

高钰坤, 鲜本忠, 魏新辉, 等.渤海湾盆地长堤走滑断裂带断层活动与组合样式分段差异[J].石油物探, 2025, 64(5): 932-945
GAO Yukun, XIAN Benzong, WEI Xinhui, et al.Segmented difference in fault activities and combination pattern of strike-slip fault zones in Changdi area, Bohai Bay Basin[J].Geophysical Prospecting for Petroleum, 2025, 64(5): 932-945

渤海湾盆地长堤走滑断裂带断层活动与 组合样式分段差异

高钰坤¹, 鲜本忠^{1,2}, 魏新辉³, 张伟涛³, 王俊辉¹, 白宇杰¹, 刘 俐¹, 邓 涛³, 王春生⁴

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 3. 中国石化胜利油田分公司桩西采油厂, 山东东营 257000; 4. 中国石油国际勘探开发有限公司, 北京 102100)

摘要:渤海湾盆地长堤走滑断裂带属于郯庐走滑断裂带东侧的派生构造带,含油气资源丰富。在沙河街组沉积时期,该断裂带经历了伸展、走滑多期叠合改造,其断裂分段活动的动力学机制及其对油气差异富集的控制模式尚未得到系统揭示。基于三维地震、钻井及岩心录井等资料,利用地震断层与层位解释、地震属性分析、断层生长指数等方法,研究了长堤走滑断裂带沙河街组沉积时期的断层性质、活动历史、组合特征及其分段性差异,以深化大型走滑断裂带背景下伴生走滑断裂分段发育特征和油气富集规律认识。研究发现,长堤走滑断裂带共识别出主断层张扭断裂组、主断层压扭断裂组、差异伸展走滑断裂组等共 7 组断层,剖面上组合为顺向断阶式、逆向断阶式、Y 字型与反 Y 字型、地垒式、地堑式以及俯冲逆断层式共 6 种构造样式,平面上可分为分支尾端、尾端、压扭叠接区、张扭叠接区、主位移区共 5 段。其中,南部分支尾端断裂活动性较弱,表现为拉张性质的马尾构造,北部尾端应力释放,二者断面封堵性差,导致油气逸散;压扭叠接区断裂活动性较强,发育花状构造,断面下缓上陡,封堵性好有利于油气聚集;张扭叠接区发育脆性共轭断层和反向断阶构造;主位移段由走向相反的张扭、压扭段形成复合 S 型,断裂活动性最强,压扭段断面封堵性强,利于油气成藏,而张扭段沟通性强,利于油气运移,发育雁列式断层和俯冲逆断层构造。

关键词:走滑断裂带;断层组合样式;断层活动史;走滑分段性;长堤地区

中图分类号: TE121.2; P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-1441(2025)05-0932-14

DOI: 10.12431/issn.1000-1441.2024.0034

Segmented difference in fault activities and combination pattern of strike-slip fault zones in Changdi area, Bohai Bay Basin

GAO Yukun¹, XIAN Benzong^{1,2}, WEI Xinhui³, ZHANG Weitao³, WANG Junhui¹,
BAI Yujie¹, LIU Li¹, DENG Tao³, WANG Chunsheng⁴

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, Beijing 102249, China; 3. Zhuangxi Oil Production Plant, Shengli Oilfield Company, Sinopec, Dongying 257000, China; 4. China National Oil and Gas Exploration and Development Company Ltd., Beijing 102100, China)

Abstract: The strike-slip fault zone in Changdi area, Bohai Bay Basin belongs to the derivative structural zone on the east side of Tanlu strike-slip fault zone, which is rich in oil and gas resources. During the sedimentary period of Shahejie Formation, the fault zone underwent a multi-stage

收稿日期(Received): 2024-01-30; 接收日期(Accepted): 2025-03-10。

第一作者简介: 高钰坤(1998—), 男, 博士在读, 从事油气勘探与开发地质研究工作。E-mail: gaoyk98@163.com

通信作者: 鲜本忠(1973—), 男, 博士, 教授, 从事沉积学与储层地质学教学与研究。E-mail: xianbzh@cup.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41872113, 42172109, 42172108)和中国石油大学(北京)科研启动基金项目(2462020BJRC002, 2462020YXZZ020)共同资助。

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41872113, 42172109, 42172108) and Science Foundation of China University of Petroleum (Beijing) (Grant Nos. 2462020BJRC002, 2462020YXZZ020).

© The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

superimposed transformation of extension and strike-slip. The dynamic mechanism of fault segment activities and its control mode for differential accumulation of oil and gas have not been systematically revealed. Three-dimensional (3D) seismic data, drilling data, and core logging data were analyzed, and seismic fault and horizon interpretation, seismic attribute analysis, fault growth index, and other methods were employed to study the fault properties, activity history, combination characteristics, and segmented differences of strike-slip fault zones in Changdi area during the sedimentary period of Shahejie Formation, so as to deepen the understanding of the segmented development characteristics and oil and gas accumulation rule of the associated strike-slip faults in the background of large strike-slip fault zones. According to the research, seven fault groups including the tension-torsion fault group of the main fault, compression-torsion fault group of the main fault, and differential extensional strike-slip fault group were identified in the strike-slip fault zones in Changdi area, and six structural styles including forward fault-step group, reverse fault-step group, Y-shaped and anti-Y-shaped fault group, horst type, graben type, and subduction reverse fault group were observed in the section. On the plane, it could be divided into five sections: branch tail end, tail end, compression-torsion overlapping area, tension-torsion overlapping area, and main displacement area. Among them, the fault activity of the southern branch tail was weak, which was manifested as the tensile horsetail structure, and the stress release was concentrated on the northern branch tail. The poor sealing property of the two sections leads to oil and gas escape. The compression-torsion overlapping area had strong fault activity, flower-like structure, gentle lower section and steep upper section, and good sealing properties, which are conducive to oil and gas accumulation. Brittle conjugate faults and reverse fault-step structures were developed in the tension-torsion overlapping area. The main displacement area was S-shaped due to the opposite tension-torsion and compression-torsion sections, with the strongest fault activity and strong section sealing in the compression-torsion section, which was conducive to oil and gas accumulation, while the tension-torsion section had strong communication, which was conducive to oil and gas migration, and with echelon faults and subduction reverse faults developed.

Keywords: strike-slip fault zone, combination pattern of fault, history of fault activity, strike-slip fault segmentation, Changdi area

新生代以来,渤海湾盆地依次经历了西太平洋板块持续俯冲作用下的地幔隆升伸展和郯庐走滑拉分双重构造体制改造,导致其兼具走滑拉分与伸展断陷叠合盆地特征^[1-2],呈现“东西分带、南北分区”的构造格局^[3]。长堤构造带位于渤海湾盆地济阳拗陷东北部^[4],为一典型的潜山披覆构造带^[5-6],东侧紧邻郯庐走滑断裂带,属于郯庐断裂的派生构造带^[7-8]。

长堤构造带在沙河街组发育多套砂砾岩体,与其西侧的优质烃源岩相接,油气富集条件优越。随着勘探程度的提高,埋深较大、勘探程度低的沙河街组三段下亚段(沙三下亚段)、四段上亚段(沙四上亚段)成为了该区带增储上产的重要阵地。早期研究认为,该区油气的运移和富集受到断层活动影响,长堤断裂的形成与古近纪从剪切-挤压向剪切-拉张的应力场转变有关,整体表现为伸展性质^[7,9-11]。最新的研究成果表明,长堤地区还受到郯庐断裂右旋走滑作用的控制,发育走滑断层^[6,12-13]。作为多因素联合控制下的叠合构造带,长堤断裂带具有性质多变、分期活动、次级断层发育的特点,导致其断裂性质、构造样式以及演化特征复杂,不同部位油气富集程度差异大,亟需深化该走滑断裂分段活动的特征及其对油气富集影响的认识。

为了深入研究长堤走滑断裂带不同断裂的性质、活动差异及其分段活动及组合特征,利用长堤地区高

精度三维地震数据、钻井及岩心录井等资料,开展了沙河街组断裂分布、性质、活动历史和构造样式研究,以探索派生型走滑断裂带分段活动规律及其对油气差异富集的影响。

1 区域地质概况

渤海湾盆地是多种力源相互作用、耦合的结果^[14],其构造演化经历了多期构造运动的叠合^[15]。新生代开始,太平洋板块斜向俯冲^[16],产生了弧后幔隆伸展与走滑拉分的构造应力,成为渤海地区发育演化的主要动力。在此背景下,渤海地区呈现出以走滑和伸展共生的构造格局^[17-19]。在济阳拗陷内,走滑和伸展构造普遍叠合发育,综合几何学与运动学可将济阳拗陷走滑构造区域划分成3个构造系统单元,分别是亲郯庐走滑构造系统、叠合走滑构造系统和亲盐兰(盐山-兰聊)走滑构造系统^[20]。沾化凹陷位于渤海湾盆地济阳拗陷东北部(图1),继承了渤海湾盆地复杂的构造格局。

沾化凹陷自古近系以来,受济阳运动影响,经历了多期构造演化阶段,包括初始裂陷阶段、强烈沉降阶段、再活化裂陷阶段、裂陷衰减阶段以及最终的区域拗陷阶段^[21]。沉降速率经历了先增大后减小、再增大后减小并增大的过程^[22],其中沙河街组三段(沙三

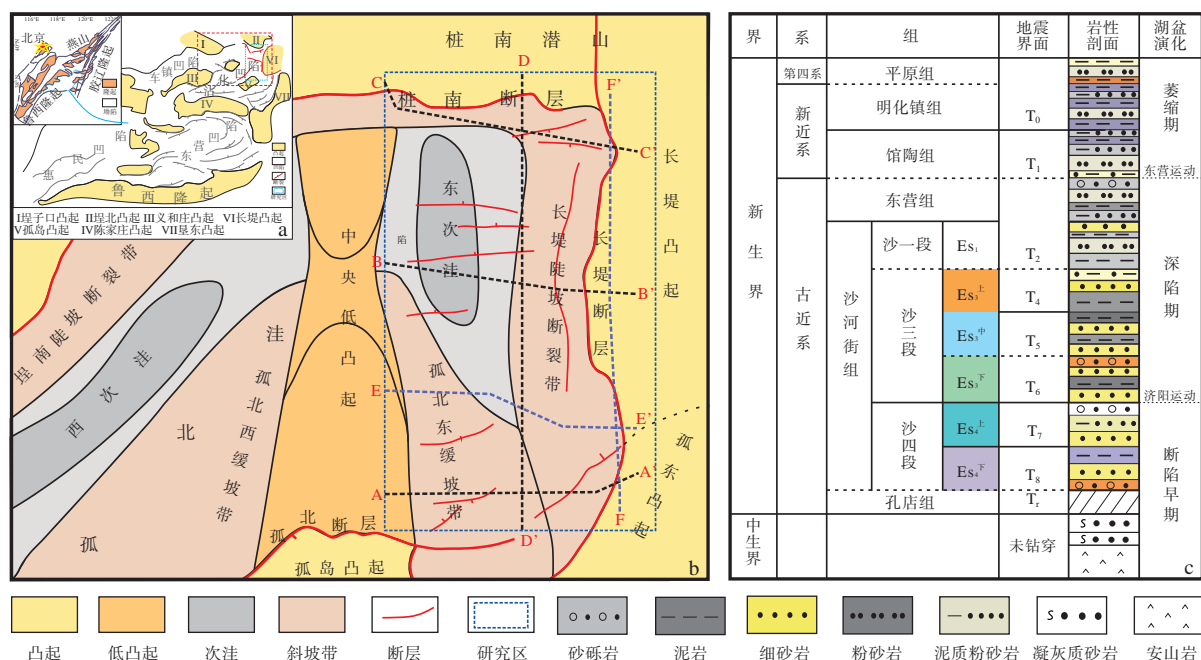


图1 沾化凹陷位置(a)以及长堤地区构造划分(b)和地层柱状图(c)(据参考文献[21]修改)

Fig. 1 Position of Zhanhua Depression (a), structure division (b) and stratigraphic column chart (c) of Changdi area (modified from reference [21])

段, Es₃ 底段沉积速率最大。长堤断裂位于沾化凹陷东部, 是郯庐断裂带中的次级断层, 发育于沙四段沉积末期, 为 NNE 走向 (图 1)。其东侧为长堤低凸起, 西侧为沾化凹陷东次洼, 南端与孤东凸起相接, 北端与桩南断层相交^[13]。断裂带发育区域勘探面积约 200 km², 研究区古近系主要发育沙河街组四段、三段、一段以及东营组 (Ed) 和明化镇组地层, 孔店组 (Ek) 和沙河街组二段在部分地区缺失 (图 1)。

研究区长堤断裂带隶属于郯庐走滑构造体系的次级构造单元, 具有多期构造属性转换特征。在古近纪孔店组 (Ek)–沙河街组四段 (Es₄) 沉积时期, 断层垂向断距较大, 表现为典型的张性正断层特征; 至沙河街组三段 (Es₃)–东营组 (Ed) 沉积期次, 受区域构造应力场转换影响, 断裂伸展作用明显减弱, 垂向断距衰减, 发育 P 型同生转换断层, 并伴随右旋走滑位移分量, 指示走滑–伸展复合变形机制^[6]。长堤断裂带作为主干控盆断裂, 其走滑分异作用导致研究区形成复杂的基底卷入型断裂网络系统, 伴生次级断裂主要呈近东西向 (EW) 和北东–南西向 (NE–SW) 优势展布 (图 1)。

2 断层空间展布及组合特征

2.1 断层的平面特征

通过精细层位标定和解释, 采用均方根 (RMS) 振

幅 RGB 融合、相干体切片等技术, 本研究清晰厘定了边界断层, 通过对各个时期层位的闭合解释, 编制了各关键层位底界面构造图。从长堤断裂带不同时期断层平面分析得出: 沙四段顶界面处断层主要分布于研究区南西侧, 除主断裂 NS 走向外, 次级断层几乎均为近 EW 走向。沙三段顶界面处西南方向发育多条 NE–SW 走向具有伸展性质的次级断层, 主断裂西侧发育一条与之平行的次级逆断层。至沙一段顶界面, 断裂基本特征保持不变, 继承了下部断裂的特征, 值得注意的是, 此界面处未发育平行于主断裂的次生逆断层。

长堤地区沙河街组沉积早期和晚期构造演化既有差异又有联系, 尤其是西部陡坡带主要受长堤断裂活动控制, 在此构造背景下发育演化出断层的产状、特征差异较大。基于对断层空间分布差异的研究, 本文根据断裂变形差异, 将研究区断层按受力机制和断层性质划分为主断层张扭断裂和压扭断裂 (图 2 中第 1~2 组)、雁列伸展断裂 (图 2 中第 3 组)、尾端分支帚状断裂 (图 2 中第 4 组)、伴生逆断裂 (图 2 中第 5 组)、差异伸展走滑断裂 (图 2 中第 6 组)、以及远端派生断裂 (图 2 中第 7 组) 共 7 组。

其中, 主断层张扭断裂和主断层压扭断裂为长堤主断裂不同位置的表现形式, 长堤走滑断裂两端 S 状弯曲的不同部位受力状态不同^[23-26], 张扭断裂主要发

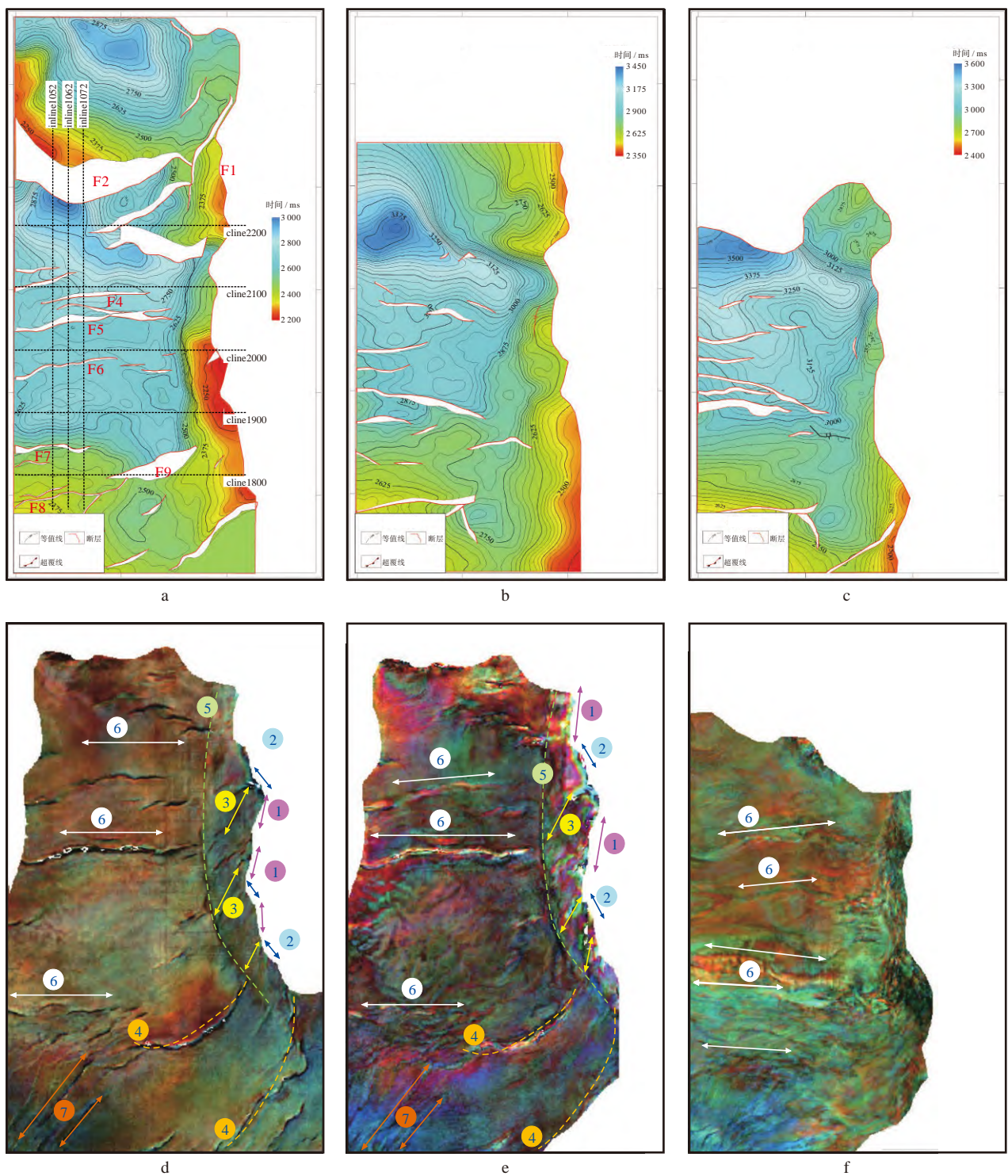


图 2 沙三、沙四段各界面断层与顶面构造叠合显示 (a~c) 以及 RMS 振幅属性 RGB 融合显示 (d~f)
a 沙三下亚段底界 (含断层编号); b 沙四上亚段底界; c 沙四下亚段底界; d 沙三上亚段; e 沙三中亚段; f 沙四上亚段

Fig. 2 Fault and top surface structure of Es₃ and Es₄ surfaces and RMS amplitude attribute RGB fusion

育于 S 型长堤走滑断层内部释压弯曲段, 发育伸展构造, 形成正断层, 主要呈 NNE 方向展布; 压扭断裂主要发育于 S 型长堤走滑断裂内部压扭弯曲段, 右行下

滑发育伸展构造, 主要呈 NWW 方向展布。主张扭断裂和主压扭断裂锯齿状复合构成长堤主断裂, 两组断裂沙三、沙四段皆有发育。差异伸展走滑断裂是由于

主断裂受基底先存构造薄弱带的应力分异作用而进行差异活动强度的伸展运动过程中所形成的小规模走滑构造,发育于研究区中、南部,长堤主断裂西侧的洼陷内部,长度2~6 km,近EW走向,最大倾角55°,与长堤主断裂近乎垂直,形成时间早,垂向断距小,至后期表现为弱伸展性。伴生逆断裂发育于长堤陡坡带上,是一条与主断裂近乎平行的伴生逆断层,近NS向展布,倾向为正东方向,倾角约45°,主要发育于沙三段时期。雁列伸展断裂主要发育于长堤主断裂与伴生逆断裂之间,为走滑作用下派生的T型断层组合,主要走向为NEE,倾向北西方向,最大倾角约50°,与主断层夹角约60°,主要发育于沙三段时期。帚状断裂为长堤断裂发生走滑作用时在尾端派生的弧状断裂,近NE-SW展布,倾向北西,最大倾角超过50°,主要发育于沙三段时期。远端派生断裂主要发育于西南部,位于帚状断裂的延伸方向,断面平直,NE-

SW走向,倾向南东,最陡处倾角约60°,最缓处倾角42°,主要发育于沙三段时期(图2)。

2.2 断层的剖面特征与组合样式

本研究通过对长堤地区不同部位断裂平、剖面分析,揭示了该地区不同区域内断层性质差异和分布特征。在长堤断裂带南段,长堤主断裂产状上陡下缓,整体呈高陡铲式特征,断穿整个第三系, NW倾向,断层控制了沙四、沙三段的沉积,在主断裂西侧发育多组次级断层,倾向与主断层相反,断距相对较小,只在层内活动(图3a)。在断裂带中段(图3b)与北段(图3c),主断面均陡直,断层样式表现为板式,倾向正东,其中中段发育一系列与主断裂倾向相同的次级断层,北段主断裂与位于研究区南部的桩南断裂分别是盆地东、北部的控边大断裂(图3)。

长堤断裂带表现的性质因时期而异,相应发育的断层组合样式也有不同。对研究区发育的7组断层

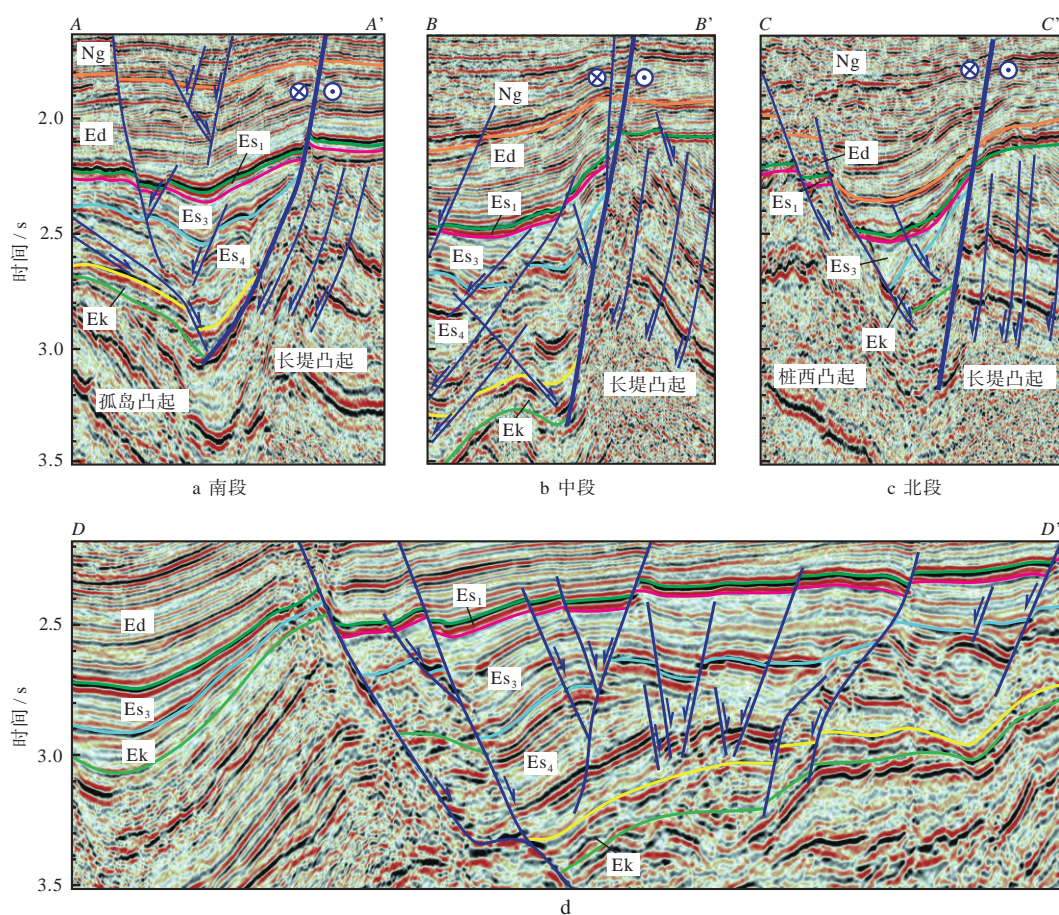


图3 长堤地区不同部位断层发育特征(剖面位置见图1b)

a A—A'; b B—B'; c C—C'; d D—D'

Fig. 3 Development characteristics of faults in different parts of Changdi area (See Fig. 1b for section location)

进行空间上的结构分析,识别出以下 4 类 6 种典型的断层组合样式,分别是顺向断阶式、逆向断阶式、Y 字型与反 Y 字型、地垒式、地堑式以及俯冲逆断层式(图 4)。其中顺向断阶式组合主要发育于研究区北部、东南和西南部,该组合样式可由长堤主断裂与雁列式断层之间、差异伸展走滑之间以及尾端帚状分支断层之间构成,沙三、沙四段时期广泛发育。逆向断阶式组合主要发育于沙三段沉积期,局限于研究区西部,主要由差异伸展走滑断裂之间、差异伸展走滑断裂与远端派生断裂之间构成。Y 字型与反 Y 字型组

合则局限于研究区中部发育,形成于沙三段沉积期,由差异伸展断裂之间构成。地堑、地垒式结构比较简单,但发育时期和部位不同,地垒式组合主要发育于研究区中南部,可由差异伸展走滑断裂之间、差异伸展滑断裂与远端派生断裂之间构成,沙三、沙四期均有发育;地堑式组合仅发育于沙三中后期研究区中东部,主要由差异伸展断裂组合之间构成。俯冲逆断层式主要由长堤伴生逆断层与长堤主断层之间形成,位于长堤断裂西侧平行发育,仅发育于沙三段早、中期。

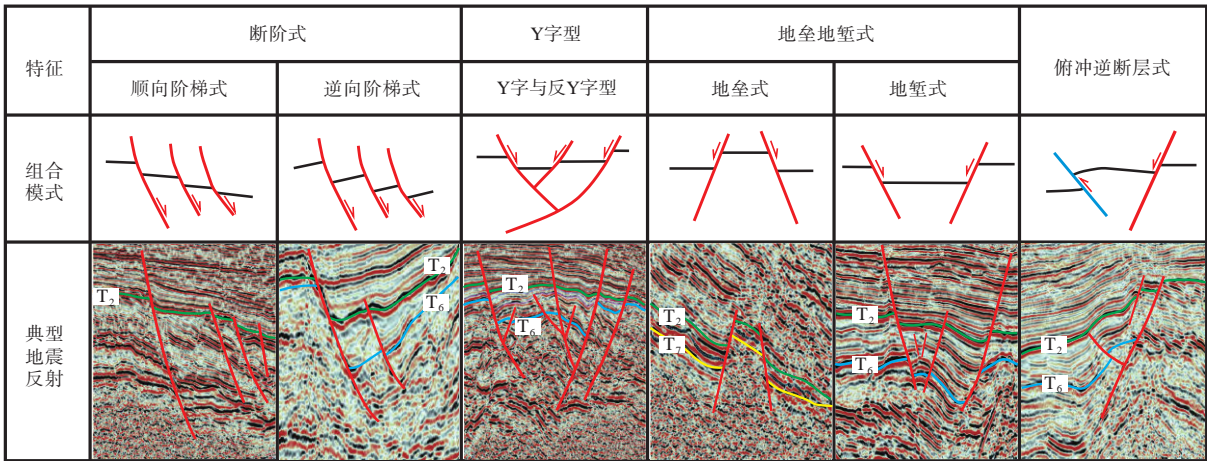


图 4 长堤地区沙河街组断裂剖面组合样式及典型地震反射特征

Fig. 4 Combination patterns of fault sections and typical seismic reflection characteristics of Shahejie Formation in Changdi area

3 断层的活动性

分别对研究区 7 组断层中选取 9 条断层(编号 F1~F9)(图 2)采用断层落差法和生长指数法,定量分析不同部位、时期发育断层的活动性。其中 F1 断层属长堤主断裂,控制盆地东部边界,F2 断层为北部桩南断裂,控制研究区北部沙河街组早期地层边界,F4~F7 断层属差异伸展走滑断层组,F8 断层属远端派生断层组,F9 断层属尾端帚状分支断层组。

3.1 断层落差分析及地层响应

长堤断层(F1)根据性质具体可分为伸展断裂和走滑断裂两种不同类型。伸展断裂自孔店组沉积时期开始活动,通过断层落差分析发现,伸展作用在沙四段沉积时期达到高峰(图 5a),最大断层落差约 620 m,为强烈伸展期,至沙三下时期,伸展作用减小,最大断层落差超过 450 m,为中-弱伸展期,至沙三中亚段以后,基本无伸展作用。相应在不同时期,地层厚度对断层活动性的响应也不同。F2 断层位于研究

区北侧,近东西走向,长约 8 km,倾向南,倾角 39.8°,断层上升盘沙河街组地层大部分被剥蚀,最大断距超过 1110 m。从桩南断裂(F2)断层落差统计图可以看出,该断层沙四下亚段时期开始强烈伸展,沙三中亚段及以后表现为中等伸展(图 5b)。

在沙四下亚段沉积时期,此时湖盆刚刚由断陷拉张初期过渡到断陷早期,长堤断层伸展活动性为中段强、南北段弱,桩南断层强烈伸展,长堤地区构造格局为南高北低,西高东低,在中间偏西北位置和南侧偏东位置分别可见 SE-NW 走向和近 NS 走向的洼槽,且在北西位置为本区最深洼处。从沙四下亚段地层厚度同生断层叠合图可以看出,该时期地层厚度最大约 630 m,整体地层厚度北厚南薄、西厚东薄,主要沉降中心在北西部桩南断层附近和北东部长堤断层根部(图 6f)。在沙四上亚段沉积期,断陷湖盆仍处于断陷早期,长堤断层伸展活动性为北段强、南段弱,桩南断裂保持强烈伸展,此时的构造格局表现为南东高北西低。通过沙四上亚段地层厚度同生断层叠合图不难

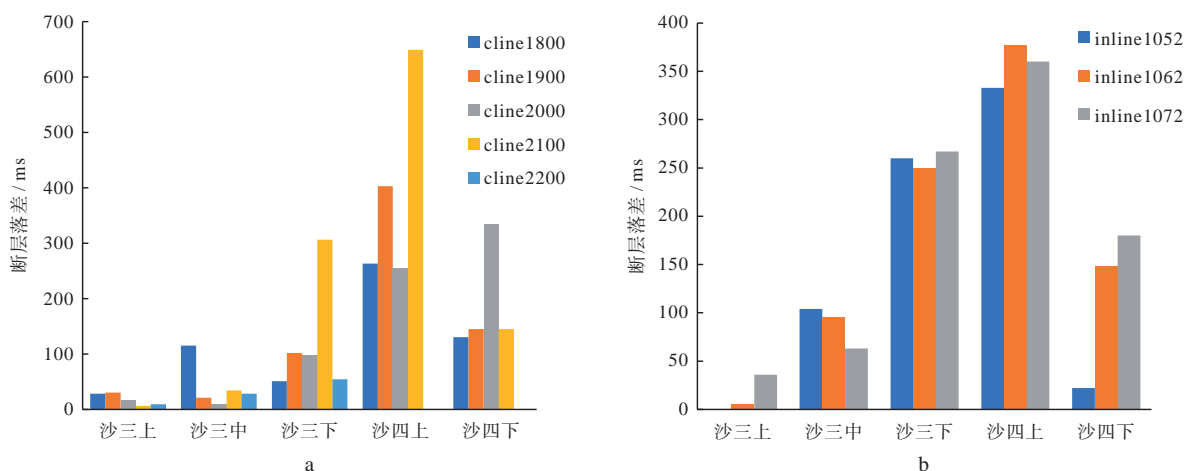


图 5 研究区重要断层不同时期断层落差直方图(测线号及断层编号见图 2)

a 长堤断裂 (F1); b 桩南断裂 (F2)

Fig. 5 Histograms of fault drop of important faults during different periods in Changdi area (See Fig. 2 for line No. and fault No.)

发现,该时期存在南北两个沉降中心,北侧地层最大厚度可达 1 200 m,且北部沉降范围相应较南部更大,整体地层呈南北厚、中间薄的特征(图 6e)。在沙三下亚段低位+湖侵域沉积时期,长堤断层北段还有一定伸展性,桩南断裂伸展活动开始减弱,长堤地区整体表现为东高西低、南北高中间低的构造格局,几乎全区都处于构造低位,主要深洼区在北部桩南断裂两侧。从沙三下亚段低位+湖侵域地层厚度图可以看出,该时期湖平面较低,湖盆范围相对局限,地层主要发育于中间的构造低部位,南侧孤岛鼻状凸起和北侧桩西凸起附近地层不发育(图 6d)。

进入沙三下亚段高位域以后,长堤断裂伸展活动微弱,桩南断裂仍具有伸展性,但其力源性质改变。沙三下亚段高位域沉积时期,长堤地区构造格局未发生较大改变,全区仍处于构造低位,最低点为桩南断裂下降盘根部的深洼区,盆地的伸展方向为 NW-SE 向。地层发育基本与构造格局保持一致,整体呈现南厚北薄的特征,在东西方向上,南段和北段具有差异性。北段地层表现为东厚西薄,厚度最大处为长堤断层根部,可达 400 m;南段则呈现出中间厚、四周薄的特点,最厚处约 200 m(图 6c)。沙三中亚段沉积时期,断陷湖盆演化阶段仍处于深陷期,湖平面开始下降,湖泊范围初步收缩,沉积空间相对减小。从地层厚度图可以看出,该时期地层呈南厚北薄、中间厚两边薄的特征,地层最厚处位于东南部同生断层下降盘根部,厚度约 220 m,最薄处位于长堤断裂中段断层根部,厚度仅约 20 m(图 6b)。到沙三上亚段沉积时期,

湖盆演化至深陷中后期,即将进入热沉降期,从地层厚度同生断层叠合图可以看出,该时期地层厚度急剧减薄,基本呈现中间厚四周薄、SW-NE 轴向分布的特点,地层最厚处约 90 m,最薄处仅十余米(图 6a)。

3.2 断层活动的生长指数分析

对研究区次级断层进行生长指数分析,内部次级断层在空间上存在北、中、南 3 个活动区带,随发育时间呈现由南向北活动性逐渐增强的趋势。F4~F7 断层位于研究区西部,近东西走向,断层最长约 6 km,最短约 3 km,多向北倾,最大倾角 45°。其中 F4 断层在沙三中亚段生长指数超过 1.5,断层中段活动强度大,两侧活动强度小,展现出了强烈的伸展性质。而其他时期生长指数均为 1 左右,表现为极弱伸展或走滑作用,断层活动性在空间上未有明显区分(图 7a₁ 和图 7a₂)。F5 断层自沙三段开始生长指数超过 1.0,沙三中和沙三上亚段最大生长指数均超过 1.5,沙三中亚段更是接近 1.7,表现为强烈伸展,沙三上亚段东侧活动性最强,沙三中亚段则表现为西侧较东侧活动性强,沙三下亚段表现为较弱伸展或走滑。沙四段生长指数均小于 1.0,表现为弱走滑或者走滑作用,断层活动性在空间上未有明显区分(图 7b₁ 和图 7b₂)。F6 断层则在沙三上亚段生长指数最大,超过 1.7,表现为强烈伸展,且该时期断层活动性越接近东侧越强,其余时期断层生长指数在 1.0 左右,活动性较弱,表现为极弱伸展或走滑,断层活动性在空间上未有明显区分(图 7c₁ 和图 7c₂)。

对于下降盘二台阶北段地层,在沙四上亚段时

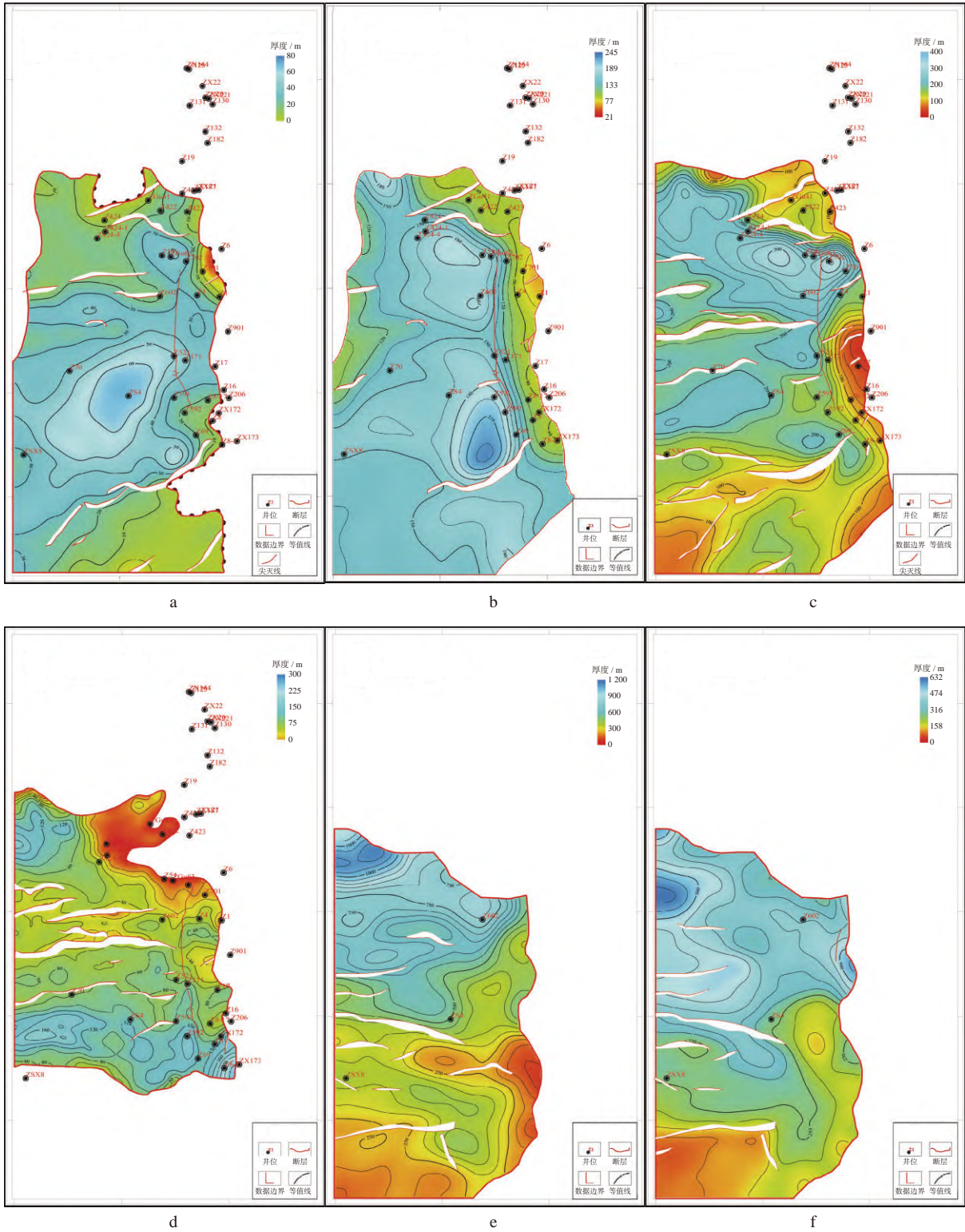


图 6 长堤地区沙河街组地层厚度同生断层分布叠合显示

a 沙三上亚段; b 沙三中亚段; c 沙三下亚段高位域; d 沙三下亚段湖侵+低位域; e 沙四上亚段; f 沙四下亚段

Fig. 6 Superposition of stratigraphic thickness and concurrent fault distribution of Shahejie Formation in Changdi area

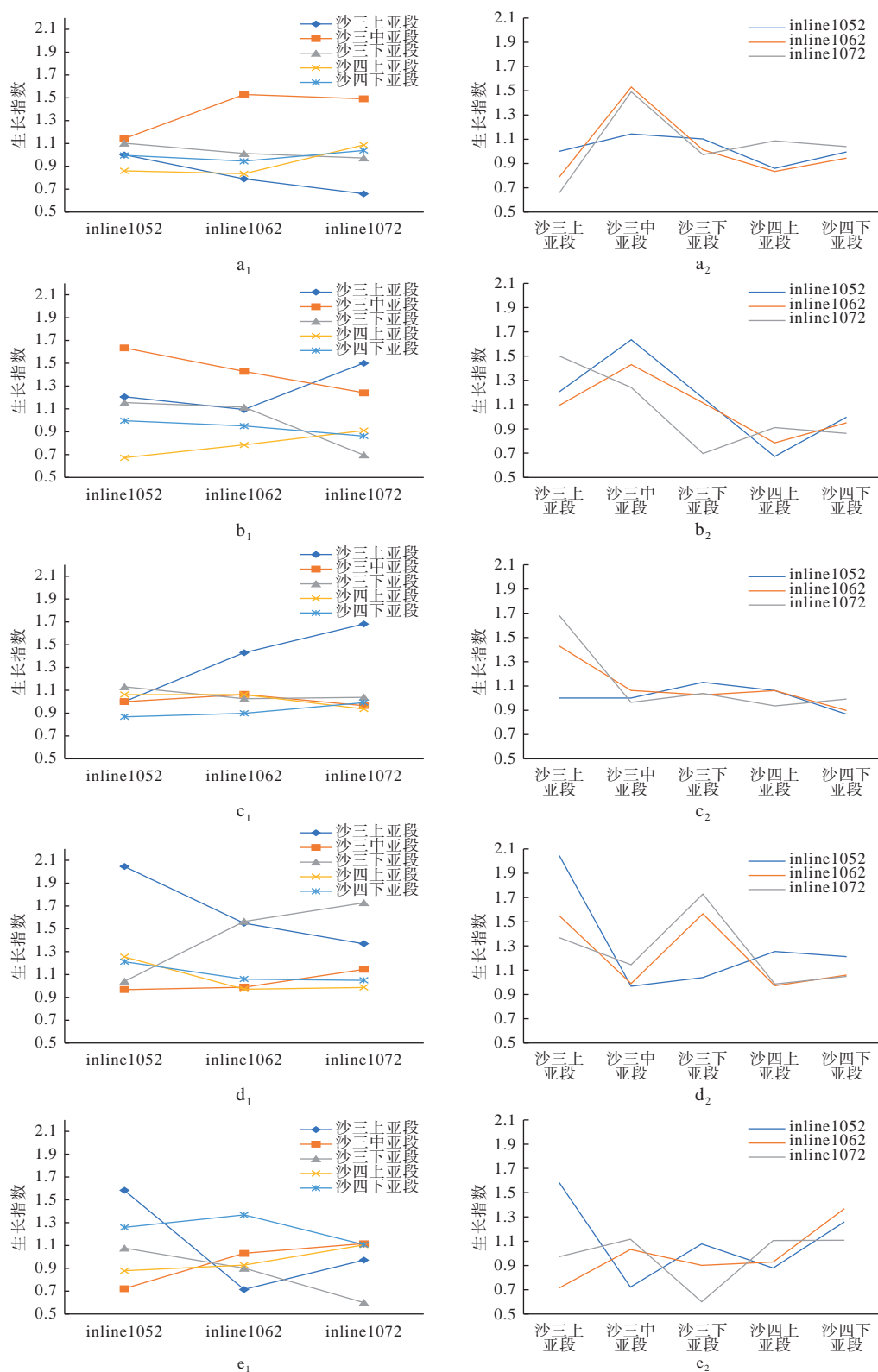


图 7 长堤地区次级断层生长指数曲线 (测线号及断层编号见图 2)

a₁, a₂ 表示 F4 断层; b₁, b₂ 表示 F5 断层; c₁, c₂ 表示 F6 断层; d₁, d₂ 表示 F7 断层; e₁, e₂ 表示 F8 断层

Fig. 7 Growth index of secondary faults in Changdi area (See Fig. 2 for line No. and fault No.)

期, F7 断层落差超过 300 m, 倾向北, 倾角 43°, 在沙三下亚段和沙三上亚段生长指数均超过 1.5, 沙三上亚段达到 2.1, 表现为强伸展作用, 该断层空间活动性在沙三下亚段表现为东强西弱, 而沙三上亚段则表现为西强东弱, 在其他时期表现为极弱伸展或弱走滑, 断层活动性在空间上亦未见明显差异(图 7d₁ 和图 7d₂)。F8 断层在沙四下亚段和沙三上亚段最大生长指数接近 1.5, 表现为弱伸展作用。F7, F8 断层在沙四段生长指数接近 1.0, 说明 F7, F8 乃至东侧的 F9 断层在垂向上活动量十分有限, 表现为弱伸展或者不活动(图 7e₁ 和图 7e₂)。

4 走滑断裂带分段性及油气意义探讨

4.1 长堤断裂带与郯庐断裂的关系

郯庐断裂紧邻济阳坳陷发育于其东侧, 长度可达 2 400 km, 贯穿中国东部大陆不同构造单元, 在平面上表现为 NNE 走向的线性带状分布, 可分为北、中、南 3 段, 剖面上表现为经典的走滑构造特征。郯庐断裂进入新生代以后发育右旋走滑活动, 并认为其主要动力机制为太平洋板块俯冲速率、方向的改变以及远端印度洋板块对亚欧板块碰撞复合而成。走滑作用初

期构造形迹包括: R 表示同向剪断裂、R'表示反向剪断裂、P 表示同向剪断裂、Y 表示平行剪断裂、T 表示张断裂、C 表示压性构造, 平面上常见雁列构造等。其中 P 型走滑构造带表现为雁列断层组或者单一 P 剪切断层或者压扭性 TP 断裂组成, 与主位移带夹角为 15°左右(图 8), 主断层两端发育分支断层, 侧边发育伴生断层; 剖面上主断层表现为高角度分支断层, 和旁侧断层表现为地堑、地垒或断阶式组合。长堤地区为济阳坳陷走滑构造区中的亲郯庐走滑构造带^[25-27], 长堤断裂与郯庐走滑断裂主位移方向夹角约 12°, 发育了若干与主断层共线或相交的次级断层, 形成复杂构造, 即为与主干断裂同向剪切断裂的 P 型走滑构造带。

4.2 长堤走滑断裂带分段差异特征

通常一个完整的走滑断层可划分为主位移区、叠接区和尾端 3 段^[25]。一般主位移区相对位移量较大, 断面平直, 有时可断穿至基底。叠接区为断层生长连接形成, 走滑断裂的阶步与旋向控制其应力性质, 进而表现出叠接区的隆升与拆沉。断裂尾端为主断裂传播扩展的应力发散区, 常表现为弧状构造。

长堤走滑断裂带主要活动于沙三段时期, 为右行走滑断裂带, 北起埕岛凸起, 南接孤岛凸起, 北部与

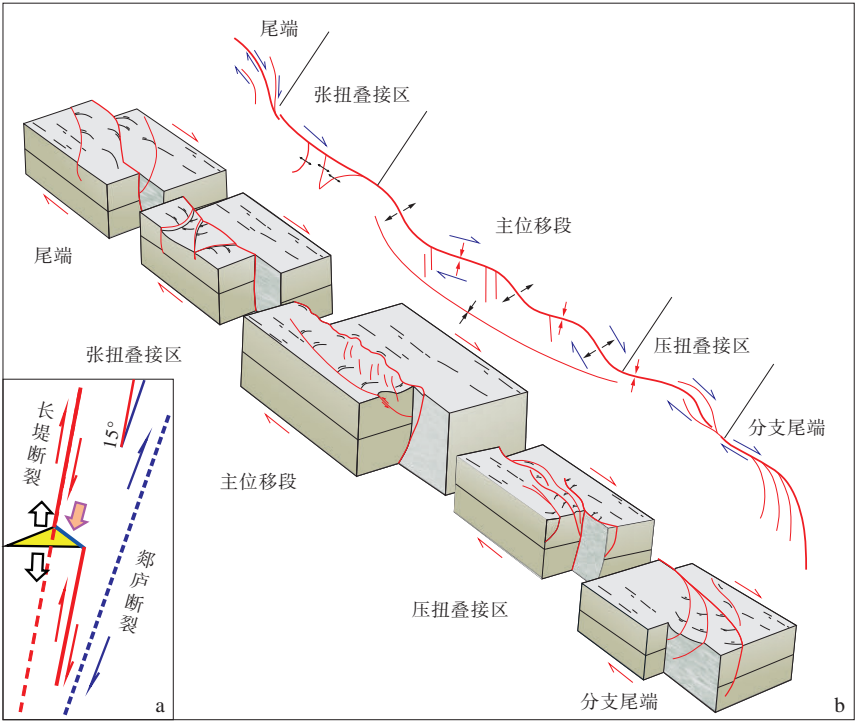


图 8 长堤地区断裂关系 (a) 及走滑断层分段模式 (b)(据参考文献 [26] 修改)

Fig. 8 Fault relationship (a) and segmented model of strike-slip fault (b) in Changdi area (modified from reference [26])

EW 走向的桩南断裂相交, 内部与南段发育一系列不同成因的次级断层, 研究区位于长堤走滑断裂带左阶, 右阶为长堤潜山, 综合考虑上述因素, 建立了长堤走滑断裂带分段模式 (图 8)。

长堤走滑断裂带整体表现如图 9 所示。尾端特征在南北端有差异, 在南端为应力发散区, 表现为明显的弧状构造, 内弯段为断层下降盘, 在南部可见微二台阶构造 (图 9c); 然而在北端, 桩南断裂将长堤走滑断裂左阶拉张应力释放并明显可见断层落差增大, 因而走滑断裂在此处并未发育出拉张性质的马尾或羽状构造 (图 9g)。主位移段表现为 NE-SW 和 NW-SE 走向的复合 S 型, 分别对应压扭和拉张分量, 断裂附近应力较集中, 且受先存伸展构造影响, 断面上陡下缓, 底部与伸展构造相接, 西侧发育与之伴生的平行逆断层和雁列式伸展断层 (图 9e)。南部压扭叠接区发育花状构造, 右阶为潜山构造, 因此次生断层发育较浅并且根部向主断裂贴合, 此处尾端和主位移段未完全连接 (图 9d); 叠接区为主位移区和尾端的交接区, 北部张扭性叠接区靠近桩南断裂位置, 走滑断层左阶发育一组脆性共轭断层与桩南断裂配合形成逆向断阶构造, 最小共轭角平行于 EW 方向 (图 9f)。

4.3 走滑断裂带分段活动和油气富集意义

渤海湾盆地长堤走滑断裂控制了长堤陡坡带沙

河街组地层和砂砾岩体的发育, 进而控制油气在砂砾岩体中的运移和聚集。长堤陡坡带主要发育扇三角洲、近岸水下扇以及湖底扇等砂砾岩扇体, 其中, 扇三角洲主要发育于长堤走滑断裂主位移段和压扭叠接区, 近岸水下扇主要发育于张扭叠接区, 湖底扇则发育于张扭叠接区西部桩南断裂下降盘。砂砾岩体在构造活动控制下形成构造-岩性油气藏、断块油藏、岩性油藏以及地层不整合油藏。长堤地区受西部孤北洼陷和东部桩东凹陷双侧供源, 主要烃源岩层系为沙四段、沙三段以及沙一段, 油源条件好^[6], 该区断裂深切油源, 油气直接充注, 成藏动力足, 各层系均成藏, 潜力巨大, 共 95 口井钻遇砂砾岩体, 见油气显示率 90.5%, 测井解释油层 217 层; 同时, 探明面积外多口井见良好油气显示、工业油流, 投产井平均单井产油 6 060 t。

长堤地区油气分布存在明显的时空差异, 其中, 浅层油气主要集中于长堤走滑断裂带主位移段和叠接区, 尾端油气分布相对较少 (图 9)。经过对长堤走滑断裂带断层构造和含油气特征分析, 认为长堤走滑断裂是沟通底部烃源岩和沙河街组砂砾岩扇体储层的主要运移通道 (图 10 和图 11), 根据分段性差异总结出长堤走滑断裂带对含油气时空性差异的控制规律。主位移段呈复合 S 型构造 (图 8), 断距大, 断面上

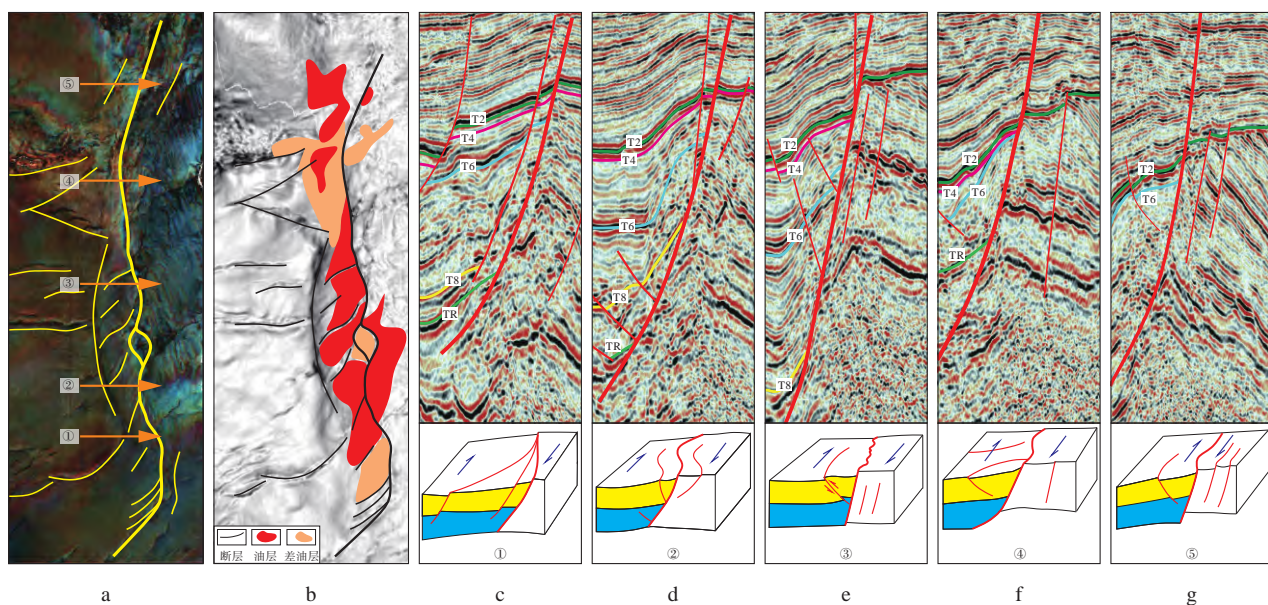


图 9 长堤地区走滑断层各段构造样式

a 沙三段顶面 (T4) 地震 RMS 振幅属性 RGB 融合图; b 沙三段顶面 (T4) 地震倾角相干属性图与油藏分布示意图; c 分支尾端构造示意; d 压扭叠接区构造示意; e 主位移段构造示意; f 张扭叠接区构造示意; g 尾端构造示意

Fig. 9 Structural patterns of each segment of strike-slip fault in Changdi area

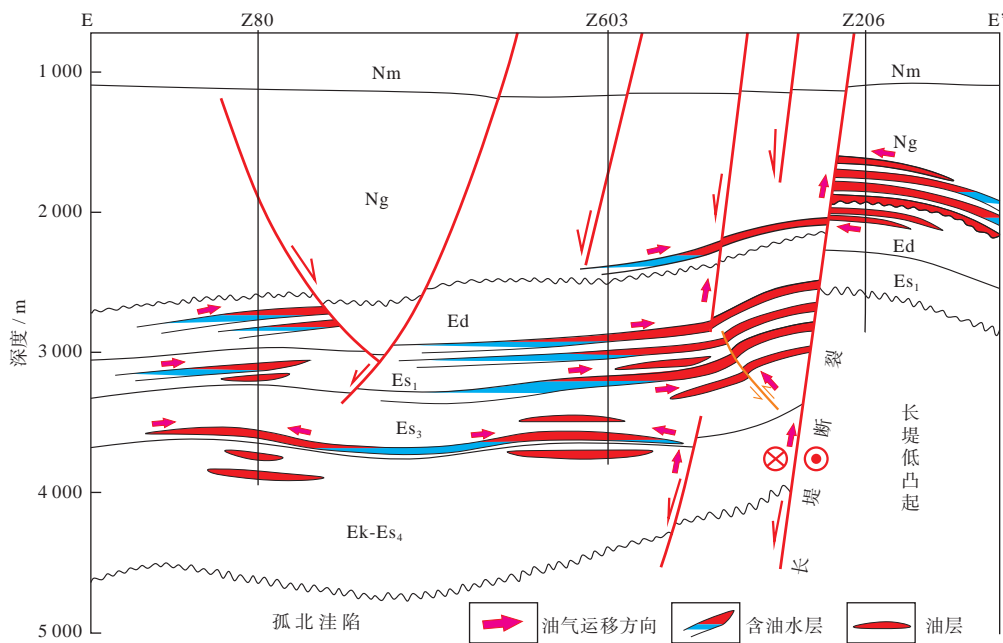


图 10 长堤地区东西向油藏剖面示意(剖面位置见图 1b)(据参考文献 [26] 修改)

Fig. 10 EW-trending reservoir section in Changdi area (See Fig. 1b for section location) (modified according to reference [26])

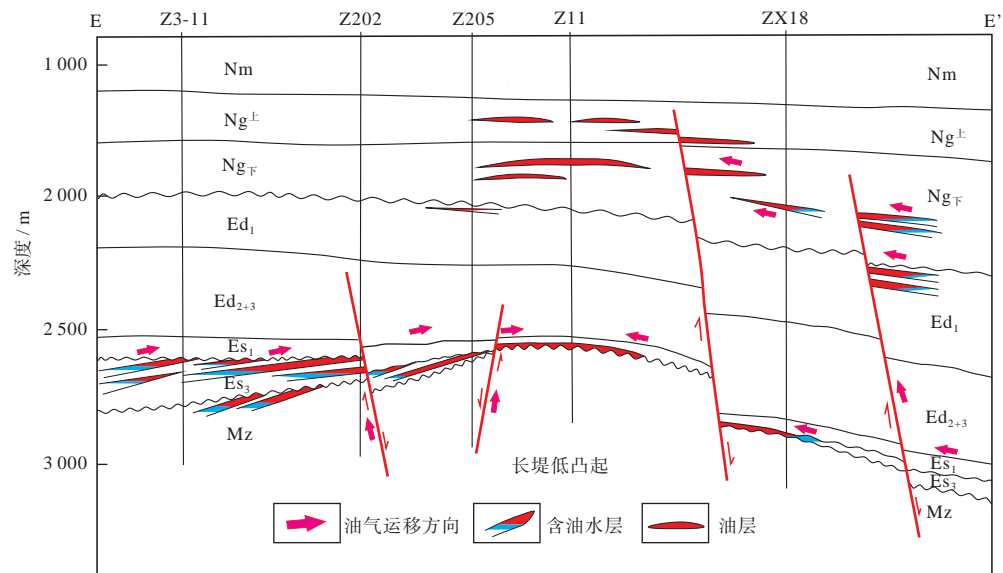


图 11 长堤地区南北向油气成藏剖面(剖面位置见图 1b)

Fig. 11 SN-trending reservoir section in Changdi area (See Fig. 1b for section location)

陡下缓,是砂砾岩体的主要沉积段,在 NE-SW 和 NW-SE 两个方向分别具有压扭和拉张分量,其中压扭分量段断面紧闭,将油气封堵在地层砂砾岩体中(图 11);张扭分量段断面张开,可作为通道沟通油源(图 9c)。压扭叠接区底部断面西倾,直接沟通油源,而上部表现为压扭性质,对油气具有封堵聚集作用(图 9b)。张扭叠合区发育近岸水下扇砂体,然而此段断层封堵性较差,以发育岩性油气藏为主(图 9d),该

段西部的湖底扇也以岩性油气藏为主(图 8)。位于南北段的尾端,分别发育马尾构造和拉张构造,封堵性差,不利于油气聚集(图 9a 和图 9e)。

5 结论

利用高精度三维地震资料、钻录井及分析化验资料的一体化研究,采用地震 RMS 振幅属性和 RGB 融

合技术刻画长堤走滑断裂带几何学特征,断层生长指数法和断层落差法研究运动学特征,并结合油气生产情况探讨走滑断裂带分段性差异的石油地质意义,得出以下结论,以期指导同类型构造带油气藏勘探开发。

1)长堤地区平面上发育7组断层,剖面上组成6种断层组合样式,各组断层发育时间不同。根据断层性质和形态,将长堤陡坡带断层平面上划分为主断层张扭断裂和压扭断裂组、差异伸展走滑断裂组、雁列伸展断裂组、伴生逆断层组、尾端分支帚状断裂组以及远端派生断裂组共7组。7组断层在剖面上分别组成顺向断阶式、逆向断阶式、Y字型与反Y字型、地垒式、地堑式以及俯冲逆断层式共6种构造样式。

2)长堤地区沙河街组发育伸展-叠合构造。沙四段主要发育伸展构造,主断裂长堤断层具有差异伸展的活动特性,内部次级断层主要为近EW方向展布的差异伸展走滑断层。沙三段及以后主要发育走滑构造,并伴生雁列断层、俯冲逆断层、尾端分支断层以及远端派生断层。

3)长堤走滑断裂带可划分为分支尾端、压扭叠接区、主位移段、张扭叠接区、尾端五段。南部分支尾端主要发育拉张为主的马尾式顺向断阶,形成微二台阶构造,北部地层压力被释放,构造落差小,未发育扇体,南北部的尾端断层封堵性差,不利于油气成藏;叠接区为主位移段和尾端的连接部位,南部压扭叠接区发育花状构造,构造落差大,以发育扇三角洲沉积物为主,断层底部斜接深处烃源岩,上部封堵性强,有利于油气聚集,北部张扭叠接区发育脆性共轭断层,不利于油气成藏;主位移段S型复合构造,压扭段封堵油气,储层与构造耦合,有利于成藏,张扭段沟通油源,有利于运移。

参考文献 (References)

- [1] 徐长贵.渤海海域大型伸展-走滑复合断裂特征与控藏作用[J].中国海上油气, 2022, 34(6): 1-13.
XU C G.Characteristics and reservoir controlling of large-scale extension-strike slip composite faults in Bohai sea area[J].China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(6): 1-13.
- [2] 刘惠民,高阳,秦峰,等.渤海湾盆地济阳坳陷油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J].石油学报, 2023, 44(12): 2141-2159.
LIU H M, GAO Y, QIN F, et al.New fields, new types and resource potentials of hydrocarbon exploration in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J].Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2141-2159.
- [3] 吴智平,张劭,张晓庆,等.渤海湾盆地“埕北-垦东”构造转换带形成演化及成藏特征[J].石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1321-1333.
WU Z P, ZHANG M, ZHANG X Q, et al.Evolution and reservoir characteristics of the “Chengbei-Kendong” structural transfer zone in the Bohai Bay Basin[J].Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1321-1333.
- [4] 董火祥,刘景彦,陈兆芹.基于小波分析的定量层序划分及湖平面变化[J].西南石油大学学报(自然科学版), 2023, 45(5): 57-68.
DONG H X, LIU J Y, CHEN Z Q.Quantitative sequence division and lacustrine level change based on wavelet analysis[J].Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2023, 45(5): 57-68.
- [5] 张伟涛,薛雁,代莉,等.长堤潜山构造模型及演化特征研究[J].中国石油大学胜利学院学报, 2019, 33(2): 1-4.
ZHANG W T, XUE Y, DAI L, et al.Study on structural model and evolution characteristics of Changdi buried hill[J].Journal of Shengli College China University of Petroleum, 2019, 33(2): 1-4.
- [6] 程燕君,吴智平,张杰.济阳坳陷长堤地区走滑构造特征及对油气聚集的控制作用[J].油气地质与采收率, 2020, 27(2): 35-42.
CHENG Y J, WU Z P, ZHANG J.Characteristics of strike-slip faults and its control on hydrocarbon accumulation in Changdi area of Jiyang Depression[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(2): 35-42.
- [7] 陈广军,王永诗,马承杰.胜利油区长堤潜山区构造关系探讨[J].新疆石油学院学报, 2001, 13(3): 15-18.
CHEN G J, WANG Y S, MA C J.Probe into tectonic relationship of Chang Di potential mountain in Shengli oilfield[J].Journal of Xinjiang Petroleum Institute, 2001, 13(3): 15-18.
- [8] 杨林龙,刘惠民,贾光华,等.济阳坳陷沾化凹陷邵家走滑-伸展断层带构造特征及其石油地质意义[J].地质论评, 2023, 69(增刊 1): 305-306.
YANG L L, LIU H M, JIA G H, et al.The structure characteristics of Shaojia fault in Zhanhua Depression of Jiyang Depression and its petroleum geological significance[J].Geological Review, 2023, 69(S1): 305-306.
- [9] 田波.长堤地区下第三系高分辨率层序地层学研究及隐蔽油藏预测[D].成都:成都理工大学, 2004.
TIAN B. High resolution sequence stratigraphy analysis and subtle reservoir prediction of Lower Tertiary in Changdi area, Shengli oilfield [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2004.
- [10] 吕优良,宋海涛,何幼斌,等.长堤地区油气成藏特征及主控因素分析[J].江汉石油学院学报, 2004, 26(2): 50-52.
LV Y L, SONG H T, HE Y B, et al.Analysis of hydrocarbon reservoir formation characteristics and its key control factors[J].Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2004, 26(2): 50-52.
- [11] 王友净,林承焰,董春梅,等.长堤断裂带北部地区剩余油控制因素与挖潜对策[J].中国石油大学学报(自然科学版), 2006, 30(4): 12-16.
WANG Y J, LIN C Y, DONG C M, et al.Control factors of remaining oil distribution and potential exploitation measures in the northern part of Changdi fault belt[J].Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(4): 12-16.
- [12] 曹高社,邢娜娜,周廷全,等.桩西潜山断裂构造的分形特征及其意义[J].河南理工大学学报(自然科学版), 2011, 30(3): 288-293.
CAO G S, XING N N, ZHOU T Q, et al.The study on fractal features and its implication meaning of ZhuangXi buried hill's fracture structure[J].Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2011, 30(3): 288-293.

- [13] 李雪梅, 王伟, 王娉娉, 等. 济阳拗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(自然科学版), 2014, 36(5): 40-48.
LI X M, WANG W, WANG P P, et al. Cenozoic tectonic characteristics and evolution in Changdi area of Jiyang Depression[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2014, 36(5): 40-48.
- [14] 徐长贵. 渤海走滑转换带及其对大中型油气田形成的控制作用[J]. 地球科学, 2016, 41(9): 1548-1560.
XU C G. Strike-slip transfer zone and its control on formation of medium and large-sized oilfields in Bohai sea area[J]. Earth Science, 2016, 41(9): 1548-1560.
- [15] 陈发景. 调节带(或传递带)的基本概念和分类[J]. 现代地质, 2003, 17(2): 186, 207.
CHEN F J. The basic concept and classification of adjustment belts (or transfer belts)[J]. Geoscience, 2003, 17(2): 186-207.
- [16] PARK Y, KANG N, YI B, et al. Tectonostratigraphic framework in the eastern Korean continental margin, East Sea: implication for evolution of the Hupo Basin[J]. Basin Research, 2022, 34(2): 797-823.
- [17] 侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 渤海湾盆地中、新生代构造演化研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(6): 845-851.
HOU G T, QIAN X L, CAI D S. The tectonic evolution of Bohai Basin in Mesozoic and Cenozoic time[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2001, 37(6): 845-851.
- [18] 漆家福, 张一伟, 陆克政, 等. 渤海湾盆地新生代构造演化[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1995, 19(增刊 1): 1-6.
QI J F, ZHANG Y W, LU K Z, et al. Cenozoic tectonic evolution in Bohai Bay Basin province[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1995, 19(S1): 1-6.
- [19] 赵重远. 渤海湾盆地的构造格局及其演化[J]. 石油学报, 1984, 5(1): 1-8.
ZHAO Z Y. Structural pattern and evolution of Bohaiwan Basin, China[J]. Acta Petrolei Sinica, 1984, 5(1): 1-8.
- [20] 袁浩伟. 济阳拗陷新生界走滑构造类型及形成机理[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022.
YUAN H W. The types and formation mechanisms of the Cenozoic strike-slip structures in Jiyang Depression[D]. Beijing: China University of Petroleum, Beijing, 2022.
- [21] 邱隆伟, 杜双虎, 代莉, 等. 孤北洼陷沙三段沉积特征及其控制因素[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(2): 161-167.
QIU L W, DU S H, DAI L, et al. Sedimentary characteristics and their controlling factors of the third member of Shahejie Formation in Gubei Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(2): 161-167.
- [22] 邱隆伟, 贾继成, 马立驰, 等. 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[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(1): 175-182.
QIU L W, JIA J C, MA L C, et al. Sedimentary characteristics and spatial distribution of coarse clastic rocks of fan delta in Changdi fault zone in Gubei Sub-Sag, Jiyang Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(1): 175-182.
- [23] 卢姝男, 吴智平, 程燕君, 等. 济阳拗陷滩海地区构造演化差异性分区[J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(4): 61-66.
LU S N, WU Z P, CHENG Y J, et al. Division of differential tectonic evolution in Shengli shallow sea area of Jiyang Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(4): 61-66.
- [24] 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]. 油气地质与采收率, 2002, 9(4): 24-27.
ZHANG J L, LIN C S, ZHENG H R. 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.
- [25] 左亮, 能源, 黄少英, 等. 哈拉哈塘地区超深层走滑断裂构造变形特征及其石油地质意义[J]. 现代地质, 2023, 37(2): 270-282.
ZUO L, NENG Y, HUANG S Y, et al. Deformation characteristics of ultra-deep glide faults in the Halahatang area and their petroleum geological significance[J]. Geoscience, 2023, 37(2): 270-282.
- [26] 能源, 杨海军, 邓兴梁. 塔中古隆起碳酸盐岩断裂破碎带构造样式及其石油地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(1): 40-50.
NENG Y, YANG H J, DENG X L. Structural patterns of fault broken zones in carbonate rocks and their influences on petroleum accumulation in Tazhong Paleo-uplift, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(1): 40-50.
- [27] YUAN H W, CHEN S P, DAI K, et al. Cenozoic tectonic evolution of the Bohai Bay Basin: constraints from strike-slip activities of the Wangjiagang fault zone, NE China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2022, 233: 105262.

(编辑: 朱文杰)