

渤海湾盆地冀中坳陷典型斜坡带 成因机制及油气成藏特征

董大伟¹, 赵利², 李婷婷¹, 施瑞¹, 李彤¹, 孙艺飞¹, 孙昊¹

(1. 中国石油大学 胜利学院, 山东 东营 257061; 2. 山东农业大学 资源与环境学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 在统计国内断陷盆地斜坡带的宽度和坡度基础上, 以冀中坳陷文安、蠡县、束鹿西 3 大典型斜坡带为例, 利用现有的地震、石油地质等资料, 从构造几何学、运动学等方面进行综合研究, 分析各类型斜坡带构造演化及其成藏特征。根据斜坡带的坡度和宽度, 划分出宽缓型、平台型和窄陡型 3 类斜坡带, 分别对应冀中坳陷的文安斜坡、蠡县斜坡和束鹿西斜坡。宽缓型斜坡对应的凹陷为单断式, 边界断层拆离深度浅, 以沉积为主控因素; 宽缓型斜坡油气成藏以横向长距离运移、多层系含油为特征, 圈闭类型多样。平台型斜坡对应的凹陷为双断式, 边界断层拆离深度中等, 为构造—沉积复合型成因机制; 平台型斜坡含油气丰度取决于斜坡内生烃次注, 圈闭类型以鼻状构造和岩性尖灭为主。窄陡型斜坡对应的凹陷为单断式, 边界断层拆离深度深, 以构造为主控因素; 窄陡型斜坡带油气成藏以垂向运移为主要特征, 圈闭类型以构造型为主。

关键词: 构造解析; 成因机制; 成藏模式; 斜坡带分类; 冀中坳陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE121.2

文献标识码: A

Evolution mechanism and hydrocarbon reservoir characteristics of typical slope zones in Jizhong Depression, Bohai Bay Basin

DONG Dawei¹, ZHAO Li², LI Tingting¹, SHI Rui¹, LI Tong¹, SUN Yifei¹, SUN Hao¹

(1. Shengli College, China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China;

2. College of Resources and Environment, Shandong Agriculture University, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract: The width and gradient of slope zones in faulted basins in China were studied. The tectonic evolution mechanism and hydrocarbon reservoir characteristics of various types of slope zones were discussed from the aspects of structural geometry and kinematics based on the seismic and geological data collected mainly from the Wen'an, Lixian and Shulu West slopes in the Jizhong Depression. According to slope gradient and width, three types of slope zones were classified: wide-gentle type, platform type and narrow-steep type, corresponding to the Wen'an, Lixian and Shulu West slopes, respectively. The wide-gentle type slope was characterized by a single-break and shallow detachment, and was dominated by sedimentation. Oil and gas migrated horizontally for a long distance and was enriched in multiple layers with various trap types. The platform type slope was characterized by double-breaks and medium detachment, and was controlled by both structure and sedimentation. The hydrocarbon abundance in the platform type slope depended on the hydrocarbon-producing subsags in slopes, and the traps were mainly nose-like or lithologic pinch-out types. The narrow-steep slope was characterized by a single-break and deep detachment, and was dominated by structure. Oil and gas migrated vertically and was mainly enriched in structural traps.

Key words: structural analysis; genetic mechanism; accumulation model; classification of slope zones; Jizhong Depression; Bohai Bay Basin

斜坡带为深凹陷带向凸起过渡的地带, 其边缘部位翘起较高, 是以斜坡形式与凸起相连的超、剥单斜坡^[1-6], 在断陷盆地中范围广阔, 是油气聚集

的有利区带之一^[7-8]。“凹陷生油、斜坡成藏”是一个普遍的规律^[9], 自 1990 年代以来, 斜坡带发现油气地质储量近 $15 \times 10^8 \text{ t}$ ^[10], 已成为富油凹陷精细二

收稿日期: 2019-02-12; 修订日期: 2019-06-02。

作者简介: 董大伟 (1984—), 男, 博士, 副教授, 从事油区构造解析方面研究。E-mail: dongdw@slucpe.edu.cn。

通信作者: 赵利 (1988—), 男, 讲师, 博士, 从事油区构造解析与构造物理模拟方面研究。E-mail: orchidy@126.com。

基金项目: 山东省高校科研项目 (J18KA212)、东营市科技发展计划项目 (2017zcyd69)、中国石油大学胜利学院春晖计划课题 (KY2017001) 和中国石油大学胜利学院大学生创新训练项目 (2018062) 资助。

次勘探发现规模储量的重点^[11-12]。

目前国内外已有众多学者对其研究,将斜坡带(缓坡带)定义均表征了相似的特征,但对斜坡带分类出发点各不相同。根据研究需要分别以斜坡带形成机理、层序发育特征、地层沉积特点和构造特点等对斜坡带进行划分,导致分类方案繁多。如根据斜坡带的形成机理,将其分为沉积斜坡、构造斜坡和构造—沉积复合斜坡^[13-15];以层序发育特征为依据,将斜坡带分为宽缓型、窄陡型和双元型^[1-2];以地层发育展布为依据,将斜坡带分为继承性超覆型、继承性超剥型、先凹后斜型和构造型^[10,16-18];根据斜坡带对层序类型、地层结构特征的控制及地貌特征、成因,将斜坡带分为单断—沉积坡断型、单断—斜坡型和双断—构造破折型^[19-20];以剖面 and 平面特征为依据,将斜坡带分为两大类十种类型^[2];根据基底和盖层断层的发育情况及其组合方式,分为单断型斜坡和双断型斜坡^[21]。这些分类要素在斜坡带类型划分中的意义各不相同,斜坡带类型划分必须遵循科学性和实用性的原则。随着断陷盆地斜坡带构造、沉积研究的

深入以及油气勘探推进,斜坡带分类方案需在前人分类方案基础上进行修改,以适应和推广油气勘探新思路。本文选取斜坡带坡度和宽度作为分类依据,在统计可查阅到的斜坡带坡度和宽度的基础上,对斜坡带进行分类;以斜坡带类型发育多样的渤海湾盆地冀中坳陷为例,重点对文安斜坡、蠡县斜坡、束鹿西斜坡进行各类型斜坡带成因机制和成藏模式研究,以期完善斜坡带成因机制,丰富斜坡带油气勘探理论。

1 冀中坳陷区域构造概况

冀中坳陷西邻太行山隆起,东至沧县隆起,南接邢衡隆起,北依燕山隆起,整体呈 NNE 向展布,面积为 $2.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1)。冀中坳陷地层结构分为三层:下构造层为基底层,包括古生界(Pz)和中生界(Mz);中构造层为断陷层,包括古新统一渐新统的孔店组(Ek)、沙河街组四段(Es₄)、沙河街组二—三段(Es₂₋₃)、沙河街一段—东营组(Es₁-Ed),中新统馆陶组(Ng);上构造层为拗陷层,主要是指上新统明化镇组(Nm)和第四系平原组(Qp)。

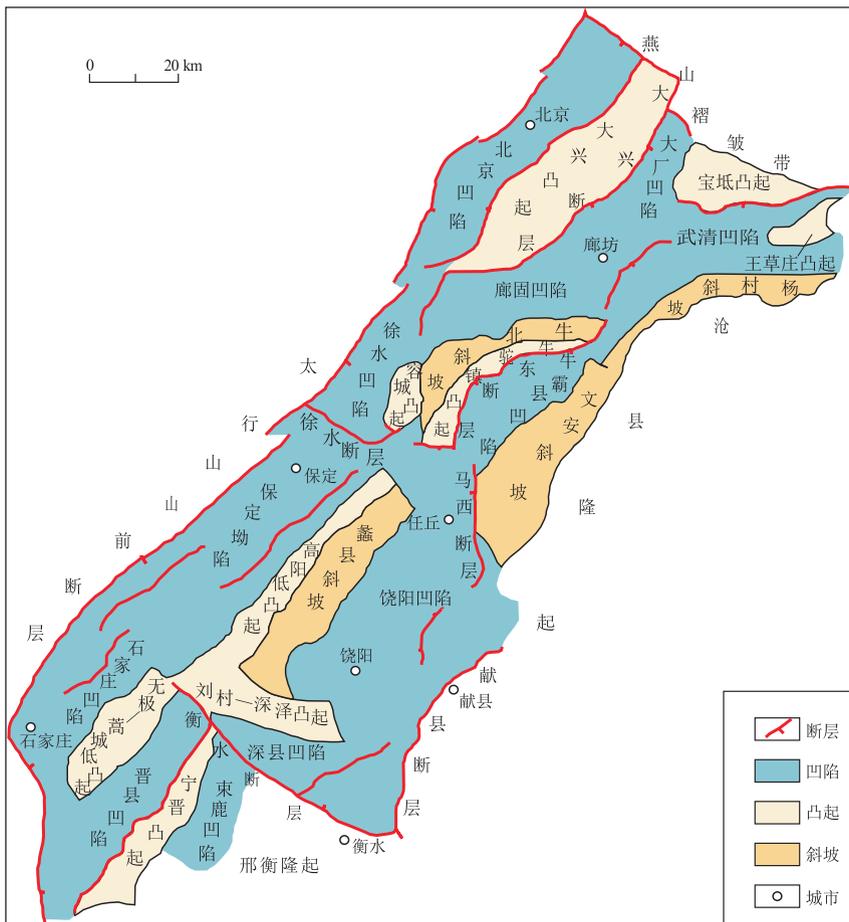


图 1 渤海湾盆地冀中坳陷区域位置及构造格局

Fig.1 Regional location and structural pattern of Jizhong Depression, Bohai Bay Basin

冀中拗陷内主要断层有 NW、NE 和近 EW 3 组走向(图 1)。NE 走向断层最为发育,太行山山前断层、大兴断层、牛东断层等一系列大型断层均呈 NE 走向;NW 向断层多发育于拗陷的中南部,倾向南西,献县断层南部、马西断层等均为 NW 走向,构成了冀中拗陷中南部的东侧边界;近 EW 向断层发育于拗陷内构造转换位置,往往作为调节断层出现,数量较少,如衡水断层、徐水断层^[22]。

2 斜坡带的定义与分类

本文在前人研究的基础上,结合冀中拗陷内斜坡带构造特征,将斜坡带定义为:断陷盆地内以缓坡形式连接凸起与洼陷的二级构造带,其地层翘倾、剥蚀后被拗陷层所覆盖,向盆外以凸起为界,向盆内以最后一条盆倾断层为界。

由于斜坡地层坡度和宽度是所有斜坡带共有的几何特征,可以广泛适用于斜坡带分类,并且地层坡度和宽度能直接反映斜坡的不同成因机制和沉积构造特点,对油气成藏具有重要影响,因此,本文选取斜坡带地层坡度与宽度 2 要素作为分类标准。通过统计中国断陷盆地内的斜坡带,发现地层坡度小于 4°的斜坡带很少,并且宽度大于 10 km 的斜坡,地层坡度一般小于 10°(表 1),因此,本文将宽度 10 km、地层坡度 4°和 10°作为斜坡带类型划分的分界点,将斜坡带类型划分为“宽缓型”、“平台型”、“窄陡型”。宽缓型斜坡带的地层坡度在 4°~10°,宽度大于 10 km;平台型斜坡带的地层

坡度小于 4°,宽度大于 10 km;窄陡型斜坡带的地层坡度大于 10°,宽度小于 10 km。冀中拗陷内的文安斜坡、蠡县斜坡和束鹿凹陷西斜坡对应前述 3 种类型斜坡。

3 典型斜坡带几何学特征

3.1 文安斜坡带

文安斜坡位于冀中拗陷霸县凹陷东南部,东邻沧县隆起,南接饶阳凹陷,西靠霸县洼槽,北部以里澜断层为界(图 1)。斜坡内正断层发育,由于受到早期 NE 向的先存基底断层的影响,断层的走向主要以 NE 向为主。斜坡整体断层发育,主要受到西侧主干断层——牛东断层的控制,发育大量次一级断层。牛东断层是古近纪继承发育的一级控盆断层,是霸县凹陷的控凹断层,其规模较大,延伸较长,影响着整个斜坡的断层发育。文安斜坡带斜坡坡度为 9.6°,坡度适中,沿斜坡上倾方向地层大量超覆、尖灭;在斜坡顶部,剥蚀相对较弱,只在南部有较明显的地层剥蚀。

根据断层的平面分布特征,文安斜坡大致可分为三部分:北部信安镇地区断层较密集,以 NNE、NW 向的断层为主,形成交叉式断层组合样式,交错纵横形成明显的网状;中部苏桥—文安地区断层也较为密集,以 NE 向为主,多呈平行式断层组合特征;南部长丰镇地区断层成雁列式组合特征(图 2a)。单条断层在平面上的几何形态以直线型、弧形、“S”型为主,直线型断层延伸较短,规模

表 1 中国部分断陷盆地斜坡带坡度和宽度统计

Table 1 Gradient and width of some slope zones in China

斜坡位置	斜坡名称	斜坡坡度/(°)	斜坡宽度/km
渤海湾盆地冀中拗陷	饶阳凹陷蠡县斜坡带	2.5	14.5
渤海湾盆地济阳拗陷	惠民凹陷斜坡带	4.8	10.7
渤海湾盆地济阳拗陷	沾化凹陷东段(垦东)斜坡带	5	7.4
二连盆地	阿南—阿北凹陷斜坡带	6	6.9
渤海湾盆地济阳拗陷	车镇凹陷西斜坡带	6.7	10.8
二连盆地	赛汉塔拉凹陷斜坡带	7	11.8
渤海湾盆地昌潍拗陷	潍北凹陷斜坡带	8	16.4
渤海湾盆地济阳拗陷	东营凹陷南坡东段	9	21.0
渤海湾盆地黄骅拗陷	歧北凹陷斜坡带	9	20.4
渤海湾盆地冀中拗陷	霸县凹陷文安斜坡带	9.6	18.4
渤海湾盆地济阳拗陷	东营凹陷南坡西段	9.6	14.0
渤海湾盆地济阳拗陷	车镇凹陷(埕中)斜坡带	9.9	12.0
二连盆地	洪浩尔舒特凹陷斜坡带	10.6	8.5
二连盆地	额仁淖尔凹陷斜坡带	10.7	9.5
渤海湾盆地冀中拗陷	武清凹陷斜坡带	11.3	12.0
二连盆地	乌里雅斯太凹陷斜坡带	13.3	6.2
南襄盆地	泌阳凹陷北部斜坡带	18	16.5
渤海湾盆地冀中拗陷	束鹿凹陷西斜坡带	20	8.5

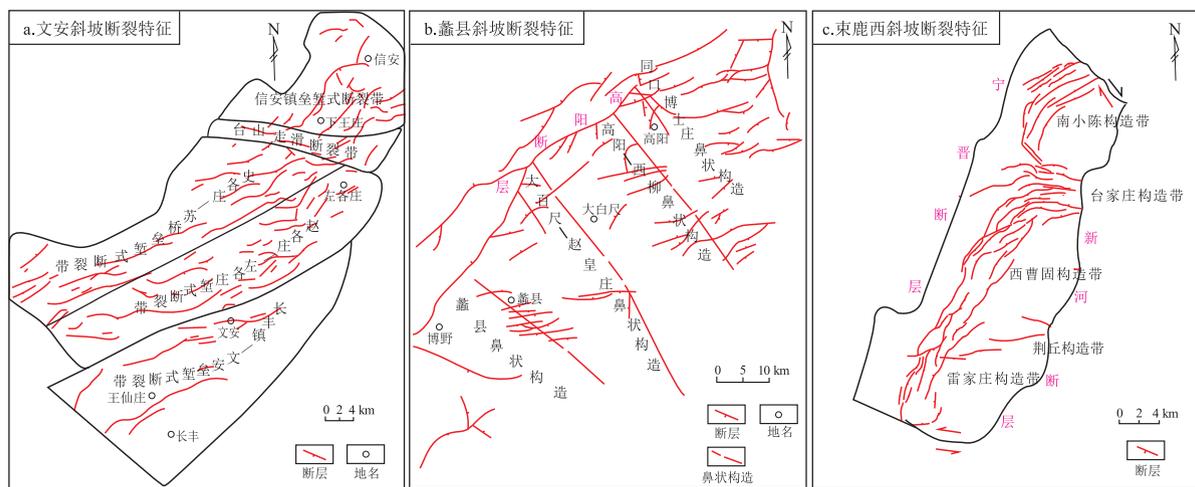


图2 渤海湾盆地冀中坳陷文安、蠡县和束鹿斜坡带断层平面分布

Fig.2 Fault distribution in Wen'an (a), Lixian (b) and Shulu (c) slope zones in Jizhong Depression, Bohai Bay Basin

较小。受 E_{s_3} — E_{s_2} 时期 NE—SW 向张扭作用, 断层平面呈现“S”型和弧形, “S”型断层延伸较远, 规模较大, 由多级伸展变形叠加而成, 贯穿整个斜坡。断层在平面上的组合特征多为平行式、交叉式、雁列式和羽状。剖面上, 文安斜坡发育大量正断层, 断层形态主要以板式为主; 在牛东断层的控制下, 断层组合样式多为“Y”字形、多级“Y”字形样式 (图 3a)。

3.2 蠡县斜坡带

蠡县斜坡位于冀中坳陷饶阳凹陷中西部, 南部

与刘村—深泽低凸起相接, 西部紧邻高阳低凸起, 北部与徐水—文安变换带相邻 (图 1)。蠡县斜坡主要发育 NE、NNE 向断层, 以及少量与斜坡走向基本一致的 NW 向断层。蠡县斜坡仅有高阳断层等几条比较大的断层, 其余都是一些比较小的断裂。高阳断层是一条 NE 走向的正断层, 其尾部派生出一系列 NE 向断层 (图 2b)。断层总体规模比较小、构造简单, 主要集中在斜坡中北部。北部构造活动相对比较强烈, 断裂发育, 受 NW、NE 向断

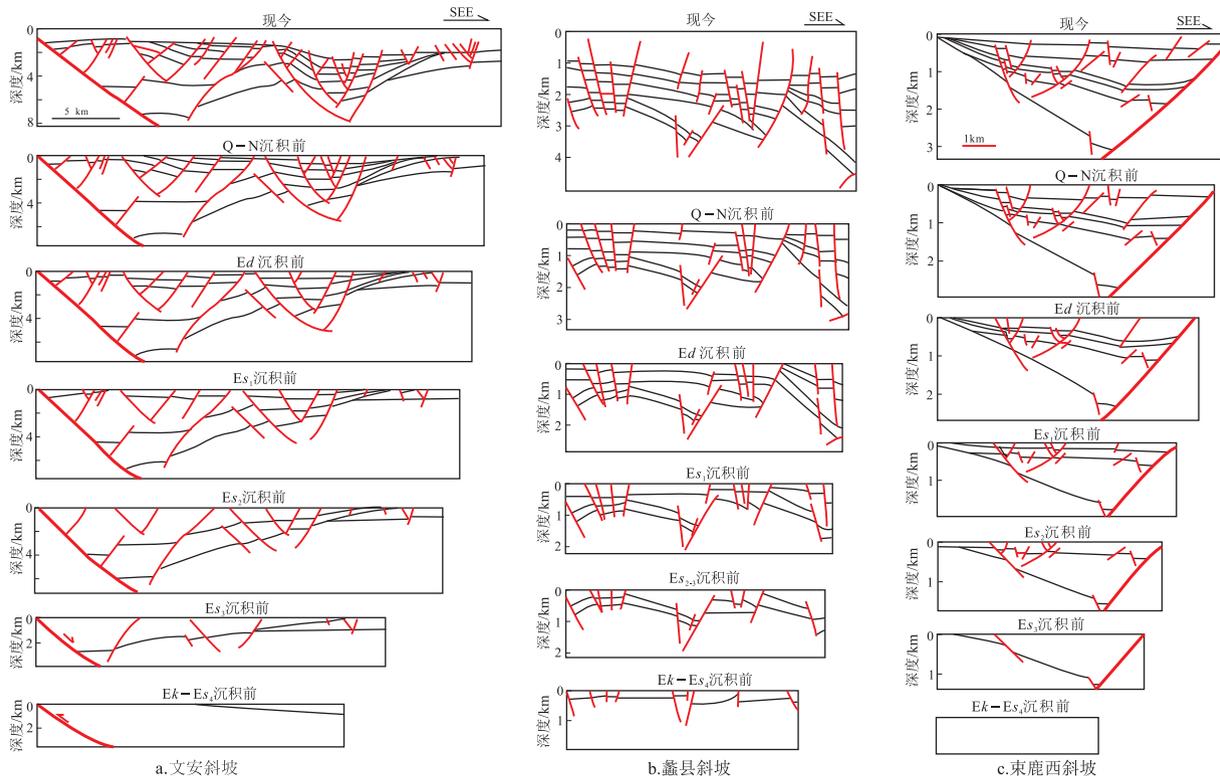


图3 渤海湾盆地冀中坳陷文安斜坡(a)、蠡县斜坡(b)和束鹿斜坡(c)构造演化剖面位置见图1。

Fig.3 Tectonic evolutions in Wen'an (a), Lixian (b) and Shulu (c) slope zones in Jizhong Depression, Bohai Bay Basin

层影响,形成垒堑相间的构造格局。南部构造活动相对较弱,断裂不发育,断层数量较少,仅发育 2 条控制斜坡的大型边界断层——高阳和大百尺断层,地层超覆、剥蚀关系不明显。断层剖面组合样式主要为“Y”字形和阶梯状断层组合样式(图 3b)。

3.3 束鹿西斜坡带

束鹿西斜坡位于冀中坳陷束鹿凹陷西部,西接宁晋凸起,南部紧靠邢衡隆起,北接深县凹陷并与宝坻—桐柏镇变换带相邻。束鹿西斜坡内断裂体系发育规模小且数量较少,大部分断层走向为 NE 向和 NNE 向。断层活动强度大,斜坡坡度陡且范围小。其早期以超覆沉积为主,晚期退覆沉积加强且顶部剥蚀作用剧烈。断层平面组合样式总体以斜列式和平行式为主,主要集中在束鹿西斜坡的南部区域,北部断层较少;中部地区断层密集,主要发育近 EW 方向的横向调节断层,为平行式断层组合样式(图 2c)。剖面上发育大量的正向断层和反向断层,边界断层为铲式正断层,断层倾角较大(图 3c)。

3.4 不同斜坡带构造特征对比

文安斜坡的坡度为 9.6°,宽度为 18.4 km,属于宽缓型斜坡;蠡县斜坡的坡度为 2.5°,宽度为 15.4 km,属于平台型斜坡;束鹿西斜坡的坡度为 20°,宽度为 8.5 km,属于窄陡型斜坡。基于地层坡度和宽度要素,上述 3 个斜坡分属于不同类型斜坡,其对应的凹陷、控凹断层等亦存在明显差异。

文安斜坡对应的霸县凹陷为单断型,构造伸展量一般较大,为断阶式或堑垒相间式,属于沉积斜坡;斜坡带发育较多次级断层,而控凹断层倾角较小,拆离深度小于 10 km,相对较小(表 2)。蠡县

斜坡对应的饶阳凹陷属于双断型,凹陷受控于双侧断层的活动,斜坡断层发育中等,斜坡带构造样式多为堑垒相间,属于构造—沉积复合斜坡;斜坡带还发育一条与控凹断层规模相当的反向断层,而盆地控凹断层倾角中等,拆离深度约为 10 km,相对中等(表 2)。束鹿西斜坡对应的束鹿凹陷属于单断型,斜坡断层发育强烈,构造样式多为顺向断阶式,反向断层较少,属于构造型斜坡;盆地控凹断层倾角大,拆离深度大于 10 km,相对较大,推测断层具有走滑性质(表 2)。

4 典型斜坡带运动学特征

通过平衡剖面恢复,可以分析斜坡带断层发育及其构造演化特征。文安斜坡及其对应凹陷在晚白垩世处于区域挤压背景,牛东断层逆冲,研究区处于隆升剥蚀状态;进入新生代,研究区及邻区转换为 NW—SE 向伸展。Ek—Es₄时期,牛东断层负反转,研究区演变成断陷盆地斜坡带并发育多条次级正断层,剖面伸展量约 2.9 km、伸展率约 13.5%。Es₃—Es₂时期,研究区强烈变形并发育大量次级断层,斜坡带翘倾显著,地层整体呈西厚东薄;该时期剖面伸展量约 5.4 km、伸展率约 21.2%。Es₁—Ed 时期,研究区断层继承性发育,地层横向变化不大;该时期剖面伸展量约 2.2 km、伸展率约 7.2%。N—Q 时期,研究区断层活动逐渐消亡,但地层东厚西薄,沉积中心向东迁移;该时期剖面伸展量约 1.0 km、伸展率约 3.4%(表 3、图 4)。

蠡县斜坡的构造演化与文安斜坡类似。前新生代研究区处于区域挤压背景,斜坡带发育多条

表 2 渤海湾盆地冀中坳陷典型斜坡带构造变形差异

Table 2 Differences of tectonic deformation in typical slope zones in Jizhong Depression, Bohai Bay Basin

类型	坡度(°)	宽度/km	剖面样式	变形特征	控凹断层
宽缓型	4~10	>10		凹陷单断型,伸展量大;斜坡断层发育弱,为断阶式或堑垒式,属于沉积斜坡	断层正断,倾角小,拆离深度相对较小
平台型	<4	>10		凹陷双断型,伸展量和斜坡断层发育中等,构造样式为堑垒式,属于构造—沉积斜坡	发育一条与控凹断层规模相当的反向断层,倾角中等,断层皆未拆离至基底面
窄陡型	>10	<10		凹陷单断型,伸展量小;斜坡断层发育强,为顺向断阶式,反向断层少,属于构造斜坡	断层伸展+走滑,断层倾角大,拆离深度相对较大

表3 渤海湾盆地冀中坳陷文安、蠡县、束鹿西斜坡带平衡剖面伸展量、伸展率及速率统计

Table 3 Extension amount, rate and velocity of Wen'an, Lixian and Shulu West slope zones in Jizhong Depression, Bohai Bay Basin

斜坡带		Ek—Es ₄	Es ₃ —Es ₂	Es ₁	Ed	N—Q
文安斜坡	伸展量/m	2 917	5 417	1 042	1 125	1 021
	伸展率/%	13.52	21.16	3.77	3.78	3.38
	伸展速率/(m·Ma ⁻¹)	149.59	373.59	416.8	239.36	42.89
蠡县斜坡	伸展量/m	250	90	105	60	65
	伸展率/%	11.84	4.24	4.77	4.35	2.80
	伸展速率/(m·Ma ⁻¹)	12.82	6.21	42	12.77	2.73
束鹿西斜坡	伸展量/m	1 330	934	583	467	167
	伸展率/%	30.77	17.00	8.97	6.59	2.20
	伸展速率/(m·Ma ⁻¹)	68.2	64.41	233.20	99.36	7.02

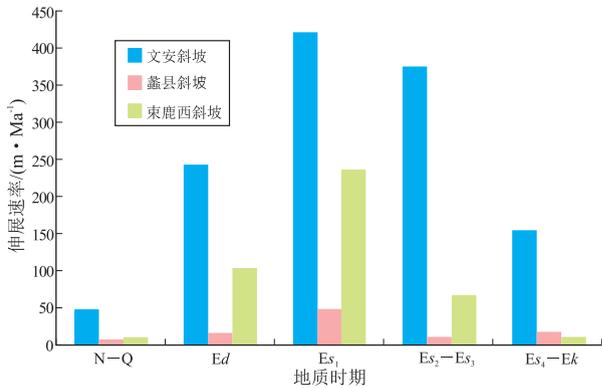


图4 渤海湾盆地冀中坳陷典型剖面的伸展速率

Fig.4 Extension rate of typical profiles in Jizhong Depression, Bohai Bay Basin

逆断层。Es₄—Ek 时期,邻区饶阳凹陷演变成断陷盆地,前述逆断层负反转,研究区强烈变形并发育成斜坡带,剖面伸展量约 0.25 km、伸展率约 11.8%。Es₂—Es₃时期,研究区变形减弱,斜坡带未明显翘倾,地层厚度横向变化不大;该时期剖面伸展量约 0.09 km、伸展率约 4.2%。Es₁—Ed 时期,研究区断层继承性发育并有所增强;该时期剖面伸展量约 0.17 km、伸展率约 6.7%。N—Q 时期,研究区断层活动逐渐消亡,但地层东厚西薄;该时期剖面伸展量约 0.07 km、伸展率约 2.8%(表 3、图 4)。

束鹿西斜坡的构造演化与前述斜坡带有所差异。前新生代研究区处于区域挤压背景,但斜坡带区未发育明显构造。Es₄—Ek 时期,邻区束鹿凹陷强烈断陷,研究区发育成斜坡带,地层翘倾显著,剖面伸展量约 1.3 km、伸展率约 30.8%。Es₂—Es₃时期,研究区变形继承性发育并减弱,但斜坡带发育多条次级正断层;该时期剖面伸展量约 0.9 km、伸展率约 17.0%。Es₁—Ed 时期,研究区构造活动有所增强,沉积中心靠近控凹断层;该时期剖面伸展

量约 1.2 km、伸展率约 17.5%。N—Q 时期,研究区断层活动逐渐消亡,地层整体东厚西薄;该时期剖面伸展量约 0.17 km、伸展率约 2.2%(表 3、图 4)。

在平衡剖面的基础上,通过统计、对比各地质时期伸展量、伸展率、伸展速率等数据,可以分析斜坡带活动强度演变等特征。分析表 3 可以得到如下结论:文安斜坡的伸展率在 Es₃—Es₁时期最强,之后逐渐变弱,变化规律是“弱—强—弱”,反映文安斜坡是正态演化型的演化过程。蠡县斜坡的伸展率 Ek—Es₄时期较强,Es₃—Es₂时期变弱,Es₁时期增强,之后逐渐变弱,变化规律是“强—弱—强—弱”,反映蠡县斜坡是继承性多期发育的演化过程。束鹿西斜坡的伸展率在 N—Q 时期之前都比较强,在 Es₁为最强,变化规律则是“强—弱”,反映束鹿西斜坡是消亡型的演化过程。此外,从图 4 可以看出,3 个典型斜坡带的伸展速率皆呈正态演化。

根据前述斜坡带的构造演化及其活动强弱的变化,本文将 3 个斜坡带的演化分为基底发育期(前新生代)、初始发育期(Ek—Es₄)、强烈发育期(Es₃—Ed)以及发育衰亡期(N—Q)4 个阶段。基底发育期研究区为挤压应力场,形成基底构造层序以及不同的先存构造;初始发育期研究区转变为伸展应力场,控凹断层发生负反转,断陷盆地斜坡带形成;强烈发育期研究区进入差异化发展阶段,奠定平台型、宽缓型、窄陡型斜坡带,并与初始发育期共同沉积断陷构造层序;发育衰亡期研究区各斜坡带统一进入热沉降阶段,构造变形进一步减弱,沉积特征亦趋同,并最终形成拗陷构造层序。

5 典型斜坡带动力学机制分析

综合冀中坳陷3大斜坡几何学运动学变形特

征及构造演化史分析,表明冀中拗陷古近纪时期整体断裂活动性强,断陷活动变化特征明显,同时明确断陷盆地中大多数生长断层的发育具有不平衡的特征,即断层活动初期较微弱,中期强度最大,末期则微弱活动直到停止,整体呈现一个完整的断裂运动旋回。

$E_k-E_{s_4}$ 为初始发育期,受先存构造影响,各控凹断层活动各异;但是,控凹断层若倾角大则拆离深度大,进而使得斜坡带翘倾幅度大,整个凹陷狭窄。斜坡带在此时期活动较弱,地层沉积薄,其中蠡县斜坡发育范围、断层活动数量依次大于文安斜坡、束鹿斜坡,而束鹿斜坡以地层翘倾变形为主。 $E_{s_3}-E_{s_1}$ 为强烈发育期,地层厚度变化明显加快,断层活动性增强,地层沉积厚,斜坡带基本定型。此时期文安斜坡的活动性最强,束鹿斜坡活动最弱,而蠡县斜坡断层多为继承性发育。 $Ed-Q$ 为发育衰亡期,地层厚度变化明显减慢,断层活动处在逐渐减弱至消亡的过程,局部断层持续微弱活动,斜坡带基本形成。此后全区变形以拗陷为主,形成统一的沉降单元,各斜坡带变形基本无差异(表 4)。

6 斜坡带油气成藏特征

6.1 斜坡坡度和宽度控制斜坡带储层发育及油气横向运移

斜坡坡度和宽度是控制斜坡带沉积相发育、展布的重要因素,进而控制着储层及储盖组合。宽缓型斜坡坡度相对适中,地层倾角中等,平面上沉积相的分布较为宽广,以河流—三角洲—湖泊沉积体系为特征。上述沉积特征使得斜坡带储层发育较

多,但泥岩盖层较少,如文安斜坡区域盖层为沙一段烃源岩兼盖层,断层活动和断距中等,使油气能多层系垂向运移,连同横向运移形成网毯式成藏模式,主要形成断层、不整合、岩性尖灭型等油气藏(表 5)。平台型斜坡地层倾角小,导致平面上沉积相变化小,沉积速率缓慢,发育河流相和滨浅湖相。上述沉积特征使得斜坡带储层发育少,如蠡县斜坡以潜山内幕、烃源岩附近储层砂体为主,多为自生自储或上生下储,区域盖层为沙一下亚段,主要形成潜山、断层、岩性尖灭等油气藏(表 5)。窄陡型斜坡带坡度大,地层倾角大,导致平面上沉积相变化快,以快速堆积、分选差的冲积扇、扇三角洲为特征。上述沉积特征使得斜坡带储层、盖层发育,但储层多以砾岩、粗砂岩等为主,如束鹿西斜坡的沙三下亚段发育大量砂砾岩油气藏^[23-25](表 5)。

斜坡带的坡度和宽度可以控制油气横向运移范围。平台型斜坡的地层倾角小,油气难以横向运移,洼槽中生成的油气难以横向有效运移至斜坡上成藏,使得油气来源于斜坡带内邻近的生烃次洼。如蠡县斜坡南段未发育生烃次洼,则未发现油气;而北段油气藏的油源对比显示,油气主要来自斜坡带次洼内的沙一段下部烃源岩,进而形成一系列鼻状油气藏。宽缓型斜坡的地层倾角适中、宽度较大,油气能横向长距离运移,使油气平面分布宽广。窄陡型斜坡的地层倾角较大、宽度小,有利于油气垂向运移,但平面分布狭窄。

6.2 构造变形控制斜坡带主要圈闭类型及油气垂向运移

斜坡带相对于陡坡带的构造变形弱,但不同类

表 4 渤海湾盆地冀中拗陷典型斜坡构造演化异同

Table 4 Similarity and difference for tectonic evolution in typical slope zones in Jizhong Depression, Bohai Bay Basin

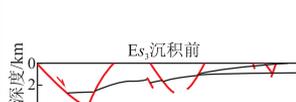
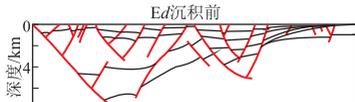
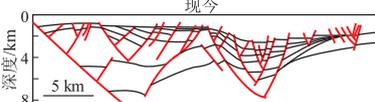
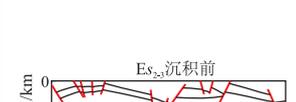
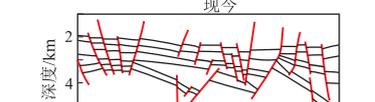
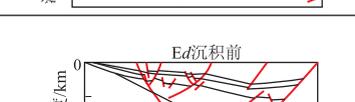
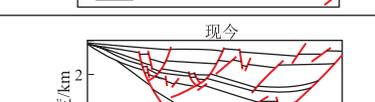
斜坡带	初始发育期 ($E_k-E_{s_4}$)	强烈发育期 ($E_{s_3}-E_{s_1}$)	发育衰亡期 ($Ed-Q$)
文安斜坡			
蠡县斜坡			
束鹿斜坡			
变形特征	受先存构造影响,各控凹断层活动各异,但斜坡活动弱,地层沉积薄	断层活动强烈,地层沉积厚,斜坡带定型;文安斜坡活动强度大于蠡县斜坡,大于束鹿斜坡	断层逐渐减弱至消亡,斜坡带基本形成;全区变形以拗陷为主,形成统一沉降单元

表5 斜坡带成藏模式
Table 5 Accumulation models in slope zones

类型	宽缓型	平台型	窄陡型
成藏模式			
圈闭类型	断层、不整合、岩性尖灭型	潜山、断层、岩性尖灭型	断层、不整合、砾岩、泥灰岩裂缝型
成藏特征	坡度、断距中等, 油气能横向长距离、垂向多层系运移, 形成网毯式成藏模式	坡度小, 油气难以横向运移; 断层活动弱, 断距小, 不能沟通源储, 油气难以垂向运移, 油气丰度取决于斜坡内生烃次注	坡度大, 油气易于横向运移, 但凹陷窄导致运移距离近; 断层活动强, 断距大且继承性活动, 断层沟通油源, 使油气垂向运移
实例	文安斜坡: 文22、苏9等油气藏, 地质储量 762×10^4 t	蠡县斜坡: 西柳10南、高43南等油气藏, 地质储量 $1\ 179 \times 10^4$ t	束鹿斜坡: 晋100、晋古1油气藏, 地质储量 $3\ 081 \times 10^4$ t

型斜坡带的变形差异使其形成不同的圈闭类型组合。宽缓型斜坡断层发育多且呈断阶状, 形成大量多层系含油的断层圈闭; 同时, 由于断阶的垂向输导作用, 使地层圈闭有效性提高, 发育较多隐蔽性地层圈闭, 因此, 宽缓型斜坡的圈闭组合为断层—地层型。平台型斜坡断层发育中等, 断层圈闭是其重要类型之一; 此外, 斜坡带内断块以差异升降为主, 形成多层系剥蚀和地层不整合, 进而发育地层不整合圈闭和潜山内幕圈闭, 因此, 平台型斜坡的圈闭组合为断层—不整合—潜山型。窄陡型斜坡的断层发育强度大, 易形成断层和裂缝型圈闭; 而且, 地层翘倾显著, 使得地层剥蚀强烈且砾岩发育, 进而发育不整合和砾岩圈闭, 因此, 窄陡型斜坡的圈闭组合为断层—裂缝—不整合—砾岩岩性型。

此外, 构造活动强度影响油气垂向运移, 而其演化则控制油气垂向分布。宽缓型斜坡的构造演化为“弱—强—弱”模式, 油气垂向运移存在主成藏期, 垂向分布广但相对集中; 平台型斜坡的构造虽然活动强度弱但具多期性, 油气能多期成藏并且垂向多层系含油; 窄陡型斜坡的构造演化为“强—弱”模式, 断层断距大且继承性活动, 使油气垂向运移。

6.3 不同斜坡带的地层不整合对油气成藏的影响

斜坡带是盆地内地层翘倾以及沉降区剥蚀的重要区带, 发育大量地层不整合。而且, 不同类型斜坡带的不整合类型不同, 进而在油气输导、圈闭类型等方面有所差异^[26]。

宽缓型斜坡的构造活动强度相对平台型适中, 且地层坡度较小, 使其发育超覆不整合。该类型不整合形成于湖平面上升期, 发育区域泥岩盖层, 具有较好的封闭有效性。因此, 当不整合面侧向封堵

油气时, 该类型斜坡在不整合面之上、之下皆可形成油气藏。

平台型斜坡, 如蠡县斜坡在前新生代的褶皱冲断以及新生代的正断层的差异升降, 使其发育褶皱型和断块型潜山及其对应不整合。该类型不整合发育较完整风化壳, 对下伏潜山具有较好的垂向封闭有效性, 且风化裂缝、砂砾岩等为较好的储层; 同时, 平台型斜坡地层坡度小, 泥岩较为发育, 亦为潜山提供良好盖层。因此, 该类型斜坡多形成不整合面之下的潜山油气藏。

窄陡型斜坡的坡度最大, 地层的显著翘倾作用使其形成削截型不整合和超覆型不整合。削截型不整合的垂向封闭有效性和横向输导有效性与平台型潜山相似, 但该类型不整合发育于斜坡带外缘, 形成不整合面之下油气藏。超覆型不整合的垂向封闭有效性与宽缓型斜坡相似, 但该类型不整合发育于斜坡带内缘。

7 结论

(1) 根据斜坡带的坡度和宽度, 将坡度在 $4^\circ \sim 10^\circ$ 、宽度大于 10 km 的斜坡带归为宽缓型斜坡带, 将坡度小于 4° 、宽度大于 10 km 的斜坡带划分为平台型斜坡带, 将坡度大于 10° 、宽度小于 10 km 的斜坡带划分为窄陡型斜坡带。

(2) 宽缓型斜坡凹陷一般为单断型, 伸展量大, 斜坡断层发育弱, 为断阶式或堑垒式, 成因上为沉积斜坡; 斜坡带发育大量次级断层, 而盆地控凹断层倾角小, 拆离深度相对较小。平台型斜坡凹陷一般为双断型, 伸展量和斜坡断层发育中等, 构造样式为堑垒式, 成因上为构造—沉积复合斜坡; 斜坡带发育一条与控凹断层规模相当的反向断层, 而

盆地控凹断层倾角中等且皆未拆离至基底面。窄陡型斜坡凹陷为单断型,伸展量小、斜坡断层发育强,为顺向断阶式,反向断层少,成因上为构造斜坡;盆地控凹断层倾角大,拆离深度相对较大,常具有走滑性质。

(3)宽缓型斜坡坡度、断距中等,油气能横向长距离、垂向多层系运移,形成网毯式成藏模式,发育断层、不整合、岩性尖灭等类型油气藏;平台型斜坡坡度小,油气难以横向运移,断层活动弱,断距小,不能沟通源储,油气难以垂向运移,油气丰度取决于斜坡内生烃次洼,发育潜山、断层、岩性尖灭等类型油气藏;窄陡型斜坡带坡度大,油气易于横向运移,但凹陷窄导致运移距离近,断层活动强,断距大且继承性活动,断层沟通油源,使油气垂向运移,发育断层、不整合、砾岩及泥灰岩裂缝等类型油气藏。

参考文献:

- [1] 李丕龙.陆相断陷盆地油气地质与勘探[M].北京:石油工业出版社,2003:80-89.
LI Pílong. Petroleum geology and exploration of continental fault basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 80-89.
- [2] 秦永霞,姜素华,王永诗.斜坡带油气成藏特征与勘探方法:以济阳拗陷为例[J].海洋石油,2003,23(2):14-20.
QIN Yongxia, JIANG Suhua, WANG Yongshi. Pool-forming features and exploration methods for oil and gas in slope zone[J]. Offshore Oil, 2003, 23(2): 14-20.
- [3] 张家震.济阳拗陷缓坡带形成机制及油气成藏规律研究[D].广州:中国科学院研究生院,2006.
ZHANG Jiachen. The forming mechanism of gentle slope and reservoir-forming low in Jiyang Depression [D]. Guangzhou: University of Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [4] 杨伟荣,钱铮,张欣,等.冀中地区文安斜坡带成藏特征研究[J].岩性油气藏,2008,20(3):49-52.
YANG Weirong, QIAN Zheng, ZHANG Xin, et al. Accumulation characteristics in Wen'an slope belt in Jizhong Depression [J]. Lithologic Reservoirs, 2008, 20(3): 49-52.
- [5] 金之钧,云金表,周波.塔里木斜坡带类型、特征及其与油气聚集的关系[J].石油与天然气地质,2009,30(2):127-135.
JIN Zhijun, YUN Jinbiao, ZHOU Bo. Types and characteristics of slope zones in Tarim Basin and their relationship with oil accumulation [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(2): 127-135.
- [6] 金凤鸣,李宝刚,崔周旗,等.箕状断陷缓坡带油气富集的主要地质因素[J].断块油气田,2011,18(6):726-729.
JIN Fengming, LI Baogang, CUI Zhouqi, et al. Main geological factors of controlling accumulation and distribution of oil and gas in gentle slope of half graben basin [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2011, 18(6): 726-729.
- [7] 赵贤正,金凤鸣,李玉帮,等.断陷盆地斜坡带类型与油气运聚成藏机制[J].石油勘探与开发,2016,43(6):841-849.
ZHAO Xianzheng, JIN Fengming, LI Yubang, et al. Slope belt types and hydrocarbon migration and accumulation mechanisms in rift basins [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(6): 841-849.
- [8] 姚城,张新涛,于海波,等.石臼坨凸起东南斜坡带输导体系与油气运聚模式[J].断块油气田,2017,24(6):755-759.
YAO Cheng, ZHANG Xintao, YU Haibo, et al. Hydrocarbon translocation system and migration-accumulation patterns in southeastern slope area, Shijiuotuo Uplift [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2017, 24(6): 755-759.
- [9] 李火车,刘秋生,王亚红,等.斜坡油气勘探[J].石油地球物理勘探,2001,36(5):602-610.
LI Huoche, LIU Qiusheng, WANG Yahong, et al. Oil-gas exploration on slope [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2001, 36(5): 602-610.
- [10] 王海潮,王余泉,秦云龙,等.渤海湾盆地沉积斜坡及其含油气性[J].地质力学学报,2006,12(1):23-30.
WANG Haichao, WANG Yuquan, QIN Yunlong, et al. Sedimentary slopes of the Bohai Gulf Basin and their oil potential [J]. Journal of Geomechanics, 2006, 12(1): 23-30.
- [11] 赵贤正,卢学军,崔周旗,等.断陷盆地斜坡带精细层序地层研究与勘探成效[J].地质学前缘,2012,19(1):10-19.
ZHAO Xianzheng, LU Xuejun, CUI Zhouqi, et al. Detailed research of fine sequence stratigraphy and exploration results in the slope zone of faulted basin [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(1): 10-19.
- [12] 赵贤正,王权,金凤鸣,等.渤海湾盆地富油凹陷二次勘探工程及其意义[J].石油勘探与开发,2015,42(6):723-733.
ZHAO Xianzheng, WANG Quan, JIN Fengming, et al. Reexploration program for petroleum-rich sags and its significance in Bohai Bay Basin, East China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(6): 723-733.
- [13] 费宝生.箕状凹陷缓坡带油气勘探[J].复式油气田,1999(3):1-5.
FEI Baosheng. Oil and gas exploration of ramp zone in basket depressions [J]. Multiple Oil-Gas Field, 1999(3): 1-5.
- [14] 翟光明,高维亮.中国石油地质学[M].北京:石油工业出版社,2005:14-18.
ZHAI Guangming, GAO Weiliang. Chinese petroleum geology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005: 14-18.
- [15] 樊太亮,高志前,刘聪,等.塔里木盆地古生界不同成因斜坡带特征与油气成藏组合[J].地质学前缘,2008,15(2):127-136.
FAN Tailiang, GAO Zhiqian, LIU Cong, et al. The characteristics of Palaeozoic slopes with different geneses and oil/gas plays in the Tarim Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(2): 127-136.
- [16] 韩志艳,周卓明,杨昊,等.松辽盆地梨树断陷东南斜坡带营城—沙河子组储层特征及主控因素[J].石油实验地质,2018,40(3):345-352.
HAN Zhiyan, ZHOU Zhuoming, YANG Hao, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of Yingcheng-Shahezi formations in southeast ramp region of Lishu Fault Depression, Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(3): 345-352.
- [17] 刘玉英,房敬彤.渤海湾盆地箕状凹陷缓坡带油气藏形成条件

- 及富集程度初步探讨[J].石油勘探与开发,1988(3):21-26.
- LIU Yuying, FANG Jingtong. Oil and gas accumulation and the formation of oil reservoirs on the gentle slope of the dustpan like sag in Bohaiwan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 1988(3):21-26.
- [18] 赵红星, 司继伟, 何伟平. 陆相断陷盆地斜坡带分类及成藏特征分析[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2011, 8(3):28-30.
- ZHAO Hongxing, SI Jiwei, HE Weiping. Classification of continental fault-breaking basin and study of reservoir formation[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2011, 8(3):28-30.
- [19] 李海, 刘安, 罗胜元, 等. 鄂西宜昌斜坡区寒武系页岩储层发育特征: 以鄂宜页1井为例[J]. 石油实验地质, 2019, 41(1):76-82.
- LI Hai, LIU An, LUO Shengyuan, et al. Characteristics of the Cambrian Shuijingtu shale reservoir on Yichang Slope, western Hubei Province: a case study of well EYY 1[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(1):76-82.
- [20] 彭传圣. 箕状断陷盆地缓坡带层序格架特征与演化: 以济阳坳陷为例[J]. 东华理工学院学报, 2005, 28(3):239-243.
- PENG Chuansheng. Sequence framework feature and evolution of the ramp belt of Half-Graben-Basin: example of Jiyang Depression[J]. Journal of East China Institute of Technology, 2005, 28(3):239-243.
- [21] 张宇. 济阳坳陷缓坡带构造特征及分类[J]. 断块油气田, 2005, 12(3):22-24.
- ZHANG Yu. Structural features and classification of the gentle slope zone in Jiyang Depression[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2005, 12(3):22-24.
- [22] 单帅强. 太行山山前断层的构造几何学、运动学及其对渤海湾盆地发育的控制作用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- SHAN Shuaiqiang. Structural geometry and kinematics of the Taihang Mountain piedmont fault and its controlling on the development of the Bohai Bay Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [23] 黄远鑫, 鱼占文, 张骛, 等. 束鹿凹陷西斜坡潜山成藏主控因素与成藏模式[J]. 特种油气藏, 2018, 25(6):60-64.
- HUANG Yuanxin, YU Zhanwen, ZHANG Ao, et al. Main-controlling factors and hydrocarbon accumulation patterns of the buried-hill reservoirs in the western slope of Shulu Sag[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(6):60-64.
- [24] 吴东胜, 陈林. 束鹿凹陷潜山地层分布特征及有利区预测[J]. 特种油气藏, 2018, 25(1):1-4.
- WU Dongsheng, CHEN Lin. Hill strata distribution and favorable area prediction in Shulu Sag[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(1):1-4.
- [25] 詹路锋. 束鹿西斜坡沙河街组沉积特征及有利区带预测[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009.
- ZHAN Lufeng. Study of sedimentary characteristics and favorable zones prediction of Shahejie Formation in Shulu West Slope[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2009.
- [26] 蒋有录, 查明. 石油天然气地质与勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006:159-173.
- JIANG Youlu, ZHA Ming. Oil and gas geology and exploration[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006:159-173.

(编辑 徐文明)

(上接第497页)

- [17] 郭顺, 闫继福, 郭兰, 等. 鄂北杭锦旗地区太原组沉积微相分析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2009, 39(2):283-287.
- GUO Shun, YAN Jifu, GUO Lan, et al. The sedimentary microfacies of Taiyuan Formation in the Hangjinqi area, the north of Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2009, 39(2):283-287.
- [18] 李潍莲, 纪文明, 刘震, 等. 鄂尔多斯盆地北部泊尔江海子断裂对上古生界天然气成藏的控制[J]. 现代地质, 2015, 29(3):584-590.
- LI Weilian, JI Wenming, LIU Zhen, et al. Control of Boerjiang-haizi Fault on gas accumulation of Upper Paleozoic in northern Ordos Basin[J]. Geoscience, 2015, 29(3):584-590.
- [19] 肖冬生, 付强. 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗区块下石盒子组自生石英形成机制[J]. 岩石矿物学杂志, 2011, 30(1):113-120.
- XIAO Dongsheng, FU Qiang. The genetic mechanism of authigenic quartz in Lower Shihezi Formation of Hanggin Banner, northern Ordos Basin[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2011, 30(1):113-120.
- [20] 王付斌, 马超, 安川. 鄂北杭锦旗地区三维地震勘探难点与对策[J]. 石油化工应用, 2016, 35(6):109-113.
- WANG Fubin, MA Chao, AN Chuan. The difficulties and countermeasures of 3-D seismic exploration in Hangjinqi area[J]. Petrochemical Industry Application, 2016, 35(6):109-113.
- [21] 邢凤存, 陆永潮, 刘传虎, 等. 车排子地区构造—古地貌特征及其控砂机制[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(1):78-83.
- XING Fengcun, LU Yongchao, LIU Chuanhu, et al. Structural-paleogeomorphologic features of Chepaizi area and mechanism of their control on sandbodies[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(1):78-83.

(编辑 徐文明)