岩具有良好的勘探潜力。长堤地区沙一段下部生物灰岩的沉积厚度较薄, 对其发育及分布模式尚未形成统一认识; 为此, 笔者基于高频层序地层划分及体系域研究成果, 对长堤地区沙一段生物灰岩的内幕结构及发育规律进行研究, 明确其发育模式, 以期为研究区下步的储层预测及油气成藏分析提供理论依据。

1 高频层序地层划分

依据岩心、录井及测井资料, 对长堤地区桩1等井沙一段下部生物灰岩发育段进行高频层序地层划分^[1-3]。研究区沙一段下部为长期基准面旋回中的上升半旋回, 整体处于湖侵过程, 发育正韵律, 且上升半旋回顶部发育油页岩。上升半旋回自下而上可进一步识别出3个中期基准面旋回, 分别为PSQ1, PSQ2和PSQ3共3个四级层序, 每个四级层序又可以进一步划分为湖侵体系域(TST)和湖退体系域(RST)(图1)。其中, PSQ1自下而上由砂岩过渡为泥岩, 再过渡为砂岩, 砂泥比逐渐增大, 颜色以灰色为主, 其上部发育的下降半旋回厚度大于下部的上升半旋回; PSQ1中湖侵体系域水体变深, 粒度变细, 下部以砂岩为主, 湖退体系域水体变浅, 粒度向上逐渐变粗, 以发育砂岩为主, 顶部存在韵律转换面。PSQ2底部发育砂岩, 向上过渡为泥岩, 顶部发育一套白云岩, 颜色以灰色为主, 旋回的对称性较好; 其湖侵体系域水体变深, 早期发育砂岩、泥岩沉积, 向上粒度变细, 电阻率曲线呈钟形, 湖退体系域水体变浅, 顶部发育一套白云岩, 向上粒度变粗, 电阻率曲线呈漏斗形。PSQ3主要以泥岩和白云岩为主, 底部发育泥岩、油页岩, 顶部发育白云岩, 自然伽马曲线为中等幅度钟形, 其上升半旋回的厚度略大于下降半旋回; PSQ3湖侵体系域水体缓慢加深, 发育泥岩, 电阻率曲线呈钟形, 湖退体系域水体变浅, 早期发育泥灰岩, 晚期水体较浅, 盐度较大, 发育白云岩。

在单井高频层序地层划分的基础上, 选取研究区桩132、桩181、桩海18及桩海6井进行连井高频

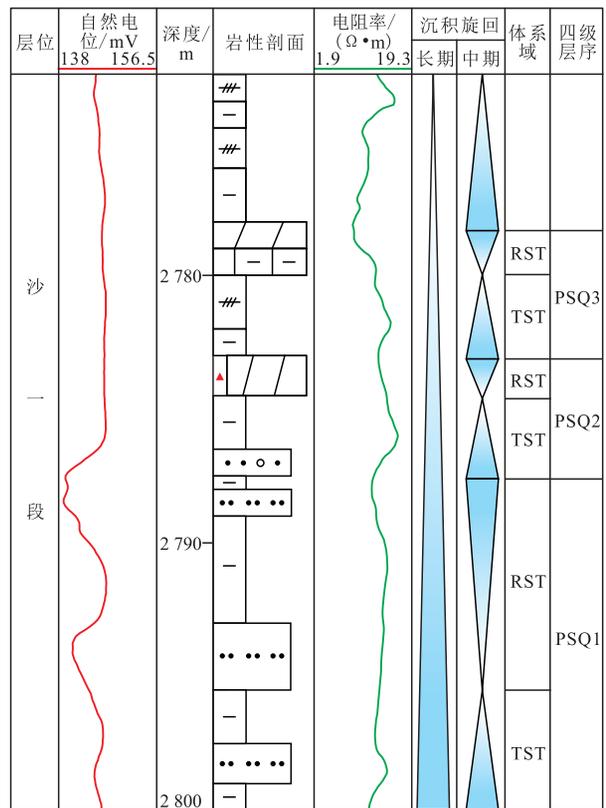


图1 长堤地区桩1井高频层序地层划分

Fig.1 High-frequency sequence division of Well Zhuang1 in Changdi area

层序地层对比。结果表明, 这4口探井沙一段下部发育的3个四级层序的总厚度表现为潜山两翼厚于潜山顶部的特征, 且各四级层序内部上升和下降半旋回的厚度及对称性具有一定的差异。在沙一段整个三级层序中, 以作为体系域边界的一套油页岩为层序地层划分的顶部标志层, 该套油页岩可以代表水体较深、水动力较弱、富含有机质的沉积环境。沙一段底部生物灰岩主要发育于各四级层序的湖退体系域, 且在北部潜山斜坡处相对较为发育。

2 古水深变化及古地貌特征

2.1 古水深变化特征

由于生物灰岩的发育受古水深变化的影响, 因此首先对古水深变化特征进行分析。基于长堤地区连井高频层序地层对比及划分结果, 根据四级层序内部体系域的变化特征, 可以获取在准层序内部可容纳空间与沉积物供给速率之间的变化关系, 进而确定古水深的变化特征。桩317、桩4和桩203等井的古水深分析结果表明, 研究区沙一段下亚段古水深变化存在3种模式, 生物灰岩发育段与古水深变化具有对应关系(图2)。

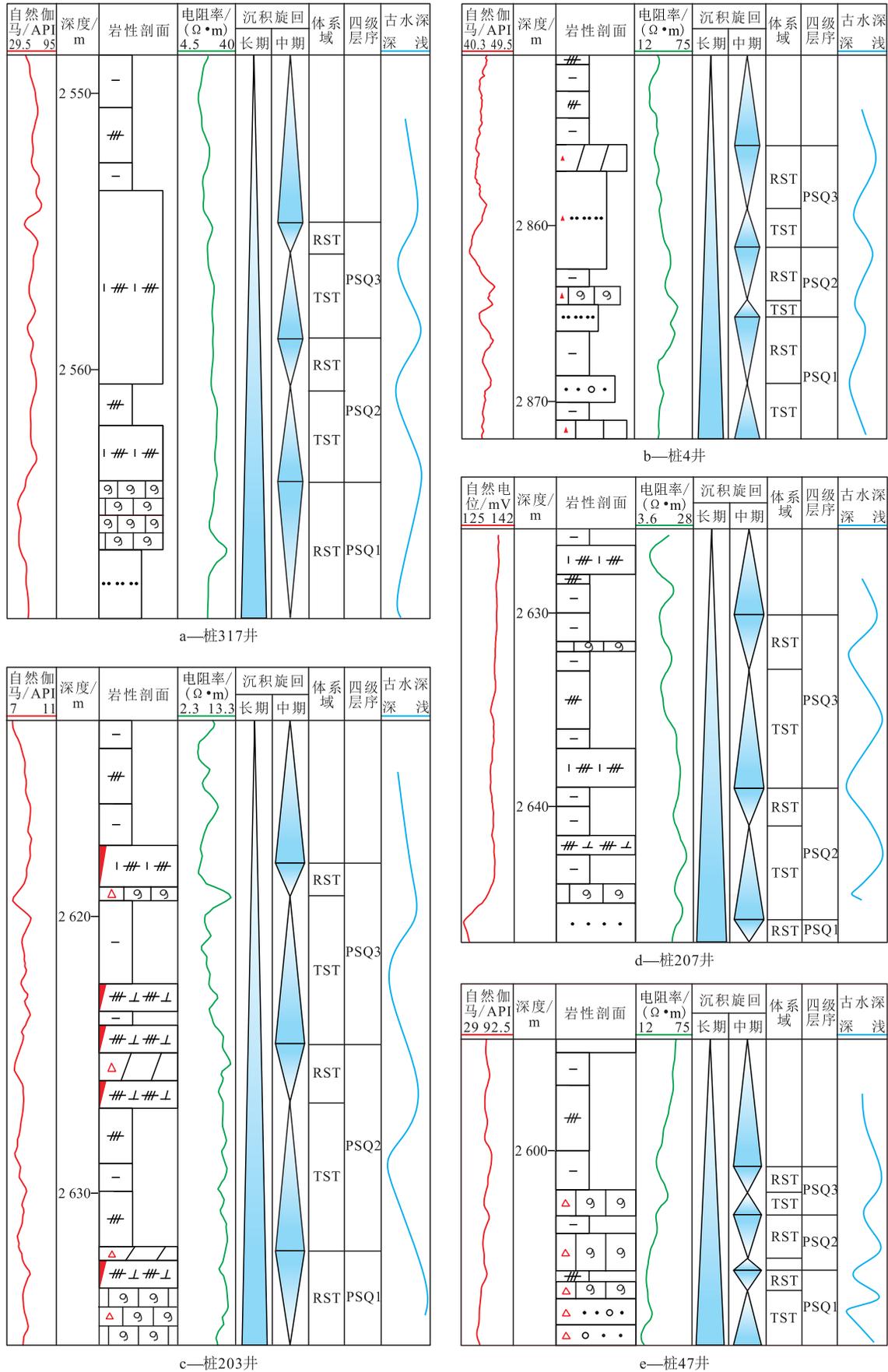


图2 长堤地区沙一段下部古水深变化特征

Fig.2 Characteristics of paleo water depth change at the lower Es₁ in Changdi area

2.1.1 水退模式

基于单井高频层序地层划分结果,发现研究区沙一段下部生物灰岩多发育于各四级层序的湖退体系域。以桩317井为例(图2a),该井PSQ1古水深曲线整体表现为逐渐变浅的水退模式,反映出沙一段沉积早期研究区为湖退背景,生物灰岩发育于PSQ1湖退体系域,对应于古水深曲线斜率较小段,表明该时期古水深处于一个相对缓慢下降的过程,水体相对较浅,水体处于低能状态,水深变化缓慢,在此环境中易于生物灰岩沉积。

2.1.2 高位模式

研究区单井古水深变化特征分析结果表明,除在水退模式中发育生物灰岩,在水体最深时也发育生物灰岩,对应于古水深变化的高位模式。以桩4井为例(图2b),该井古水深曲线具有整体变深的趋势,反映出沙一段沉积早期研究区为湖侵背景;生物灰岩发育于PSQ2湖侵体系域与湖退体系域过渡阶段,PSQ2古水深呈缓慢下降又缓慢上升的过程;在PSQ1底部发育一套石灰岩,表明此时古水深变化幅度较小,水体较为稳定;在PSQ3湖退体系域顶部发育一套白云岩,表明古水深下降至一定水深,形成潮坪环境,反映水体处于低能状态,古水深缓慢下降,易于生物灰岩沉积。

2.1.3 低位模式

分析高频层序地层划分结果发现,在研究区沙一段下部四级层序湖退体系域末期、湖侵体系域早期也发育生物灰岩,对应于古水深变化的低位模式。以桩203井为例(图2c),该井古水深曲线整体呈逐渐变深的趋势;生物灰岩发育于PSQ3湖退体系域晚期古水深下降的过程,处于古水深最浅的部位,水体较为动荡;在PSQ1底部也发育生物灰岩,反映该时期古水深缓慢下降,水体较为稳定;在PSQ2湖退体系域顶部发育一套白云岩,表明古水深下降至一定水深,形成潮坪环境,水体处于低能状态,易于生物灰岩沉积。

2.2 古地貌特征

基于古水深变化特征分析,利用构造平衡剖面技术,分析研究区沙一段沉积时期的古地貌特征,明确沙一段地形起伏特征,结合生物灰岩成分的变化,确定湖泊环境生物灰岩发育背景,进而讨论古水深变化和古地貌对生物灰岩发育的控制作用。

在层拉平的基础上,利用构造平衡剖面技术,对研究区进行古地貌恢复。在古地貌恢复之前,研究区沙一段底界表现为东南部地势较高,北部和长堤潜山两翼地势较低;其中,桩海古1井处的地势最

低,桩302井处的地势相对较高。在古地貌恢复之后,研究区沙一段底界表现为南部和东部的地势较低,北部和东南部的地势较高;桩海古1、桩海18、桩海6及桩14等井区地势较高,构造幅度变化较小,桩132、桩15、桩11及桩参1等井区地势较高,构造幅度变化较大,而桩203、桩204及桩3等井的地势较低,且构造幅度变化较小;其中,在地势较低区域发育楔形沉积体,东部桩海6井至桩307井一带的地势相对较高区域发育沉积充填相,生物灰岩多发育于研究区的东南部斜坡及东部洼槽。

3 生物灰岩内幕结构类型划分

济阳拗陷沙一段岩性具有一定的相似性,主要以生物灰岩和泥岩为主。在惠民凹陷商河地区沙一段发育多层碳酸盐岩沉积^[4-8],其成分以白云石为主,沉积相类型包括滨湖亚相、生物浅滩亚相、滩缘亚相和半深湖亚相。沾化凹陷长堤地区沙一段上部为深灰色泥岩、灰质泥岩,向下变为灰质泥岩、棕褐色油页岩夹薄层生物灰岩,底部为棕褐色油页岩、灰色泥岩夹薄层白云岩。沾化凹陷沙一段发育的生物灰岩及特殊岩性段均为地层划分的重要标志层。长堤地区不同构造位置生物灰岩的发育特征稍有差异。依据单井纵向生物灰岩发育特征将研究区生物灰岩的内幕结构划分为3类。

第1类生物灰岩内幕结构 该类型即研究区沙一段下部发育1套生物灰岩。以桩317井为例(图2a),该类生物灰岩的岩性组合为粉砂岩-生物灰岩-泥岩,自然伽马曲线呈指状低值,电阻率曲线为较高值、漏斗状。其中生物灰岩发育于PSQ1湖退体系域,层拉平地震剖面显示其发育于缓坡带,多表现为上超反射特征,且波峰连续性差、振幅偏弱。研究区桩4、桩209、桩205、桩203、桩317等井均发育第1类生物灰岩内幕结构。

第2类生物灰岩内幕结构 该类型即研究区沙一段下部发育2套生物灰岩。以桩207井为例(图2d),该类生物灰岩的岩性组合为泥岩-生物灰岩-灰质泥岩,自然电位曲线为中低值,电阻率曲线为中值、指状。其中生物灰岩发育于PSQ1和PSQ3湖退体系域,层拉平地震剖面显示其发育于缓坡带,多表现为上超反射特征,且波峰连续性好、振幅较强。研究区桩207、桩12、桩14等井均发育第2类生物灰岩内幕结构。

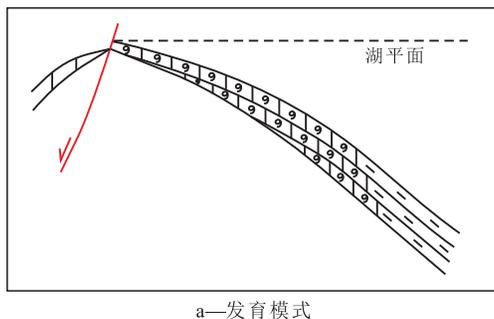
第3类生物灰岩内幕结构 该类型即研究区沙一段下部发育3套生物灰岩。以桩47井为例(图

2e),该类生物灰岩的岩性组合多以泥岩-生物灰岩-泥岩或泥岩-生物灰岩-砾岩为主,自然伽马曲线呈指状低值,向上逐渐增大,电阻率曲线值自下而上逐渐增大,呈指状、中低值。层拉平地震剖面显示其发育于坡折带,表现为振幅较强、连续性好的波峰。研究区桩47、桩303、桩11、桩181和桩参1等井均发育第3类生物灰岩内幕结构。

长堤地区沙一段生物灰岩总体呈带状分布,主要集中在分布于东北部、中部和南部3个区域。研究区钻遇这3类生物灰岩内幕结构探井的钻探结果显示,在中部潜山隆起南缘发育第3类生物灰岩内幕结构,向西南方向依次发育第2类和第1类生物灰岩内幕结构。

4 生物灰岩发育模式

根据生物灰岩成分变化及分布特征,结合沙一



段沉积时期的高频层序地层划分结果以及古水深变化和古地貌等特征,确定沾化凹陷长堤地区生物灰岩发育模式^[9-12]。其主要发育生物滩坝沉积,岩性主要为生物灰岩,主要形成于正常浪基面之上,水体处于低能状态。在迎浪面发育亮晶颗粒石灰岩滩,背浪面发育泥晶颗粒石灰岩滩,其间为滩间沉积。针对长堤地区特殊的地貌环境,可以将其生物灰岩发育模式进一步划分为缓坡生物灰岩和洼槽生物灰岩2种类型。

4.1 缓坡生物灰岩发育模式

缓坡生物灰岩分布于研究区的凸起周围。受相对湖平面变化和缓坡地貌控制,缓坡生物滩形成于浪基面之上,水体较为平静,处于低能状态,其沉积时期为水体缓慢上升过程,古地貌形态表现为缓坡,倾角约为10°~15°。缓坡生物灰岩形成于迎浪面一侧,地震剖面上多表现为上超、中-强振幅反射特征(图3)。

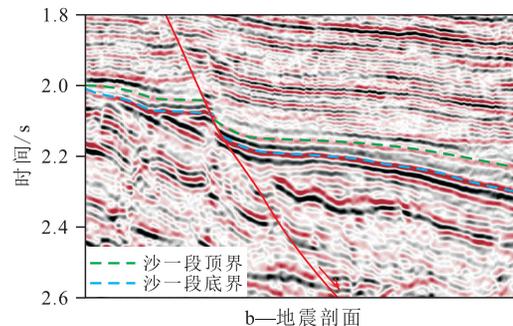


图3 长堤地区沙一段下部缓坡生物灰岩发育模式

Fig.3 Development mode of the biolimestone developed in gentle slope in the lower Es₁ in Changdi area

4.2 洼槽生物灰岩发育模式

洼槽生物灰岩分布于长堤地区东部缓坡带下凹处。受古水深变化及下凹地貌控制,洼槽生物灰岩形成于浪基面之上,水体处于低能状态,沉积时期水体为缓慢上升过程,古地貌形态表现为洼槽特征。

洼槽生物灰岩可能存在原地沉积的生物灰岩和异地沉积的生物灰岩2种成因。其中,原地沉积

的生物灰岩形成于迎浪面一侧,地震剖面上多表现为双向上超反射特征,对应于连续性较好、振幅较强的波峰,且延伸至洼槽底部,研究区东部洼槽附近桩310井已钻探证实;异地沉积的生物灰岩形成于高位水退过程,由于研究区缺少物源供给,水体较为清澈,洼槽内部沉积物可能由就近生物滩经湖浪打碎后在洼槽底部堆积形成,可发育2~3套生物灰岩(图4)。

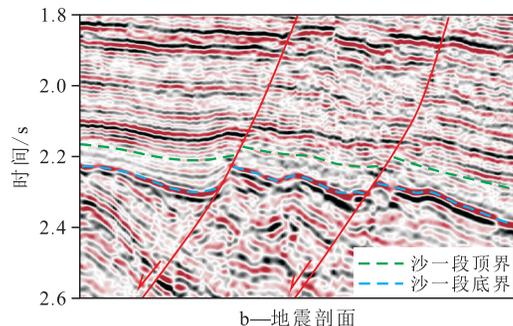
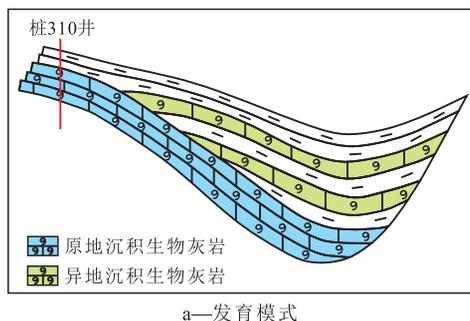


图4 长堤地区沙一段下部洼槽生物灰岩发育模式

Fig.4 Development mode of the biolimestone developed in trough in the lower Es₁ in Changdi area

5 生物灰岩分布特征

在沙一段沉积早期生物灰岩发育阶段,长堤地区至少存在3期较小的湖平面变化旋回^[13],发育3期生物灰岩沉积。分析桩181—桩12—桩209连井对比剖面(图5)发现,桩181井沙一段发育3套生物灰岩,桩12井在PSQ1和PSQ2发育2套生物灰岩,桩209井在PSQ1发育1套生物灰岩;生物灰岩分布具有一定的规律性,表明在沙一段沉积早期的湖侵过程中,研究区湖平面发生高频振荡,沉积物以退积叠置样式堆积。第1期湖平面变化时,桩181、桩12

和桩209井均处于浪基面与湖平面之间,位于滨浅湖缓坡折带,发育生物灰岩沉积,且平面上呈条带状分布。第2期湖平面变化时,桩181和桩12井处于浪基面和湖平面之间,发育生物灰岩沉积,而桩209井处于浪基面之下,以发育泥岩为主。第3期湖平面变化时,桩181井处于浪基面与湖平面之间,发育生物灰岩沉积,而桩12和桩209井处于浪基面之下,以发育泥岩为主。由于湖平面的周期性变化,导致研究区沙一段生物灰岩的分布也发生相应的变化,在隆起周缘生物灰岩发育较厚,沿缓坡方向生物灰岩相对减薄,且平面上平行于潜山周缘呈条带状分布^[14-15]。

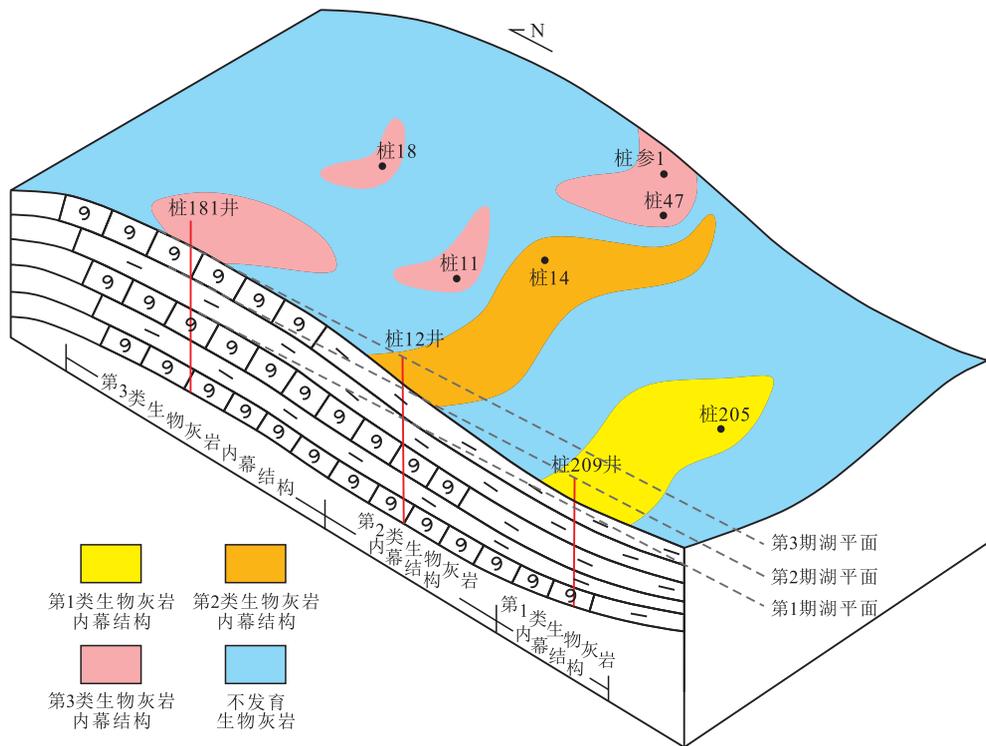


图5 长堤地区沙一段生物灰岩分布特征

Fig.5 Distribution characteristics of biolimestone in the Es₁ in Changdi area

6 结论

由于沾化凹陷长堤地区位于构造高部位,物源缺乏,因此在其沙一段沉积时期湖水较为清澈,为生物灰岩的沉积创造了有利条件。基于单井高频层序地层划分对古水深变化进行分析,确定研究区湖平面变化周期具有一定的规律性。在湖侵时期,湖平面变化速度较快,不利于生物灰岩沉积;而湖退时期,湖平面变化速度相对较慢,有利于生物灰岩沉积。研究区沙一段生物灰岩主要发育于湖水缓慢下降过程中,在湖水上升过程中则发育较少。

长堤地区沙一段生物灰岩主要分布于西南部缓坡及东部洼槽,分别具有缓坡生物灰岩发育模式和洼槽生物灰岩发育模式。

参考文献:

- [1] 付志方,王焕弟,邢卫新,等.层序地层学研究现状及进展[J].勘探地球物理进展,2005,28(5):320-324.
FU Zhifang, WANG Huandi, XING Weixin. Review of sequence stratigraphy [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2005, 28 (5): 320-324.
- [2] WILLIAMSON C R, PICARD M D. Petrology of carbonate rocks of the Green River Formation (Eocene) [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1974, 44(3): 738-759.

- [3] MURPHY D H, WILKINSON B H. Carbonate deposition and facies distribution in a central Michigan Marl Lake [J]. *Sedimentology*, 1980, 27(2): 123-135.
- [4] 杜韞华. 中国湖相碳酸盐岩油气储层[J]. *陆相石油地质*, 1992, 3(6): 25-37.
DU Yunhua. China lacustrine carbonate oil and gas reservoir [J]. *Continental Petroleum Geology*, 1992, 3(6): 25-37.
- [5] 赵国连, 赵澄林, 叶连俊. 渤海湾盆地“四扇一沟”沉积体系及其油气意义[J]. *地质力学学报*, 2005, 11(3): 245-258.
ZHAO Guolian, ZHAO Chenglin, YE Lianjun. Sedimentary system of “four fans and one channel” in the Bohai Gulf Basin and its significance for petroleum exploration [J]. *Journal of Geomechanics*, 2005, 11(3): 245-258.
- [6] 贺锋, 林畅松, 刘景彦, 等. 古城地区碳酸盐岩沉积特征及其主控因素[J]. *特种油气藏*, 2016, 23(5): 17-21.
HE Feng, LIN Changsong, LIU Jingyan, et al. Carbonate rock sedimentation and its main-controlling factors in Gucheng [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2016, 23(5): 17-21.
- [7] 王振洲, 张春雷, 高世臣. 利用决策树方法识别复杂碳酸盐岩岩性——以苏里格气田苏东41-33区块为例[J]. *油气地质与采收率*, 2017, 24(6): 25-33.
WANG Zhenzhou, ZHANG Chunlei, GAO Shichen. Lithology identification of complex carbonate rocks based on decision tree method: An example from Block Sudong41-33 in Sulige Gas Field [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2017, 24(6): 25-33.
- [8] 宋章强, 赖维成, 牛成民, 等. 渤海海域湖相碳酸盐岩地震-地质综合预测方法及应用[J]. *石油与天然气地质*, 2009, 30(4): 444-449.
SONG Zhangqiang, LAI Weicheng, NIU Chengmin, et al. An integrated seismic-geological approach to predict lacustrine carbonate rock in the Bohai Sea waters [J]. *Oil & Gas Geology*, 2009, 30(4): 444-449.
- [9] 姜秀芳. 济阳坳陷沙四段湖相碳酸盐岩分布规律及沉积模式[J]. *油气地质与采收率*, 2010, 17(6): 12-15.
JIANG Xiufang. The distribution pattern and sedimentary mode of the carbonate rock in Sha4 member in Jiyang depression [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2010, 17(6): 12-15.
- [10] 刘超, 姜在兴, 陈骥. 青海湖北部冲积扇沉积特征、演化过程及控制因素[J]. *油气地质与采收率*, 2017, 24(5): 1-9.
LIU Chao, JIANG Zaixing, CHEN Ji. Sedimentary characteristics, evolution and controlling factors of the alluvial fans, the north of Qinghai Lake [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2017, 24(5): 1-9.
- [11] 王敏, 赵国良, 冯敏, 等. 砂质辫状河储层隔夹层分布模式及其对边底水运移的影响——以南苏丹P油田Fal块为例[J]. *油气地质与采收率*, 2017, 24(2): 8-14.
WANG Min, ZHAO Guoliang, FENG Min, et al. Distribution pattern of intercalations and its impact on migration of edge and bottom water in sandy braided-river reservoirs—A case study of Fal structure in P Oilfield, South Sudan [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2017, 24(2): 8-14.
- [12] 赵约翰. 济阳坳陷埕岛东坡东营组重力流沉积特征及相模式[J]. *特种油气藏*, 2017, 24(4): 24-31.
ZHAO Yuehan. Gravity Flow sedimentary characteristics and facies model for Dongying Formation on east slope of Chengdao, Jiyang Depression [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2017, 24(4): 24-31.
- [13] 万琳, 王清斌, 赵国祥, 等. 石臼坨凸起陡坡带东三段扇三角洲砂体成岩作用定量表征[J]. *大庆石油地质与开发*, 2017, 36(6): 31-39.
WAN Lin, WANG Qingbin, ZHAO Guoxiang, et al. Quantitative characterization of the diagenesis of Ed₃ fan-delta sandbodies in the steep slope belt of Shijiutuo Uplift [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2017, 36(6): 31-39.
- [14] 曹建文, 夏日元, 张庆玉, 等. 潮湿环境下典型碳酸盐岩缝洞系统充填模式探讨[J]. *石油实验地质*, 2016, 38(1): 56-62.
CAO Jianwen, XIA Riyuan, ZHANG Qingyu, et al. Typical filling models of a fractured-vuggy system in carbonate rocks under a moist environment [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016, 38(1): 56-62.
- [15] 聂明龙, 童晓光, 刘群明, 等. 土库曼斯坦阿姆河右岸地区盐下碳酸盐岩气藏类型及油气富集因素[J]. *石油实验地质*, 2016, 38(1): 70-75.
NIE Minglong, TONG Xiaoguang, LIU Qunming, et al. Types of pre-salt carbonate gas reservoirs and hydrocarbon enrichment factors of Amu Darya right bank area in Turkmenistan [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016, 38(1): 70-75.

编辑 邹澍滢