

辽东湾坳陷新近系馆陶组浅水三角洲的发现及其油气勘探意义

钟怡江^{1,2}, 陈洪德^{1,2}, 徐长贵³, 王峻^{1,2}, 邹灏^{1,2}, 魏鹏^{1,2}, 杜晓峰³, 黄晓波³

[1. 成都理工大学 沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 2. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室 四川 成都 610059; 3. 中海石油(中国)有限公司 天津分公司, 天津 300452]

摘要:为突破辽东湾坳陷新近系馆陶组沉积相的早期认识对该区油气勘探下一步进展的制约,以沉积地质、地球物理和古生物相结合的分析方法,详细分析了湖泊及浅水三角洲存在的地质背景和证据。通过辽河坳陷馆陶组 and 明化镇组下段的沉积模式及可可西里卓乃湖-库赛湖区的现代沉积比较,结合孢粉百分含量法和相对比值法的半定量分析方法所揭示的古湿度和古温度分析结果,认为馆陶组主要是亚热带且湿度逐渐增大的气候条件下,以冲积扇和辫状河为主,具有大平原小前缘特点的浅水三角洲沉积模式。三角洲平原分为以冲积扇为主的上平原和以辫状河为主的下平原,三角洲前缘具有平面规模小、不稳定、河口坝和远砂坝不发育的特征。馆陶组下段封闭型湖泊面积小,以三角洲平原沉积为主;馆陶组上段湖域面积扩大,三角洲前缘更加发育,且次级洼陷之间由辫状河水系连通,呈敞流型湖泊特征。辽东湾坳陷新近系馆陶组浅水三角洲沉积体系的新认识使得前三三角洲泥岩发育区可能成为区域性盖层,为下一步大型油气藏的勘探提供重要的地质指导。

关键词:浅水三角洲;馆陶组;新近系;辽东湾坳陷

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Discovery of shallow-water delta in the Neogene Guantao Formation in the Liaodong Bay Depression and its significance for oil and gas exploration

Zhong Yijiang^{1,2}, Chen Hongde^{1,2}, Xu Changgui³, Wang Jun^{1,2}, Zou Hao^{1,2}, Wei Peng^{1,2}, Du Xiaofeng³, Huang Xiaobo³

(1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

3. Tianjin Branch of CNOOC Limited, Tianjin 300452, China)

Abstract: In order to break through the constraint of the earlier understandings of sedimentary facies on oil and gas exploration in the Neogene Guantao Formation in Liaodong Bay Depression, this paper studied the geological background and the evidences of the occurrence of lake and shallow-water delta through integration of sedimentary geology, geophysics and paleontology. The sedimentary patterns of the Guantao Formation and the Lower Minghua Formation in the Liaohe Depression, as well as the modern sedimentary patterns of the Zhuonai-Kusai Lake area were taken as analogies for comparison, and a semi-quantitative analysis method was used to determine paleohumidity and paleotemperature. It is believed that the Guantao Formation was deposited under subtropical climate conditions with increasing humidity, dominated by alluvial fan and braided river facies, and characterized by sedimentary pattern of shallow-water delta with a large plain and a small front. The delta plain consists of the upper plain dominated by alluvial fan and the lower plain dominated by braided river. The delta front features in small scale, instability, as well as underdeveloped mouth bar and distal bar. The area of closed lake was small during deposition of the lower Guantao Formation and delta plain deposits predominated. In contrast, the area of the open lake was enlarged during deposition of the upper Guantao Formation, delta front was well developed, and the subsags were connected by the braided river system. According to the new understandings on the shallow-water delta sedimentation system of the Neogene Guantao Formation in Liaodong Bay Depression, the front delta

收稿日期:2016-06-23;修订日期:2017-04-20。

第一作者简介:钟怡江(1983—),男,讲师,沉积学。E-mail:zhongyijiang2012@cdut.cn。

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41602118)。

mudstone may act as a regional cap rock, providing an important geological guidance for future oil and gas reservoir exploration.

Key words: shallow-water delta, Guantao Formation, Neogene, Liaodong Bay Depression

辽东湾坳陷是渤海湾盆地重要的油气勘探区之一,已成为中国东部重要的能源基地。经过近半个世纪的勘探,辽东湾坳陷共发现了14个大油气田和29个含油气构造,获各级石油地质储量 13×10^8 t,天然气地质储量 535×10^8 m³^[1]。受东营组三段和沙河街组三段两套烃源岩及重要的区域性盖层制约,辽东湾坳陷主要的油气藏主要发育在古近系沙河街组、东营组以及下部上元古界、古生界和中生界潜山中,新近系馆陶组油气藏主要是长期活动断裂的输导作用聚集而成,且发育高-特高孔隙度、高-特高渗透层,目前只在南部LD16-1和LD27-2地区具有油气突破^[1]。

前人认为辽东湾地区馆陶组为一套冲积扇和辫状河的陆源粗碎屑沉积^[2-5],因此缺乏良好的盖层条件,制约了该地区新近系油气勘探的下一步进展。近几年随着勘探步伐的加快和研究的深入,在渤海海域中南部渤中凹陷—黄河口凹陷—沾化凹陷统一的沉降中心相继发现了新近系馆陶组上段及明化镇组湖泊和浅水三角洲沉积,为该地区大型油气田油气勘探提供了有利的地质条件^[6-12]。目前国内鄂尔多斯盆地、松辽盆地、塔里木盆地、准格尔盆地等坳陷和断陷湖盆中都发育有浅水三角洲沉积体^[13],且取得了很好的油气勘探效应。

笔者在辽东湾坳陷新近系馆陶组进行古生物组合、岩性特征、沉积构造、测井及地震特征等详细分析后,对沉积相有了全新的认识,发现湖泊及浅水三角洲沉积,分析了浅水三角洲的沉积及平面展布特征,将为辽东湾坳陷新近系油气勘探下一步进展提供良好的地质指导。

1 区域地质背景

辽东湾坳陷位于渤海湾盆地东北部海域,呈北东向长条形展布,其东西两侧分别与胶辽隆起、燕山褶皱带相邻,南北分别与渤中坳陷、下辽河断陷盆地相接,面积约11 000 km²,发育辽东凹陷、辽中凹陷、辽西凹陷3个负向构造单元和辽东凸起、辽西低凸起2个正向构造单元,共同构成三凹两凸的构造格局^[14],各构造单元均呈北东-南西向相互平行展布(图1)。在古近纪末期,喜马拉雅运动第二幕(东营期)之后,由于

受太平洋板块的运动影响,华北地区遭受强烈的挤压,使区域整体抬升,广泛发育侵蚀夷平作用,结束了古近纪不均一的湖相断陷盆地沉积充填的发育历史。新近系馆陶组沉积时期渤海湾盆地进入以均匀热沉降为主的拗陷演化阶段,渤海湾盆地的沉降中心向渤中凹陷迁移^[15]。新近系虽然以热沉降为主,但是古近系强烈走滑拉张活动的断裂在新近系仍然具有走滑作用特征,只是走滑强度较弱,区域应力场以近南北向弱拉张为主^[16]。

2 辫状河三角洲存在证据

新近纪渤海海域沉降中心为远离物源区的渤中凹陷—黄河口凹陷—沾化凹陷,坳陷沉降速度加快,可容纳空间增大,发育了浅湖背景下的浅水三角洲沉积^[16]。辽东湾坳陷新近系馆陶组沉积时期,周缘近物源(燕山褶皱带和胶辽隆起)提供的粗碎屑物质及辽河盆地从上游向盆地内输送的物质,在盆地低可容纳空间中快速充填形成了一套整体具有高砂地比特征的砂砾岩沉积。本文通过详细的钻井、岩心、古生物、微量元素分析,结合地震及测井等有利研究手段,充分挖掘沉积特征要素后,发现了丰富的湖泊及三角洲存在证据,为重新认识辽东湾坳陷新近系馆陶组沉积特征提供了新的视角。

2.1 盆地沉降特征

辽东湾坳陷馆陶组厚度分布特征(图2)揭示了盆地横向中间沉降速率快,边缘沉降速率慢,轴向东北部 and 西南部沉降速率快,中部沉降速度慢的差异沉降作用,使得古地貌出现了中间高,东北和西南两端低的似“马鞍状”特征。西南部的洼陷由于毗邻渤中地区,与渤海海域沉降中心具有一定的耦合关系,东北部发育的次级洼陷为辽东湾坳陷内部的沉降中心。“马鞍”两端沉降中心成为此时的汇水中心,为辽东湾坳陷形成湖泊和三角洲提供了重要的地质背景。

2.2 古生物及古气候特征

辽东湾坳陷东北部及西南部沉降中心馆陶组发育的泥岩中均发现了典型的湖相微体古生物藻类化石组合,主要为淡水型的盘星藻属(*Pediastrum*)、光面球藻

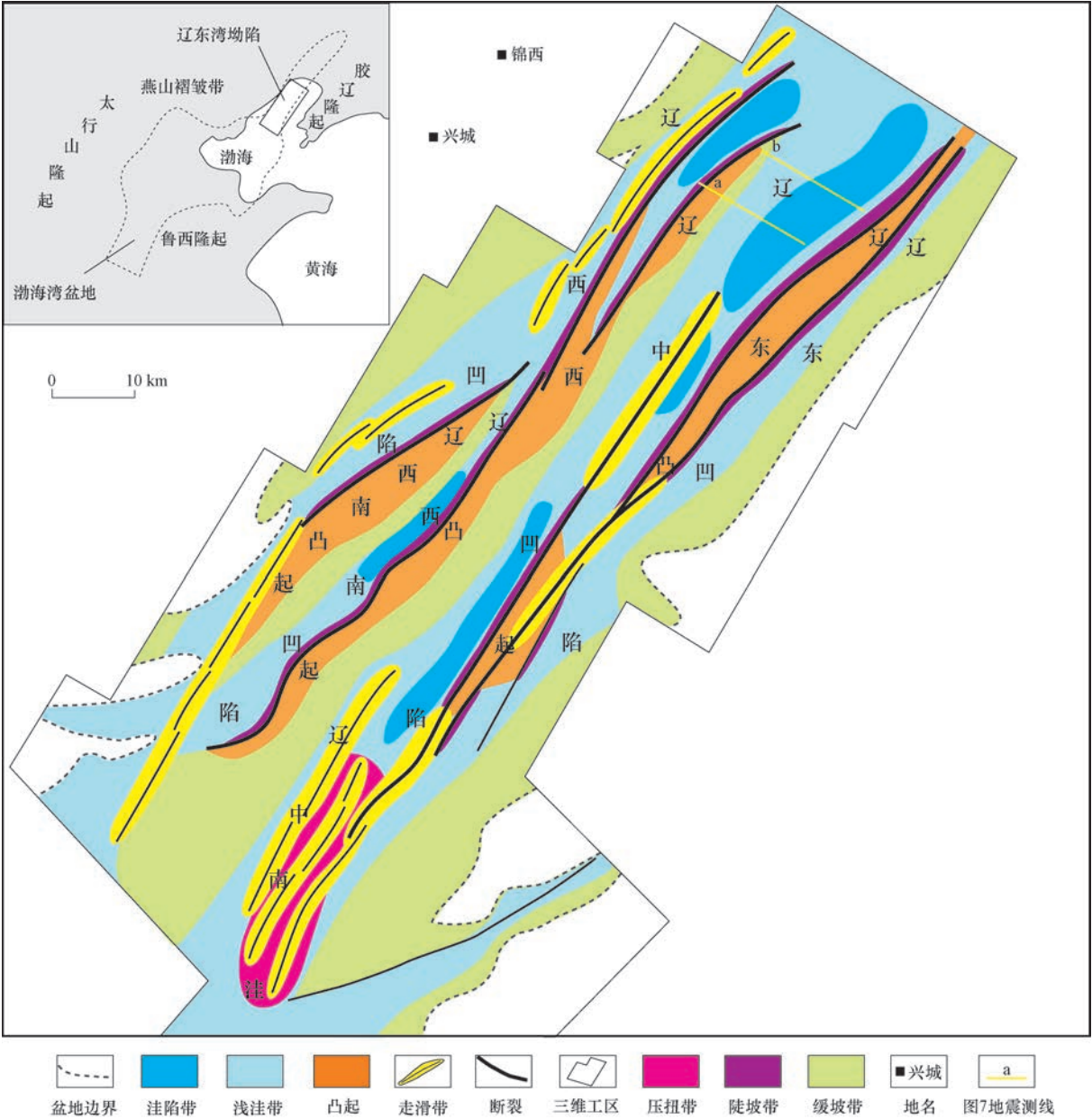


图 1 辽东湾坳陷构造单元平面分布

Fig. 1 Structure division of the Liaodong Bay Depression

属(*Leiosphaeridia*)、粒面球藻属(*Granodiscus*)、环纹藻属(*Concentricystes*)和褶皱藻属(*Compenia*),含量一般为10%~40%,东北部洼陷内最大含量可以达到95%,西南部洼陷含量为5%~50%。

馆陶组孢粉组合特征显示其对应的植物大部分生长于亚热带地区,并且水生和沼生类植物孢粉含量也较多,因此该时期的古气候类型为亚热带型。依据植物孢粉对于温度和湿度的敏感性原理,采取百分含量法和相对比值法的半定量分析方法^[17],选取研究区孢粉数据较完整的LD28地区为例,以某一种孢粉在单位盖片上的最大孢粉粒数作为基数,再将不同盖片中的同类型孢粉粒数与此基数相比,得到相对比值(R):

$$R = \frac{\text{单位盖片孢粉粒数}}{\text{Max(研究层段单位盖片孢粉粒数)}} \quad (1)$$

再以不同气候类型孢粉的相对比值进行加权并求和来作为综合评价气候变化的函数:

$$\text{温度综合指数} = 2R_{\text{亚热带组}} + 1.5R_{\text{热温过渡带组}} + R_{\text{温带组}} - 0.5R_{\text{温寒过渡带组}} - R_{\text{寒带组}} \quad (2)$$
$$\text{湿度综合指数} = 2R_{\text{旱生组}} + R_{\text{中生组}} - R_{\text{沼生组}} - 2R_{\text{水生组}} \quad (3)$$

在分别对温度和湿度敏感的孢粉种属进行分类之后,对孢粉数据进行相对比值统计,得出了温度、湿度变化曲线(图3,图4)。图中湿度和温度曲线的起伏变化反映了馆陶组沉积时期的古气候特征表现为从早期到晚期,湿度曲线总体呈现逐渐增大的趋势,在馆陶组

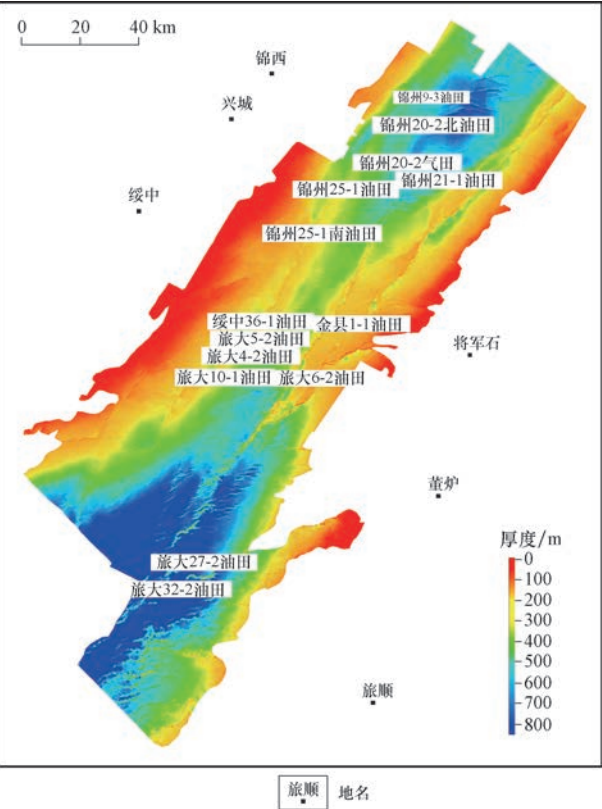


图 2 辽东湾坳陷馆陶组地层厚度

Fig. 2 Isopach of the Guangtao Formation in the Liaodong Bay Depression

沉积中期存在有一次较大的湿度波动,温度曲线呈现两次升温—降温旋回过程。

2.3 沉积学特征

从有限的取心资料得知,研究区馆陶组主要以含油性重的含砾粗砂为主(图 5a),东北部洼陷中馆陶组下段发现有反映弱还原条件浅水湖泊环境沉积的灰绿色、浅灰色泥岩(图 5b)。低角度冲洗交错层理(图 5c)和四段式具有双跳跃模式的粒度概率累积曲线特征,表明湖水波浪双向水流作用的存在。研究区砂砾岩/地层比值主要为 70% 以上,靠近盆地东西两侧物源的广大地区甚至高达 90% 以上。馆陶组下段砂砾岩/地层比值高值范围显著比上段大,且相对低值(<70%)区域在中间呈孤立状;馆陶组上段砂砾岩/地层比值在盆地东西两侧也呈高值特征,但高值范围较下段减小,相对低值(<70%)区域在盆地轴部呈带状展布,50% 以下区域在相对低值(<70%)区中呈串珠状分布。东北部、中部和西南部出现多个特低值区,最低可达 30% 以下(图 6)。强物源供给、粗碎屑沉积背景下的砂砾岩/地层比值的低值区是湖泊及浅水三角洲可容纳空间增加的沉积响应。

2.4 地球物理特征

在洼陷带砂砾岩/地层比值较低地区,顺盆地东西两侧物源方向地震剖面上能见到大型双向斜交前积反射特征,且测井曲线为表现底部低幅齿形,中部漏斗形

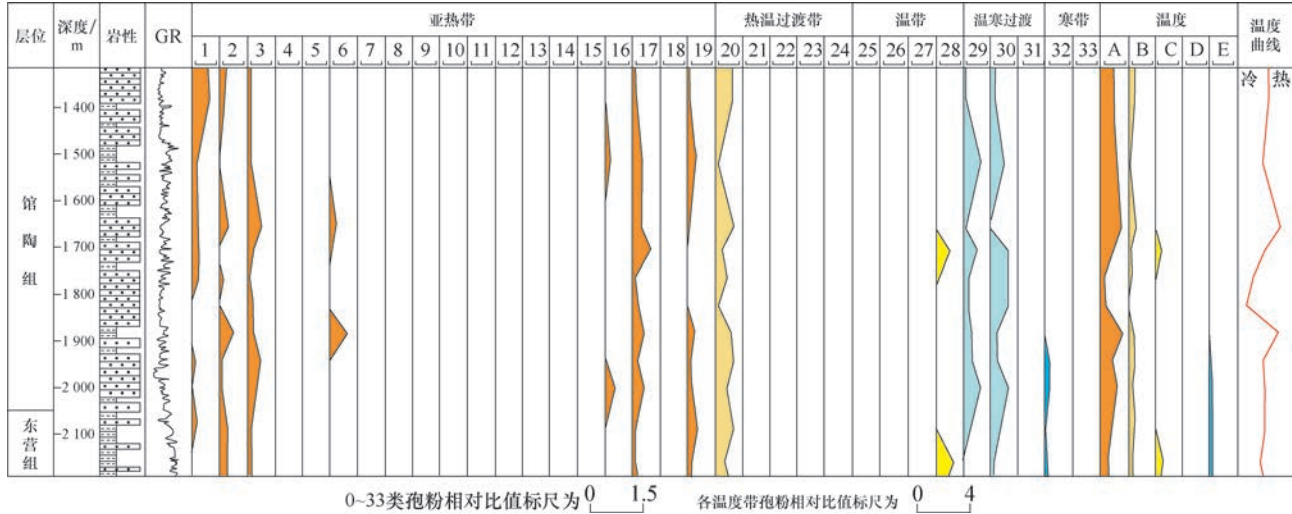


图 3 辽东湾坳陷 A-1-1 井温度敏感型孢粉相对比值及综合曲线

Fig. 3 Relative ratio and composite curves of temperature-sensitive pollen types of Well A-1-1 in the Liaodong Bay Depression

1. 枫香粉属;2. 栎粉属;3. 山核桃粉属;4. 芸香粉属;5. 山矾粉属;6. 槲粉属;7. 枫杨粉属;8. 紫树粉属;9. 大戟粉属;10. 无患子粉属;11. 冬青粉属;12. 桃金娘粉属;13. 漆树粉属;14. 鸡爪勒粉属;15. 伏平粉属;16. 雪松粉属;17. 铁杉粉属;18. 油杉粉属;19. 水龙骨单缝孢属;20. 榆粉属;21. 山毛榉粉属;22. 藜粉属;23. 柳叶菜粉属;24. 栗粉属;25. 眼子菜粉属;26. 槭树粉属;27. 唇形三沟粉属;28. 桉木粉属;29. 单束松粉属;30. 双束松粉属;31. 蒿粉属;32. 云杉粉属;33. 冷杉粉属;
A. 亚热带;B. 热温过渡带;C. 温带;D. 温寒过渡带. E. 寒带

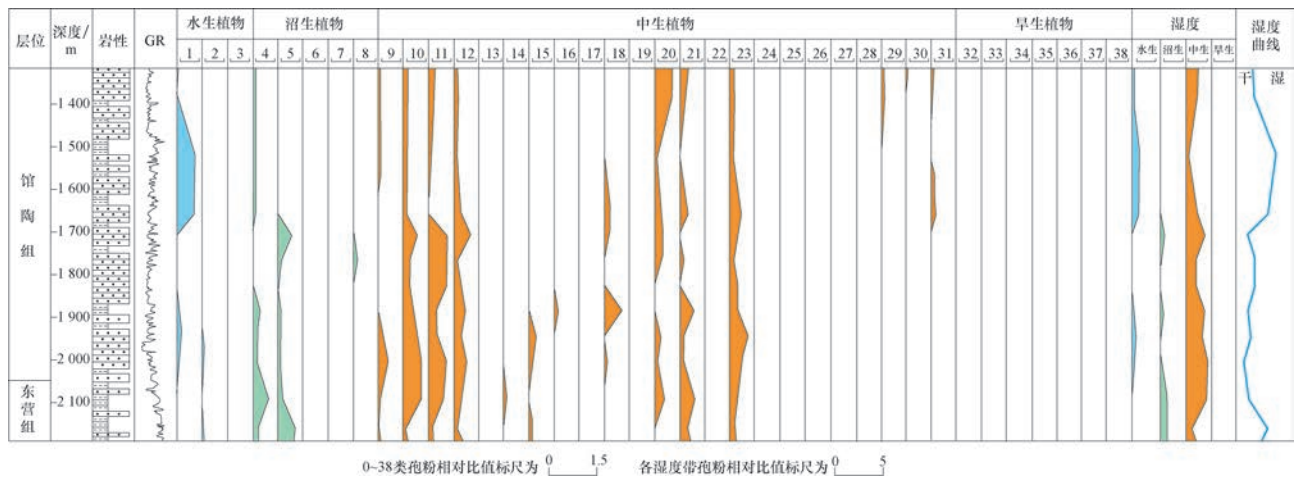


图 4 辽东湾坳陷 A-1-1 井湿度敏感型孢粉相对比值及综合曲线

Fig. 4 Relative ratio and composite curves of moisture-sensitive pollen types of Well A-1-1 in the Liaodong Bay Depression

1. 粗肋孢属; 2. 槐叶萍孢属; 3. 伏萍孢属; 4. 水龙骨科; 5. 桉木粉属; 6. 眼子菜粉属; 7. 柳叶菜粉属; 8. 紫萁孢属; 9. 雪松粉属; 10. 单束松粉属; 11. 双束松粉属; 12. 铁杉粉属; 13. 油杉粉属; 14. 冷杉粉属; 15. 云杉粉属; 16. 芸香粉属; 17. 大戟粉属; 18. 楝粉属; 19. 栗粉属; 20. 枫香粉属; 21. 栎粉属; 22. 桃金娘粉属; 23. 山核桃粉属; 24. 山矾粉属; 25. 紫树粉属; 26. 冬青粉属; 27. 无患子粉属; 28. 鸡爪勒粉属; 29. 槭树粉属; 30. 漆树粉属; 31. 山毛榉粉属; 32. 凤尾蕨孢属; 33. 希指蕨孢属; 34. 麻黄粉属; 35. 藜粉属; 36. 蒿粉属; 37. 锦葵粉属; 38. 唇形三沟粉属

A. 水生; B. 沼生; C. 中生; D. 旱生

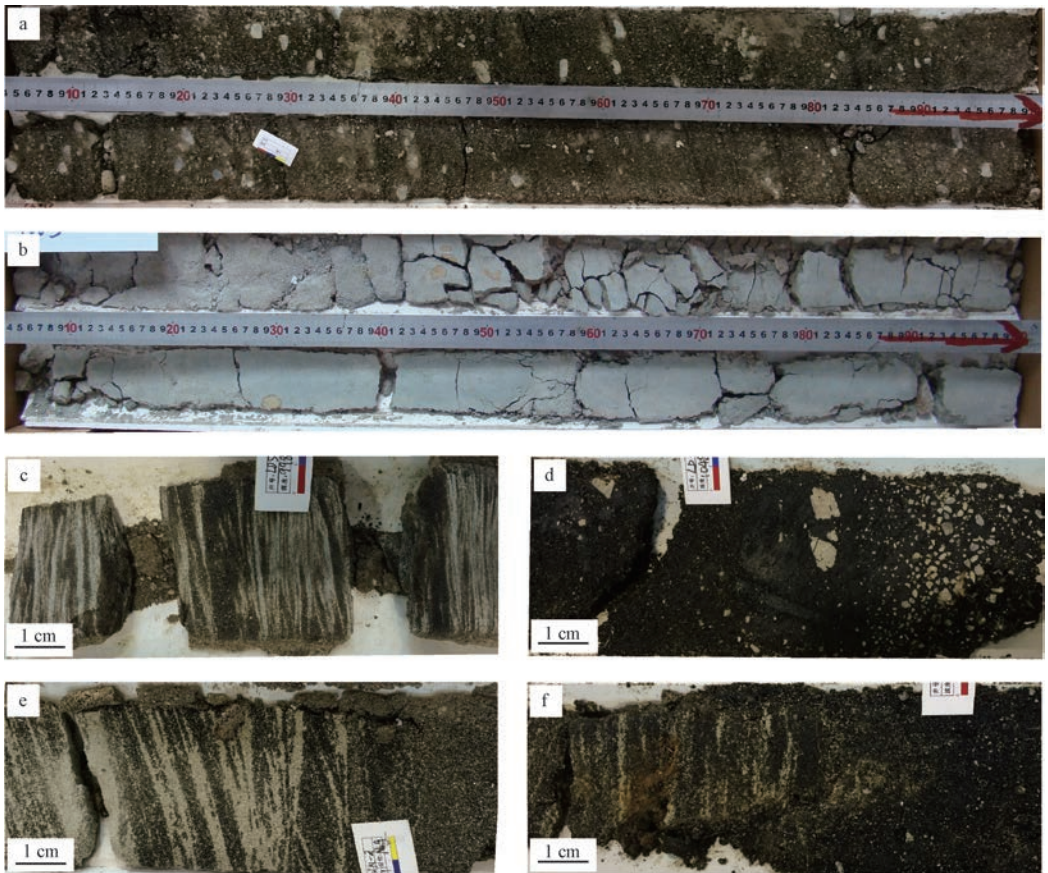


图 5 辽东湾坳陷馆陶组岩性及沉积构造特征

Fig. 5 Lithology and sedimentary structure of the Guantao Formation in the Liaodong Bay Depression

a. 砂砾岩, LD5-A, 埋深 1071.2~1069.2 m; b. 灰绿色泥岩, 顶部为灰白色粗砂岩, JZ23-A, 埋深 988.5~986.5 m; c. 低角度冲流交错层理, LD5-A, 埋深 998.2 m; d. 粒序层理, LD5-A, 埋深 1048.8 m; e. 斜层理, LD5-A, 埋深 1066.7 m; f. 平行层理, LD5-A, 埋深 1039.4 m

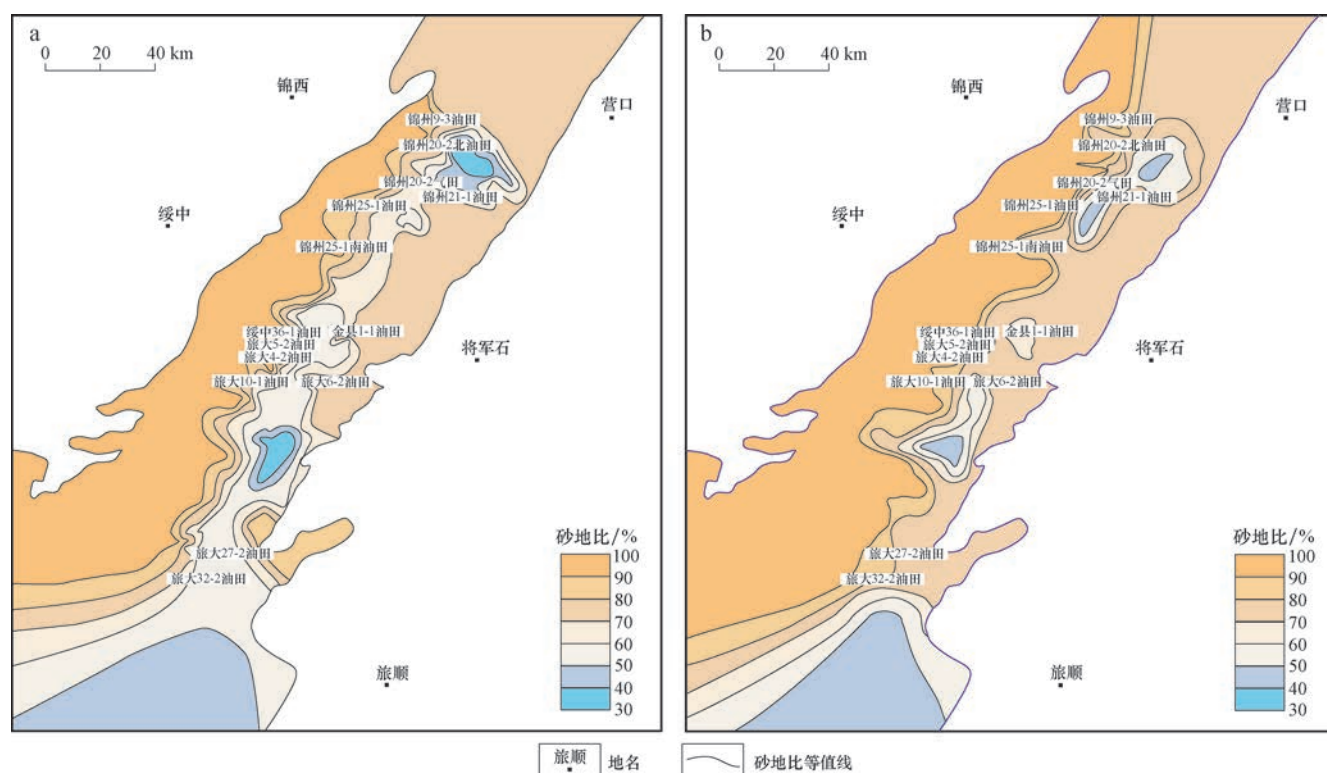


图6 辽东湾坳陷馆陶组下段(a)和上段(b)砂砾岩/地层厚度比值等值线

Fig. 6 Contour map of net-to-gross ratio of the Lower (a) and Upper (b) Guantao Formation in the Liaodong Bay Depression

(图7a右侧柱状图)的进积叠加样式,与河流相地球物理响应特征具有明显的差异(图7a)。东北部洼陷特低值区内($<40\%$)地震剖面上响应为强振幅平行反射并偶见弱振幅不连续反射(图7b中黄色框)特征,录井岩性见多套厚层泥岩夹砂岩,泥岩单层最厚可达50 m,测井曲线表现为低幅齿形及多套小型漏斗形特征(图7b右侧柱状图),分别表现为浅湖泥、浅湖砂坝及河口砂坝沉积响应特征。

3 浅水三角洲发育特征

结合以上分析,认为研究区沉积模式与东北部邻区辽河坳陷馆陶组和明化镇组下段的沉积模式^[5,18]以及青海省可可西里卓乃湖-库赛湖区山间冲积扇-湖泊沉积体系现代沉积具有相似性。卓乃湖、库赛湖以及周围的湖泊均为内流湖,湖泊之间均有季节性辫状河水系沟通。北部为昆仑山,山前冲积扇发育,南部为盆内凸起,也发育小型冲积扇。《中国国家地理》杂志2015年曾报道2011年曾因降水过多使得内流湖泊贯通流入长江水系,而成为外流湖^[19]。

燕山褶皱带和胶辽隆起物源区以及辽河坳陷分别从东西两侧及东北部向盆地轴部沉降速度快的次

级洼陷汇水形成局部的湖泊水域。该湖泊水体浅,汇水面积小,且具有汇水面积随气候变化大特征。馆陶组上段比下段气候潮湿,湖泊汇水面积增加,盆地轴向连接汇水区域的辫状河水系更加发育。该沉积背景下发育的浅水三角洲具有大平原、小前缘的特点。

3.1 三角洲平原

三角洲平原是该浅水三角洲发育的主体,具有冲积平原的特点。上平原亚相以季节性从东西两侧向盆地内推进的冲积扇为主,是盆地内粗碎屑物质的主要来源,主要沉积分选较差(标准偏差一般大于2),含次棱角-次圆状砾石的砾岩及砂砾岩,砂岩主体以粗砂岩含细-中砾为主,平行层理、交错层理和粒序层理等强水流沉积构造发育(图5d—f)。下平原亚相主要发育季节性辫状河为主。盆地东西两侧及东北部辽河坳陷沿盆地轴部向西南部渤海湾主要汇水区流动的辫状河对盆地两侧向内推进的冲积扇粗粒沉积进行了复合再次搬运堆积。受气候干湿变化影响,馆陶组下段冲积扇更发育,上平原较馆陶组下段范围大(图8),馆陶组上段古地貌鞍部连接次洼的季节性辫状水流更发育。

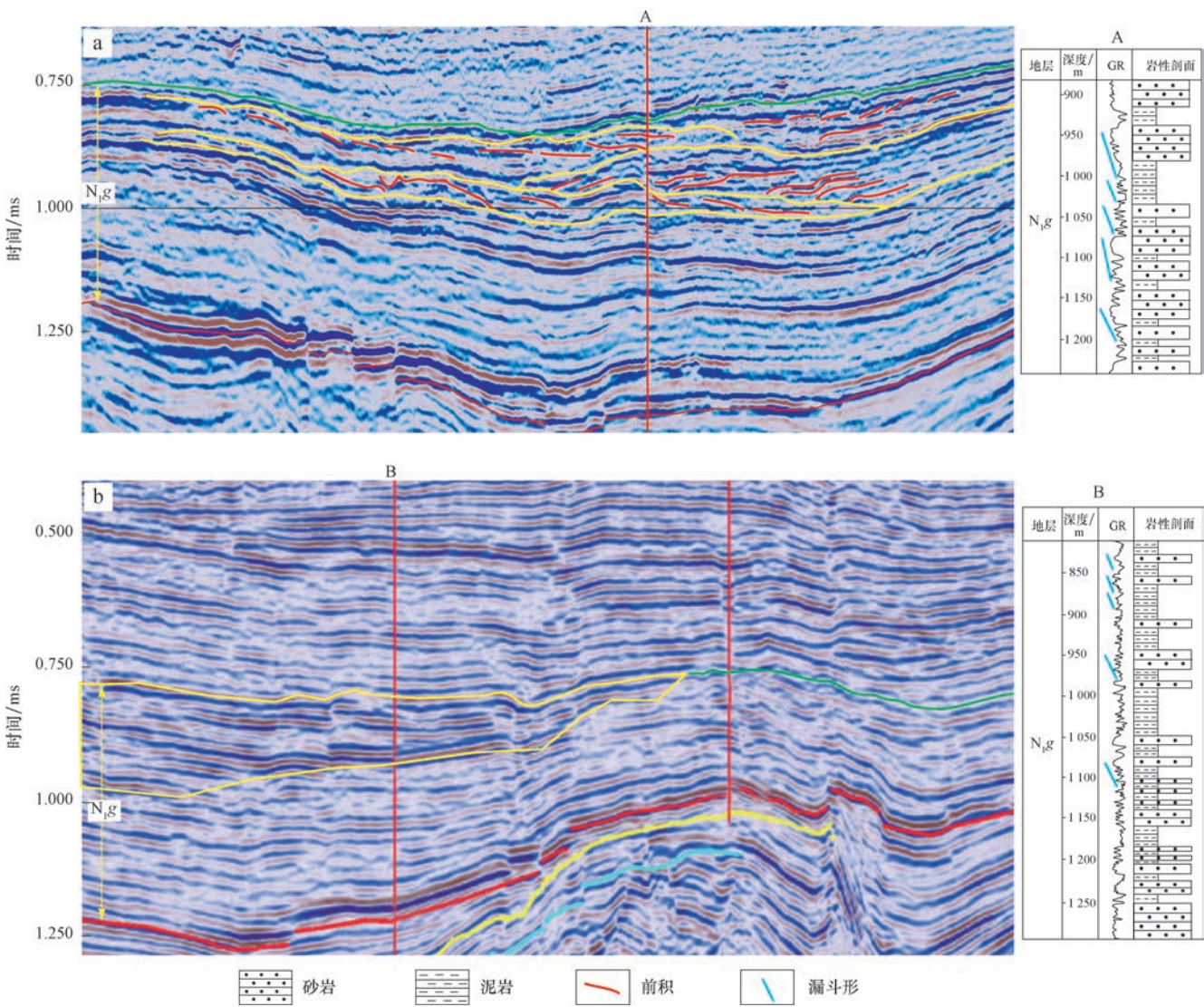


图7 辽东湾坳陷馆陶组浅水三角洲及湖泊地球物理响应特征
Fig. 7 Geophysical response of shallow delta and lake of the Guantao Formation in the Liaodong Bay Depression
a. 黄框内为三角洲前积体;b. 黄框内为湖泊地震响应,地震剖面对应位置在图1中标识

3.2 三角洲前缘

三角洲前缘具有平面规模小,纵向发育受物源供给充填淤塞制约而不稳定特征。由于三角洲平原辫状河输沙量较大,湖泊发育范围及位置显著受气候、物源供给和基底沉降的综合影响,只有在气候相对潮湿、基底沉降快和可容纳空间未被快速充填的区域可能发育。湖域范围内可容纳空间快速增加,三角洲前缘砂岩含量显著降低。受物源供给充足,河流进积作用强影响,河口坝和远砂坝等不发育^[20],且湖泊很容易被充填而消失,充填了地震剖面所展示的双向交织的前积特征砂体。馆陶组下段具有闭流型湖泊特征,馆陶组上段湖泊面积增大,南北湖泊之间由辫状河水系连通,整体呈现出敞流型湖泊特点。

4 油气勘探意义

浅水湖泊及其背景下浅水三角洲的发育,彻底改变了研究区以辫状河为主,粗粒沉积充满全盆的沉积特点。与研究区西南部渤海海域主体地区新近系浅水三角洲的发现^[5,11-12]具有的油气勘探意义一样,湖泊相带内稳定沉积的泥岩给制约研究区馆陶组勘探的关键油气成藏配置—盖层的发育提供了有利条件,特别是北部洼陷和馆陶组下段湖泊—浅水三角洲沉积体系的揭示,极大的丰富了该区储盖组合条件,为形成大型油气藏提供了必要的保障,为研究区馆陶组勘探思路的调整能起到很好的指导作用。

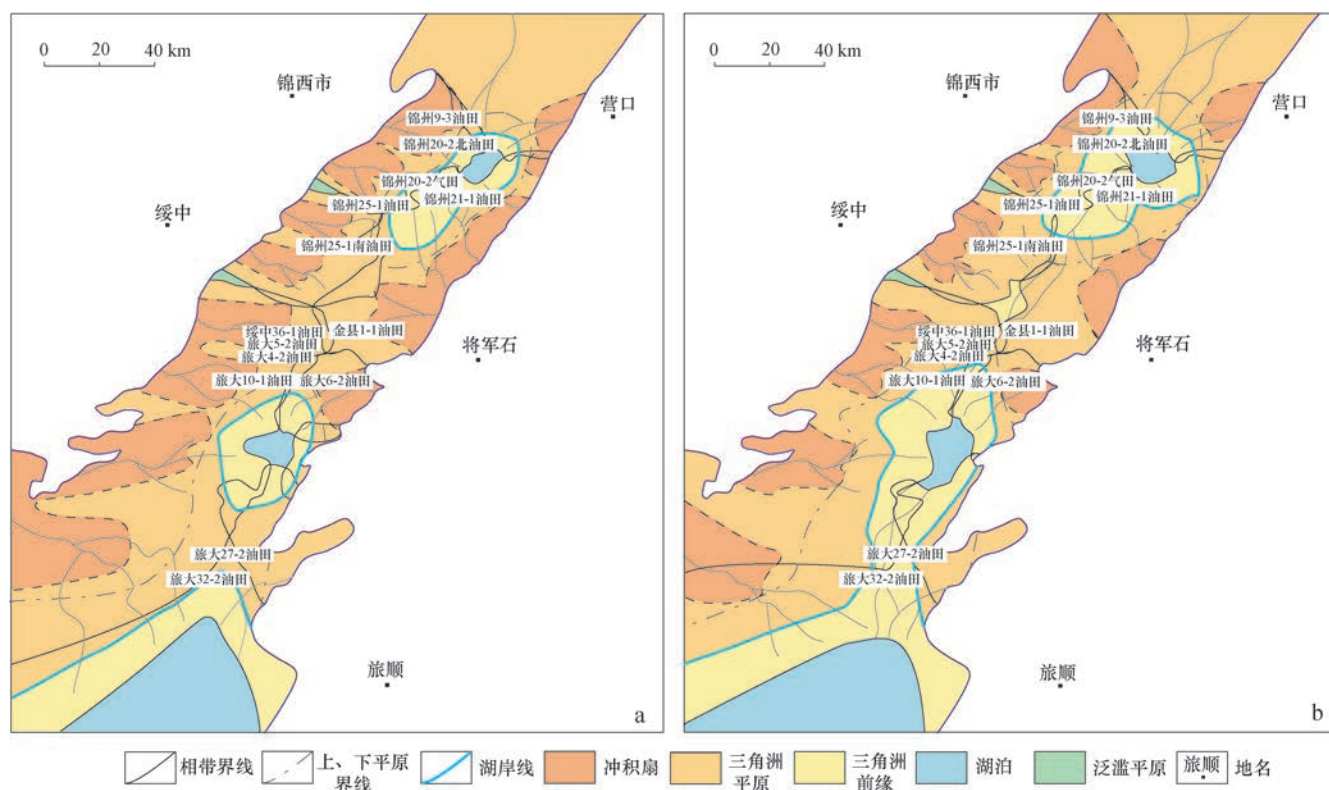


图8 辽东湾坳陷馆陶组下段(a)和上段(b)沉积相分布

Fig. 8 Sedimentary facies of the Upper (a) and Lower (b) Guantao Formation in the Liaodong Bay Depression

5 结论

1) 通过地质、地球物理和古生物的综合分析,证实了馆陶组下段至馆陶组上段气候越来越潮湿的条件下,辽东湾坳陷东北部和西南部沉降中心湖泊及浅水三角洲的存在。

2) 浅水三角洲具有大平原、小前缘的特点,且可划分为以冲积扇沉积为主的上平原、以辫状河沉积为主的下平原及河口坝和席状砂不发育的前缘3个亚相。湖泊范围显著受到气候、物源供给和基底沉降的综合影响。在湿度逐渐增大的情况下,馆陶组下段具有物源供给强,三角洲平原更加发育,湖域面积小,湖水闭塞的特征。馆陶组上段湖域面积扩大,三角洲前缘更加发育,次级洼陷之间由辫状河水系连通,呈现敞流型湖泊特征。

3) 馆陶组浅水三角洲及湖泊的发现,使得发育区域性的盖层成为可能,极大的丰富了该区储盖组合条件,为形成大型油气藏提供了必要的保障。

参考文献

[1] 王祥,王应斌,吕修祥,等.渤海海域辽东湾坳陷油气成藏条件与分布规律[J].石油与天然气地质,2011,32(3):342-351.

Wang Xiang, Wang Yingbin, Lv Xiuxiang, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and distribution patterns in the Liaodong Bay Depression, the Bohai Sea [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(3): 342-351.

[2] 翟光明. 中国石油地质志: 胜利油田(卷六) [M]. 北京: 石油工业出版社, 1987: 139-141.

Zhai Guangming. China Petroleum Geology: Shengli Oilfield (Vol 6) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1987: 139-141.

[3] 吴崇筠, 薛叔浩. 中国含油气盆地沉积学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1992: 158.

Wu Chongjun, Xu Shuhao. The petroleum basin sedimentology of China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992: 158.

[4] 徐长贵, 许效松, 丘东洲, 等. 辽东湾地区辽西凹陷中南部古近系构造格架与层序地层格架及古地理分析 [J]. 古地理学报, 2005, 7(4): 449-459.

Xu Changgu, Xu Xiaosong, Qiu Dongzhou, et al. Structural and sequence stratigraphic frame works and palaeogeography of the Paleogene in central-southern Liaoxi Sag, Liaodong wan Bay area [J], Journal of Palaeogeography, 2005, 7(4): 449-459.

[5] 朱伟林, 李建平, 周心怀, 等. 渤海新近系浅水三角洲沉积体系与大型油气田勘探 [J]. 沉积学报, 2008, 26(4): 575-582.

Zhu Weilin, Li Jianping, Zhou Xinhui, et al. Neogene shallow water deltaic system and large hydrocarbon accumulations in Bohai Bay, China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(4): 575-582.

[6] 王蛟. 沾化凹陷馆陶组下段辫状河三角洲的发现及油气勘探意义 [J]. 天然气地球科学, 2010, 21(6): 974-979.

Wang Jiao. Discovery of braided river delta in the Lower Member of

- Guantao Formation in Zhanhua Sag and exploration significance[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2010, 21(6): 974–979.
- [7] 王蛟. 山东孤岛油田馆陶组沉积晚期浅水振荡湖泊沉积[J]. *沉积学报*, 2007, 25(1): 82–89.
- Wang Jiao. Shallow oscillating lacustrine sediment of the Late Guantao Formation in Gudao Oilfield, Shandong Province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(1): 82–89.
- [8] 王蛟, 杨东明. 济阳坳陷孤岛油田馆陶组上段浅水湖泊三角洲沉积特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2010, 29(3): 238–243.
- Wang Jiao, Yang Dongming. Sedimentary features of shallow water Lake Delta of the Upside Guantao Formation of Gudao Oilfield in Jiyang Depression[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2010, 29(3): 238–243.
- [9] 李东海, 姜在兴, 李继山. 济阳坳陷东部新近系馆陶组下段辫状河三角洲沉积研究[J]. *石油大学学报(地球科学版)*, 2003, 27(3): 10–13.
- Li Donghai, Jiang Zaixing, Li Jishan. Braided river delta sedimentary facies of Lower Guantao Formation of the Neogen in Easten Jiyang Depression[J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 2003, 27(3): 10–13.
- [10] 王代流, 王蛟. 孤岛油田馆陶组湖相沉积认识及应用[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2009, 31(2): 41–44.
- Wang Dailiu, Wang Jiao. The recognition and application of lacustrine facies in Guantao Formation of Gudao Oil Field[J]. *Journal of Southwest Petroleum(Science & Technology Edition)*, 2009, 31(2): 41–44.
- [11] 代黎明, 李建平, 周心怀, 等. 渤海海域新近系浅水三角洲沉积体系分析[J]. *岩性油气藏*, 2007, 19(4): 75–81.
- Dai Liming, Li Jianping, Zhou Xinhui, et al. Depositional system of the Neogene shallow water delta in Bohai Sea area[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2007, 19(4): 75–81.
- [12] 徐长贵, 姜培海, 武法东, 等. 渤中坳陷上第三系三角洲的发现、沉积特征及其油气勘探意义[J]. *沉积学报*, 2002, 20(4): 588–594.
- Xu Changgui, Jiang Peihai, Wu Fadong, et al. Discovery and Sedimentary characteristics of the Neogene Delta in Bozhong Depression and its significance for oil and gas exploration[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(4): 588–594.
- [13] 刘自亮, 沈芳, 朱筱敏, 等. 浅水三角洲研究进展与陆相湖盆实例分析[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(4): 596–604.
- Liu Ziliang, Shen Fang, Zhu Xiaomin, et al. Progress of shallow-water delta research and a case study of continental lake basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(4): 596–604.
- [14] 徐长贵, 余一欣, 吴奎, 等. 辽东湾坳陷断裂联接及其控油气作用[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(4): 456–462.
- Xu Changgui, Yu Yixin, Wu Kui, et al. Fault linkages and their control on hydrocarbon accumulation in the Liaodongwan Depression, offshore Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(4): 456–462.
- [15] 张若祥, 李建平, 刘士磊, 等. 渤海中部馆陶组层序地层特征及其底界研究[J]. *地层学杂志*, 2011, 35(2): 147–154.
- Zhang Ruoxiang, Li Jianping, Liu Shilei, et al. Sequence-stratigraphy and the basal boundary of the Guantao Formation in the Middle Bohai Gulf Basin. *Journal of Stratigraphy*[J]. 2011, 35(2): 147–154.
- [16] 徐长贵, 任健, 吴智平, 等. 辽东湾坳陷东部地区新生代断裂体系与构造演化[J]. *高校地质学报*, 2015, 21(2): 215–222.
- Xu Changgui, Ren Jian, Wu Zhiping, et al. Cenozoic fault system and tectonic evolution of the Eastern Liaodong Bay Depression[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2015, 21(2): 215–222.
- [17] 吴伟, 林畅松, 周心怀, 等. 辽东湾古近纪东营期古气候演化及其对湖平面变化的影响[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 36(1): 33–40.
- Wu Wei, Lin Changsong, Zhou Xinhui, et al. Paleoclimate evolution and its influence on lake level changes of Paleogene Dongying epoch in Liaodong Bay, East China[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2012, 36(1): 33–40.
- [18] 杨彦东. 渤海湾盆地北段辽河坳陷馆陶组地层沉积模式[J]. *特种油气藏*, 2014, 21(4): 67–69.
- Yang Yandong. Sedimentary mode of Guantao Formation in Liaohe Depression, Northern Bohai Bay Basin[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2014, 21(4): 67–69.
- [19] 陈勇. 青藏高原无小事. 卓乃湖决堤, 青藏高原的水可能留不住了! 我国东部气候也许随之改变! [J]. *中国国家地理*, 2015, (11): 78–93.
- Chen Yong. There are big things in Tibetan plateau. Water may be unable to retain in Tibetan as to the breaching of dyke of Zuonai lake! Climate in east of China may change! [J]. *Chinese National Geography*, 2015, (11): 78–93.
- [20] 孙作兴, 张义娜, 刘长利, 等. 浅水三角洲的沉积特征及油气勘探意义[J]. *石油与天然气学报*, 2012, 34(9): 161–165.
- Sun Zuoxing, Zhang Yina, Liu Changli, et al. Sedimentary characteristics and exploration significance of shallow-water delta[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2012, 34(9): 161–165.

(编辑 张亚雄)