

任健, 杨波, 陈兴鹏, 等. 渤海新近纪—第四纪隐性走滑断层发育机理与判识方法探究[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(12): 11-17.

REN Jian, YANG Bo, CHEN Xingpeng, et al. Development mechanism and identification methods of subtle strike-slip faults in the Neogene-Quaternary of Bohai Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(12): 11-17.

渤海新近纪—第四纪隐性走滑断层 发育机理与判识方法探究

任健¹, 杨波¹, 陈兴鹏², 裴小刚¹, 高曦龙¹, 郭颖¹

(1 中海石油(中国)天津分公司渤海石油研究院, 天津 300452; 2 山东石油化工学院石油工程学院, 东营 257061)

摘要:渤海海域新近系—第四系地层中发育大量地震资料中难以识别的“隐性走滑断层”, 其断面陡立、断续分布、断距较小。在油气勘探过程中, 隐性断层认识失败导致圈闭失效、勘探失利的现象时有发生, 因此亟需从断层发育机理上重新认识且有效刻画隐性走滑断层。基于渤海新近纪—第四纪构造背景以及三维地震资料, 对隐性走滑断层发育机理以及识别方法进行探究, 结果表明, 渤海新近纪—第四纪隐性走滑断层为先存断层斜向拉伸构造背景之下发育的位移分异式走滑断层, 不受基底走滑断层直接控制; 先存边界断层与斜向拉伸方向夹角 α 、先存边界断层与斜拉伸展断层夹角 θ 以及走滑分异概率 P 之间存在特定关系, 利用这一原理可以判断分异型隐性走滑断层是否发育, 并取得了良好的应用效果。本研究明确了渤海新近纪—第四纪隐性走滑断层发育机理与判识方法, 为油气勘探提供了重要指导。

关键词:隐性走滑; 走滑分异; 分散式变形; 斜向拉伸; 先存断裂; 新近纪—第四纪; 渤海海域

中图分类号: P736; P738

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.128

0 引言

“隐性断层”的概念首先由中国学者明确提出^[1-3], 指的是在区域或局部应力场、基底断裂活动等因素影响下, 产生于沉积盆地盖层中的弱变形构造带或断裂趋势带, 属于断裂带形成演化早、中期阶段的产物, 由于缺乏明显的断裂面(带)和显著的位移而难以识别。实际上, 隐性断层是断裂演化的必然过程, 沙箱物理模拟和数值模拟实验均揭示了这一断裂带形成的早期过程^[4-6], 国内学者在鄂尔多斯盆地的裂缝控藏研究中也提出过基底断裂“隐性活动”

相关概念^[7-8]。在实际的油气勘探过程中, 可以将“隐性断层”理解为因断距过小、断层两侧波阻抗差较小等原因导致在地震资料中特征不明显, 但对圈闭的形成、沉积体系的展布以及油气运移具有控制作用的一类断层。值得指出的是, 隐性断层中的“隐性走滑断层”因其水平位移错断地层的形变方式以及断面陡立产状, 相较“隐性倾滑断层”在地震资料中更难识别。近年来, 渤海湾盆地对“隐性走滑断层”进行了大量相关研究^[9-14], 总结出了地层产状突变性、地震反射特征变化性、断层掉向分带性以及油气成藏差异性隐性走滑断层识别方法, 在地震资料改善方面也提出了三维体曲率属性分析、最大似然属性技术、断层增强技术等一系列技术方法。但是, 随着近年来渤海海域浅层新近系油气勘探程度的加深, 新近纪—第四纪隐性走滑断层识别不清导致地质勘探失利现象时有发生, 如钻井前推测的同一圈闭出现“一油一水”现象, 或者钻井前判识由走滑断层分隔的 2 个圈闭出现油水界面一致而导致勘探失利的现象。鉴于此, 有必要结合渤海湾

收稿日期: 2024-05-28

资助项目: 中海石油(中国)有限公司“七年行动计划”重大科技专项“渤海油田稳产 3000 万吨, 上产 4000 万吨关键技术研究”(CNOOC-KJ 135 ZDXM 36 TJ); 中国海洋石油有限公司综合科研项目“渤海大中型天然气田形成条件、富集规律与勘探方向研究”(KJZH-2024-2107)

第一作者: 任健(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事构造石油地质方面的研究工作。E-mail: renjian5@cnooc.com.cn

盆地新近纪—第四纪构造发育背景,提出有针对性的隐性走滑断层识别方法。

本文结合渤海海域新近纪—第四纪先存断裂斜向拉伸构造背景,提出大部分该时期隐性走滑断层为分散式变形过程中形成的位移分异式走滑,并提出有针对性的隐性走滑发育概率预测方法,为油气勘探过程中隐性走滑断层的识别提供了可以借鉴的方案。

1 研究区概况

渤海位于渤海湾盆地海域地区,为发育在华北克拉通之上的陆内裂陷-拗陷盆地^[15-16],二级构造单元可以进一步划分为 9 个凹陷,12 个凸起(图 1)。新生代为盆地主要发育期,自下而上发育有古近系的孔店组、沙河街组(四段—一段)、东营组(三段—一段),新近系的馆陶组(下段+上段)、明化镇组(下段+上段)以及第四系的平原组,本文研究的隐性走滑断层主要发育期为新近系—第四系沉积期。

中生代—新生代古近纪,渤海经受大规模地幔

上涌引发的拉张裂陷以及印度板块与欧亚大陆碰撞、太平洋板块向欧亚大陆俯冲导致的郯庐断裂强烈走滑活动的影响^[17-19],在伸展-走滑双动力模式的复合作用下,经历了孔店组—沙三段沉积期的强断陷期以及沙二段—东营组沉积期的断拗期。这一时期,郯庐断裂与张-蓬断裂等巨型走滑断裂系统在渤海海域交汇,发育了 NE、NNE、NW 和近 EW 向等走向不同、数量众多的走滑-伸展断裂体系。

新近纪—第四纪拗陷期,渤海发生裂后热沉降,主体的沉积沉降中心已经迁移至渤中凹陷。大量的断裂特征分析以及断裂活动性分析均表明^[20-22],该时期渤海主要受到近 SN 向伸展应力背景控制,前述的不同走向、数量众多的中生代—古近纪先存断裂在该时期活化,形成了典型的斜向拉伸构造体系。先存断裂走向与新近纪—第四纪拉伸方向的夹角决定了走滑-伸展分量的相对大小,夹角越大,走滑分量越小、伸展分量越大,不同的伸展-走滑分量进而控制了不同的斜向拉伸构造样式。本文对渤海的新近纪—第四纪隐性走滑断裂分析也基于该斜向拉伸背景。

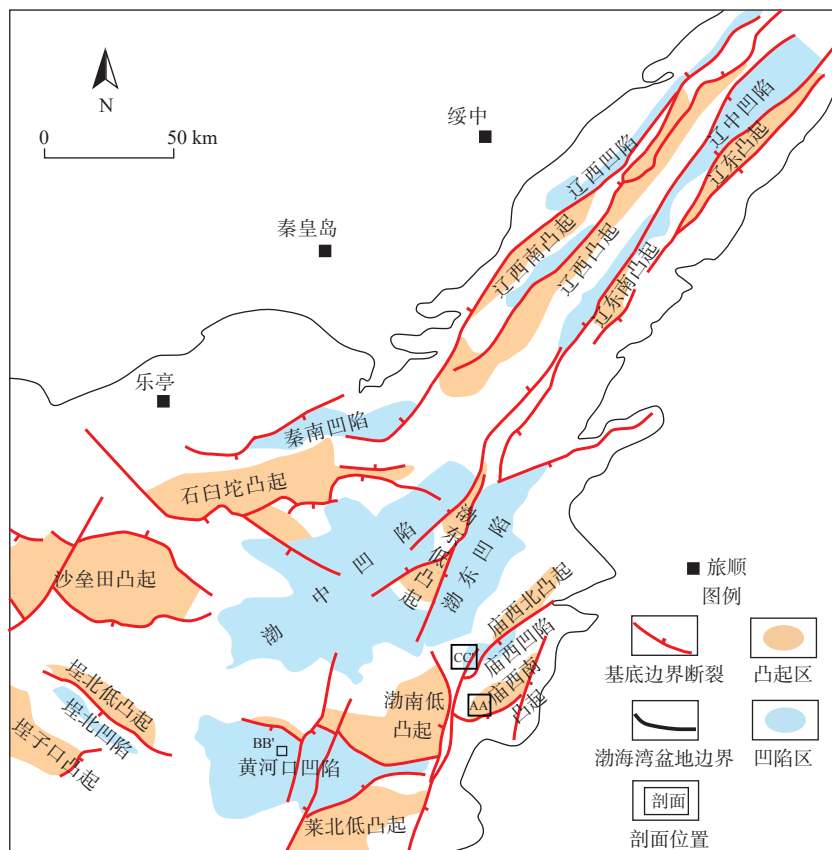


图 1 研究区构造及位置

Fig.1 Tectonic background and location of the study area

2 隐性走滑断层特征发育机制

2.1 隐性走滑断层特征

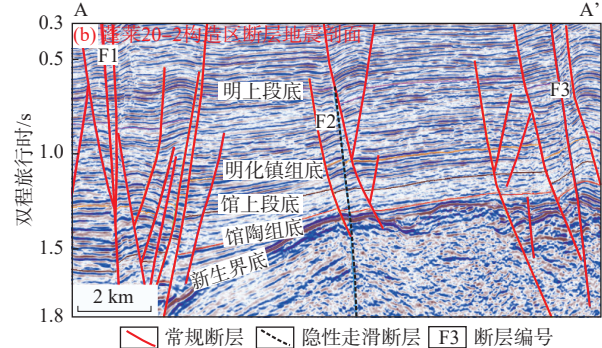
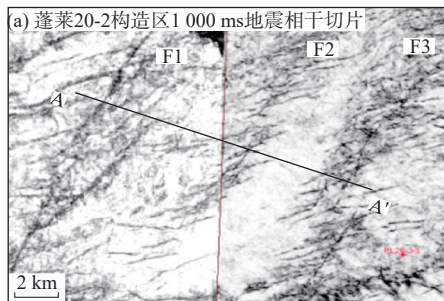
油气勘探实践证明, 新近系隐性走滑断层在渤海海域均有分布, 但在靠近大型先存走滑断裂的附近分布更加密集, 尤其在渤海东南部邻近庐走滑断裂带的庙西南凸起、渤南低凸起、庙西南凹陷及其周边地区有着广泛的分布, 该区域的蓬莱 20-2、垦利 9-1、渤中 36-1、渤中 34-1 等油田均在一定程度上受隐性走滑断层控制。

在平面上, 已经通过油气勘探验证的隐性走滑断层呈 NE、NNE 或近 NS 向展布, 大多数平面延伸不远或呈现断续分布, 单段延伸长度在 2 km 以内。隐性走滑与伸展断层在平面上相互交切, 但两者之间的夹角可能在较大范围内变化, 如蓬莱 20-2 区, 隐性走滑断层与雁列伸展断层的夹角为 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ (图 2a), 而渤中 34-1 地区的夹角接近 80° (图 3a)。

在剖面上, 新近纪—第四纪隐性走滑断层可根

据切穿层位多少分为 2 种类型, 第 1 种是贯穿新近系与古近系甚至潜山面呈陡立状断层, 单支发育或与周边伸展断层搭接 (图 2b); 第 2 种是悬浮在新近系地层当中呈陡立状断层, 未达古近系, 单支直立或与周边伸展断层搭接 (图 3b)。这 2 种类型的隐性走滑断层均为新近纪—第四纪时期形成, 第 1 种类型虽切穿潜山顶面, 但具有走滑变形上强下弱特征, 潜山面甚至并无明显变形特征, 因此, 并非先存走滑断层复活形成的继承性走滑断层, 而是新近纪—第四纪时期新生断层, 这一点与传统认识并不相同^[9]。

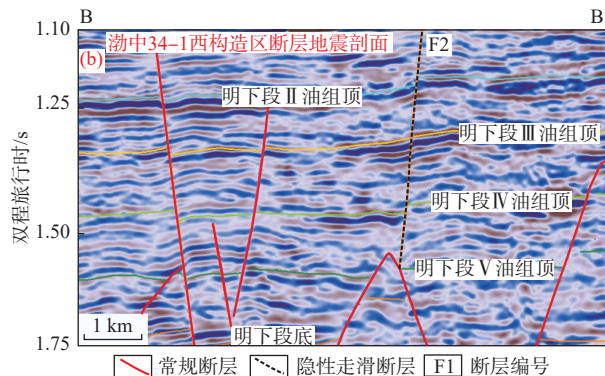
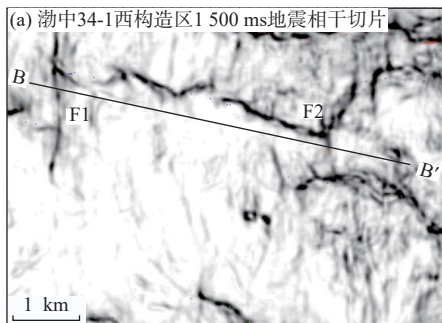
需要指出的是, 渤海新近纪—第四纪断层均为在斜向拉伸背景下形成的走滑-伸展断层, 并不发育典型的纯走滑及压扭走滑构造^[21]。所谓的“走滑断层”, 其周边只发育伸展断层, 而逆断层等真正的走滑派生构造极为罕见。这些伸展断层不是走滑断层的派生断层, 两者之所以伴生, 是伸展断层派生走滑断层。在此背景下形成的走滑断层断距必然较小, 走滑强度不足, 多以隐性走滑的状态出现。



剖面位置见图 1

图 2 蓬莱 20-2 构造区隐性走滑断层特征

Fig.2 Characteristics of subtle strike-slip faults in the Penglai 20-2 structural area



剖面位置见图 1

图 3 渤中 34-1 西构造区隐性构造断层特征

Fig.3 Characteristics of subtle strike-slip faults in the Bozhong 34-1W structural area

2.2 隐性走滑断层的走滑分异机制

基于上述分析,本文提出渤海新近纪—第四纪隐性走滑断层发育机理为分散式变形中形成的位移分异式走滑断层。所谓分散式变形,即在没有先存断裂存在的均质体中变形,先存断裂只起到控制均质体边界的作用,这一变形方式在众多物理模拟实验过程中得到展示^[23-24]。渤海新近纪隐性走滑断层为均质体中变形而形成的走滑断层,不受基底断裂直接控制,这一点已在上文论述。所谓位移分异式走滑是 TIKOFF 和 TEYSSIER^[25] 提出的概念, FOSSEN 和 TIKOFF^[26]、TEYSSIER 等^[27] 也进行过相关论述。他们通过大量的三维速度梯度张量分析,认为在非共轴变形的斜向拉伸过程中,瞬时应变和有限应变的差异性导致了分异走滑的产生(图 4b)。假设斜向拉伸方向与先存边界断层的夹

角为 α , 当 $\alpha < 20^\circ$ 时, 发生简单剪切主控应变; 当 $20^\circ < \alpha < 90^\circ$ 时, 发生纯剪切主控应变。在简单剪切主控应变中, 最小和最大瞬时应变轴在变形之初处于水平位置, 中间瞬时应变轴处于垂直位置, 有限应变与瞬时应变轴位置相同, 但随着变形程度的增加, 最小有限应变轴变成垂直方向, 中间应变轴变为水平方向, 因此, 与先存断层平行的走滑断层先发育, 随着变形程度增加, 伸展断层发育以调节有限应变; 纯剪切主控应变则相反, 最小瞬时应变在变形初期处于垂直位置, 最大和中间瞬时应变处于水平位置, 随着变形程度增加, 最小有限应变变为水平位置, 中间有限应变变为垂直位置, 因此, 在变形的初期主要发育伸展断层, 随着变形程度增加, 走滑断层开始发育以调节有限应变。这一伸展断层与走滑断层由于斜向伸展过程中瞬时应变和有限应变的差异性而同时发育的现象, 被称为“走滑分异”, 这一点在物理模拟实验中也得到揭示^[28-29]。

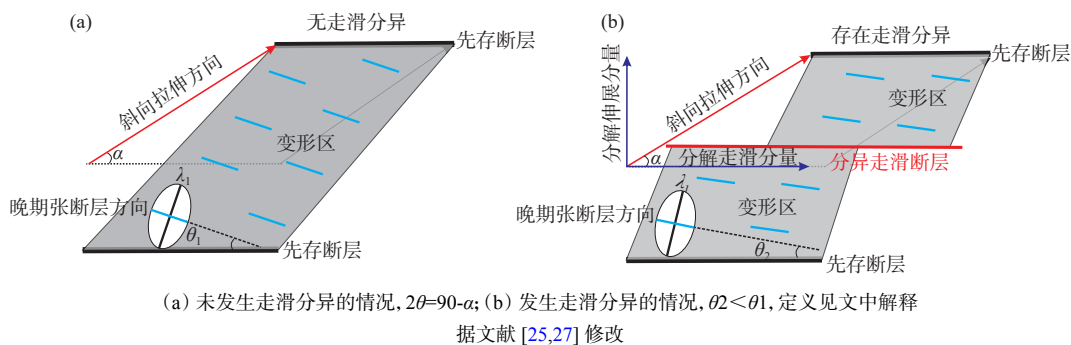


图 4 斜向拉伸过程中走滑分异示意图

Fig 4 Schematic diagram of strike-slip partitioning during oblique extension

渤海海域的新近纪隐性走滑断层符合纯剪切主控条件下的走滑分异断层特征: ①渤海新近纪隐性走滑断层发育于均质变形体内(无先存走滑断层复活), 变形体两侧受斜向伸展背景下的先存断层控制, 符合走滑分异断层发育条件; ②隐性走滑断层只与伸展断层相伴生, 且不同断层体系的两者之间夹角不同, 符合斜向伸展派生走滑分异的情况; ③隐性走滑断层的断距较小、断面不明显, 主要是由于纯剪条件下的走滑分异断层为晚期派生, 调节部分有限应变, 规模一般不大, 识别上较为困难。

3 隐性走滑断层识别

渤海隐性走滑断层的识别方法, 除了地震资料改善以及走滑断层引起的相关形变间接判断之外, 本次研究基于斜向拉伸走滑分异发育机理, 提出了

具有针对性的概率学识别方法。

根据斜向拉伸理论, 先存边界断层与最大瞬时应变轴 λ_1 交角的余角, 即斜向拉伸形成伸展断层与先存边界断层的夹角为 θ , 而斜拉方向与先存边界断层之间夹角为 α , 两者之间的关系为 $2\theta=90-\alpha$ ^[28,30], 但当走滑分异断层发育时, 在分散变形区的走滑分量减弱, 伸展分量相对增强, 最大瞬时应变轴与先存断层夹角增大, 在 α 不变的情况下 θ 变小, 走滑分异越强则 θ 角越小(图 4)。依据这一原理, 可以根据不同 α 情况下 θ 角的大小, 判断走滑分异的概率大小。TIKOFF 与 TESSYIER 等^[25,27] 在进行详细应变分析的基础上, 制作了 θ 、 α 以及走滑分异概率 P 的判识图, 本文以其为基础进行了修改(图 5)。

结合渤海海域东部地区龙口 14 构造区的新近纪隐性走滑断层判识实例对该方法作出说明。龙

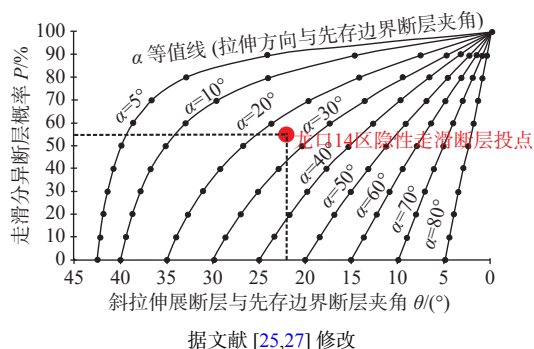
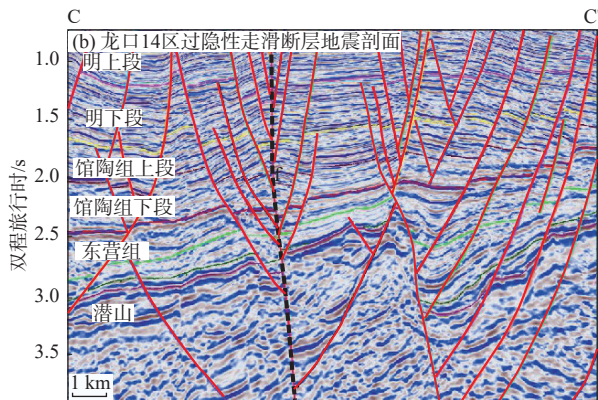
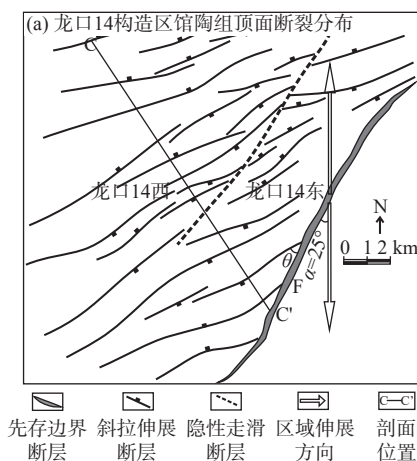


图 5 斜向拉伸走滑分异概率判识

Fig.5 Identification of the probability of strike-slip partitioning during oblique extension process

口 14 构造位于渤海东部斜向拉伸区, 边界先存断层呈 NE 向展布, 新近纪次级伸展断层呈 NEE 向展布与边界断层斜交, 并在剖面上表现为对倾的似花状构造(图 6)。在第 1 轮地震资料解释时, 并未在



剖面位置见图 1

图 6 龙口 14 构造区隐性走滑断层平面与剖面特征

Fig.6 Plane and profile characteristics of subtle strike-slip fault in Longkou-14 structural area

(4)根据渤海海域的油气勘探实践, 当 $P > 50\%$ 时, 认为发生过明显的走滑活动, 隐性走滑断层发育; 当 $50\% \geq P \geq 25\%$ 时, 认为可发生沿走向的滑动, 隐性走滑断层发育是可接受的; 当 $P < 25\%$ 时, 认为该地区不可能发育隐性走滑断层。因此, 认为该地区的隐性走滑断层 f 是存在的。

在此认识下, 龙口 14 构造区隐性走滑断层得到认可, 并进行了龙口 14 构造区隐性断层东西两侧相关圈闭的钻探。钻探结果印证了该隐性走滑断层的存在: 龙口 14 西构造馆陶组油水界面比龙口 14 东构造馆陶组油水界面更低, 隐性走滑断层两侧的油水关系并不一致, 证明隐性走滑断层起到了分隔圈闭的作用, 也验证了利用走滑分异判识新

伸展断层之间识别出图 6 中的 f 走滑断层, 因为其在地震剖面中的特征极其不明显; 在第 2 轮解释过程中, 由于油气勘探需要, 对走滑断层 f 进行了构造解释。这种在地震剖面中特征极为不明显的走滑断层, 如若存在便可以称之为“隐性走滑断层”, f 断层到底是否存在, 需依靠走滑分异断层方法进行判识。具体使用方法如下:

(1)明确边界先存断层 F 与区域新近纪拉伸方向(近 SN 向)的夹角锐夹角 α 为 25° 。

(2)计算斜向拉伸形成 32 条伸展断层与边界先存断层的平均夹角 θ 为 22.3° 。

(3)将 α 与 θ 投点到斜向拉伸断层走滑分异图上(图 5), 选择 α 为 25° 的等值线, 量取该线之上横坐标为 θ 为 22.3° 时对应的纵坐标值 P 为 55% , 走滑分异概率为 55% 。

近纪—第四纪隐性走滑断层方法的合理性。

4 结论

渤海新近纪—第四纪隐性走滑断层为斜向伸展过程中形成的走滑分异型断层, 并非基底先存断层复活形成, 而是由伸展作用派生, 断距小, 不易识别。随着走滑分异作用的增强, 隐性走滑断层发育的概率增大, 与其伴生的伸展断层将展现不同的走向特征, 伸展断层与边界先存断层夹角、斜拉方向与边界先存断层夹角以及走滑分异概率存在特定关系, 可以用来判断隐性走滑断层发育的概率, 并取得了良好的应用效果。

参考文献:

- [1] 王伟锋, 周维维, 周杰, 等. 金湖凹陷隐性断裂带形成机制及分布 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2014, 44(5): 1395-1405.
WANG W F, ZHOU W W, ZHOU J, et al. Formation mechanism and distribution of buried fault zone in the Jinhu Sag[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(5): 1395-1405.
- [2] 周维维, 王伟锋, 安邦, 等. 渤海湾盆地隐性断裂带成因类型特征及其对油气聚集的控制作用 [J]. 天然气地球科学, 2014, 25(11): 1727-1734.
ZHOU W W, WANG W F, AN B, et al. Genetic types of potential fault zone and its significance on hydrocarbon accumulation[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(11): 1727-1734.
- [3] 王伟锋, 周维维, 徐守礼. 沉积盆地断裂趋势带形成演化及其控藏作用 [J]. 地球科学, 2017, 42(4): 613-624.
WANG W F, ZHOU W W, XU S L. Formation and evolution of concealed fault zone in sedimentary basins and its significance in hydrocarbon accumulation[J]. Earth Science, 2017, 42(4): 613-624.
- [4] CROOK A J L, WILLSON S M, YU J G, et al. Predictive modelling of structure evolution in sandbox experiments[J]. *Journal of Structural Geology*, 2006, 28(5): 729-744.
- [5] HARDY S. Propagation of blind normal faults to the surface in basaltic sequence: insights from 2D discrete element modeling[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2013, 48: 149-159.
- [6] MITRA S, MILLER J F. Strain variation with progressive deformation in basement-involved trishear structures[J]. *Journal of Structural Geology*, 2013, 53: 70-79.
- [7] 汪泽成, 赵文智, 门相勇, 等. 基底断裂"隐性活动"对鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏的作用 [J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(1): 9-13.
WANG Z C, ZHAO W Z, MEN X Y, et al. Control of basement fault minor-activity on gas pool formation of Upper Paleozoic, Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(1): 9-13.
- [8] 赵文智, 胡素云, 汪泽成, 等. 鄂尔多斯盆地基底断裂在上三叠统延长组石油聚集的控制作用 [J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(5): 1-5.
ZHAO W Z, HU S Y, WANG Z C, et al. Key role of basement fault control on oil accumulation of Yanchang Formation, Upper Triassic, Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(5): 1-5.
- [9] 薛永安, 吕丁友, 胡志伟, 等. 渤海海域隐性断层构造发育特征与成熟区勘探实践 [J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(2): 233-246.
XUE Y A, LYU D Y, HU Z W, et al. Tectonic development of subtle faults and exploration in mature areas in Bohai Sea, East China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(2): 233-246.
- [10] 牛成民, 薛永安, 黄江波, 等. 渤海海域隐性走滑断层形成机理、识别方法与控藏作用 [J]. 中国海上油气, 2019, 31(6): 1-12.
NIU C M, XUE Y A, HUANG J B, et al. Formation mechanisms, identification methods and control effects of recessive strike-slip faults in the Bohai sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2019, 31(6): 1-12.
- [11] 吴俊刚, 王昕, 柴永波, 等. 隐性走滑断裂识别标志及其与油气聚集的关系: 以青东—莱州湾构造带为例 [J]. 东北石油大学学报, 2017, 41(3): 1-8.
WU J G, WANG X, CHAI Y B, et al. Identification marks of subtle strike-slip faults and its relationship with hydrocarbon accumulation in Qingdong-Laizhouwan tectonic belt[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2017, 41(3): 1-8.
- [12] 张中巧, 高京华, 吴奎, 等. 基于高波数曲率属性的隐性走滑断层识别: 以辽东湾坳陷旅大构造区为例 [J]. 地球物理学进展, 2017, 32(6): 2602-2607.
ZHANG Z Q, GAO J H, WU K, et al. Identification of hidden strike-slip fault based on high wavenumber curvature attribute: taking Lüda area in Liaodong Bay Depression as example[J]. *Progress in Geophysics*, 2017, 32(6): 2602-2607.
- [13] 穆星, 赵海华. 隐性走滑断层的识别方法及其走滑量的计算 [J]. 石油物探, 2021, 60(1): 157-166.
MU X, ZHAO H H. Identification of concealed strike-slip fault and estimation of strike-slip offset: a case study of the Jiyang Depression in Bohai Bay Basin[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2021, 60(1): 157-166.
- [14] 张友, 南山, 王玉秀, 等. 隐伏走滑断层特征及其对油气成藏的影响: 以渤海海域蓬莱 13-14 地区为例 [J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(6): 26-29.
ZHANG Y, NAN S, WANG Y X, et al. Buried strike-slip fault feature and effect on hydrocarbon reservoir forming in Penglai 13-14 area[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(6): 26-29.
- [15] 汤良杰, 万桂梅, 周新怀, 等. 渤海湾盆地新生代构造演化 [J]. 高校地质学报, 2008, 14(2): 191-198.
TANG L J, WAN G M, ZHOU X H, et al. Cenozoic geotectonic evolution of the Bohai Basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2008, 14(2): 191-198.
- [16] 漆家福, 邓荣敬, 周心怀, 等. 渤海海域新生代盆地中的郯庐断裂带构造 [J]. 中国科学: 地球科学, 2008, 38(增刊 I): 19-29.
QI J F, DENG R J, ZHOU X H, et al. Tanlu Fault zone in Cenozoic basin in Bohai Sea[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2008, 38(S1): 19-29.
- [17] DENG J, SU S, NIU Y, et al. A possible model for the lithospheric thinning of North China Craton: evidence from the Yanshanian (Jura-Cretaceous) magmatism and tectonism[J]. *Lithos*, 2007, 96(1): 22-35.
- [18] SUN W, DING X, HU Y H, et al. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the West Pacific[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2007, 262(3): 533-542.
- [19] 余一欣, 周心怀, 徐长贵, 等. 渤海海域新生代断裂发育特征及形成机制 [J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(2): 273-279.
YU Y X, ZHOU X H, XU C G, et al. Characteristics and formation mechanisms of the Cenozoic faults in the Bohai Sea

- waters[J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(2): 273-279.
- [20] 詹润, 朱光, 杨贵丽, 等. 渤海海域新近纪断层成因与动力学状态 [J]. *地学前缘*, 2013, 20(4): 151-165.
- ZHAN R, ZHU G, YANG G L, et al. The genesis of the faults and the geodynamic environment during Neogene for offshore of the Bohai sea[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(4): 151-165.
- [21] 任健, 吕丁友, 陈兴鹏, 等. 渤海东部先存构造斜向拉伸作用及其石油地质意义 [J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(3): 530-541.
- REN J, LYU D Y, CHEN X P, et al. Oblique extension of pre-existing fabrics and its control on oil accumulation in the eastern part of Bohai Sea[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(3): 530-541.
- [22] 黄雷. 渤海海域新近纪以来构造特征与演化及其油气赋存效应 [D]. 西安: 西北大学, 2014.
- HUANG L. Neogene-Quaternary tectonic reactivity and its control on petroleum accumulation in the Bohai Bay, East China[D]. Xi'an: Northwest University, 2014.
- [23] SCHREURS G. Fault development and interaction in distributed strike-slip shear zones: an experimental approach[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2003, 210(1): 35-52.
- [24] SCHREURS G, COLLETTA B. Analogue modelling of faulting in zones of continental transpression and transtension[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1998, 135: 59-79.
- [25] TIKOFF B, TEYSSIER C. Strain modeling of displacement-field partitioning in transpressional orogens[J]. *Journal of Structural Geology*, 1994, 16(11): 1575-1588.
- [26] FOSSEN H, TIKOFF B. Extended models of transpression and transtension, and application to tectonic settings[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1998, 135(1): 15-33.
- [27] TEYSSIER C, TIKOFF B, MARKLEY M. Oblique plate motion and continental tectonics[J]. *Geology*, 1995, 23(5): 447-450.
- [28] WITHJACK M O, JAMISON W R. Deformation produced by oblique rifting[J]. *Tectonophysics*, 1986, 126(2): 99-124.
- [29] PINET N, COBBOLD P R. Experimental insights into the partitioning of motion within zones of oblique subduction[J]. *Tectonophysics*, 1992, 206: 371-388.
- [30] FOSSEN H, TIKOFF B. The deformation matrix for simultaneous simple shearing, pure shearing and volume change, and its application to transpression-transtension tectonics[J]. *Journal of Structural Geology*, 1993, 15(3/5): 413-422.

Development mechanism and identification methods of subtle strike-slip faults in the Neogene-Quaternary of Bohai Sea

REN Jian¹, YANG Bo¹, CHEN Xingpeng², PEI Xiaogang¹, GAO Xilong¹, GUO Ying¹

(1 Research Institute of Bohai Oil Field, Tianjin Branch of CNOOC (China) Ltd., Tianjin 300452, China;

2 Shandong Institute of Petroleum and Chemical Technology, Dongying 257061, China)

Abstract: A large number of "subtle strike-slip faults" are developed in the Neogene-Quaternary strata in the Bohai Sea, which are difficult to identify in seismic data. These faults are steep, discontinuous, and have small fault throws. The existence of subtle faults could destroy the trap. In the process of oil and gas exploration, failure to identify subtle faults will lead to exploration failure. Therefore, it is urgent to re-understand subtle strike-slip faults from the perspective of fault development mechanism and guide their effective characterization. Based on the Neogene-Quaternary tectonic background of the Bohai Sea and three-dimensional seismic data, the development mechanism and identification method of subtle strike-slip faults were explored. Results show that the Neogene-Quaternary subtle strike-slip faults in the Bohai Sea are displacement-partitioned strike-slip faults developed under the oblique extensional tectonic background of pre-existing faults, and they are not directly controlled by basement strike-slip faults. There is a specific relationship among the angle α between the pre-existing boundary fault and the oblique extension direction, the angle θ between the pre-existing boundary fault and the oblique extension faults, and the probability P of displacement partitioning of strike-slip. This principle was used to effectively determine whether the subtle strike-slip fault was developed, and good application results were achieved. This study clarified the development mechanism and identification method of subtle strike-slip faults in the Neogene-Quaternary in the Bohai Sea, providing important guidance for oil and gas exploration.

Key words: subtle strike-slip; strike-slip partitioning; distributed deformation; oblique extension; pre-existing faults; Neogene-Quaternary; Bohai Sea