

东海陆架盆地西湖凹陷天台斜坡构造变换带发育特征及形成机理

余浪^{1,2},余一欣^{1,2},蒋一鸣³,邹玮³,陈石^{1,2},唐贤君³,梁鑫鑫^{1,2},何新建³,陈冬霞^{1,2}

[1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249;2. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249;
3. 中海石油(中国)有限公司上海分公司,上海 200030]

摘要:东海陆架盆地西湖凹陷天台斜坡构造位置特殊,深层NW向断裂带从斜坡区通过,并对斜坡南、北部新生界的构造特征起到了明显的调节和变换作用。通过三维地震资料精细解释和平衡剖面复原,建立了天台斜坡深层NW向断裂和浅层断裂的发育模式,厘定了NW向变换带的构造属性,同时结合区域地质背景,探讨了构造变换带的演化过程和形成机理。结果表明:天台斜坡中生界发育包括天台西断裂和孤山断裂在内的NW向伸展滑脱断层,并对斜坡南、北部新生界地质结构、断裂发育和伸展强度等起到了明显的调节和变换作用。天台斜坡北部和南部分别表现为缓坡和陡坡结构特征,北部断裂密集发育,而且孤山断裂上盘发育弧形断裂,北部伸展强度也要明显大于南部。发育于天台西断裂和孤山断裂之间的NW向构造变换带明显不同于伸展背景下的变换构造,属于离散构造变换带。受秦岭-大别造山后碰撞伸展作用与欧亚板块和太平洋板块的碰撞、俯冲过程影响,天台斜坡构造变换带主要经历了晚侏罗世—早白垩世初期变换带孕育期、早白垩世中期—早始新世变换带雏形期、中晚始新世—渐新世早期变换带成熟期和渐新世晚期—现今变换带静止期4个演化阶段。

关键词:弧形断裂;NW向断裂;构造变换带;天台斜坡;西湖凹陷;东海陆架盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Characteristics and forming mechanisms of transform zone in the Tiantai slope, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

YU Lang^{1,2}, YU Yixin^{1,2}, JIANG Yiming³, ZOU Wei³, Chen Shi^{1,2}, TANG Xianjun³, LIANG Xinxin^{1,2},
HE Xinjian³, CHEN Dongxia^{1,2}

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Shanghai Branch, CNOOC, Shanghai 200030, China]

Abstract: The Tiantai slope in the Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin, has a special tectonic background with a deep NW-trending fault zone cutting through and adjusting/transforming the tectonic features of the Cenozoic in the southern and northern parts of the slope. Based on the detailed interpretation of 3D seismic data and restored balanced cross sections, this study establishes models for the development of deep and shallow faults, determines the tectonic attribute of the NW-trending transform zone and discusses the evolution history and genetic mechanisms of the transform zone against regional geological settings. The results show that the NW-trending extensional detachment faults, including the Tiantaixi fault and the Gushan fault, were developed in the Mesozoic of the Tiantai slope, and have played an accommodating and transforming role in shaping the geological framework and controlling fault development and extension intensity of the Cenozoic, resulting in a gentle and a steep slope respectively on the south and more stretched north parts of the slope. The faults of the Cenozoic in the northern slope obviously outnumber those in the southern slope. Arc fault systems are found to be developed in the hanging wall of the Gushan fault. The NW-trending tectonic transform zone bounded by the Tiantaixi fault and the Gushan fault differs greatly from that formed in the extensional

收稿日期:2022-11-07;修订日期:2023-03-07。

第一作者简介:余浪(1997—),男,博士研究生,油气构造解析。E-mail: yulang2634@163.com。

通讯作者简介:余一欣(1977—),男,博士、副教授,盆地分析和构造地质。E-mail: yuxin0707@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(42072149);中海石油(中国)有限公司科研项目(CNOOC-KJ 135 ZDXM 39 SH01)。

setting, indicating a discrete type of tectonic transform zone. Influenced by the post-orogenic collision and extension between the Qinling and Dabie orogenic belts, and the collision and subduction of the Eurasian and Pacific plates, the transform zone in the Tiantai slope has experienced four evolutionary stages, including the gestation period from the Late Jurassic to the Early Cretaceous, the embryonic period from the middle Early Cretaceous to the Early Eocene, the maturation period from the middle Late Eocene to the Early Oligocene, and the quiescence stage from the Late Oligocene to present.

Key words: arc fault, NW-trending fault, tectonic transform zone, Tiantai slope, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

引用格式:余浪,余一欣,蒋一鸣,等.东海陆架盆地西湖凹陷天台斜坡构造变换带发育特征及形成机理[J].石油与天然气地质,2023,44(3):753-763. DOI:10.11743/ogg20230317.

YU Lang, YU Yixin, JIANG Yiming, et al. Characteristics and forming mechanisms of transform zone in the Tiantai slope, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 753-763. DOI: 10.11743/ogg20230317.

构造变换带是一类可以传递和调节断层之间位移量而使区域应变保持守恒的构造,最早于1970年由Dahlstrom在研究加拿大落基山地区褶皱-逆冲断层几何形态时提出^[1],后被引入伸展盆地和走滑盆地构造研究中^[2-4]。近些年有关构造变换带类型、发育过程、形成机理及其控油气作用等方面的研究成果已成为含油气盆地构造地质学研究的重要进展,尤其是裂陷盆地构造变换带的研究成果极大地促进了油气勘探进展^[3-9]。裂陷盆地构造变换带的发育与正断层的分段生长连接过程密切相关,类型多样,既可以是具有一定展布范围的变换斜坡、斜向背斜等,也可以是单一的离散变换断层或离散变换带^[6,10]。目前有关裂陷盆地构造变换带的研究依然存在一些问题,如变换带类型划分标准和方案并不统一,从而造成实际应用和学术交流困难^[11]。另外,受地震反射资料限制,深部地层发育的构造变换带的准确识别也还存在一定难度。

西湖凹陷位于东海陆架盆地东部坳陷带中段,受欧亚板块和太平洋板块碰撞、俯冲影响,构造演化历史复杂,经历了雁荡运动、瓯江运动、玉泉运动、花港运动以及龙井运动等多期构造运动^[12-13],而且NW向断裂和NE向断裂相互交织在一起,油气成藏条件优越,具有良好的油气勘探前景^[14]。前人已经针对西湖凹陷的断裂体系、反转构造以及沉积环境演化和油气成藏特征等进行了较深入的研究^[14-17],认识到西湖凹陷西部天台斜坡构造背景特殊,发育NW向构造变换带,但由于受地震资料和研究方法限制,仅是简单地通过断裂组合特征对构造变换带的发育机制和成因演化进行了分析,认为变换作用在早期断陷及后期的挤压反转过程中均有发生,但并没有对构造变换带的分布范围、具体构造标志、构造属性和演化过程等进行深入分析^[18-19]。这些亟待解决的关键问题也限制了对该区油气富集规律的深入认识。本文主要通过对天台斜坡最新三维地震资料进行精细解释,分析深、浅层断裂发育特征,进而通过对比分析斜

坡南、北部构造特征的差异性,确定构造变换带展布范围及其构造属性,同时结合区域地质背景分析构造变换带形成演化过程和形成机理,期待为该地区的构造解析和油气勘探实践提供科学依据和理论指导。

1 区域地质概况

东海陆架盆地位于中国东部近海地区,是发育在华南克拉通基底之上的弧后裂谷盆地^[20],整体呈NNE向展布,具有“东西分带、南北分块”的基本构造格局,自西向东依次发育西部坳陷带、中部隆起带和东部坳陷带^[21]。西湖凹陷位于东海陆架盆地东北部,东侧为钓鱼岛隆褶带,西侧为海礁隆起和渔山东低隆起^[22](图1)。西湖凹陷自西向东可分为西部斜坡带、中央反转带和东部断阶带,其中西部斜坡带自北向南包括杭州斜坡、平湖斜坡和天台斜坡,天台斜坡西邻海礁隆起和渔山东低隆起,东部为中央反转带(图1)。自中生代以来,西湖凹陷主要经历了晚白垩世—早始新世断陷期、中—晚始新世断—拗转换期、渐新世—中新世拗陷—反转期以及上新世至今的区域沉降期等演化阶段,自下而上沉积了上白垩统、古新统、始新统八角亭组、始新统宝石组、始新统平湖组、渐新统花港组、中新统龙井组、中新统玉泉组、中新统柳浪组、上新统三潭组和更新统东海群等地层^[18](图2)。

天台斜坡位于西湖凹陷西部斜坡带南部,构造位置特殊,除发育大量NE向断裂外,还有NW向基底断裂带从斜坡部位通过(图1)。受NW向断裂带影响,天台斜坡南北部的斜坡结构和断裂发育特征等都存在明显差异。天台斜坡北部表现出缓坡形态,断层主要呈NE向展布,在靠近NW向断裂的部位,断裂走向由NE向转变为NW向。天台斜坡南部表现出陡坡形态,断层主要呈NE向展布,而且发育密度要明显小于斜坡北部。

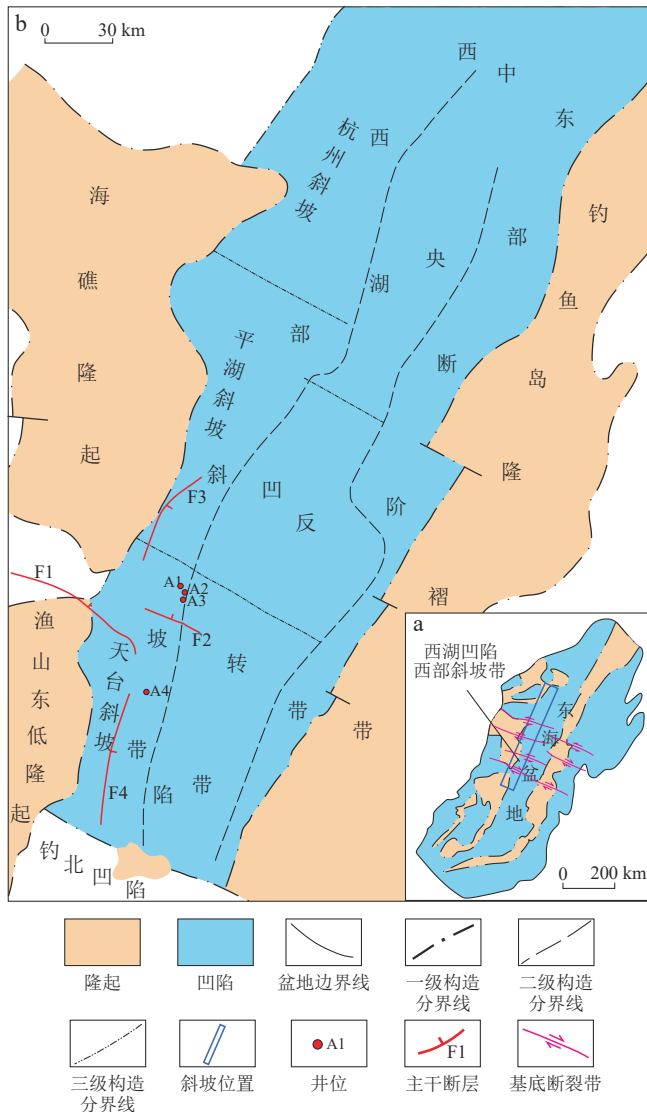


图1 东海陆架盆地西湖凹陷天台斜坡及邻区主要构造特征

Fig. 1 Main tectonic features of the Tiantai slope and surrounding

areas in the Xihu Sag of the East China Sea Shelf Basin

a. 西湖凹陷西部斜坡带位置; b. 天台斜坡位置

F1. 天台西断裂; F2. 孤山断裂; F3. 平湖断裂; F4. 宝石断裂

2 断裂发育特征

三维地震资料解释结果表明,除NW向基底断裂以外,天台斜坡还发育多种样式的断层,主要表现为正断层性质。整体上,可将天台斜坡发育的断裂体系划分为中生界和新生界深、浅两套断裂体系,其变形特征和性质存在较明显差异。

2.1 平面展布特征

天台斜坡深层中生界NW向断裂数量较少,延伸长度一般为10~45 km,发育以天台西断裂(F1)为主

的拆离断层体系,在中生界底面(T_g)表现为一系列NNW向延伸近平行的断裂组合,倾向NE,其中天台西断裂西起渔山东低隆起,贯穿天台斜坡,延伸长度达40 km以上。天台西断裂东北部发育一条NNW向的孤山断裂(F2),断裂延伸长度约25 km(图3a),仅在中生代发生活动。

受天台西断裂和孤山断裂影响,天台斜坡新生界内断裂平面展布表现出明显的分区特征。天台西断裂以北地区断裂发育密度明显大于南部地区,断裂延伸长度较短,一般为2~10 km,整体呈NNE向展布,其中天台斜坡南、北部分别发育一条控斜坡断层,分别是宝石断裂(F4)和平湖断裂(F3)(图3b)。在邻近孤山断裂的地区,浅层断裂走向发生明显改变,由NE向转变为NW向,形成向NW向凸出的弧形断裂。天台斜坡大部分浅层断裂都是向SE向倾斜,但在邻近天台西断裂的局部地区发育倾向NW的反向断裂,其规模较小(图3b,c)。往上至 T_g^0 界面,斜坡主体范围内断裂已很少发育,只是在靠近西湖凹陷中央反转构造带的部位发育一些近EW向的正断层(图3d)。

从断层平面组合样式来看,天台斜坡单条断层主要呈直线形和弧形展布,多条断层常合成平行式和帚状形态(图3)。通过对不同层系断裂系统进行对比,可以发现浅层断裂受深层NW向断裂分隔,表现出明显的分区性。远离NW向基底断裂的浅层断裂以NE向正断层为主,在邻近NW向断裂的部位,浅层断裂走向则发生变化,而且这种走向变化主要发生在基底断层上盘,以孤山断裂东北部弧形断裂最为明显(图3c)。

2.2 深层断裂特征

天台斜坡深层主要发育NW向断裂,其中规模较大并对斜坡结构和浅层新生界断裂发育有较大影响的主要是天台西断裂和孤山断裂^[18],但地震资料对 T_g 界面以下的深层断裂的反映并不是很清楚。为了准确厘定天台西断裂形态特征,本次研究结合断裂上盘滚动背斜形态特征,并利用垂直简单剪切原理^[23],对天台西断裂形态进行了恢复,取得了较好结果(图4a)。

天台西断裂在地震剖面上呈上陡下缓形态,向上断至 T_g^0 界面,向深层发生滑脱,是一条规模较大的伸展拆离断层(图4a)。天台西断裂上盘发育多条铲式正断层,向下都在同一个拆离面上发生滑脱,而且这些次级断层都仅仅是发育在新生界以下的地层内,向上并未断穿新生界底面(T_g^0),导致深部地层表现出南断北超的特点,滚动背斜发育特征明显(图4a)。由于受地震、钻井资料的限制,目前还无法确定该地区新生界

地层				年龄/Ma	地震反射界面	构造运动	盆地演化
系	统	组	段				
第四系	更新统	东海群(QpDh)		2.6	T ₀	冲绳运动	区域沉降
新近系	上新统	三潭组(N ₂ s)		5.3	T ₁ ⁰	龙井运动	拗陷-反转
	中新统	柳浪组(N ₁ l)			T ₁ ²		
		玉泉组(N ₁ y)	上段		T ₁ ⁶		
			下段		T ₁ ⁷		
		龙井组(N ₁ l)	上段		T ₂ ⁰	花港运动	
			下段		T ₂ ¹		
古近系	渐新统	花港组(E ₃ h)	上段	23.0			断-拗转换
			下段				
	始新统	平湖组(E ₂ p)	上段	33.9	T ₃ ⁰	玉泉运动	断-拗转换
			中段		T ₃ ²		
			下段		T ₃ ⁴		
		宝石组(E ₂ b)		43.0	T ₄ ⁰	平湖运动	
		八角亭组(E ₂ ba)			T ₅ ⁰	甌江运动	断陷
	古新统				T ₈ ⁰		
						雁荡运动	
白垩系	上白垩统	石门潭组(K ₂ s)		66.0	T ₁₀ ⁰		断陷
				100.0	T _g	基隆运动	

图2 东海陆架盆地西湖凹陷主要地层单元和构造运动特征^[18]Fig. 2 Main stratigraphic units and tectonic movements in the Xihu Sag of the East China Sea Shelf Basin^[18]

以下地层的具体时代,但通过前人对东海盆地中生代残留盆地的研究以及扬子板块东南缘杭州湾地区NW向正断层切割中生界的特点^[24-25],可以确定天台斜坡新生界之下也发育中生界,而且地层结构特征主要受包括天台西断裂在内的多条NW向断层控制(图4)。

孤山断裂位于天台西断裂东北部,发育特征与天台西断裂相似,也是一条深层滑脱断层,但其对浅层新生界断裂的影响更为明显,控制其上盘发育一系列呈弧形展布的断裂(图4b)。

2.3 浅层断裂特征

天台斜坡浅层新生界断裂发育特征受深层NW向断裂影响明显,斜坡北部较南部发育更为密集。天台西断裂上盘发育多条反向断层,在剖面上组合形成反向断阶。反向断层向下断穿新生界底界(T₁₀⁰),向上错断至花港组上段顶界(T₂²),控沉积作用不明显(图5a)。从地震剖面上看,天台斜坡北部近隆起一侧浅层断裂密集发育,大多数断裂向上断穿平湖组上段顶界(T₃⁰),而在天台斜坡东部,仅有少量断层一直活动

至龙井组沉积期(图5b)。孤山断裂上盘发育一系列弧形断层,在剖面上表现出“Y”字形和反“Y”字形的断层组合样式,弧形断层大多向下断穿新生界底界(T₁₀⁰),向上基本都终止于花港组下段顶界(T₂¹),控制了斜坡带北部边界,对平湖组、花港组沉积具有明显控制作用。在玉泉运动和龙井运动挤压作用影响下,天台斜坡南部断裂仅在靠近中央反转带附近发育,在剖面上表现出反“Y”字形样式(图5c)。自西向东,古新统、始新统沉积厚度逐渐增大。后期挤压作用对斜坡北部影响较弱,仅在局部范围内见到低幅背斜形态(图5)。

3 构造变换带发育特征

裂陷盆地构造变换带具有多种不同表现形式,如受正断层连接作用形成的变换斜坡、斜向背斜、横向褶皱等,也有受断层硬连接作用而形成的变换断层和离散变换带等^[3,26-29]。根据西湖凹陷天台斜坡地质结构、形成演化及其断裂发育特征,本文认为天台斜坡在NW向天台西断裂和孤山断裂之间发育一个呈NW-SE

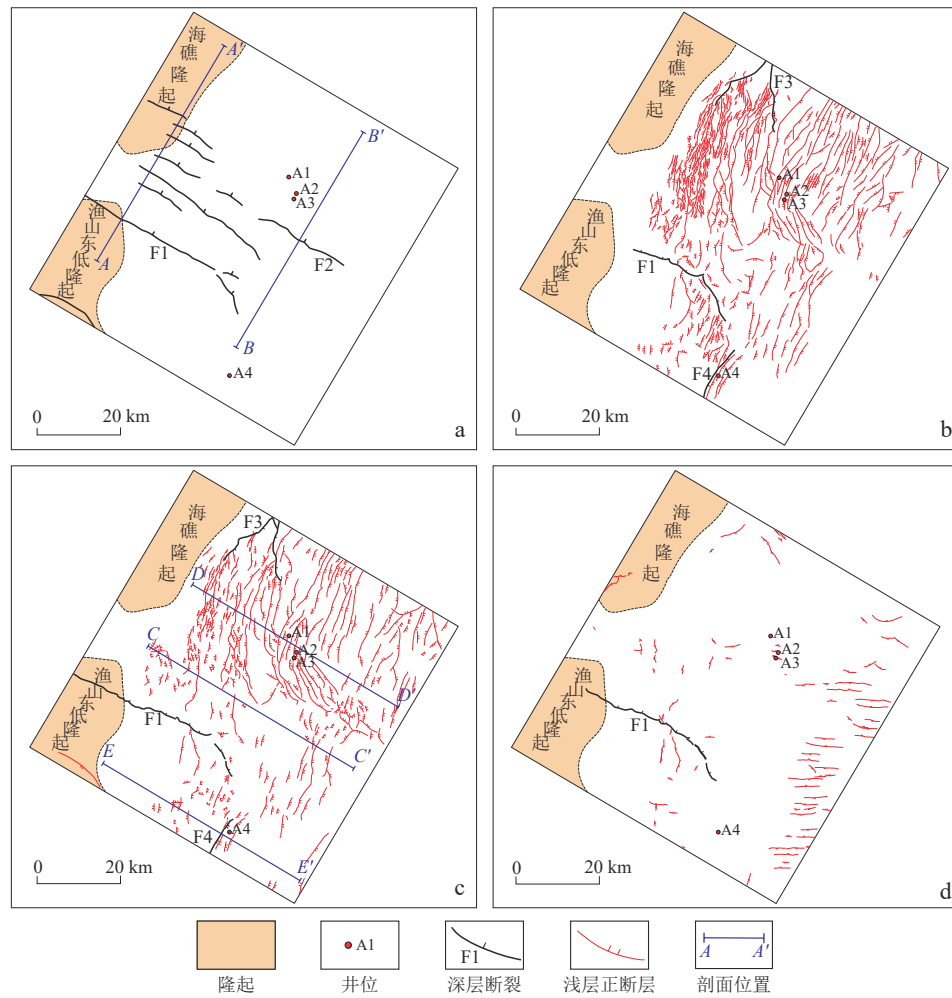


图3 东海陆架盆地天台斜坡不同层位断裂系统

Fig. 3 Fault systems on different horizons in the Tiantai slope in the East China Sea Shelf Basin

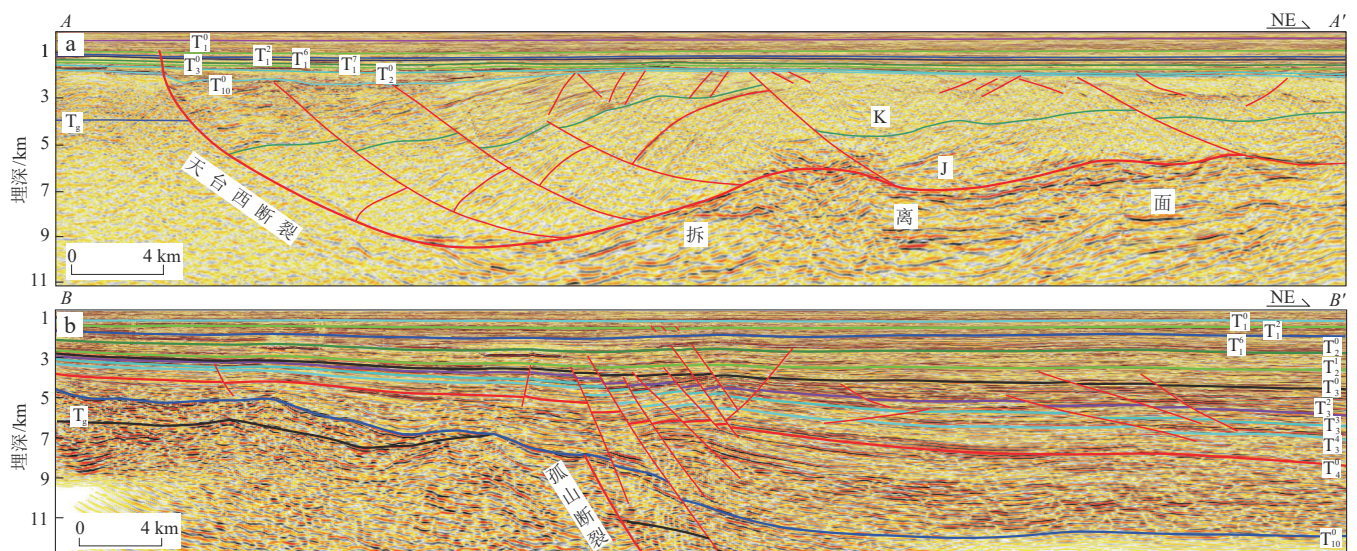
a. 中生界底界面(T_g); b. 平湖组底界面(T_4^0); c. 花港组底界面(T_3^0); d. 玉泉组底界面(T_1^6)

图4 东海陆架盆地天台斜坡中生界NW向断裂发育特征(剖面位置见图3a)

Fig. 4 Characteristics of the NW-trending faults in the Mesozoic of the Tiantai slope in the East China Sea Shelf Basin

(see Fig. 3a for the location of the sections)

a. 过天台西断裂地震剖面; b. 过孤山断裂地震剖面

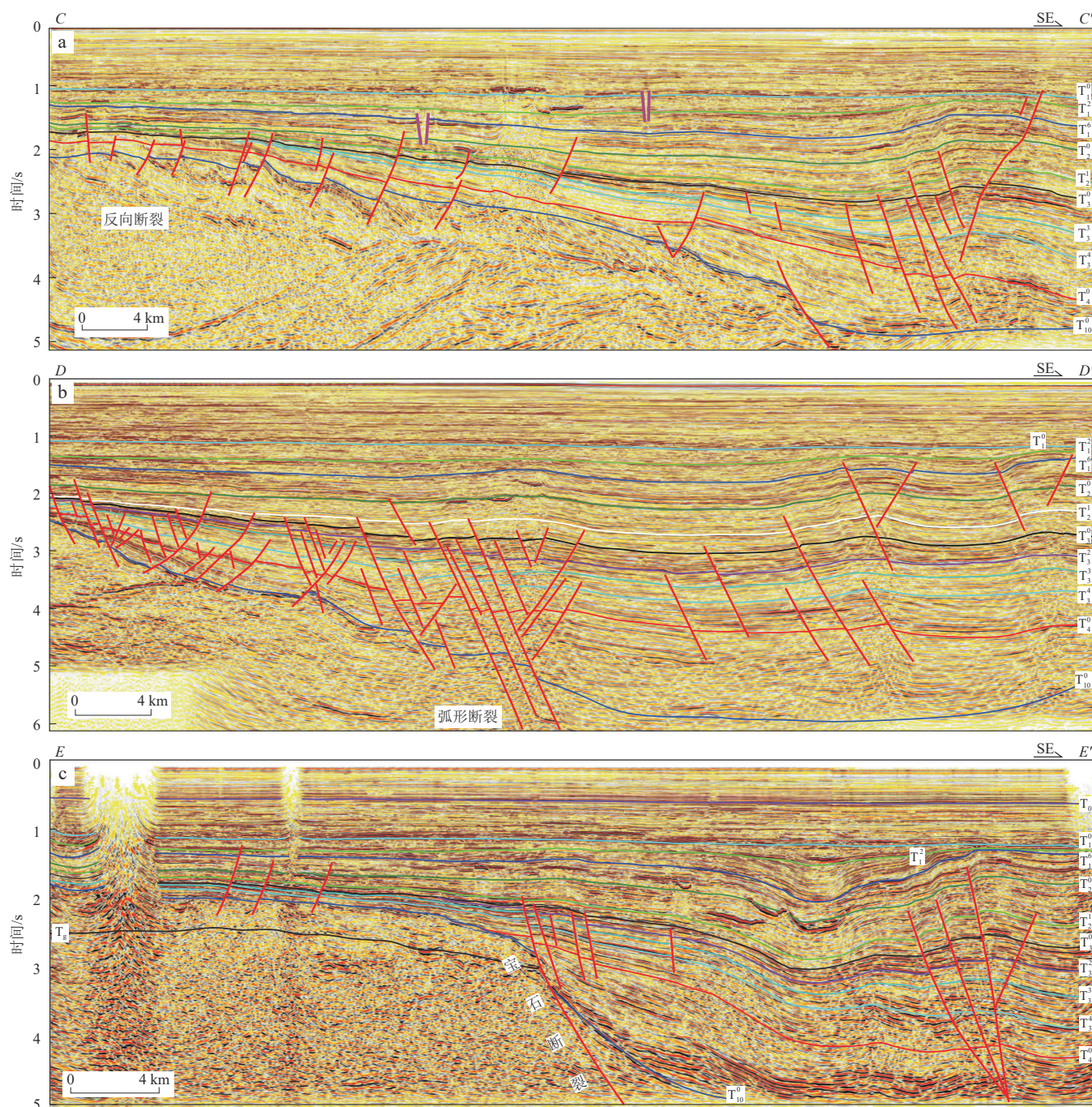


图5 东海陆架盆地天台斜坡典型地震剖面(剖面位置见图3c)

Fig. 5 Typical seismic profiles through the Tiantai slope in the East China Sea Shelf Basin (see Fig. 3c for the location of the sections)

a. 过反向断裂地震剖面; b. 过弧形断裂地震剖面; c. 过宝石断裂地震剖面

向展布,宽度约为15 km的构造变换带(图6)。该变换带向北可以延伸至海礁隆起和渔山东低隆起之间部位,向南可延伸至西湖凹陷中央反转构造带。构造变换带内部断裂相对较少,西北部发育向西倾斜的反向断层,东南部发育东倾正断层(图5a)。

NW向构造变换带对斜坡南、北部的地质结构、断裂分区性以及伸展作用等都起到了明显的调节和变换作用。前已述及,天台斜坡南、北部的地质结构特征存

在一定差异。位于天台西断裂上盘的斜坡北部主要表现为缓坡结构特征(图5a,b),孤山断裂上盘新生界断裂走向发生明显变化,在平面上呈弧形展布,这也指示孤山断裂在新生代发生了右旋走滑作用(图3)。天台斜坡南部则表现为受宝石断裂控制的陡坡结构特征,宝石断裂对地层沉积有一定控制作用,其上盘发育的浅层断裂在剖面上组合成同向断阶的构造样式(图5c)。

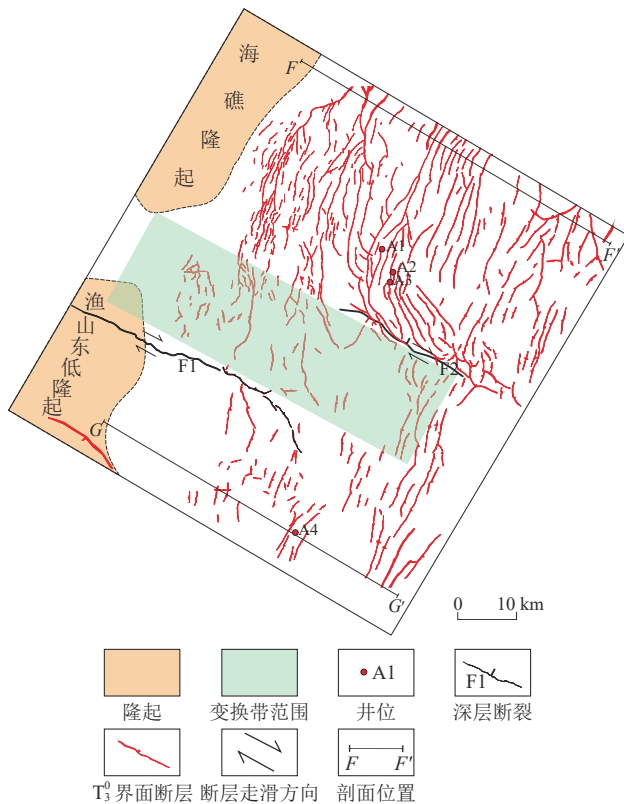


图6 东海陆架盆地天台斜坡NW向构造变换带平面分布

Fig. 6 Map showing distribution of the tectonic transform zone on the Tiantai slope of the East China Sea Shelf Basin

天台斜坡南、北部新生界断裂发育特征也具有明显的分区性(图6)。NW向构造变换带以北地区断裂发育密度明显大于构造变换带内部及其南部地区。NW向基底断裂上盘(斜坡东北部地区)新生界内断裂密集发育,走向NE或NW向,在邻近孤山断裂地区断裂走向发生变化,由NE向转变为NW向,呈弧形展布。NW向基底断裂带上部也发育浅层断裂,但规模较小,天台西断裂上盘发育一系列反向断层。而在NW向基底断裂下盘(斜坡西南部地区)新生界内断裂发育数量较少。

另外,平衡剖面复原结果表明,天台斜坡南、北部新生代不同时期的伸展强度存在较大差异,尤其是在伸展量最大的宝石组沉积末期,该时期斜坡北部的剖面伸展量达到4.15 km,伸展率为8.90%,而同时期斜坡南部的剖面伸展量仅为0.25 km,伸展率为0.67%(图7)。在华南地区整体呈NW-SE向伸展应力场作用的影响下,天台斜坡南、北部发生了差异伸展作用,并造成深层中生界先存NW向断裂(天台西断裂、孤山断裂等)在新生代发生走滑活化活动,其上盘为主动走滑盘,造成新生界断裂发育密度大,同时在邻近孤山断裂的局部地区诱发形成弧形断裂(图6)。

综上所述,天台斜坡中生界内发育多条先存断裂,新生代这些先存断裂南、北两侧的伸展强度有明显差异,导致天台西和孤山等先存断裂发生走滑活动,最终形成NW向构造变换带,对斜坡南、北部的新生界地质结构、断裂发育以及伸展过程等都有明显影响,在新生代构造变形过程中起到了重要的调节和变换作用。需要指出的是,从天台斜坡NW向构造变换带的发育特征来看,该构造变换带与常见的完全在伸展体系中发育的变换构造是有一定差别的,严格来说应该是属于一类形成于特殊地质背景下的离散构造变换带。

4 构造变换带演化过程及形成机理

在欧亚板块和太平洋板块碰撞、俯冲过程中,中国东部沿海地区应力场方向发生多次改变,影响了东海陆架盆地中、新生代构造变形及演化过程^[12-13,19,30]。根据区域地质背景和天台斜坡深、浅层断裂发育特征、不同时期的伸展量差异以及断层活动强度,可以将该地区NW向构造变换带的形成演化过程划分为4个阶段,即晚侏罗世—早白垩世初期变换带孕育期、早白垩世中期—早始新世变换带雏形期、中晚始新世—渐新世早期变换带成熟期和渐新世晚期—现今变换带静止期(图8)。

4.1 晚侏罗世—早白垩世初期(构造变换带孕育期)

三叠纪末期华南板块与华北板块发生碰撞拼贴,形成秦岭大别—苏鲁造山带。区域构造研究表明,秦岭—大别造山带在早、中侏罗世开始进入后碰撞伸展阶段,在造山带内识别出超高压—高压变质作用期后伸展体制下形成的拆离断层带和变质核杂岩,构造分析结合变质作用 $P-T$ 轨迹和同位素年代学证据揭示伸展拆离断层形成时间为200~170 Ma^[31]。在秦岭—大别造山带东部延伸的杭州湾地区,同样识别出呈NWW走向延伸的正断层,而且控制了侏罗系沉积^[25]。受秦岭—大别造山带后碰撞作用影响,NE-SW向的伸展作用可延伸到中国东部海域,东海陆架盆地南部开始发育NW走向拆离断裂系统。晚侏罗世—早白垩世初期秦岭—大别造山带的后碰撞伸展作用持续,天台斜坡发育NW向基底正断层,其中天台西断裂(F1)为一条规模较大、南断北超的拆离断层,上盘发育多条次级铲式断层,并对上盘中生界沉积有明显控制作用。同时天台斜坡北部的孤山断裂(F2)也开始发育,共同控制了天台斜坡的地层结构特征(图8a),为构造变换带的发育奠定了基础。

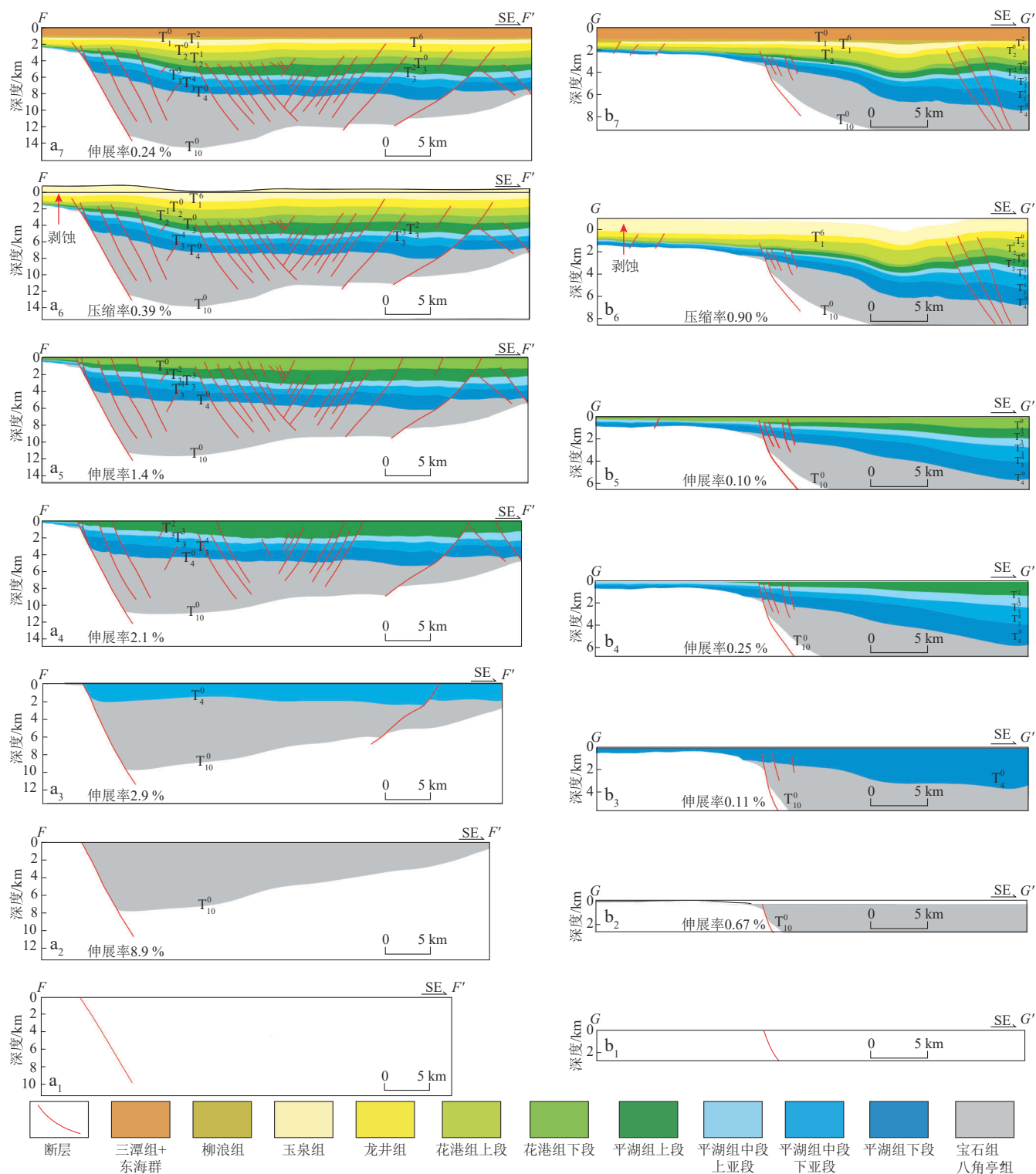


图7 东海陆架盆地天台斜坡南、北部平衡演化剖面(剖面位置见图6)

Fig. 7 Balanced cross-sections of the south and north parts of the Tiantai slope in the East China Sea Shelf Basin
(see Fig. 6 for the locations of the sections)

a₁, b₁. 新生界沉积前; a₂, b₂. 宝石组沉积末期; a₃, b₃. 平湖组下段沉积末期; a₄, b₄. 平湖组上段沉积末期; a₅, b₅. 花港组下段沉积末期;
a₆, b₆. 柳浪组沉积前; a₇, b₇. 现今

4.2 早白垩世中期—早始新世(构造变换带雏形期)

早白垩世中期中国东部开始受太平洋构造域控

制,伊泽奈琦板块俯冲和后撤引起大规模岩浆作用,东亚大陆边缘处于弧后拉张环境,大规模发育断陷盆地,区域伸展方向开始转变为NW-SE向^[31]。晚白垩世太

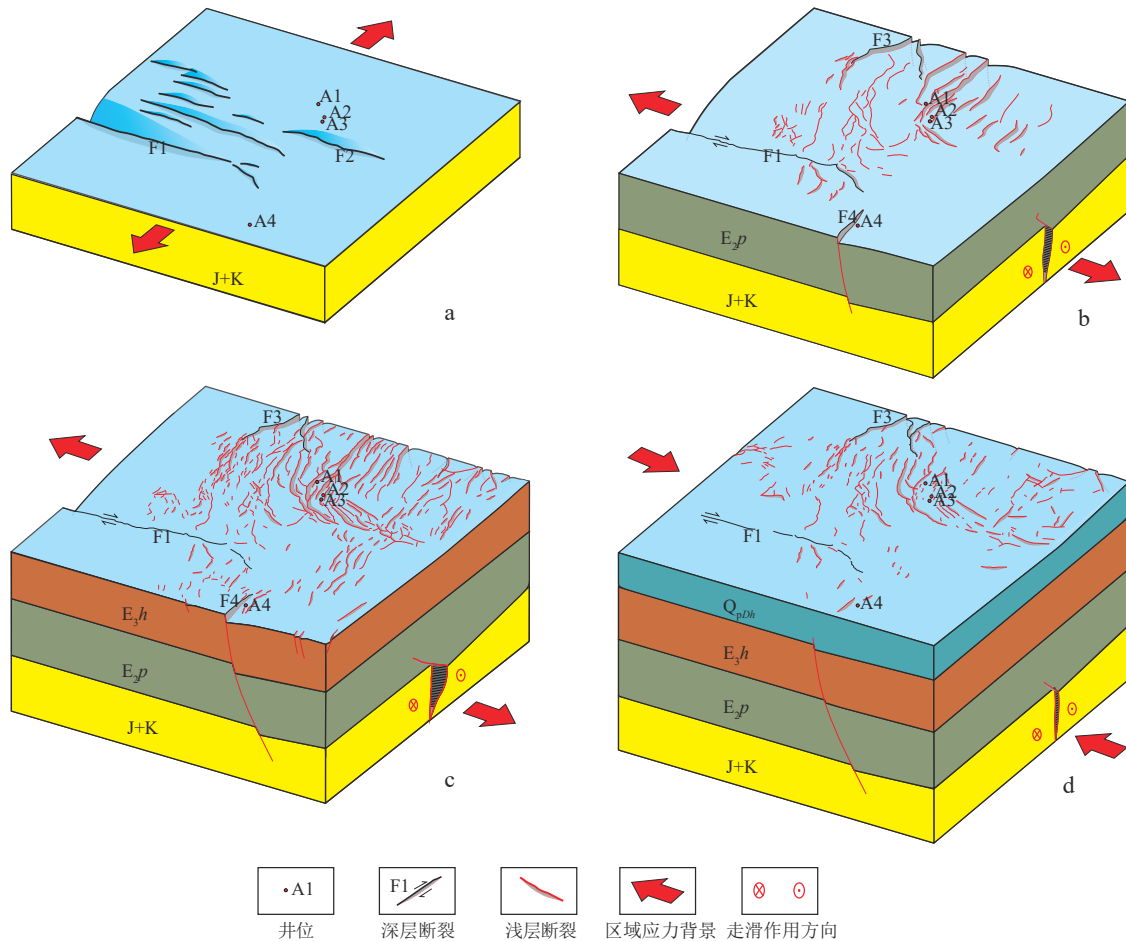


图8 东海陆架盆地天台斜坡构造变换带发育演化过程示意图

Fig. 8 Schematic map showing the evolution model of the Tiantai slope tectonic transform zone in the East China Sea Shelf Basin

a. 晚侏罗世—早白垩世初期; b. 早白垩世中期—早始新世; c. 中、晚始新世—渐新世早期; d. 渐新世晚期—现今

平洋板块逐渐取代伊泽奈琦板块,呈NNW向俯冲,华南地区整体呈NW-SE向伸展,发育NE-NNE向断陷盆地^[20,32-33]。早始新世天台斜坡受到NW-SE方向的伸展以及天台斜坡南、北部的不协调伸展作用,导致NW向基底断裂开始发生右旋走滑活动,斜坡南、北部开始发育少量NE-NNE向断裂,顺向、反向断层差异分布(图8b)。

4.3 中、晚始新世—渐新世早期(构造变换带成熟期)

晚始新世太平洋板块向欧亚板块俯冲的方向由NNW向转变为NWW向,造成西湖凹陷所受应力环境由拉张向挤压过渡^[34],断裂活动性减弱,对地层沉积的控制作用变弱,同时上始新统平湖组厚度小于宝石组,表明西湖凹陷的断陷强度明显减弱,具有断-拗转换特征^[13,35]。天台斜坡处于NW-SE向伸展应力场的作用下,新生代浅层NE向断裂继续活动,同时NW向基底断裂走滑活动强烈,导致孤山断裂上盘发育的浅层断裂由NE向转变为NW向,在平面上呈弧形展布,该时期

也是天台斜坡NW向构造变换带的发育成熟期(图8c)。

4.4 渐新世晚期—现今(构造变换带静止期)

晚渐新世以来,西湖凹陷主要受花港运动挤压作用影响,凹陷内地层隆升,并遭受剥蚀,花港组缺失,与上覆地层形成局部不整合面^[12]。天台斜坡在近WE向的挤压背景下,NW向基底断裂走滑活动微弱,浅层断层的活动性也明显减弱(图8d),逐渐演变为现今的构造面貌。

5 结论

1) 天台斜坡中生界发育天台西断裂和孤山断裂等NW向伸展滑脱断层,在新生代演化成为离散构造变换带,对斜坡南、北部新生界地质结构、断裂发育特征以及伸展作用强度等都起到明显的调节和变换作用。

2) 受深层先存断裂活动影响,天台斜坡北部和南

部分别表现为缓坡和陡坡特征,斜坡北部断裂发育密集程度和伸展作用强度都要大于斜坡南部,天台西断裂上盘发育一系列反向断层,孤山断裂上盘发育向NW方向凸出的弧形断裂。

3) 天台斜坡构造变换带的形成演化主要受秦岭—大别造山后碰撞伸展作用以及欧亚板块和太平洋板块的碰撞、俯冲过程影响,经历了晚侏罗世—早白垩世初期的孕育期、早白垩世中期—早始新世的雏形期、中晚始新世—渐新世早期的成熟期和渐新世晚期—现今的静止期等4个阶段。

参 考 文 献

- [1] DAHLSTROM C D A. Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky Mountains[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1970, 18(3): 332-406.
- [2] MORLEY C K, NELSON R A, PATTON T L, et al. Transfer zones in the East African rift system and their relevance to hydrocarbon exploration in rifts[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(8): 1234-1253.
- [3] PEACOCK D C P, SANDERSON D J. Geometry and development of relay ramps in normal fault systems[J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(2): 147-165.
- [4] PEACOCK D C P, SANDERSON D J. Strike-slip relay ramps[J]. Journal of Structural Geology, 1995, 17(10): 1351-1360.
- [5] MOUSLOPOULOU V, NICOL A, LITTLE T A, et al. Displacement transfer between intersecting regional strike-slip and extensional fault systems[J]. Journal of Structural Geology, 2007, 29(1): 100-116.
- [6] MOUSTAFA A R. Controls on the geometry of transfer zones in the Suez rift and northwest Red Sea: Implications for the structural geometry of rift systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(6): 979-1002.
- [7] 周心怀, 余一欣, 魏刚, 等. 渤海辽东湾海域JZ25-1S转换带与油气成藏的关系[J]. 石油学报, 2008, 29(6): 837-840.
ZHOU Xinhui, YU Yixin, WEI Gang, et al. Relationship between JZ25-1S transfer zone and hydrocarbon accumulation in Liaodongwan offshore of Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(6): 837-840.
- [8] 吴智平, 张劭, 张晓庆, 等. 渤海湾盆地“埕北-垦东”构造转换带形成演化及成藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1321-1333, 1358.
WU Zhiping, ZHANG Meng, ZHANG Xiaoqing, et al. Evolution and reservoir characteristics of the “Chengbei-Kendong” structural transfer zone in the Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1321-1333, 1358.
- [9] 胡德胜, 宫立园, 满晓, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷雁列断层变换带发育特征及其控储作用——以古近系流沙港组一段重力流沉积为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1359-1369.
HU Desheng, GONG Liyuan, MAN Xiao, et al. Development pattern of en echelon fault transition zone in Weixi'nan Sag, Beibu Gulf Basin and its control on hydrocarbon accumulation——A case study of gravity flow deposits in the Palaeogene Liu 1 Member[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1359-1369.
- [10] 漆家福. 裂陷盆地中的构造变换带及其石油地质意义[J]. 海相油气地质, 2007, 12(4): 43-50.
QI Jiafu. Structural transfer zones and significance for hydrocarbon accumulation in rift basins[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2007, 12(4): 43-50.
- [11] YU Yixin, XU Changgui, ZHANG Xintao, et al. Research advances on transfer zones in rift basins and their influence on hydrocarbon accumulation[J]. Energy Geoscience, 2023, 4(3): 100148.
- [12] 于仲坤, 丁飞, 赵洪. 西湖凹陷构造演化特征及油气运聚单元划分[J]. 上海国土资源, 2018, 39(4): 75-78.
YU Zhongkun, DING Fei, ZHAO Hong. Characteristics of structural evolution and classification of hydrocarbon migration and accumulation units in Xihu Sag, China[J]. Shanghai Land & Resources, 2018, 39(4): 75-78.
- [13] 周心怀, 蒋一鸣, 唐贤君. 西湖凹陷成盆背景、原型盆地演化及勘探启示[J]. 中国海上油气, 2019, 31(3): 1-10.
ZHOU Xinhui, JIANG Yiming, TANG Xianjun. Tectonic setting, prototype basin evolution and exploration enlightenment of Xihu Sag in East China Sea Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2019, 31(3): 1-10.
- [14] 蔡华, 张建培, 唐贤君. 西湖凹陷断裂系统特征及其控藏机制[J]. 天然气工业, 2014, 34(10): 18-26.
CAI Hua, ZHANG Jianpei, TANG Xianjun. Characteristics of the fault systems and their control on hydrocarbon accumulation in the Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(10): 18-26.
- [15] 周荔青, 江东辉, 周兴海, 等. 东海西湖凹陷西斜坡断层—岩性油气藏富集评价体系与勘探方向[J]. 石油实验地质, 2022, 44(5): 747-754.
ZHOU Liqing, JIANG Donghui, ZHOU Xinghai, et al. Evaluation system and exploration optimization for fault-lithologic reservoir on the western slope of Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2022, 44(5): 747-754.
- [16] 邹玮, 余一欣, 刘金水, 等. 东海盆地西湖凹陷中央反转构造带发育主控因素及宁波背斜形成过程[J]. 石油学报, 2021, 42(2): 176-185.
ZOU Wei, YU Yixin, LIU Jinshui, et al. Main controlling factors of the central inversion structure belt and the development of Ningbo anticline in Xihu Sag, East China Sea Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(2): 176-185.
- [17] 蒋一鸣, 邵龙义, 李帅, 等. 西湖凹陷平湖构造带平湖组沉积体系及层序地层研究[J]. 现代地质, 2020, 34(1): 141-153.
JIANG Yiming, SHAO Longyi, LI Shuai, et al. Deposition system and stratigraphy of Pinghu Formation in Pinghu tectonic belt, Xihu Sag[J]. Geoscience, 2020, 34(1): 141-153.
- [18] 王超, 唐贤君, 蒋一鸣, 等. 西湖凹陷天台斜坡带北部构造变换带特征及油气地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, 40(6): 93-105.

- WANG Chao, TANG Xianjun, JIANG Yiming, et al. Characteristics of the structural transfer zone of northern Tiantai slope in Xihu Sag of the East China Sea Basin and their petroleum geological significances [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(6): 93-105.
- [19] 祁鹏, 郭刚, 崔敏, 等. 西湖凹陷天台斜坡新生代构造差异特征及其形成机制[J/OL]. *现代地质*: 1-9[2022-11-01]. <https://doi.org/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2022.081>. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.2022.081.
- QI Peng, GUO Gang, CUI Min, et al. Cenozoic tectonic difference and its formation mechanisms of the Tiantai slope in the Xihu Sag [J/OL]. *Geoscience*: 1-9[2022-11-01]. <https://doi.org/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2022.081>. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.2022.081.
- [20] 赵志刚, 王鹏, 祁鹏, 等. 东海盆地形成的区域地质背景与构造演化特征[J]. *地球科学*, 2016, 41(3): 546-554.
- ZHAO Zhigang, WANG Peng, QI Peng, et al. Regional background and tectonic evolution of East China Sea Basin [J]. *Earth Science*, 2016, 41(3): 546-554.
- [21] 张绍亮, 张建培, 唐贤君, 等. 东海西湖凹陷断裂系统几何学特征及其成因机制[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(1): 87-94.
- ZHANG Shaoliang, ZHANG Jianpei, TANG Xianjun, et al. Geometry characteristic of the fault system in Xihu Sag in East China Sea and its formation mechanism [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(1): 87-94.
- [22] 张建培, 余逸凡, 张田, 等. 东海西湖凹陷深盆地勘探前景探讨[J]. *中国海上油气*, 2013, 25(2): 24-29, 35.
- ZHANG Jianpei, YU Yifan, ZHANG Tian, et al. A discussion on the exploration potential of deep basin gas in Xihu Sag, East China Sea [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2013, 25(2): 24-29, 35.
- [23] YAMADA Y, MCCLAY K. Application of geometric models to inverted listric fault systems in sandbox experiments. Paper 1: 2D hanging wall deformation and section restoration [J]. *Journal of Structural Geology*, 2003, 25(9): 1551-1560.
- [24] 李智高, 龚建明, 操应长, 等. 东海南部及邻区海陆中生代沉积特征对比[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(1): 29-35.
- LI Zhigao, GONG Jianming, CAO Yingchang, et al. Comparison of sedimentary characteristics of the Mesozoic in southern East China Sea and adjacent uplifting areas [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(1): 29-35.
- [25] 姚琪. 杭州湾地区北西向断裂新构造运动特征[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- YAO Qi. Neotectonics of NW-SE trending faults in Hangzhou Bay, China [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [26] 余一欣, 周心怀, 魏刚, 等. 渤海湾地区构造变换带及油气意义[J]. *古地理学报*, 2008, 10(5): 555-560.
- YU Yixin, ZHOU Xinhui, WEI Gang, et al. Structural transfer zones and their hydrocarbon significances in Bohai Bay area [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10(5): 555-560.
- [27] 宋洪亮, 李彦来, 汪瑞宏, 等. 渤海辽中凹陷构造反转作用下沉积模式认识及应用——以JX油田西块东营组为例[J]. *石油地质与工程*, 2022, 36(2): 1-5.
- SONG Hongliang, LI Yanlai, WANG Ruihong, et al. Recognition and application of sedimentary model under tectonic inversion in Liaozhong sag of Bohai Sea——by taking Dongying Formation in the west block of JX Oilfield as an example [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2022, 36(2): 1-5.
- [28] MOUSTAFA A R. Controls on the development and evolution of transfer zones: The influence of basement structure and sedimentary thickness in the Suez rift and Red Sea [J]. *Journal of Structural Geology*, 1997, 19(6): 755-768.
- [29] 王冰洁, 王德英, 王鑫, 等. 渤海湾盆地辽中凹陷南洼走滑转换带特征及其对大、中型油田的控制作用[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(6): 1347-1358.
- WANG Bingjie, WANG Deying, WANG Xin, et al. Characteristics of strike-slip transition zone in southern Liaozhong Sag, Bohai Bay Basin and its control on large/medium-sized oilfields [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(6): 1347-1358.
- [30] 宋小勇, 储呈林, 芮志峰. 东海盆地西湖凹陷构造样式及其演化[J]. *高校地质学报*, 2010, 16(1): 86-93.
- SONG Xiaoyong, CHU Chenglin, RUI Zhifeng. Structural framework and evolution of Xihu Sag in East China Sea Basin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2010, 16(1): 86-93.
- [31] 索书田, 钟增球, 游振东. 大别-苏鲁超高压-高压变质带伸展构造格架及其动力学意义[J]. *地质学报*, 2001, 75(1): 14-24.
- SUO Shutian, ZHONG Zengqiu, YOU Zhendong. Extensional tectonic framework of the Dabie-Sulu UHP-HP metamorphic belt, central China, and its geodynamical significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(1): 14-24.
- [32] 张哲坤. 古太平洋俯冲对华北克拉通陆内变形及岩浆作用的制约[D]. 广州: 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 2020.
- ZHANG Zhekun. Intracontinental deformation and magmatism of the north China craton induced by subduction of the paleo-pacific plate [D]. Guangzhou: University of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences), 2020.
- [33] MARUYAMA S, ISOZAKI Y, KIMURA G, et al. Paleogeographic maps of the Japanese islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present [J]. *Island Arc*, 1997, 6(1): 121-142.
- [34] 索艳慧, 李三忠, 曹现志, 等. 中国东部新生代反转构造及其记录的大洋板块俯冲过程[J]. *地学前缘*, 2017, 24(4): 249-267.
- SUO Yanhui, LI Sanzhong, CAO Xianzhi, et al. Mesozoic-Cenozoic inversion tectonics of East China and its implications for the subduction process of the oceanic plate [J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(4): 249-267.
- [35] 李居云, 姜波, 屈争辉, 等. 东海西湖凹陷构造演化及控煤作用[J]. *煤田地质与勘探*, 2016, 44(5): 22-27.
- LI Juyun, JIANG Bo, QU Zhenghui, et al. Tectonic evolution and control of coal in Donghai Xihu Sag [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2016, 44(5): 22-27.