

# 济阳拗陷埕岛地区潜山断裂的特征及封闭性研究

石晓光

(中国石化胜利油田分公司物探研究院, 山东 东营 257022)

**摘要:** 断裂是埕岛地区潜山油气聚集成藏最主要的控制因素。利用高精度三维地震资料和钻井资料结合区域应力场分析,对潜山断裂体系进行系统的解剖;从局部应力场特征、断层性质、新生代活动强度和产状配置定性评价断层的封堵性,并形成基于断面两侧瞬时频率属性变化率的封闭性预测方法。研究表明,研究区主要发育NW向走滑伸展断层、NNE向左旋压扭断层和近EW向伸展断层,主要控山断裂将埕岛地区划分为西排山、中排山和东排山。成藏期不活动断裂封闭性好,新生代的断裂,增压段封闭性好,释压段及拉张断裂封闭性差。西排山断层封堵,油源风险大;中排山断层封堵性有一定风险;东排山整体封堵条件好,成藏条件有利。

**关键词:** 成因机制;断裂特征;断层封闭性;瞬时频率;潜山;埕岛地区

中图分类号:TE132 文献标志码:A

## Study on characteristics and sealing of buried hill faults in Chengdao area, Jiyang Depression

SHI Xiaoguang

(Shengli Geophysical Research Institute of SINOPEC, Dongying 257022, China)

**Abstract:** Faults are the most important controlling factor for oil-gas accumulation of buried hills in the Chengdao area. Combined with the regional stress field, the buried hill fault systems were systematically analyzed by using high-precision 3D seismic data and drilling data. The sealability of the fault was qualitatively evaluated from the characteristics of local stress field, fault properties, Cenozoic activity intensity, and occurrence configuration, and then it was formed a sealability prediction method based on the instantaneous frequency attribute change rate on both sides of the section. The research results show that the study area mainly develops NW strike-slip extensional faults, NNE left-handed compression-torsion faults, and near-EW extensional faults. The main mountain-controlling faults divide the Chengdao area into Xipai Mountain, Zhongpai Mountain, and Dongpai Mountain. The inactive faults during the accumulation period have good sealing properties, the active faults in the Cenozoic have good sealing properties in the pressurized section, and the pressure-releasing section and tensile fractures have poor sealing properties. The Xipai Mountain fault is blocked, and the oil source risk is high; the Zhongpai Mountain fault has a certain risk of plugging; the Dongpai Mountain fault has good overall sealing conditions and favorable accumulation conditions.

**Key words:** genetic mechanism; characteristics of the fault system; the fault sealing; instantaneous frequency; buried hill; Chengdao area

深层潜山油气勘探是我国近些年油气增储的主要领域<sup>[1-3]</sup>,并先后在渤海、塔里木、四川、长庆等油田取得重大突破。济阳拗陷是我国东部主要的含油气盆地之一,潜山油气勘探一直是拗陷内勘探重要目标,但由于受印支、燕山、喜山等多期次构造运动的影响,拗陷内潜山特征各异,构造样式复杂,从而导致对研究区的潜山油气成藏规律认识不清。埕岛地区是济阳拗陷潜山油气勘探的重点地区,受多期构造运动及郯庐断裂走滑活动的影响<sup>[4-8]</sup>,断裂体系复杂,而潜山油气藏的形成过程、富集规律

及控制因素与断裂体系密切相关。因此本文利用研究区的高精度三维地震资料,结合钻井资料及区域构造应力场的最新研究成果,对潜山断裂特征进行精细解剖,并从新生代活动强度、局部应力场的

收稿日期:2021-01-28;改回日期:2021-06-22。

作者简介:石晓光(1980—),硕士,高级工程师,从事综合油气勘探工作。E-mail:liulianggang.slyt@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项“渤海湾盆地精细勘探关键技术(三期)”(2016ZX05006)资助。

性质、岩性产状配置、断层性质等多因素对潜山断层进行定性评价,最后探索了基于断层两侧瞬时频率属性差异性的断层封闭性预测方法,明确了埕岛潜山断裂特征及各类断层的封堵性,为研究区潜山油气藏下一步的勘探提供依据。

## 1 区域地质概况

埕岛地区指济阳拗陷东北部,位于渤海湾盆地北低凸起的东南端、NW向构造体系和NNE向构造体系的交汇处,其南西侧为埕北断层,沙南凹陷与渤中凹陷古近系自北东侧超覆于凸起之上,南东侧以埕北30南断层与黄河口凹陷分割,南部与桩海、桩西潜山相连<sup>[9]</sup>,平面上呈现为倒三角形。依据研究区主要控山断裂的分割效应,可将埕岛地区划分为西排山、中排山和东排山三部分,西排山位于埕北断层与埕北20断层之间,整体沿NW向展布;中排山位于埕北20断层与埕北30北断层之间,整体为“倒梯形”;东排山位于埕北30北断层和埕北30南断层之间,为自SW向NE倾没的“四边形”(图1)。受印支、燕山、喜山等多期构造运动及郯庐断裂走滑活动的影响,西、中、东排山内部发育多期不同性质的断裂活动,不同性质、不同方向断裂的相互叠加<sup>[7]</sup>,导致埕岛地区差异隆升剥蚀,潜山内幕层系复杂多样<sup>[8]</sup>。

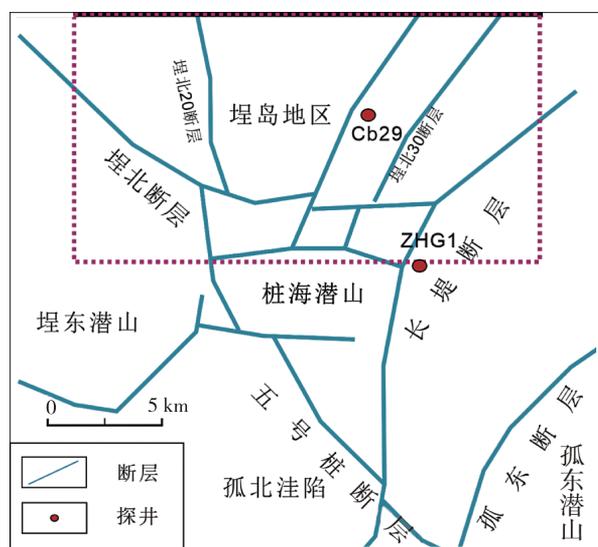


图1 埕岛地区构造纲要

## 2 潜山断裂的成因机制

### 2.1 中生代地质背景

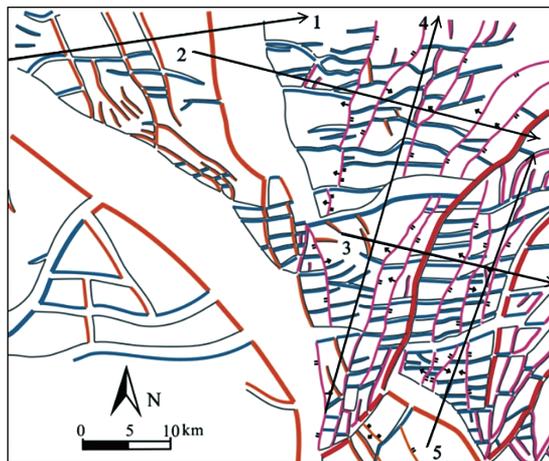
早一中三叠世,华北地区为一大型统一的拗陷

盆地<sup>[4]</sup>,晚三叠世,扬子板块与华北板块剪刀式的碰撞与拼接<sup>[10-11]</sup>,对华北地区的构造格局产生了重要的影响<sup>[12-14]</sup>。济阳拗陷整体处于抬升剥蚀状态,三叠系被剥蚀殆尽,并发育一系列NW—NWW向的褶皱与逆冲断层<sup>[5-6]</sup>。早一中侏罗世,华北地区仍受扬子板块与华北板块碰撞挤压的影响,但挤压应力明显减弱,同时太平洋板块向NNW向的俯冲消减作用开始增强,但未影响华北地区的构造格局<sup>[15]</sup>,中国东部进入古亚洲域向滨太平洋构造域演化的构造阶段<sup>[16-19]</sup>。晚侏罗世—早白垩世,受太平洋板块持续俯冲的影响,太平洋板块活动取代了扬子板块、西伯利亚板块活动对华北地区构造演化的控制地位,滨太平洋构造域基本形成。太平洋板块沿NNW向的俯冲至欧亚板块之下,使得NNE向郯庐断裂发生强烈的左旋走滑。

与此同时,中国东部岩石圈强烈减薄,伴随地幔柱活动与软流圈隆升。在这两种机制作用下,中国东部进入大规模裂陷发育阶段,早期形成的NW向逆断层发生构造反转,变为正断层,在华北地区形成了一系列断陷盆地(如胶莱盆地、苏北盆地、南黄海盆地等),沉积了较厚的地层并伴有强烈的火山活动。晚白垩世,太平洋板块俯冲速率增加至200 mm/a<sup>[20]</sup>,导致我国东部形成高大造山带<sup>[21]</sup>的同时,在华北地区形成近EW向的挤压应力场,济阳拗陷东北部地区、走向近SN向挤压构造的存在是该时期应力场的良好证据<sup>[22]</sup>;晚白垩世晚期,太平洋板块转变为向北低速运动,导致海沟后退与板片后撤,由于海沟后退矢量转变为南,华北克拉通东部出现近SN向拉张<sup>[22]</sup>。

### 2.2 中、新生代构造应力场与潜山内幕断层形成的关系

晚三叠世,在扬子板块与华北板块“剪刀式”碰撞形成NE—SW向的挤压应力作用下,华北地区发育形成了大量的NW向逆断层<sup>[5-6,23]</sup>,埕岛地区的埕北断层及埕北20断层就形成于该时期,其逆冲活动导致断层上盘靠近断层的区域发生强烈剥蚀,而缺失石炭—二叠系,甚至奥陶系部分被剥蚀,造成靠近断层处古生界薄而远离断层处古生界厚的特征(图2)。



1- NNE向主走滑断层      2- NW向反向走滑伸展断层  
 3- NNE向同向次级走滑断层      4- NE向、近EW向伸展断层  
 5- 地层剖面位置

1:图3地震剖面位置;2:图4a地震剖面位置;3:图4b地震剖面位置;4:图5a地震剖面位置;5:图5b地震剖面位置

图2 埕岛地区下古生界顶面断裂体系

虽然NW向潜山内幕断层断至太古界,但断层上盘古生界未出现剥蚀减薄的现象,因此该组断裂在晚三叠世的NE—SW向挤压应力下未发育,NNE向断层与近EW向断层与NW—SE向挤压应力场不符,因此,晚三叠世,埕岛地区仅发育NW向的埕北断层和埕北20断层,潜山内幕断层尚未发育。早—中侏罗世,继承晚三叠世的构造应力场,但整体变弱,华北地区整体拗陷,研究区沉积了一套河湖相含煤地层,地层沉积具有披盖式、NW向成带分布的特点(图3)。

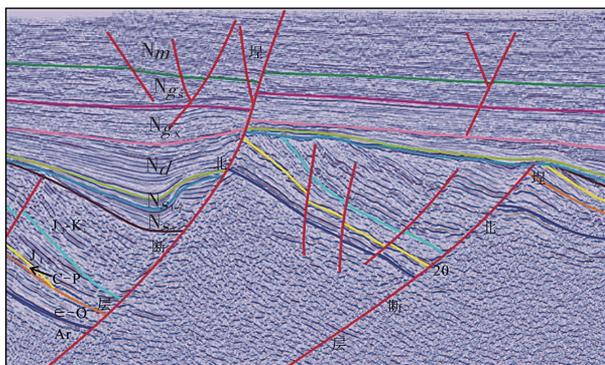
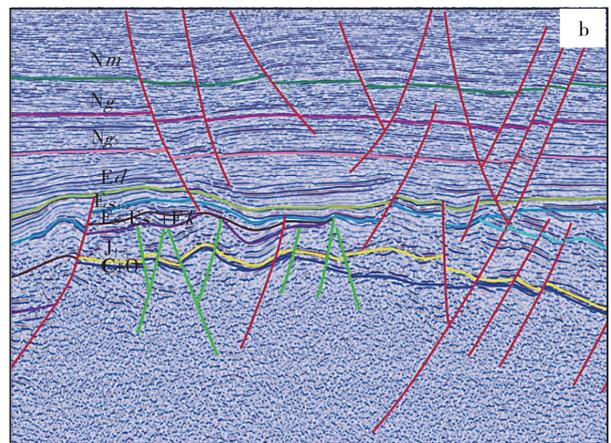
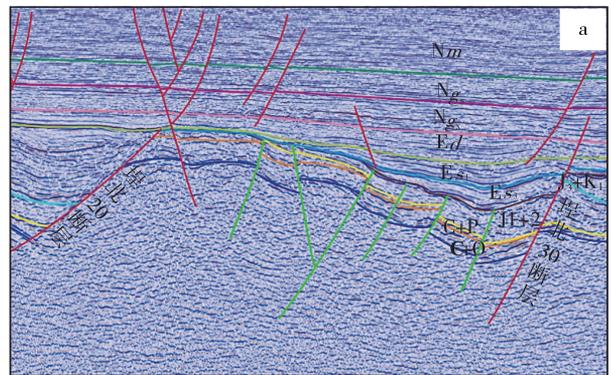


图3 过埕岛西排山的NEE向地震剖面(图2剖面1)

晚侏罗世,伊泽奈岐板块的运动方向突然改变为NNW向,且以300 mm/a的速度俯冲于东亚大陆之下<sup>[20]</sup>,郯庐断裂发生大规模的左旋走滑,并在中国东部产生压扭性构造应力场。受此影响,紧邻郯庐断裂的埕岛地区新生NNE向左旋走滑断裂,同时先前NW向断裂右旋走滑活动。NNW向的埕北20

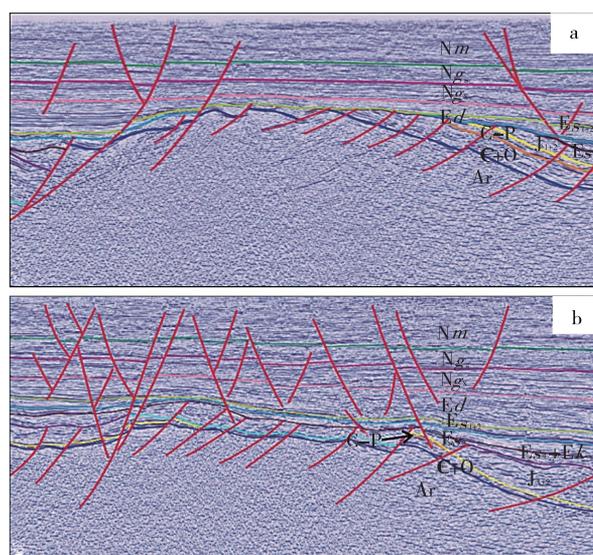
断层与NNE向的埕北30北断层所夹的中排山处于走滑断裂派生的共轭增压区,NNE埕北30北断层与埕北30南断层之间东排山处于走滑断裂叠接增压区,加之整个中国东部压扭性构造应力场的影响,在中排山和东排山内部形成了大量的NNE向压扭走滑断层,剖面上表现为高角度逆断层(图4),东排山NNE向断层向海域延伸,断层两盘地层厚度发生明显变化,表现出走滑断层特有的海豚效应,中排山NNE向断层向海域延伸,断层倾向发生改变,表现出走滑断层特有的丝带效应。NW向埕北断层与NNW向埕北20断层之间的西排山,在走滑作用之下新生少量的走滑拉张断层,剖面上表现为高角度(近直立)正断层(图3)。



a.图2剖面2; b.图2剖面3

图4 过埕岛中排山和东排山的NWW向地震剖面

在晚白垩世早期近EW向挤压、晚期SN向伸展的应力场作用下,埕岛地区整体抬升,遭受强烈剥蚀。部分形成于晚侏罗—早白垩世的NNE向的走滑断层继续压扭活动,形成挤压背斜(图4);同时新形成一系列近EW向、倾向南的铲式或板式正断层(图5)。



a.图2剖面4; b.图2剖面5

图5 过埕岛中排山和东排山的NNE向地震剖面

### 3 断裂体系特征

埕岛地区潜山主要发育NW向、NNE向及近EW向断裂,其中NW向断裂仅在西排山发育,NNE向断裂则在中排山和东排山发育,近EW向断裂在研究区广泛分布,不同方向断裂相互切割,构造研究区呈“北撒南敛”的网状断裂体系(图2)。

#### 3.1 NW向断裂体系

埕岛地区潜山内幕NW向断裂较少,仅在西排山发育,部分断裂与埕北断层平行,规模较小;部分断裂与埕北20断层近乎平行,与埕北断层小角度相交(图2)。剖面上,NW向内幕断裂为板式正断层,倾向NE或SW,切割太古界至下白垩统,但对寒武系—奥陶系和中、下侏罗统的沉积无明显的控制作用,仅控制上侏罗统—下白垩统的沉积(图3)。

#### 3.2 NNE向断裂体系

NNE向断裂在中排山和东排山广泛发育,且被近EW向断层切割。平面上该组断裂与NNE向的埕北30北和埕北30南断层近于平行(图2);剖面上为高角度逆断层,多数倾向SW,仅一条倾向NE,断层同样切割太古界至下白垩统。

#### 3.3 近EW向断裂体系

该组断裂在埕北地区广泛发育,对NW向和NNE向断裂具有明显的切割作用(图2)。剖面上,该组断裂多为铲式或板式正断层,倾向南,多数断层仅切割太古界至下白垩统,但对寒武系—奥陶系和中、下侏罗统的沉积无控制作用,仅控制上侏罗统—下白垩统的沉积,切割至明化镇组的断层对新

生界各组段的沉积具有明显的控制作用(图5)。

## 4 断裂体系的封闭性

影响断层封闭性的地质因素很多,如断裂带填充物的胶结和成岩作用、断层两盘对置的岩性、断裂带的泥岩涂抹、断层的力学性质、断面正应力、断层产状配置等<sup>[24]</sup>。埕岛地区潜山储集层会出现碳酸盐岩与碳酸盐岩或砂岩对接的关系,不宜采用泥岩涂抹与岩性匹配评价其封闭性。本文从新生代活动强度、局部应力场的性质、岩性产状配置、断层性质这4个因素对研究区潜山断层进行定性评价,同时探索了基于断层两侧瞬时频率属性差异性的封闭性预测方法,预测潜山断层的封堵性。

### 4.1 断层圈闭的单因素分析

#### 4.1.1 新生代活动强度

断层活动强度可以用断层断距、断层年龄和断层活动速率来表征。断距大,断裂带物质遭受的碾磨作用强,容易形成断层泥,横向封闭性好。但如果断距大于区域盖层的厚度,其纵向封闭性会很差;若断距太小,断面不易形成封闭物质,横向封闭性会很差<sup>[25]</sup>。在相同条件下,生长断层比非生长断层的封闭性要好,因为未充分固结的泥岩很可能沿断面涂抹,利于形成薄膜封闭。年轻断层或重新复活的断层,尤其在断开不整合面或浅部储集层时,近代活动性越大纵向封闭能力越差。通过断层断距、断层年龄和断层活动速率的计算,结果表明,研究区埕北20断层在新生代停止活动,在其上升盘目前已经发现SHG1等多个古生界的探明储量块,证明其封闭性好,有利于封堵油气;而埕北30断层、长堤断层活动小,断层封堵性中等;对于埕北断层、ZH104南断层、桩南断层活动强度大,封堵性差,有利于油气运移。

#### 4.1.2 局部应力场性质

渤海地区进入新生代以来,郯庐断裂带由左行走滑转为右行走滑,埕岛地区的应力场由NE—SW拉张转变为NW—SE拉张,加之右旋走滑作用的影响,使得局部应力场发生变化,郯庐断裂左旋派生出叠加增压区、叠接释压区、共轭释压等区域应力场。其中埕北30北断层、埕北30南断层处于叠接增压区,封堵性好;ZH104南断层、桩海断层处在叠接释压区,封堵性中等。完钻的CB309井位于埕北30断层南部的叠接增压区,获得百吨高产,断层两侧都是古生界奥陶系地层对接,证实断层封堵有利。

#### 4.1.3 岩层产状配置

正断层与其两侧岩层产状的配置关系可分为同向正断层、反向正断层、屋脊式正断层、反向屋脊式正断层几种组合形式。本文通过对研究区精细的油藏解剖表明,油藏分布特征及断层的封闭性特征是有规律可循的,通常主断裂多为同向正断层,封闭性较差,为油气向下盘地层运移提供了可能性;分支断层多为反向正断层,封闭性较好,为油气在下盘地层的成藏提供了条件。

通过对埕岛地区潜山成藏井附近的断层产状配置关系进行统计分析,结果表明除埕北30南断层岩层产状配置为同向正断层、封堵性中等外,其余断层为反向正断层及屋脊式正断层,均封堵性好(表1)。长堤断层上升盘的长堤潜山主要发育的同向正断层,基本是只见油气显示未能聚集成藏,如构造高部位的ZGX66、ZG12等井。

表1 埕岛地区潜山主要断层岩层产状配置评价

断层	岩层产状配置	封闭性
埕北断层增压段	屋脊式断层	好
埕北断层释压段	屋脊式断层	好
埕北20断层	反向正断层	好
埕北30北断层	屋脊式正断层	好
埕北30南断层	同向正断层	好
长堤断层增压段	反向正断层	好
长堤断层释压段	反向正断层	好
桩海104南断层	反向正断层	好

#### 4.1.4 断层性质

断裂性质是影响断层封闭性的重要因素。通常情况下压扭性断层封闭性最好,走滑断层较好,张性断层次之。针对埕岛地区潜山而言,受郯庐断裂带的影响,NW向埕北断层左旋走滑伸展断层的弯曲段派生挤压或者拉张作用,挤压区封堵性较好,而NNE向右旋伸展走滑断层,在平面上表现为“S”型弯曲,断层中部具有走滑挤压的性质,因此断层中部封堵性好,NE向伸展断层的封堵性则比较差(表2)。

表2 埕岛地区主要断层性质评价

断层	断层性质	封闭性
埕北30断层	张扭	好
长堤断层	张扭	好
桩海104南断层	拉张	差
埕北断层	扭张	中等

#### 4.2 基于断层两侧瞬时频率属性差异性的封闭性预测

断层两侧的数据体指的是在原始SEGY数据中,存在于断层两侧的数据体。已知断层数据,需先从SEGY数据中提取出其两侧的数据来,计算这部分数据体的属性,包括振幅、均方根振幅比、瞬时振幅、瞬时相位、瞬时频率等,进而分析两侧数据的属性变化规律,寻找与封堵性之间的关系。一般情况下在储层段由于油气的存在会导致高频成分的衰减。如果断层封闭且含有油气,那么高频成分衰减的可能性就大,会导致封闭的地方瞬时频率会下降<sup>[26]</sup>。研究区下古生界储层以碳酸盐岩为主,除了不整合面为连续的强反射地震特征,内幕为短轴状的杂乱反射,潜山断裂两侧地层频率的变化主要与所含流体有关,因此本文认为通过开展基于断层两侧地震资料瞬时频率属性变化率能在一定程度上预测研究区潜山断裂的封闭性。

首先基于三维地震资料开展断层面的构造解释,形成断层平面构造图。提取断层面两侧瞬时频率属性值,将断面两侧瞬时频率属性值进行差值运算,得到断面两侧瞬时频率属性差;再利用解释的断层面构造图,计算断层面的倾角数据,并进行正弦值计算,得到断层面的倾角正弦值;最后利用对接型封堵断层评价公式进行封堵性评价参数的计算。

$$F = |A - B| \sin(\theta) / A \quad (1)$$

其中: $F$ 为封堵参数; $A$ 为储层段瞬时频率值,Hz; $B$ 为储层对接段瞬时频率值,Hz; $\theta$ 为断面倾角,(°)。

在计算出封堵性参数的基础上,利用已知断层油藏进行标定,明确研究区封堵参数 $F$ 的值域范围,即确定断层封堵时参数 $F$ 的大小;计算沿断层的封堵评价参数 $F$ 平面分布图,明确在空间上断层的封堵特征。

本文利用上述方法对埕岛地区潜山断裂的封堵性进行预测,其中图6为CBG14西断层计算出的封堵评价参数 $F$ 平面分布图,红黄色区域为断层封堵性相对较好的区域,蓝色区域为封堵性相对较差的区域。CBG14井位于封堵性好的红色区域,成藏条件良好并获得了百吨以上的高产工业油流,CBG14井证实封堵参数 $F$ 大于0.5时断层具有较好

的封闭性。

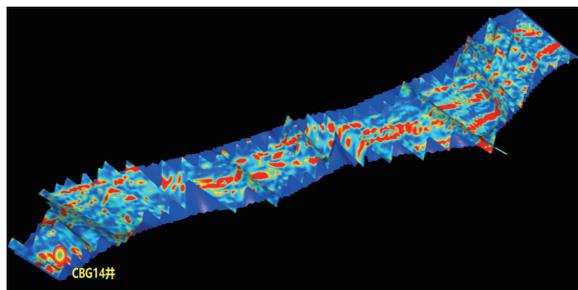


图6 CBG14井西断层断面瞬时频率变化率属性研究表明断层封闭性与新生代活动强度、局部

应力场的性质、岩性产状配置、断层性质等多种因素相关,仅考虑单一因素来评价断层的封闭性是不全面的。本文从影响断层封闭性的诸多因素入手,对埕岛地区潜山断裂的封闭性进行系统评价,并形成了基于断层两侧瞬时频率属性差异性的封闭性预测方法。预测结果表明:成藏期不活动断裂封闭性好;新生代活动断裂,增压段封闭性好,释压段及拉张断裂封闭性差。从整个研究区看(图7):西排山断层封堵,油源风险大;中排山断层封堵性有一定风险;东山整体封堵条件良好。

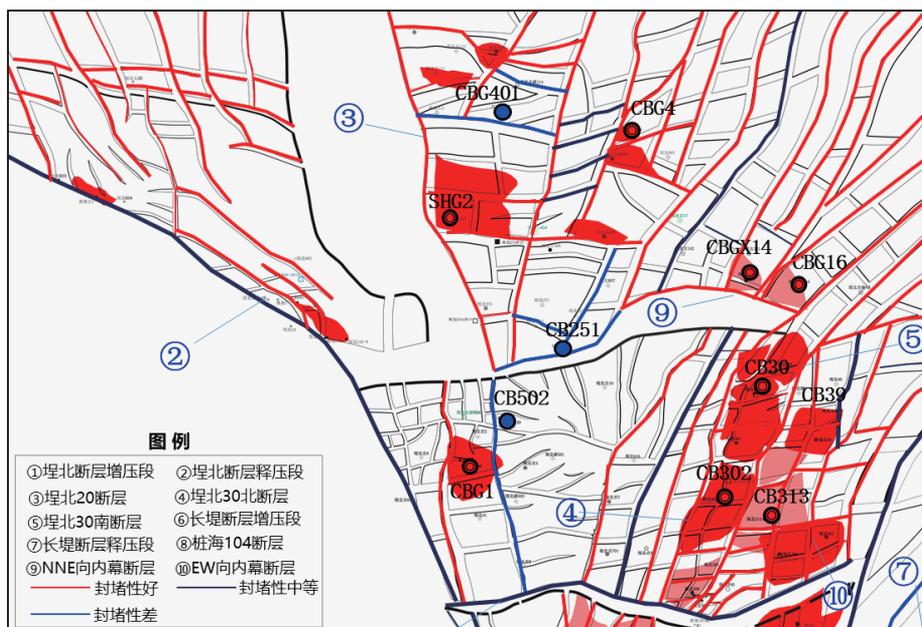


图7 埕岛地区下古生界断层封堵性综合评价

### 5 结论

(1)埕岛潜山主要发育NW向、NNE向和近EW向三组断裂体系,NW向断裂仅在西排山发育,NNE向断裂在中排山和东排山均有发育,近EW向断裂则广泛发育在埕岛地区。

(2)NW向内幕断裂为同向埕北断层晚侏罗世一早白垩世右旋走滑活动过程中形成的走滑伸展断层;NNE向断层则为郯庐断裂左旋走滑活动和区域挤压应力场下形成的左旋压扭断层;近EW向断裂的形成与晚白垩世晚期近SN向伸展应力场有关。

(3)形成针对潜山断裂封堵性多因素定性评价方法,并探索基于断层两侧瞬时频率属性差异性的封堵性预测。研究结果表明:埕岛地区西排山断层封堵,油源风险大;中排山断层封堵性有一定风险;

东排山整体封堵条件良好,成藏条件有利。

#### 参考文献:

[1] 施和生,王清斌,王军,等.渤中凹陷深层渤中19-6构造大型凝析气田的发现及勘探意义[J].中国石油勘探,2019,24(1):36-45.

[2] 管树巍,张春宇,任荣,等.塔里木北部早寒武世同沉积构造——兼论寒武系盐下和深层勘探[J].石油勘探与开发,2019,46(6):1075-1086.

[3] 胡勇,彭先,李骞,等.四川盆地深层海相碳酸盐岩气藏开发技术进展与发展方向[J].天然气工业,2019,39(9):48-57.

[4] 马杏垣,刘和甫,王维襄,等.中国东部中、新生代裂陷作用和伸展构造[J].地质学报,1983,57(1):22-32.

[5] 吴智平,李伟,任拥军,等.济阳拗陷中生代盆地演化及其与新生代盆地叠合关系探讨[J].地质学报,2003,77(2):280-286.

[6] 李伟,吴智平,赵文栋.渤海湾盆地燕山期构造特征

- 与盆地转型[J].地球物理学进展,2010,25(6):2068-2077.
- [7] 马立驰,王永诗,杨贵丽.垦东一埕岛构造带古近纪断层活动特征[J].油气地质与采收率,2015,22(3):42-46,51.
- [8] 罗霞.埕岛地区古生界构造和地层多样性及形成机制[J].西南石油大学学报(自然科学版),2019,41(2):1-9.
- [9] 张在振.埕岛地区前中生界潜山构造特征及其控藏作用[D].山东:中国石油大学(华东),2016.
- [10] LI S Z, KUSKY T M, WANG L, et al. Collision leading to multiple-stage large-scale extrusion in the Qinling orogeny: insights from the Mianlue suture[J]. *Gondwana Research*, 2007, 12(1/2): 121-143.
- [11] LI J H, ZHANG Y Q, DONG S W, et al. Structural and geochronological constraints on the Mesozoic tectonic evolution of the north Dabashan zone, South Qinling, central China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 64: 99-114.
- [12] DAVIS G A, ZHENG Y D, WANG C, et al. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, northern China [M]//HENDRIX M S, DAVIS G A. Paleozoic and Mesozoic tectonic evolution of central and eastern Asia: from continental assembly to intracontinental deformation. USA: Geological Society of America, 2001: 171-197.
- [13] LIU J, ZHAO Y, LIU X M, et al. Rapid exhumation of basement rocks along the northern margin of the North China craton in the early Jurassic: evidence from the Xiabancheng Basin, Yanshan Tectonic Belt [J]. *Basin Research*, 2012, 24(5): 544-558.
- [14] 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.
- [15] 杨超,陈清华,吕洪波,等.济阳拗陷晚古生代一中生代构造演化特点[J].石油学报,2008,29(6):859-864.
- [16] 董树文,张岳桥,龙长兴,等.中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J].地质学报,2007,81(11):1449-1461.
- [17] 张岳桥,董树文,赵越,等.华北侏罗纪大地构造:综评与新认识[J].地质学报,2007,81(11):1462-1480.
- [18] WANG Y, ZHOU L Y, LUO Z H. Kinematics and timing of continental block deformation from margins to interiors[J]. *Terra Nova*, 2017, 29(4): 253-263.
- [19] 王瑜,孙立新,周丽云,等.燕山运动与华北克拉通破坏关系的讨论[J].中国科学(地球科学),2018,48(5):521-535.
- [20] 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.
- [21] ZHANG L M, WANG C S, CAO K, et al. High elevation of Jiaolai Basin during the late Cretaceous: implication for the coastal mountains along the East Asian margin [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 456: 112-123.
- [22] 朱光,谢成龙,向必伟,等.洪镇变质核杂岩的形成机制及其大地构造意义[J].中国科学(D辑:地球科学),2007,37(5):584-592.
- [23] 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[J].高校地质学报,2004,10(3):405-417.
- [24] 陈永峤,周新桂,于兴河,等.断层封闭性要素与封闭效应[J].石油勘探与开发,2003,30(6):38-40.
- [25] 刘书会,赵铭海,王学宏,等.利用地震地质信息综合预测断层的封堵特性[J].河南石油,2003,17(3):1-3.
- [26] 付光,付晓飞,孟庆芬.车古20潜山主要断层垂向封闭性评价[J].新疆石油地质,2004,25(2):134-136,140.

(编辑 杨芝文)