

文章编号: 1673-1506(2022)06-0014-10

DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2022.06.002

引用: 杨帆,陈宇航,张新涛,等.渤海辽西低凸起南倾没端前古近系断裂特征及对潜山地层控制作用[J].中国海上油气,2022,34(6):14-23.

YANG Fan, CHEN Yuhang, ZHANG Xintao, et al. Characteristics of the pre-Paleogene faults and their influences on buried-hill strata at the south pitching end of the Liaoxi low uplift, Bohai sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(6): 14-23.

# 渤海辽西低凸起南倾没端前古近系断裂特征及对潜山地层控制作用<sup>\*</sup>

杨帆<sup>1,2</sup> 陈宇航<sup>3</sup> 张新涛<sup>4</sup> 余一欣<sup>1,2</sup> 柳永军<sup>5</sup> 张震<sup>5</sup> 牛月萌<sup>1,2</sup>

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院 北京 102249;

3. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院 陕西西安 710018; 4. 中海石油(中国)有限公司勘探部 北京 100010;

5. 中海石油(中国)有限公司天津分公司 天津 300459)

**摘要** 渤海辽西低凸起南倾没端紧邻渤中凹陷和秦南凹陷,是环渤中凹陷重要的潜山勘探目标区,前古近系断裂对潜山地层的分布有重要影响。通过对三维地震资料进行精细解释,结合钻井资料和区域演化背景,对辽西低凸起南倾没端前古近系断裂发育及对潜山地层控制作用进行分析。辽西低凸起南倾没端前古近系主要发育负反转断裂、伸展-走滑复合断裂以及伸展断裂,在剖面上多组合成叠瓦式、似花状、“Y”型以及多米诺式等构造样式。平面上,前古近系断裂主要呈NW向、NE—NNE向以及NE—NEE展布。前古近系断裂主要经历了印支期、燕山期和喜山期等多期次活动,其中印支期断裂发生逆冲推覆,控制了古生界的展布,而燕山期逆冲断裂发生反转和新生成的伸展断裂共同控制了中生界的发育。喜山期在近SN向伸展应力影响下,部分燕山期断裂发生复活,形成伸展-走滑复合断裂。

**关键词** 渤海;辽西低凸起;前古近系;断裂;潜山;潜山地层

中图分类号: TE121.2

文献标识码: A

## Characteristics of the pre-Paleogene faults and their influences on buried-hill strata at the south pitching end of the Liaoxi low uplift, Bohai sea

YANG Fan<sup>1,2</sup> CHEN Yuhang<sup>3</sup> ZHANG Xintao<sup>4</sup> YU Yixin<sup>1,2</sup>  
LIU Yongjun<sup>5</sup> ZHANG Zhen<sup>5</sup> NIU Yuemeng<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing, Beijing 102249, China;  
2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing, Beijing 102249, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xian, Shaanxi 710018, China; 4. Exploration Department of CNOOC China Limited, Beijing 100010, China; 5. CNOOC China Limited, Tianjin Branch, Tianjin 300459, China)

**Abstract:** Adjacent to the Bozhong and Qinnan sags, the south pitching end of Liaoxi low uplift in Bohai sea is an important exploration target for buried hill around Bozhong sag. The pre-Paleogene faults have an important impact on strata distribution of buried hill. In this paper, the development of pre-Paleogene faults at the south pitching end of the Liaoxi low uplift and their control on buried hill strata are analyzed by fine

\* 中海油科技项目“中国近海潜在富油凹陷新生代构造差异研究与构造恢复(编号:CCL2021RCPS0169KQN)”部分研究成果。

第一作者简介: 杨帆,男,中国石油大学(北京)在读博士研究生,从事油区构造解析研究。地址:北京市昌平区府学路18号(邮编:102249)。E-mail:775066385@qq.com。

通信作者简介: 余一欣,男,2000年获长安大学学士学位,2006年获中国石油大学(北京)博士学位,现为中国石油大学(北京)地球科学院副教授,主要从事含油气盆地构造地质学教学、科研工作。E-mail:yuxin0707@163.com。

interpretation of three-dimensional seismic data, combined with drilling data and regional evolution background. The results show that there are mainly negative inversion faults, extensional-strike-slip composite faults and extensional faults in the pre-Paleogene in the study area, and their composite styles involve imbricate, flower-like shape, “Y” shape and domino. On the plane, the pre-Paleogene faults are mainly distributed in NW, NE—NNE and NE—NEE directions. Pre-Paleogene faults mainly experienced different activities such as Indosinian, Yanshanian and Himalayan periods, among which Indosinian faults were thrust napped, which controlled the distribution of Paleozoic; while the inversion of Yanshanian thrust faults and the newly formed extensional faults jointly controlled the development of Mesozoic. During the Himalayan period, under the influence of tensile stress in the near SN direction, some Yanshanian faults revived and developed extensional-strike-slip composite faults.

**Key words:** Bohai; Liaozi low uplift; pre-Paleogene; fault; buried hill; buried hill strata

“潜山”一词自 Powers<sup>[1]</sup>首次提出到现今其概念已经发生了较大变化,目前一般将那些被新的沉积地层覆盖、且与新的沉积地层之间以不整合面为界的较老地层的隆起均视为潜山<sup>[2]</sup>。潜山已逐渐成为重要的油气勘探目标,国内外已经发现了众多储量可观的潜山油气藏<sup>[3-4]</sup>。在影响潜山油气成藏的地质因素中,断裂变形及其发育期次对潜山油气藏的形成具有重要意义,能对潜山圈闭有效性、储层物性以及油气运移等产生重要影响<sup>[5-7]</sup>,特别是在油气的垂向运移中尤为重要<sup>[8-9]</sup>。

渤海地区历经多年勘探,已在新生界内发现了蓬莱 19-3、垦利 6-1、渤中 8-4、渤中 29-6、渤中 36-1 等多个大中型油气田<sup>[10-11]</sup>。近年来随着勘探工作逐渐向深层转移,在前古近系潜山领域也获得了多个重要突破,先后发现了锦州 25-1S、蓬莱 9-1、渤中 19-6 和渤中 13-2 等多个亿吨级油气田,特别是渤中 19-6 和渤中 13-2 大型潜山油气田的发现在渤海湾盆地的油气勘探历史上具有重要意义,并使环渤中凹陷潜山构造带成为勘探热点领域<sup>[4,12-14]</sup>。辽西低凸起南倾没端位于渤中凹陷北部,近些年针对前古近系潜山目标钻探了多口钻井,并在中生界测试获得高产油气流<sup>[15]</sup>,展现了辽西低凸起南倾没端潜山油气勘探的良好前景。但由于前古近系潜山埋深一般都较大,井位部署风险高,潜山深层相关资料匮乏,国内外缺少公开发表的有关辽西低凸起南段前古近系潜山形成演化过程、断裂发育特征以及断裂对潜山地层发育和控制作用等方面的相关文献,限制了对该地区潜山油气成藏规律的认识。

本文结合钻井资料、三维地震资料解释及区域构造演化背景,分析了辽西低凸起南倾没端前古近

系潜山内部断裂发育特征,厘清了前古近系断裂变形特征、活动期次及其平面展布特征,分析前古近系断裂对潜山地层发育的控制作用,拟为该地区的潜山油气勘探实践提供理论基础和科学依据。

## 1 区域地质概况

渤海湾盆地位于中国华北地区东北部,总体呈 NNE 向展布,由一系列 NNE 向和 NE 向的坳陷及位于其间的隆起组成,包括陆地和海域两部分。渤海湾盆地是典型的新生代裂陷盆地<sup>[16]</sup>,盆地基底历经印支期和燕山期的改造,后期叠加喜山期强烈的伸展和走滑作用,从而形成现今的盆地格局。从区域大地构造位置来看,华北克拉通处于古亚洲洋、特提斯洋和太平洋三大构造域的交互部位,渤海湾盆地处于华北板块东部边缘,位于太平洋板块和华北板块的交接处,是华北克拉通破坏的产物<sup>[17]</sup>。

辽西低凸起位于渤海辽东湾坳陷西南部,整体呈 NE 向展布,其南部以 SW 向向凹陷内逐渐倾没。辽西低凸起南倾没端南、北分别被渤中凹陷和秦南凹陷围限,西接石臼坨凸起东部 428 构造带(图 1a)。辽西低凸起南倾没端位于构造活动强烈部位,NE 向辽西走滑断裂带和 NW 向秦皇岛-旅顺断裂带在此部位发生交汇,是渤海一级构造变换带发育区<sup>[18]</sup>。在不同时期的构造运动影响下,辽西低凸起南倾没端前古近系潜山地层经历了复杂的建造和改造作用,表现出不同的展布特征,并形成了复杂的断裂体系<sup>[19]</sup>。根据已钻井资料以及地震相特征(图 2),研究区前古近系潜山地层自下而上依次为:太古界混合花岗岩、古生界寒武—奥陶系碳酸盐岩和石炭一二叠系碎屑岩、中生界侏罗系碎屑岩和白垩系火山

岩(图1b)。地震剖面上(图2),太古界整体表现为杂乱、弱振幅反射;古生界地震反射特征清晰,下古生界碳酸盐岩成层性较好,表现为强振幅、连续层状反射特征(图1b),上古生界碎屑岩表现为

弱振幅、较连续反射特征;中生界碎屑岩地震剖面上典型地震响应特征为中一强振幅、较连续反射,中生界火山岩对应杂乱、中一弱振幅、差连续性反射特征。

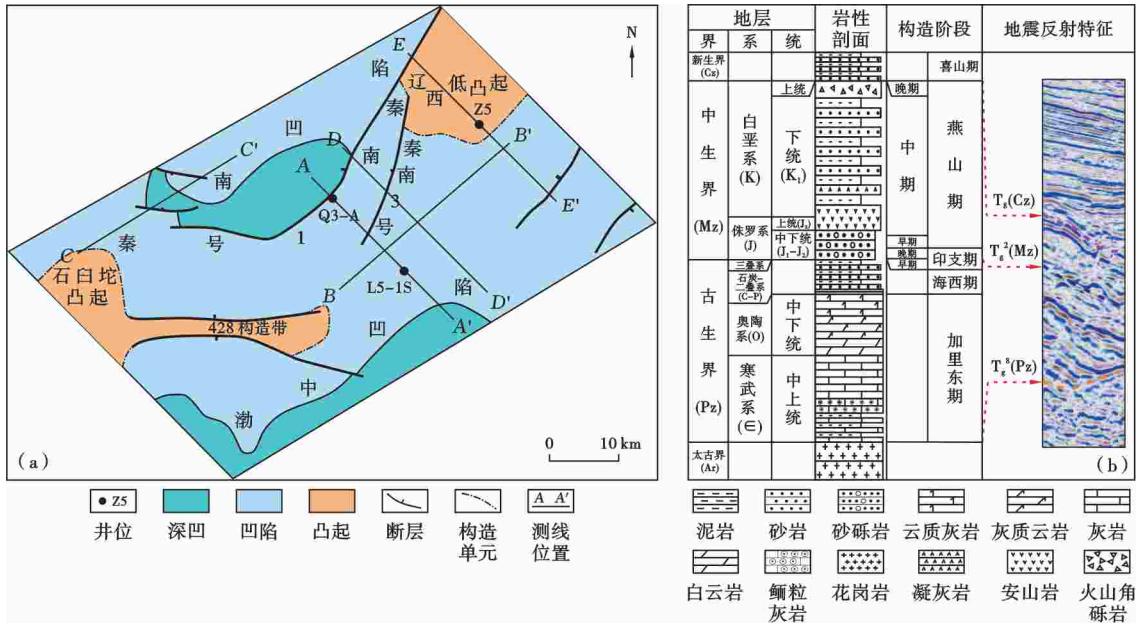


图1 渤海辽西低凸起南倾没端构造位置及潜山地层综合柱状图

Fig. 1 Structural location and comprehensive histogram of buried hill strata map of the south pitching end of the Liaoxi low uplift

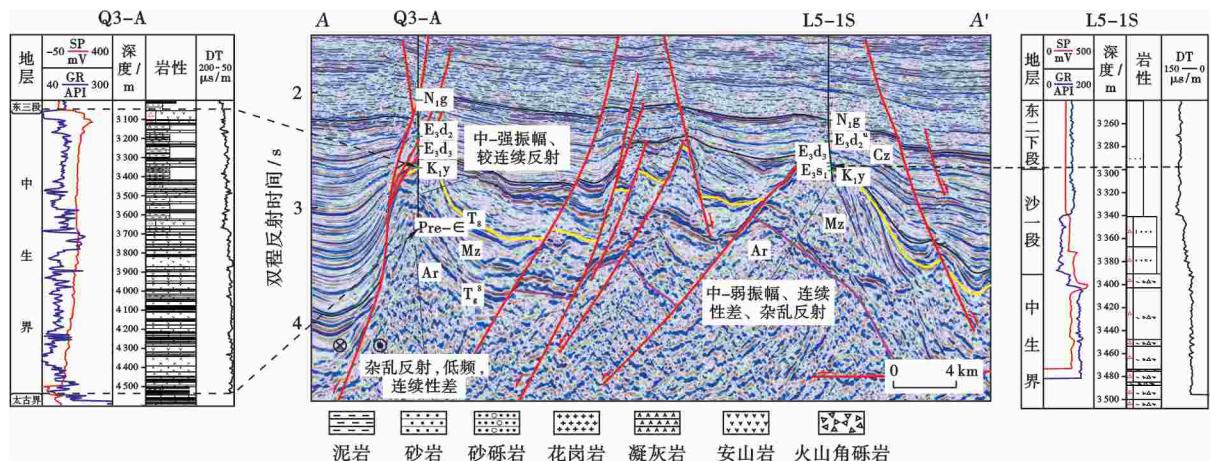


图2 渤海辽西低凸起南倾没端合成记录标定及反射特征对比(剖面位置见图1)

Fig. 2 Synthetic seismic record and seismic reflection features contrast of the south pitching end of the Liaoxi low uplift(see Fig. 1 for line location)

## 2 断裂发育特征

### 2.1 断裂类型及剖面特征

依据研究区钻遇潜山地层的典型钻井资料(表1),

对潜山内幕地层进行地震层位标定,再根据标定地层的地震相特征,对全区的潜山内幕地层开展地震资料解释。解释结果表明,研究区内主要发育负反转断裂、伸展-走滑复合断裂和伸展断裂。

表1 辽西低凸起南倾没端典型钻井资料统计

Table 1 Statistical of typical drilling data at the south pitching end of the Liaoxi low uplift

井名	钻遇深度/m			钻遇厚度/m			主要岩性
	中生界	古生界	太古界	中生界	古生界	太古界	
Q3-A	3 054~4 544		4 544~4 746	1 490		202	中生界:下部灰色、灰绿色安山岩 顶部灰色凝灰岩和泥岩 太古界:灰色花岗岩
L5-1S	3 391~3 508			116.5			灰色流纹质火山角砾岩
Z5		2 009~2 147.25			138.25		下部灰色、褐色白云岩 顶部灰色石灰岩

1) 负反转断裂:研究区由于历经印支期挤压作用叠加后期伸展作用,断裂活动强度大,对反转前地层的改造作用强,对反转后地层的沉积控制作用明显。该类断裂在剖面上保留有明显的构造反转现象

(图3)。古生界经过挤压-剥蚀-伸展埋藏作用,与改造其的断裂组合成秃底-薄底构造。负反转断裂后期持续性活动切至新生界,整体组合呈叠瓦式构造样式。

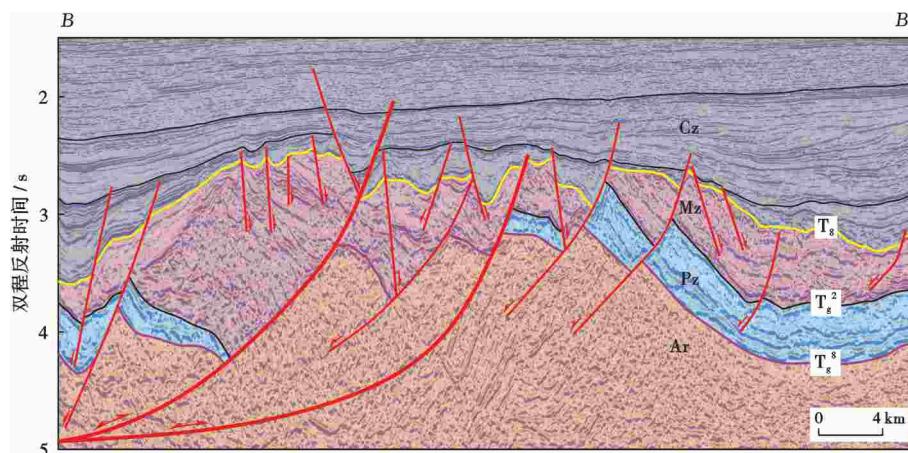


图3 辽西低凸起南倾没端典型地震剖面(剖面位置见图1)

Fig. 3 Typical seismic profiles through the south pitching end of the Liaoxi low uplift (see Fig. 1 for line location)

2) 伸展-走滑复合断裂:该类型断层均贯穿新生界至古生界,延伸至太古界,剖面形态上陡下缓、延伸距离长、顺走向断距变化较大,产状高陡,数量稀少,对中、新生界控制作用明显,浅层发育较为密集的次生正断层,整体组合为似花状构造样式(图3)。

3) 伸展断裂:区内伸展断裂发育,新生界伸展断裂发育密集且产状高陡,平均倾角可达70°,断面基本以板式为主,绝大多数在剖面和平面上延伸长度较短,基本上属于层内断裂,只在构造边界存在控新生界沉积的边界大断裂,边界大断裂上多发育反向调节正断层,与主干断层组合成“Y”字型;中生界层内正断层多以铲式为主,断层自下而上倾角变化大,介于20°~60°之间。由于中生界伸展作用强烈,断块发生旋转,剖面上呈多米诺式,大多数切穿古生界,向下延伸至太古界,向上延伸至新生界底部(图3)。

## 2.2 断裂平面展布特征

辽西低凸起南倾没端前古近系潜山地层主要发育三组不同走向的断层,分别是NW向、NE—NNE向以及NE—NEE向。

NW向断裂主要分布在辽西低凸起南倾没端南部以及秦南凹陷西南部,平面延伸距离较长,延伸方向较为稳定,各条断裂之间近乎平行。NW向断裂在潜山顶面( $T_8$ 反射层)已经没有断距显示,说明其为潜山内幕断裂,非长期发育断层。同时,NW向与NE—NNE向断裂之间具有明显的截切关系(图4a)。

NE—NNE向断裂主要分布在辽西低凸起南倾没端以及秦南凹陷与南倾没端边界,平面样式主要以平行式、斜交式为主(图4a,b),秦南1号与秦南3号在1 000 ms相干切片上,具有雁列式和马尾式组合样式(图4c),指示其长期发育的特点,并在后期

具有走滑性质,区内其他 NE—NEE 向断层则以伸展性质为主。

NE—NEE 向断裂平面展布多以小规模为主,但是断裂密度大,发育部位集中,断裂走向变化不大,在 1 000 ms 相干切片上走向更为稳定,形态更为平直。

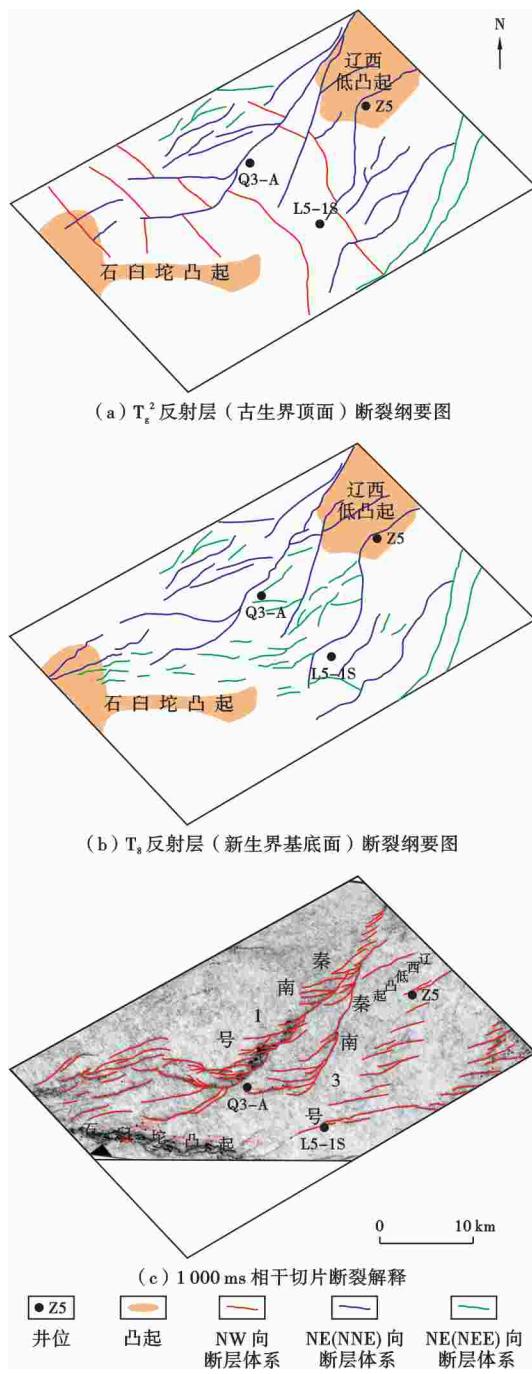


图 4 辽西低凸起南倾没端潜山内部不同层位断裂分布  
Fig. 4 Distribution of faults on different layers of buried hill at the south pitching end of the Liaoxi low uplift

at the south pitching end of the Liaoxi low uplift

### 2.3 断裂活动期次划分

基于区域应力场和断裂平面发育特征,结合断裂两盘地层发育情况,可以将辽西低凸起南倾没端断裂主要活动期次划分为印支期、燕山早期、燕山中期、燕山晚期以及喜山期等 5 个阶段。

#### 1) 印支期( $T_{1-3}$ )。

印支期进入华北克拉通破坏阶段<sup>[20]</sup>, 华南板块与华北板块剪刀式闭合<sup>[21]</sup>, 从而使渤海湾盆地处于强烈的挤压环境中, 产生 NE—SW 向挤压应力, 在辽西低凸起南倾没端和秦南凹陷西南区域共产生两组 NW 向逆冲推覆断层体系(图 4a)。剖面可见断层上盘古生界向靠近断裂一侧发生减薄或被剥蚀殆尽, 上覆较厚中生界, 说明中生界沉积前(印支期)断层发生逆冲推覆, 导致上盘古生界遭受剥蚀(图 5a)。

#### 2) 燕山早期( $J_1—J_2$ )。

太平洋板块以 NWW 向向华北板块高角度俯冲<sup>[22]</sup>, 产生 NWW—SEE 向挤压应力, 郊庐断裂系统在该期发生左旋走滑作用<sup>[23-24]</sup>, 整个渤海地区处于左旋扭的应力场<sup>[25]</sup>, 生成 NE—NNE 向的具有弱逆冲性质的走滑断层<sup>[23]</sup>, 使部分与逆冲走滑断层斜交的印支期逆冲断层发生反转, 沉积中下侏罗统(图 5a), 并且将印支期 NW 向先存断裂切割为多段(图 4a)。

#### 3) 燕山中期( $J_3—K_1^2$ )。

燕山中期, 太平洋板块以 SEE—NWW 方向向华北板块加速俯冲, 导致深部岩浆开始上涌, 火山活动活跃, 岩石圈发生拆离作用, 达到岩石圈减薄的高峰期<sup>[26]</sup>, 岩浆的侧向对流以及岩石圈的拆离作用<sup>[27]</sup>, 产生 NW—SE 向伸展应力, 形成一系列 NE—NNE 向正断层, 在剖面上多表现为铲式正断层特征(图 5b), 同时印支期的逆冲断裂发生反转(图 5a), 与燕山中期形成的铲式正断层共同控制了中生界沉积(图 5b)。

#### 4) 燕山晚期( $K_2$ )。

燕山晚期, 古太平洋板块以 NWW 方向向华北板块低速俯冲, 此时岩浆活动归于平静, 重新生成新的岩石圈<sup>[28]</sup>, 产生 NW—SE 向为主的区域性挤压应力, 研究区整体以挤压作用为主, 局部挤压高部位中生界遭受完全剥蚀。中生界顶面存在明显的削截特征, 是燕山晚期挤压作用的有力证据(图 5c)。

## 5)喜山期(E至今)。

喜山期,欧亚板块受太平洋板块低速俯冲和印度板块高速俯冲的共同作用下,渤海湾盆地软流圈上涌<sup>[29]</sup>,产生NW—SE向强伸展作用,形成新的NE—NEE向

断裂体系,盆地进入新生代裂陷沉积阶段。同时燕山期部分断裂活化表现出伸展-走滑性质,在新生界层内形成似花状构造(图5c),燕山期铲式正断层控制新生代早期地层沉积,之后停止活动遭受深埋(图5b)。

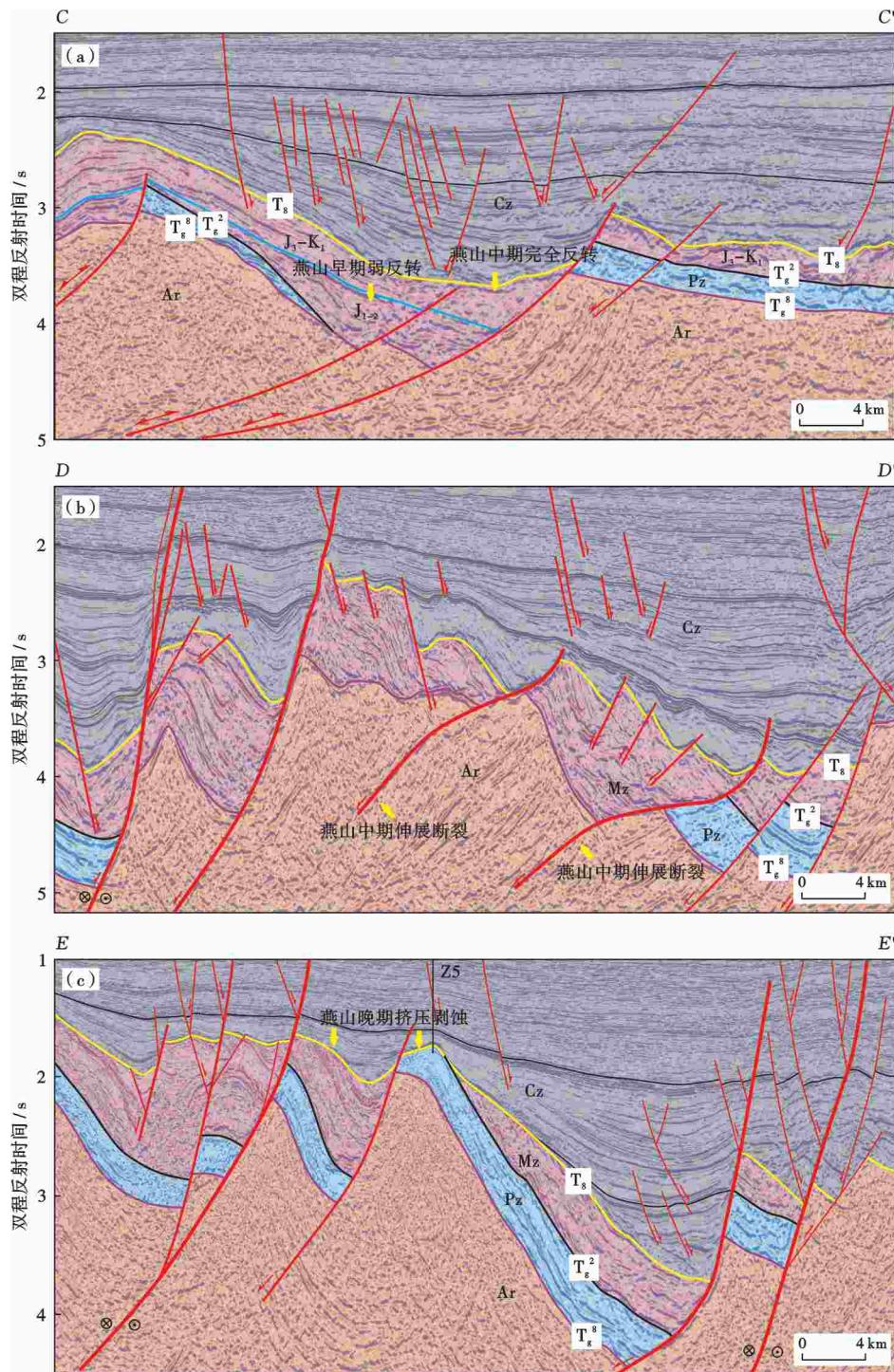


图5 辽西低凸起南倾没端断裂剖面特征(剖面位置见图1)

Fig. 5 Characteristics of fault at the south pitching end of the Liaoxi low uplift(see Fig. 1 for lines locations)

### 3 断裂对潜山地层发育的影响

#### 3.1 潜山地层发育特征

基于辽西凸起南倾没端三维地震资料的精细解释和全区构造-地层格架的搭建(图2、3、5),明确辽西低凸起南倾没端古生界存在较大面积缺失,缺失部位在剖面和平面上都具有一定的规律性。古生界稳定发育区,厚度200~300 ms,在古生界遭受改造剥蚀区域的负反转断裂的上盘,古生界厚度随着距负反转断裂越近,厚度的减薄现象越明显,直至缺失(图3、5a);平面上,古生界缺失区域均处于印支期NW向断裂体系所影响的部位(图6a)。中生界在研究区内展布稳定,仅在局部隆起存在部分缺失,绝大多数剖面上中生界厚度在500 ms左右,最大厚度可达1 000 ms(图5b),且越靠近断裂中生界厚度越大(图5c);平面上,中生界仅在辽西低凸起南段主体部位和石臼沱凸起428构造带隆起高部位缺失(图6b)。进入喜山期后,研究区内潜山不再遭受强烈的剥蚀改造,地层分布趋于稳定。

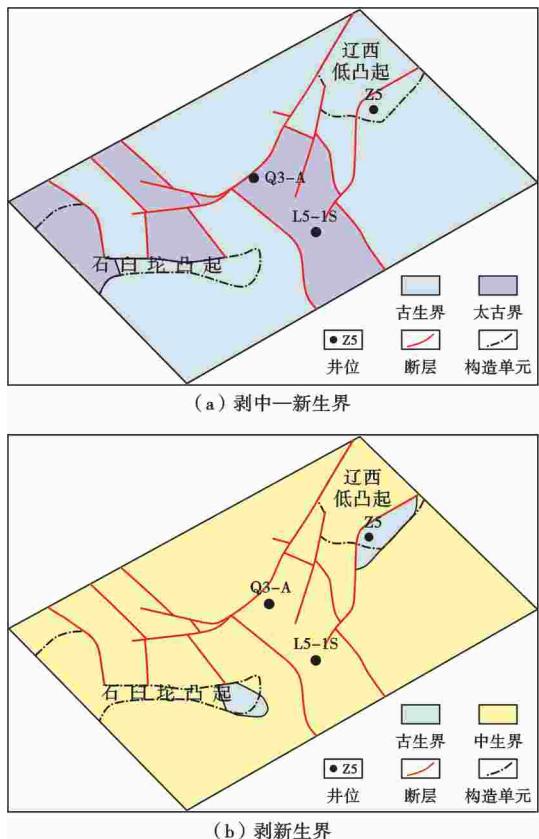


图6 辽西低凸起南倾没端古地质图

Fig. 6 Paleo-geological maps at the south pitching end of the Liaoxi low uplift

#### 3.2 断裂对潜山地层的控制作用

渤海湾盆地位于华北克拉通破坏的核心区域,形成于华北克拉通东部地块之上的中、新生代盆地<sup>[17,20,23]</sup>。印支期,华南板块与华北板块剪刀式闭合过程中,区域应力机制为NE—SW向挤压,形成一系列NW向逆冲推覆断裂,控制了古生界的分布以及潜山雏形的发育<sup>[20,23-24,28]</sup>。渤海海域燕山运动(侏罗纪—白垩纪)阶段,先后经历了挤压-伸展-再挤压构造演化过程,期间伴有强烈的火山活动<sup>[24-25,27-28]</sup>。燕山早期(早—中侏罗世)NW—SE向挤压形成NE向左行压扭走滑断裂,该阶段形成的断裂多改造印支期古构造格局。燕山中期(晚侏罗—早白垩世)受强烈的NW—SE向伸展作用,区域进入裂陷阶段,先存逆冲断裂发生反转与新生NE向主干断裂共同控制中生界沉积。燕山晚期(晚白垩世)受NW—SE向挤压作用影响,该阶段区域局部隆升造成古背斜顶部中生界被剥蚀<sup>[24-28]</sup>。渤海地区在新生代受太平洋板块向欧亚板块俯冲的影响,先后经历了伸展-走滑复合叠加改造的过程<sup>[25]</sup>。

断裂发育与演化往往都伴随着地层的发育和改造<sup>[30-31]</sup>。辽西低凸起南倾没端不同活动期次的断层对潜山地层的展布具有不同的影响。根据印支期古生界展布特征(图6a)与断裂期次的匹配关系,明确印支期两组NW向断裂对研究区及邻区的古生界改造起主要作用,古生界缺失部位均处于印支期逆冲断裂的上盘冲起部位,初期挤压作用强烈,导致冲起程度大,致使古生界完全剥蚀,后期挤压作用减弱导致冲起程度变小,剥蚀部分古生界。同时,印支期断裂的末端区域古生界逆冲幅度低,使得古生界得以保存(图7a);燕山早期NW向压扭作用下,将印支期断裂切割为多段,导致秦南凹陷中的古生界遭受一定程度的剥蚀,并使得部分区域的印支期断裂发生反转,接受中生界沉积(图7b);燕山中期NW向伸展作用下,生成新的NNE向伸展断裂体系,同时印支期逆冲断裂发生负反转,全区沉积中生界,并且在负反转部位沉积相对较厚的中生界(图7c);燕山晚期NW向挤压作用下,部分燕山中期伸展断裂发生正反转,使得局部区域中生界完全剥蚀(图7d);进入喜山期后,盆地进入断陷沉积阶段,产生众多浅层伸展断裂(图7e),对潜山地层改造作用较弱。

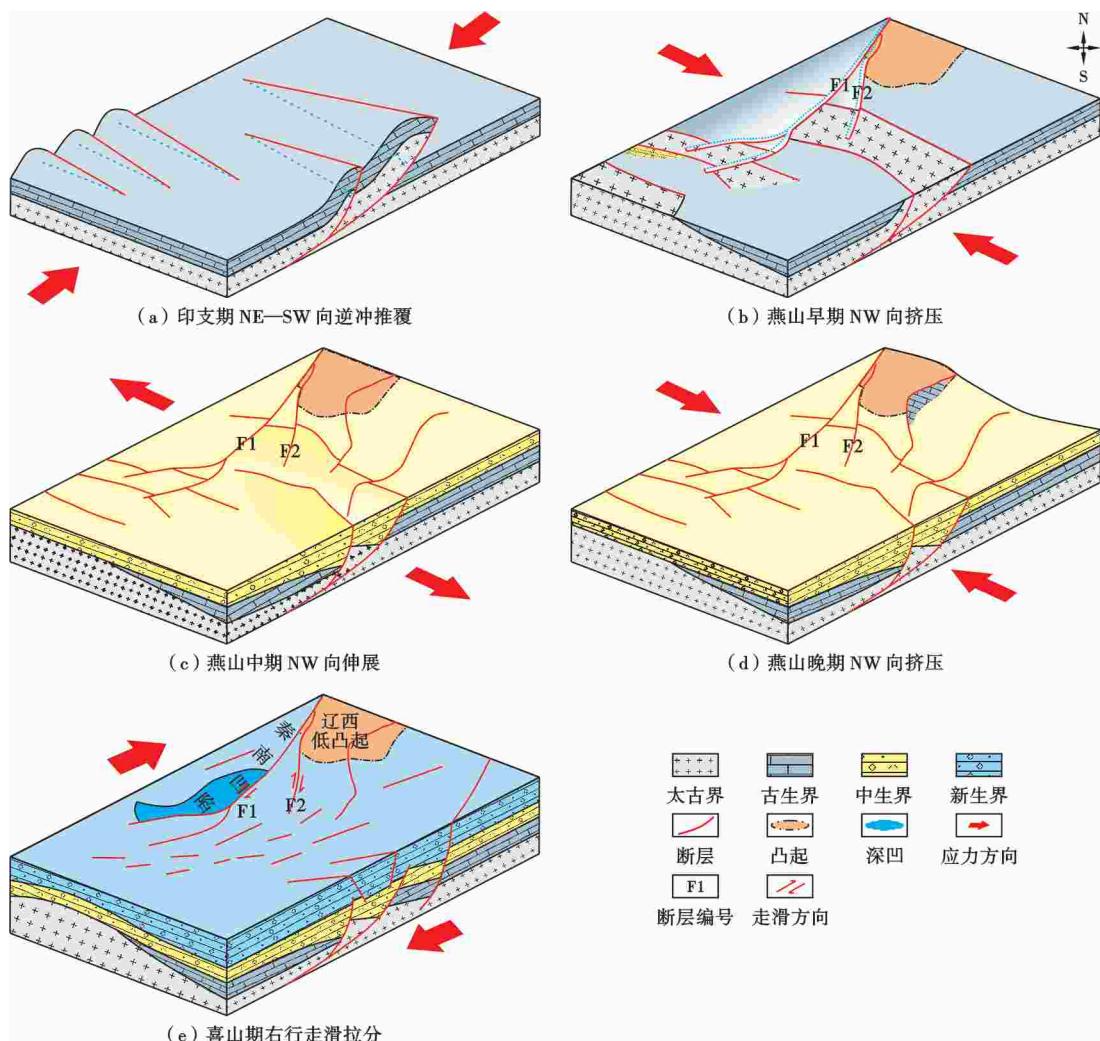


图7 辽西低凸起南倾没端前古近系断裂演化模式

Fig. 7 Evolution models of the pre-Paleogene faults at the south pitching end of the Liaoxi low uplift

### 3.3 油气地质意义

近年来渤中凹陷西南部渤中19-6和渤中13-2等大型潜山油气田的发现,证实了环渤中凹陷潜山油气勘探的良好前景。本文研究区位于渤中凹陷北部,处于NE向、近EW向和NW向构造体系的交汇部分,构造变形及演化复杂,发育多个潜山构造。通过系统分析前古近系断裂发育特征,明确断裂对潜山地层的控制作用,能为今后辽西低凸起南倾没端潜山油气勘探提供一定理论指导。

随着渤海海域潜山油气勘探研究不断深入以及勘探力度的不断加大,潜山油气探明储量占整个渤海海域潜山已发现油气田探明储量比重不断增加。前人研究表明<sup>[32-33]</sup>,断裂活动对渤海海域潜山优质储层的分布有明显的控制作用,裂缝发育程度与优

质储层的形成密切相关,而断裂活动是裂缝发育的重要影响因素之一,明确断裂演化过程对寻找研究区潜山潜在的油气储集单元具有一定的指导意义。

### 4 结论

1) 辽西低凸起南倾没端前古近系断裂类型主要有负反转断裂、伸展-走滑复合断裂和伸展断裂,断裂剖面组合样式主要包括叠瓦式、似花状、“Y”型以及多米诺式等,平面上主要呈NW向、NE-NNE向以及NE-NEE展布,平面组合样式以平行式和斜交式为主。

2) 辽西低凸起南倾没端前古近系断裂主要经历5期构造活动:印支期近NE-SW向挤压,形成NW向逆冲推覆体系;燕山早期NWW-SEE向挤

压,形成NNE向走滑逆冲断裂;燕山中期NW—SE向伸展,拆离作用诱导了强烈的伸展断陷作用,形成一系列NE—NNE向伸展断裂,同时使早期印支期NW向断裂发生负反转;燕山晚期NW—SE向挤压,部分燕山中期断裂发生正反转;喜山期,进入新生代断陷沉积阶段,部分燕山期断裂持续性活动表现出伸展-走滑性质。

3)印支期逆冲断裂对辽西低凸起南倾没端及邻区古生界起主要的剥蚀改造作用,局部挤压强烈区域古生界完全剥蚀;燕山期早—中期逆冲断裂发生反转和新生成的伸展断裂共同控制中生界沉积,燕山晚期挤压作用下,局部区域中生界被剥蚀殆尽;喜山期断裂对辽西低凸起南倾没端潜山地层的改造作用较弱。

## 参考文献

- [1] POWERS S. Reflected buried hills and their importance in petroleum geology[J]. Economic Geology, 1922, 17(4): 233-259.
- [2] 李军,刘丽峰,赵玉合,等.古潜山油气藏研究综述[J].地球物理学进展,2006,21(3):879-887.  
LI Jun, LIU Lifeng, ZHAO Yuhe, et al. A review of study on ancient buried hill reservoir [J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(3): 879-887.
- [3] CUONG T X, WARREN J K, BACH HO field, a fractured granitic basement reservoir, Cuu Long basin, offshore se Vietnam: a “buried-hill” play[J]. Journal of Petroleum Geology, 2009, 32(2): 129-156.
- [4] 薛永安,王奇,牛成民,等.渤海海域渤中凹陷渤中19-6深层潜山凝析气藏的充注成藏过程[J].石油与天然气地质,2020, 41(5):891-902.  
XUE Yongan, WANG Qi, NIU Chengmin, et al. Hydrocarbon charging and accumulation of BZ 19-6 gas condensate field in deep buried hills of Bohai Depression, Bohai Sea[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 891-902.
- [5] FOWLER W A Jr. Pressures, hydrocarbon accumulation, and salinities chocolate bayou field, Brazoria county, Texas[J]. Journal of Petroleum Technology, 1970, 22(4): 411-423.
- [6] YIELDING G, FREEMAN B, NEEDHAM D T. Quantitative fault seal prediction[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(6): 897-917.
- [7] PEACOCK D C P, SANDERSON D J. Geometry and development of relay ramps in normal fault systems[J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(2): 147-165.
- [8] ANDERSON R N, FLEMINGS P, LOSH S, et al. Gulf of Mexico growth fault drilled, seen as oil, gas migration pathway[J]. Oil & Gas Journal, 1994, 92(23): 97-104.
- [9] HOOPER E C D. Fluid migration along growth faults in compacting sediments[J]. Journal of Petroleum Geology, 1991, 14(S1): 161-180.
- [10] 谢玉洪,高阳东.中国海油近期国内勘探进展与勘探方向[J].中国石油勘探,2020, 25(1): 20-30.  
XIE Yuhong, GAO Yangdong. Recent domestic exploration progress and direction of CNOOC[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 20-30.
- [11] 薛永安.渤海海域垦利6-1油田的发现与浅层勘探思路的重大转变[J].中国海上油气,2021, 33(2): 1-12. DOI: 10.11935/j.issn. 1673-1506. 2021. 02. 001.  
XUE Yongan. Discovery of KL 6-1 oilfield and great change of shallow strata exploration ideas in Bohai sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(2): 1-12. DOI: 10. 11935/j. issn. 1673-1506. 2021. 02. 001.
- [12] 周心怀,余一欣,魏刚,等.渤海辽东湾海域JZ25-1S转换带与油气成藏的关系[J].石油学报,2008, 29(6): 837-840.  
ZHOU Xinhua, YU Yixin, WEI Gang, et al. Relationship between JZ25-1S transfer zone and hydrocarbon accumulation in Liaodongwan offshore of Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(6): 837-840.
- [13] 薛永安,李慧勇.渤海海域深层太古界变质岩潜山大型凝析气田的发现及其地质意义[J].中国海上油气,2018, 30(3): 1-9. DOI: 10. 11935/j. issn. 1673-1506. 2018. 03. 001.  
XUE Yongan, LI Huiyong. Large condensate gas field in deep Archean metamorphic buried hill in Bohai sea: discovery and geological significance[J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(3): 1-9. DOI: 10. 11935/j. issn. 1673-1506. 2018. 03. 001.
- [14] 李慧勇,牛成民,许鹏,等.渤中13-2大型整装覆盖型潜山油气田的发现及其油气勘探意义[J].天然气工业,2021, 41(2): 19-26.  
LI Huiyong, NIU Chengmin, XU Peng, et al. Discovery of Bozhong 13-2 Archean large monoblock volatile buried hill oilfield and its oil and gas exploration significance[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(2): 19-26.
- [15] 薛永安,张新涛,牛成民.辽西凸起南段斜坡带油气地质新认识与勘探突破[J].中国石油勘探,2019, 24(4): 449-456.  
XUE Yongan, ZHANG Xintao, NIU Chengmin. New geological understandings and prospecting breakthrough in slope zone of southern Liaozi uplift[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(4): 449-456.
- [16] ALLEN M B, MACDONALD D I M, XUN Zhao, et al. Early Cenozoic two-phase extension and late Cenozoic thermal subsidence and inversion of the Bohai Basin, northern China[J]. Marine and Petroleum Geology, 1997, 14(7/8): 951-972.
- [17] 李三忠,索艳慧,戴黎明,等.渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏[J].地学前缘,2010, 17(4): 64-89.  
LI Sanzhong, SUO Yanhui, DAI Liming, et al. Development of the Bohai Bay Basin and destruction of the North China Craton[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(4): 64-89.
- [18] 李伟,戚建庆,周东红,等.辽东湾坳陷辽西凸起的形成与演化[J].大地构造与成矿学,2019, 43(5): 911-923.  
LI Wei, QI Jianqing, ZHOU Donghong, et al. Formation and evolution of Liaoxi dome, Liaodong bay depression[J]. Geo-

- tectonica et Metallogenica, 2019, 43(5): 911-923.
- [19] 余一欣,周心怀,魏刚,等.渤海湾地区构造变换带及油气意义[J].古地理学报,2008,10(5):555-560.
- YU Yixin, ZHOU Xinhui, WEI Gang, et al. Structural transfer zones and their hydrocarbon significances in Bohai Bay area[J]. Journal of Palaeogeography, 2008, 10(5): 555-560.
- [20] 兰浩圆,李三忠,李玺瑶,等.华北东部印支期变形特征:对大陆深俯冲极性的启示[J].地学前缘,2017,24(4):185-199.
- LAN Haoyuan, LI Sanzhong, LI Xiayao, et al. Indosinian deformation in eastern North China: implications for continental deep subduction polarity[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(4): 185-199.
- [21] 赖旭龙,殷鸿福,杨逢清.秦岭三叠纪古海洋再造[J].地球科学(中国地质大学学报),1995,20(6):648-656.
- LAI Xulong, YIN Hongfu, YANG Fengqing. Reconstruction of the Qinling Triassic paleo-ocean[J]. Earth Science(Journal of China University of Geosciences), 1995, 20(6): 648-656.
- [22] LI Sanzhong, SUO Yanhui, LI Xiayao, et al. Mesozoic tectono-magmatic response in the East Asian ocean-continent connection zone to subduction of the Paleo-Pacific Plate[J]. Earth-Science Reviews, 2019, 192:91-137.
- [23] 漆家福,于福生,陆克政,等.渤海湾地区的中生代盆地构造概论[J].地学前缘,2003,10(增1):199-206.
- QI Jiafu, YU Fusheng, LU Kezheng, et al. Conspectus on Mesozoic basins in Bohai bay province [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(S1): 199-206.
- [24] 吴智平,侯旭波,李伟.华北东部地区中生代盆地格局及演化过程探讨[J].大地构造与成矿学,2007,31(4):385-399.
- WU Zhiping, HOU Xubo, LI Wei. Discussion on Mesozoic basin patterns and evolution in the eastern North China Block [J]. Geotectonica et Metallogenica, 2007, 31(4): 385-399.
- [25] CAO Xianzhi, LI Sanzhong, XU Liqing, et al. Mesozoic-Cenozoic evolution and mechanism of tectonic geomorphology in the central North China Block: constraint from apatite fission track thermochronology[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 114, Part 1:41-53.
- [26] LIU Junlai, GUAN Huimei, JI Mo, et al. Late Mesozoic metamorphic core complexes: new constraints on lithosphere thinning in North China[J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(6):633-638.
- [27] 刘俊来,DAVIS G A,纪沫,等.地壳的拆离作用与华北克拉通破坏:晚中生代伸展构造约束[J].地学前缘,2008,15(3): 72-81.
- LIU Junlai, DAVIS G A, JI Mo, et al. Crustal detachment and destruction of the North China craton: constraints from Late Mesozoic extensional structures[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(3): 72-81.
- [28] 张飞鹏,吴智平,李伟,等.黄骅坳陷印支-燕山期构造特征及其演化过程[J].中国矿业大学学报,2019,48(4):842-857.
- ZHANG Feipeng, WU Zhiping, LI Wei, et al. Structural characteristics and its tectonic evolution of Huanghua depression during the Indosinian-Yanshanian[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(4): 842-857.
- [29] 包汉勇,郭战峰,张罗磊,等.太平洋板块形成以来的中国东部构造动力学背景[J].地球科学进展,2013,28(3):337-338, 340-346.
- BAO Hanyong, GUO Zhanfeng, ZHANG Luolei, et al. Tectonic dynamics of eastern China since the formation of the pacific plate[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28 (3): 337-338, 340-346.
- [30] CHILDS C, NICOL A, WALSH J J, et al. The growth and propagation of synsedimentary faults[J]. Journal of Structural Geology, 2003, 25(4):633-648.
- [31] LEEDER M R. Tectonic sedimentology: sediment systems deciphering global to local tectonics[J]. Sedimentology, 2011, 58(1): 2-56.
- [32] 杜晓峰,刘晓健,张新涛,等.渤海海域太古界变质岩储层特征与形成控制因素[J].中国海上油气,2021,33(3):15-27. DOI: 10.11935/j. issn. 1673-1506. 2021. 03. 002.
- DU Xiaofeng, LIU Xiaojian, ZHANG Xintao, et al. Characteristics and controlling factors of Archean metamorphic reservoirs in Bohai sea area[J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(3): 15-27. DOI: 10.11935/j. issn. 1673-1506. 2021. 03. 002.
- [33] 徐长贵,杜晓峰,刘晓健,等.渤海海域太古界深埋变质岩潜山优质储集层形成机制与油气勘探意义[J].石油与天然气地质,2020,41(2):235-247,294.
- XU Changgui, DU Xiaofeng, LIU Xiaojian, et al. Formation mechanism of high-quality deep buried-hill reservoir of Archean metamorphic rocks and its significance in petroleum exploration in Bohai Sea area[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2): 235-247,294.

收稿日期:2021-12-31 改回日期:2022-04-25

(编辑:冯娜)