

伍亮, 李昆, 周锋, 等. 西湖凹陷冷泉亭地区断裂构造特征及演化[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(1): 31-43.

WU Liang, LI Kun, ZHOU Feng, et al. Characteristics and evolution of fault structures in Lengquanting area of Xihu Sag[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(1): 31-43.

西湖凹陷冷泉亭地区断裂构造特征及演化

伍亮¹, 李昆², 周锋², 谢春雨², 唐大卿^{1*}, 张勇杰¹

(1 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074; 2 中国石油化工股份有限公司上海海洋油气分公司勘探开发研究院, 上海 200120)

摘要:冷泉亭地区是西湖凹陷重要的油气勘探区域, 由于经历了多期构造运动, 该地区断裂构造十分发育, 并且对盆地的沉积构造演化及油气成藏具有重要控制作用。为揭示对冷泉亭地区新生界油气成藏具有关键控制因素的断裂构造特征及其发育机制, 通过对西湖凹陷平北冷泉亭地区最新三维地震资料的精细构造解释, 系统研究了该地区的断裂构造类型、几何学特征及成因演化。结果表明: 冷泉亭地区断裂以正断层和走滑断层为主, 该区断裂发育数量众多且空间上具有明显的分区分层差异活动特征。受区域应力场影响, 西湖凹陷冷泉亭地区断裂构造主要经历了 5 大阶段: ①断陷期 (古新统一平湖组下段沉积期), 共出现 3 幕断层强扭张活动; ②断拗转换期 (平湖组中段—上段沉积期) 大中型断层的继承性张扭活动; ③初始拗陷期 (花港组沉积期) 主干断层的继承性弱扭张活动; ④稳定拗陷期 (玉泉组—柳浪组沉积期) 西缘坡折带主干断层及冷泉亭主干断层继承性弱伸展活动; ⑤区域沉降期 (三潭组沉积期至今) 剪切应力作用导致的西缘坡折带主干断层的微弱伸展活动。

关键词:断裂构造; 构造特征; 成因演化; 冷泉亭地区; 西湖凹陷

中图分类号: P744.4

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.246

0 引言

西湖凹陷是东海陆架盆地重要的勘探区域, 也是最主要的富烃凹陷, 多期裂陷和反转构造作用的叠加导致其形成了比较复杂的构造样式和凹陷结构^[1-3]。经过四十多年的勘探, 西湖凹陷发现了多个油气田和含油气构造, 西北缘的平湖斜坡带为西湖凹陷油气勘探开发的重点区域, 目前已发现平湖、中山亭、团结亭、宝云亭等多个油气田^[4], 该区具有丰富的油气资源和巨大的勘探潜力。由于经历了多期伸展-挤压构造旋回作用^[5], 该区的断裂构造十分发育且断裂成因演化复杂, 导致斜坡带以往勘探

效果总体呈现了“小、断、贫、散”的特征, 可供钻探的构造圈闭日益减少^[6]。前人对该地区的构造也开展过一系列的研究, 包括西湖凹陷构造演化史^[7-8]、平北地区断裂构造特征^[9-11]、平北地区古隆起特征^[12]以及断裂对圈闭的控制作用^[13-15]等。前人虽然认识到平北地区断裂组合样式的多样性与差异性, 但对总体伸展背景下断裂发育特征、断裂走向-倾向的空间变化规律以及力学成因机制等认识并不深入和系统, 且由于早期地震资料品质不佳等条件限制, 西湖凹陷平湖斜坡带断裂构造差异性与断裂分期差异演化特征等仍然不够明确, 制约了对该区基础地质问题深入、系统的认识, 进而影响了该区的油气勘探进程。

本文在区域动力背景分析的基础上, 充分利用新采集的西湖凹陷平湖斜坡带冷泉亭地区的高品质三维地震资料, 通过精细构造解释, 对断裂构造类型、几何学特征、活动期次及成因演化进行深入分析, 以期丰富对该地区断裂活动规律的认识并为本区油气勘探实践提供理论参考。

收稿日期: 2023-10-23

资助项目: 中石化上海海洋油气分公司项目(34000000-21-ZC0613-0050)

第一作者: 伍亮(1999—), 男, 在读硕士, 主要从事地震资料解释与盆地构造演化方面的研究工作。E-mail: amandacug@163.com

* 通讯作者: 唐大卿(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事含油气盆地构造分析与地震地质解释方面的研究工作。E-mail: tangdqcg@sina.com

1 地质概况

西湖凹陷位于东海陆架盆地东北部,呈 NNE 向展布,南北长约 500 km,东西平均宽约 130 km,面积约 $5.9 \times 10^4 \text{ km}^2$,是东海陆架盆地中规模最大的新生代富烃凹陷。西侧自北而南依次与虎皮礁隆起、长江坳陷、海礁隆起、钱塘凹陷及渔山东隆起 5 个构造单元相接,东邻钓鱼岛隆褶带。西湖凹陷

总体上可划分出 3 个构造带,即西部斜坡带、中央洼陷反转构造带和东部断阶带^[16]。研究区位于西部斜坡带中部的平湖斜坡带的北部鼻状隆起带上(图 1),三维地震工区约 $3\,200 \text{ km}^2$,研究区内可进一步划分出西部缓坡带、中部坡折带和东部低洼带 3 个次级构造单元,其中,中部坡折带可进一步细分为南断坡和北断洼,东部低洼带可进一步细分为南断洼和北断隆。

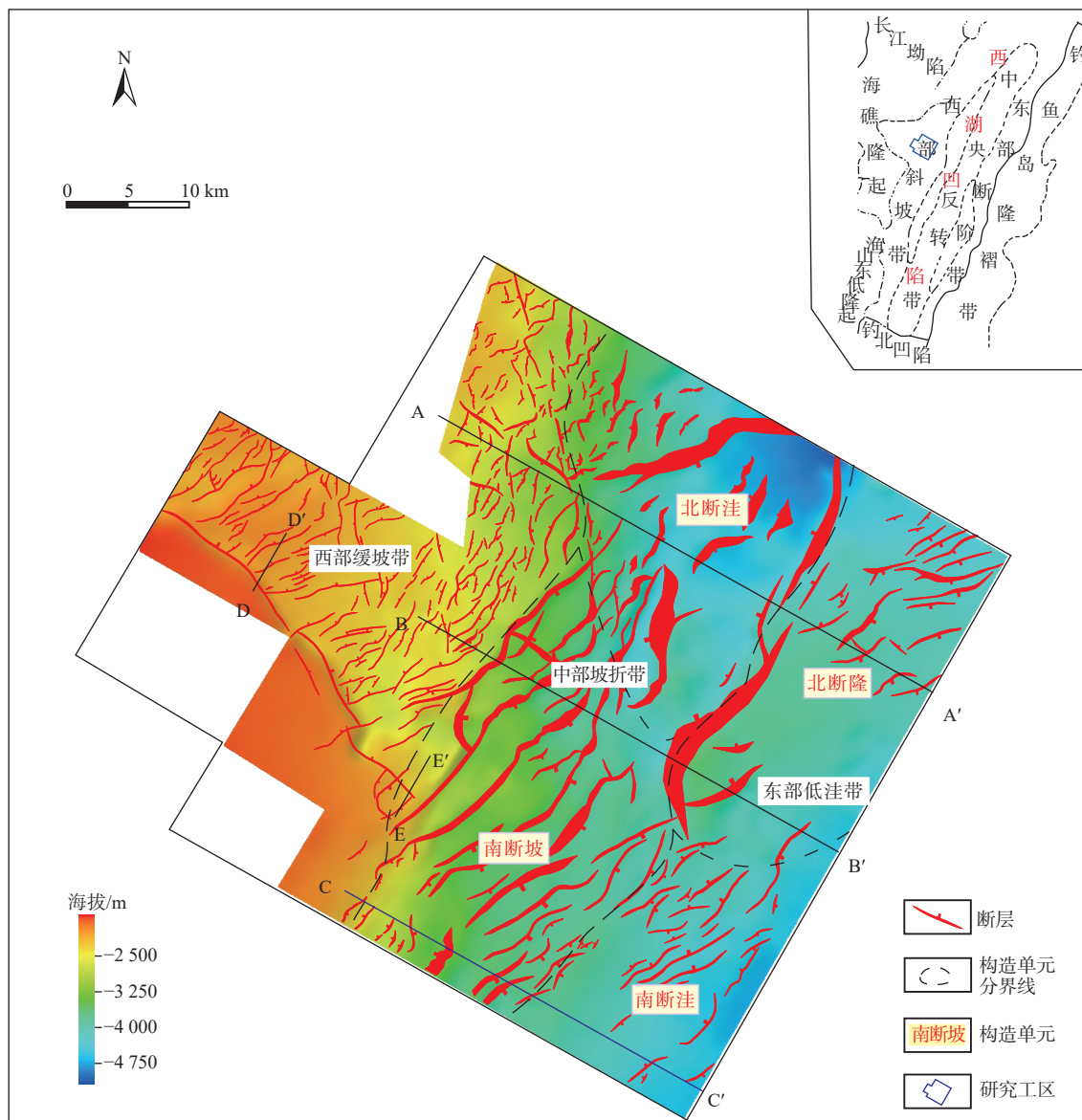


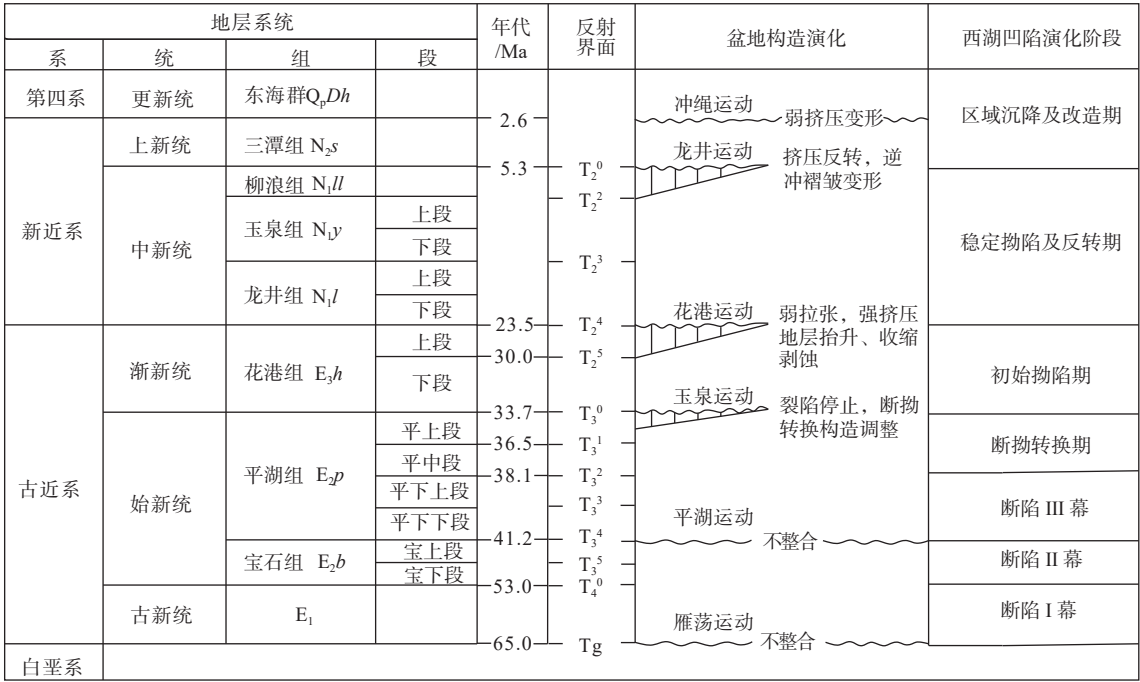
图 1 西湖凹陷冷泉亭地区构造位置及次级构造单元划分

Fig.1 Tectonic position of Lengquanting area and secondary structural unit division in the Xihu Sag

西湖凹陷主要发育新生代地层(图 2),厚度逾万米,从下至上包括古新统(E_1)、始新统宝石组(E_{2b})、平湖组(E_{2p})、渐新统花港组(E_{3h})、中新统龙井组(N_{1l})、玉泉组(N_{1y})、柳浪组(N_{1l})、上新统

三潭组(N_{2s})及第四系东海群($QpDh$)^[17]。研究区总体上共经历了 7 个构造演化过程:断陷期的断陷 I 幕、II 幕、III 幕,断拗转换期,初始拗陷期,稳定拗陷期及区域沉降期。期间经历了 6 次构造运动,

分别为雁荡运动、平湖运动、玉泉运动、花港运动、龙井运动和冲绳海槽运动,使得该地区的构造演化呈现出复杂性和多期性的特征。目前,西湖凹陷平湖斜坡带已发现多个油气田,如平湖油气田、团结亭气田等,油气主要富集在平湖组,油源主要来自西斜坡以及三潭深凹深层平湖组下段及宝石组煤系烃源岩层系,形成“下生上储、旁生侧储”型油气藏^[18]。



据文献 [17] 修改

图 2 西湖凹陷地层发育特征及构造演化简图

Fig.2 Stratigraphic characteristics and structural evolution in the Xihu Sag

2 断裂构造类型

西湖凹陷冷泉亭地区受控于东海盆地大的构造背景,经历了平湖运动、花港运动、龙井运动等大型构造事件,发育了一系列形态各异、性质不同的断层,各期构造运动形成的断层在性质、活动强度、数量规模展布特征等方面差异较大,下面重点根据断层的力学性质与级别规模对研究区断裂构造类型进行详细描述。

2.1 根据断层力学性质分类

2.1.1 张性断层

张性断层是研究区新生界最典型和最重要的断裂构造类型,该类断层发育数量众多且分布广泛。张性断层主要发育于古新统一花港组下段,大多数为早期裂陷形成的断层,主要分布在研究区的西缘缓坡带和东部低洼带。平面走向以 NNE 向为主,剖面上呈同向断阶、地垒、地堑等典型伸展构造样式,在冷泉亭构造带因受古潜山影响,大量发育反

向断层(图 3、4)。

2.1.2 张扭/扭张性断层

受区域剪切应力影响,研究区扭动构造也非常发育,由此产生的张扭/扭张性断层全区广泛分布,张扭性断层以扭为主、张为辅,主要分布于冷泉亭东北部,剖面组合样式为似花状和半花状等典型扭动构造样式;扭张性断层以张为主、扭为辅,主要分布于研究区西侧高带和北部,剖面组合样式多为半花状、似花状和梳状等典型扭动构造样式(图 4、图 5)。此外,张扭性断裂组合的存在还与古隆起的发育有关,在断陷发育期,冷泉亭古隆起与 SEE 向拉张应力斜交,诱发张扭性断裂活动,地震剖面上表现为典型的似花状和半花状等典型的扭张构造样式。

2.1.3 走滑断层

西湖凹陷大量发育 NW 向走滑断裂^[19],该类走滑断裂(或隐伏走滑断裂)横切东海盆地,使得东海盆地呈现出典型的“分段式裂谷盆地”特征。研究区最典型的 NW 向走滑断裂发育于雀亭地区西侧,该走滑断裂平面呈 NW 走向(图 1),剖面形态为一

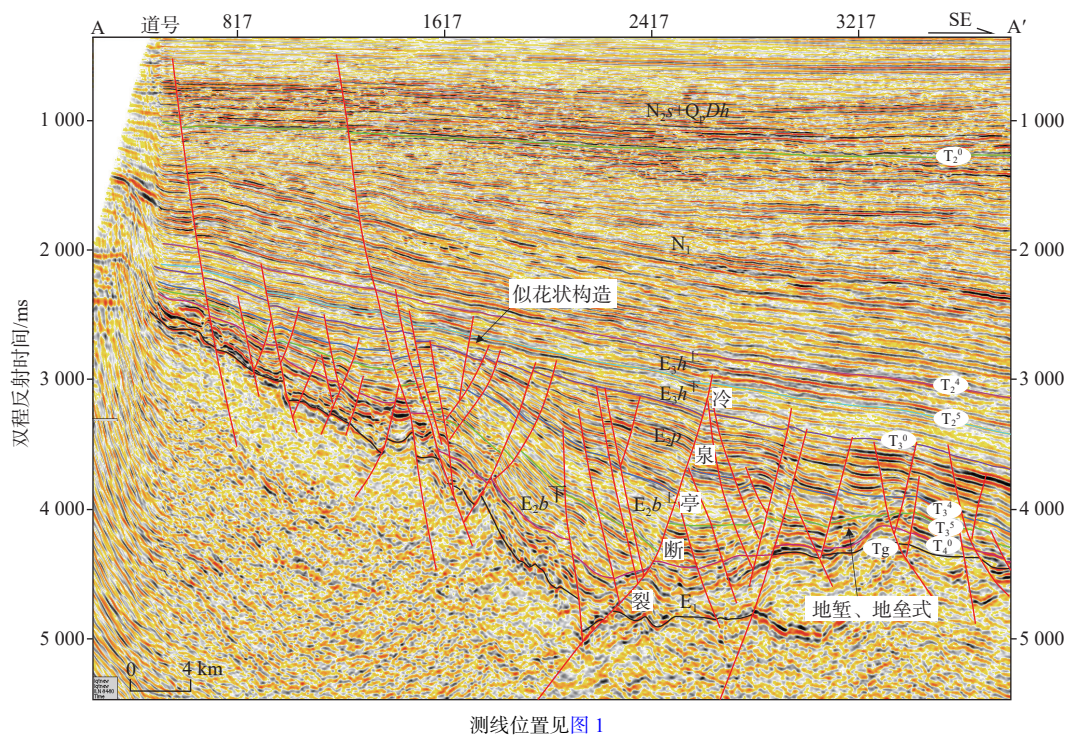


图 3 冷泉亭地区 AA' 测线地震地质解释剖面

Fig.3 Interpretation of the seismic profile of the AA' survey line in the Lengquanting area

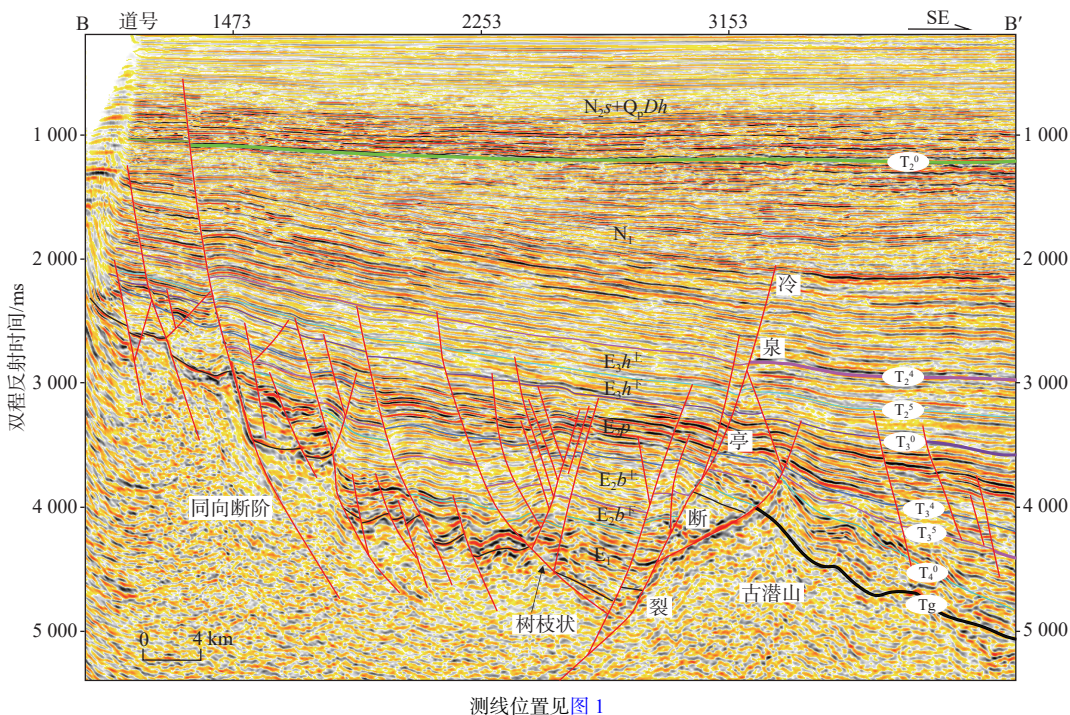
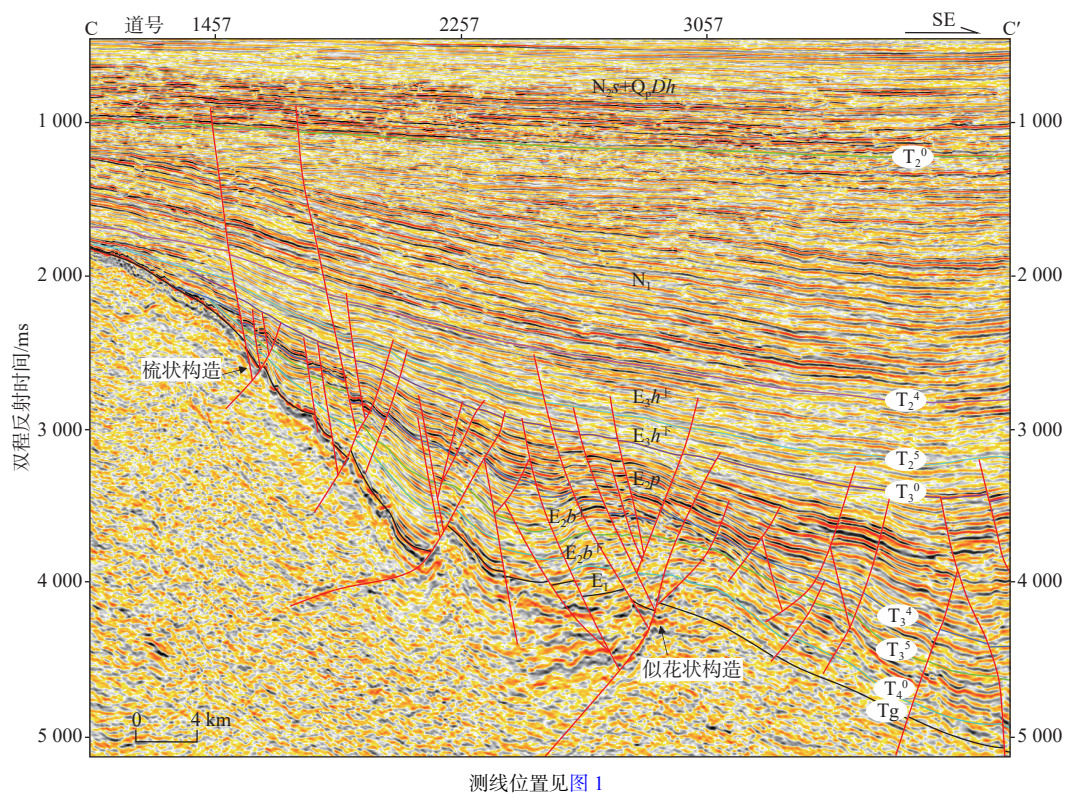


图 4 冷泉亭地区 BB' 测线地震地质解释剖面

Fig.4 Interpretation of the seismic profile of the BB' survey line in the Lengquanting area

高角度北倾断裂,其成因与西湖凹陷东部边界一系列 NW 向走滑断裂相似,为古新世区域左旋剪切作用的产物,对西湖凹陷具有明显的横向剪切作用并分割次级构造单元。此走滑断裂带限制了北部小

断裂的活动,控制了南部断裂的倾向。通过平、剖面特征分析,可以揭示出此断裂带的分带差异性,在剖面上表现为北部为单条直立状或较缓的负花状(图 6a),南部为宽缓的负花状(图 6b)。



测线位置见图 1

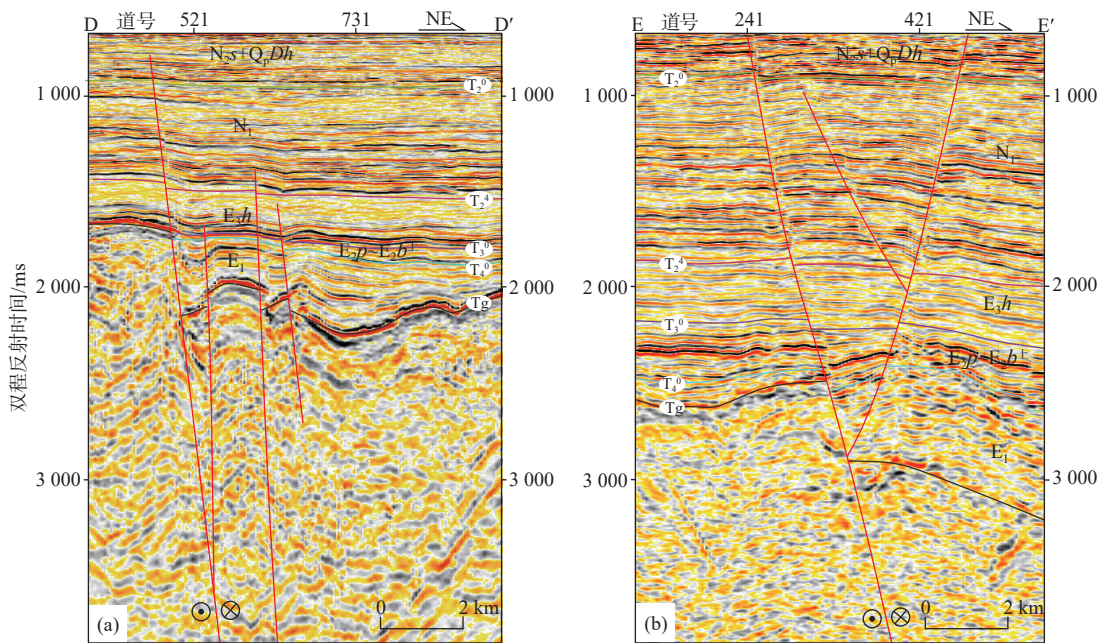
图 5 冷泉亭地区 CC'测线地震地质解释剖面

Fig.5 Interpretation of the seismic profile of the CC' survey line in the Lengquanting area

2.2 根据断层级序分类

根据断层规模及其对冷泉亭地区构造单元、地层厚度等方面的控制作用,研究区断层可分为 3 个

级别,即二级至四级断层。其中,二级断裂包括孔雀亭边界 NW 向走滑断裂、冷泉亭断裂等,该类断裂带规模较大、活动时间较长并对沉积和隆拗格局具有明显的控制作用;三级断裂主要发育于研究区



(a)北部直立走滑断层;(b)南部负花状走滑断层

图 6 冷泉亭地区北西向走滑断裂剖面特征

Fig.6 Interpretation of the seismic profiles of slip-strike fault in the Lengquanting area

中部的坡折区,主要为一系列斜列式展布的张扭性断裂,对坡折带构造格局与沉积充填有重要控制作用;研究区四级断裂一般为分支断层,发育数量较多,但规模相对较小(图 7)。

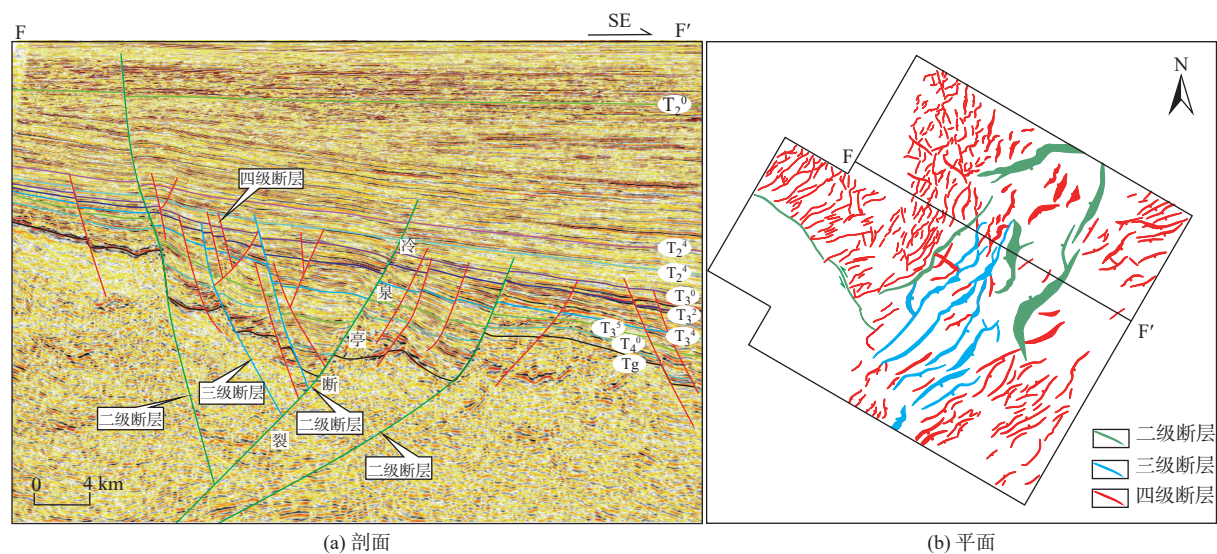


图 7 冷泉亭地区断裂分级

Fig.7 Fault classification of the Lengquanting area

3 断裂构造几何学特征

断裂构造是西湖凹陷冷泉亭地区最主要的构造类型,研究区的断裂具有明显的分区分层差异活动特征,并对该区的沉积构造特征及油气成藏与富集具有重要控制作用。

3.1 断裂剖面特征

断裂剖面特征是描述断裂形态和活动的重要

内容,断裂剖面特征主要包括断面形态和组合样式 2 个方面。冷泉亭地区断裂剖面形态及组合样式具有如下特征:①断裂剖面特征复杂多样,按照力学性质可划分为伸展型、走滑伸展型(图 8);②断面形态复杂多样,特征也不尽相同,以铲式和单断式为主;③断裂数量多且分层分区差异性明显,垂向上断裂主要发育于古新统一平湖组。平面上,西部缓坡带主要发育张性断层,断层在剖面形态上常表现为斜列式断阶和深洼带复合地堑等构造样式;中部坡折带走滑扭动特征明显,断层在剖面形态上表现

大类	序号	构造类型	构造样式	典型剖面特征	大类	序号	构造类型	构造样式	典型剖面特征
伸展型	1	同向断阶			走滑伸展型	1	梳状		
	2	反向断阶				2	树枝状		
	3	y字形 人字形				3	半花状		
	4	地堑 地垒式				4	负花状		

图 8 冷泉亭地区断裂剖面组合样式

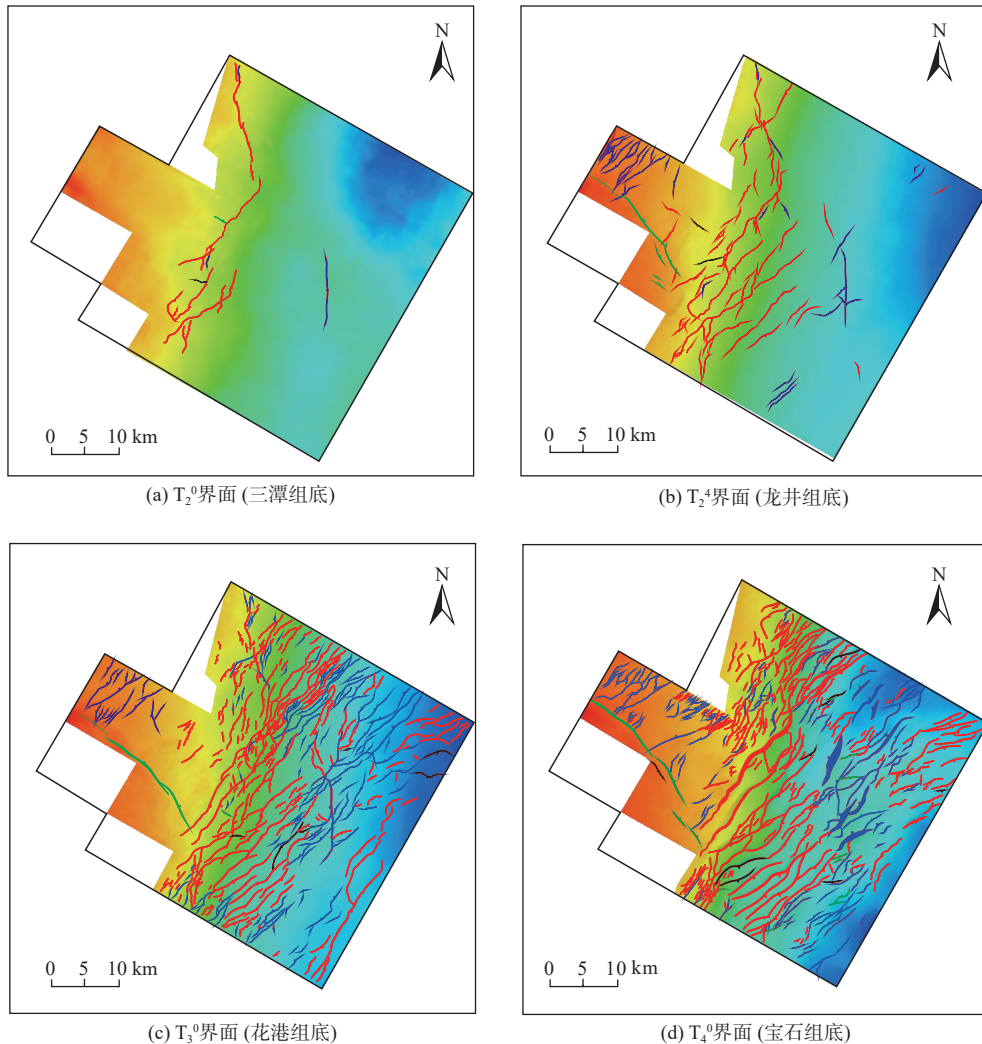
Fig.8 Combination styles in seismic profile in the Lengquanting area

为树枝状、半花状、梳状与负花状等典型走滑扭动构造样式; 东部低洼带主要发育 NNE 向伸展断裂, 局部发育扭动构造, 剖面上表现为反向或同向断阶、反“y”字形等构造样式。

3.2 断裂平面特征

由研究区的典型构造界面断裂体系分布及倾向特征图(图 9)可见, 西湖凹陷冷泉亭地区断裂构造平面展布规律性明显, 即绝大多数断裂为 NNE 或 NE 向展布, 规模较大的有冷泉亭断裂带、平湖断裂东北缘分支等。受区域剪切应力影响, 少数断层呈近 EW 向分布, 而冷泉亭边界走滑断层等极少数断裂呈 NW 向展布。由 T_2^0 , T_2^4 , T_3^0 和 T_4^0 构造

界面所揭示的断裂体系分布特征表明, 西湖凹陷冷泉亭地区在其深部断陷构造层的断裂比较发育, 断裂全区密集分布, 浅层的断裂主要发育于西侧坡折带。从平面上看, 冷泉亭地区断裂分区差异性活动特征显著, 表现为西部缓坡带以发育同、反向断阶正断层为主, 平面展布为带状; 中部坡折带断裂极其发育, 以同、反向走滑/扭动断裂为主, 断裂呈 NE 向展布; 东部低洼带则以同向正断层为主, 多呈杂乱分布; 西南隆起区发育的一条 NW 向走滑断裂带限制了其东北部小断裂的活动。此外, 冷泉亭地区断裂的倾向也复杂多变, 从倾向特征图可以看出, 断层倾向总体以东倾或西倾为主, 少量为北倾和南倾。



(a) 上新统三潭组底界面; (b) 中新统龙井组底界面; (c) 渐新统花港组底界面; (d) 始新统宝石组底界面

图 9 冷泉亭地区关键构造界面断裂体系分布及倾向特征

Fig.9 Distribution and dipping of key structural interface in the fault systems of the Lengquanting area

3.3 断裂空间分布规律

冷泉亭地区断裂空间展布规律具有明显的分区分层差异性。分区差异表现为:西部缓坡带主要发育同向张性、扭张性断裂,呈带状展布,断裂走向与西湖凹陷走向基本一致;中部坡折地区主要发育同、反向走滑扭动断裂;东部低洼带主要以同向正断层为主,平面分布较为杂乱(图 9)。分层差异性表现为: T_3^0 反射界面以下断裂构造比较发育,主要为扭张、张扭与走滑断层,数量众多; T_2^5 反射界面以上断裂主要在西缘缓坡有少量发育,而 T_2^0 反射界面以上处于区域沉降阶段,弱继承性断裂仅发育于西缘坡折带。

4 断裂活动特征与演化过程

4.1 断裂活动期次与强度

结合东海盆地的区域动力背景和盆地演化过程分析认为,西湖凹陷冷泉亭地区断裂活动期次宏观上可以划分为 5 个阶段 7 个活动期次(图 10),即断陷期的 I 幕(古新统沉积期)、II 幕(宝石组沉积期)、III 幕(平湖组下段沉积期)、断拗转换期(平湖组中段—上段沉积期)、初始拗陷期(花港组沉积期)、稳定拗陷期(玉泉组—柳浪组沉积期)与区域沉降期(三潭组沉积期至今)。断陷 I 幕为古新统

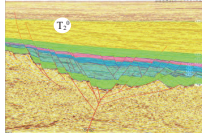
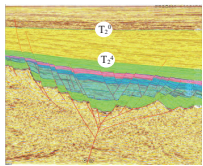
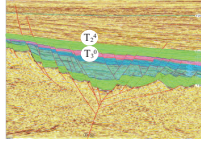
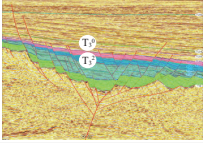
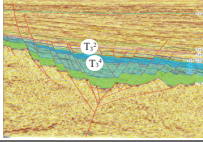
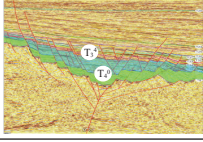
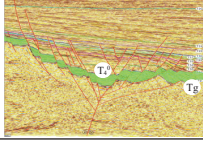
时期	界面	演化	期次	应力场	断裂活动特征	代表性地震解释剖面	主要发育地区
上新世	三潭组	区域沉降期	⑦	弱伸展	(微弱)伸展活动		西侧坡折带
中新世—渐新世	柳浪组—玉泉组	稳定拗陷及反转期	⑥	弱伸展	(较弱)伸展活动		西侧坡折带 冷泉亭断裂带
	花上段—花下段	初始拗陷期	⑤	斜向伸展	(较弱)右行扭张 (较强)右行扭张		西侧坡折带 中北部洼陷带
始新世	平上段	断拗转换期	④	斜向伸展	(强烈)右行扭张		全区广泛发育
	平下段	断陷 III 幕	③	斜向伸展	(较强)右行扭张		全区广泛发育
	宝上段	断陷 II 幕	②	斜向伸展	(较强)左行扭张		全区广泛发育
	宝下段				(强烈)左行扭张		
古新世	古新统	断陷 I 幕	①	斜向伸展	(强烈)左行扭张		全区广泛发育

图 10 冷泉亭地区断裂分期活动特征

Fig.10 Evolution of fault activity in the Lengquanting area

沉积时期, 该时期西湖凹陷处于 NW—SE 斜向伸展应力状态, 断层大量发育, 具有强烈左行扭张活动特征, 控制了该地区的基本构造格局和沉积充填; 断陷 II 幕为宝石组沉积时期, 该时期断层全区广泛发育, 且控沉作用也很明显; 断陷 III 幕为平湖组下段沉积时期, 该时期太平洋板块俯冲方向由 NNW 向转变为 NWW 向, 应力状态由左旋转变为右旋, 断裂表现为强烈右旋扭张特征, 控沉作用减弱。断拗转换期为平湖组中段—上段沉积期, 断裂活动强度较断陷期减弱, 断层对沉积控制作用也进一步减弱; 初始拗陷期为花港组沉积期, 花下段断裂具有较强的右行扭张特征, 花上段右行扭张减弱, 断层数量也随之减少, 主要分布在西缘缓坡带及冷泉亭断裂带; 稳定拗陷期为玉泉组—柳浪组沉积期, 此时研究区受到的伸展应力进一步弱化, 仅在西侧发育少量弱伸展断层; 区域沉降期为三潭组沉积期至今, 仅在西侧坡折带发育少量弱伸展断层。

4.2 断裂演化过程

盆地断裂系统形成和演化与所经历的构造运动密切相关, 西湖凹陷经历了断陷—断拗—拗陷—

反转—区域沉降的发展时期, 各地质时期的应力场决定了断裂系统的性质, 在不同构造单元, 由于基底结构和局部应力场的差异, 断裂的特征及演化也各不相同。

本文选取了 2 条典型地震剖面进行了平衡剖面恢复(图 10), 结合对断裂活动特征及区域应力场的分析, 将该地区的断裂构造演化分为 5 个时期 7 个阶段, 具体分析如下:

4.2.1 断陷期(古新统—平湖组下段沉积期)

(1) 断陷 I 幕(古新统沉积期)

晚白垩世—古新世, 新生太平洋板块推动库拉板块做 NNW 向运动, 对亚洲大陆东南缘斜向俯冲, 相对欧亚板块的俯冲角度由早期的 10° 变为 80° , 使得亚洲大陆东南缘处在左旋应力场控制下^[20], 板块俯冲引起地幔上拱, 使地壳上部发生张性拉裂, 为东海陆架盆地西带裂谷型断陷盆地的形成奠定了基础^[19,21]。发生在晚白垩纪和古新世之间的雁荡运动使盆地发育断块和半地堑裂谷^[22], 产生了一系列 NNE 向多具控制沉积和次级构造单元的同生正断裂, 走向以 NE 向为主, 如冷泉亭断裂(图 11a)。

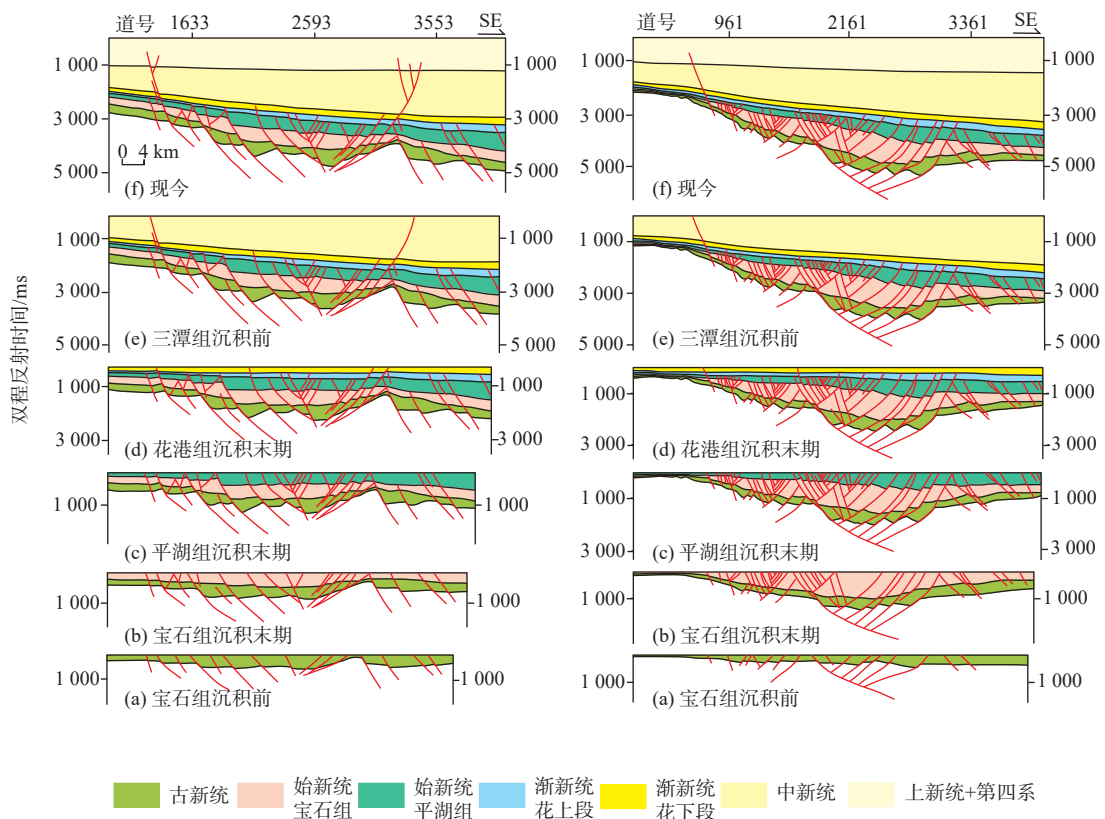


图 11 西湖凹陷冷泉亭地区典型构造演化剖面图

Fig.11 Tectonic evolution shown on typical profiles of the Lengquanting area

(2) 断陷Ⅱ幕(宝石组沉积期)

早始新世,太平洋板块对欧亚板块持续斜向俯冲,东海陆架区处于剪切拉张应力状态,西湖凹陷进入强烈断陷期,NNE或NE向展布的断陷断层大量发育,有些断层断至基底,部分断层规模较大,不断发育演变为生长断层,对沉积产生控制作用。受走滑活动影响,该时期断层张扭特征明显,剖面上构造样式表现为似花状、梳状(图4、11b)。此外,受古潜山影响,反向断层也大量发育,且古隆起对局部应力的分解,诱发了断层扭动转换^[12],从而产生了一系列张扭性断裂,剖面上表现为似花状和半花状等构造样式,该时期形成了多个NNE—NE向的地堑-半地堑、地垒-半地垒的构造格局,在这些地堑-半地堑凹部都充填堆积巨厚的沉积物^[21]。

(3) 断陷Ⅲ幕(平湖组下段沉积期)

中晚始新世,太平洋板块的俯冲方向发生偏转,总体呈NWW向,俯冲速度增大且方向转为近垂直,而印度板块汇聚速率减小,两个方向的板块俯冲拼贴形成一对右旋力偶,亚洲板块东南缘处于右旋压扭应力场^[19],加之西太平洋海沟的持续东撤,东海陆架盆地内伸展方向及拉张中心均发生了明显变化。断层发育减少,表现为 T_3^4 (平湖组底)层位上发现的断层最多(图10),向上断层逐渐减少,但在凹陷的边缘,沉积充填仍然受到断裂作用的控制,如西斜坡有些部位则可见地层超覆现象^[23]。

4.2.2 断拗转换期(平湖组中段—上段沉积期)

该时期区域拉张作用逐渐减弱,表现为断拗转换特征(图10、11c),平湖组沉积结束后,玉泉运动开始,以 T_3^0 为界,东海盆地应力状态由伸展转变为挤压,地层抬升剥蚀,岩浆上拱,盆内第1次构造反转运动由此形成,但大部分断层仍为正断层,表明此阶段处于西部斜坡带冷泉亭地区的反转强度低于伸展作用,且因为持续时间较短,断裂仍表现为明显的正断距,西湖凹陷由断陷阶段转变为拗陷阶段,从地震剖面上断裂断穿层位来看,断裂多位于 T_3^0 以下,主断裂继续活动,但对沉积的影响不大。

4.2.3 初始拗陷期(花港组沉积期)

渐新世初期,玉泉运动结束,西湖凹陷进入拗陷期(图11d),凹陷内处于应力相对松弛状态^[19],渐新统花港组广泛沉积。晚渐新世,太平洋板块向欧亚板块的运动速率有所增大(75~90 mm/a),以NW向为主,印度板块碰撞速率保持较低水平,约为45~50 mm/a,方向转变近N向,菲律宾板块向

中国大陆东南缘持续斜向俯冲,方向为NNW向,陆缘岛弧形成且不断发展,东海陆架盆地受挤压发生挠曲拗陷沉降^[24],此时西湖凹陷局部发生了以剪切挤压为主的构造事件(花港运动),西湖凹陷整体抬升,局部处于剥蚀状态,南段主要表现为地层翘倾,花港组地层与上覆地层为不整合接触,形成局部不整合面^[21,25],该时期冷泉亭地区断裂构造基本继承了断陷期的构造格局,部分断层继承性活动。

4.2.4 稳定拗陷期(玉泉组—柳浪组沉积期)

该时期地壳以不均一的整体下沉作用为主,使得研究区进入稳定沉降的拗陷阶段(图11e),盆地沉积范围变大。该时期构造运动处于相对稳定的状态,同沉积断层不发育。中新世末,随着菲律宾海板块整体停止扩张并向北移动,东亚陆缘中段以东成为菲律宾海板块俯冲带的一部分,太平洋板块向西俯冲的挤压力直接传递到东海陆架盆地,导致该区发生强烈的EW向挤压(龙井运动)^[26-27],从整个区域来看,由东到西褶皱强度逐渐减弱,到达本地区时,挤压应力基本消失,对本地区影响微乎其微,因此,渐新世以后本地区基本是单一斜坡,而无挤压构造形迹^[10]。该时期断裂活动微弱,断裂仅在西缘缓坡带有少量发育,部分断层继承性活动。

4.2.5 区域沉降期(三潭组沉积期至今)

区域沉降期是指三潭组沉积期及以后时期(图11f)。龙井运动后,地层褶皱、抬升并遭受剥蚀夷平,深凹部位先发育早上新世充填沉积,随着弧后拉张中心向东迁移至冲绳海槽,西湖凹陷进入区域沉降期,东海盆地全域广泛沉积上新统一第四系的海陆过渡相-浅海相碎屑岩^[28],地层产状稳定。由于冲绳海槽南部海槽凹陷的张裂运动,使得陆架盆地应力场再次发生转变,由挤压应力场转变为张性剪切应力场,形成了一系列近EW向剪切平移断裂,具有张扭性。自此,西湖凹陷构造格局基本定型。

5 结论

(1)西湖凹陷冷泉亭地区断裂构造十分发育,按运动学特征断裂构造类型可分为张性断层、张扭性断层及走滑断层。张性断层及张扭性断层在研究区具有发育数量众多、规模大、空间展布规律明显等特征;而走滑断层仅分布在冷泉亭构造带西侧,对次级断裂发育及展布具有重要控制作用。按级别可分为二至四级断层,其中,冷泉亭等二级断层

对构造格局和沉积充填具有明显控制作用。

(2) 西湖凹陷冷泉亭地区断裂剖面组合样式复杂多样,有同向或反向断阶、“y”字形、半花状、树枝状、梳状等;断裂平面走向以 NNE、NE 向为主,且伸展扭动特征明显。断裂分区、分层差异活动特征明显,分区差异性表现为:西部缓坡带主要发育同向张性、扭张性正断裂,呈带状组合样式;中部坡折带主要发育同、反向走滑扭动断裂;东部低洼带主要以同向正断层为主,平面分布较为杂乱。分层差异性表现为: T_3^0 反射界面以下断裂构造比较发育,主要为扭张、张扭与走滑断层,而 T_2^5 反射界面上断裂仅在西缘缓坡带有少量发育。

(3) 西湖凹陷冷泉亭地区断裂的活动期次宏观上可以划分为 5 个阶段 7 个活动期次:即断陷期(古新统一平湖组下段沉积期)的 3 幕强扭张活动,断拗转换期(平湖组中段—上段沉积期)大中型断层的继承性张扭活动,初始拗陷期(花港组沉积期)主干断层的继承性弱扭张活动,稳定拗陷期(玉泉组—柳浪组沉积期)西缘坡折带主干断层及冷泉亭主干断层继承性弱伸展活动,以及区域沉降期(三潭组沉积期至今)剪切应力作用导致的西缘坡折带主干断层继承性微弱伸展活动。

(4) 西湖凹陷冷泉亭地区经历的多期伸展-挤压构造旋回主要是太平洋板块对欧亚板块的俯冲方向,以及速率改变、印度板块、菲律宾海板块俯冲作用,和东海盆地深部地质作用等多重地质作用的结果,使得该区的应力场在不同时期发生多期转换,西湖凹陷冷泉亭地区断裂特征及成因演化正是上述地球动力学特征的表现形式与浅层响应。

参考文献:

- [1] 宋小勇. 东海盆地西湖凹陷构造样式及其对油气聚集的控制 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2007.
SONG X Y. Tectonic pattern of Xihu Sag in East China Sea Basin and its control over oil and gas accumulation [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). 2007.
- [2] 雷闯, 叶加仁, 吴景富, 等. 低勘探程度盆地成藏动力学过程: 以西湖凹陷中部地区为例 [J]. 地球科学, 2014, 39(7): 837-847.
LEI C, YE J R, WU J F, et al. Dynamic process of reservoir formation in basins with low exploration degree: a case study of the central part of Xihu Depression [J]. Earth Science, 2014, 39(7): 837-847.
- [3] 蒋一鸣, 邹玮, 刘金水, 等. 东海西湖凹陷中新世末反转背斜构造成因机制: 来自基底结构差异的新认识 [J]. 地球科学, 2020, 45(3): 968-979.
- JIANG Y M, ZOU W, LIU J S, et al. Genetic mechanism of Late Miocene anticlinal inversion in Xihu Sag, East China Sea: a new understanding from basement structural differences [J]. Earth Science, 2019, 45(3): 968-979.
- [4] 李朝阳, 魏琳, 刁慧, 等. 西湖凹陷孔雀亭构造平湖组油气来源及充注特征 [J]. 石油科学通报, 2021, 6(2): 196-208.
LI Z Y, WEI L, DIAO H, et al. Hydrocarbon source and charging characteristics of Pinghu Formation, Zhuoting Structure, Xihu Sag [J]. Bulletin of Petroleum Science, 2021, 6(2): 196-208.
- [5] 张建培, 张涛, 刘景彦, 等. 西湖凹陷反转构造分布与样式 [J]. 海洋石油, 2008, 28(4): 14-20.
ZHANG J P, ZHANG T, LIU J Y, et al. Distribution and pattern of inverted structures in Xihu Sag [J]. Offshore Oil, 2008, 28(4): 14-20.
- [6] 高伟中, 田超, 赵洪, 等. 西湖凹陷平湖斜坡带非构造油气藏勘探潜力探讨 [J]. 海洋石油, 2015, 35(1): 22-26.
GAO W Z, TIAN C, ZHAO H, et al. Exploration potential of non-structural oil and gas reservoirs in Pinghu slope zone of Xihu Sag [J]. Offshore Oil, 2015, 35(1): 22-26.
- [7] 戴伊宁. 西湖凹陷西斜坡新生代构造特征的差异性及成因机制 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2021.
DAI Y N. Differences of Cenozoic tectonic features and genetic mechanisms of the western slope of Xihu Sag [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2021.
- [8] 秘丛永. 西湖凹陷中央反转带和平湖斜坡带断裂特征及演化 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
MI C Y. Fault characteristics and evolution of central inversion zone and Pinghu slope zone in Xihu Depression [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [9] 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, 405.
HU W S, CAI F, HU F, et al. Tectonic characteristics and evolution rules of rift transition in Pinghu slope zone, Xihu Sag, East China Sea [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(3): 7-12, 405.
- [10] 周祥林, 高伟中, 张建培, 等. 东海西湖凹陷平北断裂特征及其对油气成藏的控制 [J]. 上海国土资源, 2014, 35(2): 54-57.
ZHOU X L, GAO W Z, ZHANG J P, et al. Characteristics of Pingbei fault and its control on oil and gas accumulation in Xihu Sag, East China Sea [J]. Shanghai Land and Resources, 2014, 35(2): 54-57.
- [11] 唐贤君, 蒋一鸣, 张建培, 等. 东海盆地西湖凹陷平北区断层断裂特征及其对圈闭的控制 [J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(8): 34-43.
TANG X J, JIANG Y M, ZHANG J P, et al. Fault characteristics of fault depression in Pingbei area of Xihu Sag, East China Sea Basin and its control over traps [J]. Marine Geology Frontiers, 2019, 35(8): 34-43.
- [12] 刘亚茹, 周平, 唐贤君. 西湖凹陷平北区古隆起发育特征及其对断裂的控制作用 [J]. 上海国土资源, 2020, 41(1): 64-68.

- LIU Y R, ZHOU P, TANG X J. Development characteristics of paleo-uplift in Pingbei area of Xihu Depression and its controlling effect on faults [J]. Shanghai Land and Resources, 2019, 41(1): 64-68.
- [13] 杨兰. 东海盆地西湖凹陷平湖斜坡带新生代圈闭类型及特征研究 [J]. 化工管理, 2019(10): 99-100.
- YANG L. Research on the types and characteristics of Cenozoic traps in Pinghu slope zone, Xihu Sag, East China Sea Basin[J]. Chemical Industry Management, 2019(10): 99-100.
- [14] 李倩, 李坤, 庄建建, 等. 西湖凹陷西斜坡断层-岩性圈闭形成条件探讨 [J]. 海洋石油, 2022, 42(2): 14-22, 38.
- LI Q, LI K, ZHUANG J J, et al. Discussion on the formation conditions of fault-lithology trap in west slope of Xihu Depression[J]. Offshore Oil, 2022, 42(2): 14-22, 38.
- [15] 李峻颀, 蒋一鸣, 侯国伟, 等. 坡折带对油气圈闭发育的约束效应: 以平湖斜坡带孔雀亭区平湖组为例 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41(3): 141-150.
- LI J J, JIANG Y M, HOU G W, et al. Constraint effect of slope break zone on hydrocarbon trap development: a case study of Pinghu Formation in Zhuoting Area, Pinghu slope zone [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2019, 41(3): 141-150.
- [16] 苏奥, 贺聪, 陈红汉, 等. 构造反转对西湖凹陷中部油气成藏的控制作用 [J]. 特种油气藏, 2016, 23(3): 75-78.
- SU A, HE C, CHEN H H, et al. Controlling effect of tectonic inversion on hydrocarbon accumulation in central Xihu Depression[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2016, 23(3): 75-78.
- [17] 朱宝衡, 谢春雨, 刘苗, 等. 西湖凹陷平北地区断裂特征及控沉、控圈分析 [J]. 海洋石油, 2022, 42(3): 1-10.
- ZHU B H, XIE C Y, LIU MIAO, et al. Fault characteristics and analysis of subsidence control and zone control in Pingbei area of Xihu Sag[J]. Offshore Oil, 2022, 42(3): 1-10.
- [18] 张尚虎, 黄建军, 李昆, 等. 西湖凹陷孔雀亭地区复合圈闭发育模式与油气富集差异控制因素 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(1): 128-137.
- ZHANG S H, HUANG J J, LI K, et al. Development model of composite trap and controlling factors of oil and gas accumulation difference in Zhuoting area, Xihu Sag [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2019, 43(1): 128-137.
- [19] 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 Z G, WANG P, QI P, et al. Regional geological setting and tectonic evolution of the East China Sea Basin[J]. Earth Science, 2016, 41(3): 546-554.
- [20] 陶瑞明. 从西太平洋板块构造探讨东海陆架盆地形成机制和类型划分 [J]. 中国海上油气地质, 1994(1): 16-22.
- TAO R M. Discussion on the formation mechanism and type division of East China Sea shelf basin from the Western Pacific plate tectonics[J]. China Offshore Petroleum Geology, 1994(1): 16-22.
- [21] 李武显, 周新民. 中国东南部晚中生代俯冲带探索 [J]. 高校地质学报, 1999, 5(2): 45-50.
- LI W X, ZHOU X M. Exploration of Late Mesozoic subduction zone in southeast China[J]. Geological Journal of Universities, 1999, 5(2): 45-50.
- [22] ZHANG J P, LI S Z, SUO Y H. Formation, tectonic evolution and dynamics of the East China Sea Shelf Basin[J]. Geological Journal, 2016, 162-175.
- [23] 李上卿. 东海西湖凹陷新生代地质构造特征与演化 [J]. 海洋石油, 2000(2): 8-14.
- LI S Q. Cenozoic geological structure characteristics and evolution of Xihu Sag, East China Sea[J]. Offshore Oil, 2000(2): 8-14.
- [24] 朱立新, 宋在超. 东海西湖凹陷原型盆地构造格架与演化分析 [J]. 海洋石油, 2016, 36(1): 1-6.
- ZHU L X, SONG Z C. Tectonic framework and evolution analysis of the prototype basin of Xihu Sag, East China Sea[J]. Offshore Oil, 2016, 36(1): 1-6.
- [25] 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 Z K, DING F, ZHAO H. Structural evolution characteristics and division of hydrocarbon migration and accumulation units in Xihu Sag[J]. Shanghai Land and Resources, 2018, 39(4): 75-78.
- [26] 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 X H, JIANG Y M, TANG X J. Basin formation setting, prototype basin evolution and exploration implications in Xihu Depression[J]. China Offshore Oil and Gas, 2019, 31(3): 1-10.
- [27] CUI X, DAI L M, LI S Z, et al. Control of strike-slip and pull-apart processes to tectonic transition of the southern East China Sea Shelf Basin[J]. Geological Journal, 2019, 54(2): 850-861.
- [28] 梁连喜, 蒲庆南, 梁若冰, 等. 东海西湖凹陷地质结构与局部构造特征 [J]. 海洋地质译丛, 1997(3): 1-6.
- LIANG L X, PU Q N, LIANG R B, et al. Geological structure and local structural characteristics of Xihu Sag, East China Sea[J]. Collection of Marine Geology Translations, 1997(3): 1-6.

Characteristics and evolution of fault structures in Lengquanting area of Xihu Sag

WU Liang¹, LI Kun², ZHOU Feng², XIE Chunyu², TANG Daqing^{1*}, ZHANG Yongjie¹

(1 Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2 Institute of Exploration and Development, SINOPEC Shanghai Offshore Oil & Gas Company, Shanghai 200120, China)

Abstract: The Lengquanting area is a major hydrocarbon exploration area of the Xihu Sag, and the fault structures in this area are highly developed due to multi-stage tectonic movements, and plays a very important role in controlling the sedimentary tectonic evolution and hydrocarbon accumulation in the basin. Based on the detailed structural interpretation of the latest 3D seismic data in the Lengquanting area of the Xihu Sag, we analyzed systematically the fault structure types, geometric characteristics, and genetic evolution of the area to understand the development mechanisms of faults, and the key controlling factors of hydrocarbon accumulation. Results show that the faults in the area are mainly normal faults and strike-slip faults. There are a large number of faults and their activities are characteristic of zoning and stratification in space. Affected by the regional stress field, the fault structure of the study area has experienced five major stages: ① Fault depression period (Paleocene-lower Pinghu Formation deposition period), with three episodes of strong torsional-tensile activities; ② Fault-depression transition period (middle-upper Pinghu Formation deposition period), with inherited tensional-torsional activities of large and medium-sized faults; ③ Initial depression period (Huagang Formation deposition period), with inherited weak torsional-tensile activities of the main faults; ④ Stable depression period (Yuquan Formation-Liulang Formation deposition period), with inherited weak extensional activities of the main faults in the western slope break zone and the main fault in the area; ⑤ Regional subsidence period (from Santan Formation deposition period to the present), with weak extensional activities of the main faults in the western slope break zone caused by shear stress.

Key words: fault structure; structure features; genetic evolution; Lengquanting area; Xihu Sag