

渤海海域印支期逆冲推覆体系的分带性及其动力学成因机制

吕丁友,杨海风,于海波,刘朋波,邓辉,张参

[中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津300452]

摘要:印支期是改变整个中国东部陆内构造变形样式的一次极为重要的构造活动期,但目前对其认识主要基于对华北克拉通周缘造山带及渤海湾盆地陆域的研究,而对渤海海域中生代构造演化的研究相对薄弱。基于最新的三维大连片地震数据,对渤海海域印支期变形开展了详细的构造解析工作,并提出印支期逆冲推覆系统可划为以下3个逆冲带:①第一逆冲带位于沙垒田凸起、渤中19-6构造区和渤南低凸起一线,为高角度冲出带,表现为太古宇基底在印支期沿逆断层高角度逆冲,部分出露地表并长期遭受风化剥蚀,导致该区域缺失古生界,高角度逆冲断层随后在燕山期和喜马拉雅期转换为走滑断层,对应于现今张家口-蓬莱断裂带的渤海湾段;②第二逆冲带为位于渤中凹陷和渤东凹陷的逆冲-褶皱中部带,其古生界主要表现为断层相关褶皱式的变形特征,特别是在渤东凹陷可识别出典型的叠瓦式构造和双重构造;③第三逆冲带为位于辽东湾坳陷的逆冲推覆前锋带,其古生界变形主要表现为宽缓的背斜、向斜构造,这一系列背斜和向斜与盆地基底内隐伏的印支期坡坪式逆冲推覆断层有关,为典型的断展或断滑褶皱。基于横切整个渤海海域的地震剖面及前人的研究资料,认为3个逆冲推覆带的空间组合受控于三级台阶式的印支期基底滑脱层。渤海海域这种印支期逆冲推覆体系分带性可能与华北克拉通不同区域的基底性质差异有关,即鲁西基底在印支期沿滑脱层逆冲至燕辽基底之上,并导致上覆古生界沉积盖层具有分带性的褶皱变形特征。

关键词:成因机制;滑脱层;构造分带性;逆冲推覆系统;印支期;渤海海域

中图分类号:TE121.2 **文献标识码:**A

Zonation and dynamic genetic mechanism of the Indosinian thrust nappe system in Bohai Sea

LYU Dingyou, YANG Haifeng, YU Haibo, LIU Pengbo, DENG Hui, ZHANG Shen

(Tianjing Branch, CNOOC, Tianjin 300452, China)

Abstract: The Indosinian orogeny is a key period shaping the intracontinental deformation pattern in eastern China. Current understanding of the Indosinian tectonism period is mainly based on the study of the orogenic belt around the North China Craton and the continental area of the Bohai Bay Basin. However, little research attention has been paid to the Mesozoic tectonic evolution in the Bohai Sea. Based on the latest three-dimensional seismic reflection data, we present a detailed structural analysis of the Indosinian deformation in the Bohai Sea and propose that the Indosinian thrust nappe system can be divided into the three thrust zones as follows. The first thrust zone along Shaleitian salient, Bozhong 19-6 structural zone and the Bonan sub-salient, is a high-angle thrust structure as shown by the Archaean basement thrust at high angle along reverse fault with part outcropped and subject to long-term weathering and denudation during the Indosinian period, resulting in the absence of the Paleozoic. The high-angle thrust faults turned into strike-slip faults as shown by the present-day Bohai Bay section along the Zhangjiakou-Penglai fault zone. The second one, the central thrust-fold zone located in the Bozhong and Bodong sags, is mainly characterized by fault-related fold deformation in the Paleozoic strata, especially in the Bodong Sag, where typical imbricates and duplex structures can be identified. The third thrust zone, the front belt of the thrust nappe located in the Liaodong Bay Depression, is

收稿日期:2023-01-22;修订日期:2023-04-06。

第一作者简介:吕丁友(1974—),男,博士、高级工程师,海上油气勘探与科研管理。E-mail:lvdy@cnooc.com.cn。

基金项目:中海石油(中国)有限公司“七年行动计划”重大科技专项(CNOOC-KJ 135 ZDXM 36 TJ 08 TJ)。

mainly characterized by extensive and gentle anticlines and synclines under the Paleozoic deformation, typical fault-propagation or fault-detaching folds, which are associated with the hidden thrust nappe faults of slope-plateau type in the basin basement during the Indosinian. We may conclude through the seismic section across the entire Bohai Sea and previous research data, that the spatial association of three thrust nappe zones is controlled by the three-step basement detachment layers during the Indosinian period. The dynamic genetic mechanism of the Indosinian thrust nappe system in the Bohai Sea may be related to the differential basement features in the North China Craton, that is, the thrusting of Luxi basement against Yanliao basement along the decollement layer during the Indosinian, leading to the overlying Paleozoic caprock characterized by fold deformation in zonation.

Key words: genetic mechanism, detachment layer, tectonic zonation, thrust nappe system, Indosinian, Bohai Sea

引用格式: 吕丁友, 杨海风, 于海波, 等. 渤海海域印支期逆冲推覆体系的分带性及其动力学成因机制[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 720–734.

DOI: 10. 11743/ogg20230315.

LYU Dingyou, YANG Haifeng, YU Haibo, et al. Zonation and dynamic genetic mechanism of the Indosinian thrust nappe system in Bohai Sea[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 720–734. DOI: 10. 11743/ogg20230315.

渤海海域位于渤海湾盆地东部, 由盆地内的两个中-新生代叠合坳陷组成, 是华北克拉通破坏的中心^[1-6]。盆内新生界富含油气资源^[7-11], 因此前人的研究往往聚焦于盆地在燕山期和喜马拉雅期的构造-沉积演化过程^[12-19], 而忽略了印支期的作用。印支期是改变整个中国东部陆内构造变形样式的一次极为重要的构造活动期^[20-22], 其标志着华南和华北两大陆块沿着秦岭—大别—苏鲁造山带发生了强烈的碰撞、拼贴过程^[23-24], 从而形成了统一的东亚大陆边缘, 并为随后燕山运动和喜马拉雅运动在华北及其周缘的开启提供了基本的构造格架^[25-26]。这就意味着印支运动与燕山、喜马拉雅两期运动具有一种继承性关系, 这种关系在渤海湾盆地及其周缘表现为主控盆断裂均继承于印支期构造。例如, 郯庐断裂起源于印支期苏鲁造山带的弥散性碰撞边界^[27-28], 鲁西地区广泛发育具有继承性特征的滑脱层^[29], 渤海湾盆地内印支期古构造格局控制了中生界乃至新生界的构造变形样式及沉积分布特征^[30]等。由此可见, 认识渤海海域印支期构造变形对进一步理解不同构造期叠加-改造过程、华北克拉通的破坏过程, 乃至渤海海域油气藏的勘探开发, 都具有重要意义。

印支期挤压造山活动在华北地区有着明确的地质记录, 表现为大规模逆冲推覆断层的广泛发育和区域上角度不整合面的形成^[18, 24, 31-35]。Li等(2017)经过大量的野外地质调查及对前人资料的进一步总结, 厘定了中国东部陆缘印支期的变形特征, 并提出华北地区印支期变形表现为与大华南陆块和华北陆块碰撞边界相关的巨型弧形逆冲-褶皱变形系统, 该系统在华北地区不同区段指示出了不同的挤压方向^[36]。在秦岭—大别造山带, 表现为EW向展布的逆冲-褶皱变形带;

在苏鲁造山带南段的徐淮地区, 表现出近NE向展布的弧形逆冲-褶皱变形带^[37]; 在鲁西地区和渤海湾盆地的陆域部分则转变为NE向和近EW向的宽缓背斜和一系列弧形叠瓦状逆冲推覆构造^[30, 38]。

虽然这种宏观逆冲-褶皱变形系统的发现对于理解华北地区印支期的构造演化过程具有重要的指导意义, 但把研究范围缩小到渤海海域时就会存在一些问题。由于受海域地震资料品质的约束, 目前对渤海海域印支期构造变形特征的认识仍不清楚, 包括: ①对盆内印支期断裂-褶皱的空间组合特征认识不清楚; ②对盆内印支期逆冲推覆构造的分带性认识不清楚; ③对盆内印支期变形的动力学成因机制认识不清楚。由此, 可进一步引申出华北地区巨型弧形逆冲-褶皱系统如何延伸至渤海海域, 以及渤海湾盆地海域与陆域间印支期变形对比关系等一系列亟待解决的关键科学问题。为了解决以上问题, 本文基于渤海海域最新的三维大连片地震数据, 对研究区印支期变形开展了详细的构造解析工作, 提出印支期逆冲推覆系统可划分为3个逆冲带, 并解析了每个逆冲带的变形特征, 进一步探讨了这种分带性的动力学成因机制。

1 区域地质背景

渤海湾盆地主要由华北平原和渤海海域两部分组成。渤海海域位于渤海湾盆地东部, 其北靠燕山褶皱带, 西接黄骅坳陷和济阳坳陷, 东部与辽东隆起和鲁西凸起相临, 南部为鲁西隆起(图1)。渤海海域内发育了渤中和辽东湾两大坳陷以及深切至岩石圈的郯庐断裂。其中, 郯庐断裂大约形成于晚侏罗世—早白垩世, 表现为左行走滑性质, 在三叠世则表现为弥散型边界

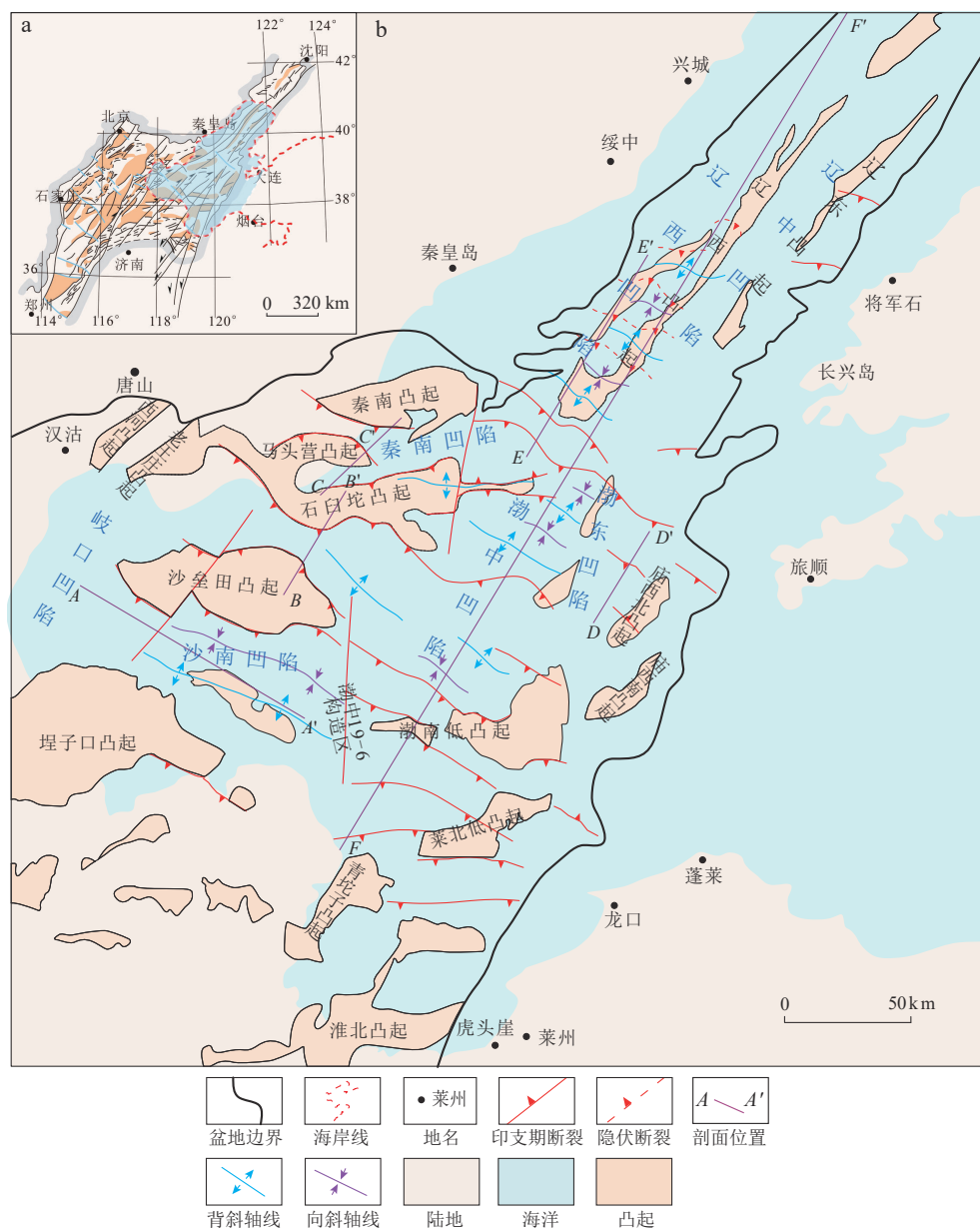


图1 渤海海域印支期构造纲要

Fig. 1 Tectonic outline map of the Bohai Sea during the Indosinian

a. 渤海湾盆地构造纲要; b. 渤海海域构造纲要

特征,对印支期的整体盆-山格局影响较小^[27, 36, 39-41]。渤中坳陷位于渤海中部,其自南向北发育了沙南凹陷、沙垒田-渤中19-6凸起、渤中凹陷、石臼坨-428凸起以及秦南凹陷等次一级构造单元。最新的地球物理资料显示,渤中凹陷地壳厚度为12~22 km,为整个华北克拉通最薄处,可视为华北克拉通的破坏中心^[42]。辽东湾坳陷位于渤海东北部,是下辽河坳陷向海域的延伸^[43-47],整体呈NE向展布,由于坳陷发育位置与郯庐断裂相重合,因此其中-新生代的构造演化过程与郯庐断裂密切相关^[28, 48-49],但针对辽东湾坳陷印支期构造变形特征的研究则相对较少。

华北克拉通经历了多期次的构造运动,这在渤海海域表现为3个角度不整合面的广泛分布。依据这3个角度不整合面可将区域地层划分为4个主要构造层。第一构造层为太古宇变质花岗岩,为盆地的基底,与上覆古生界之间为沉积接触关系。根据基底类型,渤海海域又可划分为鲁西基底和燕辽基底,两个基底的交界大致位于张蓬构造带和旅大构造带之间^[50]。第二构造层主要由上、下古生界组成,两者之间为平行不整合接触,在中生代构造运动前,其厚度是稳定的。下古生界为稳定克拉通背景下的陆表海沉积,以寒武系和奥陶系海相碳酸盐岩为主^[51]。上古生界为石炭

系-二叠系海-陆交互相沉积。两者之间缺失志留系-泥盆系,指示了加里东期的垂向构造运动^[51]。在三叠纪,包括渤海湾盆地在内的华北克拉通经历了印支运动,导致了古生界发生了明显的褶皱变形,并形成了一系列大规模的逆冲推覆构造^[52],使得古生界与上覆中生界之间表现为角度不整合关系。第三构造层为中生界,在渤海海域又可划分为中-下侏罗统、上侏罗统和下白垩统3个亚层,指示了燕山期的幕式挤压。但由于燕山期构造变形不是本文的研究重点,且现有地震资料难以在渤海海域识别出3个亚层,因此本文将其作为一个构造层进行研究。第四构造层为新生界,自下而上依次发育了孔店组、沙河街组、东营组、馆陶组、明化镇组以及平原组^[53]。

2 逆冲推覆分带特征

本文基于最新的渤海三维大连片地震数据和前人的研究成果^[1, 5, 54-55],对渤海海域进行了详细的构造解释,构建了渤海海域印支期构造纲要图(图1),并将研

究区褶皱-逆冲推覆体系划分为沙垒田凸起高角度逆断层冲出处、渤中-渤东凹陷逆冲-褶皱中部带和辽东坳陷逆冲推覆前锋带。下文将着重介绍这3个带的逆冲-褶皱变形特征。

2.1 沙垒田高角度逆断层冲出处

根据褶皱变形样式及地层分布特征,本文将沙垒田高角度逆断层冲出处进一步划分为前缘的沙垒田凸起和后缘的沙南凹陷、埕北低凸起和埕北凹陷,它们之间由一条NW-SE向断层所分隔,整体呈NW-SE向展布。

埕北低凸起古生界和中生界变形很好地展示出后缘带印支期断层和褶皱变形特征(图2)。埕北凹陷北部由中、新生代控盆的埕北断裂与埕北低凸起分隔(图2b—f)。从一系列NE-SW向剖面中可见,古生界在远离断层处厚度较为稳定,靠近断层处地层逐渐减薄,顶部削截现象明显,表现为典型的“薄底”构造特征,表明该断层在印支期为逆冲断层。同时,古生界在部分剖面中显示出明显的褶皱变形,上覆中生界超覆

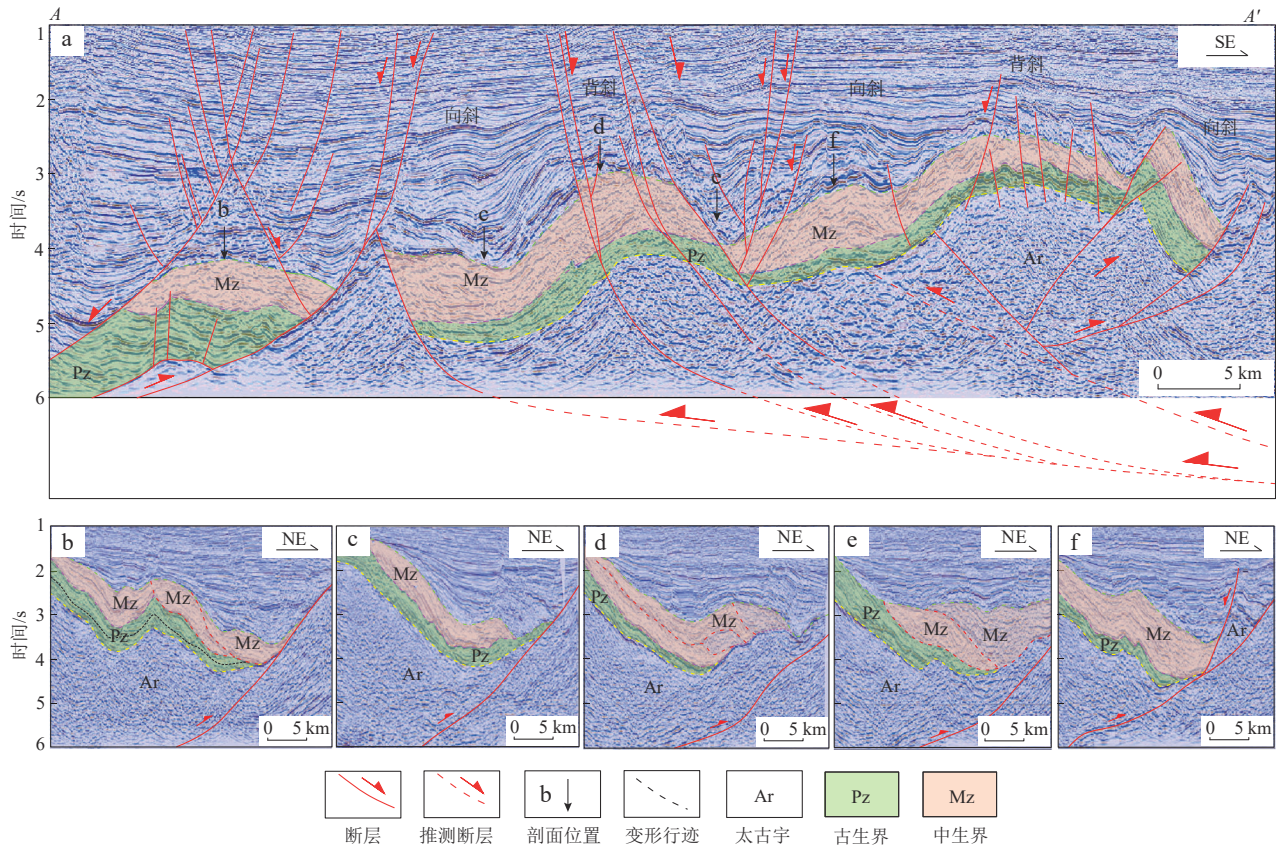


图2 渤海海域埕北低凸起印支期和燕山期挤压变形特征(a图中剖面位置见图1b)

Fig. 2 Compression-related deformation during the Indosinian and Yanshanian in the Chengbei sub-salient, Bohai Sea

(see Fig. 1b for the section location of Fig. 1a)

(绿色、紫色和黄色虚线为地层界线。)

于古生界之上,指示该区域古生界褶皱变形发生在中生界沉积之前,即为印支期变形的结果(图2b)。从图2d中可以看到,埕北断层控制了后缘带的中、新生界沉积,且沉积厚度在靠近断层处增大,为典型的半地堑。值得注意的是,中生界在靠近断层的区域存在较为明显的褶皱变形,局部呈透镜状(图2e),且与上覆新生界呈角度不整合关系,指示了燕山期挤压事件。在NW-SE向剖面中可见一系列背斜和向斜相间排列(图2a)。不同于NE-SW向剖面,NW-SE向剖面中可见古生界和中生界均卷入了褶皱变形,且变形具有一致性,也指示二者经历了燕山期挤压事件。结合两个方向的剖面可知,现今古生界的褶皱形态表现为一系列的穹窿构造,为印支期和燕山期褶皱叠加的结果。其中,穹窿整体呈NW-SE向展布,说明印支期褶皱枢纽走向为NW-SE向,与边界逆断层的走向基本一致,指示了印支期挤压事件。

虽然沙垒田凸起和渤中19-6构造区两个潜山大部分区域缺失古生界和中生界,但根据最新的钻井资料显示,沙垒田凸起的北部残留了部分侏罗系,其下伏太古宇变质岩基底,缺失古生界,这说明印支期沙垒田凸起便开始抬升,并导致古生界遭受长期风化剥蚀。此外,沙垒田凸起北部边界断层的运动学特征也能够较好地验证这一过程(图3)。从剖面中可以看到,沙

垒田凸起的北部边界为两条SW倾向的高角度断层。在两条断层之间可识别出残留的古生界,位于南侧断层上盘的沙垒田凸起在太古宇变质岩基底之上则缺失古生界,而残留古生界之上沉积的中生界超覆于古生界和沙垒田凸起之上,因而指示该断层在中生界沉积之前,即在印支期表现为逆断层性质(图3)。边界断层东部的中生界褶皱变形较为强烈,且与下伏古生界变形明显不协调,指示其为燕山运动的结果。值得注意的是,两条高角度断层向上可切穿至新生界,且产状变为近直立,呈负花状,说明该断层在新生代转变为张扭性走滑断层。对比前人的研究成果发现^[56-57]其可对应张蓬断裂的渤海湾段,这就意味着现今的张蓬构造带可能脱胎于印支期的高角度逆冲推覆断层。

2.2 渤中-渤东凹陷逆冲-褶皱中部带

渤海海域印支期逆冲推覆中部带包括石臼坨凸起、秦南凹陷、渤中凹陷以及渤东凹陷。其中,石臼坨凸起和渤中凹陷具有相似的逆冲-褶皱变形特征,而渤东凹陷则与两者存在差异。

本文选取了一条过石臼坨凸起和秦南凹陷的典型剖面来揭示印支期的变形样式。在剖面中可见,古生界过石臼坨凸起整体呈背形展布。其中,背斜北翼顶部发育有削截现象,古生界表现为“薄底”构造特征,上

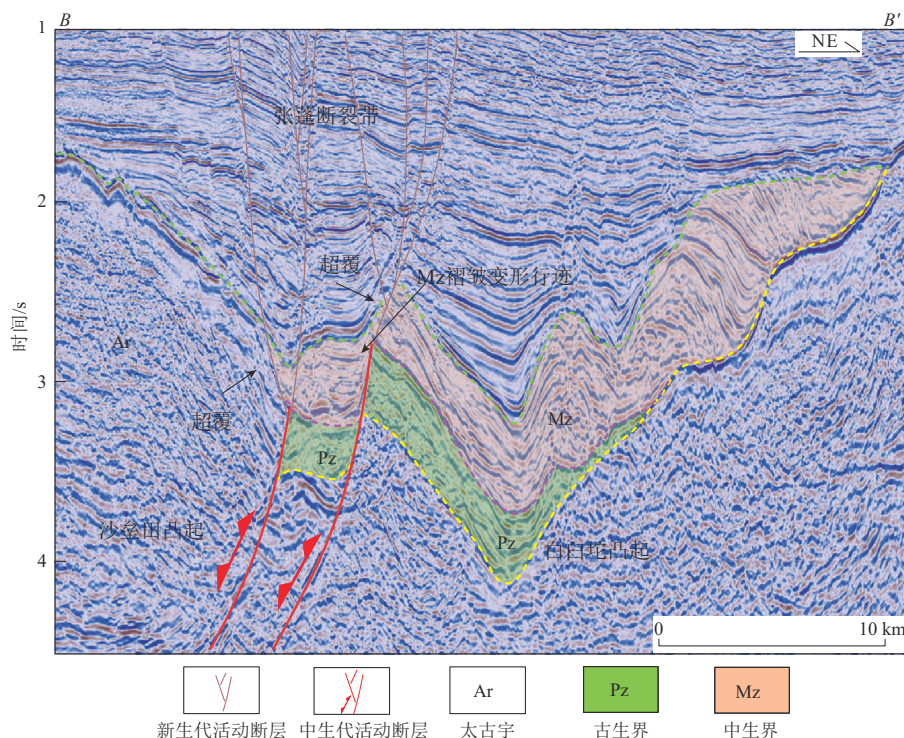


图3 渤海海域过张蓬断裂带典型剖面(剖面位置见图1b)

Fig. 3 Typical profile of the Zhangpeng fault zone in the Bohai Sea (see Fig. 1b for the profile location)

(绿色、紫色和黄色虚线为地层界线。)

覆侏罗系超覆于古生界之上,指示白垩纪以来的控凹断层在印支期为逆冲断层(图4)。此外,背斜北翼的古生界中还可以识别出一些层间褶皱,这些褶皱的轴迹指示出一系列次级向斜和背斜。其中,向斜的上覆地层超覆于向斜两翼(图4),指示侏罗系沉积之前就存在向斜的古地形,说明次级背斜和向斜形成于印支期。在秦南凹陷内,古生界之上的地层推测为侏罗系,其与下伏古生界和上覆白垩系之间都存在明显的角度不整合关系。值得注意的是,侏罗系的厚度在靠近古生界背形的转折端(石臼坨凸起)处最厚,且遭受了强烈的风化剥蚀,削截明显,但在靠近秦南凹陷现今的沉积中心时,地层厚度则逐渐减薄。这种地层厚度变化说明,在接受侏罗系沉积之前,石臼坨凸起应为低地貌,而现今的秦南凹陷为相对高地形,结合前文识别出的印支期变形特征推测,石臼坨凸起和秦南凹陷在印支期为一个向斜组成的逆冲-褶皱系统。而现今地形发生倒转与早白垩世区域上的伸展裂解过程有关^[58],这在剖面上表现为控凹断裂明显控制了白垩统沉积,说明断层在伸展过程中,上盘石臼坨凸起沿断层面发生旋转、掀斜并抬升。类似的剖面还可见于渤中凹陷,因此石臼坨凸起和渤中凹陷均具有相似的逆冲-褶皱变形特征。

与石臼坨凸起和渤中凹陷相比,渤东凹陷印支期变形的证据更加清晰。在过渤东凹陷的剖面中可以识别出印支期的挤压式褶皱,以及在其前缘发育的一系列坡坪式逆冲推覆断层,且局部可见典型的叠瓦式逆冲、与坡坪式逆冲相关的断弯褶皱作用。在地震剖面中,叠瓦式构造表现为褶皱迹线的不连续性,每个不连续面都可能代表了逆冲断面(图5)。同时,这些褶皱

和断层都未直接卷入上覆侏罗系,因而可判断渤东凹陷逆冲-褶皱的形成时间极可能是印支期。从平面上来看,这些逆冲断层和褶皱枢纽的走向均为近EW向,与印支期挤压方向相垂直。

2.3 辽东湾坳陷逆冲推覆前锋带

穿过辽东湾坳陷的NE-SW向剖面揭示古生界的褶皱变形由一个背斜和一个向斜组成(图6)。其中,靠南的背斜为典型的箱状褶皱,在箱状褶皱转折端处,古生界还发育了一系列次级背斜和向斜。这些次级背斜和向斜明显被削截,导致古生界厚度减薄,并与上覆中生界之间呈超覆关系。靠北的向斜整体由两个次级向斜及其中间的次级背斜组成,呈“W”形。与靠南的背斜不同的是,向斜内的古生界顶部没有明显的削截现象,且地层显著偏厚,可能代表了印支期逆冲推覆断层作用导致的局部增厚。向斜内的中生界超覆于古生界之上,且沉积厚度的变化也呈现出“W”形特征,两个沉积中心分别位于两个向斜的转折端处。这种沉积特征指示中生界沉积过程受控于古生界的古地貌。由以上现象可推断辽东湾坳陷古生界的褶皱变形形成于印支期。特别值得注意的是,向斜北翼古生界中还能够识别出一些层间褶皱以及向北逐渐被削截的现象(图6)。褶皱的轴迹和削截现象指示向北可能还存在一个宽缓的背斜式潜山,虽然该背斜已经被晚中生代的大型拆离断层所改造,但古生界在辽东湾坳陷北部被剥蚀殆尽的证据能够指示该潜山在中生代很可能为高地形,长期遭受风化剥蚀作用。

本文认为这些复背斜和复向斜的形成与太古宇基底中一系列坡坪式逆冲推覆断层有关。在地震剖面5.0~5.7 s的范围内,可以识别出定向性很好的地震反射强轴区,该强轴很可能代表了印支期逆冲推覆体系的滑脱层(断坪)。同时,在每一个背斜处的太古宇基底内,还可以识别出一系列南倾、倾角大约45°的逆断层(断坡),这些断层向下都可以归并至滑脱层上。需要强调的是,不同于渤中凹陷内的逆冲断层,图6所示剖面中的逆断层都没有冲出印支期的古地表,现今表现为盲断层。

3 讨论

3.1 渤海海域三级台阶式逆冲推覆体系与印支期滑脱层

虽然前文描述了渤海海域印支期逆冲-褶皱3个区带的变形特征,但对于其在空间上的分带性组合

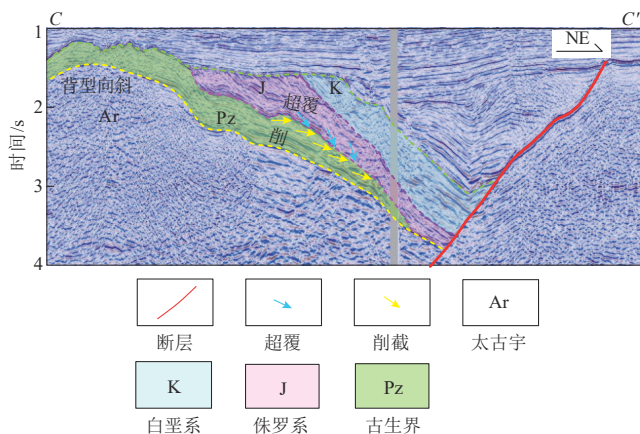


图4 渤海海域西部印支期逆冲推覆构造(剖面位置见图1b)

Fig. 4 The Indosinian thrust nappe structure in the western Bohai Sea (see Fig. 1b for the profile location)
(绿色、紫色和黄色虚线为地层界线。)

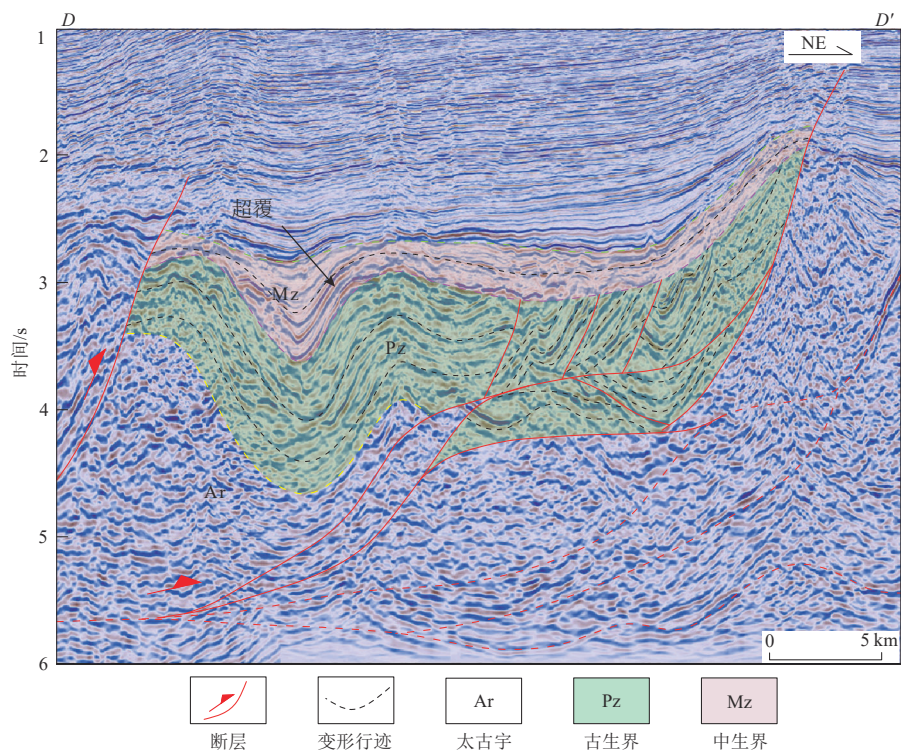


图5 渤海海域东部典型坡坪式逆冲推覆构造(剖面位置见图1b)

Fig. 5 Typical thrust nappe structure of slope-plateau type in the eastern Bohai Sea (see Fig. 1b for the profile location)

(绿色、紫色和黄色虚线为地层界线。)

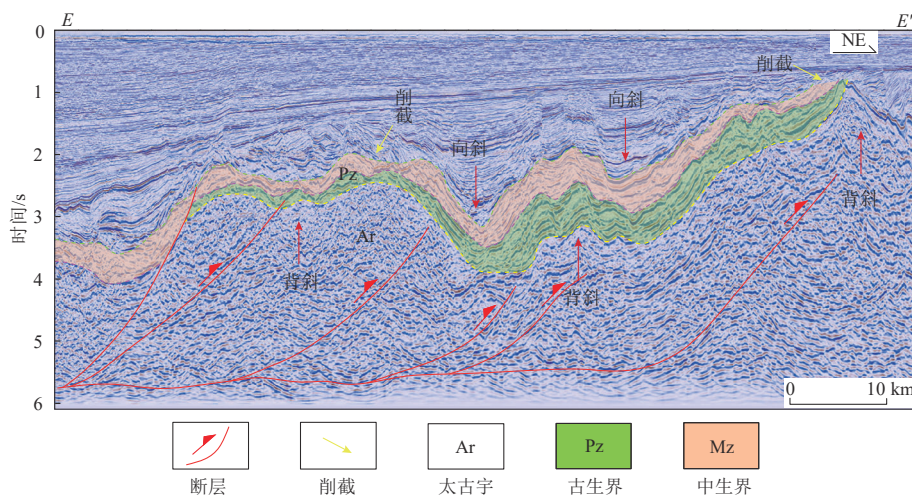


图6 渤海海域典型复式向斜和复式背斜(剖面位置见图1b)

Fig. 6 Typical compound synclines and anticlines in the Bohai Sea (see Fig. 1b for the profile location)

(绿色、紫色和黄色虚线为地层界线。)

样式还不清楚。为此,本文选取了一条横跨整个渤海海域的NE-SW向大剖面(垂直于印支期构造线的方向),剖面覆盖了研究区的主要构造单元,具体包括渤中坳陷的黄河口凹陷、渤南低凸起、渤中凹陷,以及辽东湾坳陷的辽西凸起和辽西凹陷。虽然由于受到海域地震资料品质的约束,且缺少深层钻井数

据,很难精准确定详细的前新生界地层划分方案,但依然可以根据剖面中的超覆关系识别出主要构造层的发育位置。因此,在对剖面进行详细构造解析基础之上,本文绘制了整个渤海海域印支期的逆冲-褶皱变形样式,并进一步划分出三级台阶式的逆冲推覆体系(图7)。

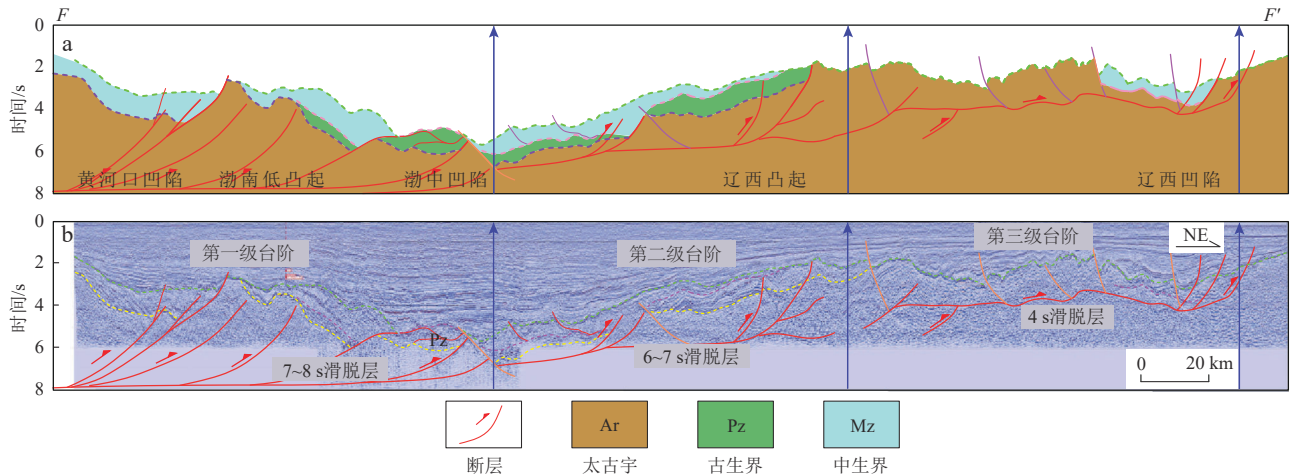


图7 渤海海域三级台阶式逆冲推覆体系(剖面位置见图1b)

Fig. 7 Three-step thrust nappe system in the Bohai Sea (see Fig. 1b for the profile location)

a. 逆冲推覆体系典型剖面;b. 逆冲推覆体系剖面解释

3.1.1 第一级台阶

第一级台阶包括黄河凹陷和渤南低凸起两个次级构造单元。其中,黄河凹陷为由一系列南倾边界断层所控制的半地堑。由于地震资料约束,这些边界断层向下只能识别至6 s左右。根据凹陷内古生界的“薄底”现象和中生界沉积厚度变化,可确定这些边界断层为负反转断层,即印支期为逆冲断层,中、新生代反转为伸展断层。这与沙垒田凸起南部边界断层的运动学性质基本一致(图2)。在渤南低凸起中部可识别出一组高角度断层。断层控制了中生界沉积,并导致古生界的“薄底”现象,断层向上可切穿新生界,具有典型的花状构造,这种特征可类比于沙垒田凸起北部边界的张蓬构造带。因此,可以认为该组断层为张蓬构造带向东的延伸。在渤南低凸起与渤中凹陷的交汇处,可以识别出一条南倾的低角度隐伏断层,断层向下可延伸至地震双程反射时间8 s深度,甚至更深。这条断层的运动学性质也为负反转断层(印支期挤压、中新代伸展),判断依据如下:①渤南低凸起北部残留的古生界和部分中生界向北延伸与太古宇基底对接,说明有隐伏断层存在。②中生界在靠近隐伏断层处厚度较为均一,但在远离隐伏断层时(靠近渤南低凸起顶部)削截现象明显,厚度减薄。这说明隐伏断层没有控制中生界沉积,最近的活动时间应为中生代晚期。在断层活动过程中,渤南低凸起应发生过旋转、翘倾,并导致部分中生界的风化剥蚀。③以隐伏断层为界,渤南低凸起北部残留古生界的变形并不明显,而渤中凹陷古生界发生了明显的褶皱变形。这说明在中生界沉积之前,隐伏断层就已经存在,并控制了断层上、下盘古生

界的褶皱变形样式。由以上基本地质事实可见,第一级台阶应由一系列南倾断层组成,这些断层向下很可能归并至8 s左右(甚至更深)的滑脱面之上,其前身应为印支期的坡坪式逆冲推覆断层。

3.1.2 第二级台阶

第二级台阶位于渤中凹陷。在渤中凹陷北部与辽东湾拗陷相接处,可以识别出一系列倾向南、倾角大约45°的断层,推测断层向下可归并至6~7 s的滑脱面之上,该滑脱面向南可与前述基底隐伏断裂相连,从而形成第二级台阶(图7)。南倾断层上盘的古生界和中生界都存在明显削截和褶皱现象,具有“双薄底”构造特征,说明南倾断层乃至整个滑脱面的形成时间应为印支期,逆冲推覆作用导致古生界的褶皱及削截,在燕山期,这些断层仍持续活动,导致中生界的褶皱变形及削截。与渤中凹陷北部不同,渤中凹陷中部主要由古生界组成,且古生界的褶皱变形主要表现为由一系列次级背斜和向斜组成的复向斜,这与前文所述的石臼坨凸起和渤中凹陷东部的古生界褶皱变形样式一致,推测这些古生界褶皱的形成与6~7 s滑脱面在印支期的逆冲推覆作用有关。

3.1.3 第三级台阶

第三级台阶位于辽东湾拗陷,又可进一步划分为辽西凸起和辽西凹陷两个次级构造单元^[59-61]。辽西凸起古生界的褶皱变形样式与前述剖面一致,由一系列背斜和向斜组成。在辽西凸起的太古宇基底内,也可以识别出一系列没有冲出印支期古地表的坡坪式逆冲推覆断层。逆冲断层的断坪位于剖面的5~6 s,

向南拓展可以与第二级台阶北部边界的南倾断层相接,从而形成第三级台阶的滑脱面。在辽西凹陷可以识别出一条南倾的大型拆离断层,拆离面向下可延伸至4 s左右。该拆离断层明显控制了新生界的沉积,为典型的同沉积断层,说明该断层自新生代以来一直都在伸展。由于长时间的拆离作用,凹陷内古生界和中生界都呈现出透镜化分布的特征,因此很难识别出两者之间的接触关系是超覆还是断层接触。但残留的古生界仍保留了一些褶皱变形的证据,而中生界褶皱变形则不明显,说明这些褶皱变形可能发生在印支期。结合辽西凸起的逆冲-褶皱特征,本文推测辽西凹陷内4 s处的拆离面也可能继承于印支期的逆冲推覆面。

上述渤海海域三级台阶式的逆冲推覆体系中,每一级台阶都对应着一个滑脱层。这就意味着滑脱层存在与否,很可能直接影响渤海海域印支期乃至随后的燕山期和喜马拉雅期的挤压、伸展或走滑的变形样式^[14, 62-63]。虽然滑脱层在部分剖面中有所显现,特别是在高角度逆冲断裂带最为明显(图2),但由于受到海域资料深部数据品质的约束,很难将这些断层向下有效延伸,只能靠坡坪式逆冲推覆模式进行合理推断。那么如何验证盆内滑脱层是否存在以及活动的时间是否为印支期,就需要在渤海海域周边的陆域拗陷及鲁西地区寻找依据。

李理等基于野外调查系统研究了鲁西地区滑脱面的运动学特征,并提出滑脱面构造在鲁西地区是广泛分布的,并认为滑脱面的成因机制为燕山晚期伸展过程中的重力滑覆,但本文认为一些地质证据能够指示滑脱面的最早活动时间可追溯至印支期:①鲁西地区滑脱面主要发育于太古宇与古生界的沉积接触界面之上。在滑脱过程中,卷入变形的地层主要为古生界,而无中生界^[64]。这说明中生界尚未沉积之前,与滑脱过程相关的褶皱变形就已经存在了。这种现象在渤海海域表现为古生界褶皱与中生界褶皱之间的不协调性,以及中生界超覆于古生界褶皱之上。②鲁西地区滑脱面之上经常发育顺层滑动形成的层间褶皱,褶皱轴面大致可划分为北倾和南倾两组^[65]。虽然不能排除燕山中、晚期逆冲推覆和后期伸展拆离的改造作用,但这些层间褶皱很可能指示了鲁西地区印支期发育的复背斜或者复向斜^[66],这可类比为前文描述的渤中凹陷发育的古生界复向斜。由此可见,滑脱层与鲁西地区印支期褶皱变形密切相关。③鲁西地区太古宇变质岩基底中广泛发育了一套糜棱岩, σ 型和 δ 型旋转碎斑的拖尾方向指示糜棱岩带(滑脱层)上盘的滑动方向总体向北,与印支期的逆冲推覆方向一致。同时,蒙阴县龟蒙顶

太古宇基底中同样可以识别出一套糜棱岩带(图8),糜棱岩带整体南倾,带内残留太古宇碎斑呈透镜化分布,透镜体长轴的倒伏方向指示糜棱岩上盘向上运动,这很可能代表了印支期的挤压事件(图8)。这可类比为沙垒田凸起的高角度逆冲带和辽西凸起的坡坪式逆冲带(图2)。此外,前人在济阳拗陷和黄骅拗陷的太古宇和古生界中也识别出一系列印支期的坡坪式逆冲推覆断层和叠瓦式构造,其中,断坪区能够深切至太古宇基底之中^[64-65],对应本文在渤海海域提出的滑脱层。

由以上基本事实可见,印支期滑脱层在渤海湾盆地及其周缘是广泛发育的。因此,与渤海海域三级台阶式逆冲推覆体系相关的滑脱层也应存在。

3.2 渤海海域逆冲推覆体系分带性动力学成因机制

中-晚三叠世,华北陆块与华南陆块发生了强烈的碰撞拼贴^[67-68],导致华北克拉通地区进入陆内造山

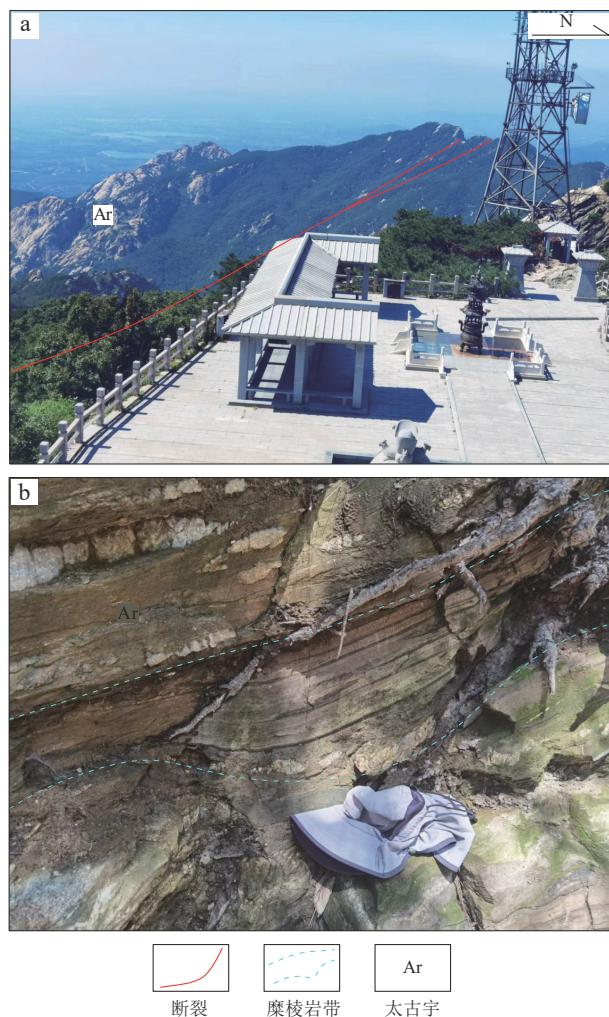


图8 蒙阴县龟蒙顶的糜棱岩带

Fig. 8 Mylonite belt in Guimengding, Mengyin County

a. 糜棱岩带分布照片;b. 糜棱岩带局部发育照片

阶段,这次构造事件即印支运动^[69-71]。印支运动在渤海湾盆地的主要坳陷保留了较好的记录,如在济阳坳陷内形成一个近EW走向的宽缓背斜及一系列南倾的逆冲断裂带^[72];黄骅坳陷已有的地层、钻井以及地球物理资料等能够很好地揭示出坳陷“一隆两凹”的构造格局为印支期挤压背景下形成的宽缓的复式背斜,背斜走向为近EW向,在背斜两翼可识别出背冲式构造^[73]及一系列叠瓦式构造^[74]。与这两个坳陷相比,渤海海域印支期变形则表现为三级台阶式的逆冲推覆体系,每一台阶具有不同的逆冲-褶皱变形特征,特别是第一台阶的沙垒田凸起至渤中19-6构造区一线,太古宇基底在印支期时就已经冲出地表,说明其经历了强烈的挤压作用。由此可见,虽然3个坳陷都经历了印支期的挤压作用,但渤海海域印支期的构造变形样式、逆冲-褶皱的组合规律保留得更加完整、系统,变形程度也更强。本文认为这种差异与渤海海域所处的构造位置有关。

前人的研究发现,渤海湾盆地的基底具有三分结构,由太行基底、鲁西基底和燕辽基底组成^[48]。其中,太行基底(磁异常偏低)与鲁西和燕辽基底的分布位置存在一个明显的磁异常梯度带(图9),大体位于黄骅坳陷的中部,呈NNE向展布^[76],其上覆沉积盖层中发育大量的走滑断层^[72],断层走向与分界线走向基本一致,可对应黄骅坳陷内的沿岸走滑变换带^[72]。鲁西基底与燕辽基底的分布位置横跨渤海海域,磁异常值明显

偏低,而与之相连的鲁西基底的磁异常值明显偏高(图9)^[77]。对比渤中凹陷主要构造单元分布位置可见,分界线(磁异常低值区)与前文描述的高角度冲出带的北边界(张蓬断裂带)重合,沙垒田凸起—渤中19-6构造区—渤南低凸起一线位于具有高磁异常特征的鲁西基底之上(图9),而渤中凹陷和辽东湾坳陷则位于燕辽基底之上。由此可见,张蓬断裂带作为鲁西基底和燕辽基底的分布位置,很可能控制了渤海海域不同构造期的构造变形样式。根据地震剖面显示(图3),张蓬断裂带最早形成时期可追溯到印支期,其表现形式为高角度的逆冲推覆断层(图3),说明在印支期鲁西基底沿张蓬构造带逆冲至燕辽基底及其上覆古生界之上,并导致了渤海海域广泛发育的逆冲-褶皱变形(图4—图6)。这种基底冲出式构造变形特征明显不同于与其相邻的发育于太行基底之上的黄骅坳陷印支期构造变形样式^[78],而类似于现今的龙门山断裂带^[77]。在燕山期,张蓬断裂带应为压扭型走滑断层^[79],这表现为张蓬断裂带附近的中生界发生了与压扭型走滑断层相伴生的褶皱变形(图3),而这种褶皱变形样式并没有发育于古生界和新生界之中。在喜马拉雅期,张蓬断裂带则转换为张扭型的活动断裂带,其控制了现今地震的发生^[79],以及油气的运聚过程^[80]。

基于前文描述的渤海海域印支期变形特征和古生界残留分布,本文构建了研究区古地貌(图10),并认为其经历了如下的构造演化过程:在印支期近NS向挤压力的作用下,鲁西地区(包括济阳坳陷)能够沿深部基底滑脱层向北逃逸^[64],形成一系列南倾的逆冲断层和近EW走向的宽缓褶皱^[65]。当挤压力传导至鲁西基

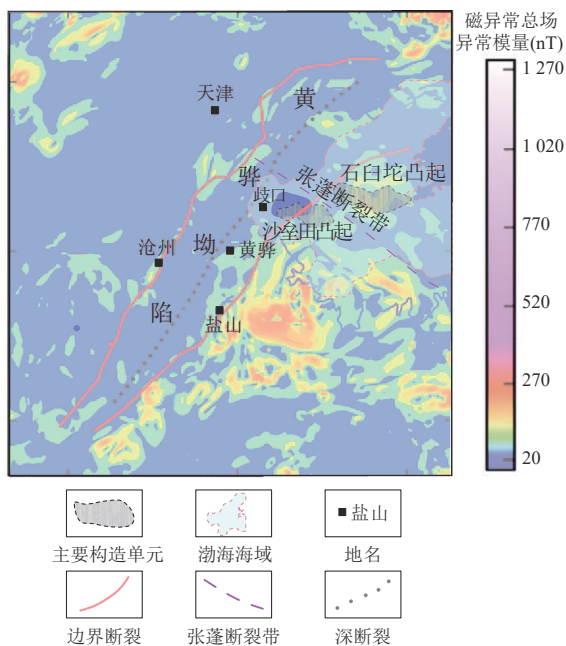


图9 磁异常总场异常模量水平梯度^[75]

Fig. 9 Horizontal gradient of amplitude calculated with total-field magnetic anomalies^[75]

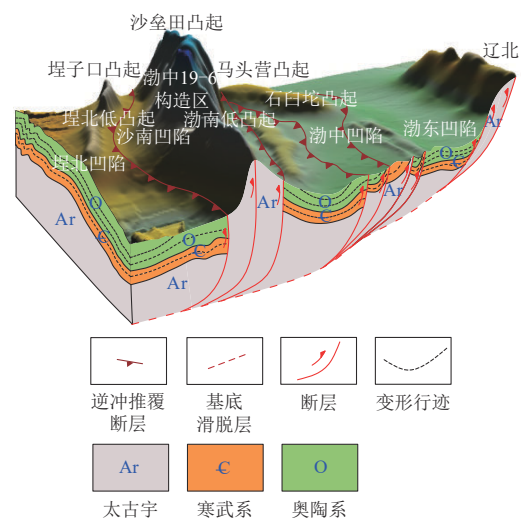


图10 渤海海域环渤中凹陷三维构造地貌

Fig. 10 Three-dimensional structural landform in area surrounding the Bozhong Sag of the Bohai Sea

底与燕辽基底的拼接处时,燕辽基底能够起到阻碍作用,从而导致鲁西基底沿着深部滑脱层(对应第一级台阶)和块体间的拼接处(现今的张蓬构造带渤海湾段)高角度逆冲至燕辽基底之上,并不断隆升,导致其上覆古生界被风化剥蚀殆尽(图7),从而形成了沙垒田凸起、渤中19-6构造区一线的隆起区^[81]。冲出带的后缘在强烈阻挡作用下形成了变形较为强烈的逆冲-褶皱变形带(图2),对应着现今的埕北低凸起。与此同时,位于燕辽基底之上的渤中凹陷发育了由一系列次级背斜和向斜组成的复向斜及一系列坡坪式逆冲推覆断层和叠瓦式构造,它们共同构成了渤海海域逆冲推覆体系的中部带。坡坪式逆冲推覆系统在进入辽东湾坳陷后又向上突破,其变形样式表现为第三级台阶的断展式褶皱,对应着前锋带。在这种构造体制下,辽东湾北部的太古宇基底被抬升,长期遭受风化剥蚀而缺失古生界,类似的现象还可见于阿尔卑斯山逆冲推覆体系的前锋带^[82-83]。

4 结论

1) 渤海海域印支期主要发育逆冲推覆构造样式,根据平面展布特征,可划为3个逆冲带:沙垒田凸起高角度冲出带、渤中-渤东凹陷逆冲-褶皱中部带及辽东湾坳陷逆冲推覆前锋带。

2) 这3个逆冲带变形特征分别为:冲出带发育逆冲推覆构造,表现为太古宇基底沿高角度逆冲断层冲出;中部带发育典型的断展褶皱与叠瓦式逆冲和双重构造;前锋带发育典型的断展或断滑式褶皱,且其空间组合特征受控于三级台阶式的基底滑脱层。

3) 渤海海域印支期逆冲推覆体系分带性的动力学成因机制与组成华北克拉通的基底性质差异有关。

参 考 文 献

- [1] LUO Liang, QI Jiafu, LI Hongxiang, et al. Geometry and evolution of the Cangdong Sag in the Bohai Bay Basin, China: Implications for subduction of the Pacific plate [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 15393.
- [2] QIU Nansheng, CHANG Jian, ZHU Chuanqing, et al. Thermal regime of sedimentary basins in the Tarim, Upper Yangtze and North China Cratons, China [J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 224: 103884.
- [3] YI Liang, DENG Chenglong, TIAN Lizhu, et al. Plio-Pleistocene evolution of Bohai Basin (East Asia): Demise of Bohai Paleolake and transition to marine environment [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 29403.
- [4] 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.
- [5] 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 等. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制[J]. *中国科学(地球科学)*, 2011, 41(5): 583-592.
- ZHU Rixiang, CHEN Ling, WU Fuyuan, et al. The time, scope, and mechanism of the destruction of the North China Craton [J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2011, 41(5): 583-592.
- [6] MENG Qingren, WU Guoli, FAN Longgang, et al. Late Triassic uplift, magmatism and extension of the northern North China Block: Mantle signatures in the surface [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 547: 116451.
- [7] ZHOU Liming, ZHANG Daoyong, SUN Jinchao, et al. Status-quo of proved oil/gas initially-in-place in China as of 2020 and its variation trend in the past decade [J]. *Energy Geoscience*, 2022, 3(4): 343-348.
- [8] 郭喜浩, 徐昉昊, 黄晓波, 等. 基于多元统计分析的油-源对比——以渤海湾盆地渤中凹陷为例[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(5): 1259-1270.
- GUO Xihao, XU Fanghao, HUANG Xiaobo, et al. Oil-source correlation based on multivariate statistical analysis: A case study of the Bodong Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(5): 1259-1270.
- [9] 王祥, 马劲风, 王飞龙, 等. 渤海湾盆地渤中凹陷西南部深层烃源岩有机相预测[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(6): 1070-1080.
- WANG Xiang, MA Jinfeng, WANG Feilong, et al. Prediction of organic facies of deep source rocks in southwestern part of Bozhong Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2022, 44(6): 1070-1080.
- [10] 王永诗, 张顺. 渤海湾盆地沾化凹陷渤南洼陷古近系深层优质储层形成机制[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(1): 11-19.
- WANG Yongshi, ZHANG Shun. Formation mechanism of high-quality reservoirs in deep strata of Paleogene, Bonan Subbasin, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2023, 45(1): 11-19.
- [11] MA Lichi, SONG Mingshui, WANG Yongshi, et al. Exploration progress of the Paleogene in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Energy Geoscience*, 2023, 4(1): 42-50.
- [12] ZHENG Tianyu, CHEN Ling, ZHAO Liang, et al. Crustal structure across the Yanshan belt at the northern margin of the North China Craton [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2007, 161(1/2): 36-49.
- [13] 董树文, 张岳桥, 李海龙, 等. “燕山运动”与东亚大陆晚中生代多板块汇聚构造——纪念“燕山运动”90周年[J]. *中国科学(地球科学)*, 2019, 49(6): 913-938.
- DONG Shuwen, ZHANG Yueqiao, LI Hailong, et al. The Yanshan orogeny and late Mesozoic multi-plate convergence in East Asia—Commemorating 90th years of the “Yanshan Orogeny” [J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2019, 49(6): 913-938.

- [14] 李伟, 蒙美芳, 陈兴鹏, 等. 渤海海域东部弯曲走滑断裂派生伸展与挤压作用的定量表征及其油气地质意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(5): 23-32.
- LI Wei, MENG Meifang, CHEN Xingpeng, et al. Quantitative characterization of extension and compression derived from bending strike-slip faults and their petroleum geological significance of the eastern Bohai Sea [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(5): 23-32.
- [15] 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, 50(1): 28-49.
- ZHU Jichang, FENG Youliang, MENG Qingren, et al. Late Mesozoic tectonostratigraphic division and correlation of Bohai Bay Basin: Implications for the Yanshanian Orogeny [J]. Scientia Sinica(Terrae), 2020, 50(1): 28-49.
- [16] LIU Boran, NEUBAUER F, LIANG Chenyue, 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.
- [17] ZHANG Yueqiao, QIU Erkang, DONG Shuwen, et al. Late Mesozoic intracontinental deformation and magmatism in North and NE China in response to multi-plate convergence in NE Asia: An overview and new view [J]. Tectonophysics, 2022, 835: 229377.
- [18] 邓辉, 杨海风, 李果营, 等. 郯庐断裂莱州湾段块体旋转效应及意义[J]. 地球科学, 2020, 45(11): 4176-4186.
- DENG Hui, YANG Haifeng, LI Guoying, et al. Block rotation effect and its significance of Tanlu fault [J]. Earth Science, 2020, 45(11): 4176-4186.
- [19] 王德英, 刘晓健, 邓辉, 等. 渤海湾盆地渤中19-6区中-新生代构造转换特征及其对太古宇潜山大规模储层形成的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1334-1346.
- WANG Deying, LIU Xiaojian, DENG Hui, et al. Characteristics of the Meso-Cenozoic tectonic transformation and its control on the formation of large-scale reservoirs in the Archean buried hills in Bozhong 19-6 area, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1334-1346.
- [20] 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]. 地学前缘, 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.
- [21] WEN Xiaohao, LI Baosheng, WANG Wei, et al. Deposition of sandstorms in a vegetation-covered sand dune in Ejia Oasis and its characteristics [J]. Journal of Geographical Sciences, 2006, 16(4): 502-508.
- [22] LI Haibing, YANG Jingsui, XU Zhiqin, et al. Geological and chronological evidence of Indo-Chinese strike-slip movement in the Altyn Tagh fault zone [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(1): 28-33.
- [23] 李三忠, 郑祺亮, 李玺瑶, 等. 中国东部苏鲁造山带的印支期俯冲极性及其造山过程[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(4): 18-32.
- LI Sanzhong, ZHENG Qiliang, LI Xiyao, et al. Triassic subduction polarity and orogenic process of the Sulu orogen, East China [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2017, 37(4): 18-32.
- [24] 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 Xiyao, et al. Indosinian deformation in eastern North China: Implications for continental deep subduction polarity [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(4): 185-199.
- [25] 王宇, 徐春强, 郭玲莉, 等. 渤海湾盆地石臼坨东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.
- [26] 刘少峰, 王平, 胡明卿, 等. 中、上扬子北部盆-山系统演化与动力学机制[J]. 地学前缘, 2010, 17(3): 14-26.
- LIU Shaofeng, WANG Ping, HU Mingqing, et al. Evolution and geodynamic mechanism of basin-mountain systems in the northern margin of the Middle-Upper Yangtze [J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(3): 14-26.
- [27] 张岳桥, 董树文. 郯庐断裂带中生代构造演化史: 进展与新认识[J]. 地质通报, 2008, 27(9): 1371-1390.
- ZHANG Yueqiao, DONG Shuwen. Mesozoic tectonic evolution history of the Tan-Lu fault zone, China: Advances and new understanding [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(9): 1371-1390.
- [28] 朱光, 刘程, 顾承串, 等. 郯庐断裂带晚中生代演化对西太平洋俯冲历史的指示[J]. 中国科学(地球科学), 2018, 48(4): 415-435.
- ZHU Guang, LIU Cheng, GU Chengchuan, et al. Oceanic plate subduction history in the western Pacific Ocean: Constraint from late Mesozoic evolution of the Tan-Lu fault zone [J]. Scientia Sinica(Terrae), 2018, 48(4): 415-435.
- [29] 徐聪, 李理, 符武才. 鲁西地块中-新生界裂缝发育特征及构造应力场分析[J]. 地质科学, 2021, 56(3): 829-844.
- XU Cong, LI Li, FU Wucui. Development characteristics of fractures in the Mesozoic and Cenozoic and structure stress field analysis of the Luxi Block [J]. Chinese Journal of Geology, 2021, 56(3): 829-844.
- [30] 刘一鸣, 吴智平. 渤海湾盆地古近纪构造变革的穿时特征及成因探讨: 以渤海海域西南部和陆上济阳坳陷为例[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(3): 1095-1110.
- LIU Yiming, WU Zhiping. Diachronous characteristics and genetic mechanism of the Paleogene tectonic transition in Bohai Bay Basin: A case study of the southwest Bohai Sea and Jiyang

- Depression [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(3): 1095–1110.
- [31] 邢志波, 王宗秀. 华北地台东缘的印支运动烙印——来自大连地区的构造形变信息[J]. *地球学报*, 2004, 25(5): 555–560.
BING Zhibo, WANG Zongxiu. Indosinian orogeny in the eastern margin of North China platform: Tectonic deformation in Dalian area [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2004, 25(5): 555–560.
- [32] LI Sanzhong, ZHAO Guochun, DAI Liming, et al. Mesozoic basins in eastern China and their bearing on the deconstruction of the North China Craton [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 47: 64–79.
- [33] ZHANG Yueqiao, DONG Shuwen, ZHAO Yue, et al. Jurassic tectonics of North China: A synthetic view [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(2): 310–326.
- [34] GUO Runhua, LI Sanzhong, SUO Yanhui, et al. Late Triassic Dabie-Sulu Orogeny: New exhumation model of the HP-UHP rocks [J]. *Geological Journal*, 2017, 52(S1): 22–31.
- [35] 张超, 石绍山, 时溢, 等. 华北板块北缘东段中三叠世构造演化: 来自辽宁法库地区侵入岩的证据. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(3): 734–748. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20200218.
ZHANG Chao, SHI Shaoshan, SHI Yi, et al. Tectonic Evolution of Northern Margin of Eastern North China Craton: Evidences of Middle Triassic Plutons in Faku Area, Liaoning Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(3): 734–748. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20200218.
- [36] LI Sanzhong, JAHN B M, ZHAO Shujuan, 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.
- [37] 彭凌日, 舒良树, 张育炜. 华北陆块东南缘徐淮推覆-褶皱带构造变形特征研究 [J]. *高校地质学报*, 2017, 23(2): 337–349.
PENG Lingri, SHU Liangshu, ZHANG Yuwei. Study of the features of structural deformation for the Xu-Huai thrust-and-fold belt, SE North China Block [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2017, 23(2): 337–349.
- [38] 李三忠, 王金铎, 刘建忠, 等. 鲁西地块中生代构造格局及其形成背景 [J]. *地质学报*, 2005, 79(4): 487–497.
LI Sanzhong, WANG Jinduo, LIU Jianzhong, et al. Mesozoic structure and its tectonic setting in the western Shandong Block [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(4): 487–497.
- [39] 李理, 赵利, 刘海剑, 等. 渤海湾盆地晚中生代—新生代伸展和走滑构造及深部背景 [J]. *地质科学*, 2015, 50(2): 446–472.
LI Li, ZHAO Li, LIU Haijian, et al. Late Mesozoic to Cenozoic extension and strike slip structures and deep background of Bohai Bay Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2015, 50(2): 446–472.
- [40] 赵利, 李理. 渤海湾盆地晚中生代以来伸展模式及动力学机制 [J]. *中国地质*, 2016, 43(2): 470–485.
ZHAO Li, LI Li. The extensional pattern and dynamics of Bohai Bay Basin in Late Mesozoic-Cenozoic [J]. *Geology in China*, 2016, 43(2): 470–485.
- [41] 朱光, 王道轩, 刘国生, 等. 郯庐断裂带的伸展活动及其动力学背景 [J]. *地质科学*, 2001, 36(3): 269–278.
ZHU Guang, WANG Daoxuan, LIU Guosheng, et al. Extensional activities along the Tan-Lu fault zone and its geodynamic setting [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2001, 36(3): 269–278.
- [42] LIU Lihua, HAO Tianyao, LÜ Chuanchuan, et al. Crustal structure of Bohai Sea and adjacent area (North China) from two onshore-offshore wide-angle seismic survey lines [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 98: 457–469.
- [43] 贾楠, 刘池洋, 张功成, 等. 辽东湾坳陷新生代构造改造作用及演化 [J]. *地质科学*, 2015, 50(2): 377–390.
JIA Nan, LIU Chiyang, ZHANG Gongcheng, et al. Cenozoic multiple faulting and tectonic evolution in the Liaodong Bay Depression [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2015, 50(2): 377–390.
- [44] 贾楠, 刘池洋, 张功成, 等. 辽东湾坳陷新生代差异抬升事件的确定及其地质意义 [J]. *地学前缘*, 2015, 22(3): 77–87.
JIA Nan, LIU Chiyang, ZHANG Gongcheng, et al. The Cenozoic distinct uplift events in the Liaodong Bay Depression and their geological significance [J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(3): 77–87.
- [45] FU Chao, LI Shengli, LI Shunli, et al. Sedimentary characteristics, dispersal patterns, and pathway formation in Liaoxi Sag, Liaodong Bay Depression, North China: Evolution of source-to-sink systems in strike-slip tectonics belt [J]. *Geological Journal*, 2020, 55(7): 5119–5137.
- [46] LIU Lei, ZHONG Yijiang, CHEN Hongde, et al. Seismically induced soft-sediment deformation structures in the Palaeogene deposits of the Liaodong Bay Depression in the Bohai Bay Basin and their spatial stratigraphic distribution [J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 342: 78–90.
- [47] 王双龙, 程奇, 吕坐彬, 等. 渤海辽东湾锦州25-1地区沙三段沉积体系演化及有利砂体分析 [J]. *石油地质与工程*, 2021, 35(3): 12–18.
WANG Shuanglong, CHENG Qi, LYU Zuobin, et al. Evolution of the sedimentary system and favorable reservoir analysis of the 3rd member of Shahejie formation in Jinzhou 25-1 area, Liaodong Bay, Bohai Sea [J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2021, 35(3): 12–18.
- [48] 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 Run, ZHU Guang, YANG Guili, 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.
- [49] 李西双, 赵月霞, 刘保华, 等. 郯庐断裂带渤海段晚更新世以来的浅层构造变形和活动性 [J]. *科学通报*, 2010, 55(8): 684–692.
LI Xishuang, ZHAO Yuexia, LIU Baohua, et al. Structural

- deformation and fault activity of the Tan-Lu fault zone in the Bohai Sea since the Late Pleistocene [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(8): 684-692.
- [50] 李淑玲, 孟小红, 付立新, 等. 黄骅拗陷前新生代残留盆地结构与基底性质研究[J]. 地球物理学报, 2010, 53(9): 2204-2212.
LI Shuling, MENG Xiaohong, FU Lixin, et al. Research on pre-Cenozoic residual basin structure and basement property of Huanghua Depression[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(9): 2204-2212.
- [51] 于海波, 王德英, 牛成民, 等. 渤海海域渤南低凸起碳酸盐岩潜山储层特征及形成机制[J]. 石油实验地质, 2015, 37(2): 150-156, 163.
YU Haiibo, WANG Deying, NIU Chengmin, et al. Characteristics and formation mechanisms of buried hill carbonate reservoirs in Bonan low uplift, Bohai Bay [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2015, 37(2): 150-156, 163.
- [52] 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(S1): 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.
- [53] 侯明才, 曹海洋, 李慧勇, 等. 渤海海域渤中19-6构造带深层潜山储层特征及其控制因素[J]. 天然气工业, 2019, 39(1): 33-44.
HOU Mingcai, CAO Haiyang, LI Huiyong, et al. Characteristics and controlling factors of deep buried-hill reservoirs in the BZ19-6 structural belt, Bohai Sea area[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(1): 33-44.
- [54] 付立新, 楼达, 李宏军, 等. 印支——燕山运动对大港探区古潜山形成的控制作用[J]. 石油学报, 2016, 37(S2): 19-30.
FU Lixin, LOU Da, LI Hongjun, et al. Control effect of Indosinian-Yanshan movement on the formation of buried hill in Dagang exploration area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(S2): 19-30.
- [55] 刘建忠, 李三忠, 周立宏, 等. 华北板块东部中生代构造变形与盆地格局[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(4): 45-54.
LIU Jianzhong, LI Sanzhong, ZHOU Lihong, et al. Mesozoic tectonics and basin distribution in the eastern North China plate [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2004, 24(4): 45-54.
- [56] 索艳慧, 李三忠, 刘鑫, 等. 中国东部NWW向活动断裂带构造特征: 以张家口-蓬莱断裂带为例[J]. 岩石学报, 2013, 29(3): 953-966.
SUO Yanhui, LI Sanzhong, LIU Xin, et al. Structural characteristics of NWW-trending active fault zones in East China: A case study of the Zhangjiakou-Penglai fault zone [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(3): 953-966.
- [57] GUO Lingli, LI Sanzhong, SUO Yanhui, et al. Experimental study and active tectonics on the Zhangjiakou-Penglai fault zone across North China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 114(Part 1): 18-27.
- [58] SONG Zhiwei, LIANG Chenyue, NEUBAUER F, et al. Multistage evolution of the Keluo Complex in the northern Da Hinggan mountains: Implications for the Mesozoic tectonic history of the eastern Central Asian orogenic belt [J]. Gondwana Research, 2022, 107: 339-369.
- [59] 夏斌, 刘朝露, 陈根文. 渤海湾盆地中生代构造演化与构造样式[J]. 天然气工业, 2006, 26(12): 57-60.
XIA Bin, LIU Zhaolu, CHEN Genwen. Meso-Cenozoic tectonic evolution and tectonic styles in the Bohai Bay Basin [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(12): 57-60.
- [60] 刘礼洁. 渤海海域潜山结构解析及成因机制研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
LIU Lijie. The investigation of structure and the mechanism of formation of the buried hill in Bohai area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [61] 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 Liaoxi uplift[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(4): 449-456.
- [62] 任建业, 廖前进, 卢刚臣, 等. 黄骅拗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.
- [63] 万天丰, 王亚妹, 刘俊来. 中国东部燕山期和四川期岩石圈构造滑脱与岩浆起源深度[J]. 地学前缘, 2008, 15(3): 1-35.
WAN Tianfeng, WANG Yamei, LIU Junlai. Detachments and magmatic source depth in lithosphere of eastern China during Yanshanian and Sichuanian stages [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(3): 1-35.
- [64] 李理, 张进江, 钟大赉, 等. 鲁西地区沿寒武系/太古宇不整合面滑脱构造的主要特征及形成机制[J]. 地质科学, 2007, 42(2): 335-352.
LI Li, ZHANG Jinjiang, ZHONG Dalai, et al. Main characteristics of the decollement structures along the Cambrian/Archean unconformity surface in western Shandong [J]. Chinese Journal of Geology, 2007, 42(2): 335-352.
- [65] 李理, 钟大赉, 时秀朋, 等. 鲁西地区的滑脱构造及其形成的深部背景[J]. 自然科学进展, 2008, 18(6): 651-661.
LI Li, ZHONG Dalai, SHI Xiupeng, et al. The detachment structures in the western Shandong region and their deep background of formation [J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(6): 651-661.
- [66] 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.

- [67] 李曙光. 大别山超高压变质岩折返机制与华北-华南陆块碰撞过程[J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 63-70.
LI Shuguang. Exhumation mechanism of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie mountains and continental collision process between the North and South China blocks [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(3): 63-70.
- [68] 徐政语, 林舸, 刘池阳, 等. 从江汉叠合盆地构造形变特征看华南与华北陆块的拼贴过程[J]. 地质科学, 2004, 39(2): 284-295.
XU Zhengyu, LIN Ge, LIU Chiyang, et al. A discussion on amalgamation course between the South China and North China blocks: Evidences from deformational characters in the Jiangnan superimposed basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39(2): 284-295.
- [69] 任纪舜. 印支运动及其在中国大地构造演化中的意义[J]. 中国地质科学院院报, 1984, 9(2): 31-44.
REN Jishun. The Indosinian orogeny and its significance in the tectonic evolution of China [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1984, 9(2): 31-44.
- [70] 雷宝华, 陈建文, 梁杰, 等. 印支运动以来南海盆地的构造变形与演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(3): 45-54.
LEI Baohua, CHEN Jianwen, LIANG Jie, et al. Tectonic deformation and evolution of the south yellow sea basin since Indosinian movement [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2018, 38(3): 45-54.
- [71] 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.
- [72] 王世虎, 夏斌, 陈根文, 等. 济阳坳陷构造特征及形成机制讨论[J]. 大地构造与成矿学, 2004, 28(4): 428-434.
WANG Shihu, XIA Bin, CHEN Genwen, et al. Characteristics of Jiyang Depression and mechanism of basin formation [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2004, 28(4): 428-434.
- [73] 徐德英, 朱德献, 段秋梁, 等. 黄骅坳陷中南部逆冲推覆构造特征及其形成背景分析[J]. 中国石油勘探, 2010, 15(4): 15-18, 30.
XU Deying, ZHU Dexian, DUAN Qiuliang, et al. Characteristics and tectonic setting of thrust nappe structure in central-southern Huanghua Depression [J]. China Petroleum Exploration, 2010, 15(4): 15-18, 30.
- [74] 李三忠, 索艳慧, 周立宏, 等. 华北克拉通内部的拉分盆地: 渤海湾盆地黄骅坳陷结构构造与演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(5): 1362-1379.
LI Sanzhong, SUO Yanhui, ZHOU Lihong, et al. Pull-apart basins within the North China Craton: Structural pattern and evolution of Huanghua Depression in Bohai Bay Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(5): 1362-1379.
- [75] 李淑玲, LI Yaoguo, 孟小红, 等. 黄骅坳陷横向构造转换带与基底三分结构的重磁证据[J]. 地球物理学报, 2014, 57(2): 546-555.
LI Shuling, LI Yaoguo, MENG Xiaohong, et al. The indication for traversal tectonic transform zones and trichotomous structural basement from gravity and magnetic anomaly in Huanghua Depression [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(2): 546-555.
- [76] 吴小羊, 刘天佑, 苏俊青, 等. 黄骅坳陷中北部重磁异常特征及油气地质意义[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(1): 140-145.
WU Xiaoyang, LIU Tianyou, SU Junqing, et al. Gravity and magnetic anomaly characteristics and oil & gas geological significance in the middle and northern part of the Huanghua Depression [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(1): 140-145.
- [77] 于磊, 张健, 高玲举, 等. 鲁西隆起重磁异常特征及其构造活动性分析[J]. 地震学报, 2017, 39(5): 694-707.
YU Lei, ZHANG Jian, GAO Lingju, et al. Gravity-magnetic anomalies and tectonic activities in Luxi uplift [J]. Acta Seismologica Sinica, 2017, 39(5): 694-707.
- [78] 楼达, 李三忠, 金宠, 等. 黄骅坳陷中区中生代构造演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(3): 43-53.
LOU Da, LI Sanzhong, JIN Chong, et al. Evolution of the Mesozoic strata in the middle range of the Huanghua Depression [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2008, 28(3): 43-53.
- [79] 张培震. 青藏高原东缘川西地区的现今构造变形、应变分配与深部动力过程[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2008, 38(9): 1041-1056.
ZHANG Peizhen. Current tectonic deformation, strain distribution, and deep dynamic processes in the western Sichuan region on the eastern edge of the Qinghai Tibet Plateau [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2008, 38(9): 1041-1056.
- [80] 李新琦, 李慧勇, 于海波, 等. 张家口-蓬莱断裂带渤海段断裂特征及其与油气差异成藏的关系[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(5): 16-22, 49.
LI Xinqi, LI Huiyong, YU Haibo, et al. Fault characteristics and its relationship with differential hydrocarbon accumulation of Zhangjiakou-Penglai Fault in Bohai region [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(5): 16-22, 49.
- [81] 黄雷. 走滑作用对渤海凸起区油气聚集的控制作用: 以沙垒田凸起为例[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 68-76.
HUANG Lei. The control of hydrocarbon accumulation by strike-slip motion within the Bohai Sea rise: A case study from Shaleitian uplift [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3): 68-76.
- [82] 吴运高, 李继亮, 樊敬亮. 造山带逆冲推覆构造研究的主要新进展[J]. 地球科学进展, 2000, 15(4): 426-433.
WU Yungao, LI Jiliang, FAN Jingliang. The major progresses in the researches on the thrust and nappe tectonics of orogenic belts [J]. Advances in Earth Science, 2000, 15(4): 426-433.
- [83] 袁四化, 刘永江, NEUBAUER F, 等. 东阿尔卑斯原-古特提斯构造演化[J]. 岩石学报, 2020, 36(8): 2357-2382.
YUAN Sihua, LIU Yongjiang, NEUBAUER F, et al. Tectonic evolution of Proto- and Paleo-Tethyan in the East Alps [J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(8): 2357-2382.