



## 渤海湾盆地中部428构造带近S-N向走滑断裂的形成时期及其在中生代期间的调节转换作用

武子涵, 于海波, 张 参, 戴黎明, 李法坤

### Formation period of S-N strike-slip fault in the 428 tectonic belt in the central of Bohai Bay Basin and its adjustment and transformation in the Mesozoic

WU Zihan, YU Haibo, ZHANG Can, DAI Liming, and LI Fakun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022062803>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

#### 构造-沉积耦合过程的数值模拟: 以南海北部阳江凹陷为例

Numerical modeling of the coupling between strike-slip faulting and sedimentation: A case from the Yangjiang Sag of northern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 139

#### 北康盆地基底卷入断层特征及其对南海南部构造演化的启示

Features of the basement-involved faults in the Beikang Basin and their implications for the tectonic evolution of the southern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 116

#### 渤海湾西岸晚更新世以来的沉积环境演化及碳埋藏评价

Environmental evolution and carbon burial assessment of the west coast of Bohai Bay since Late Pleistocene

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 194

#### 特提斯构造域海底流体逃逸活动特征及其控制因素

Characteristics and controlling factors of submarine fluid escape in Tethys tectonic domain

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 27

#### 北黄海盆地东部坳陷中生界次生孔隙的发育规律

Development of Mesozoic secondary pore zones in the Eastern Depression of North Yellow Sea Basin

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 194

#### 珠江口盆地阳江东凹始新统的源汇过程: 碎屑锆石定年及物源示踪

Tracing source-to-sink process of the Eocene in the Eastern Yangjiang Sag, Pearl River Mouth Basin: Evidence from detrital zircon spectrum

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 124



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

武子涵, 于海波, 张参, 等. 渤海湾盆地中部 428 构造带近 S-N 向走滑断裂的形成时期及其在中生代期间的调节转换作用 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(1): 71-81.

WU Zihan, YU Haibo, ZHANG Can, et al. Formation period of S-N strike-slip fault in the 428 tectonic belt in the central of Bohai Bay Basin and its adjustment and transformation in the Mesozoic [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(1): 71-81.

# 渤海湾盆地中部 428 构造带近 S-N 向走滑断裂的形成时期及其在中生代期间的调节转换作用

武子涵<sup>1,2</sup>, 于海波<sup>3</sup>, 张参<sup>3</sup>, 戴黎明<sup>1,2</sup>, 李法坤<sup>1,2</sup>

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 深海圈层与地球系统教育部前沿科学中心, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237

3. 中海石油天津分公司渤海石油研究院, 天津 300459

**摘要:**渤海湾盆地中部 428 构造带自印支期以来经历了多期次构造运动叠加改造过程, 区域内发育了大量的近 S-N 向与近 E-W 向褶皱、断层构造, 并控制了潜山的形成。然而目前对 428 构造带的研究仅局限于探索区域内潜山构造成因及其油气圈闭特性, 对区域内的断裂系统, 尤其是发育的大量近 S-N 向断裂的形成时期及其后期演化过程中所起到的调控作用尚不明确。鉴于此, 为明确其形成时期、探索其对区域构造格局演化模式所产生的影响, 基于前人的研究成果, 以石臼坨凸起东侧 428 构造带为主要研究对象, 通过对该区域典型的地震剖面进行精确解析, 对其展开了系统性的研究。研究结果表明: ① 428 构造带与石臼坨凸起东侧连接处存在一条近 S-N 向走滑断裂; ② 该走滑断裂的形成最早可追溯至印支期。根据古生界褶皱和薄底构造的分布特征可知, 该走滑断裂最初为近 E-W 向逆冲推覆断裂的侧向断坡; ③ 近 S-N 向走滑断裂阻挡了燕山期 NWW 向的逆冲推覆作用, 从而控制古生界和中生界大量协调褶皱的发育。而近 E-W 向断裂表现为压扭性质, 控制了中生界雁列式褶皱的形成。基于以上认识, 认为该近 S-N 向走滑断裂在印支-燕山期均起到了重要的调控作用, 是一个重要的调节转换带。

**关键词:**近 S-N 向走滑断裂; 印支运动; 燕山运动; 构造叠加; 428 构造带; 石臼坨凸起

中图分类号: P736.1

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022062803

## Formation period of S-N strike-slip fault in the 428 tectonic belt in the central of Bohai Bay Basin and its adjustment and transformation in the Mesozoic

WU Zihan<sup>1,2</sup>, YU Haibo<sup>3</sup>, ZHANG Can<sup>3</sup>, DAI Liming<sup>1,2</sup>, LI Fakun<sup>1,2</sup>

1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System, Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, MOE, Qingdao 266100, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology(Qingdao), Qingdao 266237, China

3. Bohai Petroleum Institute, Tianjin Branch, CNOOC, Tianjin 300459, China

**Abstract:** The 428 tectonic belt in the central Bohai Bay Basin has undergone superposition of multiple tectonic movements since the Indosinian, and thus a great number of near S-N and near E-W folds and faults have developed and controlled the formation of buried hills in the region. Most studies on the 428 tectonic belt focused on exploring the tectonic origin of buried hills and its hydrocarbon trap characteristics, but less research has been conducted on the faults system in the region, especially the formation period of numerous near S-N faults and the regulation role of faults in the later evolutionary process. We conducted a precise analysis of typical seismic profiles in the 428 tectonic belt, and systematically investigated the period of formation of the folds and faults in the region and their influence on the evolutionary pattern of regional tectonics. Results reveal that: (1) A near S-N strike-slip fault exists at the eastern connection between the 428 tectonic belt and the Shijiuotuo uplift; (2) a near S-N strike-slip fault was formed during the Indosinian. According to the distribution of the Paleozoic folds and thin-bottom structures, the location of the slip fault should be the lateral fault slope of the near E-W trending reverse thrust fault; (3) the near S-N strike-slip

资助项目: 国家实验室项目“微板块与古地貌重建”(2022QNLM050302-2); 国家自然科学基金项目“洋底高原俯冲和增生机制及其效应的数值模拟”(42176064), “海底古地貌动态重建”(42121005), “渤中凹陷中低位潜山构造演化、断裂体系分布及其控圈作用研究”(20210358)

作者简介: 武子涵(2000—), 男, 本科生, 主要从事构造地质学及其数值模拟研究, E-mail: wuzihan@stu.ouc.edu.cn

通讯作者: 戴黎明(1980—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事构造地质学及其数值模拟研究, E-mail: dlming@ouc.edu.cn

收稿日期: 2022-06-28; 改回日期: 2022-08-01. 文凤英编辑

faults in the area obstructed the reversible thrusting in the NWW direction during the Yanshanian, and controlled the formation of a large number of coordinated folds in the Paleozoic and Mesozoic. Moreover, some near E-W faults display a compressional-torsional nature and controlling formation of en echelon folds in the Mesozoic. Therefore, the near S-N strike-slip faults played an important role in tectonic adjustment and transition in this area during the Indosinian-Yanshanian.

**Key words:** near S-N strike slip fault; Indosinian movement; Yanshan movement; tectonic superposition; the 428 tectonic belt; Shijiutuo uplift

渤海湾盆地渤中凹陷于中生代经历了印支运动、燕山运动等多期次的构造运动事件<sup>[1-14]</sup>,形成大量近 S-N 向、近 E-W 向的构造变形叠加,其内部发育的大量潜山被认为具有良好的油气成藏条件<sup>[15-20]</sup>。428 构造带作为渤中凹陷内较为典型的潜山构造带,拥有较为独特的构造、沉积演化史<sup>[21]</sup>,其形成过程与区内发育的大量近 S-N 向与近 E-W 向褶皱-断裂系统密切相关<sup>[18,20]</sup>,且控制了油气圈闭的形成<sup>[22-23]</sup>。

然而,目前对 428 构造带部分断裂形成时期及其动力学演化过程缺乏系统性研究,尤其是对区域内发育的近 S-N 向断裂系统的形成时期及其后期构造调控作用存在一定争议。目前的研究主要有 3 种观点:第一种观点认为区域内近 S-N 向断裂为燕山早期左旋压扭作用的产物,并在新生代被继承改造<sup>[21]</sup>;第二种观点认为 428 构造带东潜山西侧的近 S-N 向断裂为燕山早期形成的逆冲断裂,其控制了潜山古生界、中生界的剥蚀<sup>[24]</sup>;第三种观点则将渤海湾内较为典型的几条近 S-N 向断裂系统定义为印支晚期出现的走滑断裂,并在燕山期与新生代得以进一步发育<sup>[5]</sup>。

对此,为明确区域内近 S-N 向断裂的形成时期,确定其对区域内构造格局塑造产生的影响,本文以 428 构造带为研究对象,通过对区域内的典型地震剖面进行详细解析,发现 428 构造带西侧与石臼坨凸起连接处存在一条近 S-N 向走滑断裂,并重点对该断裂的形成时期及其对后期构造运动的响应进行了讨论,恢复了该断裂体系的构造演化史,并建立了相应的动力学模型。

## 1 区域地质背景

渤中凹陷作为渤海湾盆地中最大的一个凹陷,地处渤海海域中部,大体呈 NE 向展布,其东靠沙垒田凸起、西邻庙西北凸起,南以渤南低凸起为界,北以石臼坨凸起为邻。本文所研究的 428 构造带便位于渤中凹陷北部边界的石臼坨凸起东部(图 1),其大体呈 E-W 向展布,总面积约 100 km<sup>2</sup>,为典型的环渤中潜山构造带之一<sup>[22]</sup>。早中生代以来,在印支运动近 S-N 向的挤压-伸展作用影响下<sup>[25-29]</sup>,428 构造带形成了近 E-W 向的隆起格局,伴随发育大量近 E-

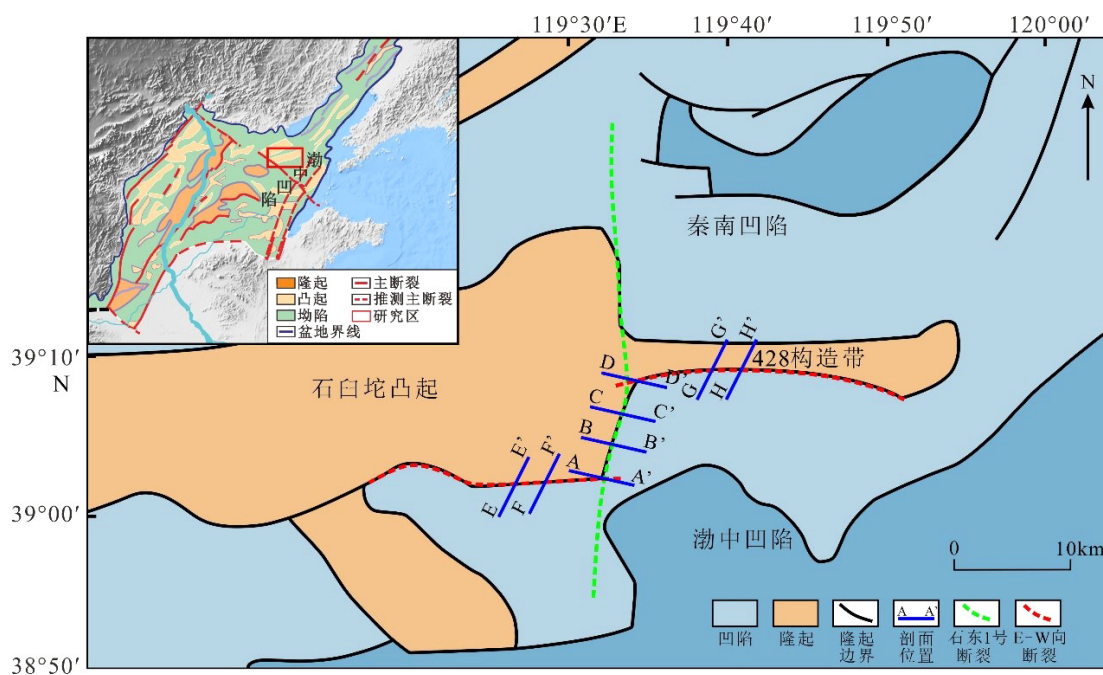


图 1 428 构造带构造位置、构造特征及剖面位置图

Fig.1 Tectonic setting and section location of the 428 tectonic belt

W向展布的逆冲断裂,而在随后燕山运动近NW-SE向的挤压-伸展-挤压作用下<sup>[25,27,29]</sup>,进一步叠加发育近NE-SW向的断裂系统与褶皱隆起带,并最终在其内部形成了东、西两座潜山,使其整体呈现出东西部宽、中部窄,东西部高、中部略低的构造形态特征<sup>[21]</sup>。

研究区地层发育情况与整个渤海湾地区地层发育情况相似,根据不同的地质时期由老到新划分为4个主要地层,即太古宙变质花岗岩基底、古生代寒武系-奥陶系海相碳酸盐岩与石炭系-二叠系海陆过渡相沉积层、中生代侏罗系-白垩系陆相火山碎屑沉积层、新生代古近系-新近系河流、湖泊相沉积层<sup>[30-33]</sup>。其中太古宙变质基底与古生界之间存在较大的沉积间断,形成了不整合接触面,进入中生代以后,受印支期近S-N向挤压-伸展运动影响,区域晚古生界曾遭受广泛剥蚀,与之后沉积的早中生界形成不整合接触,随后燕山期近NW-SE向挤压-伸展-挤压运动则使得早中生界大多遭受剥蚀并形成了层内的不整合接触,而晚中生界则与随后沉积的巨厚新生界之间形成了不整合接触<sup>[34]</sup>。

基于已有钻井与地震剖面分析可知,不同地层具有不同的地震反射特征。其中太古宙变质基底在地震剖面上主要表现为杂乱反射特征;古生界碳酸盐沉积整体呈低频连续强反射特征;中生界火山碎屑沉积整体呈弱振幅中频断续反射特征<sup>[30-31,33]</sup>。

不同地层之间接触面大多可识别到较为明显的强反射特征。

## 2 褶皱-断裂特征分析

通过对428构造带内大量的SE向与NE向地震剖面进行精确解析发现,区域内断裂系统大致可划分为两组:一组位于428构造带南侧与石臼坨凸起南侧的两条走向近E-W向、倾向为南的高角度断裂;另一组为石臼坨凸起与428构造带衔接处的一条走向近S-N向的负花状断裂。

### 2.1 近S-N向褶皱-断裂几何学、运动学特征

在428构造带西侧与石臼坨凸起衔接处随机截取的自南向北平行排列的一系列SE向地震剖面中(图2)可清晰地识别出一条走向近S-N向断裂(以下简称石东1号断裂)。

在石东1号断裂的两条SE向地震剖面(图3)中可清晰地识别出该断裂在垂向上自基底向上稳定切穿至中生界,部分切穿至新生界底界,断裂由浅部向深部逐渐收敛于主断裂,形态上表现为负花状构造,为典型的走滑断裂。其次,该走滑断裂东侧发育有厚度较为稳定均一的古生界及中生界,二者均卷入了褶皱变形,且变形相互协调,可推断其褶皱变形时间应为燕山期,而断裂西侧仅识别出太

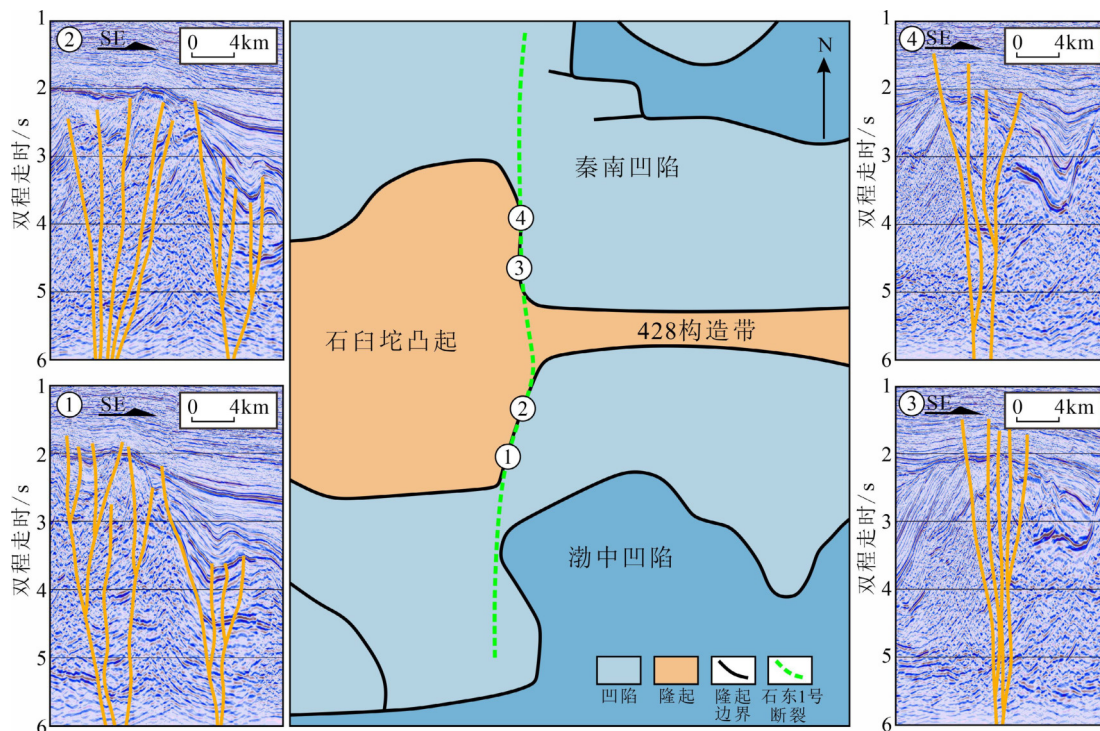


图2 近S-N向走滑断裂的存在证据

Fig.2 Evidence of the existence of near S-N strike-slip fault

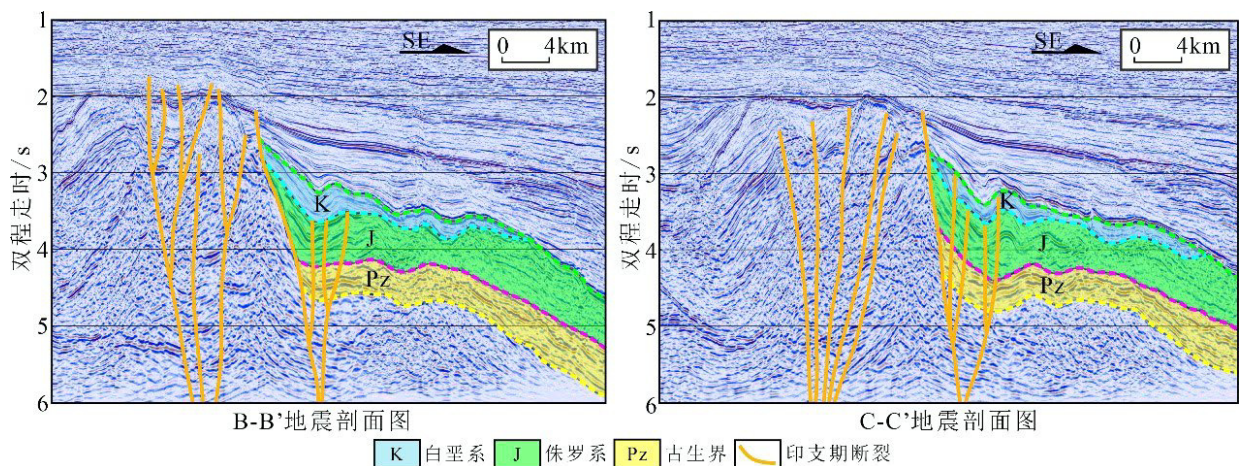


图3 428构造带B-B'、C-C'地震剖面图

剖面位置见图1。

Fig.3 B-B' and C-C' seismic profiles of the 428 tectonic belt

See Fig.1 for profile location.

古宇,其上部几乎直接覆盖了新生界,表明断裂西侧地层曾发生相对抬升并遭受了广泛的剥蚀减薄。此外特别值得注意的是,剖面中断裂东侧附近地层未识别出任何遭受逆冲抬升后剥蚀减薄与反转下降的痕迹,即地层未发育薄底构造。

## 2.2 近E-W向褶皱-断裂几何学、运动学特征

位于石臼坨凸起南侧、428构造带南侧的NE向地震剖面中均可清晰识别出多条走向近E-W向、倾向近S向的高角度断裂(图4中E-E'、F-F'、G-G'、H-H'),断裂由基底向上切穿了中生界且由浅部向深部逐渐收敛于主断裂,断裂倾角多大于60°且由深部向浅部逐渐变大,同时位于高角度断裂上盘的古生界可见明显的挤压变形而形成的褶皱,指示地层曾发生强烈的挤压弯曲变形,断面附近古生界可见明显减薄,即发育典型的薄底构造,表明高角度断裂形成于印支期早期,并在随后发生了反转,为典型的负反转断裂。其次,在上述高角度断裂附近又可识别出走向相同、具花状构造的断裂,其均向上切穿至新生界底界,其中位于428构造带南缘处的该断裂向深层逐渐收敛于高角度断裂(图4中G-G'、H-H'),表明该断裂为高角度断裂的次级断裂,其附近可见中生界发生截断并形成两套透镜体构造,表明该断裂形成于燕山期。此外由其形态特征可判断,该断裂与高角度断裂之间在平面上可能呈现锐夹角关系,其表现出明显的压扭性特征;而位于石臼坨凸起南缘处的该断裂则切穿并改造了高角度断裂并向下延伸至基底中(图4中E-E'、F-F'),表明区域地处于燕山期曾遭受近E-W向

的挤压而发生了明显的走滑。

## 2.3 近E-W向高角度断裂与近S-N向走滑断裂交切转换处剖面特征

在近E-W向高角度断裂与石东1号断裂可能互相交切的位置截取两条SE向地震剖面(图5)进行精确解析,发现两条剖面中均可识别出上述两组断裂,表明这两组断裂在此处确实存在相互交切关系。高角度断裂上盘古生界及中生界均有所减薄,这表明在原有古生界薄底构造的基础上,中生界亦遭受了逆冲抬升剥蚀与反转下降,即发育典型的双薄底构造,同时二者均发育褶皱变形,但褶皱产状明显不协调,这表明高角度断裂在燕山期也曾发生逆冲抬升,致使断裂上盘地层在原有印支期褶皱基础上再次发生变形,同时中生界接受剥蚀减薄,随后断裂发生了反转。

将这两条SE向剖面与前文中关于石东1号断裂的两条SE向剖面(图3)进行对比后发现,相比石东1号断裂东侧厚度均一且褶皱变形互相协调的古生界与中生界而言,石东1号断裂与其东西两侧高角度断裂相互交切处的古生界与中生界均可见明显的薄底构造与不协调褶皱。由此可推断,出现这种地层“薄底-无薄底-薄底”、褶皱“不协调-协调-不协调”过渡现象的可能原因是石东1号断裂的存在与活动所产生的影响。

## 2.4 褶皱平面特征

盛世强等<sup>[35]</sup>通过对428构造带部分地震测井资料中古生界与中生界的高程数据进行计算机网

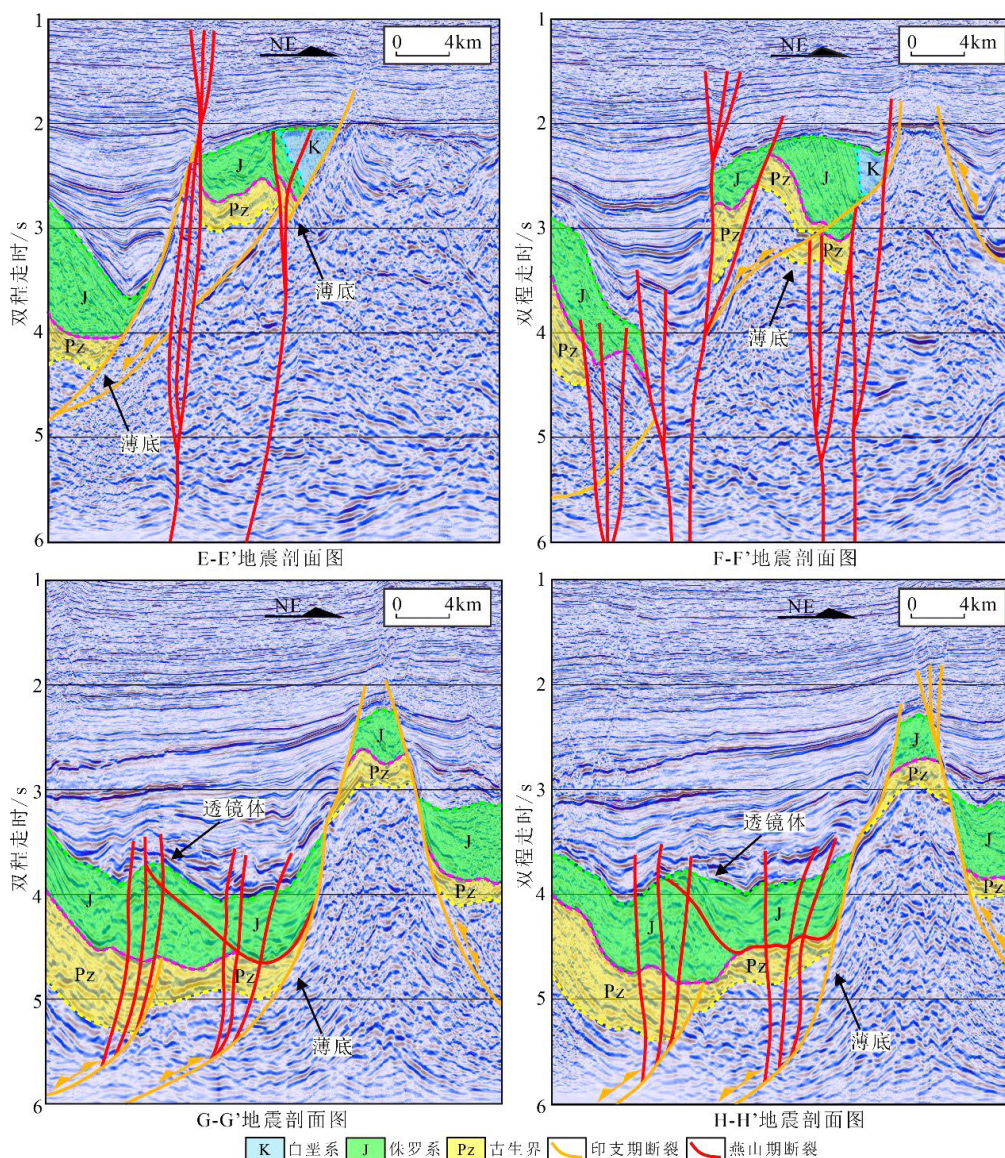


图 4 428 构造带 E-E'、F-F'、G-G'、H-H' 地震剖面图  
剖面位置见图 1。

Fig.4 Seismic profiles E-E', F-F', G-G', and H-H' of the 428 tectonic belt

See Fig.1 for profile location.

格化与图形可视化处理, 获得了区域三维地层模型 (图 6), 该模型可从平面上较好地反映区域古生界与中生界的褶皱分布特征。

根据三维地层模型可知, 428 构造带南侧中生界褶皱变形较为明显, 褶皱形态多以短轴褶皱为主, 枢纽方向多呈近 NNE-SSW 向, 两翼倾角均相对平缓, 空间上呈雁列式排布于石东 1 号断裂东侧, 这与前文地震剖面 (图 3 中 B-B'、C-C') 中所见的中生界褶皱情况相吻合, 表明其为燕山期 NWW 向挤压作用的结果。428 构造带南侧古生界亦可见褶皱变形, 其褶皱形态以构造穹窿或短轴褶皱为主, 枢纽呈近 E-W 向与近 NNE-SSW 向延伸, 整体变形

相对平缓, 其中 NNE-SSW 向枢纽与中生界褶皱枢纽方向一致, 空间上亦呈雁列式排布, 结合前文地震剖面 (图 4 中 G-G'、H-H', 图 5 中 A-A'、D-D') 中古生界褶皱情况, 推断其为印支期近 S-N 向挤压作用与燕山期近 NWW 向挤压作用相互叠加的结果。

此外, 对比两套地层褶皱的分布特征后发现, 在石东 1 号断裂附近两套褶皱的变形相互协调, 对应了前文石东 1 号断裂东侧古生界与中生界协调褶皱 (图 3 中 B-B'、C-C'), 而在近 E-W 向高角度断裂附近二者变形又存在明显的差异, 对应了前文石东 1 号断裂与近 E-W 向高角度断裂交切处 (图 5 中

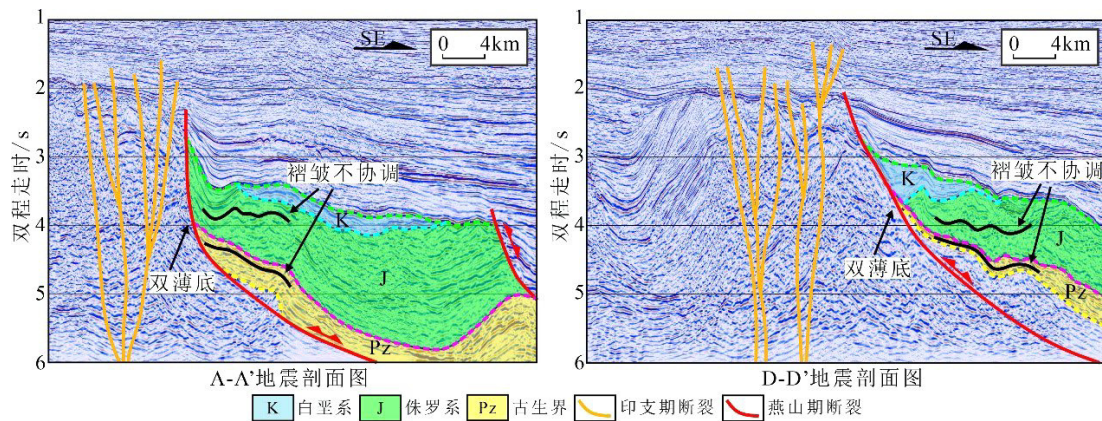


图5 428构造带A-A'、D-D'地震剖面图

剖面位置见图1。

Fig.5 Seismic profiles A-A', D-D' of the 428 tectonic belt

See Fig.1 for profile location.

A-A'、D-D')古生界与中生界褶皱间的不协调。这种在不同方向切片中两套地层褶皱变形情况的差异,表明428构造带南侧地层在中生代的挤压改造过程中受到了两组断裂的共同影响。

### 3 428构造带动力学模型

以往的研究大多将428构造带内的近S-N向断裂解读为燕山运动早期形成的具压扭性质的走滑断裂或逆冲断裂,并在此基础上建立了相应的动力学模型,但其对地震剖面特征的认识与解释不够精确,从而对断裂的形成时期以及断裂对428构造带所起到的调控作用产生了争议。大多数已有模型的建立,其仅考虑到区域地层的薄底现象,缺乏对褶皱变形特征的分析,尤其是并未对石臼坨凸起与428构造带连接处的近S-N向走滑断裂(石东1号断裂)的形成时期及其调控作用进行研究,因而不能完全反映428构造带的区域演化模式。

对此,本文在前人研究的基础上,通过对研究区内主要褶皱-断裂系统的典型地震剖面进行详细解读与论证后认为:428构造带与石臼坨凸起连接处的近S-N向走滑断裂(石东1号断裂)应形成于印支期,并配合同时期形成的两条近E-W向高角度断裂,共同调节了中生代期间的区域构造演化,导致了前文所提到的区域地层褶皱与薄底构造发育情况的差异。为明确这种调节机制,本文尝试建立起与地震剖面解析结果所对应且相对合理的动力学模型,来解释石东1号断裂形成过程及其在中生代期间对区域构造的调节转换作用。

#### 3.1 中生代印支期

##### 3.1.1 印支早期

印支运动早期,华北东部的渤海湾地区处于近S-N向的强烈挤压应力场中,渤中428构造带在该应力场影响下发育大量的近E-W走向的逆冲断裂系统,断裂上盘古生界发育枢纽近E-W向的宽缓褶皱变形,广泛抬升遭受剥蚀减薄(图7a)。与此同时,该应力场产生的剪切应力导致428构造带西侧形成了一条走向近S-N的走滑断裂(石东1号断裂),该走滑断裂最初作为近E-W向逆冲断裂的侧向断坡,控制了走滑断裂东侧地层整体北移,同时使走滑断裂附近古生界不发育薄底构造(图3),即调节了该时期石臼坨凸起与428构造带之间近S-N向的逆冲推覆作用(图7a)。

##### 3.1.2 印支晚期

印支运动晚期,近S-N向应力松弛导致428构造带处于区域伸展环境下,原近E-W向逆冲断层均反转为正断层,断裂上盘下降,上盘残余古生界得以保留,形成典型的薄底构造(图4),而断层下盘则相对抬高成山并接受剥蚀。此时石东1号断裂沿应力伸展方向活动,导致断裂东侧地层(即428构造带南缘逆冲断裂上盘)伸展下沉而相对低于其西侧地层(石臼坨凸起南缘逆冲断裂下盘),该时期428构造带E-W向的构造格局基本确定(图7b)。

#### 3.2 中生代燕山期

##### 3.2.1 燕山早期

燕山运动早期,428构造带处在NWW向的挤压应力场下,受原印支期形成的近E-W向高角度断

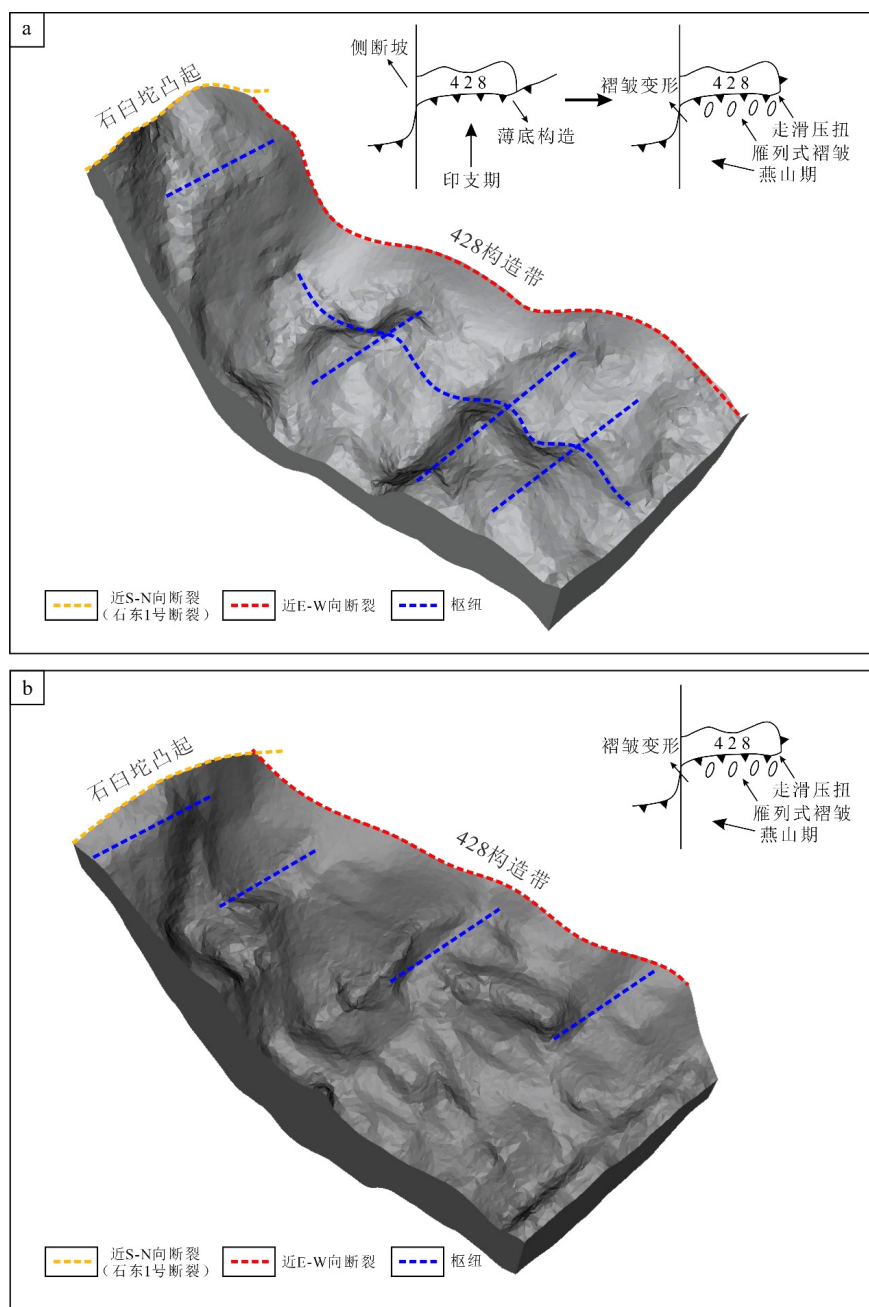


图 6 428 构造带南侧古生界 (a) 与中生界 (b) 三维模型图<sup>[35]</sup>

Fig.6 The 3D model of the Paleozoic (a) and Mesozoic (b) in the south of the 428 tectonic belt<sup>[35]</sup>

裂系统影响, 区域地层沿高角度断裂发生近 E-W 向的走滑以及近 NWW 向的逆冲抬升, 其在原高角度断裂基础上发育具压扭性质的次级走滑断裂, 并在原有印支期枢纽近 E-W 向的宽缓褶皱基础上叠加发育大量枢纽近 NE-SW 向、雁列式排列的宽缓短轴褶皱 (图 5-6), 同时上盘中生界局部形成透镜体构造 (图 4), 并开始遭受剥蚀减薄 (图 8a)。此时印支期形成的石东 1 号断裂则配合其西侧 (即石白坨凸起南缘逆冲断裂下盘) 的古生界基底, 在该时期阻挡了其东侧地层 (即 428 构造带南缘逆冲断裂上盘) 向西运动, 因而导致石东 1 号断裂东侧古生界

与中生界均遭受近 E-W 向挤压变形, 形成枢纽近 S-N 向的协调宽缓褶皱 (图 3、8a)。该时期 428 构造带在原有近 E-W 向构造的基础上, 形成了近 NWW 向的压扭性构造叠加。

### 3.2.2 燕山中晚期

燕山运动中晚期, 428 构造带处在 NWW 向的伸展应力场下, 燕山早期沿原近 E-W 向断裂发生走滑与逆冲的地层发生相反方向的伸展与反转, 上盘地层沿断面下降, 中生界发育薄底构造 (图 5), 并开始接受早白垩世沉积, 而断裂下盘则相对隆起成山 (图 8b)。该时期 428 构造带潜山构造格局基本形成。



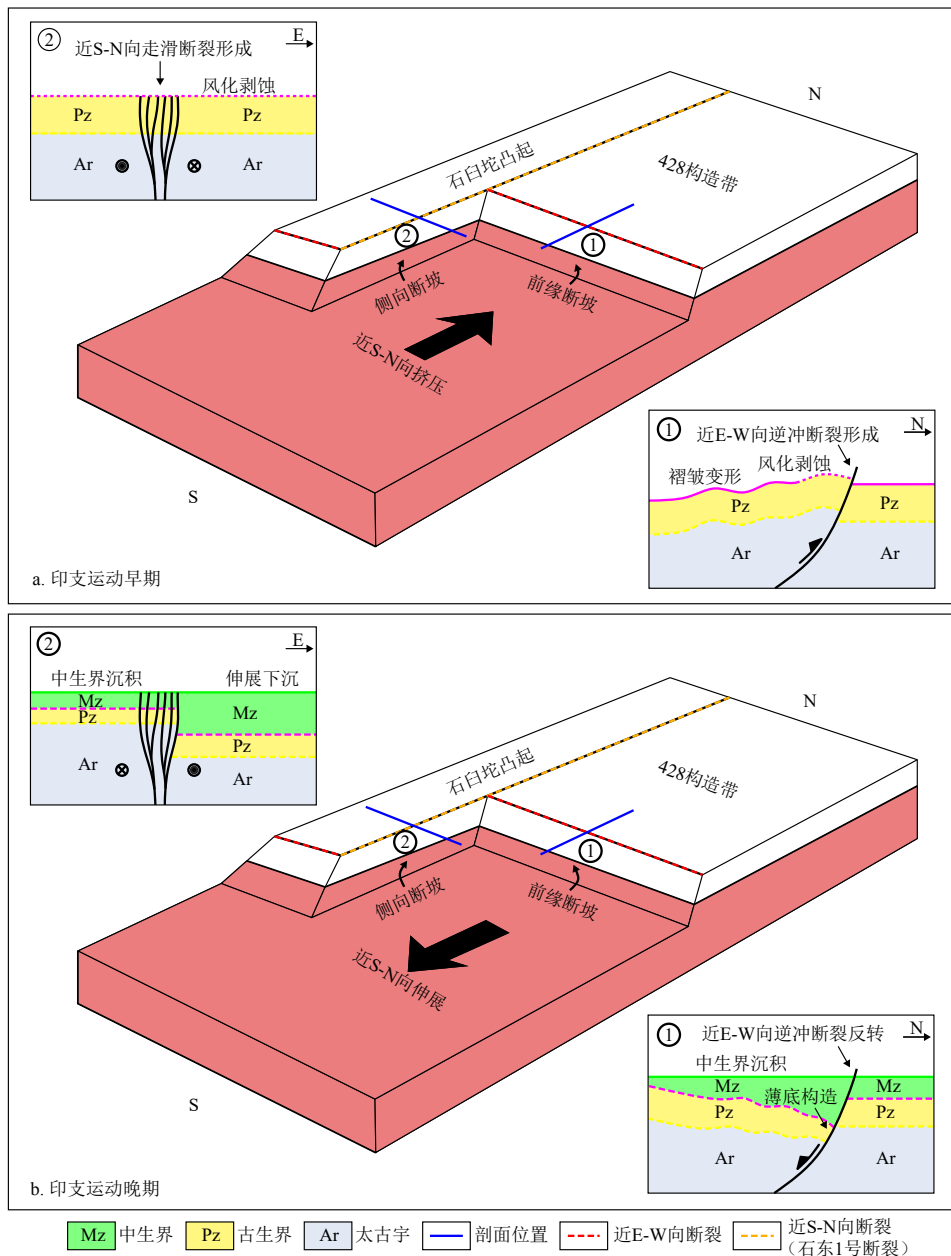


图7 428构造带印支运动时期构造动力学模式图

a: 印支运动早期, b: 印支运动晚期。

Fig.7 The Indosinian tectonic dynamic model of the 428 tectonic belt

a: The early Indosinian, b: the late Indosinian.

## 4 结论

(1)在428构造带与石臼坳凸起的连接处存在一条近S-N向的走滑断裂(石东1号断裂),该断裂的形成最早可追溯至印支期。

(2)石东1号断裂最初以侧向断坡的形式协调了其两侧近E-W向高角度断裂的逆冲作用,导致石臼坳凸起南侧与428构造带南侧的近E-W向高角度断裂南侧附近的古生界发育有薄底构造,而石东

1号断裂东侧附近的古生界则未发育薄底构造,并初步塑造了428构造带近E-W向的隆起格局。

(3)石东1号断裂配合隆起的古生界基底,在燕山期阻挡了其东侧地层向西运动,导致该断裂东侧附近的古生界与中生界发育枢纽近S-N向的协调褶皱变形;原印支期近E-W向高角度断裂在该时期转化为侧向断坡,控制了断裂上盘地层发生近E-W向走滑与近NWW向的逆冲,使其中生界剥蚀减薄而发育薄底构造,并在原有印支期枢纽近E-W向褶皱基础上叠加发育枢纽近NE-SW向褶皱,

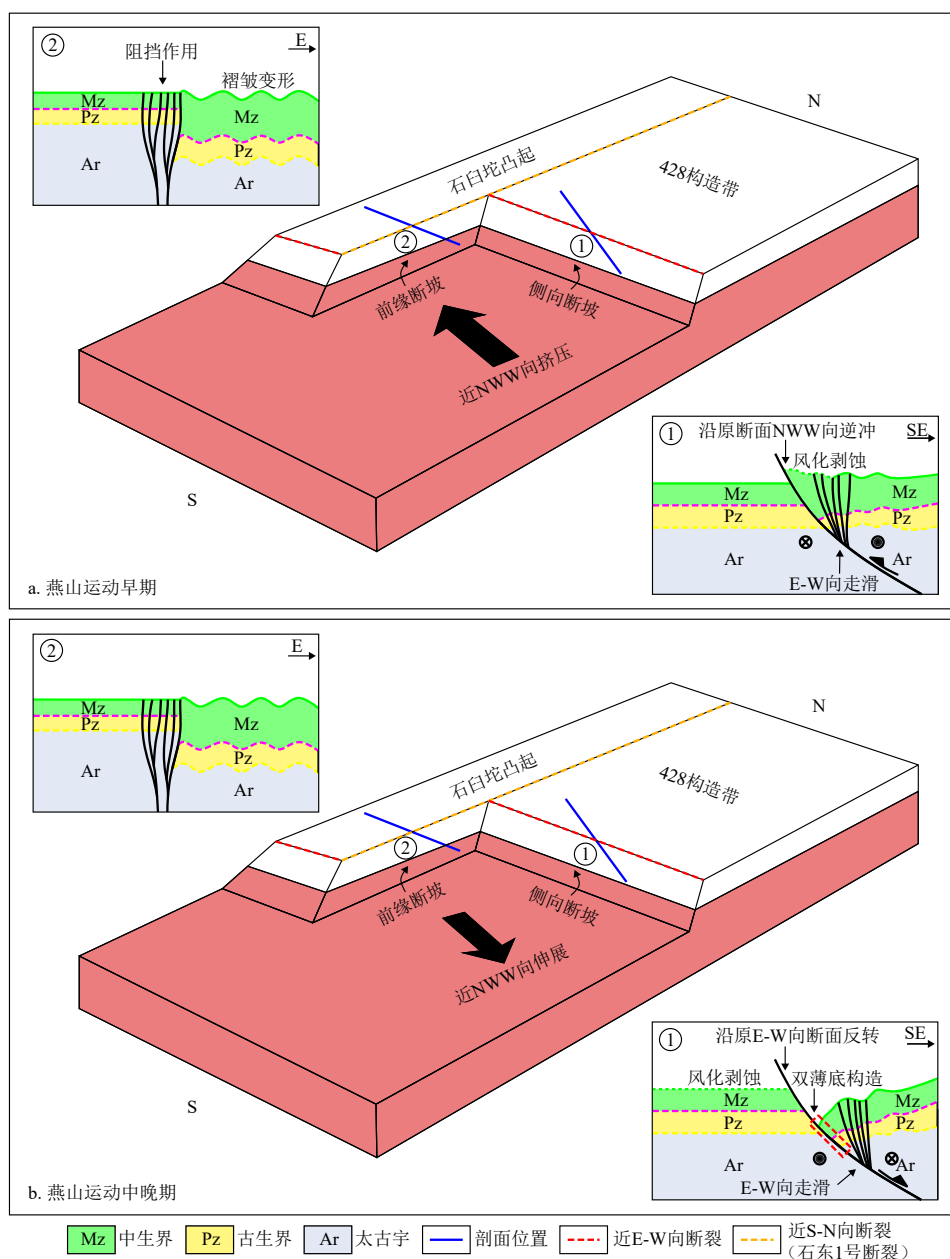


图 8 428 构造带燕山运动时期构造动力学模式图

a: 燕山运动早期, b: 燕山运动中晚期。

Fig.8 The Yanshanian tectonic dynamic model of the 428 tectonic belt

a: The early Yanshanian, b: the middle and late Yanshanian.

导致了古生界与中生界褶皱产状之间存在明显的不协调。

**致谢:** 本研究使用的地震剖面数据由中海石油天津分公司渤海石油研究院提供, 在此表示感谢。

**参考文献 (References)**

[1] 纪友亮, 胡光明, 黄建军, 等. 渤海湾地区中生代地层剥蚀量及中、新生代构造演化研究[J]. *地质学报*, 2006, 80(3): 351-358. [JI

Youliang, HU Guangming, HUANG Jianjun, et al. Eroded strata thickness of Mesozoic and evolution of Mesozoic and Cenozoic basins in the Bohai Bay basin area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(3): 351-358.]

[2] 余一欣, 周心怀, 汤良杰, 等. 渤海湾地区X型正断层及油气意义[J]. *地质学报*, 2009, 83(8): 1083-1088. [YU Yixin, ZHOU Xinhui, TANG Liangjie, et al. X-pattern normal faults in the offshore Bohai Bay basin and Its Significance on Hydrocarbon [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(8): 1083-1088.]

[3] 朱日祥, 郑天愉. 华北克拉通破坏机制与元古代板块构造体系[J]. *科学通报*, 2009, 54(19): 3354-3366. [ZHU Rixiang, ZHENG

- Tianyu. Destruction geodynamics of the North China Craton and its Paleoproterozoic plate tectonics [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(19): 3354-3366.]
- [4] 朱日祥, 徐义刚. 西太平洋板块俯冲与华北克拉通破坏[J]. *中国科学:地球科学*, 2019, 62(9): 1340-1350. [ZHU Rixiang, XU Yigang. The subduction of the West Pacific plate and the destruction of the North China Craton [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(9): 1340-1350.]
- [5] 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]. *地质前缘*, 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.]
- [6] 任建业, 廖前进, 卢刚臣, 等. 黄骅坳陷构造变形格局与演化过程分析[J]. *大地构造与成矿学*, 2010, 34(4): 461-472. [REN Jianye, LIAO Qianjin, LU Gangchen, et al. Deformation framework and evolution of the Huanghua depression, Bohai Gulf [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2010, 34(4): 461-472.]
- [7] Qi G W, Zhang J J, Wang M. Mesozoic tectonic setting of rift basins in eastern North China and implications for destruction of the North China Craton [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 111: 414-427.
- [8] 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]. *地质前缘*, 2017, 24(4): 185-199. [LAN Haoyuan, LI Sanzhong, LI Xiyao, et al. Indosinian deformation in Eastern North China: implications for continental deep subduction polarity [J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(4): 185-199.]
- [9] 孙文军, 李三忠, 王鹏程, 等. 鲁西地区中生代穹盆构造与东亚构造体制转换[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(4): 110-125. [SUN Wenjun, LI Sanzhong, WANG Pengcheng, et al. Mesozoic dome-basin structures in western Shandong province and its bearing on transition of tectonic regimes in east Asia [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(4): 110-125.]
- [10] 郭润华, 李三忠, 索艳慧, 等. 华北地块楔入大华南地块和印支期弯山构造[J]. *地质前缘*, 2017, 24(4): 171-184. [GUO Runhua, LI Sanzhong, SUO Yanhui, et al. Indentation of North China block into greater South China block and Indosinian orocline [J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(4): 171-184.]
- [11] Cheng Y J, Wu Z P, Lu S A et al. Mesozoic to Cenozoic tectonic transition process in Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin, East China [J]. *Tectonophysics*, 2018, 730: 11-28.
- [12] 翟明国. 华北克拉通构造演化[J]. *地质力学学报*, 2019, 25(5): 722-745. [ZHAI Mingguo. Tectonic evolution of the North China Craton [J]. *Journal of Geomechanics*, 2019, 25(5): 722-745.]
- [13] Wang G Z, Li S Z, Li X Y, et al. Destruction effect on Meso-Neoproterozoic oil-gas traps derived from Meso-Cenozoic deformation in the North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 2019, 333: 105427.
- [14] Liu B R, Neubauer F, Liang C Y, et al. Geological control of the eastern Great Wall: Mountain-basin relationships in the eastern North China Craton [J]. *Gondwana Research*, 2022, 102: 60-76.
- [15] 戴俊生, 陆克政, 李理, 等. 渤海湾盆地构造对油气藏分布的控制作用[J]. *勘探家*, 1997(4): 5-8. [DAI Junsheng, LU Kezheng, LI Li, et al. Tectonic control over the distribution of oil and gas pools in Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Explorationist*, 1997(4): 5-8.]
- [16] 杨池银, 张一伟. 黄骅地区叠合盆地演化与潜山油气聚集[J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30(6): 8-12. [YANG Chiyin, ZHANG Yiwei. Huanghua superimposed basin evolution and oil & gas accumulation in buried hill [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(6): 8-12.]
- [17] 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.]
- [18] 肖述光, 吕丁友, 侯明才, 等. 渤海海域西南部中生代构造演化过程与潜山形成机制[J]. *天然气工业*, 2019, 39(5): 34-44. [XIAO Shuguang, LV Dingyou, HOU Mingcai, et al. Mesozoic tectonic evolution and buried hill formation mechanism in the southwestern Bohai Sea [J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(5): 34-44.]
- [19] 叶涛, 牛成民, 王清斌, 等. 渤海湾盆地大型基岩潜山储层特征及其控制因素: 以渤中19-6凝析气田为例[J]. *地质学报*, 2021, 95(6): 1889-1902. [YE Tao, NIU Chengmin, WANG Qingbin, et al. Characteristics and controlling factors of large bedrock buried-hill reservoirs in the Bohai Bay basin: a case study of the BZ19-6 condensate field [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(6): 1889-1902.]
- [20] 周琦杰, 刘永江, 王德英, 等. 渤海湾中部中、新生代构造演化与潜山的形成[J]. *地质前缘*, 2022, 29(5): 147-160. [ZHOU Qijie, LIU Yongjiang, WANG Deying, et al. Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution and buried hill formation in central Bohai Bay [J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(5): 147-160.]
- [21] 王宇, 徐春强, 郭玲莉, 等. 渤海湾盆地石白坨东428潜山构造成因解析: 华北克拉通破坏的深度揭示[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(1): 219-228. [WANG Yu, XU Chunqiang, GUO Lingli, et al. Structural analysis of Shijiutuo east 428 buried hill in Bohai Bay Basin: Implications on destruction of the North China Craton [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(1): 219-228.]
- [22] 杨一珉. 渤中坳陷石白坨凸起倾末端427/428构造潜山成藏特征研究[D]. 成都理工大学硕士学位论文, 2018. [YANG Yimin. The research of hydrocarbon accumulation conditions of buried hills in Shijiutuo uplift tilting end: 427/428 of Bozhong depression[D]. Master Dissertation of Chengdu University of Technology, 2018.]
- [23] 王德英, 于娅, 张藜, 等. 渤海海域石白坨凸起大型岩性油气藏成藏关键要素[J]. *岩性油气藏*, 2020, 32(1): 1-10. [WANG Deying, YU Ya, ZHANG Li, et al. Key factors for reservoir formation of large lithologic reservoirs in Shijiutuo uplift, Bohai Sea [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2020, 32(1): 1-10.]
- [24] 薛永安, 王德英, 王清斌, 等. 渤海湾盆地渤中凹陷构造演化及其对潜山储层控制作用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2021: 27-36. [XUE Yong'an, WANG Deying, WANG Qingbin, et al. Tectonic Evolution of Bohai Depression in Bohai Bay Basin and its Control Effect on Buried Hills Reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2021: 27-36.]
- [25] 李三忠, 张国伟, 周立宏, 等. 中、新生代超级汇聚背景下的陆内差异变形: 华北伸展裂解和华南挤压逆冲[J]. *地质前缘*, 2011,

- 18(3): 79-107. [LI Sanzhong, ZHANG Guowei, ZHOU Lihong, et al. The opposite Meso-Cenozoic intracontinental deformations under the superconvergence: Rifting and extension in the North China Craton and shortening and thrusting in the South China Craton [J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(3): 79-107.]
- [26] Li S Z, Jahn B M, Zhao S J, et al. Triassic southeastward subduction of North China Block to South China Block: Insights from new geological, geophysical and geochemical data [J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 166: 270-285.
- [27] 李三忠, 索艳慧, 李玺瑶, 等. 西太平洋中生代板块俯冲过程与东亚洋陆过渡带构造-岩浆响应[J]. *科学通报*, 2018, 63(16): 1550-1593. [LI Sanzhong, SUO Yanhui, LI Xiyao, et al. Mesozoic plate subduction in West Pacific and tectono-magmatic response in the East Asian ocean-continent connection zone [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(16): 1550-1593.]
- [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] 肖述光, 李慧勇, 李飞, 等. 渤海西部中生代多旋回构造演化与潜山形成[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(6): 1-10. [XIAO Shuguang, LI Huiyong, LI Fei, et al. Meso-Cenozoic multicyclic tectonic evolution and its bearing on the formation of buried hill systems in the Western Bohai Sea [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(6): 1-10.]
- [30] 张震, 张新涛, 徐春强, 等. 渤海海域428潜山构造演化及其对油气成藏的控制[J]. *东北石油大学学报*, 2019, 43(4): 69-77. [ZHANG Zhen, ZHANG Xintao, XU Chunqiang, et al. Tectonic evolution and its controlling on hydrocarbon accumulation of 428 buried hill in Bohai Sea [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2019, 43(4): 69-77.]
- [31] 徐春强, 张震, 王晨杰, 等. 渤海海域428潜山地层结构特征及勘探潜力[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(11): 52-58. [XU Chunqiang, ZHANG Zhen, WANG Chenjie, et al. Stratigraphic framework and exploration potential of buried hill 428 in the Bohai Sea [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(11): 52-58.]
- [32] 朱吉昌, 冯有良, 孟庆任, 等. 渤海湾盆地晚中生代构造地层划分及对比: 对燕山运动的启示[J]. *中国科学:地球科学*, 2020, 62(11): 1783-1804. [ZHU Jichang, FENG Youliang, MENG Qingren, et al. Late Mesozoic tectonostratigraphic division and correlation of the Bohai Bay basin: Implications for the Yanshanian Orogeny [J]. *Science China Earth Sciences*, 2020, 62(11): 1783-1804.]
- [33] 叶涛, 牛成民, 王德英, 等. 渤海西南海域中生代构造演化、动力学机制及其对华北克拉通破坏的启示[J]. *地学前缘*, 2022, 29(5): 133-146. [YE Tao, NIU Chengmin, WANG Deying, et al. Mesozoic tectonic evolution and its dynamic mechanism of the southwest of Offshore Bohai Bay Basin: implications for the destruction of North China Craton [J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(5): 133-146.]
- [34] 徐小龙. 石白坨凸起断裂变形与演化特征[D]. 中国石油大学(北京)硕士学位论文, 2016. [XU Xiaolong. Deformation and evolution characteristics of faults in Shijiutuo uplift, Offshore Bohai Bay Basin[D]. Master Dissertation of China University of Petroleum (Beijing), 2016.]
- [35] 盛世强, 戴黎明, 李法坤, 等. 基于GOCAD软件的渤中凹陷428构造带三维地质建模[J]. *海洋地质前沿*, 2023. [SHENG Shiqiang, DAI Liming, LI Fakun, et al. 3D geological modeling of the 428 tectonic zone in bozhong depression using gocad software [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2023.]