

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

王德英¹, 刘晓健¹, 邓辉¹, 刘永江², 李德郁¹

[1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459; 2. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100]

摘要:华北地区中-新生代以来的构造转换作用与渤海潜山圈闭和储层成因的关系研究较少。基于岩心、镜下薄片和地震等资料,并结合区域构造背景,厘清了渤海湾盆地渤中19-6区中-新生代构造转换特征及其对潜山地层、圈闭和太古宇储层的影响。研究表明,渤中19-6区潜山构造受华北、华南和古太平洋3大板块相互作用,主要经历了前印支期—印支期、印支期—燕山期和燕山期—喜马拉雅期3次构造转换作用,形成了北西向、北东向、近南北向和东西向4组断裂体系。印支期北西向断层控制了太古宇和古生界整体的圈闭和地层展布规律;燕山期北东向和近南北向断层使潜山圈闭更加复杂化,喜马拉雅期断陷下沉,潜山整体构造面貌最终定型。多幕次构造运动对太古宇潜山大规模裂缝的形成具有重要意义,其中印支期的逆冲推覆是太古宇规模性裂缝形成的关键时期,燕山期构造转换作用进一步扩大了太古宇裂缝储层发育规模,喜马拉雅期构造转换对早期裂缝“再活化”具有显著影响,多期时—空构造转换作用是太古宇发育大规模储层的关键。提出的中国东部中-新生代构造作用与潜山圈闭和储层成因的关联机制,为中国东部潜山储层预测提供了更有效的方法途径,对指导类似盆地内的潜山油气勘探具有重要意义。

关键词:多元地层结构;圈闭成因;太古宇潜山;构造转换;中-新生代;渤中19-6区;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

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

Wang Deying¹, Liu Xiaojian¹, Deng Hui¹, Liu Yongjiang², Li Deyu¹

(1. Tianjin Branch, CNOOC Ltd., Tianjin 300459, China; 2. Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract: There are few studies on the relationship between tectonic transformation in North China since the Meso-Cenozoic and the origin of traps and reservoirs in buried hills in the Bohai Bay Basin. The data of core, seismic and thin section observation, coupled with understanding on the regional tectonic background, are applied to clarify the characteristics of the Meso-Cenozoic tectonic transformation in Bozhong 19-6 area and its influence on buried-hill strata, traps and the Archean reservoirs. It is shown that the buried-hill structure in Bozhong 19-6 area underwent tectonic transformations from the pre-Indosinian to Indosinian, from the Indosinian to Yanshanian and from the Yanshanian to Himalayan under the interaction of North China, South China and paleo-Pacific plates, resulting in four fault systems trending NW, NE, near NS and EW. The NW-trending faults formed in the period of Indosinian tectonism controlled the overall trap and stratigraphic distribution of the Archean and Paleozoic; The NW- and near NS-striking faults developed in the period of Yanshanian movement made the buried-hill traps more complex, and overall structure of the buried hills was finalized with the fault depression in the Himalayan period. Multi-episode tectonic movements are of great significance to the formation of large-scale fractures in the Archean buried hills, and the Indosinian overthrusting was critical to the formation of large-scale fractures in Archean. The Yanshanian tectonic

收稿日期:2022-03-04;修订日期:2022-09-11。

第一作者简介:王德英(1971—),女,教授级高级工程师,石油地质与综合勘探。Email: wangdy2@cnooc.com.cn。

基金项目:中海油重大科技专项(CNOOC-KJ 135 ZDXM 36 TJ 08 TJ)。

activities further expand the scale of the Archean fractured reservoirs developed, and the Himalayan tectonic transformation has a significant impact on the "reactivation" of early fractures. Multi-stage spatiotemporal tectonic transformation is the key to the development of large-scale reservoirs in the Archean. The correlation mechanism between the Meso-Cenozoic tectonism and origins of buried-hill trap and reservoir in eastern China proposed in this study, provides a more effective method for mapping of buried-hill reservoirs in eastern China, and is of great significance to guiding buried-hill petroleum exploration in similar basins.

Key words: multi-stratigraphic structure, trap genesis, Archean buried hill, structural transformation, Meso-Cenozoic, Bozhong 19-6 area, Bohai Bay Basin

引用格式: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. DOI: 10. 11743/ogg20220605.

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. DOI: 10. 11743/ogg20220605.

华北克拉通是中国主要的构造单元,具有3.8 Ga的古老历史^[1],位于古亚洲洋、特提斯洋和太平洋3大构造域的交汇处^[2],由东部陆块与西部陆块拼合形成^[3-4],在形成后经历了长期且稳定的克拉通阶段^[5-6]。古生代,华北克拉通依次经历了怀远运动、加里东运动和海西运动,造成了克拉通的3次整体升降^[7]。晚古生代以来,华北克拉通与周边陆块互相运动,区域构造活动逐渐转向以横向构造为主,各构造域共同作用于华北克拉通,构造域的转换使克拉通发生了复杂的构造变形^[8]。

渤海湾盆地是华北克拉通东部的一个中-新生代盆地,盆地内油气资源丰富,潜山内部发现了多个油气藏,是中国东部重要的石油和天然气工业基地之一。潜山内幕保留的先存断裂以及潜山与上覆地层之间的接触关系可以为构造转换作用的研究提供大量证据^[9]。潜山地层经历了前印支期—印支期、印支期—燕山期和燕山期—喜马拉雅期等多期构造转换作用,对潜山圈闭形成、潜山地层分布和大规模裂缝型储层的形成具有重要影响。各幕次的构造转换不仅直接促进了该区潜山裂缝型储层发育,也为潜山的风化壳储层和内幕溶蚀型储层的发育提供了有利条件^[10],已经发现了乌马营、蓬莱9-1、渤中19-6等一系列潜山油气田^[11-12]。其中渤中19-6潜山是中国东部传统油型盆地中发现的最大的太古宇变质岩潜山凝析气藏,其地震、钻井、分析化验等资料丰富,储层发育情况、内幕断裂展布、基底与上覆地层的接触关系清楚,因而是研究多期构造转换对潜山地层、储层控制作用的理想场所,区域构造转换作用研究可以为解决潜山储层预测难题提供更有效的方法,对指导类似盆地内潜山油气勘探具有指导意义。

1 地质概况

渤海湾盆地位于中国东部,北部为阴山—燕山造山带,南部为秦岭—大别造山带,东部为郯庐断裂带和苏鲁造山带,西部为太行山东麓断裂带,是在华北克拉通地台基础上经历了多期构造运动形成的裂谷盆地^[13],面积约 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

渤中凹陷位于渤海海域,是渤海湾盆地内最大的一个富烃凹陷,新生代以来渤中凹陷成为渤海湾盆地的沉积和沉降中心,新生界最大埋深超过10 000 m。渤中19-6(构造)区位于渤中凹陷西南部,埋深超过4 500 m,属于一个洼中的低潜山构造。构造区发育北西向、北东向与近东西向断层,分为渤中19-6、渤中19-6北、渤中13-2和渤中21/22等4个构造(图1a)。根据地层时代和岩性,把渤中19-6区地层划分为4大套,自下向上分别为太古宇变质岩、古生界碳酸盐岩、中生界火山岩和碎屑岩,以及新生界沉积岩,受多期次构造转换作用的影响,不同构造部位潜山地层组合差异明显。构造区上覆新生界,自下向上发育古近系孔店组、沙河街组、东营组和新近系馆陶组、明化镇组。孔店组为厚层砂砾岩,沙河街组和东营组发育上千米厚的超压泥岩,既是优质的烃源岩层,也是区域性盖层(图1b),馆陶组和明化镇组为砂、泥岩互层。

渤中19-6区潜山整体为高含凝析油的凝析气藏,发育多个含油气层系。渤中19-6构造和渤中13-2构造主力含油气层位为太古宇,渤中21/22构造主力含油气层位为古生界。太古宇变质岩潜山裂缝纵向发育厚度大,

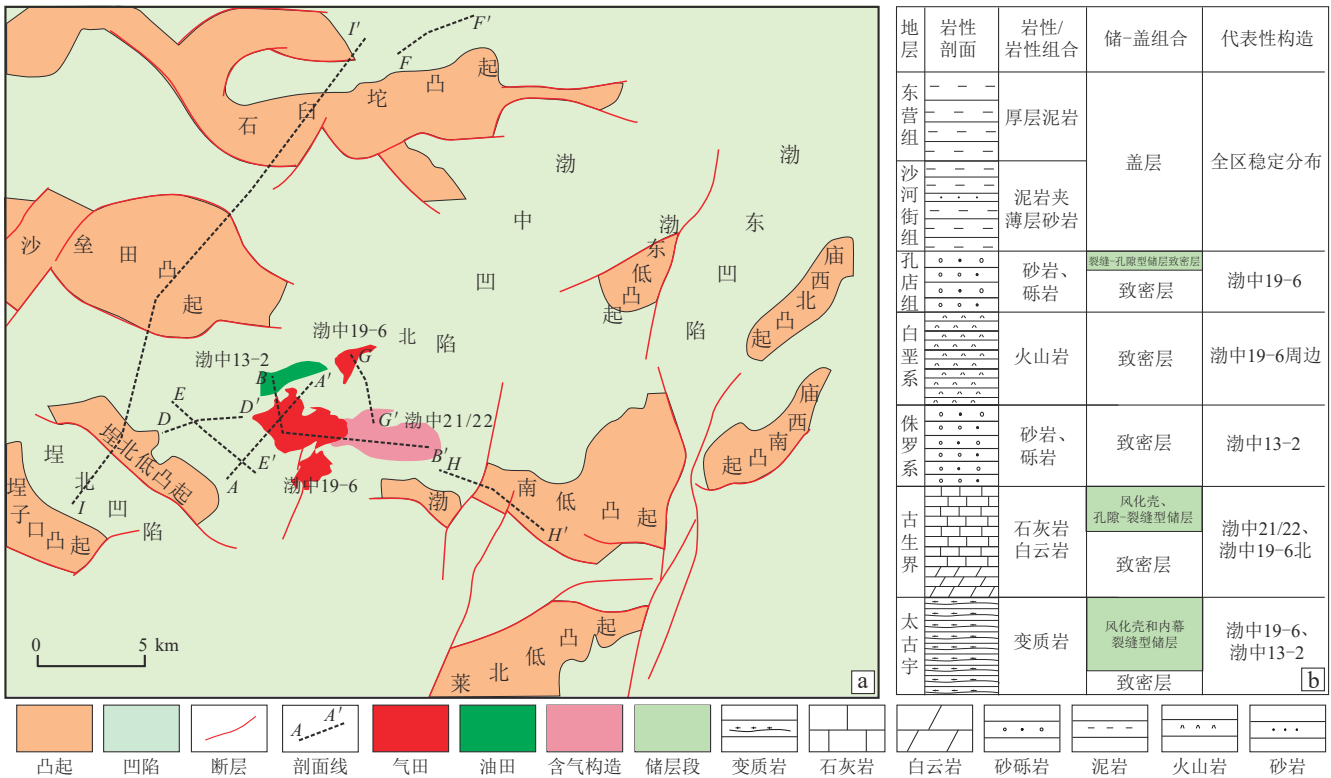


图1 渤海湾盆地渤中19-6区构造位置(a)和地层综合柱状图(b)

Fig. 1 Structural location map of Bozhong 19-6 area (a) and comprehensive stratigraphic column (b) in the Bohai Bay Basin

最高可达上千米。古生界碳酸盐岩储集空间以裂缝、岩溶角砾砾间孔和白云石晶间孔为主。研究区潜山之上覆盖了厚达1 000 m的古近系超压泥岩,为潜山油气藏提供了良好的保存条件。区域超压盖层和潜山大规模优质储层形成的优质储-盖组合,使得潜山的烃柱最大高度可达1 600 m,也是能够形成规模性油气藏的关键。

2 渤中19-6区构造转换特征

2.1 潜山构造几何学特征

2.1.1 潜山断裂特征

渤中19-6构造及围区在中生代以来经历了印支期、燕山期和喜马拉雅期等多期次构造运动,形成了错综复杂的断裂体系,按照发育早晚可划分为北西向、北东向和近南北向断裂(图2)。

印支早期华南板块与华北板块东缘和南缘自东向西呈剪刀式闭合,整个华北南缘遭受东北—北北东向挤压^[2],渤中地区形成了一系列北西向和近东西向断层。印支期断层区域上延伸较远,倾向多数为南西向。该时期断层多为深切太古宇基底的逆断层,后期构造负反转

形成大量铲形正断层,这些断层由深至浅倾角逐渐变陡。大部分仅在太古宇基底中发育,仅有小部分断层向上与新生界断层相接,潜山中断距明显比新生代断距大(图3)。燕山早期受古太平洋板块向华北板块俯冲的影响^[2],研究区形成大量北东向断层,大部分切割印支期北西向断层,纵向上基本延伸至新生界,倾向多为南东向。在渤中19-6构造南部早燕山期形成的北东向断层在喜马拉雅期持续活动(图2中②区域)。在燕山中期左行走滑作用下形成大量近南北向的伸展断裂,平面上呈雁列式分布。该时期断层纵向上基本延伸至新生界,断面近于直立,具有走滑特征。断层在中生界中仅表现为伸展正断层特征,而在新生界中呈负花状构造,说明新生代南北向断层完成由伸展运动向走滑作用的转变。

2.1.2 潜山地层圈闭特征

渤中19-6区构造整体为北东轴向的潜山。北西向($F_{印1}$ 和 $F_{印2}$)和北东向($F_{燕1}$)断层将渤中19-6区分隔为渤中13-2、渤中19-6、渤中19-6北和渤中21/22等4个构造。渤中13-2构造位于研究区西北部,以该构造南部的北东向断层为界,与渤中19-6主体构造相隔,发育断块型圈闭,圈闭高点位于断层附近,北东轴向,上覆厚层中生界砂砾岩,具有“太古宇-中生界-新

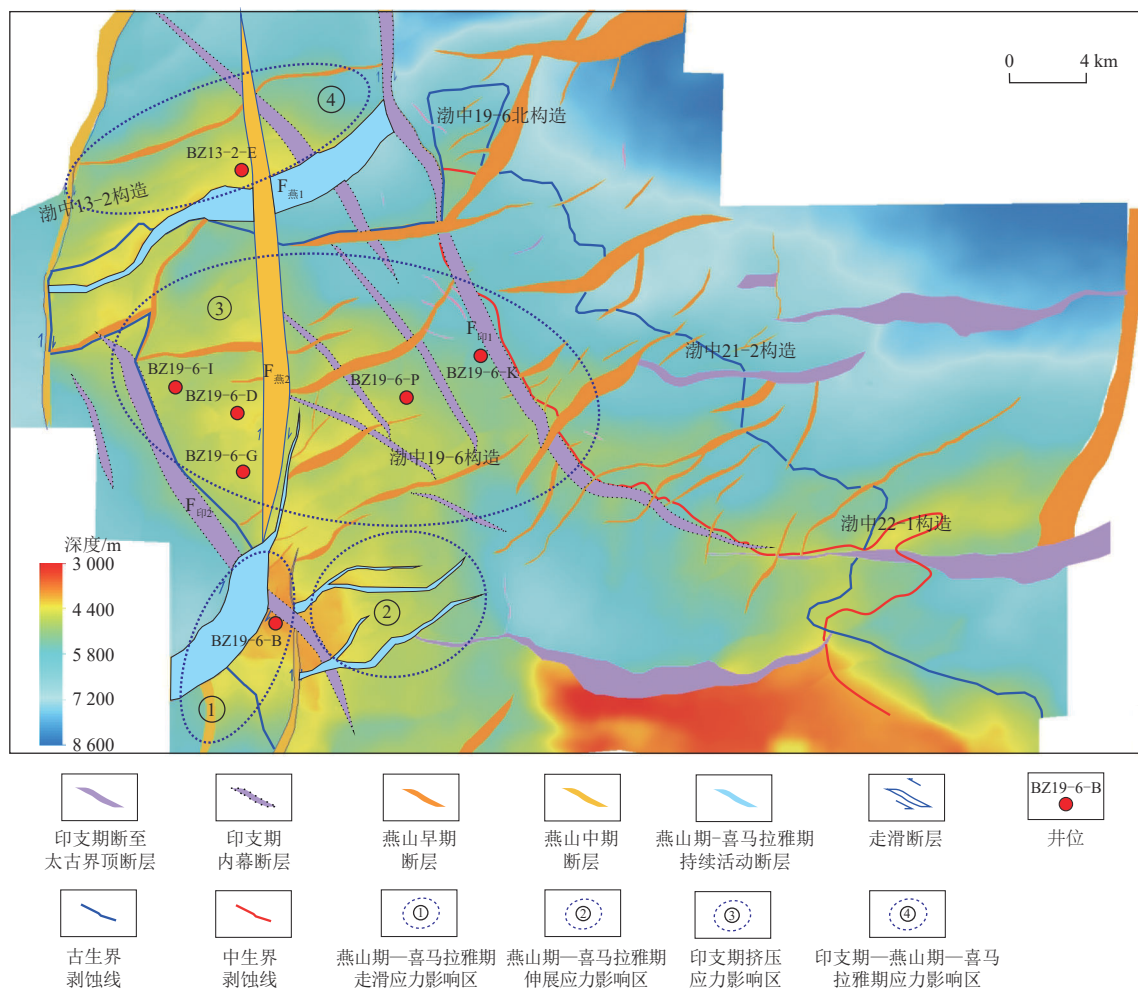


图2 渤中19-6区不同时期断裂与圈闭叠合图

Fig. 2 Superposition map showing faults and traps in Bozhong 19-6 area developed in different periods

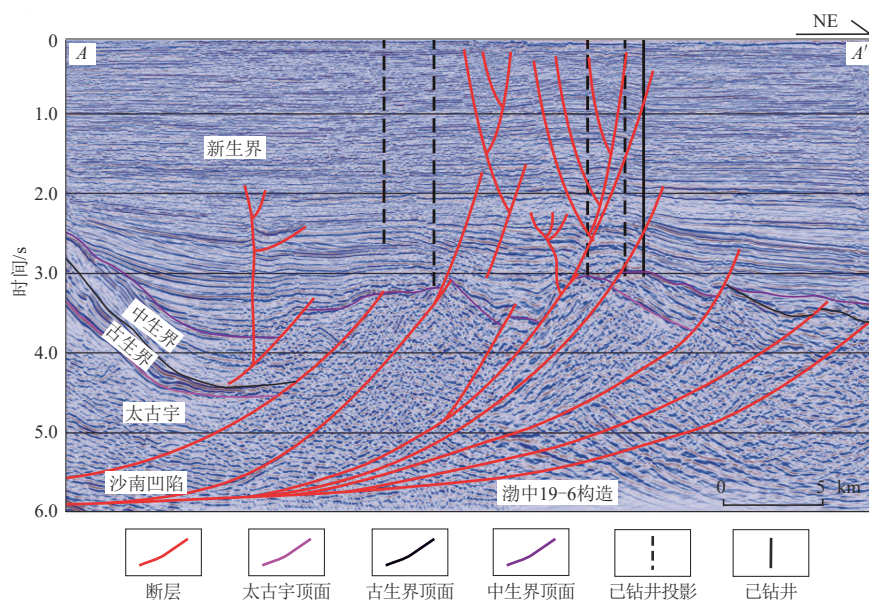


图3 渤中19-6潜山构造北东-南西向地震剖面(剖面位置见图1a)

Fig. 3 NW-SW-trending seismic profile of buried-hill structure in Bozhong 19-6 area (see Fig. 1a for the profile location)

生界”三元地层结构特征。渤中19-6主体构造位于研究区中部,潜山为太古宇,构造整体为北西轴向的大型背斜圈闭,构造被北东向和近南北向断裂分割成多个南北轴向的断块,太古宇上覆新生界,具有“太古宇-新生界”二元地层结构特征。渤中19-6北和渤中21/22构造位于研究区东侧,发育地层超覆圈闭和断块圈闭,太古宇上覆古生界,具有“太古宇-古生界-新生界”三元地层结构特征(图4)。

2.2 多期构造转换事件及其特征

根据区域性构造背景分析,渤中19-6区潜山构造主要经历了前印支期—印支期、印支期—燕山期和燕山期—喜马拉雅期多次构造转换事件改造。多幕次构造转换事件对该区断裂体系、地层结构、潜山圈闭以及大规模储层的发育起到了重要的控制作用,结合钻井与地震资料可以很好地推断多幕次构造转换作用的特征(表1)。

2.2.1 前印支期—印支期构造转换事件

华北板块在印支期以前经历了多期构造运动,以整体升降为主,对研究区圈闭及储层有影响的首个构造运动为元古代晋宁运动^[17],并造成元古界剥蚀殆尽,随后下古生界直接角度不整合覆盖于太古宇之上,这些构造运动对华北克拉通结构未产生实质性破坏。印支期构造运动拉开了华北板块大规模造山运动的序幕^[1],期间研究区潜山地层首次经历了大规模差异改造。印支期对研究区构造和地层方面的影响,总体可分为早期挤压和后期应力松弛(弱伸展)两个阶段。

1) 印支早期(早三叠世—晚三叠世早期)挤压

前印支期—印支期构造转换事件发生于早三叠世初期,主要表现为华北克拉通纵向垂直升降转换为横向大规模强挤压逆冲。印支期挤压事件期间,隆起区顶部和逆冲断层上盘的地层遭受剥蚀,造成环渤中凹陷部分潜山顶部缺失古生界。印支早期的挤压作用一方面使得渤海地区整体抬升,前期地层遭受剥蚀;另一方面使得渤海地区形成一系列近东西向或北西-南东向、呈叠瓦状排列的低角度逆冲断裂。这些断裂中的一部分虽然自新生代以来表现为伸展正断层,但古生界临近断裂处减薄形成的薄底构造和顶部削截的明显特征证明,该断裂经历先逆冲剥蚀、后反转裂陷的过程。

印支早期挤压作用是控制该区太古宇圈闭形成的关键时期,形成了渤中19-6构造太古宇北西向潜山圈闭的雏形。现今环渤中地区西部仍保留有印支早期华南和华北板块碰撞挤压形成的大型逆冲隆起。印支早期构造运动在研究区表现为一系列北西走向的大型断裂(图5a)。这些逆冲断裂使渤中19-6构造整体抬升,形成背形隆起构造,构成渤中19-6太古宇潜山圈闭的雏形(图5b)。在北西向断裂体系中,靠近西南侧的断层倾角相对较大而东北侧的断层倾角相对较小。因此,分隔渤中19-6构造和沙南凹陷之间的逆冲断层在后期反转为正断层的阻力最小,成为控制沙南凹陷和渤中19-6凸起的边界断层(图5c),其他倾角相对较低的断层则衰亡不再活动,使得渤中19-6构造抬升暴露的太古宇未发生反转深埋,保证了渤中19-6太古宇潜山圈闭较高的有效性。渤中21/22构造处于北西走向的叠瓦状逆冲断裂的翼部,古生界保留了较大的地层厚度(图5)。

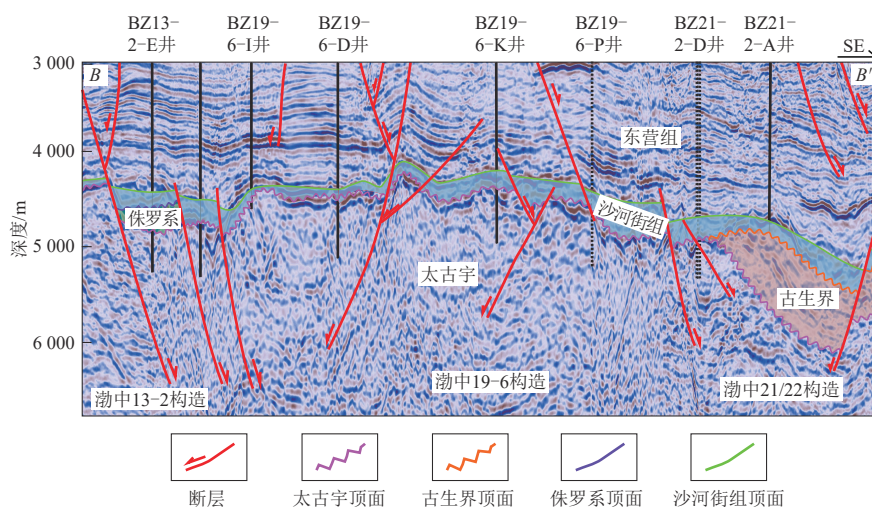


图4 渤中19-6区地层结构地震剖面(剖面位置见图1a)

Fig. 4 Seismic section showing stratigraphic structure in Bozhong 19-6 area (see Fig. 1a for the section location)

表 1 渤中 19-6 区中-新生代多期构造转换事件及其特征^[14-16]

Table 1 The Meso-Cenozoic multi-stage tectonic transformation events and characteristics in Bozhong 19-6 area^[14-16]

时期	区域构造运动	区域动力学机制	应力方向与构造性质	构造变形响应	地层组合变化关系	潜山圈闭特征
晚白垩世—新近纪	喜马拉雅运动	太平洋板块向欧亚板块俯冲	北北西向伸展	早期断层反转并新发育近东西向断层	潜山上部沉积巨厚新生界	潜山圈闭深埋定型
早白垩世末—中白垩世	燕山运动晚期	古太平洋板块向华北板块俯冲	北西西向挤压	北东向断层反转为逆冲断裂	上白垩统缺失,下白垩统遭受剥蚀	对研究区圈闭影响较小
早白垩世中期	燕山运动中期	古太平洋板块向华北板块俯冲	北西-南东向伸展	北西西、北北东向断层全面伸展	渤中 19-6 周边地区火山大规模活动,发育厚层义县组火山岩;同时箕状断陷结构形成,沉积九佛堂组、阜新组和沙海组碎屑岩	对研究区圈闭影响较小
早白垩世初期			北北东向左行走滑	形成北北东向和近南北向走滑断裂	渤中 19-6 区保持持续抬升,白垩系不发育	渤中 19-6 南部 BZ19-6-B 井区发育 S 型走滑增压型圈闭
中侏罗世末—晚侏罗世	燕山运动早期	古太平洋板块向华北板块俯冲	北西向挤压	形成大量北东向逆冲断裂	古生界发生再次严重剥蚀	对太古宇、古生界圈闭进行切割,圈闭复杂化
晚三叠世晚期—中侏罗世	印支运动晚期	华北板块北缘古亚洲洋完全闭合,造山后的弱伸展环境	强挤压后的应力松弛	中-下侏罗统沉积	渤中 13-2 构造和沙南凹陷沉积厚层侏罗系砂、砾岩	渤中 13-2 太古宇构造下沉,被侏罗系覆盖
早三叠世—晚三叠世早期	印支运动早期	华北、华南板块碰撞,古特提斯洋由东向西“剪刀式”闭合	先近南北向挤压,后南西向挤压	形成一系列北西向和近东西向逆冲断裂	渤中 19-6、渤中 13-2 构造处于古背斜核部,古生界剥蚀殆尽;渤中 21/22 处于古背斜翼部,保留部分古生界	渤中 19-6 构造太古宇圈闭形成锥形

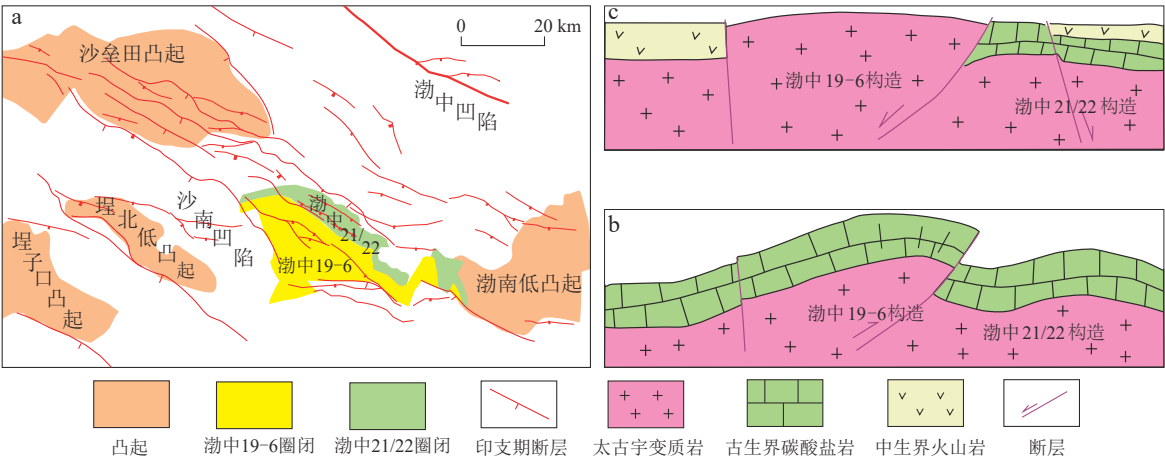


图 5 渤中 19-6 区印支早期古隆起分布和成因模式

Fig. 5 Distribution and genetic model of the early Indosinian paleo-uplift in Bozhong 19-6 area

a. 印支早期古隆起构造分布;b. 印支早期逆冲推覆,渤中 19-6 构造太古宇发育背形构造;c. 印支晚期古生界剥蚀殆尽,断层反转,低部位发育中生界

2) 印支晚期(晚三叠世晚期—中侏罗世)应力松弛

晚三叠世晚期,华北板块与东北地块群碰撞造山结束,开始进入造山后伸展阶段^[18],同时形成了一系列小型的裂陷盆地,但华北板块东部仍然处于隆升剥蚀阶段。早侏罗世晚期—中侏罗世,岩石圈冷却可能导致华北板块整体沉降并形成了多个小型裂陷盆地^[19]。

印支早期北西向逆冲断层在印支晚期发生反转,渤海湾盆地西部地区沉积了大量的北西向展布的早—中侏罗世地层,说明印支晚期以强挤压后应力松弛(弱伸展)背景下的沉积作用为主,是对前期挤压形成差异地貌的填平补齐过程。在渤中 19-6 构造西部的埕北凹陷内,从埕子口凸起—埕北凹陷最低洼处的北东向

剖面上,断裂上盘可见中-下侏罗统与下伏古生界呈角度不整合接触,同上覆白垩系同样呈角度不整合接触,这表明埕北低凸起西南缘的断裂在侏罗系沉积之前就已经反转为正断层,并在中生代控制了中-下侏罗统沉积(图6)。

2.2.2 印支期—燕山期构造转换事件

印支期—燕山期构造转换事件发生于侏罗纪—白垩纪,主要表现为印支期华北板块与华南板块之间北东—南西向构造事件到燕山期古太平洋板块与华北板块之间北东向构造事件的转换。在此期间,印支期大部分逆冲断层发生负反转形成正断层,并在断陷中沉积稳定的中生界。区域上表现为印支期北西向断层、燕山早期北东向和燕山晚期近南北向断层间互发育,并且燕山期断层切割印支期断层的构造格局。

燕山期多幕构造运动分为燕山早期、燕山中期和燕山晚期,对潜山地层格局产生重要影响的是燕山早期以北西向为主的挤压作用以及燕山中期的强左行走滑和裂陷伸展作用,燕山晚期虽亦经历广泛挤压作用,但以整体抬升掀斜为主,差异改造效应相对较弱。

1) 燕山早期(中侏罗世末期—晚侏罗世)挤压

自中侏罗世末期开始,主导研究区的板块构造背景由华北、华南陆—陆碰撞转为由伊泽奈崎板块的俯

冲作用,燕山运动拉开序幕,使得华北东部地区受到区域挤压作用,并在郯庐断裂带围区的露头中普遍发育北东或北北东轴向的纵弯褶皱和逆冲断层等挤压变形构造^[20]。

燕山早期挤压作用改造的对象是中-下侏罗统、古生界和太古宇。在燕山早期挤压过程中,在渤海形成一系列北东或北北东走向的挤压逆冲断裂,并伴生中-下侏罗统内部的北东轴向的褶皱变形及顶部的削截面(图7)。燕山早期主要受到古太平洋北西向低角度俯冲影响,形成大量北东向压扭型走断裂,该时期为渤中19-6区太古宇潜山圈闭改造的关键时期。燕山早期挤压作用在潜山形成过程中的作用主要表现为对印支期潜山的切割破坏,把原来连续的印支期圈闭带切割成一系列大小不等的小型圈闭,使早期完整的圈闭复杂化。

2) 燕山中期(早白垩世)强伸展

大约从145 Ma开始,古太平洋板块由前进式俯冲转为后撤式俯冲,华北板块整体处于具有走滑分量的强伸展构造背景,渤海湾盆地沉积了大量的早白垩世地层。该时期形成的断裂走向以北东走向和近南北走向为主。北东向断层切割早期北西向断层,使圈闭进一步复杂化。近南北走向断层贯穿了渤中19-6构造,呈断续分布的断裂组合,尤其是在渤中19-6构

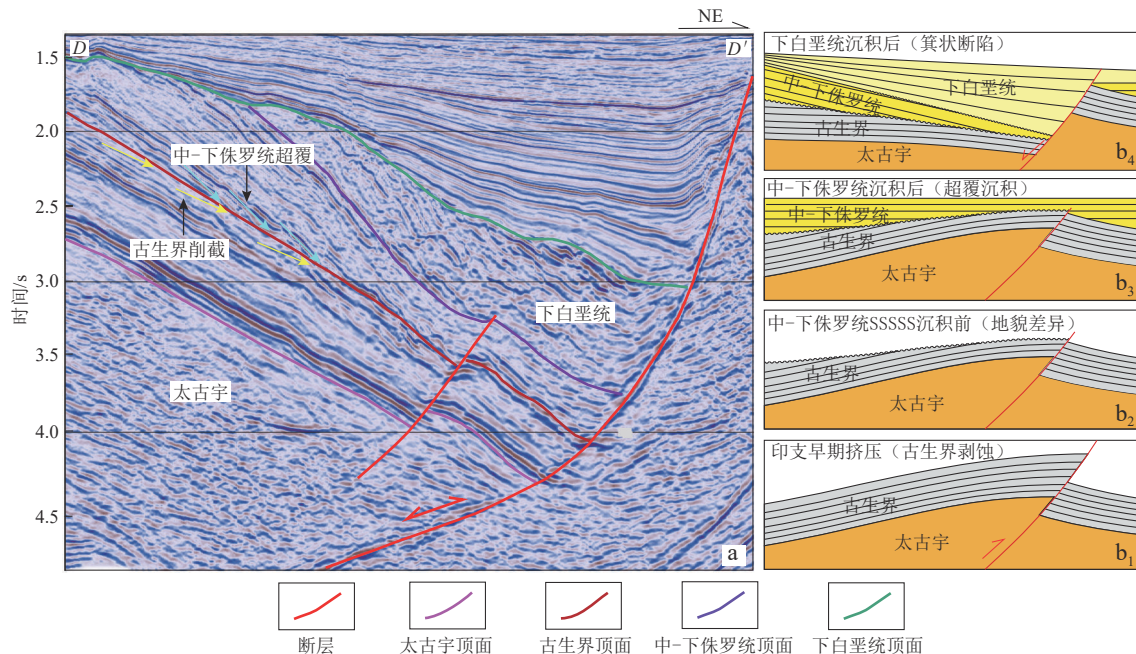


图6 渤中19-6区印支期叠瓦状逆冲断层与后期反转地震剖面 and 构造演化图(剖面位置见图1a)

Fig. 6 Seismic profile showing the imbricate thrust faults developed during the Indosinian and reversed at late Indosinian and tectonic evolution map in Bozhong 19-6 area (see Fig. 1a for the profile location)

a. 印支期叠瓦状逆冲断层与后期反转地震剖面; b₁. 印支早期挤压演化剖面; b₂. 中-下侏罗统沉积前演化剖面; b₃. 中-下侏罗统沉积后演化剖面; b₄. 下白垩统沉积后演化剖面

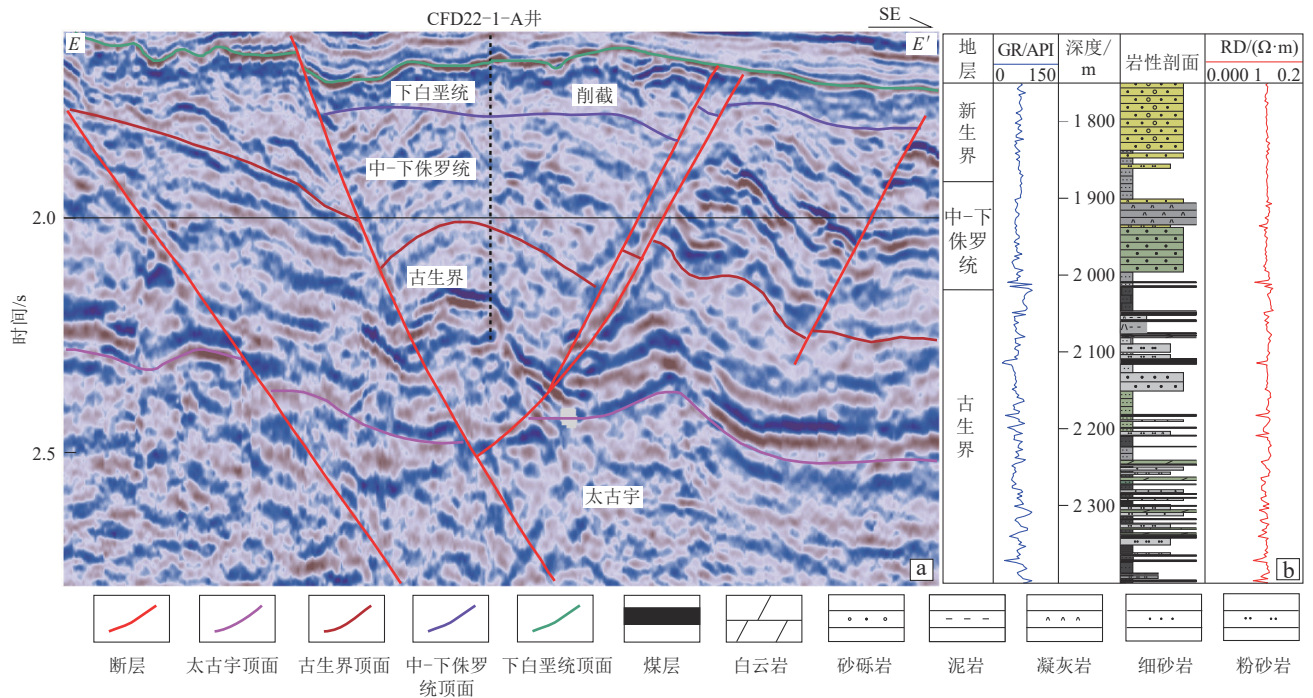


图7 渤中19-6区中-下侏罗统褶皱变形地震剖面(a)和CFD22-1-A井地层综合柱状图(b)(剖面位置见图1a)

Fig. 7 Seismic profile showing folds under deformation of the Middle-to-Lower Jurassic (a), and composite stratigraphic column of Well CFD22-1-A in Bozhong 19-6 area (b) (see Fig. 1a for the profile location)

造南部2井区形成S型走滑增压段,形成了良好的油气圈闭。

燕山中-晚期强烈的伸展裂陷作用过程中,前期北东走向和北西走向的部分大断层发生反转形成半地堑,并起到岩浆通道作用,在渤中19-6区周边发育以下部火山岩和上部碎屑岩为主的下白垩统,是渤海湾盆地目前已发现的燕山构造运动中唯一残存的地层单元。渤中凹陷秦皇岛30地区保留了较全的中生代地层,在义县组之上依次覆盖以碎屑岩为主的九佛堂组、沙海组、阜新组和孙家湾组。岩浆岩层与沉积岩层共同形成箕状断陷结构,边界断层控制沉积作用明显,是该时期构造-沉积格局最明显的特征(图8)。

3) 燕山晚期(早白垩世末期—晚白垩世)挤压

燕山晚期,渤海湾盆地开始处于左行压扭的大地构造应力场中。此阶段的压扭作用造成了局部地区隆升,部分中生界遭受剥蚀。由于渤中19-6构造北东侧的中生界和古生界剥蚀线近平行展布,说明燕山晚期的压扭作用使渤中19-6构造整体隆起,古生界和下白垩统共同遭受剥蚀,所以在平面上和剖面上展现了近平行的剥蚀界线。

2.2.3 燕山期—喜马拉雅期构造转换事件

燕山期—喜马拉雅期构造转换事件发生于白垩

纪—新生代,主要表现为燕山期北东向左行走滑事件向喜马拉雅期右行走滑事件的构造转换^[21]。研究区受两侧北东向右行走滑断裂影响,带间区域形成南北向拉张应力,区域上形成了一系列东西向和北东向正断层。喜马拉雅期断裂倾向不一,倾角多数较大,广泛分布于渤中19-6区。新生代的断裂多数只在新生界内部发育,除边界控凹断层外,大部分未断至潜山(图9),局部受走滑作用影响发育花状构造。在平面上可形成典型的走滑雁列构造和马尾状构造等。新生界断陷边界的控凹断裂大部分都是在早期印支期和燕山期断裂基础上再次伸展形成的,如研究区西北部渤中13-2构造西侧边界断裂下降盘发育古生界、中生界和新生界,说明该断裂是一条在印支期、燕山期和喜马拉雅期发生了反复转换的控凹断裂。另外,在渤中19-6区南部也存在燕山期和喜马拉雅期持续发育的走滑断层(图2中①区)和伸展断层(图2中②区),证实了研究区发生了燕山期—喜马拉雅期构造转换作用。

渤中19-6区在喜马拉雅期主要表现为强伸展、弱走滑特征,使得早期已经受破碎和走滑改造的太古宇在喜马拉雅期整体断陷下沉,上部沉积了巨厚古近系孔店组、沙河街组和东营组以及新近系馆陶组和明化镇组。喜马拉雅构造运动后研究区潜山整体面貌最终定型。

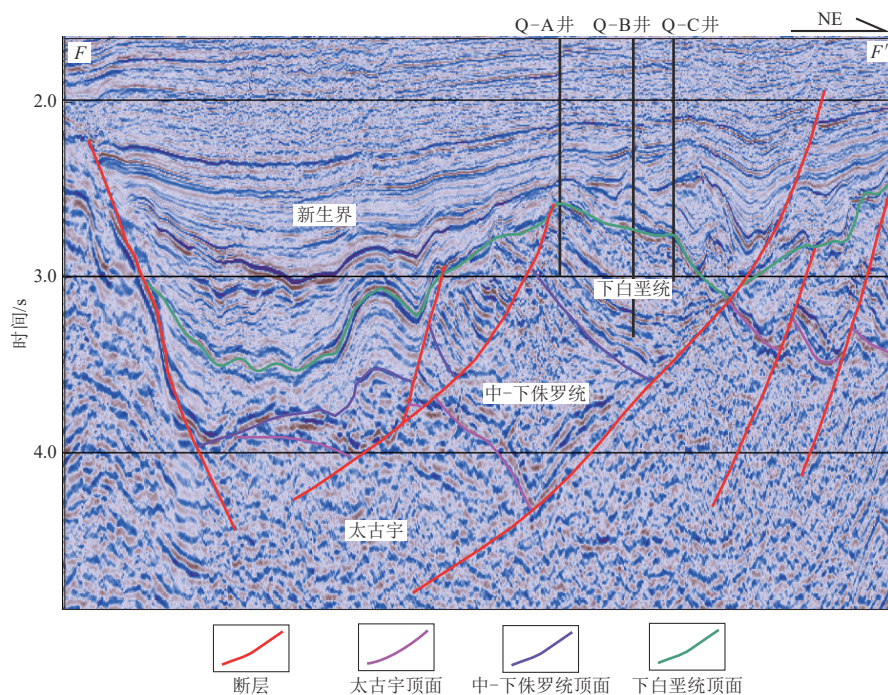


图8 渤中19-6区残存的燕山中期箕状断陷地震剖面(剖面及井点位置见图1a)

Fig. 8 Seismic profile showing the relic half-graben fault depression of the mid-Yanshanian in Bozhong 19-6 area (see Fig. 1a for the locations of profile and wells)

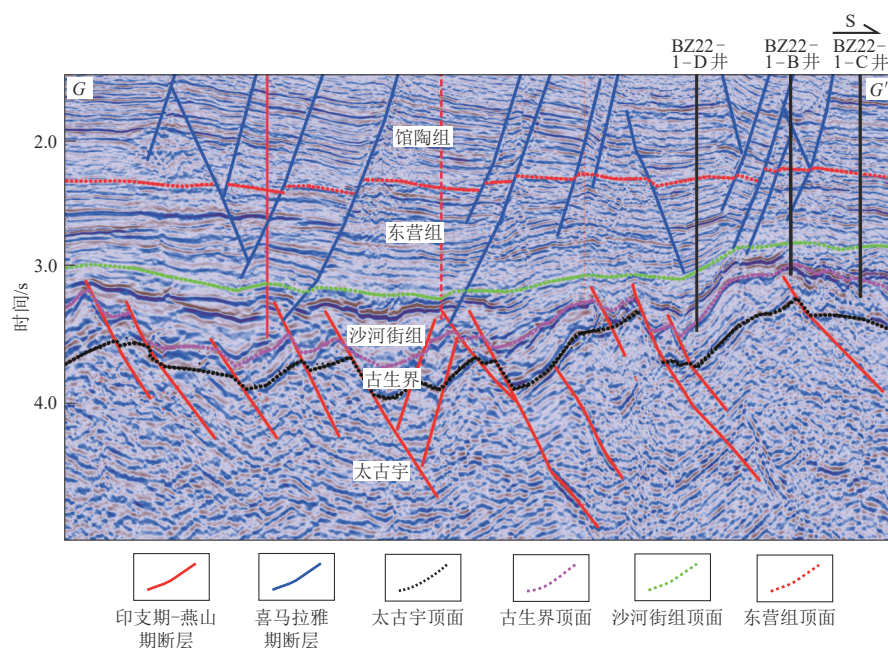


图9 渤中19-6区燕山期—喜马拉雅期构造反转地震剖面(剖面位置见图1a)

Fig. 9 Seismic profile showing the Yanshanian-Himalayan tectonic inversion in Bozhong 19-6 area (see Fig. 1a for the profile location)

3 潜山形成和改造过程

渤海海域及周边在中生代经历了印支运动和燕山运动等多个挤压—伸展—挤压的构造旋回叠加作用和

改造,多期构造活动不仅控制着不同性质的网格状复杂断裂系统的形成,同时控制了不同类型潜山构造发育。通过平衡剖面技术,恢复了东北向典型剖面(埕北凹陷—渤中凹陷—沙垒田凸起—石臼坨凸起)潜山形成和改造的过程(图10),主要揭示了印支期、燕山期

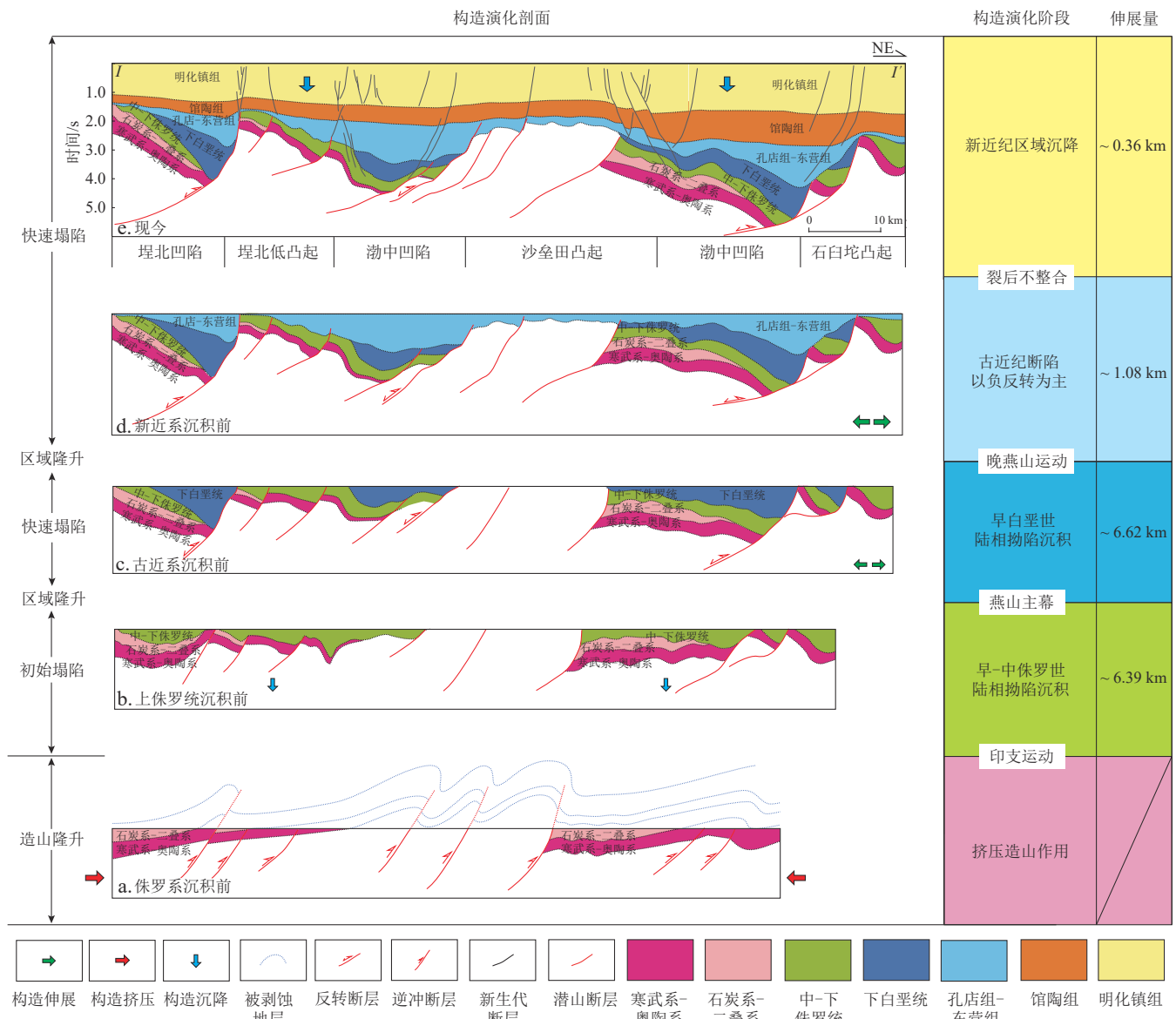


图10 环渤中凹陷北东向典型剖面构造演化恢复图(图1a中I—I'剖面)

Fig. 10 Diagram showing the restoration of structural evolution for the typical NE-trending section in the Bozhong Sag (the section I—I' in Fig. 1a)

和喜马拉雅期构造运动对潜山形成的控制作用。印支期发育北西向大型背斜、向斜构造,并发育一系列逆冲断层。晚侏罗世—早白垩世部分逆冲断层发生负反转形成上侏罗统—下白垩统盆地,中生代末期本区强烈挤压、抬升剥蚀,形成新生代底界的角度不整合界面。到了喜马拉雅期,负反转断层再次活跃,控制了一系列掀斜半地堑,走向接近、倾向相同。同时新生代右行走滑对早期潜山也有一定的改造作用。

综上所述,中-新生代以来,渤中19-6区依次经历了印支早期、印支晚期、燕山早期、燕山中期、燕山晚期以及喜马拉雅期的多期次构造转换作用。各主要构造时期构造应力性质与方向、构造响应均有所不同,在渤

中19-6构造及围区形成不同组合的潜山结构。渤中19-6构造受改造作用最强,形成了“太古宇-新生界”二元组合;渤中13-2构造受改造作用中等,形成了“太古宇-中生界-新生界”三元组合,渤中19-6北和渤中21/22构造形成了“太古宇-古生界-新生界”三元组合。

4 构造转换作用对潜山储层的控制作用

渤中19-6区潜山发育了中生界碎屑岩、古生界碳酸盐岩和太古宇变质岩3套地层,其中古生界碳酸盐岩和太古宇变质岩是区域性发育的优质储层,本次重点研究了多期构造转换对太古宇变质岩潜山大规模裂

缝型储层的影响。

4.1 印支期构造转换是太古宇规模性裂缝形成的关键

印支期逆冲挤压是太古宇潜山破碎成储的关键因素。印支期构造运动对渤中19-6区太古宇变质岩潜山储层的影响主要体现在两个方面:1)太古宇变质岩基底遭受北东向强烈的挤压推覆作用,形成大量北西向大型断裂,尤其挤压作用的核部,是应力集中发育区,在潜山内部形成了大量构造破碎带(图2中③部位);2)北东向逆冲挤压使渤中19-6构造发生剧烈抬升,形成背斜隆起构造。构造高部位上覆古生界被剥蚀殆尽,太古宇暴露地表发生风化淋滤作用,大气水沿断裂向潜山内部淋滤,形成了厚层古风化壳。这些裂缝和溶蚀孔由于形成时间较早,在后期深埋过程中经历了强烈的成岩作用,大部分裂缝均被充填。

本次研究利用方解石U-Pb测年技术对太古宇变质岩裂缝中方解石脉体开展测年,测得方解石脉的U-Pb年龄为 $208\text{ Ma} \pm 30\text{ Ma}$,证实了渤中19-6构造太古宇变质岩中印支期裂缝的存在,但这些裂缝在后期成岩过程中大部分被各种矿物充填。虽然早期的古风化壳、风化裂缝带以及内幕裂缝带被充填,但印支期构造运动破坏了太古宇变质岩坚硬的岩石结构,为后期构造作用对潜山的再改造奠定了较好的岩石学基础。

4.2 燕山期构造转换进一步扩大太古宇裂缝储层发育规模

燕山期主要受到古太平洋北西向低角度反复俯冲、后撤影响,渤中凹陷形成大量北东向走滑断裂构造,并发生两期构造转化。燕山期为渤中19-6构造太古宇潜山储层发生进一步改造的地质时期。

燕山期挤压和左行走滑在潜山形成过程中的作用主要表现为对印支期大型断裂的再次反转,并把原来连续的印支期隆起带切割成一系列大小不等的碎块,同时导致潜山块体内部发生破碎(图2中②、④部位)。尤其是研究区南部的BZ19-6-B井区在燕山中期发生了强烈的走滑压扭作用(图2中①部位),对印支期裂缝发生了再次改造,导致潜山内部更加破碎,进一步扩大太古宇裂缝储层发育规模。

4.3 喜马拉雅期构造转换对早期裂缝再活化具有重要作用

喜马拉雅期构造转换对太古宇储层的影响主要体

现在对早期裂缝的再活化作用以及新裂缝的产生^[22]。印支期和燕山期形成的裂缝由于年代久远,大部分被泥质、铁质以及碳酸盐矿物充填(图11a,b)。在喜马拉雅期的走滑转换作用影响下,早期充填的裂缝内部或边缘形成大量高角度裂缝(图11c),并且会产生少量新的裂缝(图11d)。喜马拉雅期是太古宇有效裂缝形成的主要时期。

虽然喜马拉雅期拉张构造背景的造新缝的能力不如挤压构造背景,但是晚期构造活动能够使早期裂缝再活化。研究区太古宇变质岩的裂缝再活化有两种:一种为早期断裂的再活化,渤中19-6区在早期形成的断裂受到喜马拉雅期右行走滑的叠加改造,原来的北西向和北东向断层发生再次活动,对早期破碎带再次活化形成高角度有效裂缝(图2中①、②和④部位);另一种为区域构造抬升对早期裂缝的再活化,渤中19-6构造北部BZ19-6-D井区新生代构造隆升速率达 210 m/Ma ^[23],对早期裂缝再活化起到关键作用。

4.4 多期时-空构造转换是太古宇形成超大规模储层的关键

潜山裂缝的发育程度是影响储层油气富集和单井产能的主要因素之一^[24]。渤中19-6构造总体上裂缝的有效性较好,裂缝的充填特征即可反映裂缝的有效性,决定其能否成为储集空间或渗流通道。角度较高的裂缝多为晚期形成的有效缝,而角度较低的裂缝多被压实充填,裂缝有效性较差。在渤中19-6构造中,裂缝的角度与其发育的构造部位息息相关,BZ19-6-G井区位于挤压背斜的核部,裂缝倾角最大可达 53° ,太古宇气层厚度可达 500 m 。BZ19-6-B井区位于走滑断层附近,裂缝倾角 42° ,太古宇气层厚度为 300 m 。而逆冲断层的被动盘、挤压背斜的翼部和远离走滑断层的区域,裂缝发育角度普遍偏低,如BZ19-6-F井区。

渤中19-6区太古宇潜山储层的形成经历了印支期强挤压导致潜山初始形成、燕山早期压扭走滑作用叠加改造破坏、燕山中期张扭伸展作用断陷再成山,以及喜马拉雅期张扭伸展裂缝再活化的多期构造转化、叠加改造过程。其中印支期强挤压构造作用奠定了潜山的储层基础,燕山期左行走滑进一步扩大裂缝的规模,喜马拉雅期右行走滑对早期裂缝进行再活化,多期构造转换形成了渤中19-6构造太古宇变质岩潜山有效储层厚度超过 $1\ 000\text{ m}$ 、气柱总高度超过 $1\ 600\text{ m}$ 的超大规模裂缝体系。

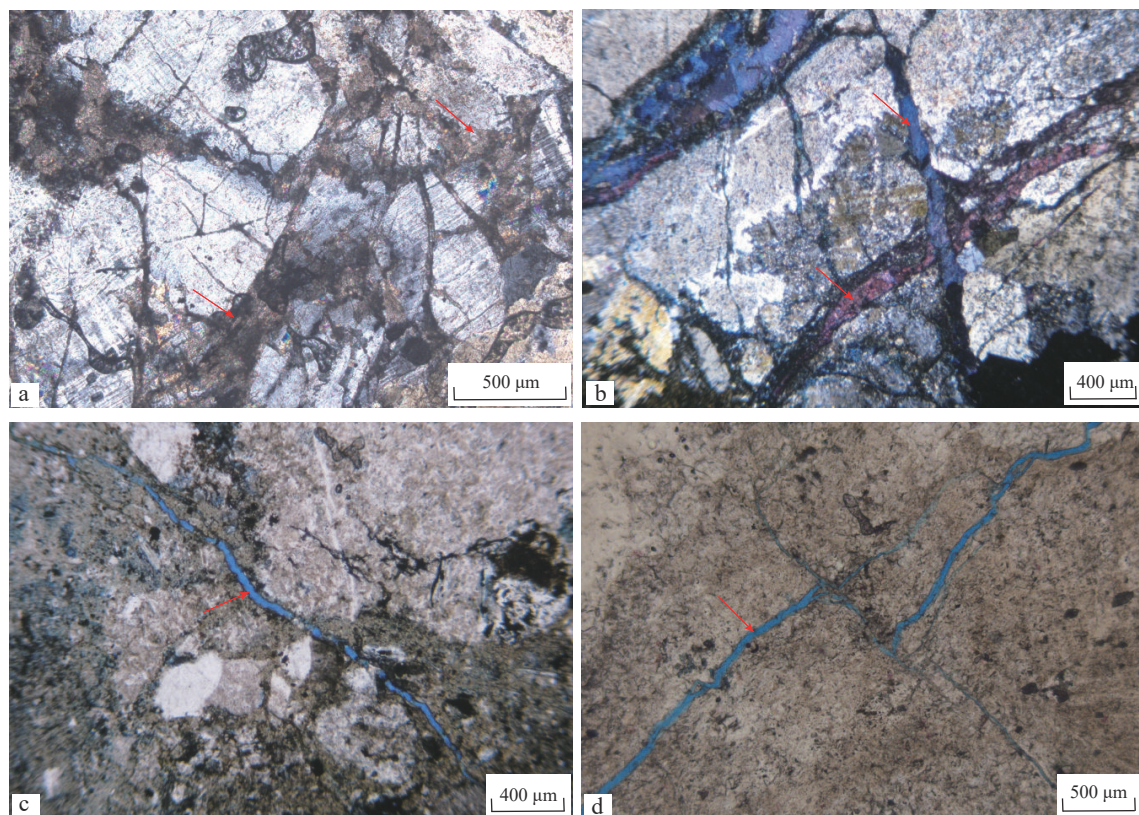


图11 渤中19-6区太古宇变质岩潜山不同期次裂缝充填特征显微照片

Fig. 11 Micrographs showing the characteristics of fracture filling in different stages of the Archean buried hills of metamorphic rocks in Bozhong 19-6 area

a. BZ19-6-1井,埋深4 025 m,早期裂缝被白云石充填,单偏光;b. BZ19-6-2Sa井,埋深4 265 m,早期裂缝被方解石和铁白云石充填,并呈相互切割产状,单偏光;c. BZ19-6-2Sa井,埋深3 885 m,早期裂缝带中发育晚期再活化有效裂缝,单偏光;d. BZ19-6-7井,埋深5 467 m,晚期新生成有效裂缝,单偏光

5 结论

1) 渤中19-6区经历了前印支期—印支期、印支期—燕山期和燕山期—喜马拉雅期等3次构造转换事件,发育了北西向、北东向、近南北向和东西向4组断裂体系。北西向印支期断层控制了太古宇和古生界整体的圈闭和地层展布规律;燕山期北东向和近南北向断层把潜山圈闭分隔成多个复杂断块,并使渤中13-2构造发生反转,太古宇上部沉积厚层侏罗系;喜马拉雅期整体断陷下沉,潜山整体构造面貌最终定型。

2) 两次时-空构造转换作用对太古宇潜山大规模裂缝的形成具有重要意义。印支期逆冲推覆是太古宇规模性裂缝形成的关键时期,燕山期构造转换进一步扩大太古宇裂缝储层发育规模,喜马拉雅期构造转换对早期裂缝再活化具有重要作用。

参考文献

[1] 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.

[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 and destruction of the North China Craton[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(4): 64-89.

[3] Zhao G, Cawood P A, Wilde S A, et al. Metamorphism of basement rocks in the Central Zone of the North China Craton: implications for Paleoproterozoic tectonic evolution[J]. Precambrian Research, 2000, 103(1-2): 55-88.

[4] Zhao G, Zhai M. Lithotectonic elements of Precambrian basement in the North China Craton: Review and tectonic implications[J]. Gondwana Research, 2013, 23(4): 1207-1240.

[5] 路凤香, 郑建平, 张瑞生, 等. 华北克拉通东部显生宙地幔演化[J]. 地学前缘, 2005, 12(1): 61-67.

Lu Fengxiang, Zheng Jianping, Zhang Ruisheng, et al. Phanerozoic mantle secular evolution beneath the eastern North China craton[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(1): 61-67.

[6] Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, et al. Mesozoic decratonization of the North China block[J]. Geology, 2008, 36(6): 467-470.

- [7] 宋莫南. 对怀远运动的再认识[J]. 山东地质, 2001, 17(1): 19-23, 51.
Song Diannan. Re-recognition of Huaiyuan Movement[J]. Geology of Shandong, 2001, 17(1): 19-23, 51.
- [8] Zhao F, Jiang S, Li S, et al. Cenozoic tectonic migration in the Bohai Bay Basin, East China[J]. Geological Journal, 2016, 51: 188-202.
- [9] Powers S. Reflected buried hills and their importance in petroleum geology[J]. Economic Geology, 1922, 17(4): 233-259.
- [10] Wang G, Li S, Suo Y, et al. Deep-shallow coupling response of the Cenozoic Bohai Bay Basin to plate interactions around the Eurasian Plate[J]. Gondwana Research, 2022, 102: 180-199.
- [11] 薛永安, 王奇, 牛成民, 等. 渤海海域渤中凹陷渤中19-6深层潜山凝析气藏的充注成藏过程[J]. 石油与天然气地质, 2022, 41(5): 891-902.
Xue Yongan, Wang Qi, Niu Chengmin, et al. Hydrocarbon charging and accumulation of BZ 19-6 gas condensate field in deep buried hills of Bozhong Depression, Bohai Sea [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 41(5): 891-902.
- [12] 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.
- [13] 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(8): 199-206.
Qi Jiafu, Yu Fusheng, Lu Kezheng, et al. Conspectus on Mesozoic Basins in Bohai Bay Province[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(8): 199-206.
- [14] 汤艳杰, 英基丰, 赵月鹏, 等. 华北克拉通岩石圈地幔特征与演化过程[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(9): 1489-1503.
Tang Yanjie, Ying Jifeng, Zhao Yuepeng, et al. Nature and secular evolution of the lithospheric mantle beneath the North China Craton [J]. Science China Earth Sciences, 2021, 64(9): 1492-1503.
- [15] 李三忠, 周立宏, 刘建忠, 等. 华北板块东部新生代断裂构造特征与盆地成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(3): 57-66.
Li Sanzhong, Zhou Lihong, Liu Jianzhong, et al. Cenozoic faulting and basin formation in the eastern north China plate [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2004, 24(3): 57-66.
- [16] 李三忠, 刘建忠, 赵国春, 等. 华北克拉通东部地块中生代变形的关键时限及其对构造的制约: 以胶辽地区为例[J]. 岩石学报, 2004, 20(3): 633-646.
Li Sanzhong, Liu Jianzhong, Zhao Guochun, et al. Key geochronology of Mesozoic deformation in the eastern block of the North China Craton and its constraints on regional tectonics: A case of Jiaodong and Liaodong Peninsula[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(3): 633-646.
- [17] 高坪仙, 刘新秒. 试论中国古大陆中-新元古代汇聚与裂解的地质记录[J]. 前寒武纪研究进展, 1999, 22(1): 47-54.
Gao Pingxian, Liu Xinmiao. Discussion on geological records of convergence and disintegration in China continent during Mesoproterozoic and neoproterozoic [J]. Progress in Precambrian Research, 1999, 22(1): 47-54.
- [18] 朱光, 王薇, 顾承串, 等. 郯庐断裂带晚中生代演化历史及其对华北克拉通破坏过程的指示[J]. 岩石学报, 2016, 32(4): 935-949.
Zhu Guang, Wang Wei, Gu Chengchuan, et al. Late Mesozoic evolution history of the Tan-Lu Fault Zone and its indication to destruction processes of the North China Craton [J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(4): 935-949.
- [19] Meng Q R, Wu G L, Fan L G, et al. Tectonic evolution of early Mesozoic sedimentary basins in the North China block [J]. Earth-Science Reviews, 2019, 190: 416-438.
- [20] 张岳桥, 董树文, 赵越, 等. 华北侏罗纪大地构造: 综评与新认识[J]. 地质学报, 2007, 81(11): 1462-1480.
Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Zhao Yue, et al. Jurassic tectonics of north China: A synthetic view [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(11): 1462-1480.
- [21] 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(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(6): 845-851.
- [22] 徐长贵, 杜晓峰, 刘晓健, 等. 渤海海域太古界深埋变质岩潜山优质储集层形成机制与油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(2): 235-247.
Xu Changgui, Du Xiaofeng, Liu Xiaojian, et al. Formation mechanism of high-quality deep buried-hill reservoir of Archaean metamorphic rocks and its significance in petroleum exploration in Bohai Sea area [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2): 235-247.
- [23] 杜晓峰, 刘晓健, 张新涛, 等. 渤海海域太古宇变质岩储层特征与形成控制因素[J]. 中国海上油气, 2021, 33(3): 15-27.
Du Xiaofeng, Liu Xiaojian, Zhang Xintao, et al. Characteristics and controlling factors of Archean metamorphic basement reservoirs in Bohai Sea area [J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(3): 15-27.
- [24] 刘国平, 董少群, 李洪楠, 等. 辽河盆地西部凹陷古潜山天然裂缝特征及其影响因素[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(3): 525-533.
Liu Guoping, Dong Shaoqun, Li Hongnan, et al. Characteristics of natural fractures and their influencing factors in the paleo-buried-hill reservoirs of the Western Sag in the Liaohe Basin, China [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3): 525-533.

(编辑 张玉银)