

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2011.05067

# 西湖凹陷裂陷期构造样式及其对沉积充填的控制作用

张敏强, 徐发, 张建培, 张田

(中国海洋石油(中国)有限公司 上海分公司, 上海 200030)

**摘要:**西湖凹陷裂陷期构造主要是指从断陷开始形成(T<sub>g</sub>界面)至始新世末(T<sub>30</sub>界面)的构造,它控制着盆内裂陷期地层的发育和沉积体系的总体展布特征。裂陷期原盆地的构造格架总体为一复杂的半地堑结构,主要受控于三组 NE 向的断裂带:东缘陡坡断裂带、中央洼陷断裂带、西部缓斜坡断裂带。西湖凹陷裂陷期古构造格局对裂陷期构造层序沉积、沉降中心的分布及迁移具有重要的控制作用。裂陷期沉积—构造事件具有幕式特征,是对晚中生代时期开始的太平洋板块相对于欧亚板块俯冲作用的局部响应。

**关键词:**裂陷期;构造样式;沉积中心;沉降中心;西湖凹陷

中图分类号:P736.1

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2011)05-0067-06

自 1980 年钻探第一口探井以来,东海陆架盆地西湖凹陷油气勘探工作取得了丰硕的成果,已发现若干个油气田及一批含油气构造。迄今为止,对于西湖凹陷的地质结构和构造演化的认识仍存在很大的争议,直接影响到盆地未来的油气勘探工作。其中,西湖凹陷的裂陷期构造主要是指盆地从断陷开始形成(T<sub>g</sub>界面)至始新世末(T<sub>30</sub>界面)的构造,它控制着盆内裂陷期地层的发育和沉积体系的总体展布特征,直接影响到西湖凹陷油气勘探的认识与前景评价。

本文综合近年来的研究成果,对西湖凹陷裂陷期构造特征及其对沉积的控制作用进行了较深入的讨论,同时,结合区域动力学背景,探讨西湖凹陷裂陷期沉积—构造事件的深层次成因机制,为下一步的油气勘探工作奠定一定的理论基础。

## 1 区域地质背景

西湖凹陷位于东海陆架盆地的东北部,呈北北东向展布,南北长约 440 km,东西宽约 110 km,面积约  $5.18 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,是中国近海面积与沉积规模最大的中生代含油气凹陷之一。西面自北而南与虎皮礁隆起、长江拗陷、海礁隆起、钱塘凹陷及渔山东隆起等 5 个构造单元相接,东邻钓鱼岛褶皱带,南北以低凸起与钓北凹陷、福江凹陷相邻。西湖凹陷总体上可划分出 3 个构造带,即东缘陡坡断裂带、中

央洼陷反转构造带、西部斜坡带(图 1)。

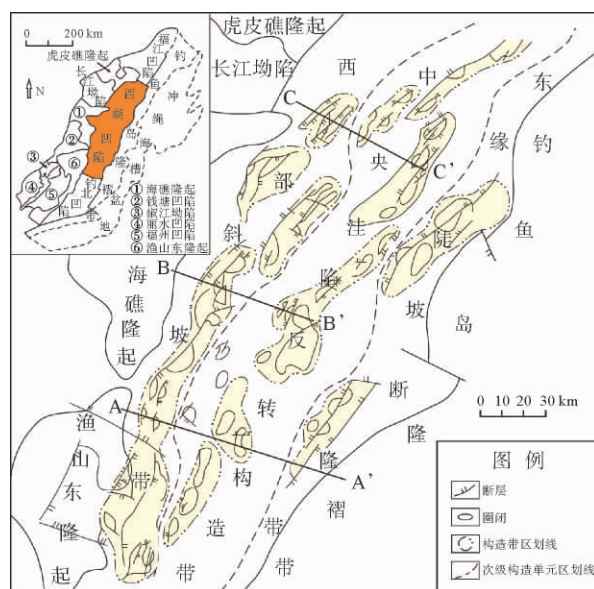


图 1 西湖凹陷构造区划示意图(据文献[1],略有修改)

Fig. 1 Schematic tectonic map of Xihu sag

西湖凹陷新生代沉积凹陷是在晚白垩世末期的构造背景上发育起来的,研究区新生代沉积地层自下而上主要由始新统平湖组以下地层(由于缺少钻井、测井、同位素、古生物等资料,地层属性尚难确定——古新统?、始新统平湖组、渐新统花港组、中新统龙井组、玉泉组和柳浪组、上新统三潭组及第四系东海群组成。

西湖凹陷形成于太平洋板块俯冲产生的弧后伸展环境,是由弧后深部物质上涌和软流圈上升造成拉伸形成的裂谷盆地<sup>[2-3]</sup>。西湖凹陷大体上经历了裂陷→拗陷→区域沉降的演化过程,可以划分为 3

作者简介:张敏强(1958—),男,博士,高级工程师,长期从事综合地质研究工作。

收稿日期:2010-11-13;改回日期:2011-01-14。 周立君编辑

个构造演化阶段:盆地开始形成(古新世?)—始新世裂陷期、渐新世—中新世反转期、上新世—更新世沉降期。

西湖凹陷整体上具有双层结构,由裂陷期构造格架和拗陷期构造格架两部分组成,两者之间以始新世末 T30 不整合界面为界。裂陷期原盆地构造格架总体上为一复杂的半地堑结构,地层由东向西上超,地层变薄。凹陷中部和东部边缘的同沉积断裂控制着凹陷的最大沉降带,西部斜坡发育东倾的调节性断裂,形成多级断阶构造。凹陷南部地区西斜坡边缘断裂的强烈活动则导致凹陷南部具有近似地堑的构造样式。拗陷期原型盆地具有明显的构造反转特征,经历了渐新世末和中新世末的挤压反转,形成两个明显的构造不整合面(T20 和 T10 不整合面)。其中,中新世末的反转构造最为强烈,构造样式多样,以高角度基底卷入式挤压反转构造为主,对油气聚集成藏具有明显的控制作用<sup>[4-5]</sup>。本文重点从研究西湖凹陷裂陷期的构造样式和沉积、沉降中心的迁移规律出发,探寻两者间的内在联系,同时,结合区域构造背景,探讨其形成、发展的深部地球动力学因素,最终为指导下一步的油气勘探工作服务。

## 2 裂陷期构造样式

西湖凹陷的裂陷期构造主要是指盆地从断陷开始形成(T<sub>g</sub> 界面)至始新世末(T30 界面)的构造,它控制着盆内裂陷期地层的发育和沉积体系的总体展

布特征。研究表明,西湖凹陷裂陷期原盆地的构造格架总体上为一复杂的半地堑结构,主要受控于 3 组 NE 向的断裂带:①东缘陡坡断裂带,主干盆缘断裂是一条区域性西倾断裂,伴生反倾羽状断裂或同向断阶;②中央洼陷断裂带,控制着盆地中部洼陷带的分布,发育断阶、次级地堑及地垒等构造,主控同沉积断裂以西倾为主,具有“Y”字型等断裂组合样式,不同区带的断裂构造样式存在明显变化;③西部缓斜坡断裂带,多发育东倾的调节性断裂,形成多级断阶构造,或由规模较大的反向断裂与伴生断裂组合形成“Y”字型等断裂样式。

### 2.1 东缘陡坡断裂带

据现有资料推测,盆地东缘存在着控制盆地发育的盆缘断裂带。地震剖面上识别的盆缘断裂深度在 10 km 以上,在深部可能终止于下地壳的韧性剪切带,推测是深达上地壳下部的控盆大断裂,形成了控制裂陷期最大沉降带及东部边界。在凹陷北部和南部的地震剖面都可观察到东缘大型盆缘断裂的存在(图 2),断裂面均向西倾,倾角 45°~50°,往深部变缓。其伴生断裂常见两种组合样式:(1)反向调节断层,呈“Y”字型或梳状组合;(2)同向羽状断裂组合,发育同向伴生断阶,形成较为典型的陡坡断裂带。平面上,该断裂呈弯曲状沿盆地东缘展布,在凹陷中部可能存在转换带,沉降较小,而东北部和东南部沉降较大,控制着裂陷期盆内两个相对沉降带。

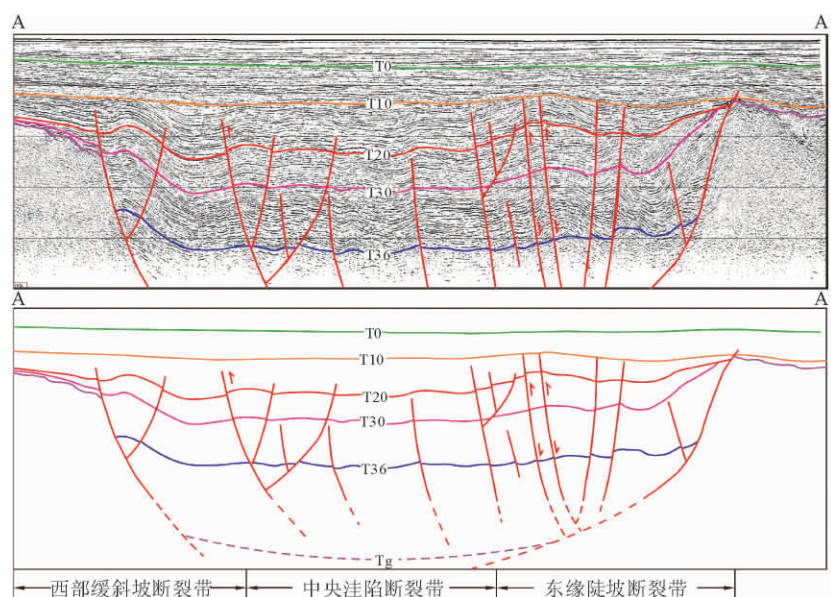


图 2 西湖凹陷南部 A-A' 地震剖面展示的东缘陡坡断裂带构造样式

Fig. 2 Structural styles of the fault zone on east steep slope in A-A' seismic profile in southern Xihu sag



## 2.2 中央洼陷断裂带

中央洼陷断裂带发育有2~3条规模较大的同沉积断裂,形成凹陷中部的次级地堑、地垒或同沉积断阶带。这些断裂在裂陷期强烈活动,生长指数达1.5~3,常常控制着T30界面以前盆地次级的沉降带和沉积中心及主要烃源岩分布。在大多数剖面上,这些断裂早期表现为正断层,倾角较大,可达 $50^{\circ}$ ~ $60^{\circ}$ ,在下部变缓呈犁形,断裂面倾向在盆地不同部位发生变化,如北部主要向东倾,中部主要向西倾,南部则形成次级的地堑、地垒构造。伴生断裂具有“Y”字型、复合“Y”字型、羽状等组合,后期多沿先存断裂面发生构造反转(图3)。

平面上,这些断裂由于受到后期的挤压反转作用的改造,其走向变化大,但总体上呈北东向的斜列状排列,并导致早期盆地充填的最大沉积中心也具斜列状特点。更进一步地,中央洼陷断裂带不同部位的构造样式存在着明显差异,如中北部存在一与发育地垒构造有关的、较为明显的低凸起,低凸起上沉积变薄,其东侧为最大的洼陷沉降带,西侧发育次一级的洼陷。中南部最大沉降中心则偏于凹陷的中部,并由于多个次级半地堑的发育形成多个次级沉降中心。

## 2.3 西部缓斜坡断裂带

西部缓斜坡断裂带裂陷期断裂活动较弱,一般发育东倾的调节性同沉积断裂,形成多级断阶构造,或由规模较大的反向断裂与伴生断裂组合形成“Y”字型等断裂样式。斜坡与洼陷带一般以东倾的调节性断裂带为界,构成斜坡与洼陷过渡的断裂坡折带,

并对沉积体系域的分布起到一定的控制作用。总体上,可划分出下列几种斜坡带类型:

(1)多米诺断阶斜坡带:西部缓斜坡断裂带北部以发育一系列多米诺(骨牌式)反向断阶为特征(图4),局部发育次级地堑或地垒构造,对局部沉积中心具有明显的控制作用。这些断阶在后期的挤压反转或不明显反转。

(2)断裂坡折带:西部缓斜坡断裂带中部与中央洼陷-反转构造带之间常存在一断裂枢纽带或坡折带,对沉积起着重要的控制作用。断裂坡折带控制着来自斜坡的三角洲、受潮汐作用影响的三角洲或低水位体系域的沉积中心,同时,这一部位也是滚动背斜广泛发育的地带。西部缓斜坡断裂带南部的边缘断裂等同沉积断裂均构成古构造枢纽带(断裂坡折带),断裂生长系数约为2~3,这些断裂在后期挤压反转常形成简单断展背斜,构成区内重要的圈闭构造。

(3)简单斜坡带:仅发育少量断裂的简单斜坡带,且后期反转弱。

## 3 裂陷期沉积与沉降中心分布

西湖凹陷经历过多期的构造演化,不同构造阶段的古构造格局对盆地整体的沉积充填具有明显的控制作用。本研究着重探讨凹陷裂陷期的沉积、沉降中心的分布及其迁移与古构造格局的关系。研究表明,凹陷内各构造层序的沉积、沉降中心明显不同并发生过明显的迁移,这些变化受控于凹陷的古构造格架样式,特别是主要同沉积断裂的差异活动和演化。

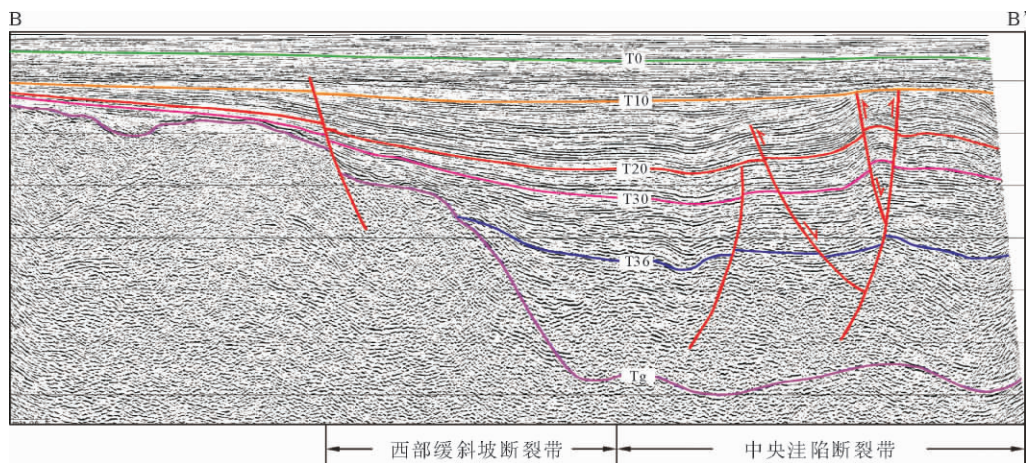


图3 西湖凹陷中部B-B'地震剖面展示的中央洼陷断裂带“Y”字型断裂组合

Fig. 3 “Y”-shaped faults in the central depression in B-B' seismic profile in central Xihu sag

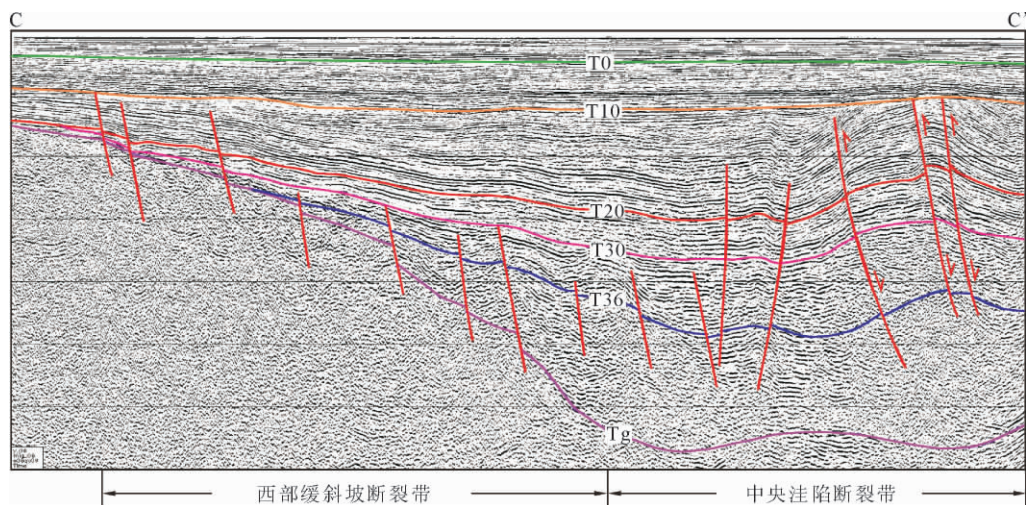


图 4 西湖凹陷北部 C-C'地震剖面展示的西部缓斜坡断裂带多米诺骨牌构造

Fig. 4 Domino structure in the fault zone on the west gentle slope in C-C' seismic profile in northern Xihu sag

从裂陷期构造层序的厚度分布不难看出(同时考虑了主要不整合面的剥蚀量)(图 5A),裂陷期总体沉积厚度较大,凹陷中部大部分地区沉积厚度均较大,盆地存在东北部和东南部两个沉降相对较大的沉降中心;在凹陷的中间呈 NW—SE 向展布的相对低凸起区,沉积厚度薄,分隔了南北两个沉积中心。位于凹陷东北部的最大沉降带受到东缘陡坡断裂带和中部洼陷断裂带的控制,沉积厚度呈 NE—SW 向展布,沉积厚度较大;东南部裂陷期沉积厚度最大,以东洼陷带为沉积中心,其形成受控于西部缓斜坡断裂带和中央洼陷断裂带。此外,凹陷南部局部构造的活动差异、次级地堑和地垒等同沉积构造可造成局部厚度的明显变化,如沿西部斜坡带附近的同沉积断裂的活动形成了次级的沉降中心,沉积充填呈 NE—SW 向展布。由于凹陷内的沉积充填以相对浅水的沉积相为主,盆地总体为饱和型盆地,最大沉积厚度带可大体反映盆地的最大沉降带。

始新统平湖组以下构造层序(Tg-T36)代表裂陷早期盆地开始断陷形成到始新统平湖组开始沉积之前的沉积充填,从构造层序的沉积厚度分布(图 5B)可见,厚度带位于盆地中部的断洼带,最大的沉降-沉积中心位于西湖凹陷中南部,受中央洼陷断裂带的控制;凹陷南端西斜坡断阶带有一次级沉积中心,分布范围小,主要受西部缓斜坡断裂带的影响;东北部具有一个相对较大的沉降中心,沿凹陷中部展布,受中央洼陷断裂带和东缘陡坡断裂带的控制。总体来说,裂陷早期盆地沉积厚度较大,凹陷中部地层厚度均较大,中南部沉降较大,主要受中央洼陷断裂带的控制;形成南北两个相对大的沉积与沉降中心,凹陷中部的同沉积断裂的强烈活动控制着整个

凹陷的沉降和沉积充填,局部沉积厚度大的区域也明显受两侧或一侧同沉积断裂的影响。

始新统平湖组构造层序(T36-T30)代表强烈裂陷和裂陷晚期的沉积充填,T30 界面为裂陷和拗陷转换的裂后不整合面,并发生微弱的隆升、反转和剥蚀,在凹陷西部和中部比较明显,对原始沉积厚度的恢复产生影响。本次研究通过大量地震剖面解释追踪和主要钻井的标定,完成了 T36-T30 构造层序的残余厚度分布图(图 5C),并结合 T30 界面的剥蚀量分布恢复了 T36-T30 构造层序的原始沉积厚度分布(图 5D)。从残余厚度和原始沉积厚度差异来看,盆地东缘变化不大,盆地西缘和中央沉积厚度展布发生变化,北部现今所看到的近 E—W 向展布的沉积中心恢复原始沉积厚度呈 NE—SW 方向长条带状展布,并向南部延伸,在西斜坡附近形成一次级沉积中心,反映了凹陷北部的东缘陡坡断裂带和中央洼陷断裂带的明显活动。凹陷南部形态也发生了明显变化,残余厚度图上存在近 E—W 向展布的沉积中心恢复原始沉积厚度后呈近 NE—SW 方向展布,沉积中心范围明显扩大,沉积形态受两侧同沉积断裂的明显控制。总体来说,T36-T30(始新统平湖组)沉积期沉降中心分异较大,南北两侧分别形成两个范围较大的沉积中心,北部最大沉降中心沉积充填受东缘陡坡断裂带和中央洼陷断裂带的明显控制;南部沉积中心,沉积充填受西部缓斜坡断裂带和中央洼陷断裂带的控制。除此之外,盆地中部也形成了一些次级规模相对较小的沉积中心,西斜坡的中部存在一个次级的地堑构造,受控于西部缓斜坡断裂带;东北部也形成一个次级的沉积中心,受东缘陡坡断裂带的强烈控制。



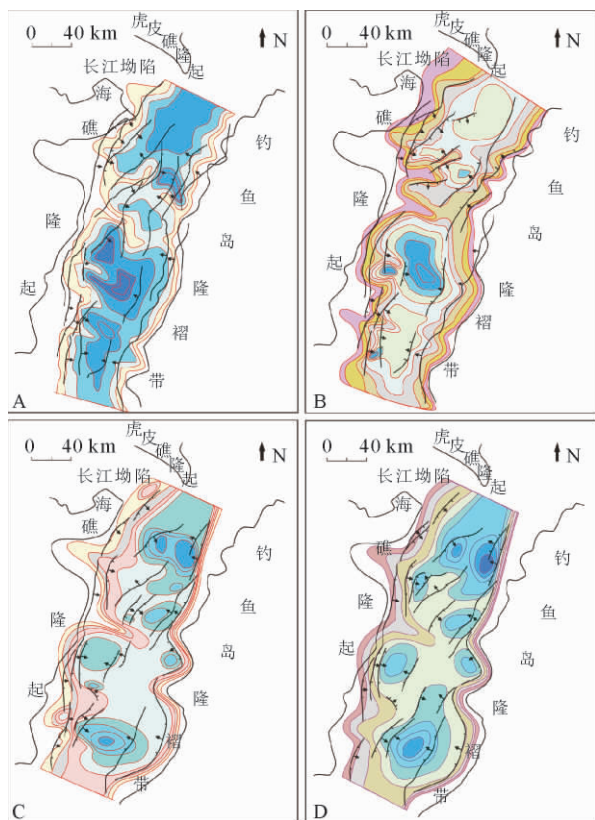


图5 西湖凹陷裂陷期不同作用阶段  
同沉积厚度与残余厚度分布

- A. 裂陷期构造层序(Tg-T30)残余厚度分布;  
B. 始新统平湖组以下地层(Tg-T36)同沉积厚度分布;  
C. 始新统平湖组地层(T36-T30)残余厚度分布;  
D. 始新统平湖组地层(T36-T30)原始沉积厚度分布

Fig. 5 Original and residual thickness of sediments in different stages of rifting phase, Xihu sag

- A. Residual thickness map of the sequence formed in rifting phase(Tg-T30); B. Original thickness map of sequence below Eocene Pinghu Formation(Tg-T36); C. Residual thickness map of Eocene Pinghu Formation(T36-T30); D. Original thickness map of Eocene Pinghu Formation(T36-T30)

#### 4 裂陷期沉积—构造事件成因机制

西湖凹陷作为东海陆架盆地的一个组成部分,其构造演化阶段是对东海陆架盆地构造演化特征的局部响应。东海陆架盆地是晚中生代在活动大陆边缘上发育起来的断陷盆地,其形成、发展与古太平洋板块相对于欧亚板块的俯冲作用有直接关系。晚侏罗世—早白垩世,古太平洋板块以快速低角度相对欧亚板块发生俯冲作用<sup>[6-7]</sup>。俯冲板块堆积产生热幔柱上涌、软流圈隆升,导致东海陆架区热隆起产生岩浆侵入和火山喷发,奠定了东海陆架盆地构造演化的基础。晚白垩世末,印度板块与欧亚板块碰撞,中国大陆东部向东大规模蠕散扩张。同时,古太平

洋板块相对欧亚板块俯冲角度的变化(由 $10^{\circ}$ 左右增加到 $80^{\circ}$ )引起弧后对流,使东海陆架盆地处于强劲的引张应力场中,形成以西湖—基隆等大断裂为主的NE向断裂体系。NE向断裂控制盆地沉降幅度,奠定盆地内拗陷、隆起“东西分带”的区域构造格局。晚白垩世时期,西部拗陷带发生裂陷,形成“箕状”断陷。古新世(?),裂陷中心迁移到东部,东部拗陷带开始裂陷,而西部拗陷带这种裂陷作用却没有得到继承性的发育而转为拗陷阶段。东部拗陷带则形成一系列地堑或半地堑型断陷。在这种构造背景下,形成了西湖凹陷裂陷期三组NE向的断裂带:东缘陡坡断裂带、中央洼陷断裂带和西部缓斜坡断裂带。

西湖凹陷裂陷期构造具有幕式特征,早期(即盆地开始断陷形成到始新统平湖组开始沉积之前)裂陷强度不大,伸展作用主要集中于盆地中部。此时,中部洼陷断裂带活动强烈,东缘陡坡断裂带和西部缓斜坡断裂带活动较弱。相应地,沉积与沉降中心位于凹陷中南部,其形成主要受控于中部洼陷断裂带。裂陷晚期(即始新统平湖组沉积时期),裂陷强度明显增大,东缘陡坡断裂带和西部缓斜坡断裂带开始显著活动,其中东缘陡坡断裂带活动最为强烈,以同向羽状断裂和反向调节断裂同时发育为代表;中部洼陷断裂带继承了早期的伸展样式持续活动,形成了一系列“Y”字型、复合“Y”字型、羽状等断裂组合样式;西部缓斜坡断裂带则形成多米诺断阶斜坡带、断裂坡折带和简单斜坡带等构造样式。3组NE向断裂带的共同作用,造成了始新统平湖组构造层序(T36-T30)具有南、北两个最大沉降中心。其中,北部沉降中心的形成受东缘陡坡断裂带和中央洼陷断裂带控制,南部沉降中心的形成受控于西部缓斜坡断裂带和中央洼陷断裂带。始新统平湖组沉积之后,地层发生微弱的隆升、反转和剥蚀,盆地处于裂陷到拗陷的转换阶段,形成了T30界面——裂陷和拗陷转换的裂后不整合面。裂陷与拗陷的转换作用,导致了西湖凹陷始新统沉积地层的厚度发生明显变化,使得西湖凹陷始新统平湖组沉积时期南、北部的沉积、沉降中心均由NE—SW方向长条带状展布转变为近E—W向展布,且沉积、沉降中心范围明显变小。

#### 5 结论

(1)西湖凹陷裂陷期原盆地的构造格架总体为一复杂的半地堑结构,主要受控于3组NE向的断裂带:①东缘陡坡断裂带,主干盆缘断裂是一条区域

性西倾断裂,伴生反倾羽状断裂或同向断阶;②中央洼陷断裂带,控制着盆地中部洼陷带的分布,发育断阶、次级地堑及地垒等构造,主控同沉积断裂以西倾为主,具有“Y”字型等断裂组合样式,不同区带的断裂构造样式存在明显变化。③西部缓斜坡断裂带,多发育东倾的调节性断裂,形成多级断阶构造,或由规模较大的反向断裂与伴生断裂组合形成“Y”字型等断裂样式。

(2)裂陷期构造层序沉积、沉降中心的分布及迁移受控于裂陷期古构造格局。裂陷盆地存在东北部和东南部两个相对沉降较大的沉降中心。位于凹陷东北部的最大沉降带受到东缘陡坡断裂带和中部洼陷断裂带的控制,东南部的最大沉降带受控于西部缓斜坡断裂带和中部洼陷断裂带。始新统平湖组以下构造层序(T<sub>g</sub>-T<sub>36</sub>)的最大沉积与沉降中心位于凹陷中南部,其形成受控于中央洼陷断裂带。始新统平湖组构造层序(T<sub>36</sub>-T<sub>30</sub>)存在北部和南部两个最大沉降中心,北部沉降中心的形成受东缘陡坡断裂带和中央洼陷断裂带控制,南部沉降中心的形成受控于西部缓斜坡断裂带和中央洼陷断裂带。

(3)西湖凹陷裂陷期沉积—构造事件具有幕式特征,裂陷早期(即盆地开始断陷形成到始新统平湖组开始沉积之前)伸展作用较弱,构造样式单一;裂陷晚期(即始新统平湖组沉积时期),伸展作用增强,构造样式复杂化。始新统平湖组沉积之后,盆地处于裂陷到拗陷的转换阶段,地层发生微弱的隆升、反转、剥蚀,相应地,沉积、沉降中心的规模也发生变化。西湖凹陷裂陷期沉积—构造事件的形成有其深层次的地球动力学背景,是对晚中生代时期开始的

太平洋板块相对于欧亚板块俯冲作用的局部响应。

#### 参考文献 (References)

- [1] 贾健谊,顾惠荣. 东海西湖凹陷含油气系统与油气资源评价[M]. 北京:地质出版社,2002. [JIA Jianyi, GU Huirong. Oil-Bearing Systems and Petroleum Assessment of the Xihu Sag in the East China Sea [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002. ]
- [2] 赵金海. 东海中、新生代盆地成因机制和演化(上)[J]. 海洋石油, 2004, 24(4): 6-14. [ZHAO Jinhai. The forming factors and evolution of the Mesozoic and Cenozoic basin in the East China Sea (prior)[J]. Offshore Oil, 2004, 24(4): 6-14. ]
- [3] 赵金海. 东海中、新生代盆地成因机制和演化(下)[J]. 海洋石油, 2005, 25(1): 1-9. [ZHAO Jinhai. The forming factors and evolution of the Mesozoic and Cenozoic basin in the East China Sea (posterior)[J]. Offshore Oil, 2005, 25(1): 1-9. ]
- [4] 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 Jianpei, ZHANG Tao, LIU Jingyan, et al. Distribution and style of inversed structures in Xihu Depression [J]. Offshore Oil, 2008, 28(4): 14-20. ]
- [5] 张敏强,钟志洪,夏斌,等. 东海西湖凹陷中南部晚中新世构造反转与油气运聚[J]. 中国海上油气, 2005, 17(2): 73-79. [ZHANG Minqiang, ZHONG Zhihong, XIA Bin, et al. Late Miocene tectonic inversion and hydrocarbon migration and accumulation in central and southern Xihu sag, East China Sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2005, 17(2): 73-79. ]
- [6] Maruyama S, Isozaki Y, Kimura G. Paleogeographic maps of the Japanese islands: plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present[J]. The Island Arc, 1997, 6(1): 121-142.
- [7] Isozaki Y. Jurassic accretion tectonics of Japan[J]. The Island Arc, 1997, 6(1): 25-51.

## STRUCTURAL PATTERN DURING THE RIFTING STAGE OF THE XIHU SAG AND ITS CONTROL OF SEDIMENT INFILLING

ZHANG Minqiang, XU Fa, ZHANG Jianpei, ZHANG Tian

(CNOOC (China) Co. Ltd., Shanghai, 200030)

**Abstract:** The structures of the Xihu Sag in the rifting stage include those formed from the onset of rifting (boundary T<sub>g</sub>) up to the Late Eocene (Boundary T<sub>30</sub>) in this paper. The Structural pattern is the factor controlling over the development of stratigraphy and the spatial distribution of depositional systems. The prototype of the basin during the rifting stage is a complicated half graben controlled by three groups of fault zone, i. e. the fault zone on east steep slope, the fault zone in central depression, and the fault zone on west gentle slope, all extending in NE direction. The paleo-structural pattern of the Xihu Sag during the rifting stage plays significant roles in the formation of sedimentary sequences, and the distribution and shifting of depositional and subsidence centers. The sedimentation and tectonic events are episodic as a local response to the subduction of the Pacific plate under the Eurasian plate starting from the late Mesozoic.

**Key words:** Xihu Sag; rifting stage; structural pattern; depocenter; subsidence center