

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020030201

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

王超, 唐贤君, 蒋一鸣, 何新建, 谭思哲

中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335

摘要:天台斜坡带北部紧邻平湖斜坡带平湖油气田,是西湖凹陷重要的油气勘探接替区。通过西湖凹陷天台斜坡带北部构造特征梳理,解析构造变换带样式、演变,并探讨其油气地质意义。研究表明,在结构特征上,天台斜坡带北部构造变换带整体处于 NWW 向基底舟山-国头断裂带上,是凹陷“南北分块”的重要体现,发育有独特的反向断阶;在构造样式上,天台斜坡带北部扭动变换断裂组合可分为北段缓冲式和南段传递式两个次级变换区,顺 NWW 向基底断裂的扭动变换作用南强北弱,在断裂组合上分别表现为“网格式”和“马尾式”;在成因演化上,天台斜坡带北部构造变换在早期伸展断陷及后期挤压反转中均有发育,自下而上具有持续递进的演变特征,调节南北两侧 NE-NNE 向断裂系伸展和挤压强度的差异,并使部分断裂改变原有的延伸方向。天台斜坡带北部与构造变换作用相关的断裂组合不仅利于控制各类扭动圈闭的发育,也利于油气顺扭动相关断裂垂向运移充注,此外,在构造变换带控制背景下该区亦是有利的前平湖组优质砂体富集区带。

关键词:构造变换带;舟山-国头断裂;NWW 向断裂;天台斜坡带北部;西湖凹陷

中图分类号:P736.1

文献标识码:A

Characteristics of the structural transfer zone of northern Tiantai slope in Xihu Sag of the East China Sea Basin and their petroleum geological significances

WANG Chao, TANG Xianjun, JIANG Yiming, HE Xinjian, TAN Sizhe

Shanghai Branch of CNOOC Ltd., Shanghai 200335, China

Abstract: The northern Tiantai slope of the Xihu Sag, next to the Pinghu oil and gas field, is an important exploration target for future replacement. After a through review of the structural characteristics of the slope, this paper is devoted to the analysis of structural styles and evolutionary process of the transfer zone and their significance to petroleum accumulation. The results show that, in terms of structural characteristics, the structural transfer zone of the northern Tiantai Slope is developed upon the NWW Zhoushan-Guotou basement fault zone under the control of the “North-south Blocking”, where a special reverse fault terrace occurs. The northern Tiantai slope can be further divided into two secondary transfer types: the buffering type in the north and the transferring in the south. The torsional transfer structure, along the NWW basement fault, is strong in the south but weak in the north, which is called the faults of “reticulation type” and “horsetail type” respectively in this paper in view of the fault combination. In terms of genetic evolution, the structural transfer zone of the northern Tiantai Slope is developed in the early period of fault subsiding up to late compression and reversal period, showing a continuous and progressive evolutionary process, which adjusts the difference of extension and compression strength of NE-NNE fault system between the north and the south and by which the original extension direction of some faults is changed. Finally, it is revealed that the fault combination under the control of structural transfer in the northern Tiantai slope area is not only favorable to the forming of various twisted trap, but also favorable to the vertical migration and recharge of oil-gas along the twisted faults. Under the control of structural transfer zone, the northern Tiantai slope is also a favorable area for the deposition of Pre-Pinghu high-quality sandy deposits.

Key words: structural transfer zone; the Zhoushan-Guotou basement fault zone; NWW faults; the northern Tiantai slope; Xihu Sag

构造变换带是一种在区域上为保持缩短或伸展量守恒而产生的调节构造^[1],它既可以是一条调节断层,也可能是具有一定宽度的调节构造带^[2]。

近年来,国内许多学者^[3-6]发现构造变换带在我国东部断陷盆地内广泛发育,类型多样,在渤海湾盆地内研究成果尤为显著。相关研究表明,断陷盆地内

资助项目:国家科技重大专项“东海深层大型气田勘探评价技术”(2016ZX05027-002)

作者简介:王超(1988—),男,硕士,工程师,从事构造地质与石油地质研究工作, E-mail: wangchao68@cnooc.com.cn

收稿日期:2020-03-02; 改回日期:2020-05-10。 周立君编辑

构造变换带对优质储集层的发育、构造圈闭的形成以及油气的运移过程均具有重要积极意义^[7]。

东海陆架盆地位于中国东部沿海大陆架上,与渤海湾盆地同处于 NE 向构造域,在盆地形成时代、成盆动力学背景上大体相当^[8-9]。目前针对东海陆架盆地内区域构造变换带研究较为薄弱,前人研究虽已认识到东海陆架盆地西湖凹陷内 NW 向隐伏基底断裂带附近存在构造变换^[10-11],但这一认识大多以模式化推断为主,缺乏针对性、系统性分析。总之,西湖凹陷内现有针对构造变换带的研究尚处于早期探索阶段,其对油气成藏的影响作用更无从谈起。

本文在近年来新三维地震资料构造解释分析基础上,研究发现西湖凹陷天台斜坡带北部与平湖斜坡带过渡部位 NW 向构造变换特征最为显著,变换带具有一定延伸宽度,内部构造形迹与西部斜坡带整体存在明显差异;早期三维地震资料覆盖有限,前人^[12-14]针对平湖斜坡带断裂特征的研究均忽视了这一构造变换带。由于天台斜坡带北部紧邻平湖斜坡带平湖油气田,同时两区均东临主力供烃洼陷,因此,天台斜坡带北部是西湖凹陷油气勘探重要的接替区,关于构造变换带特征及其对成藏影响的研究认识显得尤为重要。在此,本文通过对天

台斜坡带北部构造特征的系统梳理,分析变换带的形成演化过程及其油气地质意义,以为该区勘探评价提供地质依据。

1 区域地质概况

西湖凹陷位于东海陆架盆地东部坳陷带中段,北依福江凹陷,南接钓北凹陷,东靠钓鱼岛隆褶带,西部由北至南依次与虎皮礁隆起、长江坳陷、海礁隆起、钱塘凹陷和渔山东低隆起相邻(图 1)。

根据钻井及地震资料揭示,西湖凹陷以新生代地层为主,自下而上依次发育上白垩统、古新统、始新统八角亭组、宝石组、平湖组、渐新统花港组、中新统龙井组、玉泉组、柳浪组、上新统三潭组和第四系东海群;按盆地发育的构造层系,这些地层可分为下部断陷构造层(上白垩统、古新统、八角亭组、宝石组)、中下部断-拗转换构造层(平湖组)、中上部拗陷-反转构造层(花港组、龙井组、玉泉组和柳浪组)和上部区域沉降构造层(三潭组、东海群)四个构造层系,分别对应于西湖凹陷所经历的四个主要构造演化阶段,即晚白垩世—早始新世断陷、中晚始新世断-拗转换、渐新世—中新世拗陷-反转期、上新世至今区域沉降阶段(表 1)。在西

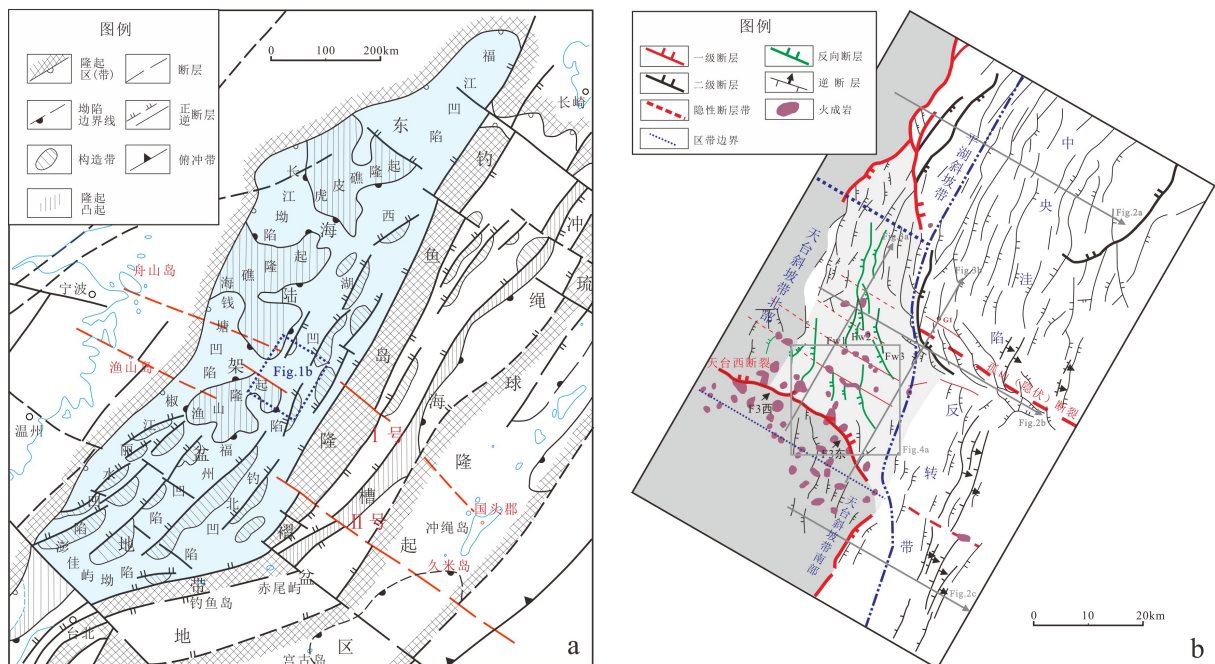


图 1 东海西湖凹陷中南部构造变换带发育区带背景

a. 东海陆架盆地构造格架(据文献^[16]修改), b. 西湖凹陷中南部断裂体系图; I 号断裂: 渔山-久米断裂带, II 号断裂: 舟山-国头断裂带。

Fig.1 Geological background of the structural transfer zone in south-central Xihu Sag, the East China Sea

a. Tectonic framework of the East China Sea Shelf Basin(revised from reference ^[16]), b. Fracture system of south- central Xihu Sag.

Fault I: Yushan-Jiumi fault zone, Fault II: Zhoushan-Guotou fault zone.

表 1 西湖凹陷构造演化特征简表
Table 1 Structural evolution characteristics of the Xihu Sag

地 层 系 统				年代 /Ma	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Q _{pdh}				冲绳运动	区域沉降
新近系	上新统	三潭组N ₂ s		2.6	T0	龙井运动	
	中新统	柳浪组N ₁ ³ l		5.3	T ₁₀		
		玉泉组N ₁ ² y	上段		T ₁₂		
			下段		T ₁₆		
		龙井组N ₁ ¹ l	上段		T ₁₇		
			下段		T ₂₀	花港运动	
古近系	渐新统	花港组E ₃ h	上段	23.0	T ₂₁		反 转
	始新统	平湖组E ₂ p	下段		T ₃₀	玉泉运动	
			上段	33.9	T ₃₂		
			中段		T ₃₄		
			下段		T ₄₀	平湖运动	断-拗转换
	古新统	宝石组E ₁ b		43.0	T ₅₀		
		八角亭组(?)			T ₈₀	甌江运动	
白垩系	上白垩统	?		66.0	T ₁₀₀	雁荡运动	断 陷
				100	T _g	基隆运动	

湖凹陷西部斜坡带范围内, 宝石组及以上的新生代地层发育齐全, 反映斜坡带整体经历了凹陷主要的构造演化阶段。

西湖凹陷具有明显的东西分带、南北分块特征^[15], 自西向东可分为西部斜坡带、中央洼陷-反转带以及东部断阶带。其中, 西部斜坡带自北向南可进一步分为杭州斜坡、平湖斜坡和天台斜坡带; 中央洼陷-反转带自北向南可划分为嘉兴构造带、宁波构造带、黄岩构造带、天台构造带; 东部断阶带可划分为宁波-玉泉边缘断裂带、黄岩边缘断裂带和天台边缘断裂带。西湖凹陷中南部构造变换带主要位于西部斜坡带的平湖斜坡带和天台斜坡带之间, 中央-洼陷反转带的黄岩构造带与天台构造带之间, 以及东部断阶带的黄岩边缘断裂带与天台边缘断裂带之间。变换带附近是晚期近 E-W 向断裂的集中发育区, 且多数 NE、NNE 向断层在其南北两侧尖灭, 或被近 E-W 向晚期断裂横向错断(图 1b)。

2 斜坡横向调节带

西湖凹陷天台斜坡带北部处于中国东部沿海陆架区 NWW 向深大断裂形成的横向调节带上。受基底深大断裂活动影响, 天台斜坡带北部南、北两侧的斜坡结构呈现出显著差异; 同时, 在天台斜坡带北部, 深部岩浆作用形成的火成岩体广泛发育。

2.1 横向调节深大断裂

东海海域区域横向调节深大断裂主要为 NWW 向、下断至基底的岩石圈断裂, 包括舟山-国头断裂带(I号)、渔山-久米断裂带(II号)及其分支断裂等(图 1a)。其中, 舟山-国头断裂带发育于杭州湾外舟山群岛至琉球群岛中冲永良部岛上的国头一线地带, 全长约 700 km。该断裂带首次由焦荣昌^[17]于 1988 年提出, 认为断裂带两侧不仅重磁异常走向、形态存在明显的区别, 莫霍面起伏、深浅也有很大不同。该巨型断裂带总体呈现出断续分布特征, 由陆向海可分为 3 段, 西段位于浙闽隆起区, 中段位于东海陆架盆地内, 东段位于冲绳海槽盆地内。其中, 中段在西湖凹陷内横穿凹陷中南部, 在西部斜坡带则位于中段平湖斜坡和南段天台斜坡的过渡部位。杨文达^[16]认为舟山-国头断裂带在西湖凹陷内的延伸段主要以平移性质为主, 是发育在凹陷新生代地层之下的基底深大断裂, 向东南方向逐步变新。本文认为, 正是由于这条 NWW 向深大断裂以水平方向的构造调节作用为主, 同时受到中深层资料品质制约, 导致在现有地震剖面上难以有效识别。目前, 随着西湖凹陷地震资料覆盖范围的不断拓展, 本文认识到舟山-国头断裂带不仅仅是盆地基底先存的破裂带, 其在西湖凹陷盆地发育期仍存在持续的构造调节作用, 并对凹陷南北构造格局

产生显著影响。

2.2 斜坡结构南北差异

天台斜坡带北部处于西湖凹陷平湖斜坡带与天台斜坡带整体变换过渡部位,受基底舟山-国头断裂带平移作用影响,斜坡结构复杂,表现为天台斜坡带北部与其南北两侧的斜坡结构明显不同。

(1)北侧平湖斜坡带(图 2a):该区西邻海礁隆起南部,构造走向总体呈近 SN 向。断陷及断-拗转换构造层受平湖主断裂控制,表现为“窄陡型”斜坡结构,以同向断阶样式为主,断裂规模和密度较大,控沉积作用显著,向东与凹陷中段深洼带相连;拗陷-反转构造层同样受控于平湖主断裂,受后期挤压反转控制,发育巨型反转背斜。

(2)南侧天台斜坡带南部(图 2c):该区西邻渔山东低隆起,构造走向 NNE。断陷及断-拗转换构

造层受宝石主断裂控制,同样表现为“窄陡型”斜坡结构,以同向断阶样式为主,断裂发育规模和分布密度弱于平湖斜坡带,断裂控沉积作用亦明显减弱,特别是断-拗转换构造层宝石主断裂生长指数已接近 1。拗陷-反转构造层宝石主断裂控制作用持续减弱,在后期挤压反转背景下,仅发育中等规模的反转背斜形态。

(3)天台斜坡带北部转换斜坡带(图 2b):该区西侧邻近海礁隆起与渔山东低隆起的过渡部位。平面上构造形迹总体 NNW-NW 向,自北向南呈现出由近 SN、NNW 向 NW 向转变的特征;剖面上表现为宽缓型斜坡结构,以反向断阶样式为主,断陷及断-拗转换构造层向东稳定增厚,反向断层规模普遍较小,平湖组沉积时期断裂生长指数总体接近 1,控沉积作用不明显。拗陷-反转构造层部分反向断层仍见明显向上错断至花港组上段,同时后期挤压

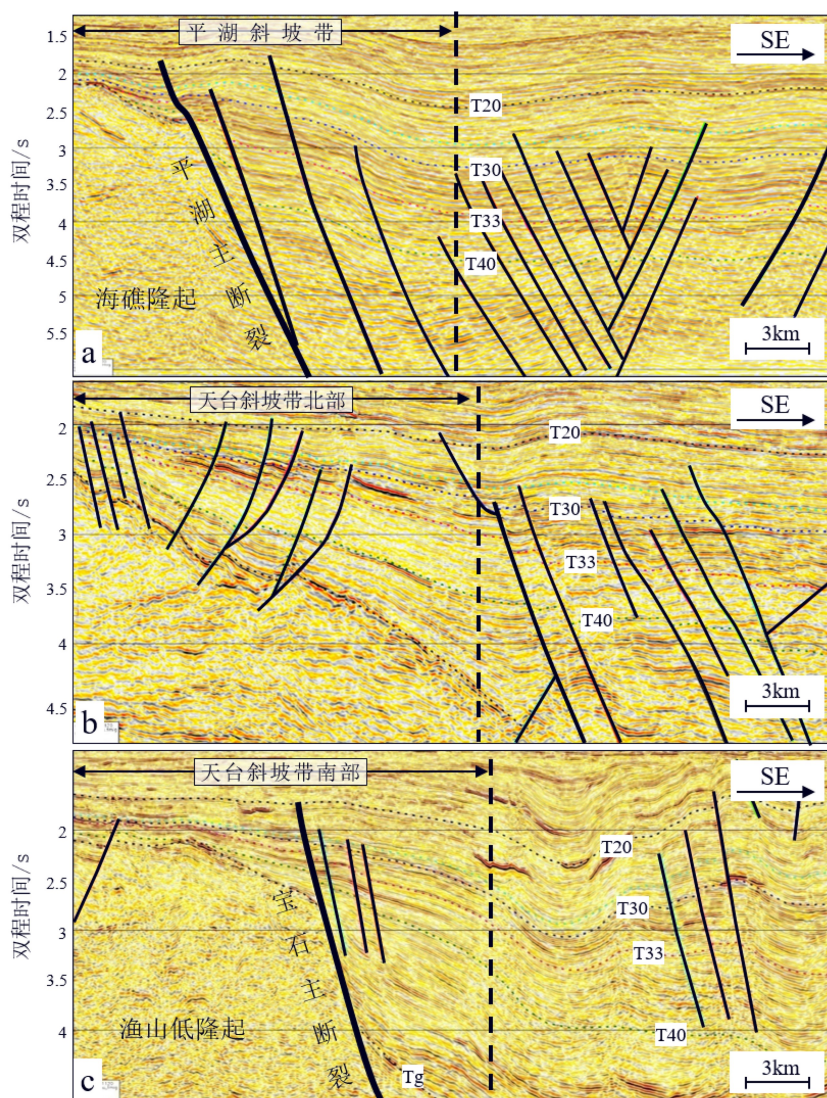


图 2 西湖凹陷中南部结构剖面(剖面位置见图 1)

Fig.2 Seismic profiles across south-central Xihu Sag (see Fig.1 for profile location)

反转对该区影响微弱, 仅见局部地层牵引现象。

此外, 天台斜坡带北部还受到显著的 NWW 向构造形迹影响, 最典型的即为 NWW 向天台西断裂, 该断裂在地震剖面上向下错断至基底, 向上最浅错断至中新统柳浪组, 构成了天台斜坡带北部和南部的分界(图 3)。天台斜坡带北部北段也存在一条隐伏的 NWW 向基底断裂, 该断裂限制了平湖主断裂向南延伸, 同时控制了孤山构造向东南方向的弧状弯折, 本文称之为孤山断裂, 由于天台斜坡带北部北段这种顺 NWW 向弧状弯折特征向其东侧中央洼陷-反转带呈现出愈发显著的特征(图 1b), 反映 NWW 孤山断裂在整个西湖凹陷均有影响作用。本文认为上述两条 NWW 向基底断裂均为舟山-国头断裂带在西湖凹陷的一部分, 舟山-国头断裂带在西湖凹陷内具有一定的宽度, 类似于郯城-庐江断裂带在渤海湾盆地辽东湾地区表现为多条平行断裂组合控制的形式。舟山-国头断裂带在西湖凹陷斜坡区范围内的扭动作用所影响的区域主要为天台西断裂及孤山断裂所限定并显著控制的区域——天台斜坡带北部构造变换带。

2.3 天台斜坡带北部火成岩带

在西部斜坡带范围内, 天台斜坡带北部相对于天台斜坡带南部和平湖斜坡带火成岩发育明显增

多。拗陷-反转构造层内, 地震剖面上可见地震强反射体, 反射同相轴连续性差, 频率较低, 顶部存在明显较强的反射界面, 在方差体属性上为黑色团块状和连续(或不连续)的带状异常(图 4a)。前人认为该区地震异常体为岩浆喷发、侵入后的反映^[18-19], 在地震剖面上呈现出明显的丘状、蘑菇状、“U”字形、“V”字形、杂乱状等地震响应特征(图 3, 图 4c、d)。

天台斜坡带北部火成岩体在分布特征上具有明显的规律性。在区带上, 火成岩体主要分布在孤山断裂及天台西断裂延伸区所限定的舟山-国头断裂带范围内, 且愈向南邻近天台西断裂, 火成岩发育规模更大、平面分布更密集、垂向分布层系更多(图 4a、b); 在剖面上, 根据地震剖面异常强反射特征, 火成岩体主要分布在中上部拗陷-反转构造层花港组、龙井组、玉泉组、柳浪组和三潭组地层中; 此外, 在下部断-拗转换及断陷构造层中多见近直立丘状反射, 为火成岩通道相岩体, 与上部强反射喷发-溢流相岩体相连通。在平面上, 单个火成岩通道多见于 NWW 向基底断裂和 NE(或 NW)向断裂交汇部位, 且多个通道顺 NWW 向呈串珠状分布, 在多条 NWW 向基底断裂发育背景下, 总体呈现出“网点状”分布特征, 在方差体属性上表现尤为显著(图 4a、b)。根据邻区 G1 井在玉泉组地层中所揭示的凝灰岩年龄(14.7 Ma)推断, 该区大规模岩浆作用发生在

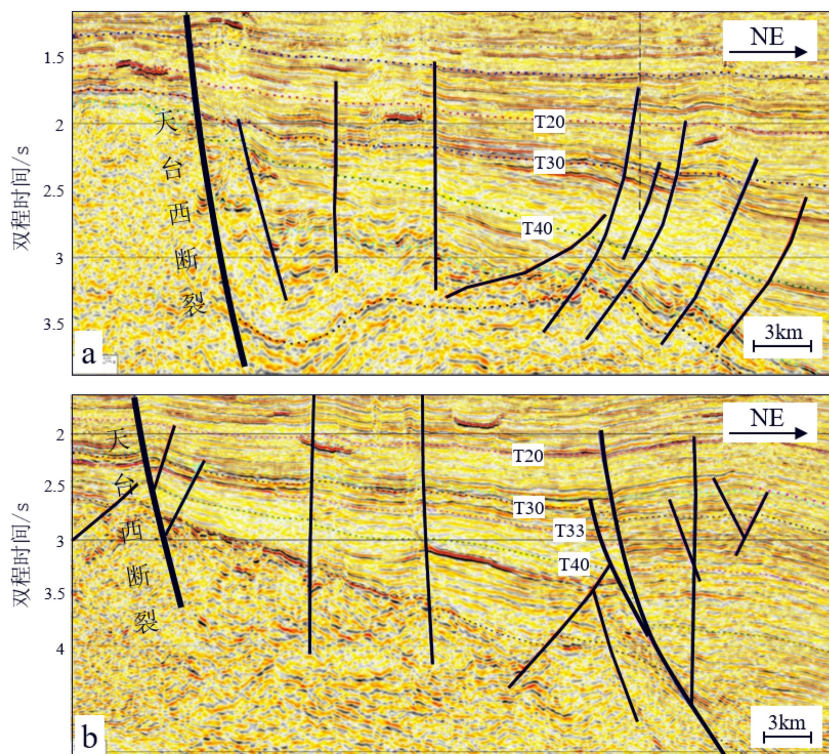


图 3 西湖凹陷天台斜坡带北部近南北向剖面(剖面位置见图 1)

Fig.3 North-south seismic profiles across northern Tiantai slope of Xihu Sag (see Fig.1 for profile location)

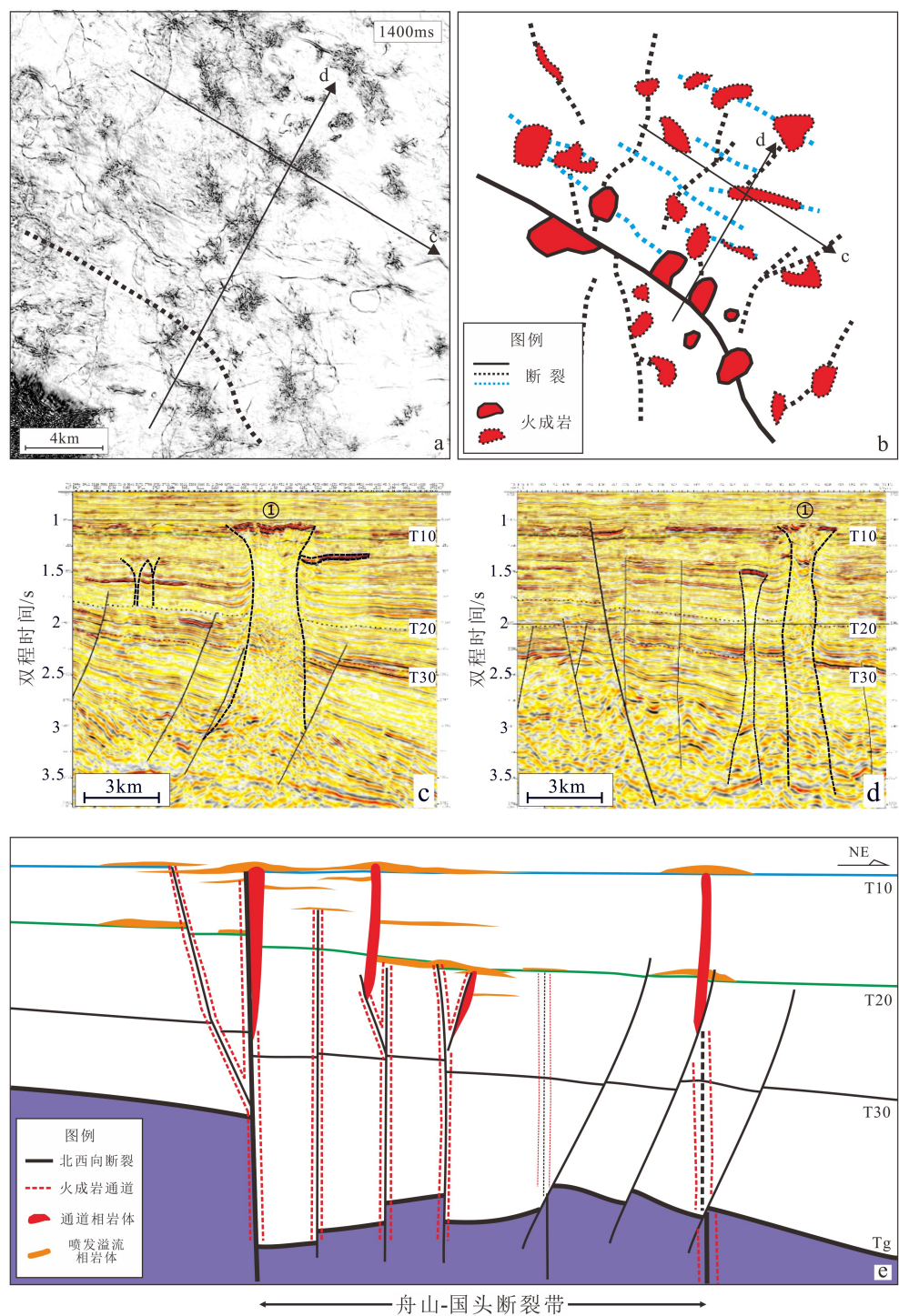


图 4 天台斜坡带北部火成岩发育特征平面图

a. 1 400 ms 地震方差体属性, b. 拗陷-反转构造层火成岩体平面分布, c. NW-SE 向火成岩地震剖面, d. SW-NE 向火成岩地震剖面, e. 火成岩剖面发育模式。

Fig.4 Distribution map of igneous rocks in northern Tiantai slope zone

a. Variance slice in 1 400 ms, b. Horizontal distribution of igneous rocks in depression-inversion structural layer, c. NW-SE seismic profile of igneous rocks, d. SW-NE seismic profile of igneous rocks, e. Development model of igneous rocks.

中新世龙井运动时期;结合岩体的展布形态,本文认为该区大规模火成岩活动与舟山-国头断裂带的晚期活化有关,这些火成岩体是在中新世 NWW

向基底深断裂活动背景下,从岩石圈深部顺 NWW 断裂上涌,并在盆地斜坡带内向上顺 NWW 和 NE (或 NW) 向两组断裂交汇部位进一步分配、调整,

在盆地中浅层形成“网点状”、“多中心点”的火成岩体(图4b、e)。在龙井运动时期,由于天台西断裂活动更为强烈,扭动背景下明显向上错断,因此,区内南段伴生的岩浆作用更为显著,表现在火成岩发育规模及分布密度上明显高于北段区域。

3 构造变换带断裂发育模式及成因

根据西湖凹陷中南部范围内横向调节深大断裂分布、斜坡结构特征以及火成岩分布规律,本文认为凹陷范围内存在 NWW 向延伸的构造变换带,主要受到 NWW 向舟山-国头基底深大断裂带活化作用影响。由于西部斜坡带基底面埋藏相对较浅,天台斜坡带北段构造形迹在 NWW 向基底深大断裂带活化作用下构造变换带发育特征较为显著。

3.1 构造变换带断裂分布及样式

天台斜坡带北部断裂分布受 NWW 向基底断裂平移影响,顺 NW 方向弧状弯折特征显著,反映平湖斜坡带 NNE 向断裂体系向南受到了明显的扭动改造,表现为断层走向自北向南由近 SN、NNW 向 NW 向转变特征。根据 NWW 向基底断裂平移扭动对两侧构造形迹的影响,结合漆家福^[5]关于构造变换带分类,本文认为天台斜坡带北部断裂体系可分为天台斜坡北段缓冲式变换和南段传递式变换两个断裂组合区(图5)。

(1) 北段缓冲式变换区

舟山-国头断裂带北缘主扭带位于西湖凹陷中央洼陷区, NWW 向基底断裂向上曲折延伸,在凹陷中央断-拗转换构造层及拗陷-反转构造层内形成明显的扭动破碎带。天台斜坡北段变换区位于主扭带西缘扭动发散端, NWW 向断裂活动特征不明显,表现为基底 NWW 向断裂发育不明显,而近 SN 向、NNW 向断裂向下延伸至基底较显著,自北向南形成弧形构造形迹,反映该区在整体近东西向伸展背景下,受到较弱的 NWW 向扭动变换作用控制。由于天台斜坡北段 NWW 向扭动线迹南北两侧的正断层不连续,而是存在一定宽度的构造变形带来缓冲位移,因此,根据构造变换带分类^[5]该区主要表现为缓冲式变换断裂组合。

在断裂组合特征上,天台斜坡北段变换区以发育弧状分布的近 SN 向、NNW 向断裂为主,这些断裂西侧斜坡高带以反向西倾,东侧斜坡低带以同向东倾为主,剖面上构成局部堑垒式断裂组合。舟山-国头断裂带北缘主扭带在天台斜坡北段延伸区表

现出明显的断裂分段尖灭特征,同时主扭带延伸线北侧近 SN、NNW 向断裂具有明显顺 NWW 向弯折特征,与 NWW 向扭动线迹构成“马尾式”断裂组合(图5)。

(2) 南段传递式变换区

舟山-国头断裂带南缘主扭带恰位于西湖凹陷西部斜坡带,天台斜坡南段明显受到扭动作用影响, NWW 向基底断裂向上断穿至拗陷-反转构造层,最明显即为 NWW 向天台西断裂及其次级断裂发育,断裂活动同时伴生较强的火山作用。天台西断裂两侧 NNW-NW 向断裂延伸长度较短,且临近天台西断裂平面走向弯折特征更明显。反映该区近东西向伸展作用较弱, NWW 向扭动变换作用占主导。由于天台斜坡南段 NWW 向断裂显著活动,且与南北两侧 NNW-NW 向断裂明显交切变换,根据构造变换带分类^[5]该区主要表现为传递式变换断裂组合。

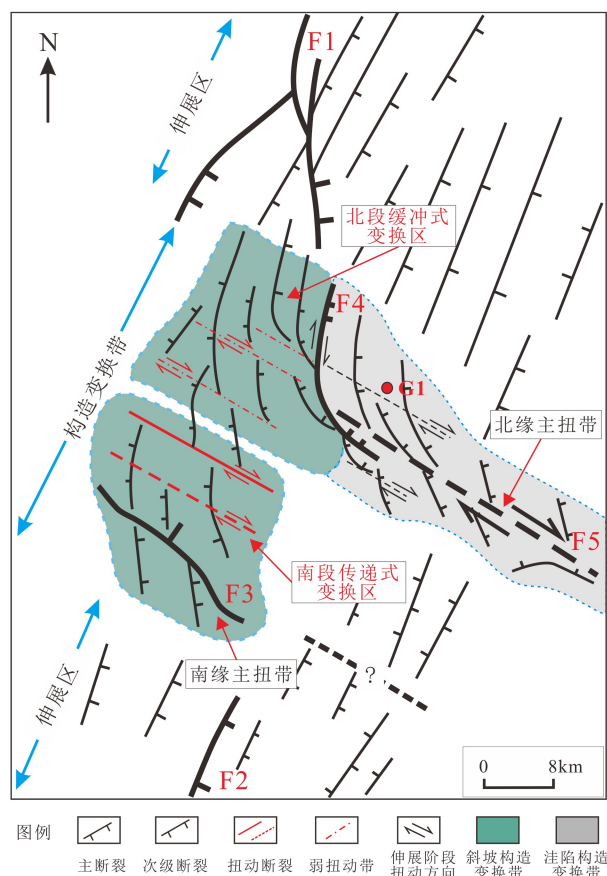


图5 天台斜坡带北部变换断裂组合发育模式

F1: 平湖主断裂, F2: 宝石主断裂, F3: 天台西断裂,
F4: 天台断裂, F5: 孤山断裂。

Fig.5 Evolutionary model of the transfer fault combination in northern Tiantai slope zone

F1: Pinghu major fault, F2: Baoshi major fault, F3: Tiantaixi fault,
F4: Tiantai fault, F5: Gushan fault.

天台斜坡带南段传递式变换断裂组合区内,以 NWW 向扭动断裂显著发育为主要特征,且向南临近天台西断裂,斜坡反向断裂及伴生火成岩具有密集发育的趋势。在剖面形态上, NWW 向断裂剖面上近直立,断面表现出上下一致的丘状反射特征,且断裂两侧地震反射波组特征明显不同,但由于两侧垂向断距不明显(图 3),这些 NWW 向断裂主要以平移扭动为主。在平面形态上,受基底 NWW 向断裂平移扭动影响,在断陷至拗陷-反转构造层中形成彼此等间距分布的 NWW 向断裂,断裂以水平错动为主,与两侧的 NW 向断裂在平面上形成“网格式”断裂组合。

3.2 构造变换带断裂发育机制及演化

在西湖凹陷整体“南北分块”的背景下,天台斜坡带北部所处位置是西湖凹陷中南部构造变换在斜坡带的主要发育区。西湖凹陷平衡剖面及断裂样式分析结果反映,天台斜坡带北部所分隔的西湖凹陷中部与南部在伸展-压缩率及伸展-挤压断裂样式上均呈现出明显的差异^[11,20]。在天台斜坡带北部范围内局部构造形态南北转换特征较显著, NNW-NW 向断裂南北延伸短,多顺 NWW 向隐性或显性断裂两侧尖灭,甚至表现出被 NWW 向断裂切割错断特征。这种 NWW 向尖灭、扭动和错断构成的变换形迹从深部断陷构造层到浅部拗陷-反转构造层均具有明显反映。因此,综合凹陷结构及斜坡带局部变换特征,天台斜坡带北部 NWW 向基底断裂所诱发的构造变换在早期断陷及后期挤压反转中均有发育,自下而上具有持续递进的演变过程,从中生代盆地基底演变至新生代盆地发育期大致经历了以下几个演化过程(图 6):

(1)晚侏罗世—早白垩世盆地基底演变阶段

燕山早期包括东海陆架盆地在内的中国东部陆缘受古太平洋板块快速俯冲作用影响,普遍发育 NE-NNE 向压性断裂系,并伴生了 NW-NWW 向断裂活动,关于燕山期 NW 向断裂活动在华南地区多有报道^[21-24],主流观点认为这些 NW 向断裂在燕山期发育具有普遍性,与 NE-NNE 向压性断裂系共生^[24-25],形成配套的断裂体系。考虑到东海陆架盆地所处海区范围 NWW 向基底深断裂多位于华南陆区 NW 向断裂延伸线上,陆区对应断裂为浙江省境内以长兴—奉化断裂为代表的一系列 NW 向断裂^[26],海-陆区构造背景相似,均属于新华夏系构造域^[27],在更靠近古太平洋板块俯冲带的东海陆架盆地区内,板块俯冲引起的 NE-NNE 向压性断裂与 NWW

向断裂共生,断裂活动强度应比陆区更为显著。因此,本文结合陆区已有认识认为舟山-国头、渔山-久米等 NWW 向断裂带至少在燕山期已形成,具有张扭性质,调节断裂带南北 NE-NNE 向压性构造带挤压强度差异,同时对沉积具有一定的控制作用。在天台斜坡带北部所处的陆缘位置,该时期表现为 NWW 向舟山-国头断裂带的显性活动,限定了南北两侧 NE-NNE 向断裂发育的连续性(图 6a)。

(2)早白垩世末—早始新世盆地伸展断陷阶段

早白垩世末期,由于印度洋板块的逐步向北漂移并俯冲,给欧亚板块一个向北的挤压推挤力;同时,中国东部陆缘由古太平洋板块快速 NWW 向俯冲转变为中速俯冲,俯冲松弛产生总体 NW-SE 向的张应力分量, NE-NNE 向压性构造向张扭性构造转换^[28],在这一背景下,东海陆架区开始进入初始盆地发育阶段,局部小范围发育 NE-NNE 断裂控制的伸展断陷盆地。在此过程中沿 NWW 向舟山-国头断裂带张性作用已不明显,以扭动调节作用为主,在其影响下断裂带以南的盆地区伸展作用显著,发育有较厚的晚白垩世地层,如丽水凹陷的石门潭组等,而断裂带以北的盆地区未见广泛揭示晚白垩世地层的报道。

晚白垩世末期,随着古太平洋板块逐步向北挤出,中国东部陆缘转而受到新生太平洋板块俯冲作用,同时受深部岩浆作用影响,东海陆架盆地所处的区域进入稳定伸展环境^[29]。大量的 NE-NNE 向断裂表现出张性特征,并在 NWW 向舟山-国头断裂带两侧广泛控制断陷的发育。受伸展强度的南北差异,以及基底 NWW 向断裂平移扭动影响,当时统一的西湖凹陷还未形成,主要表现为南北多中心,分割型断陷群发育。进入中晚始新世,随着太平洋板块俯冲转向,东海西湖凹陷由强伸展、分割型断陷向弱伸展、统一型断-拗转换盆地转变,至此,西湖凹陷进入整体发展演变阶段,基底 NWW 向断裂平移扭动作用才逐步停止。

在天台斜坡带北部,古新世—早始新世时期表现为 NE-NNE 向断裂开始逐步发育,同向、反向断裂南北断续分布,同时控制沉积。古落差特征显示,反向断层活动规律与天台西断裂基本同步(图 7),也具有一定变换调节作用,因此,向南邻近天台西断裂总体表现出反向断层增多的趋势(图 6b)。中晚始新世进入断-拗转换阶段, NE-NNE 向断裂进一步发育,部分断裂南北硬联接稳定分布, NWW 向断裂活动基本停止,仅天台西断裂局部段仍有明显活动,该时期反向西倾断裂虽有一定活动,但控沉积

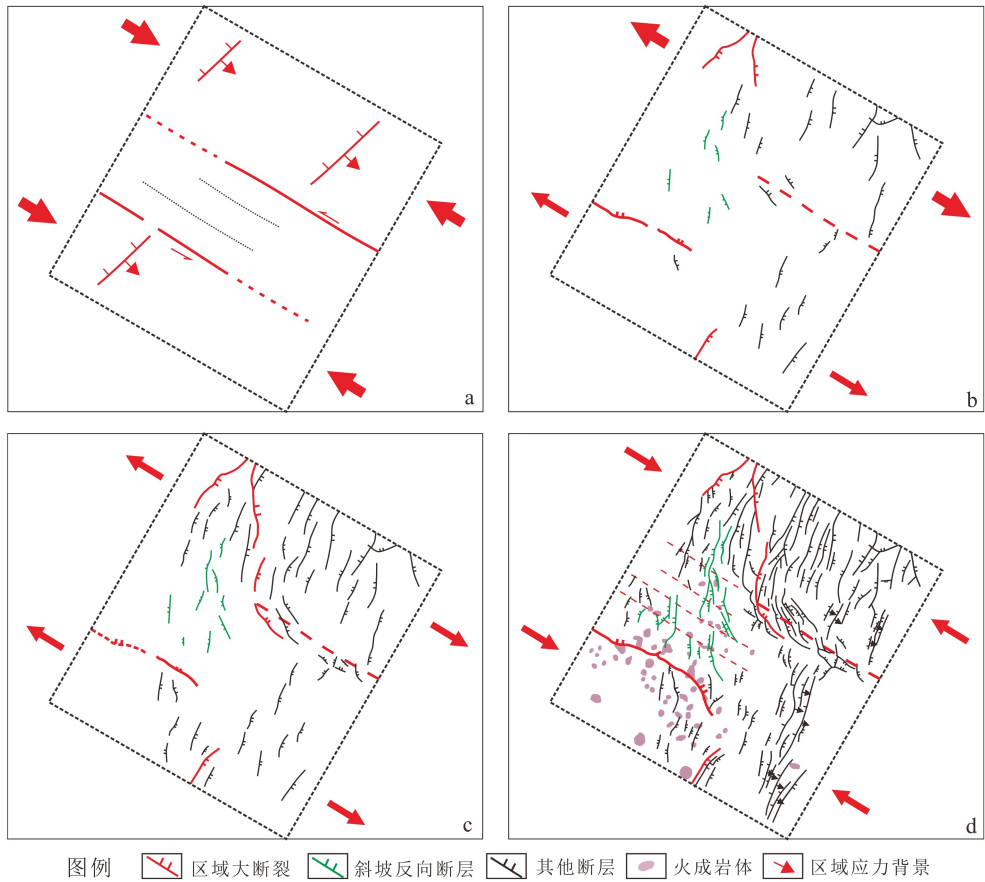


图 6 天台斜坡带北部构造变换带各阶段演变模式图
a. 晚侏罗世—早白垩世盆地基底演变阶段, b. 晚白垩世—早始新世伸展断陷阶段,
c. 中晚始新世断-拗转换阶段, d. 渐新世—中新世挤压反转阶段。

Fig.6 Evolution of the transfer zone in northern Tiantai slope
a. Evolution stage of basement from late Jurassic to Early Cretaceous, b. Rift stage from Late Cretaceous to Early Eocene,
c. Rift-depression transition stage in Middle-late Eocene, d. Compression reversal stage from Oligocene to Miocene.

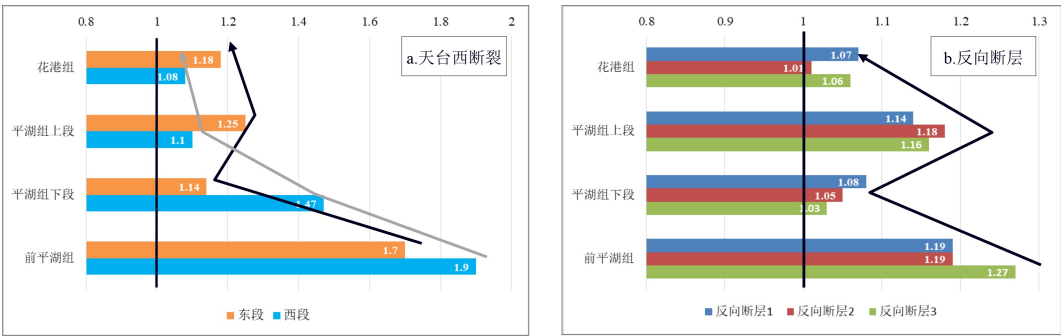


图 7 天台斜坡带典型断裂生长指数图 (断裂位置见 图 1)
Fig.7 Index chart of typical fault of Tiantai slope

特征已不明显(图 6c)。

(3)渐新世—中新世盆地挤压反转阶段

始新世末以来,随着太平洋板块向东北方向挤出,中国东部陆缘受到菲律宾海板块俯冲作用影响,逐步进入挤压环境。东海西湖凹陷受此影响最为显著,特别是进入中新世,凹陷内中央反转背斜

带广泛背斜群形成并定型。由于中央反转背斜带在西湖凹陷表现出明显的南北差异,基底 NWW 向断裂活化所产生的扭动变换作用亦较显著。

在天台斜坡带北部表现为原有 NE-NNE 向断裂整体发生走向偏转,经历长期多幕次挤压变形后转为 NNW-NW 向,明显受到 NWW 向扭动变换作

用影响。由于斜坡带 NWW 向主扭带位于南侧的天台西断裂上,该断裂在强烈的近东西向挤压背景下具有扭张性质,诱发了深部强烈岩浆作用。由于天台斜坡带北部 NWW 向扭动变换作用表现为南段显性、北段隐性,北段活动不显著(图 6d),NWW 向断层活动伴生岩浆作用亦表现出明显的南强北弱特征。

4 构造变换带的油气地质意义

断陷盆地构造变换带与油气成藏关系十分密切。世界上许多大型含油气断陷盆地的油气富集区都与构造变换带有关,中国东部如渤海湾盆地等也都已发现了大量与构造变换带有关的含油气圈闭与油气富集区^[30-31]。因此,天台斜坡带北部构造变换带同样对圈闭发育及油气富集过程具有积极意义。

(1)控制圈闭的发育

天台斜坡带北部圈闭发育普遍受到区域构造变换带作用的控制,各次级区带内受不同变换作用影响,圈闭类型存在一定的差异。其中,北段缓冲式变换区位于北缘主扭带西缘扭动发散端(图 5),盆地伸展断陷、断-拗转换阶段,受较弱的张扭作用,NNE 向断层自北向南逐步转为近 SN、NNW 向断层,沿走向形成弧形构造。在后期的挤压反转过程中,处于弧形构造中心、断裂东缘地层易形成一定的牵引背斜形态,同时上倾方向受弧形断层遮挡

形成断鼻、断块圈闭群,根据断层倾向及其与地层组合关系,这些圈闭可分为弧形反向断层上升盘断块、弧形反向断层上升盘断鼻和弧形断层下降盘断鼻等(图 8)。天台斜坡带北部南段传递式变换区邻近南缘主扭带北缘,扭动作用明显较强,尤其是在渐新世—中新世挤压反转时期以天台西断裂为代表的 NWW 向基底断裂强烈活化,向上错断始新统平湖组至中新统玉泉组地层,在使原有 NNE 向断层转向 NNW 向的同时,诱发深部强烈岩浆作用,形成 NWW 向、NNW 断层及火成岩株共同控制的断块、断鼻圈闭群,根据主控断层方向及其与伴生岩体、地层的关 系,这些圈闭可分为 NWW 向扭动断层主控断块、NNW 向扭动断层主控断块及火成岩封挡的断鼻等(图 8)。

(2)控制前平湖组优质砂体的富集

构造变换带对储层控制作用主要体现于对沉积体系展布的影响,受基底断裂带影响区域变换带通常是沉积物源进入汇水盆地的通道,从而控制着盆地内沉积体系及砂体的展布。受 NW 向舟山国头断裂带活动影响,天台斜坡带北部构造变换带在断陷早期(古新世—早始新世)沉积发育阶段处于相对较低部位,夹持于渔山低隆起与海礁隆起之间(图 1a),来自西部及南北两个隆起带的物源顺 NWW 向构造变换带向东汇聚,在 NNE-SN-NNW 走向弧形断层影响的坡折下逐步形成扇三角洲岩性体(图 9),区内局部地震剖面上显著的低位前积楔

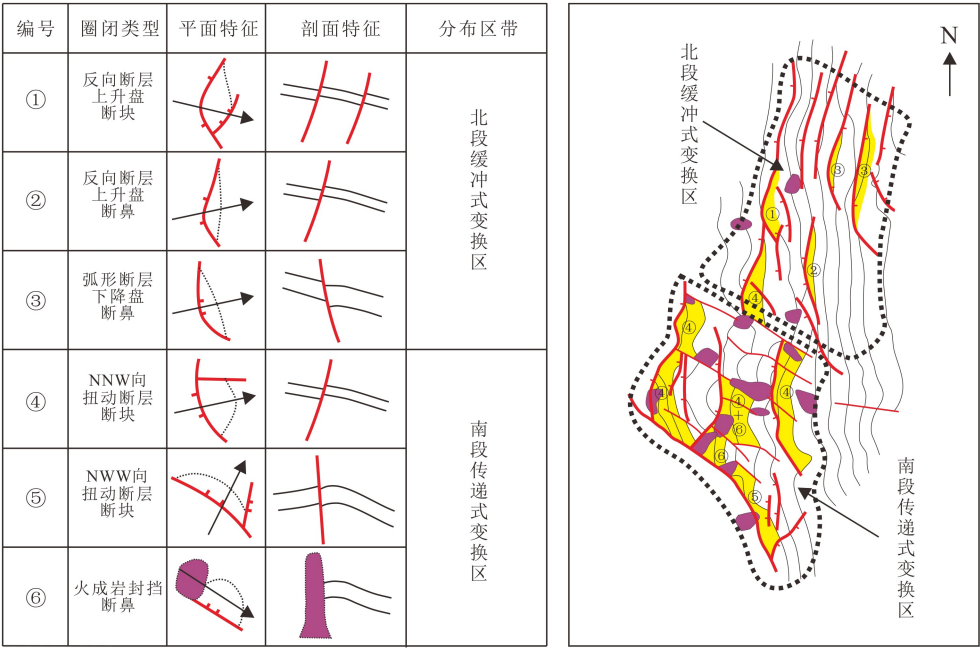


图 8 天台斜坡带北部扭动转换构造控圈模式

Fig.8 Trap-control model of torsional transfer structure for northern Tiantai slope

形体即反映前平湖组低位扇三角洲沉积。在天台斜坡带南部及平湖斜坡带内, 受 NNE 向控坡大断裂控制, 前平湖组地层普遍埋藏较深(图 2a、c), 多达 5000 m 以上, 且砂体富集程度相对较低, 对优质储层发育不利。而天台斜坡带北部前平湖组地层整体埋藏浅(图 2b), 受 NWW 向断裂影响的低地貌控制砂体相对富集, 易形成较好的优质储层。

(3) 控制油气运移

构造变换带对油气运移的控制本质上是对砂体和断层的控制作用, 其中对砂体控制作用前文已论述, 在此着重强调其对断层输导体系的控制。构

造变换带特征反映, 顺 NWW 方向是应力的集中释放带, 主要表现在两个方面, 一个方面是顺 NWW 向天台西断裂的显著活化, 另一个方面是原 NNE 向断裂顺 NWW 方向逐步弯折为近 SN 和 NNW 向, 形成弧形断层带。由于中新世挤压反转阶段亦是西湖凹陷烃源岩大规模生排烃阶段, 因此, 该时期顺 NWW 方向的应力集中释放亦有助于生成油气的垂、侧向运移。主要通过 NWW 向扭动断裂和近 SN 向弧形断层运移。中新世时期, NWW 向断裂张扭, 且显著向上错断, 为油气聚集提供高效的垂向运移通道; 该成藏关键时期, 近 SN 向弧形断层带没

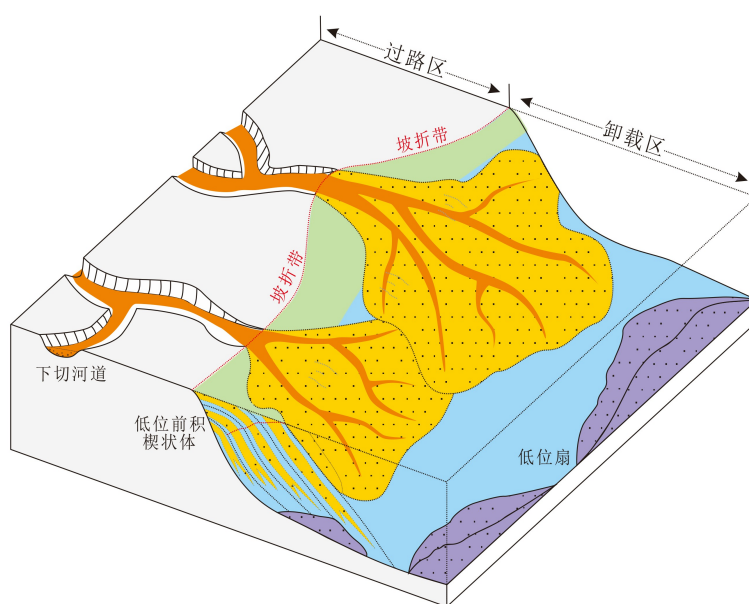


图 9 天台斜坡带转换带储层发育模式图

Fig.9 Reservoir developing model of the transfer zone of northern Tiantai slope

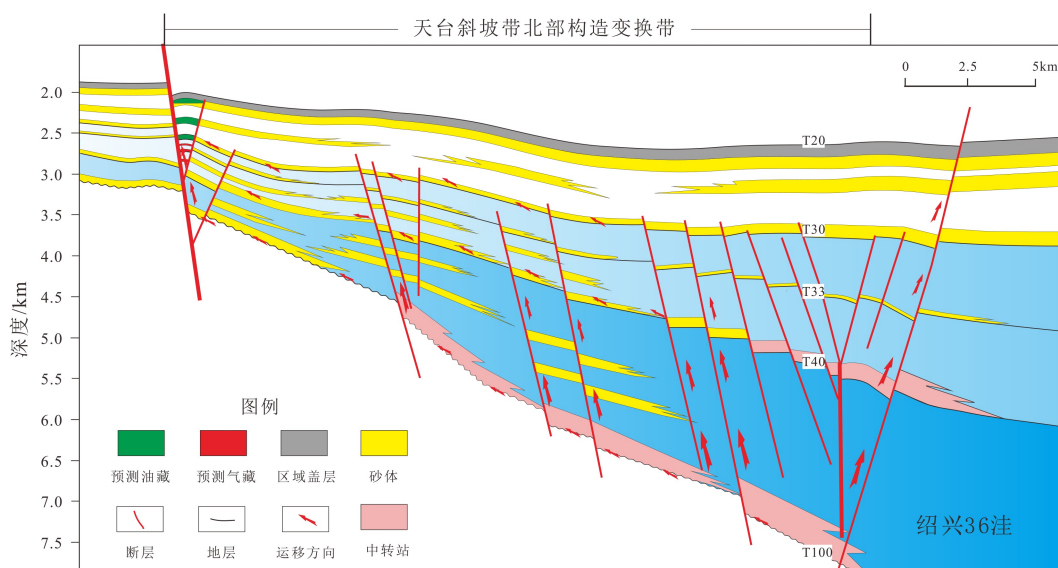


图 10 天台斜坡带北部油气成藏示意图

Fig.10 Hydrocarbon accumulation models on the northern Tiantai slope

有明显向上错断,但断裂平面形态发生了显著的弧形弯折,为断裂开启创造了条件,同样利于油气垂向运移。在这两类断裂的控制下,来自东侧主力供烃洼陷及斜坡自身烃源岩生成的油气沿着断层与砂体向上倾方向运移,受断层遮挡聚集于变换带控制的断鼻、断块圈闭群内富集成藏(图10)。

5 结论

(1)在区域构造格局变换特征上,天台斜坡带北部构造变换带是西湖凹陷“南北分块”的重要体现,该区基底整体处于舟山-国头断裂带上,导致平湖斜坡带与天台斜坡带在区内变换过渡,具体表现为天台斜坡带北部发育独特的反向断阶。

(2)在局部断裂体系变换特征上,天台斜坡带北部在扭动变换南强北弱背景下,断裂组合可分为北段缓冲式和南段传递式两个次级变换区,分别表现为NWW向隐性影响的“马尾式”和NWW向显性控制的“网格式”特征。

(3)在构造变换的成因机制上,天台斜坡带北部构造变换在早期断陷及后期的挤压反转中均有作用,自下而上具有持续递进的演变过程,并最终定型于中新世末龙井运动时期,主要调节南北两侧NE-NNE向断裂系伸展、挤压强度的差异。

(4)在油气地质意义方面,天台斜坡带北部构造变换作用控制下的断裂组合对成圈条件有利,通过NWW向扭动和断裂显性活化不仅丰富了圈闭形态,同时也利于油气垂向运移。此外,构造变换带控制下该区亦是有利的前平湖组优质砂体富集区带。

参考文献(References)

- [1] Dahlstrom C D A. Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky Mountain [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 1970, 187(3): 332-406.
- [2] 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.
- [3] 郭光辉, 漆家福. 黄骅盆地一级构造变换带的特征与成因[J]. *石油与天然气地质*, 1999, 20(2): 125-128. [WU Guanghui, QI Jiafu, et al. Characteristics and origin of first order transfer zone in Huanghua Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 1999, 20(2): 125-128.]
- [4] 孙冬胜, 刘池阳, 杨明慧, 等. 渤海湾盆地冀中坳陷中区中生代复合伸展构造[J]. *地质论评*, 2004, 50(5): 484-491. [SUN Dongsheng, LIU Chiyang, YANG Minghui, et al. Study on complex extensional structures in middle Jizhong Depression in the Bohai Bay Basin [J]. *Geological Review*, 2004, 50(5): 484-491.]
- [5] 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(2): 43-50. [QI Jiafu. Structural transfer zones and significance for hydrocarbon accumulation in rifted basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2007, 12(2): 43-50.]
- [6] 陈发景, 贾庆素, 张洪年. 传递带及其在砂体发育中的作用[J]. *石油与天然气地质*, 2004, 25(2): 144-148. [CHEN Fajing, JIA Qingsu, ZHANG Hongnian. Transfer zone and its relation with distribution of sand bodies [J]. *Oil & Gas Geology*, 2004, 25(2): 144-148.]
- [7] 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 zone and their hydrocarbon significances in Bohai Bay area [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10(5): 555-560.]
- [8] Cukur D, Horozal S, Kim D, et al. Seismic stratigraphy and structural analysis of the Northern East China Sea Shelf Basin interpreted from multi-channel seismic reflection data and cross-section restoration [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(5): 1003-1022.
- [9] 任建业. 中国近海海域新生代成盆动力机制分析[J]. *地球科学*, 2018, 43(10): 3337-3361. [REN Jianye. Genetic dynamics of China offshore Cenozoic basins [J]. *Earth Science*, 2018, 43(10): 3337-3361.]
- [10] 林长松, 高金耀. 东海微板块的南北分块与水平运动[J]. *海洋学报*, 1999, 21(1): 80-89. [LIN Changsong, GAO Jinyao. North-south segmentation and horizontal movement of the East China Sea micro-plate [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1999, 21(1): 80-89.]
- [11] 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): 91-98. [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 and Quaternary Geology*, 2014, 34(1): 91-98.]
- [12] 胡望水, 蔡峰, 胡芳, 等. 东海西湖凹陷平湖斜坡带裂陷期变换构造特征及其演化规律[J]. *石油天然气学报*, 2010, 32(3): 7-12. [HU Wangshui, CAI Feng, HU Fang, et al. The characteristics of tectonic transform evolutionary rules of chasmic cycles in Pinghu slope of Xihu Depression of East China Sea [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2010, 32(3): 7-12.]
- [13] 张建培. 东海西湖凹陷平湖斜坡带断裂系统特征及成因机制探讨[J]. *地质科学*, 2013, 48(1): 291-303. [ZHANG Jianpei. Fault system and its genetic mechanism in the Pinghu slope of the Xihu Sag in the East China Sea Shelf Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2013, 48(1): 291-303.]
- [14] 杨丽娜, 王丽顺. 西湖凹陷保俶斜坡断裂特征及与油气成藏的关系[J]. *海洋石油*, 2007, 27(1): 19-24. [YANG Lina, WANG Lishun. The effect of rupture on oil accumulation in Baochu slope of Xihu Sag [J]. *Offshore Oil*, 2007, 27(1): 19-24.]
- [15] 刘金水, 廖宗廷, 贾健谊, 等. 东海陆架盆地地质结构及构造演化[J]. *上海地质*, 2003, 3: 1-6. [LIU Jinshui, LIAO Zongting, JIA Jianyi, et al. The geological structure and tectonic evolution of the East China Sea Shelf Basin [J]. *Shanghai Geology*, 2003, 3: 1-6.]
- [16] 杨文达, 崔征科, 张异彪, 等. 东海地质与矿产[M]. 北京: 海洋出版

- 社, 2010. [YANG Wenda, CUI Zhengke, ZHANG Yibiao, et al. Geology and Mineral Resources of the East China Sea [M]. Beijing: China Ocean Press, 2010.]
- [17] 焦荣昌. 论舟山-国头断裂带的性质及其向陆区的延伸[J]. 物探与化探, 1988, 12(4): 249-255. [JIAO Rongchang. On properties of Zhoushan-Guotou fault zone and its extension towards the continent [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1988, 12(4): 249-255.]
- [18] 张卫华, 郭全仕. 平南地区火成岩分布特征及其对圈闭形成的影响[J]. 勘探地球物理进展, 2004, 27(5): 359-362. [ZHANG Weihua, GUO Quanshi. The distributional characteristics of igneous rock and effect on the formation of traps in Pingnan area [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2004, 27(5): 359-362.]
- [19] 苏程, 李春峰, 葛和平. 东海陆架盆地西湖凹陷渐中新世异常反射体的特征与成因[J]. 海洋学研究, 2010, 28(4): 14-21. [SU Cheng, LI Chunfeng, GE Heping. Characteristic and formation cause of anomalous reflection on Oligocene and Miocene transition in Xihu Depression, East China Sea Basin [J]. Journal of Marine Sciences, 2010, 28(4): 14-21.]
- [20] 张建培, 唐贤君, 张田, 等. 平衡剖面技术在东海西湖凹陷构造演化研究中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(8): 31-37. [ZHANG Jianpei, TANG Xianjun, ZHANG Tian, et al. Application of balanced cross section technique to the research of tectonic evolution of Xihu Sag in the East China Sea [J]. Marine Geology Frontiers, 2012, 28(8): 31-37.]
- [21] 谢瑞征, 朱永正, 裘然忠. 江苏地震构造特征[C]//第二届全国构造地质学会议论文选集(第三卷). 北京: 科学出版社, 1982. [XIE Ruizheng, ZHU Yongzheng, QIU Ranzhong. Characteristics of seismic structure in Jiangsu Province [C]//Selected papers of the second National Conference on Structural Geology (Volume 3). Beijing: Science Press, 1982.]
- [22] 孙岩, 沈修志. 苏南地区NW向压性构造的确立[C]//中国地质科学院综562综合大队集刊. 1987, 6: 105-115. [SUN Yan, SHEN Xiuzhi. The determination of NW compressive structures in south Jiangsu [C]//Bulletin of the 562 Comprehensive Geological Brigade Chinese Academy of Geological Sciences. 1987, 6: 105-115.]
- [23] 周祖翼. 下扬子区印支期以来主要构造运动性质、表现及其对油气藏形成与改造的作用[R]. 中石化勘探南方分公司, 2001. [ZHOU Zuyi. The nature and performance of the main tectonic movements since the Indosinian in the lower Yangtze region and their effects on the formation and transformation of oil and gas reservoirs [R]. Sinopec Exploration South Company, 2001.]
- [24] 李祖武. 中国东部NW向构造[M]. 北京: 地震出版社, 1992. [LI Zuwu. NW Trending Structures in Eastern China [M]. Beijing: Seismological Press, 1992.]
- [25] 杨明桂, 王光辉. 华南陆区板块活动与构造体系的形成演化[J]. 地质学报, 2019, 93(3): 528-544. [YANG Minggui, WANG Guanghui. Formation and evolution of plate activity and the structural system in the South China continental region [J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(3): 528-544.]
- [26] 姚琪. 杭州湾地区北西向断裂新构造运动特征[D]. 浙江大学, 2008. [YAO Qi. Neotectonics of NW-SE trending faults in Hangzhou Bay, China [D]. Zhejiang University, 2008.]
- [27] 谭忠福, 张启富, 袁正新, 等. 中国东部新华夏系[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1988: 1-15. [TAN Zhongfu, ZHANG Qifu, YUAN Zhengxin, et al. Neocathaysian in Eastern China [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1988: 1-15.]
- [28] 李三忠, 索艳慧, 李玺瑶, 等. 西太平洋中生代板块俯冲过程与东亚洋陆过渡带构造-岩浆响应[J]. 科学通报, 2018, 63(16): 1550-1593. [LI Sanzhong, SUO Yanhui, LI Xiyao, et al. Mesozoic plate subduction in West Pacific and tectono-magmatic response in the East Asian ocean-continent connection zone [J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(16): 1550-1593.]
- [29] 环文林, 时振梁, 郦家全. 中国东部及邻区中生代构造演化与太平洋板块运动[J]. 地质科学, 1982(2): 179-190. [HUAN Wenlin, SHI Zhenliang, YAN Jiaquan. Meso-cenozoic tectonic evolution of eastern China and adjacent area and movement of the Pacific Plate [J]. Chinese Journal of Geology, 1982(2): 179-190.]
- [30] 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.
- [31] 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(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 Petroli Sinica, 2008(6): 837-840.]