

孤北洼陷长堤断裂带扇三角洲砂砾岩体沉积特征及空间展布规律

邱隆伟¹,贾继成¹,马立驰²,杨勇强¹,孙超²,辛也²,王鑫³,杨生超⁴

[1. 中国石油大学(华东), 山东 青岛 266580; 2. 中国石化胜利油田地质科学研究院, 山东 东营 257015;

3. 中国石油新疆油田公司采油一厂, 新疆 克拉玛依 834000; 4. 南京大学, 江苏 南京 210023]

摘要:受多种地质作用的联合控制,断陷湖盆陡坡带内的扇三角洲型砂砾岩体在空间展布上具有较大的差异。综合利用岩心、测井和地震等资料,系统研究了孤北洼陷长堤断裂带周缘砂砾岩体的空间分布特征,分析了砂砾岩体形成的主控因素。研究表明砂砾岩体的形成主要受断层活动强度、湖平面变化和物源供给等因素控制,不同地区影响因素作用的强弱导致砂砾岩体分布的差异性。长堤断裂带北部地区断裂活动强,物源供给充足,扇体发育的规模较大,在剖面上多表现为多期垂向加积的特点,扇体前部往往发育大规模的滑塌浊积扇;南部地区断裂活动较弱,且物源供给弱,扇体发育的规模小,在剖面上表现为先退积后进积的叠加样式。受次级断层交替活动的影响,扇体在垂直物源方向上表现为多期的楔形叠加。总体上有利的相带,扇体的侧向尖灭和顶部泥岩的封堵联合控制了研究区油气的分布。

关键词:砂砾岩体;次级断层;沙河街组;沾化凹陷;济阳拗陷

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Sedimentary characteristics and spatial distribution of coarse clastic rocks of fan delta in Changdi fault zone in Gubei sub-sag, Jiyang Depression

Qiu Longwei¹, Jia Jicheng¹, Ma Lichi², Yang Yongqiang¹, Sun Chao², Xin Ye², Wang Xin³, Yang Shengchao⁴

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China; 2. Research Institute of Geological Sciences, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China; 3. First Oil Production Plant of Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China; 4. Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

Abstract: Fan delta coarse clastic rocks on steep slopes of faulted lacustrine basins have large variability in spatial distribution due to the joint control of various geological factors. Various data including core, log and seismic data are integrated to investigate the spatial distribution characteristics and the main controlling factors on formation of the fan delta coarse clastic rocks in the 2nd to the Upper 4th Member of the Eocene Shahejie Formation on the periphery of Changdi fault zone in Gubei sub-sag. The study results show that the development of fan delta coarse clastic rocks are controlled by the intensity of fault activity, change of lake level and sediment supply. The contributions of each influential factor are different in different areas, resulting in the differences of distribution of these fan delta coarse clastic rocks. In the northern part of Changdi fault zone, fault activities are strong and sediment supply is sufficient, thus the fan delta deposits are large in scale and are characterized by vertical aggradation of multiple stages on sectional view. In addition, large slump turbidite fans are common in fan front. On the contrary, in the southern part of the fault zone, faulting is relatively weak and sediment supply is insufficient, thus the fans are small in scale and show a superimposition pattern of early retrogradation and late progradation. Owing to the alternative activity of secondary faults, the fan delta coarse clastic rocks are characterized by wedge-shaped superimposition of multiple stages in the direction of perpendicular to provenance. In general, the distribution of oil and gas in the study area are controlled by favorable sedimentary facies zones, lateral pinch out of the fans and sealing of top mudstone.

Key words: coarse clastic rock, secondary fault, Shahejie Formation, Zhaihua sag, Jiyang Depression

收稿日期:2016-01-15;修订日期:2018-01-04。

第一作者简介:邱隆伟(1967—),男,教授,沉积学及储层地质学。E-mail:qiuwlsd@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05009-002);山东省自然科学基金联合专项(ZR2016DL05)。

在准噶尔盆地玛湖凹陷中心区发现十亿吨级砾岩大油区,是目前发现的世界最大砾岩油田,为我国西部地区能源安全和国防军工建设提供了重要保障,目前砂砾岩仍将是国内的热点。但坡带砂砾岩体具有快速堆积、分选和成层性差等特征,一直是国内勘探的难点。对于砂砾岩体的发育,国内已经有明确认识,主要控制因素有:断层活动、气候变化、湖平面、物源、古地貌等方面。如鲜本忠^[1]研究车镇凹陷时认为断陷湖盆陡坡带砂砾岩体主要受到构造、湖平面、古地貌控制——断裂结构控型、构造转换带控源、古地貌控砂、复合基准面控层位。董艳蕾^[2]等在泌阳凹陷东南部核桃园组研究中,认为构造起主导作用,断层陡缓程度控制着沉积体系。林畅松^[3]等在东营凹陷和沾化凹陷砂砾岩的研究中指出:断裂体系会改造古地貌,从而控制扇体的展布;与边界断层高角度相交的伴生的次级调节断裂有很好的输导作用,约束扇体分布;肖军^[4]在琼东南盆地中认为高角度相交的次级断层控制着输导系统的发育,碎屑物沿着次级同沉积断裂向盆地推进。因此断层活动加强砂砾岩非均匀性分布,前人考虑了主控断层及其伴生的次级断层对砂砾岩扇体发育的影响^[5-6],但对于同沉积次级断层在不同时期活动强度不同而造成的影响方面研究不够,并且对强弱物源背景下砂砾岩体的差异性分布样式没有进行讨论。本文从地震、测井、岩心出发,在明确孤北洼陷东次洼沙(沙河街组)四段上亚段—沙二段时期砂砾岩体沉积特征的基础上,开展次级断层活动强度对扇体影响,以及物源强弱、湖平面变化等对砂砾岩的控制作用研究,建立砂砾岩体的分布样式,为研究区的下一步勘探开发提供指导。

1 地质概况

孤北洼陷位于济阳坳陷沾化凹陷东北部,东接长堤潜山,西接长堤东凸起,南接孤岛潜山,北接桩西潜山,是典型的双断陷湖盆^[7],洼陷周边发育堤东、孤北、长堤及桩南4条边界正断层,洼陷中分布着东部次洼、西部次洼和中央低凸起等次级构造单元(图1)。研究区位于孤北洼陷的东部次洼(图1),其东部断层为长堤断裂带中段,断层上陡下缓,表现正断层性质^[7],主体为南北走向,倾向西,倾角 $40^{\circ} \sim 65^{\circ}$,北端转向NE向,南端转向SW向,断裂带长约20 km,落差1.5~2.5 km,自北向南逐渐变缓,与近于平行的五号桩断层^[8],形成断阶(二台阶),二台阶分为南北两段。在二台阶北部发育东西走向、与长堤断层近于垂直的次级断层(图1)。

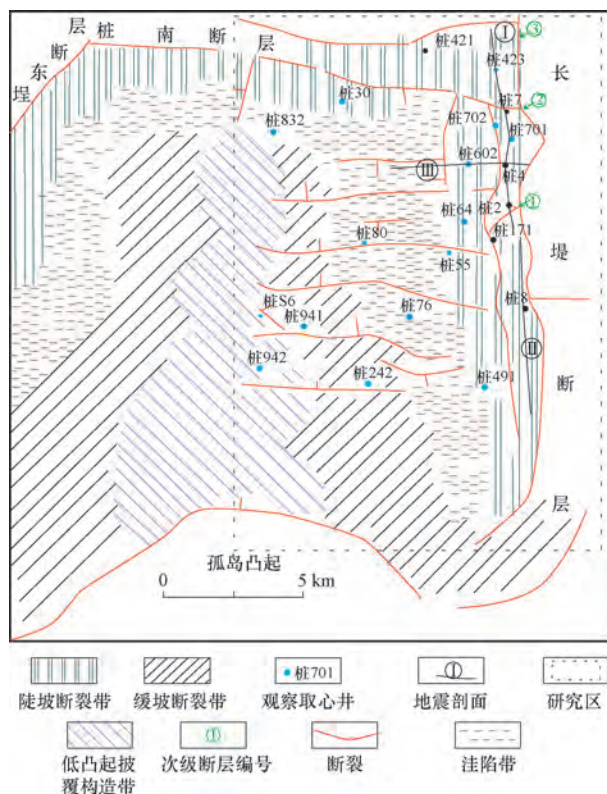


图1 孤北洼陷构造特征及井位分布

Fig. 1 Structure characteristics and well locations of the Gubei sub-sag

沙四段时期孤北洼陷处于古近纪裂陷早期,沉积类型以红色陆源碎屑物为主,经过剥蚀之后,孤北洼陷成为一个稳定的浅湖湖盆。沙三段—沙二段早期,为裂谷—深断陷期,湖盆快速沉降,湖平面快速上升,形成饥饿型的深湖—半深湖环境,发育了3期沉积旋回,同时期构造活动频繁,各个沉积区厚度变化大,与沙四段为不整合、上超不整合接触。沙二段上亚段—东营组为裂谷—萎缩期,构造活动减弱,水体变浅,凸起与凹陷分割作用减弱,与下覆沙三段为不整合接触(图2)。

2 沉积相类型及其特征

2.1 扇三角洲

研究工区二台阶主要发育扇三角洲。扇三角洲总体粒度粗、分选差,分为扇三角洲平原、扇三角洲前缘、前扇三角洲等亚相。扇三角洲平原沉积在湖平面之上,以泥石流和水上分流河道沉积为主,是阵发性洪水冲击卸载的粗粒沉积,向上变粗特征,划分出水下分流河道和水上分流河道间湾等微相。水上分流河道微相以砂质砾岩和砾状砂岩所构成,可见褐色泥砾、分选

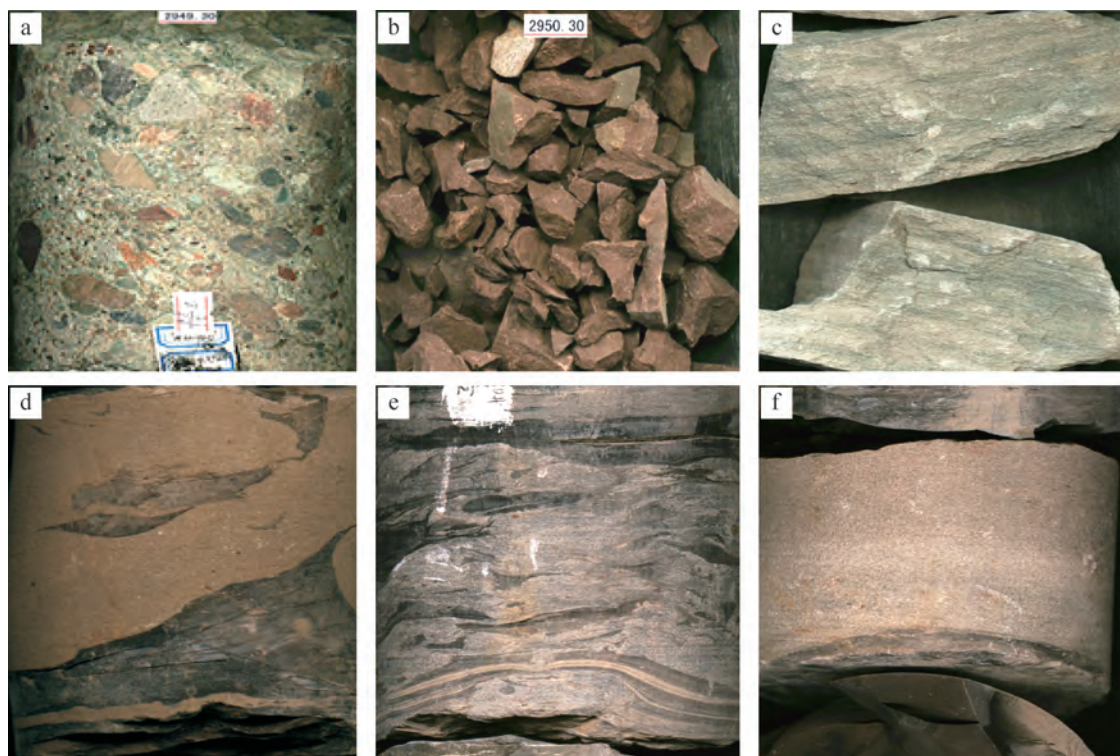


图2 孤北洼陷东次洼沙四上亚段—沙二段典型沉积特征岩心照片

Fig. 2 Typical core photographs showing sedimentary structures of Es^{4s} - Es² in the eastern Gubei sub-sag

- a. 砂质砾岩, 含有褐色砾, 分选差, 颗粒支撑, 扇三角洲平原亚相, 桩 701 井, 埋深 2 949.3 m; b. 红褐色泥岩, 扇三角洲平原亚相, 桩 701 井, 埋深 2 950.3 m; c. 粉砂岩, 浪成交错层理, 扇三角洲前缘分流河口坝, 桩 701 井, 埋深 2 942.3 m; d. 火焰状构造, 主体亚相, 桩 30 井, 埋深 3 636.9 m; e. 滑动面及搅浑构造, 边缘亚相, 桩 30 井, 埋深 3 679.2 m; f. 块状砂岩, 上下突变接触, 边缘亚相, 桩 30 井, 埋深 3 639.8 m

差, 层理不发育, 以块状构造为主。水上分流河道间湾微相颜色多为褐色, 岩性为泥岩及粉砂岩。扇三角洲前缘岩性主要为细砾岩, 中粗砂岩与细砂岩, 牵引流构造较发育, 常见递变层理和平行层理。划分出水下分流河道、水下分流河道间湾和下水分流河道砂坝等微相。水下分流河道微相岩性为含砾砂岩、砾状砂岩, 分选差, 底部有冲刷面^[9], 向上具有递变层理、块状层理等。水下分流间湾岩性主要为泥岩、粉砂岩等, 颜色多为灰色, 可见水平层理。水下分流河口砂坝岩性以灰色的细砂岩和粉砂岩组成, 呈现反序特征。前扇三角洲水动力总体较弱, 层理多为平行层理, 岩性为灰色及黑色粉砂质泥岩, 分布在扇三角洲前端。

2.2 滑塌浊积扇

滑塌浊积扇主要发育在东次洼北部断阶之下, 扇三角洲前段。滑塌浊积扇岩性细, 以粉砂—细砂岩为主, 发育段呈砂泥岩薄互层。砂岩中见有大量的准同生变形构造, 并有递变层理、冲刷面、液化构造等, 多含暗色泥砾和泥岩撕裂屑, 反映了沉积物滑动再沉积的特点。滑塌浊积扇相可以分为内扇、中扇、外扇 3 个亚

相。中扇亚相岩性细, 以粉砂—细砂岩为主, 发育段呈砂泥岩薄互层, 主要由滑塌作用导致的块体坡移而成。砂岩伴有暗色的泥砾和泥岩撕裂屑, 常见构造: 准同生变形构造、冲刷面、递变层理、液化构造等, 反映了沉积物滑动在沉积的特点。外扇亚相主要有块体滑塌而伴生的搅浑作用形成的浊流以及远砂坝末梢、前三角洲泥等混杂堆积主要发育末梢微相^[10]。

3 砂砾岩体发育特征

孤北洼陷是在燕山期拉张断陷、燕山—喜马拉雅运动早期挤压转拉张构造演化而来, 洼陷的形成演化受边界断层控制^[11-12]。长堤断层在沙四上亚段, 断层活动最强烈时期, 最大落差超过 500 m; 沙三下亚段时期受到喜马拉雅运动一幕的影响, 长堤断层最大落差超过 450 m, 生长指数为 2.7^[12]; 沙三上亚段—沙二段时期, 长堤断层活动减弱。长堤断层具有由南向北活动速率逐渐增大的特点^[12], 导致下降盘二台阶北段比南段砂砾岩体厚度大(图 3)。

对于下降盘二台阶北段地层, 在沙四上亚段时期, 3 号次级断层落差超过 600 m, 倾向北, 地层为北厚南

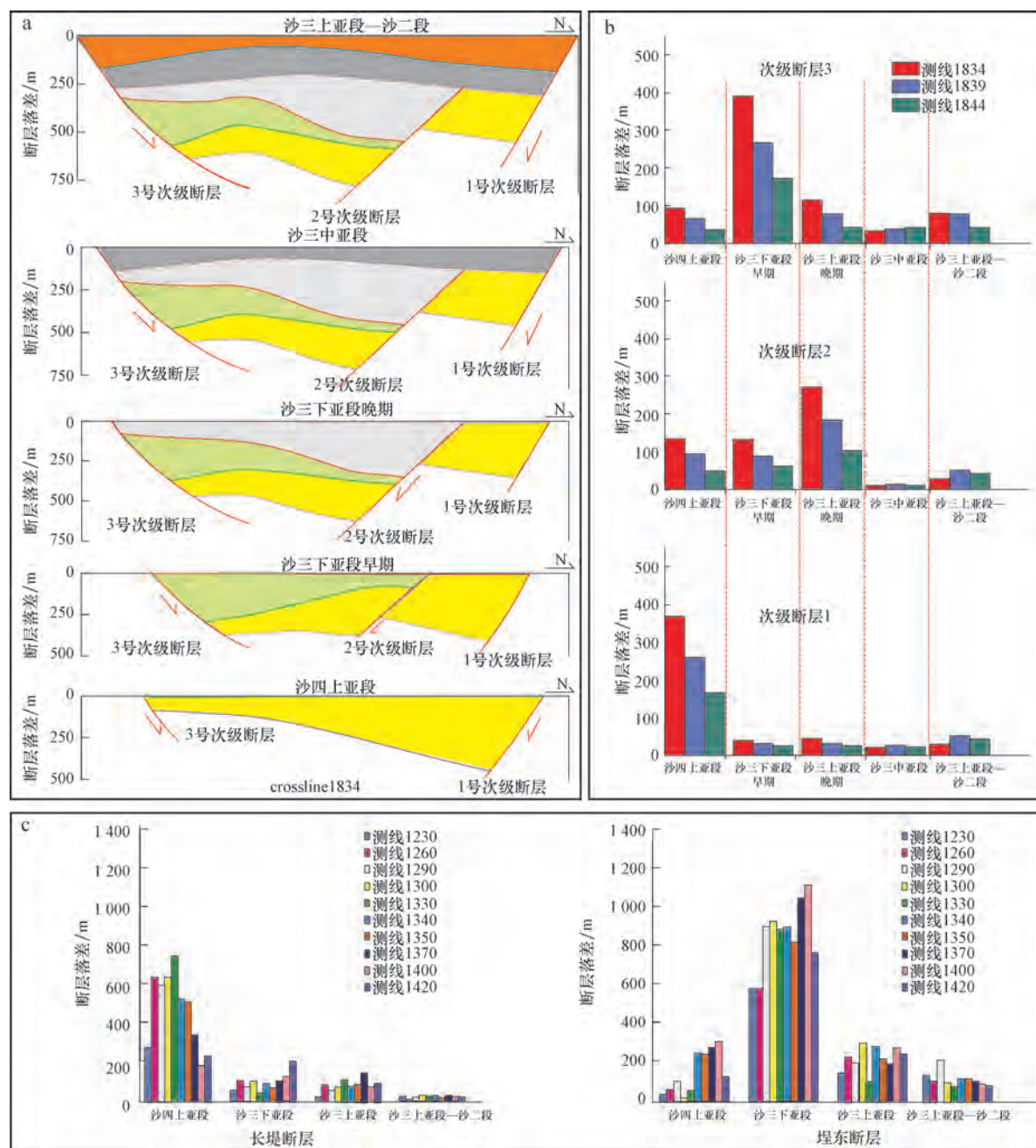


图3 孤北洼陷沙四上亚段—沙二段构造演化剖面及断层落差

Fig.3 Structural evolution profiles and the fault throw of Es^{4s}—Es² in the Gubei sub-sag

a. 孤北洼陷长堤下降盘断层北段南北向沙四上亚段—沙二段构造演化剖面; b. 孤北洼陷长堤下降盘断层北段南北向沙四上亚段—沙二段断层落差; c. 孤北洼陷长堤断层和埕东断层沙四上亚段—沙二段断层落差

薄;进入沙三下亚段时期,早期阶段3号正断层活动相对强烈,倾向南,角度40°,总长4 km,自东向西逐渐变缓,地层为北薄南厚,最大落差超过400 m;晚期阶段2号正断层活动较强,倾向北,总长3 km,自东向西逐渐变缓,二台阶北段地层为北厚西薄,最大落差超过300 m;进入沙三中亚段时期,二台阶北段地层厚度均匀;在沙三上亚段—沙二段时期,1号和3号次级断层都活动,北段地层为两端厚,中间薄(图3)。在沙四上亚段和沙三段下亚段,垂利物源方向上,可见楔形地震体,

顶超面,砂砾岩靠近次级断层厚度大(图4a);顺物源方向的地震反射稳定连续,可见加积或前积反射结构,砂砾岩体在剖面上表现为加积或进积的样式(图4b)。

二台阶南段次级断层发育少,扇体厚度小。对应长堤断层相对活动弱,沙四上亚段最大断距400多米,沙三下亚段最大断距为300多米(图3)。二台阶南段古冲沟内,沙四上亚段和沙三下亚段地震反射杂乱,不连续,反射轴向上由退积反射结构向进积反射结构转变,砂砾岩体也相应的显示退积和进积的特点(图5)。

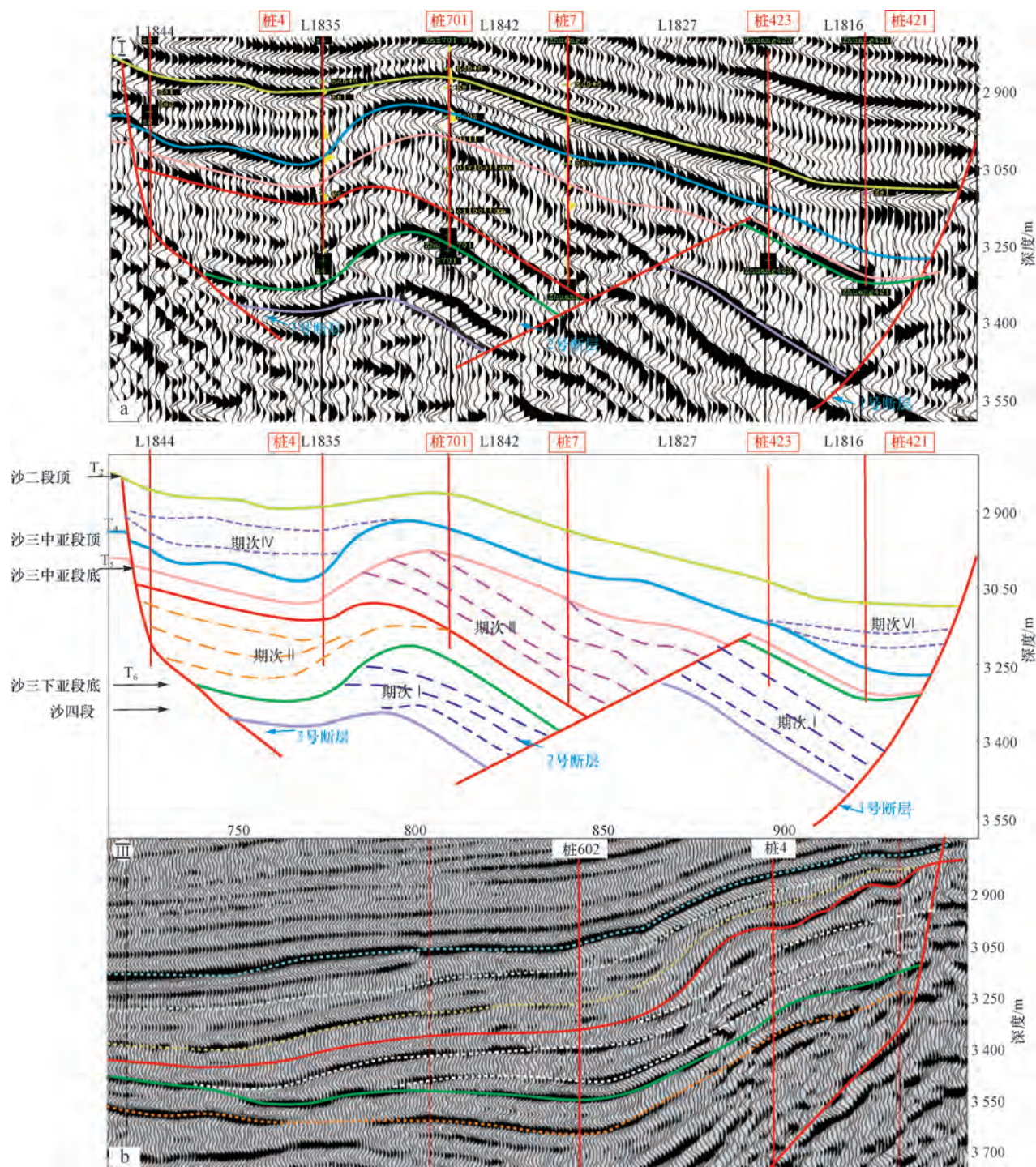


图4 孤北洼陷长堤断裂带北段沙四上亚段一沙二段典型地震剖面(剖面位置见图1)

Fig. 4 Typical seismic profile of $Es^{4s} - Es^2$ in the northern segment of Changdi fault zone in the Gubei sub-sag (seismic line location see Fig. 1)

a. 次级断层交替活动垂直物源方向地震剖面;b. 顺物源方向前积地震剖面

4 沉积体系展布

结合前人研究,研究工区沙四上亚段和沙三下亚段分别发育湖侵体系域和高位域,沙三中亚段为湖侵

体系域,沙三上亚段为高位域;沙二上亚段为湖侵域和高位域。物源主要来自东北部和南部。沙四上亚段湖侵域时期,东北物源形成扇三角洲跨过二台阶,前端形成浊积岩。南部分布小范围的扇三角洲;高位域时期,继承湖侵域时期的扇体分布,扇三角洲范围扩大,北部

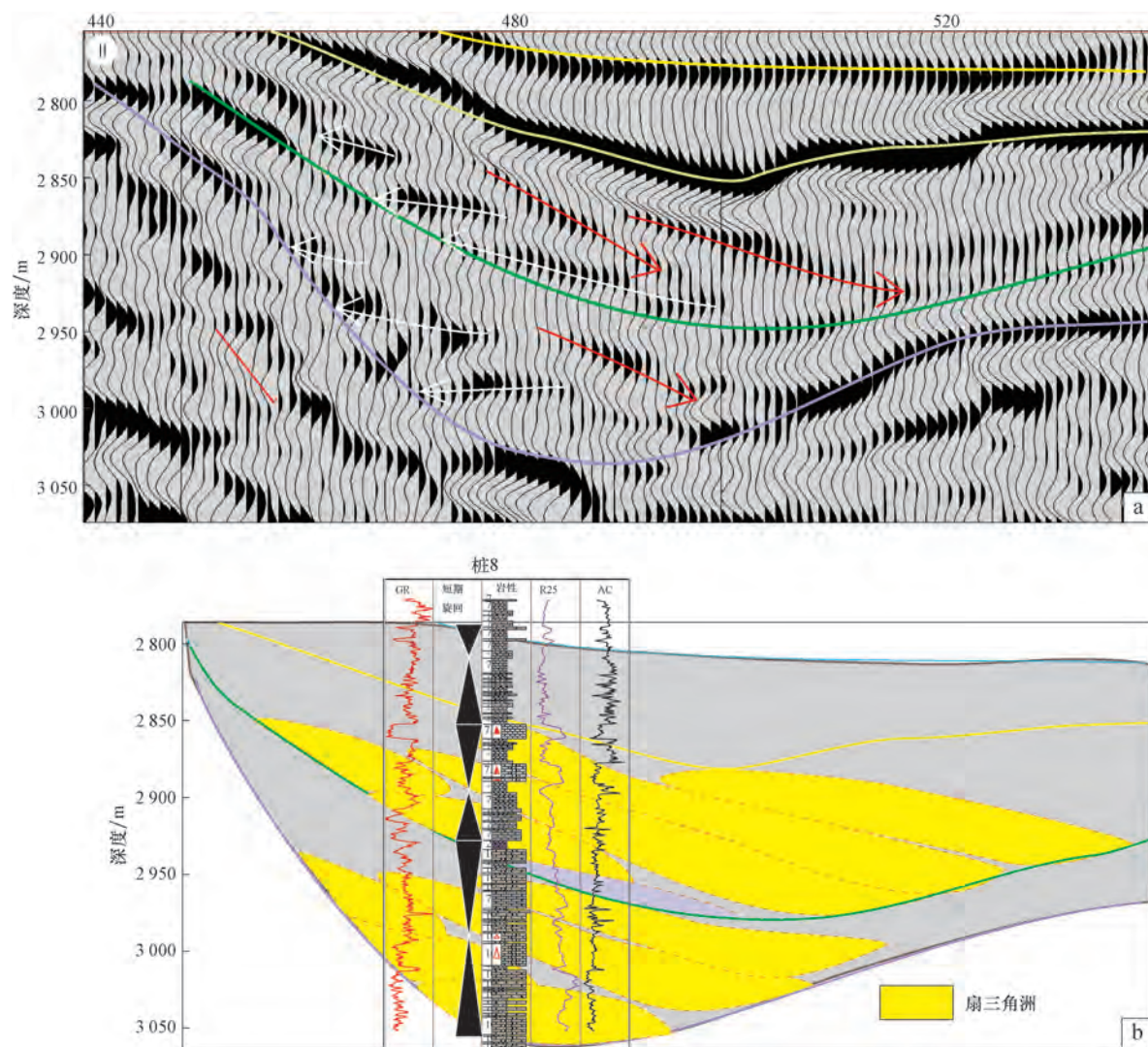


图5 孤北洼陷长堤断裂带南段沙四上亚段—沙二段地震—地质解释剖面(剖面位置见图1)
Fig.5 Seismic-geological interpretation profiles of Es^{4s} - Es^2 in the southern segment of Changdi fault zone in Gubei sub-sag (seismic line location see Fig. 1)

扇三角洲延伸至桩54附近。沙三下亚段湖侵域时期,东北部的扇三角洲分布在桩7至桩2之间二台阶上,前端发育浊积岩;高位域时期,扇三角洲范围扩大,南部扇三角洲延伸至桩69附近;沙三中亚段时期,湖平面快速上升,扇三角洲分布狭窄,地层以泥质粉砂岩为主。沙三上亚段和沙二段,物源减弱,只有发育北部扇三角洲,东北部扇三角洲分布延伸到桩421附近,南部扇三角洲范围扩大^[13](图6)

5 砂砾岩体展布控制因素

断层活动是砂砾岩体展布主控因素,沙四上亚段—沙三下亚段断层活动强,砂砾岩体厚度大。此外,长堤断层北段活动强,坡度陡,物源供应强,有利于形成厚层扇三角洲及其前端的滑塌浊积岩;断层南段活动强

度小,物源供应弱,扇三角洲分布范围小,前端不利于形成滑塌浊积扇。同沉积次级断层控制着砂砾岩的分布,有很好的输导作用,不同时期活动强度不同,对扇体展布影响不同。

湖平面对沉积体分布有影响,当湖平面上升的时候,扇体逐渐退积,向上范围缩小;当湖平面下降的时候,扇体逐渐进积,向上范围扩大。

物源强弱影响扇体的堆积样式,在强物源时期,扇体展布受湖平面影响较小,砂体以加积为主;当物源弱的时候,受湖平面影响较大,进积和退积扇体叠加堆积。

6 油气藏分布与勘探前景

目前勘探认为研究区主要发育构造油气藏、地层

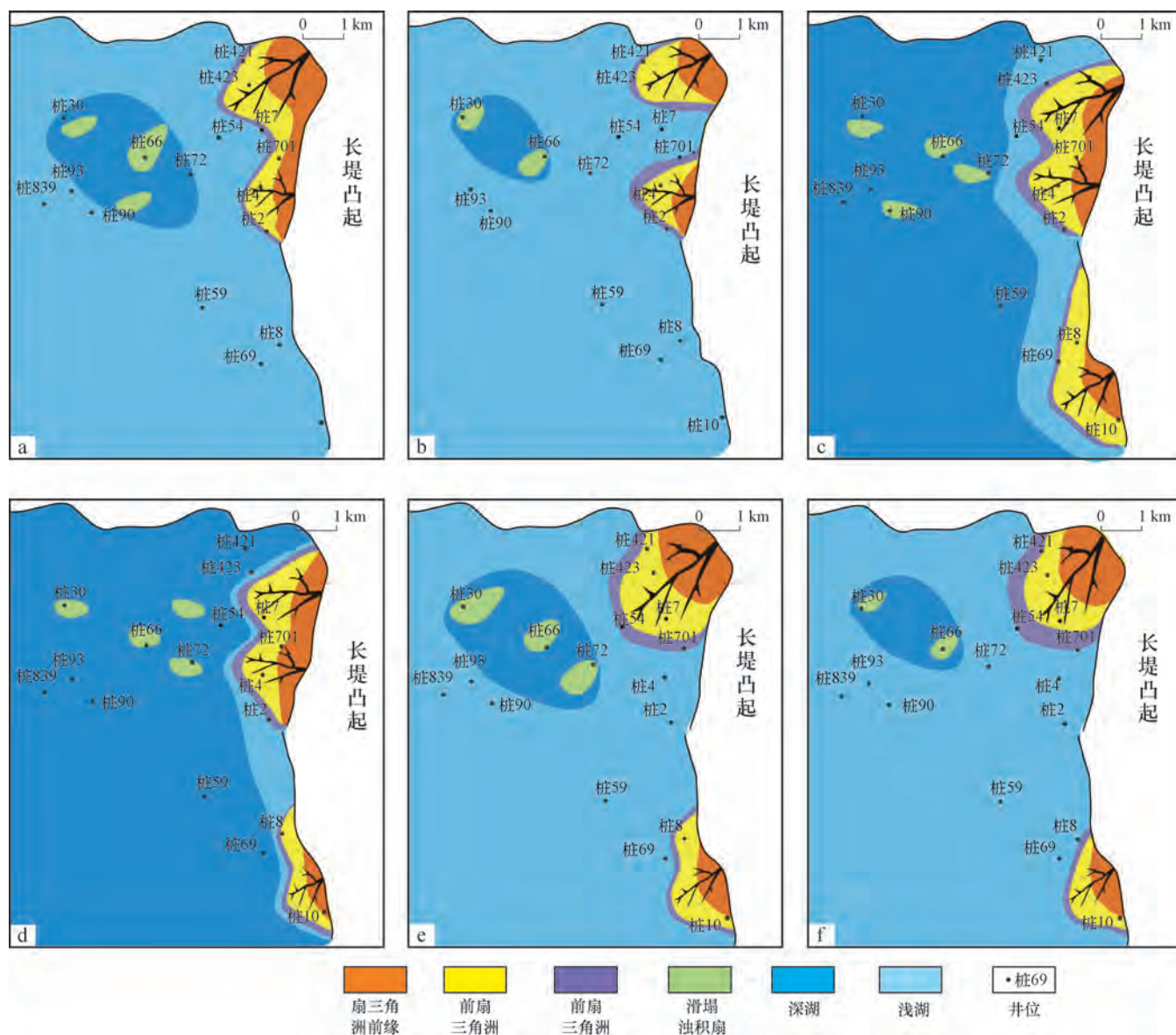


图6 孤北洼陷东次洼沙四上亚段—沙二段沉积相平面分布

Fig. 6 Map showing sedimentary facies distribution of $Es^{4s} - Es^2$ in the eastern Gubei sub-sag

a. 沙二亚段; b. 沙三上亚段; c. 沙三下亚段高位域; 沙三下亚段湖侵域; e. 沙四上亚段高位域; f. 沙四上亚段湖侵域

油气藏,构造油气藏主要储层于沙四上亚段和沙三下亚段,地层油气藏主要分布在沙三中亚段—沙二段。本文认为研究区沙四上亚段和沙三下亚段构造油气藏和地层油气藏共同发育:长堤下降盘北段沙三下亚段经历暴露剥蚀形成的不整合面,及其楔形地层发育有利于形成侧向封堵,沙三中亚段湖平面快速上升,形成的泥岩直接覆盖在扇三角洲砂体之上,扇三角洲前缘分流河口砂坝和河道砂体为有利储层,次级断层交替活动形成的背斜,有利油气向上运移,共同作用形成地层油气藏。所以二台阶北段具有其良好的储层和封堵条件,是下一步的有利勘探开发区块。此外,扇三洲前端形成滑塌浊积岩,也是最有利的勘探点^[14](图7)。

7 结论

1) 在孤北洼陷东次洼沙四上亚段—沙二段,发育了扇三角洲—浊积体系,其中水下分流河道和水下分流河口坝是最有利的储层相带。

2) 沙四上亚段—沙二段的砂砾岩的分布受到构造、湖平面、物源的联合控制,各个控制因素的强弱导致砂砾岩体空间展布的差异性。次级断层受到边界断层的控制,具有周期性活动特征,控制沉积物输导体系,形成砂砾岩体楔形地层。

3) 在次级断层和湖平面的影响下,二台阶北段形

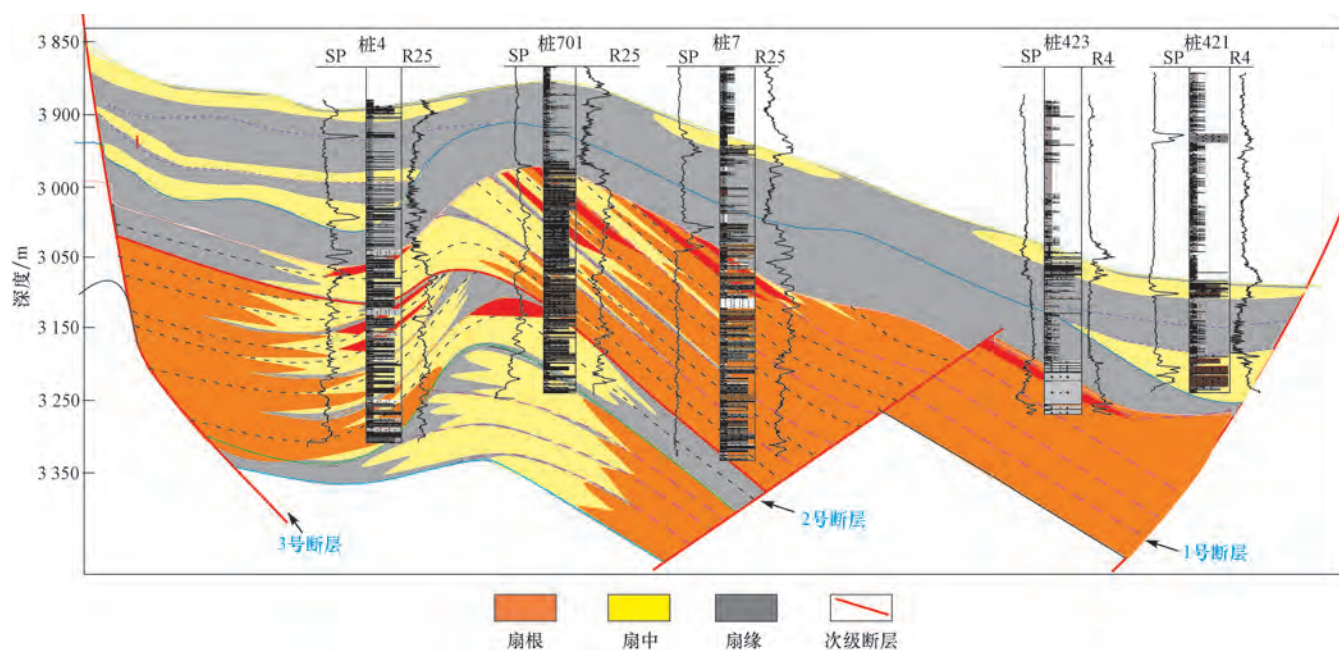


图7 孤北洼陷长堤断裂带沙四上亚段—沙二段桩2—桩4—桩701—桩7—桩4连井沉积相
Fig.7 Sedimentary facies profile of Es^{4s} - Es^{2s} crossing Zhuang 2,Zhuang 4,Zhuang 701,Zhuang 7 and Zhuang 4 wells in Changdi fault zone in the Gubei sub-sag

成有利的构造和地层油气藏,是下一步的勘探有利位置。

参考文献

- [1] 鲜本忠,王永诗,周廷全,等. 断陷湖盆陡坡带砂砾岩体分布规律及控制因素—以渤海湾盆地济阳坳陷车镇凹陷为例[J]. 石油勘探与开发,2007,34(4):429-436.
Xian Benzong, Wang Yongshi, Zhou Tingquan, et al. Distribution and controlling factors of glutinite bodies in the actic region of a rift basin: an example from Chezhen Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4): 429-436.
- [2] 董艳蕾,朱筱敏,耿晓洁. 泌阳凹陷东南部核桃园组近岸水下扇与扇三角洲沉积特征比较及控制因素分析[J]. 石油与天然气地质,2015,36(2):271-279.
Dong Yanlei, Zhu Xiaomin, Geng Xiaojie, et al. Sedimentary characteristics comparison and controlling factors analyses of nearshore subaqueous fan and fan delta in the Hetaoyuan Formation of southeastern Biyang Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(2): 271-279.
- [3] 林畅松,郑和荣,任建业,等. 渤海湾盆地东营、沾化凹陷早第三纪同沉积断裂作用对沉积充填的控制[J]. 中国科学,2003,33(11):1025-1036.
Lin Changsong, Zheng Herong, Ren Jianye, et al. Early Tertiary syndepositional faults control on deposition infilling in Dongying and Zhuanghua Depressions[J]. Science in China, 2003, 33(11): 1025-1036.
- [4] 肖军,王华,陆永潮,等. 东南盆地构造坡折带特征及其对沉积的控制作用[J]. 海洋地质与第四纪地质,2003,23(3):55-63.
Xiao Jun, Wang Hua, Lu Yongchao, et al. Characteristics of structural slope-break zone and its controlling effect on sediment in the qiong
- [5] 冯有良,徐秀生. 同沉积构造坡折带对岩性油气藏富集带的控制作用—以渤海湾盆地古近系为例[J]. 石油勘探与开发,2006,33(1):23-25.
Feng Youliang, Xu Xiusheng. Syndepositional structural slope-break zone controls on lithologic reservoirs— A case from Paleogene Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(1): 23-25.
- [6] 刘延莉,邱春光,邓宏文,等. 冀东南堡凹陷古近系东营组构造对扇三角洲的控制作用[J]. 石油与天然气地质,2008,29(1):95-101.
Liu Yanli, Qiu Chunguang, Deng Hongwen, et al. Control of the structure of the paleogene Dongying Form ation upon fan delta deposition in the Nanpu Depression, Jidong oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(1): 95-101.
- [7] 张建林,林畅松,郑和荣. 断陷湖盆断裂—古地貌及物源对沉积体系的控制作用—以孤北洼陷沙三段为例[J]. 油气地质采收率,2002,9(4):24-27.
Zhang Jianlin, Lin Changsong, Zheng Herong. Controlling action of fractures, palaeogeomorphology and material sources of rift lake-basin on sedimentary system-taking Es3 Gubei subsag as example[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2002, 9(4): 24-27.
- [8] 李雪梅,王伟,王娉婷,等. 济阳坳陷长堤地区新生代构造特征及其演化[J]. 西南石油大学学报,2014,36(5):40-48.
Li Xuemei, Wang Wei, Wang Pingping, et al. Cenozoic tectonic characteristics and evolution in Changdi Area of Jiyang Depression [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2014, 36(5): 40-48.

(下转第191页)

- ter-rock interaction in granite terrains [J]. *Geochimica*, 2010, 39 (4): 326–336.
- [17] Lennie A R, England K E R, Vaughan D J. Transformation of synthetic mackinawite to hexagonal pyrrhotite: A kinetic study [J]. *American Mineralogist*, 1995, 80 (9–10): 960–967.
- [18] Schoonen M A A, Barnes H L. Reactions forming pyrite and marcasite from solution; II. Via FeS precursors below 100 °C [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55 (6): 1505–1514.
- [19] Wilkin R T, Barnes H L. Formation processes of framboidal pyrite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61 (2): 323–339.
- [20] 张美, 邹黛黛, 吴能友. 南海北部天然气水合物沉积环境中自生矿物特征 [J]. *新能源进展*, 2015, 4 (1): 20–27.
Zhang Mei, Wu Daidai, Wu Nengyou. Characteristics of authigenic minerals from the northern South China Sea [J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2015, 4 (1): 20–27.
- [21] Chen Y, Li Y L, Zhou G T, et al. Biomineralization mediated by anaerobic methane-consuming cell consortia [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 5696.
- [22] 陆红锋, 陈芳, 刘坚, 等. 天然气水合物沉积环境的自生矿物特点及其在南海的发育情况 [J]. *南海地质研究*, 2006, 00: 93–104.
Lu Hongfeng, Chen Fang, Liu Jian, et al. Authigenic minerals associated with sedimentary environment of gas hydrate deposit and their occurrence in South China Sea [J]. *Geological South China Sea*, 2006, 00: 93–104.
- [23] Orphan V J, House C H, Hinrichs K U, et al. Methane-consuming archaea revealed by directly coupled isotopic and phylogenetic analysis [J]. *Science*, 2001, 293 (5529): 484–487.
- [24] Bowles M W, Samarkin V A, Bowles K M, et al. Weak coupling between sulfate reduction and the anaerobic oxidation of methane in methane-rich seafloor sediments during ex situ incubation [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75 (2): 500–519.
- [25] Rodriguez N M, Paull C K, Borowski W S. Zonation of authigenic carbonates within gas hydrate-bearing sedimentary sections on the Blake Ridge: offshore southeastern north America [C] // *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 2000, 164: 30.
- [26] 杨克红, 初凤友, 赵建如, 等. 南海北部冷泉碳酸盐岩矿物微形貌及其意义探讨 [J]. *矿物学报*, 2009, 03: 345–352.
Yang Kehong, Chu Fengyou, Zhao Jianru, et al. Minerals' micro-shape and its significance of seep carbonates in the North of the South China Sea [J]. *Acta Mineral Sinica*, 2009, 29 (3): 345–352.
- [27] 葛璐, 蒋少涌, 杨涛, 等. 南海北部神狐海区冷泉碳酸盐岩的地球化学特征 [J]. *矿物学报*, 2009, S1: 370.
Ge Lu, Jiang Shaoyong, Yang Tao, et al. Geochemical characteristics of seep carbonates from Shenhu area, northern South China Sea [J]. *Acta Mineral Sinica*, 2009 (S1): 370.
- [28] 刘坚, 陆红锋, 廖志良等. 东沙海域浅层沉积物硫化物分布特征及其与天然气水合物的关系 [J]. *地学前缘*, 2005, 12 (3): 258–262.
Liu Jian, Lu Hongfeng, Liao Zhiliang, et al. Distribution in sulfides in shallow sediments in Dongsha area, South China Sea, and its relationship to gas hydrates [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12 (3): 258–262.

(编辑 董立)

(上接第182页)

- [9] 王铸坤, 李宇志, 操应长, 等. 渤海湾盆地东营凹陷永北地区沙河街组三段砂砾岩粒度概率累积曲线特征及沉积环境意义 [J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38 (2): 230–240.
Wang Zhukun, Li Yuzhi, Cao Yingchang, et al. Probability cumulative grain-size distribution curves and their implications for sedimentary environment identification of coarse clastic rocks of the Es3 in Yongbei area, the Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38 (2): 230–240.
- [10] 郑荣才, 文华国, 韩永林, 等. 鄂尔多斯盆地白豹地区长6油层组湖底滑塌浊积扇沉积特征及其研究意义 [J]. *成都理工大学学报 (自然科学版)*, 2006, 36 (6): 566–575.
Zheng Rongcai, Wen Huaguo, Han Yan Yonglin, et al. Discovery and significance of sublacustrine slump turbidite fans in Chang 6 oil-bearing formation of Baibao region in Ordos Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2006, 33 (6): 566–575.
- [11] 杨剑萍, 赵卫卫, 姜在兴. 沾化凹陷孤北油田古近系沙三段扇三角洲沉积特征及油气储层意义 [J]. *石油与天然气地质*, 2003, 24 (2): 157–161.
Yang Jianping, Zhao Weiwei, Jiang Zaixing. Sedimentary characteristics and reservoir significance of eogene Es3 fan delta in gubei oilfield, zhanhua depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2003, 24 (2): 157–161.
- [12] 张阳, 回宇婷, 邱隆伟, 等. 双断湖盆沉积特征及其控制因素研究—以孤北洼陷沙四上亚段为例 [J]. *中国矿业大学学报*, 2015, 44 (5): 868–876.
Zhang Yan, Hui Yuting, Qiu Longwei, et al. Sedimentary characteristics and its controlling factors of double-fault lacustrine basin: a case study of the upper 4th member of Shahejie formation in Gubei depression [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2015, 44 (5): 868–876.
- [13] 王永诗, 庄文山. 孤北洼陷沙三、四段沉积体系分析 [J]. *油气地质与采收率*, 2003, 10 (3): 35–37.
Wang Yongshi, Zhuang Wenshan. Analysis on sedimentary system in Es³ and Es⁴ of Gubei subsag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2003, 10 (3): 35–37.
- [14] 史文东, 赵卫卫. 沾化凹陷孤北洼陷下第三系沙三段扇三角洲沉积体系及其与油气聚集的关系 [J]. *石油大学学报 (自然科学版)*, 2003, 27 (2): 15–18.
Shi Wendong, Zhao Weiwei. Sedimentary characteristics of fan-deltaic depositional system in third member of Shahejie formation in Gubei oil field [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Edition of Natural Science)*, 2003, 27 (2): 15–18.

(编辑 张亚雄)