

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2020.03.009

## 断陷盆地边界断裂结构特征及物性差异定量评价 ——以车镇凹陷埕南断裂为例

杜彦男<sup>1,2</sup>, 吴孔友<sup>1\*</sup>, 刘寅<sup>1</sup>, 林红梅<sup>3</sup>, 党思思<sup>4</sup>, 李彦颖<sup>1</sup>, 徐进军<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛, 266580;

2. 中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院, 东营, 257000;

3. 中石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 东营, 257015;

4. 中国石油新疆油田分公司陆梁油田作业区, 克拉玛依, 834000)

**摘要:** 利用地震、测井、岩心以及物性测试数据等资料, 从断裂规模和断层生长连接分段性特征入手, 分析了埕南断裂构造发育特征及分段性, 精细划分了埕南断裂不同段的断裂带结构及差异性, 对比了不同断裂带结构单元物性差异性。研究认为: (1) 埕南断裂在车西洼陷内具有明显的分段性构造发育特征, 可划分为北西向、北西西向、北东向和北东东向四个走向段, 其中北西向和北西西向段断裂呈板式, 所控洼陷内断裂发育稀疏, 北东向和北东东向段断裂呈铲式或坡坪式, 所控洼陷内断裂发育密集, 构造样式丰富; (2) 埕南断裂内部结构发育较为完整, 断裂带结构在深浅测向、井径、密度、声波时差和补偿中子测井曲线上具有良好的可识别性; (3) 断裂的生长连接过程与断裂带各结构单元厚度变化具有一定的相关性, 在落差较大的走向分段上, 断裂带各结构单元发育厚度更大, 而在各走向段连接点处, 断裂带各结构单元厚度较小; (4) 各结构单元物性差异明显, 诱导裂缝带孔渗性高于围岩, 诱导裂缝带孔渗性高于滑动破碎带 1~2 个数量级。综合研究表明, 断裂带结构的发育对流体输导起到重要的控制作用。

**关键词:** 断裂分段, 断裂带结构, 断裂带物性特征, 车西洼陷

中图分类号: P548, TE121

文献标识码: A

## The development of fault zone architecture of deep buried boundary faults in the rift basin: A case from the Chengnan Fault of the Chezhen depression

Du Yannan<sup>1,2</sup>, Wu Kongyou<sup>1\*</sup>, Liu Yin<sup>1</sup>, Lin Hongmei<sup>3</sup>, Dang Sisi<sup>4</sup>, Li Yanying<sup>1</sup>, Xu Jinjun<sup>1</sup>

(1. School of Geoscience, China University of Petroleum, Qingdao, 266580, China;

2. Drilling Technology Research Institute of Shengli Petroleum Engineering Corporation Limited, SINOPEC (SLDTI)

Dongying, 257000, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Shengli Oilfield

Company Ltd., SINOPEC, Dongying, 257015, China; 4. Luliang Oil Field Operation Area,

Xinjiang Oilfield Branch, Petro China, Karamay, 834000, China)

**Abstract:** Based on the data of seismic, well logging, drill core and physical property, we analyzed the structural characteristics, internal architecture and physical properties of different structural components of each segments of the Chengnan Fault. The results show that: (1) the Chengnan Fault can be divided into four segments based on the strike of the fault, including the NW, NWW, NE and NEE segments. Among these segments, the fault planes of the NW and NWW

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX05001003), 中国科学院先导科技 A 类专项(XDA14010301), 山东省自然科学基金(ZR2017BD036)

收稿日期: 2020-03-03

\* 通讯联系人, E-mail: wukongyou@163.com

segments shows planner shape with less faults developed inner corresponding areas, however, the fault planes of the NE and NE segments show as listric shape in the profile with the faults highly developed in the corresponding area of the Chexi Depression; (2) the internal architecture of the Chengnan Fault is highly developed, different types of well logs are used to identify the different internal components of the Chengnan Fault, including the deep and shallow laterologs, well diameter, density, acoustic log and compensated neutron logging curves; (3) the thickness of each structural components of the fault zone is controlled by the fault growth and linkage processes, and in the segment with large drop, the thickness of each structural unit of the fault zone is larger, while in the joint point of each strike segment, the thickness of each structural unit of the fault zone is smaller; (4) the physical properties of each components of the fault zone are quite different, the porosity and permeability of the damage zone is higher than that of protolith rocks, and it also has 1~2 orders of magnitude higher than that of the fault core. Our studies reflect that the internal architecture of the fault zone can affect the migration of the fluids.

**Key words:** fault segmentation, fault zone architecture, physical characteristics, the Chexi depression

断裂是断陷型含油气盆地最为重要的构造元素,据统计 70% 以上的油气藏形成受控于断裂的作用<sup>[1]</sup>,断裂的启闭性对油气成藏具有关键的控制作用<sup>[2-5]</sup>.近年来的研究表明,随着断裂的生长发育,规模的不断扩大,断裂带结构逐渐复杂化,由早期的两盘地层错断,逐渐发育为具有断裂核以及两侧破碎带的三维地质体<sup>[6-8]</sup>.这一认识的提出极大地促进了断裂控藏作用的研究,并取得了丰硕的研究成果<sup>[9-10]</sup>.在以往的研究中,人们从断裂性质、断裂演化史、泥质涂抹、泥岩刮削比、岩性对置及断面应力等角度出发对断裂带的输导作用进行了评价<sup>[11-16]</sup>,然而这些参数的评价结果是建立在把断裂作为简单的“面”的基础之上,忽略了断裂带结构“三维体”的特征及其所造成的不同结构单元物性及非均质性的差异.事实上,断裂带具有复杂的内部结构,各结构单元由于受地层破裂研磨程度不同,物性存在较大差异,对流体的输导能力也不同<sup>[17-18]</sup>.刘伟等<sup>[19]</sup>通过岩心观察和测井识别等方法对大量断裂带数据进行统计分析,认为在断层核中发育断层泥、擦痕、阶步、纤维状晶体等结构元素,并且在区域应力场的挤压作用下,岩石被进一步研磨成更细的颗粒,且具有定向排列的特征,在强大的挤压作用下裂缝反而不发育,因此相对于正常地层储层物性较差.李颜辰等<sup>[9]</sup>通过研究发现断层核两侧破碎带中诱导裂缝密集程度具有不对称性,具体表现为上盘破碎带中发育的裂缝要比下盘更为密集,并且规模、数量也明显偏大.雷光伟等<sup>[20]</sup>则从破裂带岩性及岩石力学机制角度出发,认为断层发育长度存在一

个区块阈值,当断层延伸范围达到阈值,断层影响范围将不再增加.王孝彦等<sup>[16]</sup>通过研究走滑断层的形成发育过程产生系统的认识,认为走滑断裂中随着断裂发育成长首先形成破碎带,此时裂缝、节理等构造普遍发育,随后在应力集中部位断层核逐渐演变成型.目前,断层对流体运移能力的研究已从早期的封闭系数表征向微观结构特征发展.因此,开展断裂带内部结构研究,并对比不同结构单元对流体的输导能力,对于系统的评价断裂启闭性、分析油气成藏过程具有重要的理论和现实意义.本文以车西洼陷埕南断裂为例,利用地震、岩心、测井等多种资料,对该断裂的断裂带内部结构进行研究,并分析盆地边界断裂各结构单元物性差异性及其对流体运移能力的影响.

## 1 地质背景

车西地区位于渤海湾盆地济阳坳陷北部,属于车镇凹陷的西次洼(图 1).洼陷南部为无棣和义和庄凸起,北部为埕子口凸起,西部与庆云凸起相连,东部经大王北洼陷与埕子口东段北西向断裂相连<sup>[21]</sup>.剖面上,车西地区为一典型的箕状凹陷,发育有完整的陡坡带、洼陷带和缓坡带三个构造单元<sup>[22]</sup>(图 1).从南北向剖面上看,断裂集中发育于陡坡带和缓坡带两个构造单元,其中深大断裂主要集中在陡坡带.在构造发育上,车西洼陷内的断裂按发育规模可以分为三级<sup>[23-24]</sup>,其中一级断裂为分割车西洼陷与埕子口凸起的埕南断裂,它的生长发育控制了整个车西地区的构造演化过程(图 1).二级断裂是洼陷内部主干断裂,控

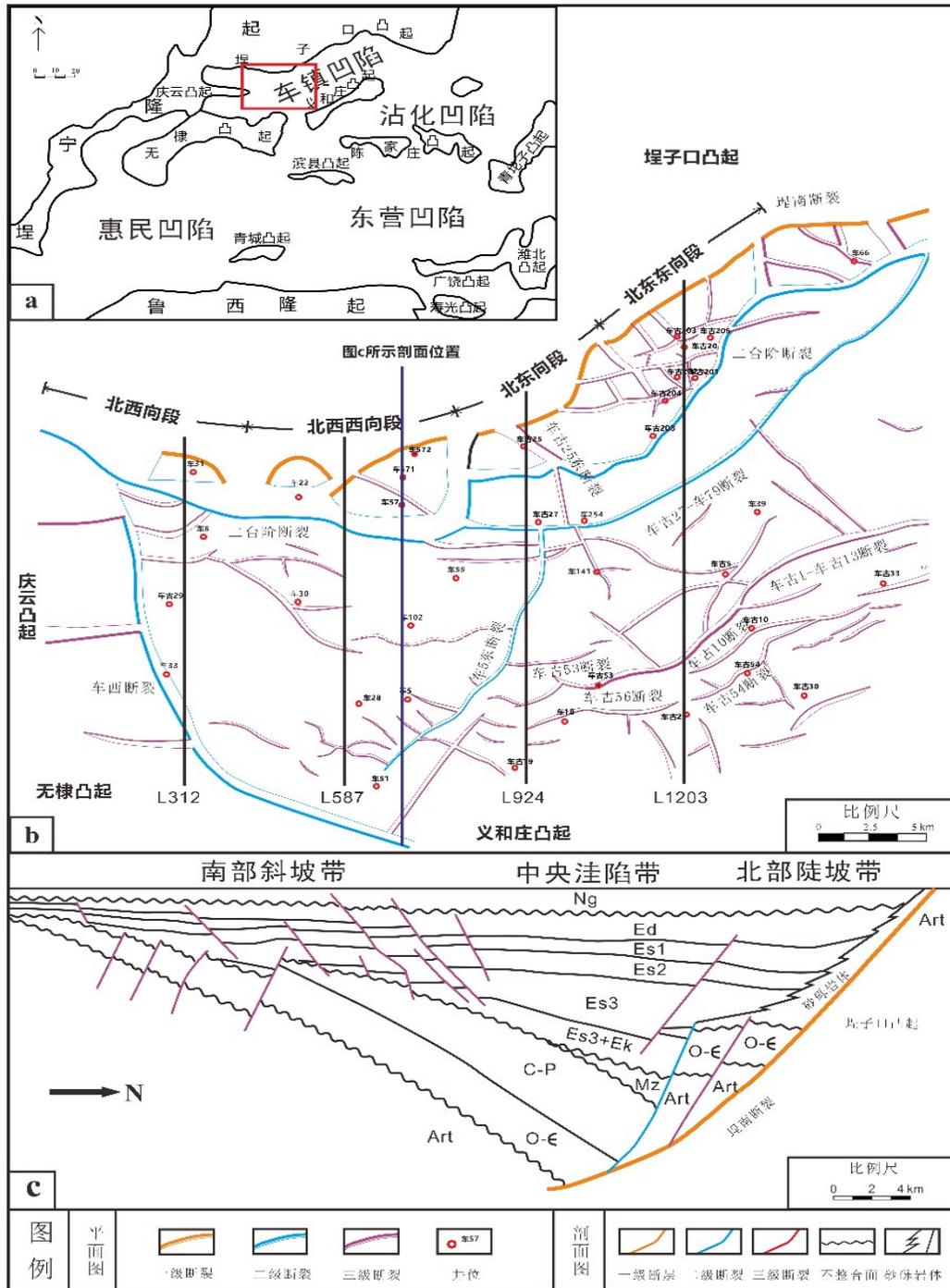


图1 车西洼陷构造位置图(a)、断裂体系图(b)及盆地结构剖面图(c)

Fig. 1 Diagrams show the location of Chexi Depression (a), the main fault system (b) of this depression, the cross section shows the basin structure of the Chexi Depression (c)

制着洼陷内各构造单元的发育,主要分布于下古生界地层中,是整个洼陷的基底构造,如控制着北部潜山带发育的二台阶断裂以及分割洼陷东西构造的车西断裂和车5东断裂等<sup>[25-28]</sup>. 三级断裂为

调节断裂,多为一级、二级断裂的分支断裂,主要分布于各个构造带上,以浅层盖层断裂为主,三级断裂的发育丰富了早期构造样式,使洼陷内的构造圈闭变得复杂多样<sup>[29]</sup>. 在地层发育上,车西洼

陷地层发育相对完整,主要包括太古界、上古生界、下古生界、中生界及新生界等多套地层<sup>[30]</sup>。新近系稳定沉积,覆盖全区,岩性以粉砂岩、泥岩为主,属河流相沉积。古近系沉积厚度最大,且晚期地层相对早期地层展布范围更广,岩性以粉砂岩、细砂岩和泥岩互层为主<sup>[31]</sup>。其中沙河街组沙一到沙三段沉积比较稳定,地层厚度大。沙四和孔店组受构造抬升剥蚀,在车36井区和车古204井区剥蚀面积较大。中生界受构造抬升剥蚀影响最为严重,仅中西部(车404井以西)靠近沉降中心区域有部分残留地层,岩性多为河湖相火成岩和碎屑岩。上古生界在该区发育较为完整,浅部岩性主要为细砾岩、粉砂岩和泥岩,深部则以灰岩为主。在北部陡坡带车57井区以西,上古生界仅在二台阶断裂上盘发育,下盘受构造抬升剥蚀,导致地层缺失。下古生界发育完整,在该区大部分井区均可钻遇,岩性以白云岩、灰岩、泥岩和页岩为主<sup>[32]</sup>。

## 2 埕南断裂构造特征及分段性

断陷盆地控凹大型正断裂通常具有明显的分段性,对于凹陷内构造发育及沉积物展布具有明显的控制作用<sup>[33]</sup>。断裂的分段性往往表现为两个方面:第一,在平面上,受区域及局部应力场作用,断裂的走向会发生一定的变化,从而产生断裂分段现象,不同段的构造特征表现不同<sup>[34]</sup>;第二,在

剖面上,断裂的剖面组合样式、断距、沉积物厚度等均可在不同段表现出不同的发育特征<sup>[35]</sup>。受正断裂发育特征控制,在断距上,正断裂往往表现为断裂中部断距大、向边缘断距减小,并在断裂端点处断距减小为零<sup>[36]</sup>,在断层长度-断距剖面(D-d profile)上为明显的正弦曲线波动状,而断距极具变小甚至为零的点往往代表不同段的分段点<sup>[37]</sup>。但是,对于我国东部伸展盆地而言,受断裂下盘强烈剥蚀的影响,边界断裂的断距往往难以测量,因此,古落差的方法往往被用于分析大型边界断裂的构造活动史。已有研究表明,断裂距离-古落差法也可以反映断裂的分段性,并展现出断裂各段中心古落差大,向边缘逐渐变小,古落差极小点代表分段点的特征<sup>[38]</sup>。

埕南断裂位于车西洼陷北部,上盘为车西洼陷沉积盖层,下盘为埕宁隆起太古代结晶基底。在车西洼陷范围内,该断裂整体走向呈北西西向,长度约为50 km,断面倾向南,倾角约为60°~75°。平面构造展布图显示,埕南断裂平面上具有明显的走向变化,由西侧近北西向转变为东侧北东东向,呈弧形展布。以断裂西侧为测量起点,选取30条剖面对埕南断裂不同层的古落差进行了测量和计算,包括 $E_k, E_{s4}, E_{s3}, E_{s2}, E_d-E_{s1}$ 等,并构建断层距离-古落差剖面(图2)。结果表明,在断层距离-古落差剖面上,不同地层的古落差均表现为明显的

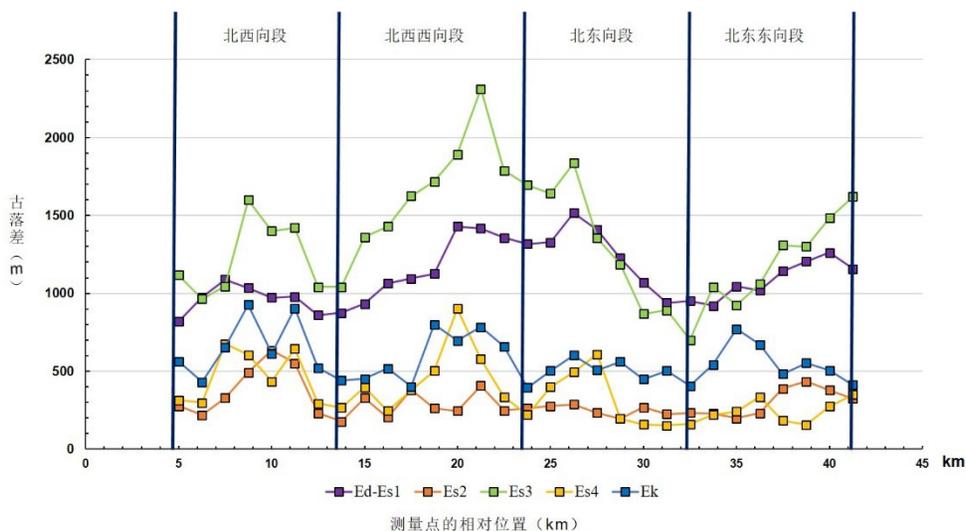


图2 埕南断裂断裂距离-古落差剖面图

Fig. 2 The distance-incremental fault throw profile of the Chengnan Fault

正弦曲线变化特征,根据古落差与断裂距离的关系,埕南断裂可分为四段,包括北西向段、北西西向段、北东向段及北东东向段,而这四段的划分与断裂的走向变化具有明显的一致性(图1c和图2)。在剖面上,不同段表现出不同的构造发育特征,具体表现如下。

**2.1 埕南断裂北西向段** 北西向段断裂呈板式产状,所控洼陷内断裂发育较少,主要集中于沙三和沙二段中,断裂倾向向南,呈阶梯状分布。二台阶断裂断距较小,断裂横向连续性较差(如图3a)。平面上,洼陷内无较大断裂,断裂多以北西向和近东西向为主,呈平行式排列。

**2.2 埕南断裂北西西向段** 埕南断裂北西西向段在剖面上呈铲式产状。二台阶潜山带内断裂发育较稀疏,潜山带展布范围较小,断裂构造样式多以滑动断阶和“Y”字形组合为主。古近系到新近系中,北部陡坡带和中央洼陷带多发育板式断裂;南部缓坡带则以北倾多米诺式断裂组合为主,断裂规模大,数量少(如图3b)。平面上,断裂走向和组合样式与北西段相近。

**2.3 埕南断裂北东向段** 北东向段在剖面上呈坡坪式产状。北部新近系靠近主干断裂部位出现逆牵引构造,并伴有板式分支断裂;南部新生界中多米诺式调节断裂相对于其他走向段更为发育,即断裂数量多,断距大。这一现象的产生与北部洼陷带沉降深度较大有关。深部地层中,二台阶潜山带展布范围增大,其内部构造样式增多,发育有滑动断阶和地堑、地垒等断层组合样式(如图3c)。平面上,主要发育北东向断裂,断裂平面组合样式以平行式和斜交式为主。

**2.4 埕南断裂北东东向段** 北东东向段剖面上产状呈坡坪式,指示该段构造活动强度相比于西部较弱。地层发育平缓,新生界地层中北部陡坡带断裂几乎不发育,南部缓坡发育小规模的多米诺式组合。深部断裂构造样式丰富且主要集中于北部二台阶潜山带中,其展布范围较大,潜山断块十分发育,断裂组合样式以复合“Y”字形和地垒组合为主(如图3d)。平面上,发育北东向和北西向两组断裂,因此断裂组合以网状和斜交式为主。

### 3 断裂带结构识别

断裂构造特征研究表明,埕南断裂不同段构造特征具有一定的差异,这种差异性对于断裂内部结构及流体运移、输导能力会产生重要的影响。已有研究表明,断裂带是由不同的结构单元组成的,通常包括位于中心的断裂核(或称滑动破碎带)及其两侧的破碎带(或称诱导裂缝带)组成<sup>[39]</sup>。滑动破碎带多发育角砾岩、未固结沉积物、断层泥等,而诱导裂缝带保留原岩性质,但发育大量交错复杂的裂缝。综合利用岩心、测井等方法,对埕南断裂断裂带结构进行了研究。

**3.1 断裂结构剖面发育特征** 针对埕南断裂发育特征,本研究选取了钻遇断裂带,并在断裂带有取心的井进行了系统的岩心观察,主要岩性为碳酸盐岩,具体特征表现如下。

**3.1.1 滑动破碎带剖面特征** 滑动破碎带是整个断裂带的中心部位,也是破碎作用最强的区域。受脆性碳酸盐岩围岩影响,断裂两侧岩石的挤压、研磨、破碎使滑动破碎带中积累了大量分选较差、磨圆度较低的砾石,经成岩作用形成断裂角砾岩(图4),如车57井4300~4310 m处发育典型的角砾岩。同时在滑动破碎带还可观察到擦痕、镜面等现象,这种岩心特征指示岩石在地下较短的时间内受到过强烈的破碎作用。滑动破碎带中心可见一定厚度的灰黑色断裂泥,受断裂两盘研磨挤压和上覆巨厚地层正应力影响,破碎带常呈现出片理化特征。

**3.1.2 诱导裂缝带剖面特征** 埕南断裂诱导裂缝带在岩心上表现明显,多期裂缝交错发育(图4)。上盘诱导裂缝带,裂缝缝宽2~4 cm左右,密度约为每厘米五条,下盘诱导裂缝带,裂缝宽度1~2 cm,密度约为每厘米两条,显示上盘诱导裂缝带发育强度大于下盘。诱导裂缝带多被后期脉体充填,镜下观察结果表明,填充物主要为方解石,茜素红染色后胶结物转变为深红色。从胶结率的角度分析,深层断裂带中80%的裂缝均已胶结,剩余胶结裂缝中存在未胶结完全和溶蚀孔缝的现象,且这种现象较多出现在上盘诱导裂缝带之中。

**3.2 断裂结构测井识别** 受断裂各结构单元的物理性质影响,不同的结构单元在裂缝敏感性曲

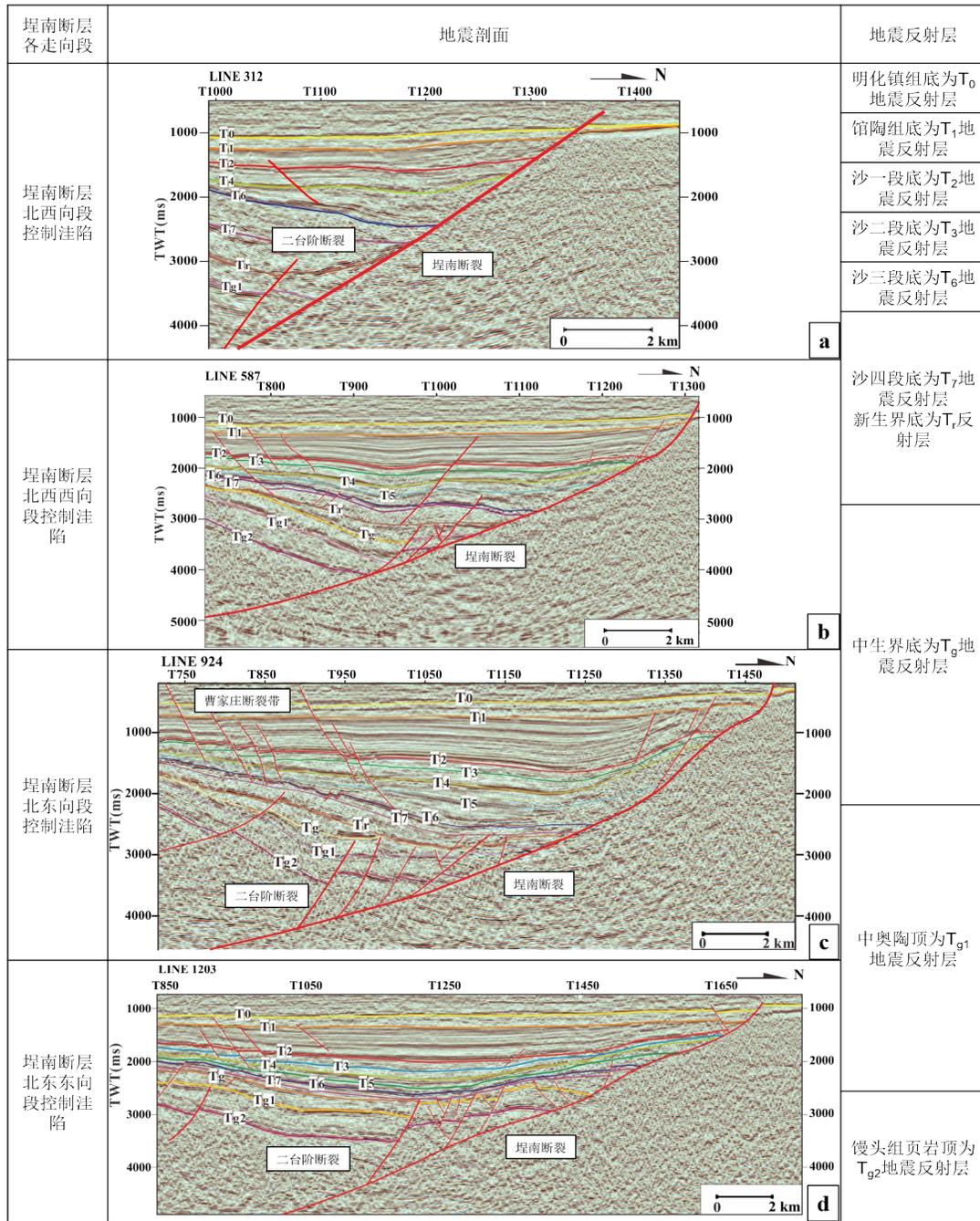


图 3 车西洼陷埕南断裂不同段地震剖面图

Fig. 3 Seismic profiles of different segments of the Chengnan Fault of Chexi Depression

线,如声波时差、密度测井、补偿中子测井、井径测井和深浅测向测井中,往往表现为不同的响应特征,因此可以根据测井曲线的响应特征来划分断裂带各结构单元<sup>[40]</sup>。本次研究选取研究区 7 口井进行了断裂带内部结构测井分析,以 Cheg202 井为例(图 5),测井曲线的识别及计算表明裂缝敏

感性测井曲线对断裂结构的响应具有明显的差异性,如深浅测向测井中( $R_{TC}$ ),深测向和浅测向的差值在诱导裂缝带中出现高值的频率要大于滑动破碎带。井径测井中( $CAL_d$ )诱导裂缝带出现明显的波动,滑动破碎带曲线相对稳定,原因在于裂缝发育带易垮塌,造成扩径。密度曲线(DEN)在

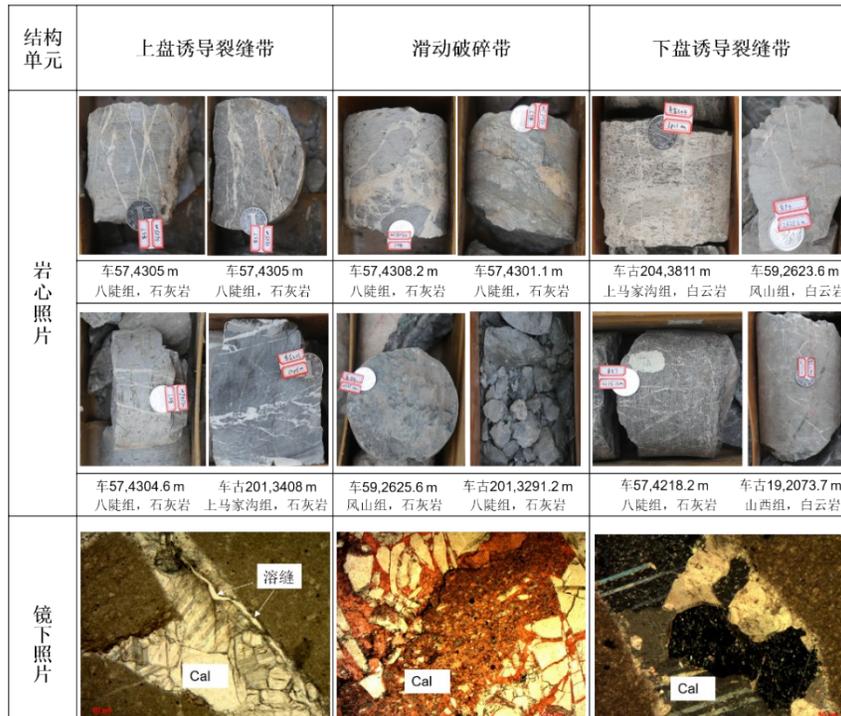


图4 埕南断裂各结构单元岩心特征

Fig. 4 Diagrams showing the characteristics of drill core of different components of Chengnan Fault

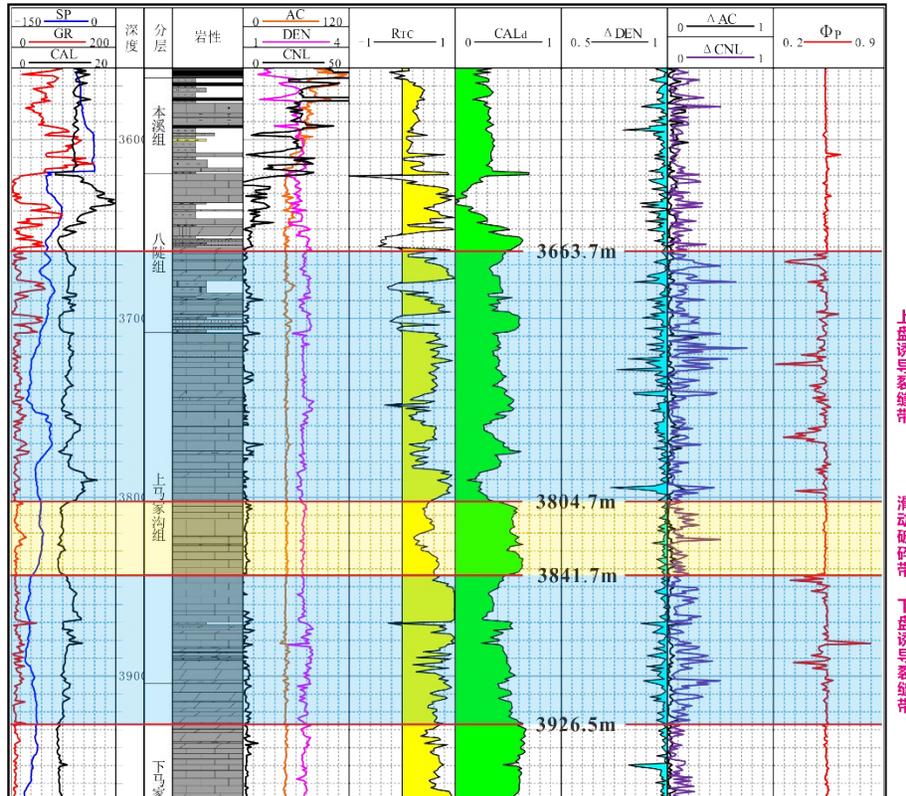


图5 Cheg202井断裂带结构测井识别图

Fig. 5 The identification chart of fault zone architecture of Cheng 202 well

诱导裂缝带表现为明显的低值且波动起伏剧烈,在滑动破碎带中则呈高值反应,曲线趋于平稳.声波时差测井(AC)和补偿中子测井(CNL)具有相似的波动响应,都在诱导裂缝带中表现高值,指示次生孔隙较为发育.滑动破碎带中则趋于稳定,波动起伏不剧烈.此外,利用声波时差、密度、补偿中子三孔隙度测井构建了次生裂缝、孔隙识别参数( $\Phi P$ )<sup>[6]</sup>,计算结果同样表明,诱导裂缝带的裂缝密度大于滑动破碎带并且呈明显的波动状,滑动破碎带平缓稳定.依据上述测井响应特征,综合划定断裂带结构单元分布范围,从而获得各结构单元发育厚度(图5).

**3.3 埕南断裂不同走向段断裂结构发育的差异性** 根据埕南断裂分段性及断裂结构测井识别结果,对不同段、不同井的断裂带结构单元发育情况进行了统计,结果表明,断裂带结构的发育与断裂特征具有明显的相关性.如图6所示,在埕南断裂不同段,自西向东断裂各结构单元厚度呈波动状变化,特征差异明显.

**3.3.1 北西向段** 断裂带各结构单元厚度较大,滑动破碎带在40 m左右,诱导裂缝带在80~100 m,滑动破碎带厚度与诱导裂缝带厚度差距较大,指示该地区受断裂影响的围岩中裂缝展布范围较远.

**3.3.2 北西西向段** 该走向段中,断裂带各结构单元厚度自西向东逐渐增大.西部地区,断裂带各结构单元厚度较小,滑动破碎带厚度在30~45 m之间,上盘诱导裂缝带厚度在60 m左右,下盘诱导裂缝带厚度在40 m左右,上盘诱导裂缝带厚度明显大于下盘诱导裂缝带.东部地区,断裂带厚度达到最大值,诱导裂缝带和滑动破碎带厚度差距较大,其中滑动破碎带厚度达到75 m,诱导裂缝带厚度在140 m左右.

**3.3.3 北东向段** 该走向段与其他走向段相比,断裂带中滑动破碎带厚度相对较低,滑动破碎带与诱导裂缝带厚度差值较大.其中车59井滑动破碎带厚度在15 m左右,上盘诱导裂缝带厚度在35 m左右,下盘诱导裂缝带厚度较大,在50 m左右.车古26井上盘诱导裂缝带厚度在120 m左右,下盘诱导裂缝带厚度则在85 m左右,滑动破碎带厚度在35 m左右.

**3.3.4 北东东向段** 该走向段与其他走向段比较,断裂带各结构单元厚度中等,诱导裂缝带厚度变化不大,上盘诱导裂缝带厚度明显大于下盘诱导裂缝带,在120 m左右.下盘诱导裂缝带厚度则在85 m左右,滑动破碎带自西向东逐渐增大,从35 m左右的厚度增加到70 m左右.

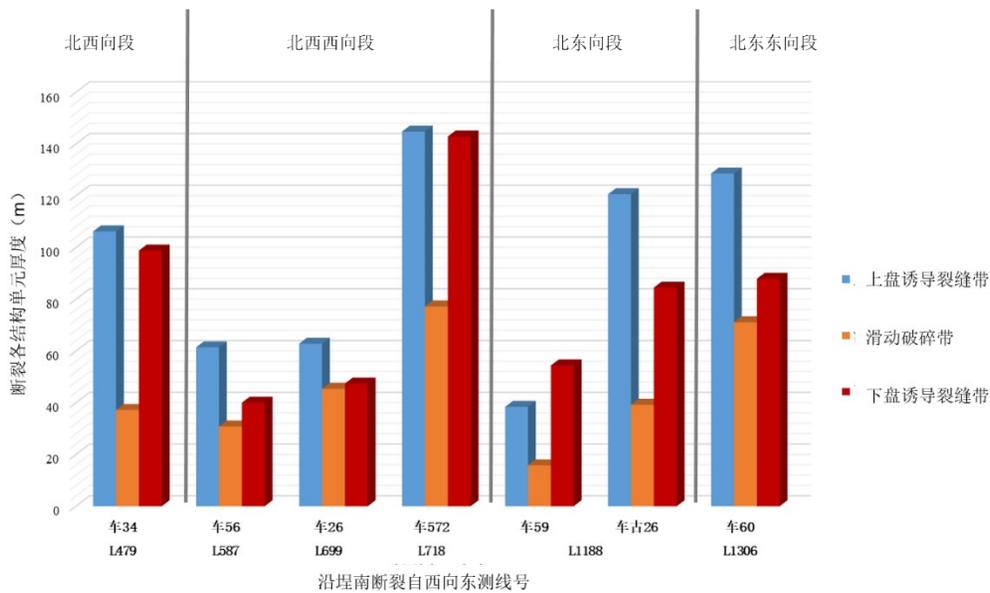


图6 沿埕南断裂自西向东断裂带各结构单元厚度统计图

Fig. 6 Diagram showing the distribution of thickness of different components along the Chengnan Fault from west to east

通过对比,可以发现断裂带各结构单元的厚度与古落差变化趋势具有很大的相似性.即在古落差较大的走向分段上,断裂带各结构单元发育更完整,厚度更大,而厚度与该结构单元的输导能力具有较为密切的关系.因此从各独立分段断裂结构单元的厚度比较来看,北东走向和北东东走向的分段断裂带厚度要明显大于北西向和北西西向断裂,而车59井钻遇断裂部位因靠近北东向和北东东向断裂连接点,受断裂生长连接影响,因此厚度较小,这一现象也与正断裂中心部位断距大、古落差大、边缘部位断距小、古落差小的规律相符.同时,四个独立分段中,北西西向断裂西部断裂带厚度最小,但从滑动破碎带在整个断裂带厚度中的占比来看,滑动破碎带占比最高.即随着断距增加,断裂带厚度在增加的同时,诱导裂缝带厚度的增长速度要高于滑动破碎带.

#### 4 不同断裂结构单元物性差异定量评价

断裂带不同结构单元岩性特征不同,导致了其物性特征也存在较大差异<sup>[41-43]</sup>.本次研究对钻遇深层断裂带5口井中各结构单元的岩心样品进行孔隙度和渗透率进行测试,测试结果如表1所示.

孔隙度、渗透率测试结果表明,埕南断裂深部碳酸盐岩中发育的诱导裂缝带孔隙度0.43%~5.60%,平均2.64%,渗透率3.50~42.60 mD,平均15.16 mD,并且表现为越靠近核部孔渗性越高.滑动破碎带孔隙度1.73%~6.16%,平均3.81%,渗透率2.12 mD.整体表现为,滑动破碎带的孔隙度高于诱导裂缝带,但渗透率远低于诱导裂缝带.在碳酸盐岩地层中,断裂的启闭性主要受到成岩胶结作用的影响,岩心观察表明,滑动破碎带

表1 埕南断裂不同结构单元物性数据表

Table1 Physical property data of different components of the Chengnan Fault

序号	层位	样品编号	深度(m)	岩性	孔隙度 (%)	渗透率 (mD)	断裂带结构	断裂分段
1	八陡组	17che57-6	4302.0	白云质石灰岩	1.73	2.69		北西西向段
2	八陡组	17che57-4	4308.2	石灰岩	3.49	1.72		北西西向段
3	八陡组	17che57-5	4304.1	石灰岩	5.76	1.99		北西西向段
4	风山组	17che571-4	3945.4	泥质白云岩	6.16	0.05	滑动破碎带	北西西向段
5	风山组	17che571-1	3945.6	泥质白云岩	4.92	0.90		北西西向段
6	风山组	17che571-3	3945.8	泥质白云岩	4.58	0.05		北西西向段
7	下马家沟组	17cheg202-4	4043.3	石膏质白云岩	2.04	4.46		北东东向段
8	前震旦系	17cheg202-2	4743.5	片麻岩	1.80	5.13		北东东向段
9	八陡组	17che57-1	4308.7	石灰岩	1.79	13.50		北西西向段
10	八陡组	17che57-2	4309.5	石灰岩	1.45	17.33		北西西向段
11	八陡组	17che57-3	4311.7	泥灰岩	2.52	6.87		北西西向段
12	风山组	17che571-2	3934.8	角砾状白云岩	2.62	3.50	诱导裂缝带	北西西向段
13	风山组	17che571-5	3944.8	泥质白云岩	3.50	9.56		北西西向段
14	风山组	17che59-1	2620.2	灰质白云岩	5.60	18.29		北东东向段
15	上马家沟组	17cheg201-1	3406.5	白云岩	2.18	42.60		北东东向段
16	上马家沟组	17cheg202-5	3805.8	石灰岩	2.54	7.51		北东东向段
17	馒头组	17cheg202-1	4565.2	泥质白云岩	0.43	9.90		北东东向段
18	风山组	17cheg202-3	4189.4	白云岩	3.76	22.30		北东东向段

存在两种发育情况(图4),即裂缝未被成岩胶结和裂缝已被成岩胶结.较高的孔隙度与滑动破碎带未完全胶结有关,而诱导裂缝带的渗透率远远大于滑动破碎带表明,诱导裂缝带在大量未胶结裂缝的作用下,具有良好的流体运移能力,滑动破碎带更多的表现为流体的封闭.综合断裂带特征及内部结构、孔渗性发育特征,建立了埕南断裂内部结构发育模式及孔渗性分布规律(图7).总体

来看,埕南断裂内部结构较为发育,滑动破碎带以胶结-部分胶结的断层角砾岩为典型特征,具有一定的孔隙发育,但渗透率较低,更多的表现为封闭作用;而诱导裂缝带以大量发育多期充填-部分充填的裂缝为典型特征,渗透率远远高于滑动破碎带,越靠近滑动破碎带孔渗性越大,更多的表现为流体运移输导.

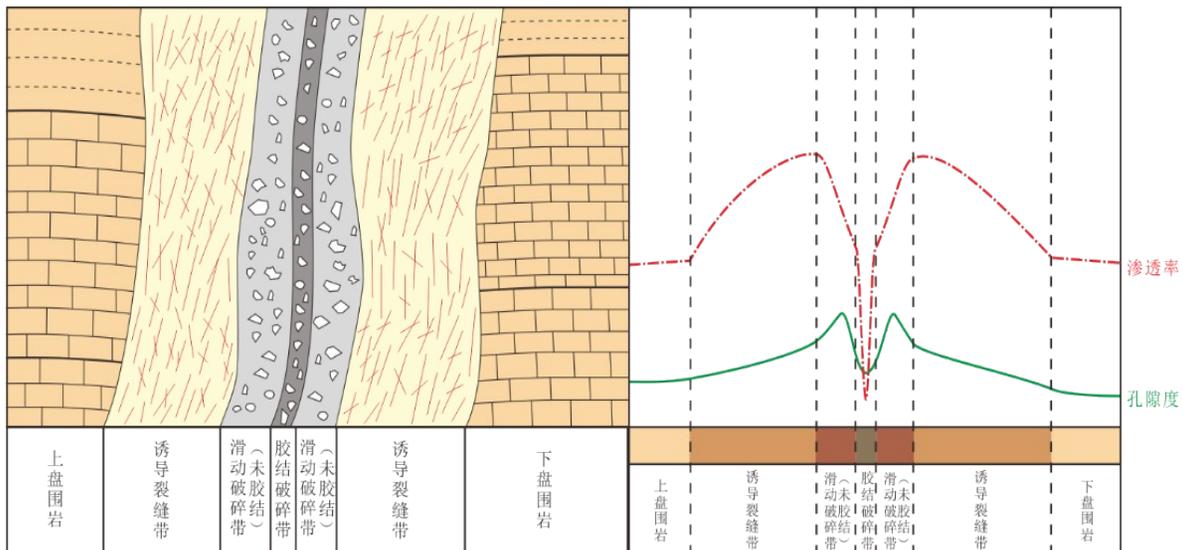


图7 埕南断裂内部结构发育及物性特征模式图

Fig. 7 Model of the internal architecture of the Chengnan Fault and the physical properties of different components

### 5 结 论

(1)埕南断层不同地层的古落差均表现为正弦曲线变化特征,以此可分为四个走向段.并且在剖面上,不同段控制洼陷表现出不同的构造发育特征.总体上,北西向和北西西向断裂控制的洼陷中埕南断裂呈板式或铲式;北部断裂稀疏,构造样式种类较少;南部缓坡带断裂数量多,规模大.北东向和北东东向断裂控制的洼陷中,埕南断裂呈铲式或坡坪式,北部深层断裂发育,二台阶展布范围较大,构造样式丰富;南部缓坡带断裂数量少、规模小.

(2)埕南断裂断裂带结构发育完整,滑动破碎带中发育有断裂角砾岩和断裂泥,且常伴有擦痕和镜面的现象.诱导裂缝带则表现为大量

的裂缝发育,上盘诱导裂缝带裂缝数量和宽度大于下盘.断裂带中80%裂缝被方解石胶结物充填.断裂结构测井曲线响应明显,利用深浅测向、井径、密度、声波时差和补偿中子测井可较好的识别断裂带结构单元.埕南断裂不同段,自西向东断裂各结构单元厚度呈波动状变化,特征差异明显.

(3)在断裂结构物性方面,整体表现为滑动破碎带的孔隙度高于诱导裂缝带,但渗透率远低于诱导裂缝带.因此在流体输导上,滑动破碎带更多表现为封闭作用,而诱导裂缝带表现为对流体的运移输导.

致 谢 感谢中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司提供资料.

## 参考文献

- [1] 罗群, 庞雄奇. 海南福山凹陷顺向和反向断裂控藏机理及油气聚集模式. 石油学报, 2008, 29(3): 363—367. (Luo Q, Pang X Q. Reservoir controlling mechanism and petroleum accumulation model for consequent fault and antithetic fault in Fushan depression of Hainan area. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(3): 363—367.)
- [2] 罗胜元, 何生, 王浩. 断层内部结构及其对封闭性的影响. 地球科学进展, 2012, 27(2): 154—164. (Luo S Y, He S, Wang H. Review on fault internal structure and the influence on fault sealing ability. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(2): 154—164.)
- [3] 付晓飞, 许鹏, 魏长柱等. 张性断裂带内部结构特征及油气运移和保存研究. 地学前缘, 2012, 19(6): 200—212. (Fu X F, Xu P, Wei C Z, et al. internal structure of normal fault zone and hydrocarbon migration and conservation. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(6): 200—212.)
- [4] 付晓飞, 方德庆, 吕延防等. 从断裂带内部结构出发评价断层垂向封闭性的方法. 地球科学-中国地质大学学报, 2005, 30(3): 328—336. (Fu X F, Fang D Q, Lu Y F, et al. Method of evaluating vertical sealing of faults in terms of the internal structure of fault zones. *Earth Science - Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30(3): 328—336.)
- [5] 刘江. 碎屑岩地层中断层封闭性定量表征及断圈风险性评价——以渤中34-2/4区块为例. 硕士学位论文. 秦皇岛: 东北石油大学, 2016. (Liu J. Quantitative fault seal characterization and risk assessment of fault trap of clastic rock: an example from Bozhong34 - 2/4 field. Thesis. Qinhuaungdao: Northeast Petroleum University, 2016.)
- [6] 张丽辰, 吴孔友, 何文军等. 准噶尔盆地北三台凸起断裂结构特征及成岩封闭作用. 地质力学学报, 2018, 24(5): 607—616. (Zhang L C, Wu K Y, He W J, et al. Structural characteristics and diagenetic sealing of faults in the Beisantai Swell, Junggar Basin. *Journal of Geomechanics*, 2018, 24(5): 607—616.)
- [7] 吴孔友, 赵仲祥, 崔世凌等. 夏口断层对惠民南部地区油气成藏的控制作用. 地质力学学报, 2012, 18(1): 32—41. (Wu K Y, Zhao Z X, Cui S L, et al. Controlling of Xiakou fault on hydrocarbon accumulation in the southern part of Huimin depression. *Journal of Geomechanics*, 2012, 18(1): 32—41.)
- [8] 吴孔友, 查明. 柴达木盆地北部块断带断层控烃作用. 石油学报, 2007, 28(3): 17—22. (Wu K Y, Zha M. Hydrocarbon controlling function of fault in the North Block - faulted Belt of Qaidam Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(3): 17—22.)
- [9] 李颜辰, 孟令东, 刘露等. 黑山窑村剖面碎屑岩地层断裂带内部结构特征. 科学技术与工程, 2016, 16(21): 172—176. (Li Y C, Meng L D, Liu L, et al. Internal structure characteristic of fault zone in clastic formations at heishanyao cut plane. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(21): 172—176.)
- [10] Molli G, Cortecchi G, Vaselli L, et al. Fault zone structure and fluid - rock interaction of a high angle normal fault in Carrara marble (NW Tuscany, Italy). *Journal of Structural Geology*, 2010, 32(9): 1334—1348.
- [11] 吕延防, 陈章明, 陈发景. 非线性映射分析判断断层封闭性. 石油学报, 1995, 16(2): 36—41. (Lv Y F, Chen Z M, Chen F J. Evaluation of sealing ability of faults using nonlinear mapping analysis. *Acta Petrolei Sinica*, 1995, 16(2): 36—41.)
- [12] 王东晔, 查明, 杨勇. 运用模糊综合评判方法定量研究断层封闭性. 断块油气田, 2006, 13(4): 5—7. (Wang D Y, Zha M, Yang Y. Quantitative study of fault sealing with synthetic fuzzy judgment. *Fault - Block Oil and Gas Field*, 2006, 13(4): 5—7.)
- [13] 沈传波, 梅廉夫, 刘立林等. 基于三维古构造应力场数值模拟的断层封闭性研究. 石油实验地质, 2004, 26(1): 103—107. (Shen C B, Mei L F, Liu L L, et al. Study of fault sealing by the 3 - D paleo - tectonic numerical simulation. *Petroleum Geology and Experiment*, 2004, 26(1): 103—107.)
- [14] Permanyer A, Martín-Martin J D, Kihle J, et al. Oil shows geochemistry and fluid inclusion thermometry of Mid Cretaceous carbonates from the eastern Basque Cantabrian Basin (N Spain). *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 92: 255—269.
- [15] 王珂, 戴俊生. 地应力与断层封闭性之间的定量关系. 石油学报, 2012, 33(1): 74—81. (Wang K, Dai J S. A quantitative relationship between the crustal

- stress and fault sealing ability. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(1): 74—81.)
- [16] 王孝彦, 高强, 孟令东等. 低-非孔隙岩石中走滑断裂带内部结构的形成演化. *断块油气田*, 2015, 22(6): 681—685. (Wang X Y, Gao Q, Meng L D, et al. Formation and evolution of internal structure of strike-slip fault zones in low-non porosity rocks. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2015, 22(6): 681—685.)
- [17] 吴孔友, 王绪龙, 崔殿. 南白碱滩断裂带结构特征及流体作用. *煤田地质与勘探*, 2012, 40(4): 5—11. (Wu K Y, Wang X L, Cui D. Structural characteristics and fluid effects of Nanbaijiantan fault zone. *Coal Geology & Exploration*, 2012, 40(4): 5—11.)
- [18] 付晓飞, 肖建华, 孟令东. 断裂在纯净砂岩中的变形机制及断裂带内部结构. *吉林大学学报地球科学版*, 2014, 44(1): 25—37. (Fu X F, Xiao J H, Meng L D. Fault deformation mechanisms and internal structure characteristics of fault zone in pure sandstone. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2014, 44(1): 25—37.)
- [19] 刘伟, 朱留方, 许东晖等. 断裂带结构单元特征及其测井识别方法研究. *测井技术*, 2013, 37(5): 495—498. (Liu W, Zhu L F, Xu D H, et al. On features and logging recognition method of structure unit in fracture belt. *Well Logging Technology*, 2013, 37(5): 495—498.)
- [20] 雷光伟, 杨春和, 王贵宾等. 北山预选区新场地段岩体节理几何特征及评价. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(5): 896—905. (Lei G W, Yang C H, Wang G B, et al. Geometric features of joints and quality evaluation of rock mass in Xinchang section, Beishan. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(5): 896—905.)
- [21] 王如良, 宋传春, 冯光铭. 车镇凹陷车西洼陷油气富集规律. *油气地质与采收率*, 2001, 8(4): 28—31. (Wang R L, Song C C, Feng G M. Research on oil-gas enrichment rules in Chexi Subsag of Chezhen sag. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2001, 8(4): 28—31.)
- [22] 张家震, 毕彩芹, 王新峰等. 车镇凹陷石油地质特征及勘探远景. *海洋石油*, 2005, 25(4): 6—10. (Zhang J Z, Bi C Q, Wang X F, et al. Petroleum and oil geology and exploratory prospect of Chezhen Sag. *Offshore Oil*, 2005, 25(4): 6—10.)
- [23] 王来斌, 徐怀民, 张本琪. 车镇凹陷鼻状构造与油气富集的关系. *西安石油学院学报(自然科学版)*, 2003, 18(6): 1—4. (Wang L B, Xu H M, Zhang B Q. Relationship between nose structures and oil-gas enrichment in Chezhen Sag. *Journal of Xi'an Petroleum Institute (Natural Science Edition)*, 2003, 18(6): 1—4.)
- [24] 王艳. 沾化、车镇凹陷盆地结构特征分析. 硕士学位论文. 青岛: 中国石油大学, 2011. (Wang Y. Basin structure characteristics analysis of Zhanhua Sag and Chezhen Sag. Master Dissertation. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2011.)
- [25] 王永诗, 鲜本忠. 车镇凹陷北部陡坡带断裂结构及其对沉积和成藏的控制. *油气地质与采收率*, 2006, 13(6): 5—8. (Wang Y S, Xian B Z. Fault structures of northern steep slope belts and their influences on sedimentation and reservoir formation in Chezhen Sag. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2006, 13(6): 5—8.)
- [26] 梁书义. 车西地区古潜山储层特征与形成机制. 博士学位论文. 青岛: 中国石油大学, 2007. (Liang S Y. Geoburied-hills Reservoir characteristics and forming-mechanism In Chexi Area. Ph. D. Dissertation. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2007.)
- [27] 渠效文. 济阳拗陷车西洼陷北部潜山油气藏特征. *山东地质*, 2003, 19(S1): 81—84, 89. (Qu X W. Oil and gas deposit characteristics of buried hill in North part of Chexi depression in Jiyang depression. *Geology of Shandong*, 2003, 19(S1): 81—84, 89.)
- [28] 万涛, 蒋有录, 林会喜等. 车西洼陷南坡油气成藏和富集的主控因素. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2010, 34(6): 38—44. (Wan T, Jiang Y L, Lin H X, et al. Main controlling factors of hydrocarbon accumulation and enrichment in the southern slope of Chexi Sag. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2010, 34(6): 38—44.)
- [29] 张永辉, 夏斌, 万念明等. 车西洼陷构造演化对油气成藏的控制作用. *大地构造与成矿学*, 2010, 34(4): 593—598. (Zhang Y H, Xia B, Wan N M, et al. Tectonic controls on the hydrocarbon accumulations in the Chexi Sag. *Geotectonica et Metallogenia*, 2010, 34(4): 593—598.)
- [30] 李家贵, 宋传春, 袁吉鲁等. 济阳拗陷车镇凹陷低位隐伏潜山油气藏研究. *中国石油勘探*, 2002, 7(2):

- 31—35. (Li J Q, Song C C, Yuan J L, et al. Research on low-position concealed buried hill oil and gas reservoirs at Chezhen Sag of Jiyang depression. *China Petroleum Exploration*, 2002, 7(2): 31—35.)
- [31] 李茹, 梁书义, 周瑶琪等. 济阳坳陷车西地区下古生界储层裂缝参数特征与裂缝类型. *大地构造与成矿学*, 2006, 30(4): 463—469. (Li R, Liang S Y, Zhou Y Q, et al. Types and parameters for fissures in the lower paleozoic reservoir in the Chexi region of Jiyang depression. *Geotectonica et Metallogenia*, 2006, 30(4): 463—469.)
- [32] 薛海涛, 卢双舫, 张学军等. 济阳坳陷下古生界碳酸盐岩烃源岩评价. *地球化学*, 2006, 35(6): 609—614. (Xue H T, Lu S F, Zhang X J, et al. Evaluation of lower paleozoic carbonate source rocks in Jiyang depression. *Geochimica*, 2006, 35(6): 609—614.)
- [33] Cartwright J A, Trudgill B D, Mansfield C S. Fault growth by segment linkage: an explanation for scatter in maximum displacement and trace length data from the canyonlands grabens of SE Utah. *Journal of Structural Geology*, 1995, 17(9): 1319—1326.
- [34] Su J B, Zhu W B, Wei J, et al. Fault growth and linkage: Implications for tectonosedimentary evolution in the Chezhen Basin of Bohai Bay, eastern China. *AAPG Bulletin*, 2011, 95(1): 1—26.
- [35] Kim Y S, Sanderson D J. The relationship between displacement and length of faults: a review. *Earth-Science Reviews*, 2005, 68(3—4): 317—334.
- [36] Peacock D C P, Sanderson D J. Displacements, segment linkage and relay ramps in normal fault zones. *Journal of Structural Geology*, 1991, 13(6): 721—733.
- [37] Morley C K, Gabdi S, Seusutthiya K. Fault superimposition and linkage resulting from stress changes during rifting: examples from 3D Seismic data, Phitsanulok Basin, Thailand. *Journal of Structural Geology*, 2007, 29(4): 646—663.
- [38] Liu Y, Chen Q H, Wang X, et al. Influence of normal fault growth and linkage on the evolution of a rift basin: A case from the Gaoyou depression of the Subei Basin, eastern China. *AAPG Bulletin*, 2017, 101(2): 265—288.
- [39] 吴智平, 李伟, 郑德顺等. 沾化凹陷中、新生代断裂发育及其形成机制分析. *高校地质学报*, 2004, 10(3): 405—417. (Wu Z P, Li W, Zheng D S, et al. Analysis on features and origins of the mesozoic and cenozoic faults in Zhanhua Sag. *Geological Journal of China Universities*, 2004, 10(3): 405—417)
- [40] 武玉宏, 王慧, 高红艳. 对三孔隙度交会图法进行测井曲线标准化的改进. *油气地质与采收率*, 2005, 12(2): 38—41. (Wu Y H, Wang H, Gao H Y. Normalization improvement on log curve by three-porosity crossplot approach. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2005, 12(2): 38—41.)
- [41] Bo S, Wu D, Wang Z H. A new method for permeability estimation from conventional well logs in glutenite reservoirs. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2017, 14(5): 1268—1274.
- [42] 沈卫兵, 庞雄奇, 张宝收等. 塔中地区碳酸盐岩与碎屑岩储层物性差异及主控因素. *高校地质学报*, 2015, 21(1): 138—146. (Shen W B, Pang X Q, Zhang B S, et al. Physical properties differences and key controlling factors of the clastic reservoirs and carbonate reservoirs in Tazhong Area. *Geological Journal of China Universities*, 2015, 21(1): 138—146.)
- [43] 楼海, 王椿镛, 姚志祥等. 龙门山断裂带深部构造和物性分布的分段特征. *地学前缘*, 2010, 17(5): 128—141. (Lou H, Wang C Y, Yao Z X, et al. Subsection feature of the deep structure and material properties of Longmenshan fault zone. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(5): 128—141.)

(责任编辑 吴劲薇)