

渤海湾盆地旅大隆起区多期叠加构造及其对潜山的控制作用

赵淑娟^{1,2},李三忠^{1,2},牛成民³,张江涛³,张震³,戴黎明^{1,2},杨宇^{1,2},李金月^{1,2}

[1. 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, 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东青岛 266100; 2. 崂山实验室 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266100; 3. 中海石油(中国)有限公司 天津分公司, 天津 300452]

摘要:旅大隆起区位于渤海湾盆地渤海海域的西北部,经历了中生代—新生代多幕构造运动的叠加改造,内幕断裂发育类型多样、变形复杂,前人对其古生界和中生界的构造研究仍相对薄弱。基于三维地震数据的详细构造解析揭示,研究区印支期主要表现为自南向北的逆冲推覆,形成了北西—近东西向的宽缓褶皱和逆冲推覆断裂;燕山早期和中期主要表现为挤压背景下的局部伸展和沉积,中—下侏罗统和上侏罗统—下白垩统之间未见明显的角度不整合;燕山晚期主要表现为自南东往北西方向的逆冲推覆;早喜马拉雅期在北西—南东向的伸展作用下形成了多米诺式的伸展—拆离断层和箕状断陷沉积。其中,印支期北西—近东西向的逆冲断层控制了研究区的基底构造格局,后期的燕山运动和早喜马拉雅运动继承或改造了早期的断层系统。晚白垩世是旅大隆起区构造格局转变的关键时期,自之前的北西—近东西向转为北东向。位于构造转变区的秦皇岛30-1构造和旅大25-1构造潜山是印支期近南北向挤压、燕山晚期北西—南东向挤压和早喜马拉雅期北西—南东向伸展叠加改造的结果,而南部的428构造潜山则受控于近东西走向的印支期逆冲及燕山期和早喜马拉雅期伸展断裂体系。

关键词:逆冲推覆;伸展拆离;叠加改造;构造演化;中生代;旅大隆起区;渤海湾盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Multistage structural superimposition and its control on buried hills in the Lyuda uplift zone, Bohai Bay Basin

ZHAO Shujuan^{1,2}, LI Sanzhong^{1,2}, NIU Chengmin³, ZHANG Jiangtao³, ZHANG Zhen³, DAI Liming^{1,2},
YANG Yu^{1,2}, LI Jinyue^{1,2}

[1. *Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System, Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, MOE and College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China*; 2. *Laboratory for Marine Mineral Resources, Laoshan Laboratory, Qingdao, Shandong 266100, China*; 3. *Tianjin Branch of CNOOC (China) Limited, Tianjin 300452, China*]

Abstract: The Lyuda uplift zone, situated in the northwestern Bohai Sea area, Bohai Bay Basin, experienced multiphase tectonic events in superimposition during the Mesozoic-Cenozoic, leading to the formation of various interior faults with intricate deformations. However, the Paleozoic and Mesozoic structures within this zone remain understudied. Based on a detailed structural analysis with 3D seismic data, this study presents the following findings. (1) The Lyuda uplift zone predominantly experienced top-to-north thrusting during the Indosinian, forming NW- to nearly EW-trending open folds and thrust-nappe faults; (2) The uplift zone primarily underwent localized extension and deposition under compression during the Early and Middle Yanshanian, with the absence of significant angular unconformity between the Middle-Lower Jurassic and the Upper Jurassic-Lower Cretaceous strata; (3) The uplift zone principally experienced top-to-northwest thrusting during the Late Yanshanian; (4) The uplift zone witnessed the emergence of domino-style extensional-detached faults and the deposition in half grabens due to NW-SE directed extension during the Early Himalayan. Among these structures, the Indosinian NW- to nearly EW-trending thrust faults shape the basement tectonic framework for the Lyuda uplift zone, while the Late Yanshanian and Early Himalayan

收稿日期:2022-12-12;修回日期:2023-06-15。

第一作者简介:赵淑娟(1986—),女,副教授、硕士生导师,构造地质与海洋地质。E-mail: zhaoshujuan@ouc.edu.cn。

通信作者简介:李三忠(1968—),男,教授、博士生导师,海洋地质与构造地质。E-mail: sanzhang@ouc.edu.cn。

基金项目:崂山实验室科技创新项目(LSKJ202204402);中国海洋石油有限公司项目(CCL2021TJT0NST0525)。

movements either inherited or modified the earlier fault system. The Late Cretaceous marked a pivotal transition for the Lyuda uplift zone's tectonic framework from trending NW to nearly EW to NE. The Qinhuangdao 30-1 and Lyuda 25-1 structural buried hills, located in the tectonic transition zone, emerged from the superimposition of the Indosinian nearly S-N directed compression, the Late Yanshanian NW-SE directed compression, and the Early Himalayan NW-SE directed extension. In contrast, 428 structural buried hill in the south is controlled by the nearly E-W-trending thrust during the Indosinian and the extensional fault system during the Yanshanian and Early Himalayan.

Key words: thrust nappe, extensional detachment, superimposed modification, tectonic evolution, Mesozoic, Lyuda uplift zone, Bohai Bay Basin

引用格式:赵淑娟,李三忠,牛成民,等. 渤海湾盆地旅大隆起区多期叠加构造及其对潜山的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(5): 1188-1202. DOI: 10. 11743/ogg20230509.

ZHAO Shujuan, LI Sanzhong, NIU Chengmin, et al. Multistage structural superimposition and its control on buried hills in the Lyuda uplift zone, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(5): 1188-1202. DOI: 10. 11743/ogg20230509.

渤海湾盆地是位于华北克拉通东部地块上的一个中生代—新生代叠合盆地,是华北克拉通破坏的中心区域,也是中国东部岩石圈最薄的地区^[1-2]。盆地内油气资源丰富,是中国东部重要的石油和天然气工业基地之一^[3]。渤海湾盆地经历了中生代印支运动、燕山运动和新生代喜马拉雅运动的多期挤压、伸展、走滑作用的改造,发生了复杂的构造格局转型和构造机制转换,记录了中国东部中生代高原隆升和垮塌的过程^[2,4-7]。

渤海湾盆地印支期变形主要与华北板块和扬子板块的碰撞有关,形成了一系列北西西向—近东西向的宽缓褶皱及逆冲推覆断层,奠定了渤海湾盆地隆—凹格局的雏形^[8-10]。古生界保存较好的黄骅拗陷和济阳拗陷印支期北西西向—近东西向的构造特征最为典型^[6,11]。渤海湾盆地燕山期构造是在古太平洋板块的俯冲角度和俯冲方向变化、陆内壳下拆沉和壳内挤出—逃逸构造的综合动力作用下形成的,变形复杂^[2,12-14]。前人将华北地区的燕山运动划分为3期短暂的挤压构造变形幕^[14-15],但不同幕次对渤海湾盆地演化的影响程度仍存在不同观点。有学者认为,燕山运动A幕(中侏罗世末)在渤海湾盆地表现微弱,未造成中、上侏罗统之间明显的角度不整合,而燕山运动B幕(早白垩世初)则产生了强烈的影响^[16]。但也有观点认为,早燕山运动(早—中侏罗世)继承了印支运动的区域应力场格局,在该次运动后,渤海湾地区的构造格局才发生根本变革,进入以伸展、裂陷盆地为主的构造演化时期,形成北东向的构造变形带,而后的中燕山运动(晚侏罗世—早白垩世)、晚燕山运动(晚白垩世)在渤海湾地区影响不大^[8]。新生代,由于西太平洋板块俯冲回卷及郯庐断裂带的强烈活动,渤海湾盆地主要表现为受控于强烈伸展和走滑的北东向构造样式^[2,17-19]。在这个过程中,中生代的先存断裂活化,并

对后期新断裂的形成起到了重要的影响^[20]。

渤海湾盆地经历的构造运动期次多,古生界和中生界变形强且改造严重,前人已针对地层保存较为完整的陆上部分的黄骅拗陷和济阳拗陷等区域进行了大量研究^[6-9]。而渤海海域由于中生界所处深度较大,古生界缺失严重,因此对其构造变形和演化过程研究难度较大。近年来,随着渤海海域地震、钻井资料的不断改善,潜山研究有了重大突破,对海域地区中生代变形的认识也更为深入,目前已经在渤海海域识别出了印支期主体自南南西向北北东方向的逆冲推覆构造体系和燕山期的挤压、伸展构造变形^[21-25],对中生代—新生代多期次变形的叠加改造过程也有了进一步认识,在潜山内部发现了多个油气藏^[3,26]。其中,位于渤海海域西北部的旅大隆起区处于印支运动、燕山运动和早喜马拉雅运动的叠合区^[27],内幕断裂发育,类型多样,变形复杂,较好地保留了中、新生代的构造变形信息,其与南部的渤中19-6区和北部的辽东湾地区相比,地层更丰富,且横向变化大,指示该区域经历了更为复杂的叠加改造。因此,旅大隆起区是研究渤海湾盆地中生代—新生代多期次构造运动叠加改造的典型区域之一。

近年来,渤海海域的地震、钻井资料为研究盆地的深层构造提供了更详细的数据,也为华北克拉通破坏、板内变形等研究打开了一个新窗口。因此,本文选择旅大隆起地区作为研究区,基于全区的三维地震数据及钻井数据,对中生代地层进行了厘定,对中新世构造进行了精细的解析,识别出印支期逆冲推覆构造、燕山期挤压构造和局部伸展构造及新生代伸展和走滑构造,进而恢复研究区中生代—新生代早期不同阶段的构造变形特征、叠加改造过程,探讨其动力学机制,为环渤海海域乃至整个渤海湾盆地中生代的构造研究和深层油气勘探提供理论依据。

1 区域地质背景

渤海湾盆地位于华北克拉通东部,北靠阴山-燕山造山带,西邻太行山隆起,南为鲁西隆起,东部与辽东、鲁东隆起相邻,发育于太古宇和古生界基底之上^[2,17,28]。渤海海域是渤海湾盆地岩石圈最薄的地区,也是渤海湾盆地的沉积-沉降中心,郯庐断裂带也从该海域穿过^[1,29-30]。位于郯庐断裂带以西的渤海海域,自北向南依次发育秦南凹陷、石臼坨凸起、石南凹陷、沙垒田凸起、沙南凹陷、埕北低凸起^[31]。本文将位于渤海海域西北部秦南凹陷与辽中-渤中凹陷之间所夹持的基底隆起区域称为旅大隆起区(图1)。该区南部和北部分别与石臼坨凸起东延的428构造和辽西凸起相临,东部以郯庐断裂带与渤中凹陷和辽中凹陷相接,西部以秦南1号断裂与秦南凹陷相临,整体上表现为东、西凹陷所夹持的局部隆起区,其中秦皇岛30-1构造和旅大25-1构造是研究区内的两个重要构造隆起区(图1)。

渤海湾盆地在太古宇基底之上保留了古生界一新生界。其中,前新生界可通过角度不整合划分为4个构造层,即印支期构造层(寒武系—二叠系)、燕山早期构造层(中-下侏罗统)、燕山中期构造层(上侏罗统—下白垩统)和燕山晚期构造层(上白垩统)^[2]。寒武系—奥陶系与石炭系—二叠系之间还存在一次挤压构造运动^[32]。上部的新生界自下而上发育有孔店组、沙河街组、东营组、馆陶组、明化镇组和平原组^[20]。在旅大隆起区及其周缘,除428构造仍局部残留上古生界,其他地区缺失或仅保留较薄的下古生界^[33-34]。

渤海海域西南部历经中、新生代的多期构造运动,形成了北西—北西西—近东西向、北东、北北东3组断裂体系。其中北西—北西西—近东西向断层多为印支运动所形成的逆冲断层,其伴随着褶皱抬升作用,常发育古生界薄底构造和秃底构造,并与上覆的中生界之间呈角度不整合接触^[31]。位于旅大隆起区西南部的石臼坨凸起及其向东延伸的428构造共同构成了一个近东西向的隆起,并在隆起南侧形成大型的近东西向的逆冲断层(图1)^[33]。这些早期的逆冲断层在晚中生代反转为正断层,控制了渤海海域下白垩统的箕状断陷沉积^[31,33]。北东向断层在中生代和新代表现为多期次活动的正断层^[17],其与古太平洋板块的俯冲回卷有关^[12,19,35]。北北东向走滑断层以郯庐断裂为代表,其在晚中生代表现为强烈伸展和左行走滑活动,新生代晚期转变为右行走滑活动^[36]。

2 古生界-中生界地层展布

旅大隆起区整体自下而上发育太古宇混合花岗岩、古生界碳酸盐岩、中生界碎屑岩和火山岩以及新生界沉积岩(图2)。钻井资料揭示,研究区前新生界地层组合差异明显,古生界和中生界厚度横向变化较大(图2,图3)。

秦皇岛30-1构造和旅大25-1构造作为研究区内的基底隆起区,普遍缺失或仅局部残留较薄的古生界,整体呈北西向展布。在该隆起区南、北两侧则普遍保留一定厚度的古生界,最厚处大于700 m(图3a)。整体上,古生界显示出自中部向南、北两侧逐渐增厚的趋势,且北部地层厚度大于南部。其中北部区域受构造因素影响,局部存在北东向和北北东向展布的条带状地层缺失区(图2,图3a)。

与古生界相比,中生界在研究区内普遍出露,且厚度显著增加,最厚处将近1700 m(图3b)。受构造因素影响,中生界厚度在横向上也存在较大差异,例如古生界均缺失的秦皇岛30-1构造和旅大25-1构造相比,前者中生界为研究区内厚度最大处,而后者中生界则较薄甚至缺失(图3b)。整体上,中生界厚度具有自南向北和自西向东减薄的趋势,且北部区域局部存在北东向展布的条带状地层缺失区(图2,图3b)。

古近纪早期沉积的孔店组在研究区西部缺失,在东部出露,钻井揭示其整体沉积厚度不大,最厚处小于200 m(图2)。该地层之上的沙河街组、东营组、馆陶组和明化镇组均稳定沉积。研究区古生界、中生界和古近系孔店组的平面横向变化指示了其中生代和新生代早期经历了多期构造的叠加改造作用。

3 中生代—新生代早期构造变形特征及叠加改造

旅大隆起及其周缘地区受到印支期挤压作用、燕山期多幕挤压和局部伸展作用及喜马拉雅期伸展、走滑作用的影响,变形样式非常复杂,并发生了构造格局的转变。以下将按构造变形期次分别进行论述。

3.1 印支期逆冲推覆构造

角度不整合和薄底构造是识别逆冲断层的重要地层标志。在古生界发育良好且研究较为深入的济阳坳陷和黄骅坳陷等区域,已经据此标志识别出印支期逆冲构造,中-下侏罗统与下伏古生界之间的明显

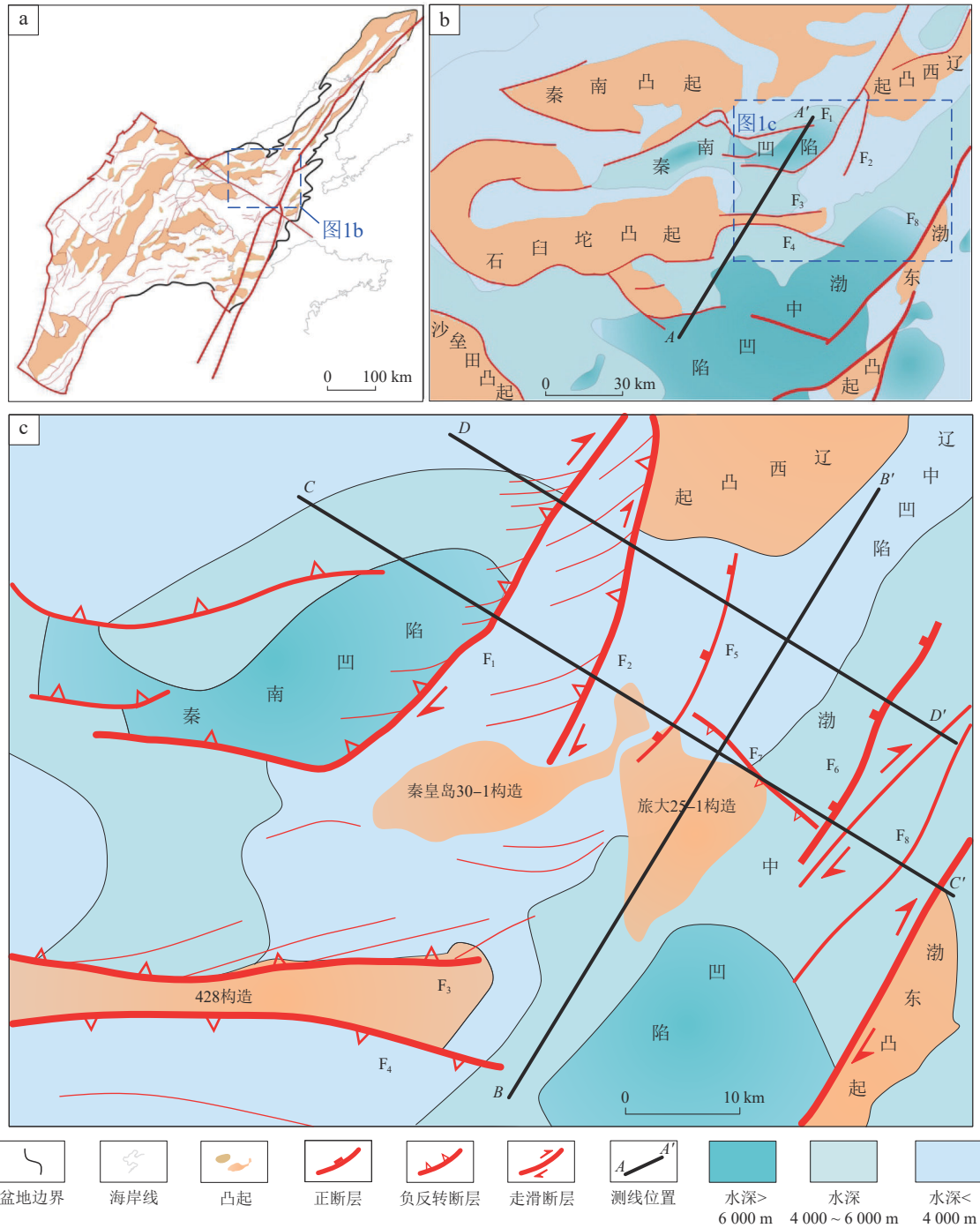


图1 渤海湾盆地旅大隆起区地质图及地震剖面位置

Fig. 1 Geologic map and seismic profile positions of the Lyuda uplift zone in the Bohai Bay Basin

a. 渤海湾盆地构造单元简图; b. 旅大隆起区位置; c. 旅大隆起区构造图

F₁, 秦南1号断裂; F₂, 秦南3号断裂; F₃, 428北断裂; F₄, 428南断裂; F₅, F₆, 拆离断层分支断裂; F₇, 印支期隐伏断裂; F₈, 郑庐断裂带

角度不整合接触是印支运动在渤海湾盆地存在的有力证据^[6]。

旅大隆起区作为多期构造的叠加作用区,其古生界最早经历了印支运动。研究区南部的428构造整体近东西走向,其南、北两侧为沿凸起边界延伸的控盆断层(图1)。从NE-SW向地震剖面上可见,两侧古生界

均表现出向428构造减薄的趋势,为典型的薄底构造特征,而在428构造高位处仍保留有较大的厚度(图4)。这种特征指示印支期存在逆冲断层活动,428构造两侧为对冲的逆断层,其中主干断层主体为自南向北逆冲,428构造北侧则为自北向南逆冲的反冲断层。断层上盘的古生界遭受剥蚀减薄,而下盘的428

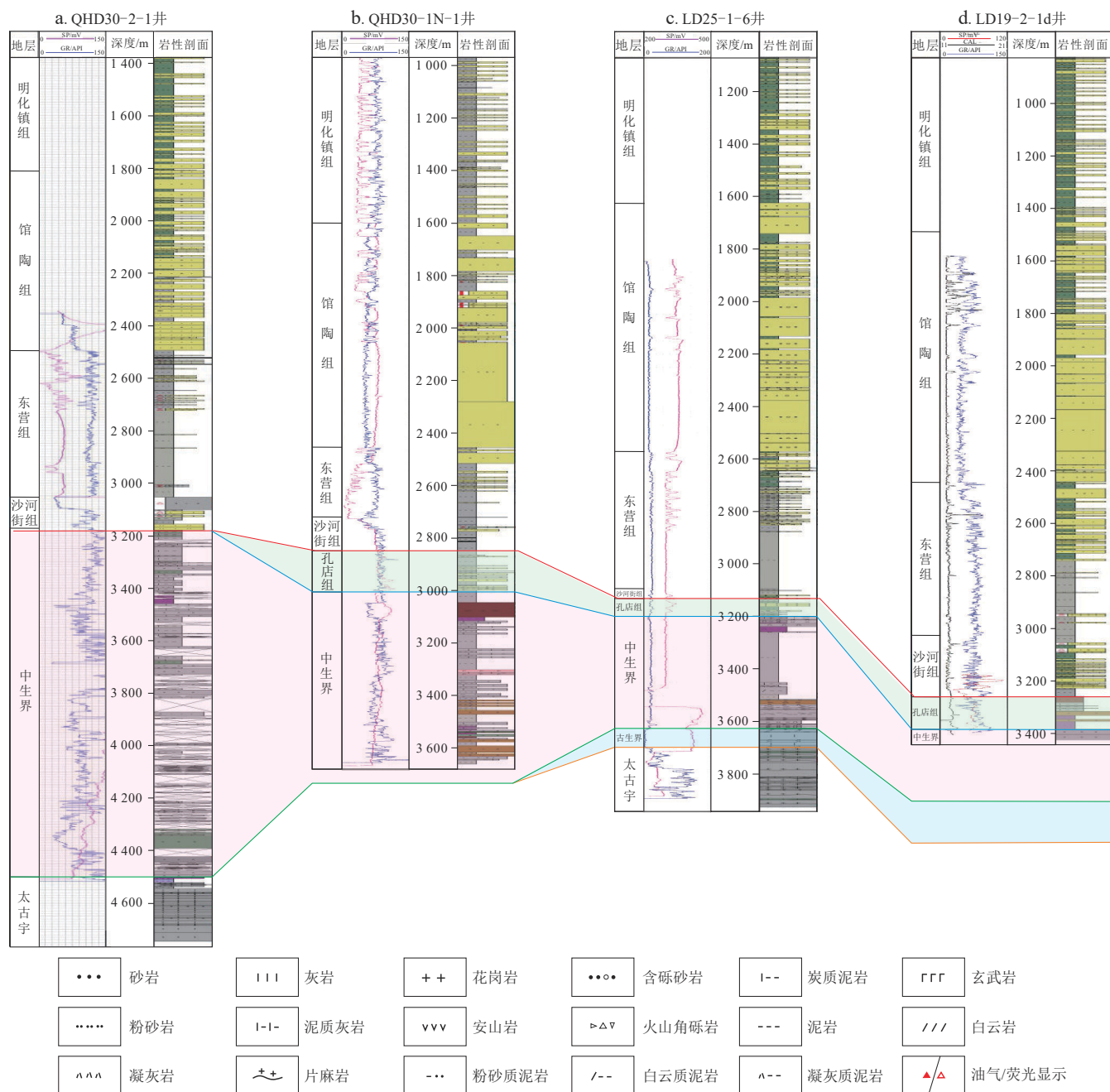


图2 旅大隆起区连井剖面(钻井位置见图3)

Fig. 2 Well-tie cross section in the Lyuda uplift zone (see Fig. 3 for well positions)

构造是两侧对冲断层和深部主逆冲断层所围限的断层三角带,遭受强烈的挤压,其内部古生界变形复杂,形成小褶皱和逆断层(图4)。印支期的这些逆冲断层和反冲断层走向均为近东西向,控制了428构造及邻区的基本隆-凹格局(图1)。

在428构造以北、秦南1号断层以东的区域,因受后期燕山运动和喜马拉雅运动的改造,印支运动的构造形迹遭受了强烈破坏,但在NE-SW向地震剖面上仍可识别出印支期叠瓦扇式的逆冲推覆断层,其平面展布为北西向和近东西向(图1,图5)。在逆

冲推覆强烈的秦皇岛30-1构造和旅大25-1构造处,古生界被剥蚀殆尽,中生界或新生界直接覆盖在太古宇之上,导致这两处潜山的初始形成(图3,图5)。在秦皇岛30-1和旅大25-1构造以北,靠近辽西凸起的区域,逆冲作用相对减弱,表现为低角度的盲冲断层,剥蚀作用也较弱,仍保留有部分古生界(图3,图5)。在NW-SE向地震剖面上,印支期逆断层因燕山期正断层的改造作用,仅局部保留,并在主隆起区以东控制了部分古生界的残留(图6)。在更北部的区域,印支期逆断层已经难以识别,但由于该区域处

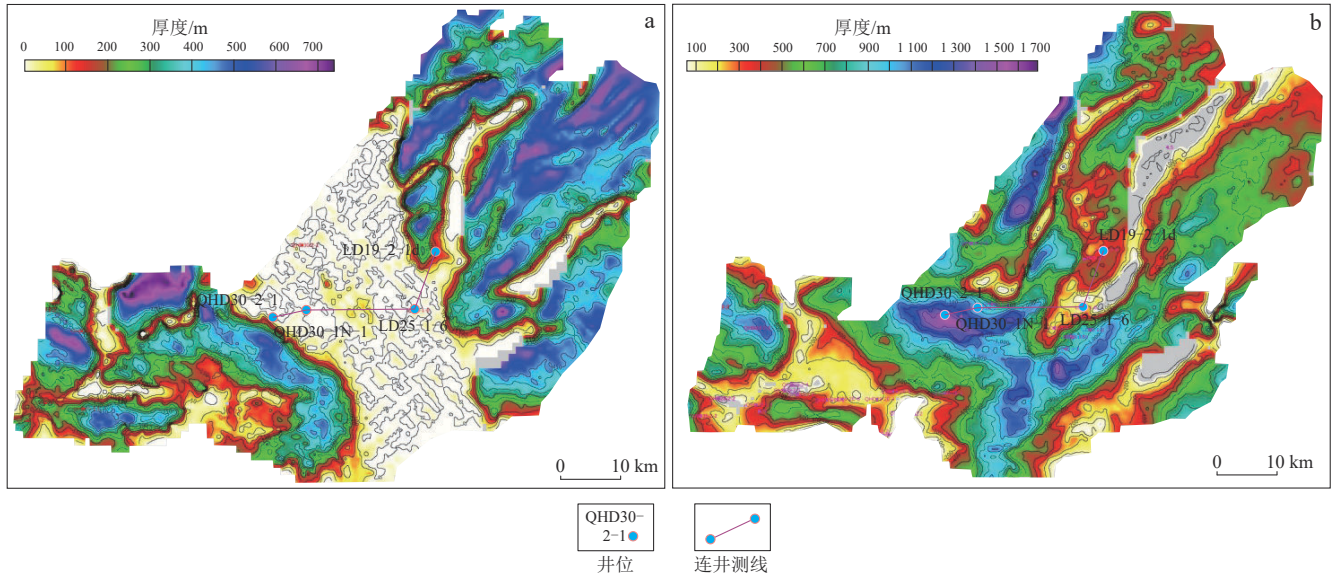


图3 旅大隆起区古生界(a)和中生界(b)地层厚度

Fig. 3 Isopach maps of the Paleozoic (a) and Mesozoic (b) strata in the Lyuda uplift zone

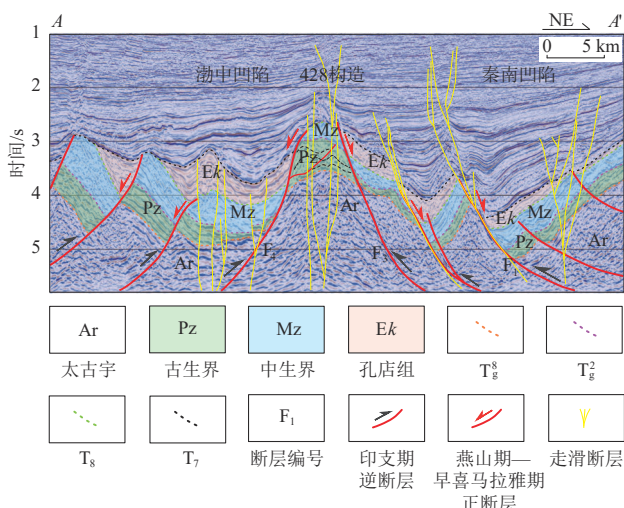
图4 旅大隆起区地震剖面A—A'及其构造解释
(剖面位置见图1b)

Fig. 4 Seismic profile A—A' in the Lyuda uplift zone and its structural interpretation (see Fig. 1b for the profile location)

于逆冲推覆断层下盘,剥蚀量较小,仍保留了厚度较为稳定的一套古生界(图3,图7)。

尽管古生界的薄底构造和秃底构造指示存在印支期逆冲推覆,但在旅大隆起区地震剖面中未见有古生界与上覆中生界之间的角度不整合,尤其在隆起区北部的NW-SE向地震剖面中,古生界与中生界的地震同相轴互相平行(图7),指示研究区北部印支运动的影响较南部更弱。局部区域,古生界与中生界之间表现为断层接触关系,这是后期燕山运动的伸展作用所致(图5,图6)。

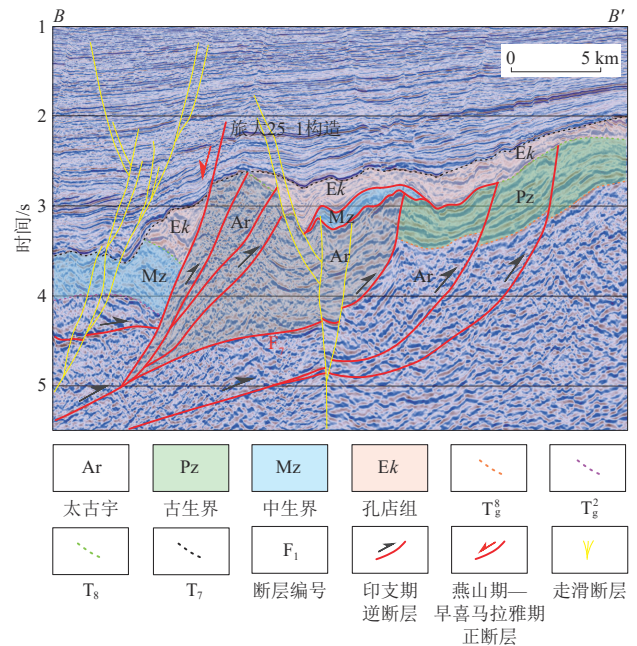
图5 旅大隆起区地震剖面B—B'及其构造解释
(剖面位置见图1c)

Fig. 5 Seismic profile B—B' in the Lyuda uplift zone and its structural interpretation (see Fig. 1c for the profile location)

3.2 燕山期挤压构造及局部伸展构造

研究区普遍保留中生界,但下白垩统与中-下侏罗统之间未见明显的角度不整合,无法精确划分内幕层序,因此本文将可能存在的侏罗系一下白垩统统一划分为中生界构造层。在NW-SE向地震剖面中可清晰地识别出中生界,其内部整体特征为反射轴连续性较

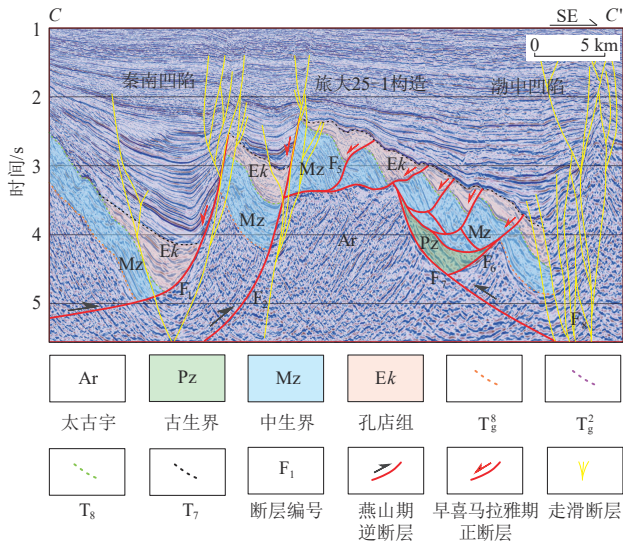


图6 旅大隆起区地震剖面C—C'及其构造解释
(剖面位置见图1c)

Fig. 6 Seismic profile C—C' in the Lyuda uplift zone and its structural interpretation (see Fig. 1c for the profile location)

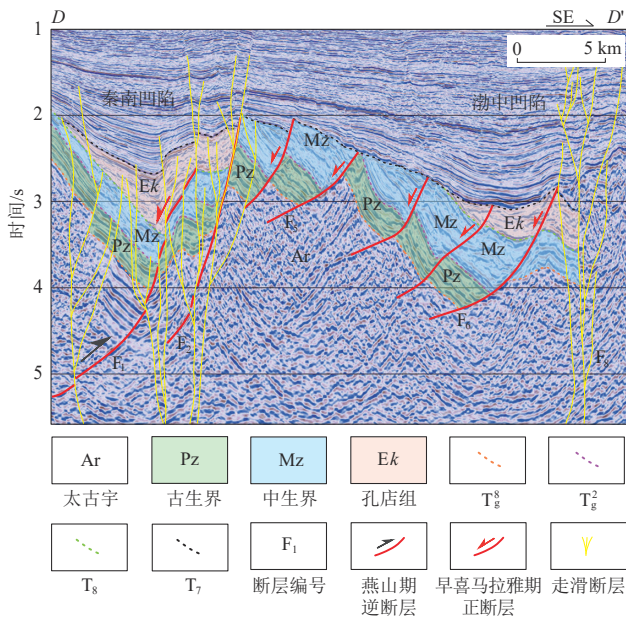


图7 旅大隆起区地震剖面D—D'及其构造解释
(剖面位置见图1c)

Fig. 7 Seismic profile D—D' in the Lyuda uplift zone and its tectonic interpretation (see Fig. 1c for the profile location)

好,相互平行,未见明显的角度不整合和逆冲断层,指示内部均为整合接触或平行不整合接触(图6,图7)。

中生界沉积期间,以秦南3号断裂为界,东、西两侧构造格局存在显著差异。该界线以西区域,在NE-SW向地震剖面中可见428构造南北两侧存在反向的多米诺式正断层,这些正断层在428构造以南区域均倾向南,而在428构造以北区域则均倾向北,且主断裂

是秦南凹陷的南部控盆断层,即秦南1号断裂的近东西走向段,此时,428构造是地垒构造(图4)。这些正断层均是印支期逆断层的负反转活动,因而继承了印支期近东西向构造格局(图1)。在秦南3号断裂以东区域,则没有这种倾向相反的正断层组合特征。该区域的NE-SW向剖面中可见,大部分印支期逆断层在中生代不具有活动性,只有少数印支期逆断层控制了中生界沉积,表明其在燕山期发生了微弱的负反转作用(图5)。在NW-SE向剖面上可见多米诺式的正断层,但中生界厚度大致保持稳定,并没有表现出箕状断陷沉积特征,因此,这些倾向北西的正断层于中生代之后才开始活动(图6,图7)。此外,在NE-SW向剖面上,局部可见中生界地震同相轴与古生界或太古宇顶面为截切关系,这指示二者之间为断层接触(图5)。该断层整体表现为近水平波状起伏,两侧被晚期走滑断层截切(图5),其对应了NW-SE向剖面上的多米诺式正断层。综上所述,旅大隆起区在中生界沉积期间并没有明显的NW-SE向控盆断层,仅部分印支期逆断层发生了较弱的负反转作用,表明该时期的伸展作用仍继承了印支期的构造格局。

在旅大隆起区的秦南30-1构造和旅大25-1构造区域,NW-SE向剖面上可见中生界与新生界孔店组底面之间存在明显的角度不整合(图6),指示该区域在中生代末发生了一次挤压运动。而更北部区域则未见中生界与孔店组之间的角度不整合,指示该期挤压事件在北部影响较弱(图7)。在NE-SW向剖面上难以识别这次角度不整合,因而推测这次事件形成于近NW-SE向的挤压应力下。

3.3 新生代伸展构造及走滑构造

研究区上覆巨厚的新生代沉积,从NW-SE向地震剖面上可以识别出新生代早期为典型的箕状断陷沉积(图6,图7),其控盆断层为走向北东、倾向北西的多米诺式正断层。箕状断陷沉积样式指示新生代早期断层活动性比中生代强。伴随着正断层的强烈活动,早期沉积的古生界和中生界发生块体旋转,断层下盘高位处遭受剥蚀,与后期的新生代沉积之间表现为明显的角度不整合接触,在断层上盘低位处则继续沉积新生界孔店组,孔店组地震轴表现出明显的超覆特征(图6,图7)。在NE-SW向地震剖面上,局部可见中生界与新生界孔店组之间也为断层接触,该断层与中生界和太古宇、古生界之间的断层特征相似,也近水平展布,向两侧延伸与后者交会(图5),指示多米诺式的正断层在深部形成统一的伸展断层系统,这与NW-SE向

地震剖面上的特征吻合。在旅大25-1构造及其邻域甚至表现为伸展作用强烈的拆离断层构造样式(图6),导致局部地区新生界直接覆盖在太古宇之上,形成平面上呈北东向展布的中生界缺失区(图3)。但旅大隆起区西南部在新生代早期仍表现为走向近东西、倾向南的正断层,控制着孔店组的箕状断陷沉积(图4)^[32]。这指示研究区在新生代的构造格局仍然以秦南1号断裂北东走向段及其南延为界,其西部继承了中生代的近东西向构造格局,而东部则转换为北东向的构造格局。

新生代中后期,北东向走滑断层的活动占主导,在控制新生代整体沉积样式的同时,导致古生界、中生界及先存断层的不连续性(图5—图7)。其中秦南凹陷东侧边界,即秦南1号断裂的北东走向段转变为走滑断层,其为辽西南凸起西界走滑断层的向南延伸,在新生代晚期表现为强烈的右行走滑(图1)。旅大隆起区东侧为郯庐断裂带,其在平面上由一系列北东走向的分支走滑断层组成(图1)。从NW-SE向地震剖面上可以看出,研究区走滑断裂以秦南1号断裂和郯庐断裂带最为明显,除此之外,区域上其他位置也均存在走

滑断层活动(图6,图7)。走滑断层在剖面上表现为明显的花状构造,向深部逐渐收敛,切穿中生界、古生界及基底,且将先存断层错断。在平面图中,可见秦南1号断裂及其分支走滑断裂形成一系列次级断层,这些次级断层均与主走滑断层斜交,其锐夹角指示主走滑断层为右行走滑,与晚新生代郯庐断裂的活动一致(图1)。

3.4 中生代—新生代早期断裂体系

研究区中生代—新生代早期主要发育两组断裂,即北西—近东西向和北东—北北东向,这两组断裂均具有多期活动性,且大多持续至新生代早期(图8)。

近东西向或北西—南东向断裂主要分布于研究中南部,平面上以近东西向为主,并被晚期断裂截切。据前文可知,该方向断裂最早于印支期开始活动,主要表现为自南向北的逆冲断层,428构造以北为倾向北的反冲断层。其中秦皇岛30-1构造南、北两侧的近东西向逆冲断层指示该潜山初始形成于印支期。在旅大25-1构造以北,印支期逆断层则转为北西—南东向,控制着该潜山的形成。燕山早—中期,在NW-SE向区域

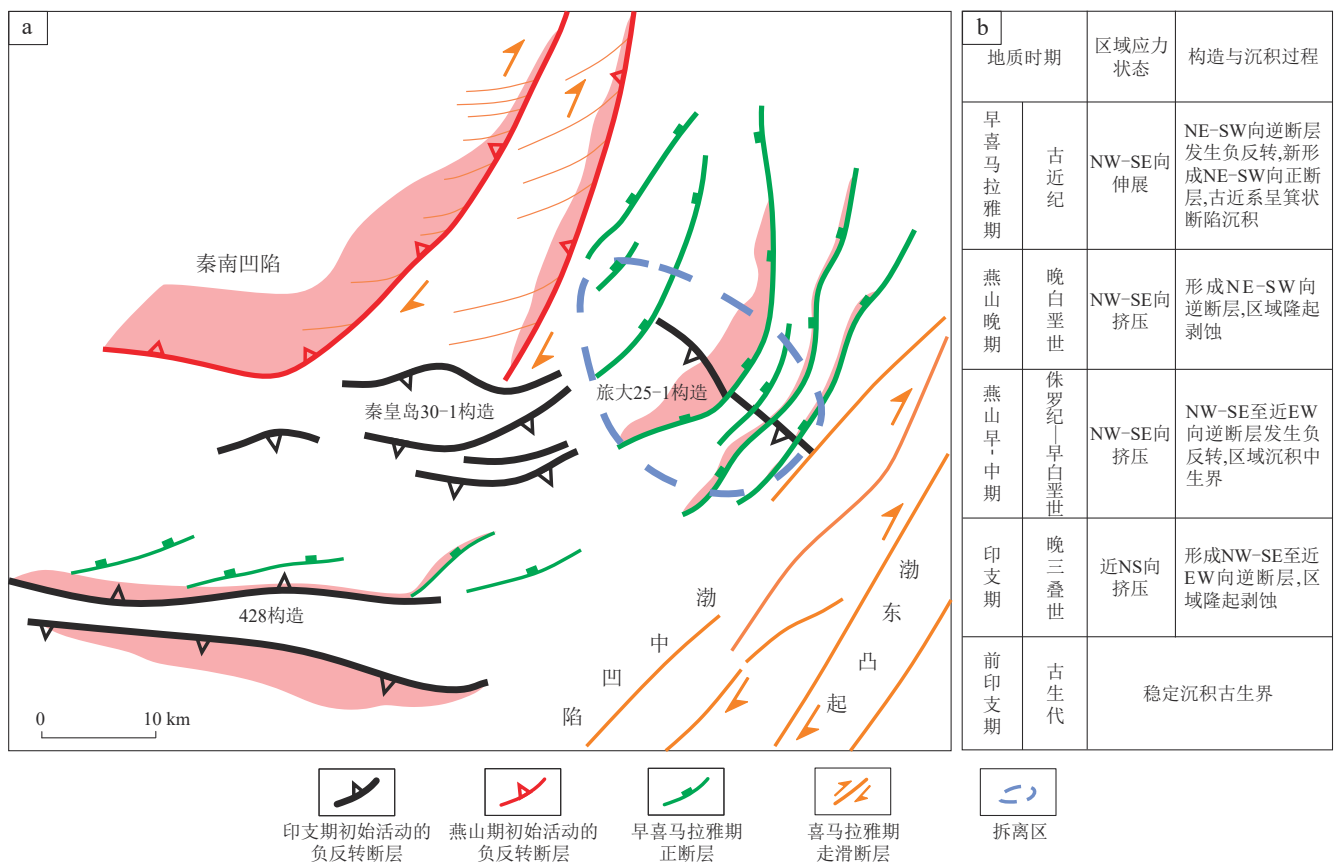


图8 旅大隆起区不同时期断裂分布

Fig. 8 Map showing the distribution of faults formed in different geologic periods in the Lyuda uplift zone

挤压力的作用下,该组断裂处于NE-SW向的局部伸展环境下,沿原逆冲断层面发生弱的负反转活动,控制了中生界沉积,在428构造两侧,近东西向断裂的伸展活动一直持续到新生代早期,控制了孔店组沉积(图4,图8)。

北东—北北东向断裂主要位于研究区中北部,平面上近平行展布,以北东向为主,局部走向偏转为北北东向。该组断裂于燕山晚期开始活动,主体表现为自南西往北东的逆冲断层和自北东往南西的反冲断层,郯庐断裂带也开始发生左行走滑运动。早喜马拉雅期,该组断裂发生明显的负反转活动,控制了孔店组的箕状断陷沉积。局部的强烈伸展作用在秦南3号断裂以东区域形成了一系列新的北东—南西向正断层,其与燕山期负反转断层共同形成拆离断层体系,从而导致旅大25-1处的潜山进一步抬升(图6—图8)。之后,位于研究区中部的北东向正断层停止活动,而秦南1号断裂、秦南3号断裂和郯庐断裂带则持续活动,并主要表现为右行走滑性质。

4 中生代—新生代构造演化过程及形成机制

本文前述地震剖面的地层和断层信息指示,旅大隆起区在中生代经历了印支期的挤压作用、燕山期的挤压和局部伸展作用以及新生代的持续伸展和走滑作用。本文选择北东—南西向和北西—南东向各一条典型地震剖面,通过时—深转换、去压实、热沉降、断层恢复和层拉平过程进行平衡恢复,并计算了不同时期主干断层的位移(滑距)。此外,根据平衡恢复所得到的不同时期的剖面长度,计算关键时期主干剖面横向上的收缩率或伸展率(即前、后两个演化阶段剖面长度之差与前者剖面长度的比值),以大致反映印支期、燕山晚期及早喜马拉雅期北东—南西向和北西—南东向的收缩强度或伸展强度,揭示不同时期的主变形方向。通过以上研究,进一步探讨研究区中生代—新生代的演化过程其不同阶段的动力机制。

4.1 印支期基底构造格局的奠基性

中生代之前,华北克拉通整体处于稳定沉积或垂向隆升阶段,接受了寒武纪—三叠纪的台地沉积^[37-38]。旅大隆起区在这种区域背景下同样接受了较为平缓的古生界沉积,变形微弱(图9a₁, a₂)。

印支运动对渤海湾盆地古生界的演化至关重要。该时期,研究区主体表现为自南向北的逆冲推覆,图9b₁中所示的逆冲断层的滑距在180~460 m,导致

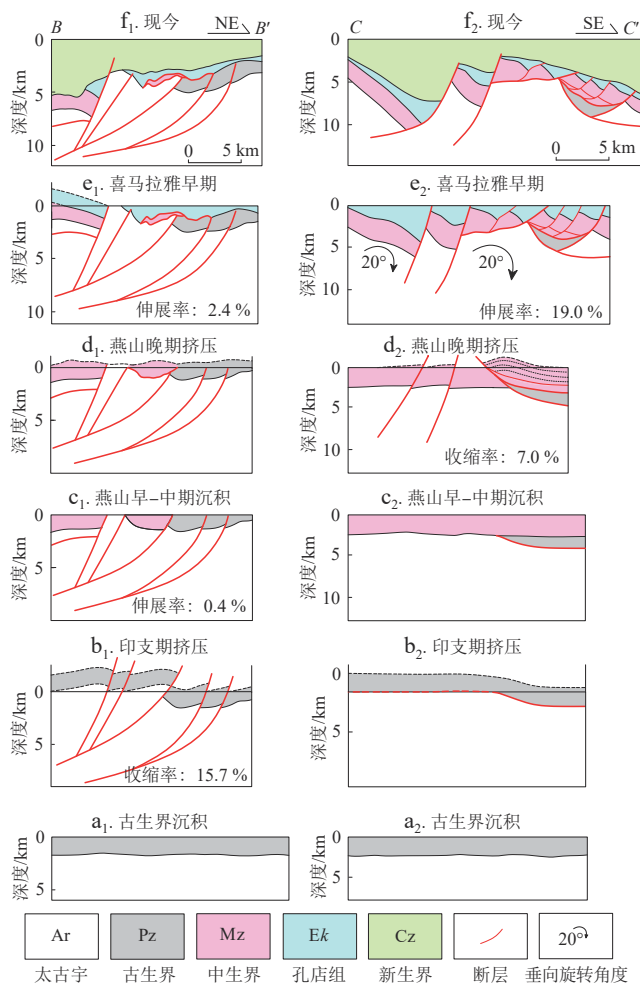


图9 旅大隆起区地震剖面B—B' (左列)和C—C' (右列)的平衡剖面(剖面位置见图1c)

Fig. 9 Balanced sections of seismic profiles B—B' (left column) and C—C' (right column) in the Lyda uplift zone (see Fig. 1c for the profile location)

区域上整体抬升,遭受剥蚀,逆冲推覆强烈处古生界被剥蚀殆尽,东部和北部逆冲作用较弱处则仍残留部分古生界(图9b₁, 图9b₂, 图10a)。这些逆冲断层在平面上呈近东西向展布,指示其形成于近南北向的挤压应力背景下,该方向的收缩率达15.7%(图9a₂)。前人在渤海湾盆地其他区域也识别出了相似的印支期变形。位于渤海湾盆地陆上区域的黄骅拗陷和济阳拗陷在印支末期,形成了一系列北西向、北西西向—近东西向的宽缓褶皱和逆冲推覆断层,控制着中生代的宏观构造样式^[6-7,9,38-39]。渤海海域西南部和渤南地区在晚三叠世也因强烈的挤压作用而形成北西向、北西西向逆冲断层,并导致隆起处古生界的剥蚀^[23,31]。因此,在中生界沉积前,渤海湾盆地的主要隆起和凸起已具雏形,整体表现为北西向—北北西向—近东西向的宽缓褶皱,控制了整个渤海湾盆地的基底构造格局^[2,6]。这幕构

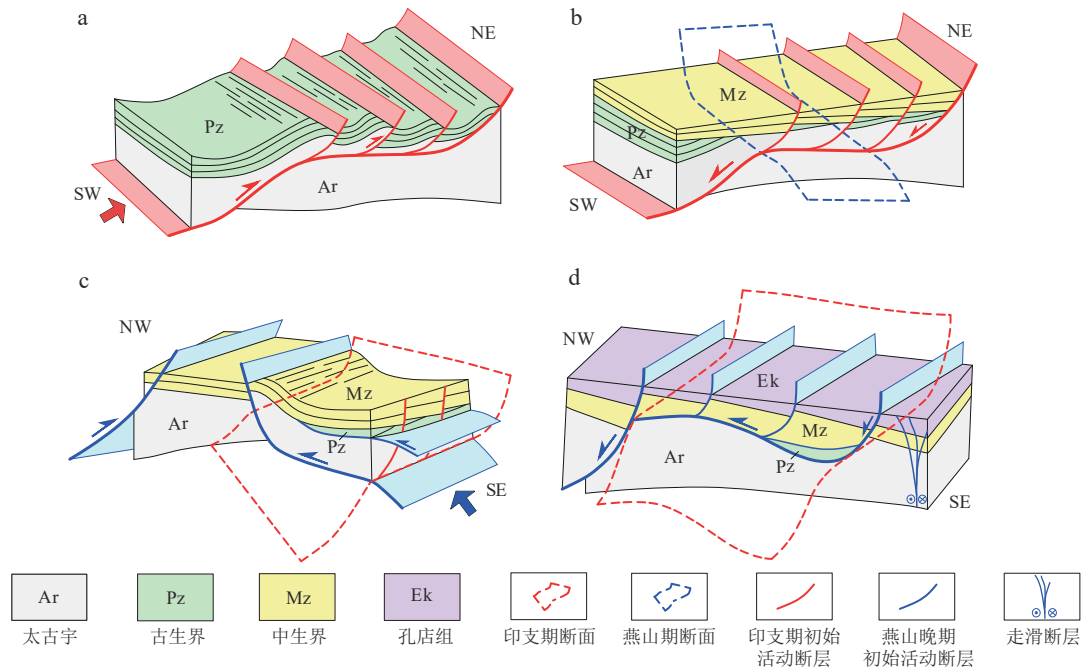


图10 旅大隆起区构造演化模式

Fig. 10 Tectonic evolutionary pattern of the Lyuda uplift zone

a. 印支期由南往北的逆冲推覆;b. 燕山早-中期近南北向伸展;c. 燕山晚期北西-南东向挤压;d. 早喜马拉雅期北西-南东向伸展

造变形可能是三叠世华北块体与扬子块体之间自东向西的剪刀式闭合所导致的,闭合过程所产生的近南北向挤压作用波及华北板块内部,使渤海湾盆地整体也处于相似的挤压背景之下^[2,5-6,10,40-42]。

4.2 燕山期—早喜马拉雅期构造体制和构造格局的转换性

渤海湾盆地在燕山早期(J_{1-2})接受稳定沉积,并在中侏罗世末发生一次广泛的挤压构造事件。黄骅坳陷上侏罗统—下白垩统与中—下侏罗统之间存在明显的角度不整合^[9,37],沾化坳陷北西向逆断层在侏罗纪仍然具有活动性^[38]。Liu 等认为,早—中侏罗世,渤海湾盆地仍经历收缩变形,北西向断层仍具有逆断层特征,区域上形成褶皱—逆冲带,高位处受到侵蚀,低位处接受沉积^[23]。因此,渤海湾地区的中—下侏罗统是印支期北西西向或近东西向宽缓褶皱的向斜低洼地区沉积或挤压挠曲盆地沉积^[5,8,37]。区域上,研究区在燕山早期仍继承了印支运动的应力和构造格局,这可能是早—中侏罗世古太平洋板块以较缓的角度向西俯冲、华北和华南块体近南北向碰撞以及鄂霍斯克洋的向北俯冲等过程使华北克拉通整体处于会聚体制下所导致的^[41,43]。

渤海湾盆地在燕山中期(J_3-K_1)整体处于伸展背景下^[35]。黄骅坳陷在该时期存在强烈的岩浆活动并

发育控盆的张性正断层^[9],渤海海域南部及济阳坳陷,北西向逆断层在白垩纪反转为正断层,指示区域上为伸展应力背景^[23,38]。旅大隆起区南部的428构造在燕山中期也处于近南北向的水平拉张环境中,先存的近东西向逆断层在局部伸展环境下反转为正断层^[33]。在旅大隆起区,中—下侏罗统与上侏罗统—下白垩统地震轴之间互相平行,二者之间未见明显的角度不整合,北西—南东向地震剖面中,未发现明显的中生代控盆断层,因此,渤海海域在燕山中期仍然继承了印支期的构造格局,但局部地区应力由挤压转换为伸展,沉积了上侏罗统—下白垩统(图9c₁,图c₂,图10b)。前人研究认为,晚侏罗世—早白垩世,古太平洋板块俯冲后撤导致华北克拉通岩石圈发生大尺度减薄和破坏,在东亚陆缘形成断陷盆地、变质核杂岩等一系列伸展变形,并伴随有大量岩浆活动^[14-15,44-45]。而李三忠等则认为,古太平洋板块的斜向俯冲形成以郯庐断裂为代表的北北东向大型走滑断层^[2,29,36,42],这些走滑断层的调节作用导致区域挤压背景下不同块体发生挤出、逃逸,从而使得研究区仍处于近南北向的伸展作用下。

燕山晚期(K_2),研究区经历主体自南东往北西方向的逆冲作用,主干逆断层的滑距约为360 m,同时发育自北西向南东方向的反冲作用,秦南1号断裂和秦南3号断裂开始形成,逆冲滑距分别为180 m和170 m,北西—南东方向的收缩率达7.0%,挤压强度小于印支

期(图9d₁, 图9d₂, 图10c)。研究区整体缺失上白垩统,在挤压变形较强的隆起区,中生界顶部遭受剥蚀,局部与上覆的新生界之间表现为角度不整合接触(图9d₂)。这个角度不整合在渤海海域西南部、南部甚至整个渤海湾盆地都普遍存在,标志了一次显著的挤压、收缩事件,同时在该区域形成一系列北东-南西走向的褶皱^[21,23,35]。漆家福等认为渤海海域的晚侏罗世一早白垩世盆地和晚白垩世盆地均经历了这次区域性的反转隆升^[8],吴智平等认为郯庐断裂以西的华北广大地区在该时期整体均处于隆升剥蚀状态^[5]。前人研究认为,晚白垩世,随着较年轻的古太平洋洋壳俯冲至东亚陆缘之下,俯冲倾角变缓,对东亚陆缘产生区域性的挤压^[15]。这种区域应力场的转变可能导致研究区在北西-南东向的挤压作用下形成北东-南西走向的构造格局。

早喜马拉雅期(E₁),研究区在北西-南东向区域伸展背景下,形成一系列向北西方向拆离的多米诺式的正断层,拆离的范围向东截止于郯庐断裂带(图6, 图7, 图9e₁, 图9e₂, 图10d)。早期的逆冲断层,即秦南1号断裂和秦南3号断裂,也在区域伸展背景下重新活动,反转为正断层,滑距分别约为3 830 m和1 710 m,其东部多条次级正断层的滑距则在1 550~3 040 m,导致北西-南东方向的伸展率达19.0%(图9e₂)。因此,相对于燕山早期和中期,该时期的伸展作用显然更为强烈。伸展过程还伴随着早期地层的块体旋转,秦南1号断裂西侧的秦南凹陷和东侧的旅大隆起区均发生了约20°的顺时针旋转(图9e₂)。块体旋转作用导致高位处遭受剥蚀,使中生界与孔店组之上的新生代沉积层之间表现为角度不整合接触(图6),在低位处则控制了孔店组的箕状断陷沉积。伸展强烈处表现为拆离断层样式,导致下部的中生界进一步减薄、碎块化(图9e₂)。此时,隆起区东侧的郯庐断裂带和渤海海域南部也表现为强烈的伸展活动^[23,36]。济阳坳陷在古近纪也进入强烈裂谷阶段,在孔店组沉积的同时形成了大量北东向正断层,强烈的控盆断层活动指示区域上为北西-南东向的伸展^[38]。这次构造伸展作用也得

到了构造-热模拟结果的证实,其是除白垩纪外,华北克拉通东部发生的又一次强烈的岩石圈减薄^[30,46]。该时期,古太平洋板块洋中脊和更年轻的洋壳俯冲至东亚陆缘之下,导致上覆地壳的水平伸展和岩浆活动的出现^[15]。而郯庐断裂等北北东向走滑断裂由左行走滑转变为右行走滑,与兰聊断裂等形成渤海湾盆地新生代早期右行右阶的走滑拉分盆地^[13,18]。

研究区在新近纪发生区域热沉降作用,形成现今的盆地格局^[32](图9f₁, f₂)。在此期间,北东-南西走向的秦南1号断裂转变为右行走滑断层,与郯庐断裂带共同影响旅大隆起区的演化,改造了早期的构造格局。

前人普遍认为,晚侏罗世一早白垩世是渤海湾盆地乃至中国东部构造格局转折的关键阶段,整体由近南北向的挤压构造体制转变为北西-南东向的伸展构造体制^[2,8,18-19,31,47]。岩石圈热结构研究也指示,白垩纪是渤海湾盆地构造演化的重要时期,其从白垩纪之前的“冷地幔热地壳”转变成白垩纪及之后的“热地幔冷地壳”^[30]。同时,华北克拉通东部也记录了大量晚中生代的伸展构造,这些伸展构造在区域尺度上均具有北西-南东向的伸展方向,指示了白垩纪强地壳伸展作用^[48-51]。但旅大隆起区在晚白垩世之前,构造格局仍为近东西向,直至晚白垩世才转变为北东-南西向。这可能是在西太平洋俯冲的区域背景下,郯庐断裂左行走滑和兰聊断裂右行走滑所夹持的三角形区域向南挤出、逃逸所致^[13,36]。早喜马拉雅期强烈的伸展作用则继承了燕山晚期的北东-南西向构造格局。因此,尽管渤海湾盆地的构造机制可能自晚中生代就已经发生了转变,但旅大隆起区的构造格局却是自晚白垩世才开始发生变革的。

4.3 中、新生代断层活动和基底滑脱层的继承性

吕丁友等基于地震资料的解释,在渤海海域基底内识别出印支期滑脱层构造,其主体表现为坡坪式逆冲,在区域上呈三级台阶构造样式,并认为鲁西基底沿印支期沿滑脱层逆冲至燕辽基底之上(图11)^[51]。王迪等也通过数值模拟研究认为,渤海海域基底内部存

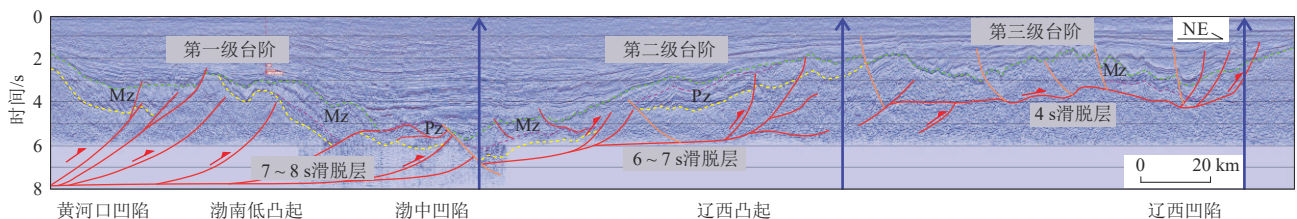


图11 渤海海域三级台阶式逆冲推覆体系(据文献[51]修改)

Fig. 11 Three-step-like thrust nappe system in the Bohai Sea area (modified after reference [51])

在阶梯状的滑脱层,该滑脱层导致的印支期大规模逆冲断层与褶皱变形与地震剖面具有较好的一致性^[52]。而李理等则在鲁西地区识别出广泛存在的燕山晚期滑脱面构造,认为其是重力滑覆的结果^[53]。那么燕山晚期滑脱面是否是印支期滑脱层的继承性活动?下面以旅大隆起区为例,探讨其可能性。

如前文所述,旅大隆起区在印支期也存在自南向北的逆冲推覆作用,这些逆冲断层向深部可能归并至渤海海域的逆冲推覆体系中。研究区位于辽西凸起南侧,属于逆冲推覆第二台阶,基底滑脱层时间深度为6~7 s(图11)。在深部的主逆冲滑脱层之上形成分支次级逆断层,其在浅部表现为高角度的叠瓦式逆断层(图10a,图11)。燕山早-中期挤压背景下的局部伸展作用导致印支期的逆冲推覆面发生较弱的负反转活动,区域上沉积了中生界(图10b)。燕山晚期在北西-南东向挤压作用下,新形成了自南东往北西方向逆冲的断层,逆冲断层面也表现为坡坪式构造,其在深部可能为燕山期主逆冲断层的断坪沿印支期基底滑脱层活动,在较浅部可能沿太古宇和古生界内部的薄弱面发育新的滑脱层,再向上断层面变陡,突破中生界,形成新的逆冲断层面(图9d2,图10c)。早喜马拉雅期,在北西-南东向伸展作用下,燕山晚期形成的浅部滑脱层作为区域上的主伸展断层面重新活动,并形成多米诺式的次级正断层,控制了孔店组的箕状断陷沉积(图10d)。由此可见,滑脱层在不同时期并非是统一的,深部的基底滑脱层控制了后期拆离的基本格局,而浅部也可能形成新的滑脱层,滑脱层共用区域大致位于旅大25-1构造及其周边地区(图8)。新生代晚期,区域上以北北东向走滑断层占主导,如秦南1号断裂、秦南3号断裂和郯庐断裂带,这些主走滑断层多为早期滑脱层的边界约束断层,此外,也有次级走滑断层切穿早期断层,但位移较小。这种多期叠加构造导致研究区早期变形被强烈改造,地震剖面尺度也难以识别滑脱层继承性活动的详细特征,后续需要数值模拟等工作的进一步验证。

5 构造叠加改造差异性及其对潜山勘探意义

近年来,前人已经在渤海海域发现了丰富的潜山油气藏,其中渤中19-6/13-2构造和渤中21/22构造处分别为太古宇和古生界储油^[3]。因此,太古宇和古生界潜山油气勘探是未来发展的潜力区和重点区。通过对旅大隆起区潜山的大量钻井勘探和详细研究,目前

已经在旅大25-1构造获得了LD25-A高产油气田,实现了该区域油气勘探的战略性突破,但其西部的秦皇岛30-1构造评价一直未有进展^[54]。这主要是由于研究区在中、新生代经历多期次、多方向、不同性质的构造运动叠加改造,导致不同潜山的形成机制存在显著差异,增加了油气勘探的难度。

前人认为,对渤海海域而言,印支运动主要影响其西部地区,而燕山运动主要影响其北部和东部地区^[55]。旅大隆起区恰好位于渤海海域西部和北部的交界处,受印支运动和燕山运动的共同作用,是印支期北西-近东西向构造格局向燕山期北东向构造格局转变的关键区域,区内不同位置的潜山受控于不同的构造叠加改造,演化过程存在差异。例如428构造潜山初始格架形成于印支期,是主体自南向北的逆冲推覆系统中局部对冲构造的下盘,其在燕山期和早喜马拉雅期的多次负反转作用下作为地垒构造相对抬升,导致428构造潜山进一步成型。因此,428构造受控于近东西向的早期逆冲、晚期伸展断裂体系。秦皇岛30-1和旅大25-1构造潜山则是在印支期自南向北的逆冲推覆、燕山期主体自南东向北西的逆冲推覆及其在早喜马拉雅期的负反转作用下形成,恰好位于北西-近东西向构造与北东向构造叠加改造的区域。旅大25-1构造潜山相对于秦皇岛30-1构造潜山,在早喜马拉雅期遭受了更为强烈的伸展拆离作用,潜山进一步被动隆升,部分中生界缺失,导致局部地区新生界直接覆盖在太古宇之上。3个潜山形成机制的不同进而导致古生界和中生界横向变化大,而后期秦南1号断裂、秦南3号断裂和郯庐断裂带等北东向断裂右行走滑活动的叠加改造使得构造变形更为复杂。

旅大隆起区在中生代-新生代早期经历的多期次构造运动导致研究区裂缝发育,且早期形成的裂缝在后期断裂活动下再次活化,这为油气的运移和储集提供了有利条件。因此,探讨研究区内各个潜山的形成机制和演化过程对太古宇、古生界和中生界油气勘探具有重要意义,也为渤海海域潜山油气勘探提供一定的理论依据。

6 结论

1) 旅大隆起区经历了印支期、燕山期和早喜马拉雅期多幕构造运动的叠加改造,在印支期表现为自南向北的逆冲推覆,燕山早期和中期为挤压背景下的局部伸展,燕山晚期为北西-南东向的挤压,早喜马拉雅期转变为北西-南东向的伸展。研究区构造格局的转

变发生在晚白垩世,由侏罗纪—早白垩世的北西—近东西向构造格局转变为晚白垩世及之后的北东—南西向构造格局。

2) 印支期北西—近东西向的逆冲推覆断裂是控制研究区晚中生代—新生代演化过程的先存构造。燕山期—早喜马拉雅期的断层活动继承或改造印支期的逆冲推覆面,其在深部可能形成统一的滑脱系统。

3) 印支期近东西走向的对冲断裂及其在燕山期和早喜马拉雅期的负反转活动的叠加效应形成了428构造潜山,秦皇岛30-1和旅大25-1构造潜山则是印支期近南北向挤压、燕山晚期北西—南东向挤压和早喜马拉雅期北西—南东向伸展叠加改造的结果。

致谢:本研究使用的地震和钻井数据由中海石油天津分公司渤海石油研究院提供,两位审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 渤海湾盆地中、新生代构造演化研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(6): 845-851.
HOU Guiting, QIAN Xianglin, CAI Dongsheng. The tectonic evolution of Bohai Basin in Mesozoic and Cenozoic time[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2001, 37(6): 845-851.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 张旗, 钱青, 王二七, 等. 燕山中晚期的中国东部高原: 埃达克岩的启示[J]. 地质科学, 2001, 36(2): 248-255.
ZHANG Qi, QIAN Qing, WANG Erqi, et al. An east china plateau in mid-late Yanshanian period: Implication from adakites [J]. Chinese Journal of Geology, 2001, 36(2): 248-255.
- [5] 吴智平, 侯旭波, 李伟. 华北东部地区中生代盆地格局及演化过程探讨[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(4): 385-399.
WU Zhiping, HOU Xubo, LI Wei. Discussion on Mesozoic basin patterns and evolution in the eastern north China block [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2007, 31(4): 385-399.
- [6] 任建业, 于建国, 张俊霞. 济阳坳陷深层构造及其对中新世盆地发育的控制作用[J]. 地学前缘, 2009, 16(4): 117-137.
REN Jianye, YU Jianguo, ZHANG Junxia. Structures of deep bed in Jiyang Sag and their control over the development of Mesozoic and Cenozoic basins [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(4): 117-137.
- [7] SU Jinbao, ZHU Wenbin, LU Huaifu, et al. Geometry styles and quantification of inversion structures in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, eastern China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(1): 25-38.
- [8] 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.
- [9] 楼达, 李三忠, 金亮, 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.
- [10] 李三忠, 刘鑫, 索艳慧, 等. 华北克拉通东部地块和大别-苏鲁造山带印支期褶皱-逆冲构造与动力学背景[J]. 岩石学报, 2009, 25(9): 2031-2049.
LI Sanzhong, LIU Xin, SUO Yanhui, et al. Triassic folding and thrusting in the eastern block of the North China Craton and the Dabie-Sulu orogen and its geodynamics [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(9): 2031-2049.
- [11] 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.
- [12] 周立宏, 李三忠, 刘建忠, 等. 渤海湾盆地燕山期构造特征与原型盆地[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(4): 692-699.
ZHOU Lihong, LI Sanzhong, LIU Jianzhong, et al. The Yanshanian structural style and basin prototypes of the Mesozoic Bohai Bay Basin [J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(4): 692-699.
- [13] 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.
- [14] 朱日祥, 周忠和, 孟庆任. 华北克拉通破坏对地表地质与陆地生物的影响[J]. 科学通报, 2020, 65(27): 2954-2965.
ZHU Rixiang, ZHOU Zhonghe, MENG Qingren. Destruction of the North China craton and its influence on surface geology and terrestrial biotas [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(27): 2954-2965.
- [15] ZHU Rixiang, ZHANG Hongfu, ZHU Guang, et al. Craton destruction and related resources [J]. International Journal of Earth Sciences, 2017, 106(7): 2233-2257.
- [16] 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]. *Science China Earth Sciences*, 2020, 50(1): 28–49.
- [17] QI Jiafu, YANG Qiao. Cenozoic structural deformation and dynamic processes of the Bohai Bay basin province, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(4): 757–771.
- [18] LI S Z, SUO Y H, SANTOSH M, et al. Mesozoic to Cenozoic intracontinental deformation and dynamics of the North China Craton [J]. *Geological Journal*, 2013, 48(5): 543–560.
- [19] LI Zhenhong, QU Hongjie, GONG Wangbin. Late Mesozoic basin development and tectonic setting of the northern North China Craton [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 114(Part 1): 115–139.
- [20] WANG Di, ZHANG Xiaoqing, YANG Linlong, et al. Influence of pre-existing faults on Cenozoic structures in the Chengbei Sag and the Wuhaozhuang area, Bohai Bay Basin, East China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 138: 105539.
- [21] 陈树光, 任建业, 辛云路, 等. 渤海湾沙北地区盆地结构构造及其演化分析 [J]. *大地构造与成矿学*, 2015, 39(5): 816–827.
- CHEN Shuguang, REN Jianye, XIN Yunlu, et al. Structure and evolution analyses of the Shabei area of Bohai Gulf Basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2015, 39(5): 816–827.
- [22] 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, LYU 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.
- [23] LIU Yiming, LIU Lijun, WU Zhiping, et al. New insight into East Asian tectonism since the Late Mesozoic inferred from erratic inversions of NW-trending faulting within the Bohai Bay Basin [J]. *Gondwana Research*, 2022, 102: 17–30.
- [24] 杨帆, 陈宇航, 张新涛, 等. 渤海辽西低凸起南倾没端前古近系断裂特征及对潜山地层控制作用 [J]. *中国海上油气*, 2022, 34(6): 14–23.
- YANG Fan, CHEN Yuhang, ZHANG Xintao, et al. Characteristics of the pre-Paleogene faults and their influences on buried-hill strata at the south pitching end of the Liaoxi low uplift, Bohai Sea [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2022, 34(6): 14–23.
- [25] 张新涛, 杨帆, 余一欣, 等. 渤海428构造带前新生代构造特征及其演化 [J]. *中国海上油气*, 2023, 35(1): 27–39.
- ZHANG Xintao, YANG Fan, YU Yixin, et al. Pre-Cenozoic tectonic characteristics and evolution in 428 structural belt, Bohai Sea [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2023, 35(1): 27–39.
- [26] 王德英, 王清斌, 刘晓健, 等. 渤海湾盆地海域片麻岩潜山风化壳型储层特征及发育模式 [J]. *岩石学报*, 2019, 35(4): 1181–1193.
- WANG Deying, WANG Qingbin, LIU Xiaojian, et al. Characteristics and developing patterns of gneiss buried hill weathering crust reservoir in the sea area of the Bohai Bay Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(4): 1181–1193.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] ZHU Guang, WANG Yongsheng, LIU Guosheng, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of strike-slip motion on the Tan-Lu fault zone, East China [J]. *Journal of Structural Geology*, 2005, 27(8): 1379–1398.
- [30] LI Zongxing, ZUO Yinhui, QIU Nansheng, et al. Meso-Cenozoic lithospheric thermal structure in the Bohai Bay Basin, eastern North China Craton [J]. *Geoscience Frontiers*, 2017, 8(5): 977–987.
- [31] 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 of the southwestern Bohai Sea and its dynamic mechanism: Implications for the destruction of the North China Craton [J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(5): 133–146.
- [32] YU Yixin, ZHOU Xinhui, XU Changgui, et al. Architecture and evolution of the Cenozoic offshore Bohai Bay basin, eastern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 192: 104272.
- [33] 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.
- [34] 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]. *地学前缘*, 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.
- [35] REN Jianye, TAMAKI K, LI Sitian, et al. Late mesozoic and cenozoic rifting and its dynamic setting in eastern China and adjacent areas [J]. *Tectonophysics*, 2002, 344(3/4): 175–205.
- [36] 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]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 48(4): 415–435.
- [37] 汪泽成, 刘和甫, 段周芳, 等. 黄骅坳陷中新世构造负反转

- 分析[J]. 地球科学, 1998, 23(3): 289-293.
- WANG Zecheng, LIU Hefu, DUAN Zhoufang, et al. Analysis of Meso-Cenozoic tectonic inversion of Huanghua Depression [J]. Earth Science, 1998, 23(3): 289-293.
- [38] CHENG Yanjun, WU Zhiping, LU Shunan, et al. Mesozoic to Cenozoic tectonic transition process in Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin, East China[J]. Tectonophysics, 2018, 730: 11-28.
- [39] 赵锡奎, 徐国强, 罗志立, 等. 济阳坳陷前中生界潜山形成的构造过程与油气聚集规律[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2004, 31(6): 596-600.
- ZHAO Xikui, XU Guoqiang, LU Zhili, et al. Structural process of buried hill formation and oil and gas accumulation law in pre-Mesozoic of Jiyang Depression, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2004, 31(6): 596-600.
- [40] MENG Qingren, ZHANG Guowei. Timing of collision of the North and South China blocks: Controversy and reconciliation [J]. Geology, 1999, 27(2): 123-126.
- [41] MENG Qingren, WU Guoli, FAN Longgang, et al. Tectonic evolution of Early Mesozoic sedimentary basins in the North China block[J]. Earth-Science Reviews, 2019, 190: 416-438.
- [42] 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.
- [43] LI Sanzhong, SUO Yanhui, LI Xiyao, et al. Mesozoic tectono-magmatic response in the East Asian ocean-continent connection zone to subduction of the Paleo-Pacific Plate [J]. Earth-Science Reviews, 2019, 192: 91-137.
- [44] WU Fuyuan, YANG Jinhui, XU Yigang, et al. Destruction of the North China Craton in the Mesozoic [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2019, 47(1): 173-195.
- [45] LIU Junlai, NI Jinlong, CHEN Xiaoyu, et al. Early Cretaceous tectonics across the North Pacific: New insights from multiphase tectonic extension in Eastern Eurasia [J]. Earth-Science Reviews, 2021, 217: 103552.
- [46] LIU Qiongying, HE Lijuan, HUANG Fang, et al. Cenozoic lithospheric evolution of the Bohai Bay Basin, eastern North China Craton: Constraint from tectono-thermal modeling [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2016, 115: 368-382.
- [47] 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 等. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2003, 33(10): 913-920.
- ZHAI Mingguo, ZHU Rixiang, LIU Jianming, et al. Mesozoic tectonic regime turning the key time in the eastern North China [J]. Science China Earth Sciences, 2003, 33(10): 913-920.
- [48] 林伟, 王清晨, 王军, 等. 辽东半岛晚中生代伸展构造——华北克拉通破坏的地壳响应[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(5): 638-653.
- LIN Wei, WANG Qingchen, WANG Jun, et al. Late Mesozoic extensional tectonics of the Liaodong Peninsula massif: Response of crust to continental lithosphere destruction of the North China Craton [J]. Science China Earth Sciences, 2011, 41(5): 638-653.
- [49] LIU Junlai, SHEN Liang, JI Mo, et al. The Liaonan/Wanfu metamorphic core complexes in the Liaodong Peninsula: Two stages of exhumation and constraints on the destruction of the North China Craton [J]. Tectonics, 2013, 32(5): 1121-1141.
- [50] MAO Liguang, XIAO Ancheng, ZHANG Hongwei, et al. Structural patterns of the late Mesozoic crustal detachment system in the Raoyang Sag, Bohai Bay Basin, eastern China: New insights from 3D seismic data [J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 84: 215-224.
- [51] 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.
- 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.
- [52] 王迪, 戴黎明, 吴昊明, 等. 渤海海域滑脱层对印支期构造分带性控制的数值模拟研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023.
- WANG Di, DAI Liming, WU Haoming, et al. Numerical simulation of the Indosinian tectonic zonation controlled by the detachment in Bohai Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023.
- [53] 李理, 钟大赟, 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 deep background of the decollement structures in the Luxi region [J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(6): 651-661.
- [54] 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.
- [55] 胡志伟, 吕丁友, 王德英, 等. 渤海海域前新生代关键构造期变形特征与潜山油气成藏意义[J]. 中国海上油气, 2023, 35(1): 50-62.
- HU Zhiwei, LYU Dingyou, WANG Deying, et al. Deformation characteristics of critical tectonic periods during pre-Cenozoic and significance of buried hill hydrocarbon accumulation in the Bohai Sea area [J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(1): 50-62.

(编辑 张玉银)