唐贤君,钟荣全,陈永军,等. 东海盆地西湖凹陷斜坡区平湖断裂带分段性及其成因机制.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(6):2047-2060. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240244.
Tang Xianjun,Zhong Rongquan,Chen Yongjun,et al. Segmentation and Genetic Mechanism of Pinghu Fault Zone in Xihu Sag Slope Area,East China Sea Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2024,54(6):2047-2060. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240244.

东海盆地西湖凹陷斜坡区平湖断裂带分段性及其成因机制

唐贤君,钟荣全,陈永军,何新建,代 勇
中海石油(中国)有限公司上海分公司,上海 200335

摘要:为了揭示平湖断裂带的形成及演化过程,厘定大型断裂分段特征及其地层充填响应,深化对复杂断裂发育机制的认识,本文基于最新的三维地震资料,开展了平湖断裂带几何学、运动学分析,并结合区域应力场分析探讨了断裂成因及发育模式。研究结果表明:平湖断裂带是由NE走向与近NS走向交替出现的三个分段和五条主干断裂构成的"X"型断裂带;NE向断层段形成时间较早,具有分段发育特征,近NS向断层段形成时间较晚,控制了南、中、北段的分段链接;平湖断裂带复杂断裂的形成受始新世时期断裂分段生长发育和区域应力场旋转两种因素的共同控制;平湖断裂带断陷期生长演化过程划分为早期NE向断裂分段发育阶段、中期NE—近NS向断裂硬链接阶段和晚期近NS—NNE/NE向断裂张扭改造阶段。平湖断裂带发育演化的时空差异直接影响着该地区局部沉积、沉降中心迁移及裂后期挤压反转背斜的发育。

关键词:平湖断裂带;分段发育;成因机制;应力场旋转;西湖凹陷;东海盆地
doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240244 **中图分类号**:P548;P618.13 **文献标志码**:A

Segmentation and Genetic Mechanism of Pinghu Fault Zone in Xihu Sag Slope Area, East China Sea Basin

Tang Xianjun, Zhong Rongquan, Chen Yongjun, He Xinjian, Dai Yong
CNOOC China Limited, Shanghai Branch, Shanghai 200335, *China*

Abstract: In order to reveal the formation and evolution process of Pinghu fault zone, to determine the segmentation characteristics of large-scale faults and their geological filling response, and to deepen the understanding of the complex fault development mechanism, this article based on the latest 3D seismic data, conducts geometric and kinematic analysis of Pinghu fault zone. Combined with regional stress field analysis, the genesis and development mode of the faults are discussed. The research results

收稿日期:2024-10-02
作者简介:唐贤君(1985—),男,高级工程师,主要从事含油气盆地构造及石油地质方面的研究,E-mail:tangxj4@cnooc.com.cn
基金项目:中海石油(中国)有限公司重大科技专项项目(KJZX-2023-0101);中海石油(中国)有限公司综合科研项目(KJZH-2023-2103)
Supported by the Major Science and Technology Project of CNOOC (China) Co., Ltd. (KJZX-2023-0101) and the Comprehensive Research Project of CNOOC (China) Co., Ltd. (KJZH-2023-2103)

indicate that: Pinghu fault zone is an "X"-shaped fault zone consisting of three segments and five main faults that alternate between NE and near NS. The NE fault segment formed earlier and has segmented development characteristics, while the NS fault segment formed later and controlled the segmented connections of the southern, central, and northern sections. The formation of complex faults in Pinghu fault zone is jointly controlled by two factors: The segmented growth and development of faults, and the rotation of regional stress fields during the Eocene. The growth and evolution process of Pinghu fault zone during the fault depression period is divided into three stages: Early NE fault segmentation development stage, middle NE-near NS fault hard connection stage, and late NS - NNE/NE fault tension torsion transformation stage. The temporal and spatial differences in the development and evolution of Pinghu fault zone play an important controlling role in the migration of local sedimentary subsidence centers and the differential development of compression reversal anticlines in the later stages of the fault.

Key words: Pinghu fault zone; segmented development; genetic mechanism; stress field rotation; Xihu sag; East China Sea basin

0 引言

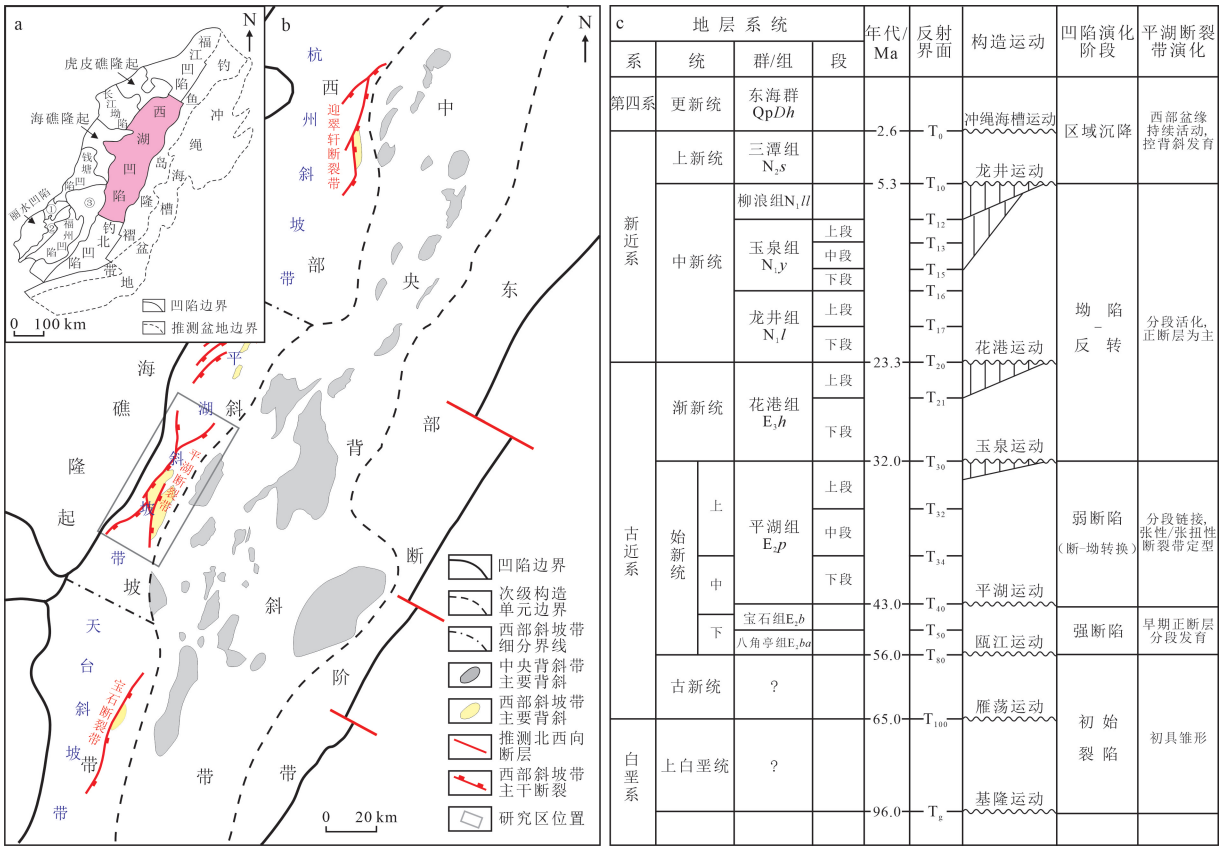
伸展断陷盆地内部大型断裂的发育具有显著的分段性。断层发育早期,各不同段孤立活动,随着伸展作用的持续,各段通过断层间相互作用,最终发生软链接和硬链接而形成长度达几十乃至上百 km、形态为非规则线形的大型断裂[1-5]。伸展断陷盆地中,断层的这种分段生长特征多是由于受到断陷阶段多期构造运动的叠加,此外,大型断裂各分段之间几何学、运动学及动力学方面的差异也是盆地演化作用的集中体现。因此,研究大型断裂的分段性不仅是认识区域构造演化的重要手段,也对油气勘探也具有重要的指导意义[6-9]。

平湖断裂带位于西湖凹陷斜坡区平湖斜坡带中段,南北延伸长度达 70 km。该区成藏条件优越,油气富集程度高,区域内的平湖油气田是平湖斜坡带迄今最有经济价值的油气田之一[10-12]。该断裂带在斜坡区构造特征上极为特殊——紧邻古近纪局部断陷深洼,发育斜坡区少有的大型背斜,且钻井揭示了西湖凹陷唯一一套稳定分布的始新世中基性火山喷出岩,上述地质现象均与平湖断裂带的孕育、发展和改造作用密切相关。已有研究[13-16]表明,平湖断裂带自古新世以来即开始逐步发育,显著活动于始新世至渐新世时期,部分区段在中—上新世仍有活动。平湖断裂带频繁的构造作用不仅控制了区域内复杂的构造面貌,而且影响了区域成藏条件及油气富集。20 世纪 90 年代以来,前人对平湖断裂带开展过一定的研究,但主要聚焦于平湖斜坡带断裂体系的整体认识[13,17-18],或是集中在平湖断裂带中南段以反转背斜构造为主的局部区域内[19-20]。受限于当时的地震、地质资料,前人对平湖断裂带形成演化过程缺乏系统性和深入性的研究,也未见关于断裂带分段性的研究成果。近年来,平湖斜坡带全面转向构造-岩性圈闭勘探,逐步形成了复杂断裂控制下"纵向叠置、横向连片"的油气富规律新认识[21];而在平湖断裂带控制下,平湖油气田也面临着探索大型断背斜翼部或同向断阶背景下的构造-岩性圈闭成藏潜力。因此,加强对平湖断裂带分段性的研究将有助于进一步深化该区断裂差异控藏认识,并推动勘探成熟区挖潜。

本文基于新三维地震资料,开展了平湖断裂带几何学、运动学分析,明确了平湖断裂带分段特征,厘清了平湖断裂带控制下的地层充填响应,并结合区域构造演化规律,揭示了断裂带分段演化及其成因机制,以期进一步指导该区的油气勘探实践。

1 区域地质概况

西湖凹陷为东海盆地内 NNE 向延伸的大型凹陷(图 1a),面积达 5.4 万 km^2,主要受控于始新世时期的伸展断陷作用,新生界沉积层最厚处超 1 万 m。西湖凹陷在平面结构上表现为东西分带、南北分块特征[22],自西向东分为西部斜坡带、中央背斜带及东部断阶带,其中西部斜坡带受多条基底 NWW 向断裂分隔,自北向南可分为杭州斜坡带、平湖斜坡带和天台斜坡带(图 1b)。在地层特征上,根据钻井及地震资料(图 1c),西湖凹陷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,



a. 东海盆地构造区划；b. 西湖凹陷构造区划及研究区位置；c. 西湖凹陷地层格架及演化阶段。①椒江凹陷；②雁荡凸起；③渔山东隆起。

图 1　西湖凹陷构造地层概况

Fig.1　Tectonic-stratigraphic framework of Xihu sag

上新统三潭组，以及第四系东海群。在构造演化上，西湖凹陷先后经历了晚白垩世—古新世初始裂陷、早中始新世强断陷、中晚始新世弱断陷（断-坳转换）、渐新世—中新世坳陷-反转和上新世以来的区域沉降 5 个演化阶段（图 1c）。在断裂体系特征上，西湖凹陷西部斜坡带以发育 NNE/NE 向正断层为主，断裂主要发育于平湖组及其下的断陷构造层中。

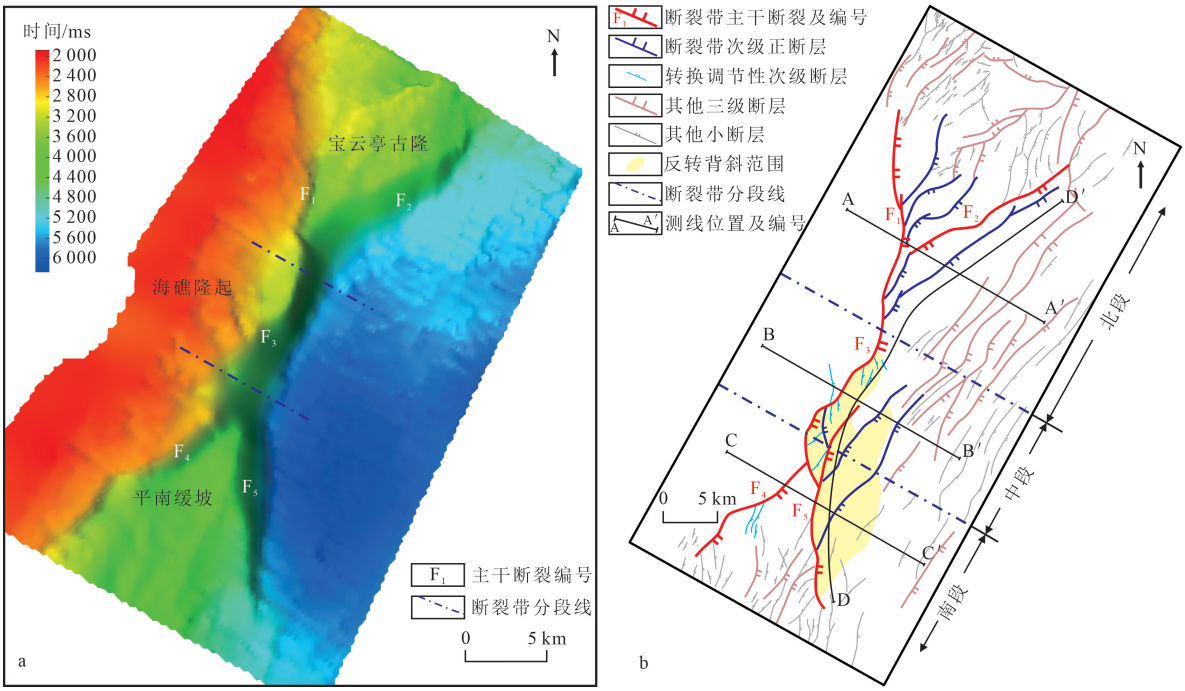
平湖断裂带发育于平湖斜坡带中段（图 1c），为邻近绍兴 36 洼的边界断层，平面上整体呈“X”型，剖面上表现为断面东倾的顺向断阶。平湖断裂带两盘地层厚度差异显著，断裂带上升盘为海礁隆起，钻遇最深地层为八角亭组火山岩，上覆平湖组及以上地层较薄，且逐步向西超覆减薄；断裂带下降盘发育巨厚的平湖组，下伏宝石组在该区揭示较少。受平湖断裂带断陷期强烈活动控制，西湖凹陷中段表现出东西双断特点，凹陷其他段则整体呈现出东断西超的断陷格局，东西双断特征不明显。

2　平湖断裂带几何学特征及分段性

根据最新的三维地震解释成果，平湖断裂带主要由团结亭断裂（F_1）、团结亭东断裂（F_2）、八角亭断裂（F_3）、中山亭断裂（F_4）及放鹤亭断裂（F_5）五条主干断裂构成，断裂主体延伸方向呈 NE 向和近 NS 向（图 2）。更低级次断层主要有两类，第一类为走向平行于主干断裂或与主干断裂小角度斜交的次级断层，第二类为走向与主干断裂存在较大斜交角度、处于主干断裂分段转换部位的调节断层。根据研究区斜坡结构及平湖断裂带主干断裂平面展布，可将平湖断裂带自北向南划分为北、中、南三段（图 2b）。

2.1　北段

平湖断裂带北段为同向多级断阶的斜坡结构，受近 NS 向 F_1 和 NE 向 F_2 两条主干断裂控制（图 2b），主干断裂夹持的区域为宝云亭古隆的西南延伸，表现出北宽南窄的特征。除近 NS 向 F_1 上断层位较浅外，该段主干断裂及次级断层向上断穿层位



a. 基底面(T_g)可视化图;b. 平湖断裂带断裂纲要图。

图2 平湖断裂带及邻区构造纲要

Fig.2 Structural outline of Pinghu fault zone and its adjacent areas

多终止于T_{30}界面附近,且在中新世末期龙井运动未形成反转背斜,但浅部地层表现出一定的单斜翘倾(图3a)。

2.2 中段

平湖断裂带中段为同向单级断阶的斜坡结构,主要受F_3控制(图2b)。该断裂为分隔西侧海礁隆起和东侧平湖斜坡带的基底断裂,两侧平湖组及下伏地层厚度差异巨大。主干断裂延伸方向存在一定变化,其北部走向呈NNE—近NS向,中部以NE向为主,至南部转为近NS向。在主干断裂下降盘发育有与之走向平行的次级断层,断距明显较小。从龙井运动挤压反转的强度来看,平湖断裂带中段反转强度稍强于北段,整体表现为宽缓的背斜(图3b)。

2.3 南段

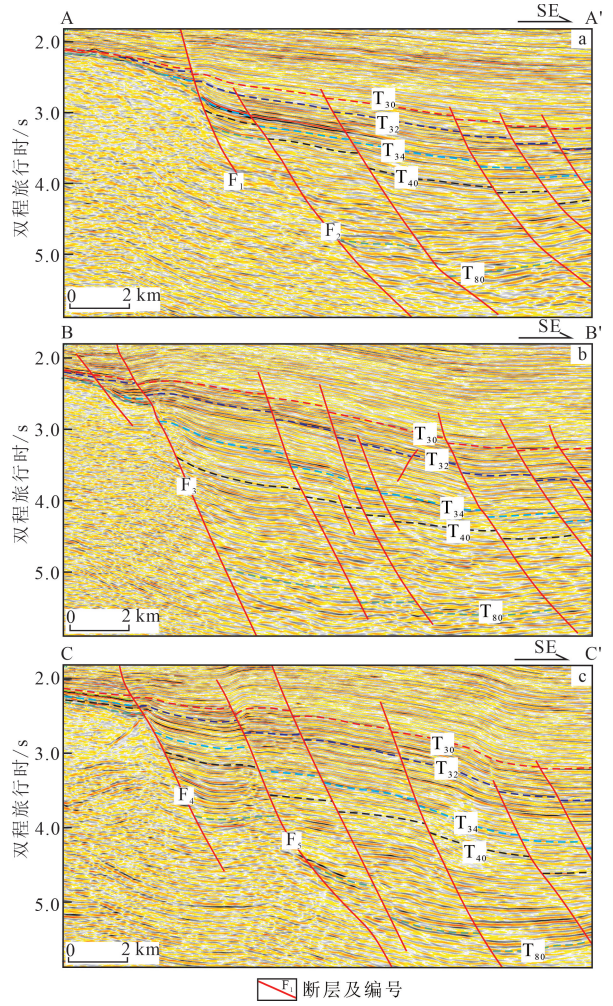
平湖断裂带南段为同向多级断阶的斜坡结构,受NE向F_4和近NS向F_5两条主干断裂控制(图2b),主干断裂夹持的区域为平南缓坡,表现出北窄南宽的特征。该段主干断裂及次级断层向上断穿层位普遍较中、北段更浅,且在中新世末期挤压反转作用下形成紧闭的背斜,反映其反转强度强于断裂带中、北段(图3c)。

综上所述,平湖断裂带表现出明显的分段性。在斜坡结构上,从平湖断裂带中段向南、北段延伸,断裂控制下的斜坡结构由单级断阶向多级断阶转变;在断裂延伸方向上,仅中段F_3走向较为稳定,以NNE-NE走向为主,而北段、南段在多级断阶背景下,断裂走向呈现出顺NE和近NS两组方向逐步分离的现象。通过对坳陷-反转阶段断裂活动强度及背斜褶皱紧闭程度分析,中新世末期龙井运动的挤压反转作用自北向南表现出逐渐增强的特点;同时在平湖断裂带中、南段局部发育有倾向NEE、走向NNW带有转换调节性质的次级断层。

3 平湖断裂带分段活动性

作为西湖凹陷西部斜坡带中段的一条大型边界断裂,平湖断裂带并非一期成型,而是多期构造作用的结果,其分段性也是各演化阶段构造作用的叠合效应。平湖断裂带形成演化主要受控于断陷阶段的区域伸展作用,综合钻井揭示的地层时代和地震层位解释结果可知,平湖断裂带的形成时代至少可向前追溯到古新世末—始新世初期。由于该区断裂带下降盘基底面埋藏深,地震反射能量弱,难以揭示更老地层的界面反射信号,本文主要计算始新世以来

断裂活动数据，通过中下始新统（T_{80}—T_{40}）、平湖组下段（T_{40}—T_{34}）和平湖组中上段（T_{34}—T_{30}）的古落差数据来分别反映早中始新世、中始新世平湖组早期和晚始新世平湖组中晚期断层活动性，并以此来揭示断裂带南、北不同段的活动强度及演变规律。



a. 北段；b. 中段；c. 南段。

图 3　平湖断裂带剖面特征

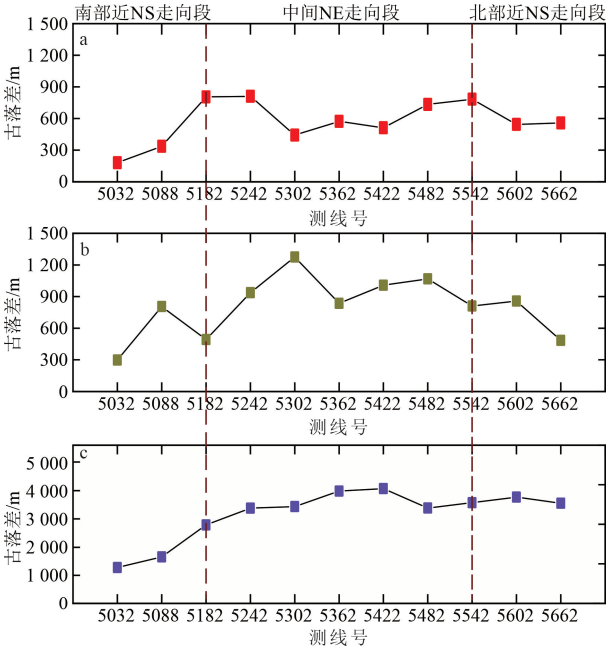
Fig.3　Structural profile of Pinghu fault zone

3.1　中段八角亭断裂的断裂活动性

古落差数据表明，平湖断裂带中段 F_3 活动强度从强断陷阶段到断-拗转换阶段总体减弱，但该断裂中部主体 NE 走向段与南、北部近 NS 走向段活动强度存在巨大差异（图 4）。

1）中部 NE 走向段。在早中始新世时期，该段断层古落差多达到 3 900 m（图 4c）；在中始新世平湖组早期古落差骤降至 1 300 m 以内（图 4b），衰减特征非常显著；在晚始新世平湖组中晚期古落差明显降低至 900 m 以内（图 4a）。

2）南、北部近 NS 走向段。两段断层在早中始新世时期古落差较低，显著小于 3 800 m（图 4c），活动强度不及中部 NE 走向段；在中始新世平湖组早期，古落差骤降至 900 m 以下（图 4b）；在晚始新世平湖组中晚期古落差明显降低至 600 m 以内（图 4a）。



a. 晚始新世平湖组中晚期；b. 中始新世平湖组早期；c. 早中始新世。虚线为八角亭断裂（F_3）不同走向段的分段线。

图 4　八角亭断裂（F_3）各层系不同走向段古落差对比

Fig.4　Comparison of Paleofall data among different strike directions of various stratigraphic series along Bajiaoting fault (F_3)

通过不同阶段断层古落差活动数据的横向对比可知，F_3 按断层走向具有明显的活动差异性：随着早中始新世强断陷阶段（T_{80}—T_{40}）到中晚始新世断-拗转换阶段（T_{40}—T_{30}）的转变，中部占主体的 NE 走向段活动性急剧减弱；而南、北部靠近 NS 走向段表现出一定的继承性强活动的特点，在晚始新世平湖组中晚期（T_{34}—T_{30}）的活动强度甚至已显著强于同时期占主体的 NE 走向段。因此，在断裂活动总体减弱的背景下，NE 走向与近 NS 走向段呈现出强弱交替活动的特点，交替转换的时间发生在平湖组早期，即平湖组下段沉积期。

3.2　平湖断裂带中段与南、北段断裂活动性对比

鉴于平湖断裂带南、北段断层走向差异更为显

著,为便于对比不同时期、不同走向段的断裂活动强度,本文分阶段开展了平湖断裂带南、中、北段断裂活动性分析。

1)早中始新世时期(T_{80}—T_{40})

早中始新世平湖断裂带南、北段总体表现出NE向F_2、F_4强活动,近NS向F_1、F_5相对弱活动或不活动的特点(图5)。其中:两条NE向断裂中,南段西支F_4和北段东支F_2均表现出差异性的强活动特征,总体表现为北部活动性略强于南部的特点(图5b、c),最强部位古落差可达5 000 m,甚至强于F_3中部NE走向段的活动强度(3 900 m)(图4c);近NS向断裂中,南段东支F_5活动性整体较弱,古落差最大值不及1 400 m,北段西支F_1古落差接近于0(图5a、d),反映了该时期未形成规模性活动断裂。

2)中晚始新世时期(T_{40}—T_{30})

①中始新世平湖组早期(T_{40}—T_{34})

中始新世平湖组早期,平湖断裂带南、北段断裂活动整体减弱,NE向断裂活动略强于近NS向断裂(图5)。其中:近NS向F_1古落差在1 100 m以内,断裂从不活动转为强活动,F_5古落差小于300 m(图5a、d);NE向F_2古落差在1 100 m以下,活动强度下降最为明显,F_4古落差在1 400 m以下(图5b、c),活动强度明显降低。

②晚始新世平湖组中晚期(T_{34}—T_{30})

晚始新世平湖组中晚期,平湖断裂带断裂活动强度整体上相对于上一时期稍有减弱,且断裂活动强度在平面上发生转变,表现为近NS向断裂活动强于NE向断裂(图5)。其中:近NS向F_1古落差在800 m以下,而F_5则较为特殊,最大古落差达到1 000 m左右(图5a、d),该期断层活动强度相比于上一时期明显增强;NE向F_2古落差小于800 m,F_4古落差在600 m以下(图5b、c)。

平湖断裂带中段与南、北段不同走向分支段断裂活动性数据对比结果(图6)揭示了与F_3内部相似的强弱交替的活动特征。即在早中始新世时期(T_{80}—T_{40})南、中、北各段中的F_4、F_3和F_2等NE走向断裂均有强活动,强度总体相当,但整体活动的连续较差,分段性特征明显;在中晚始新世时期(T_{40}—T_{30}),顺近NS走向断裂活动较强,中、南段活动强度大于北段,而原NE走向断裂仅具有一定的继承性活动,活动强度不及近NS走向断裂。上述特征进一步表明平湖断裂带近NS向断裂与NE向断裂活动具有强弱交替的特点。

3.3 平湖断裂带地层充填响应

平湖断裂带分段性活动在始新世不同阶段的残余地层厚度(图7、8)上都有显著响应关系。在横切平湖断裂带下降盘任意线剖面(图7)上始新统局部沉积中心有显著变化,总体上具有自北向南迁移的特点。在各套地层残余厚度图(图8)上平湖断裂带及其邻区具有如下特点。

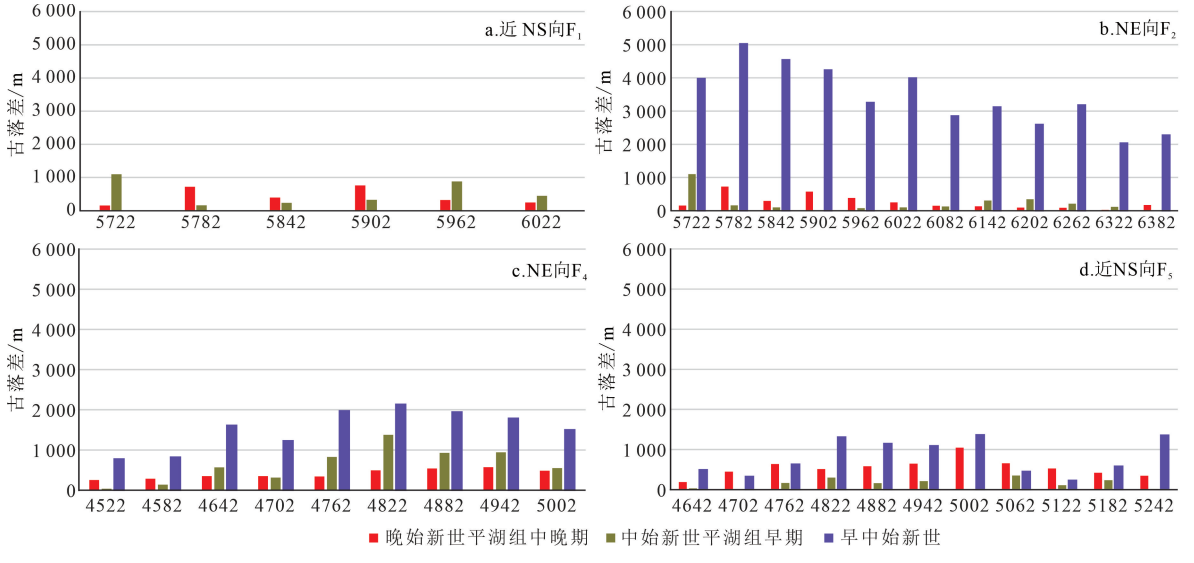
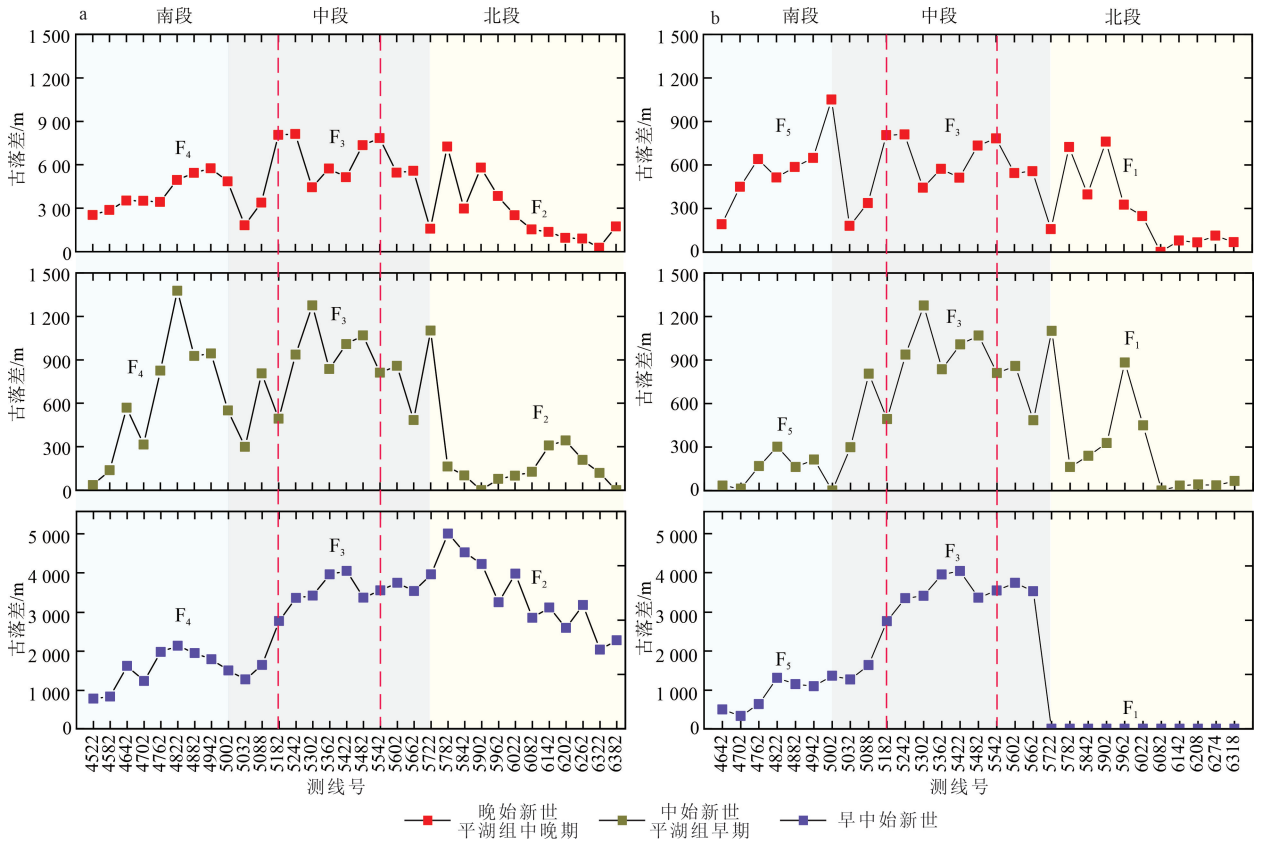


图5 平湖断裂带南、北段古落差数据

Fig.5 Paleofall of south and north sections of Pinghu fault zone



a. 按 NE 走向排列断层；b. 按近 NS 走向排列断层。虚线为八角亭断裂（F_3）不同走向段的分段线。

图 6　平湖断裂带南、中、北段顺不同走向的古落差数据对比

Fig.6　Comparison of paleofall data along different directions in south, central, and north sections of Pinghu fault zone

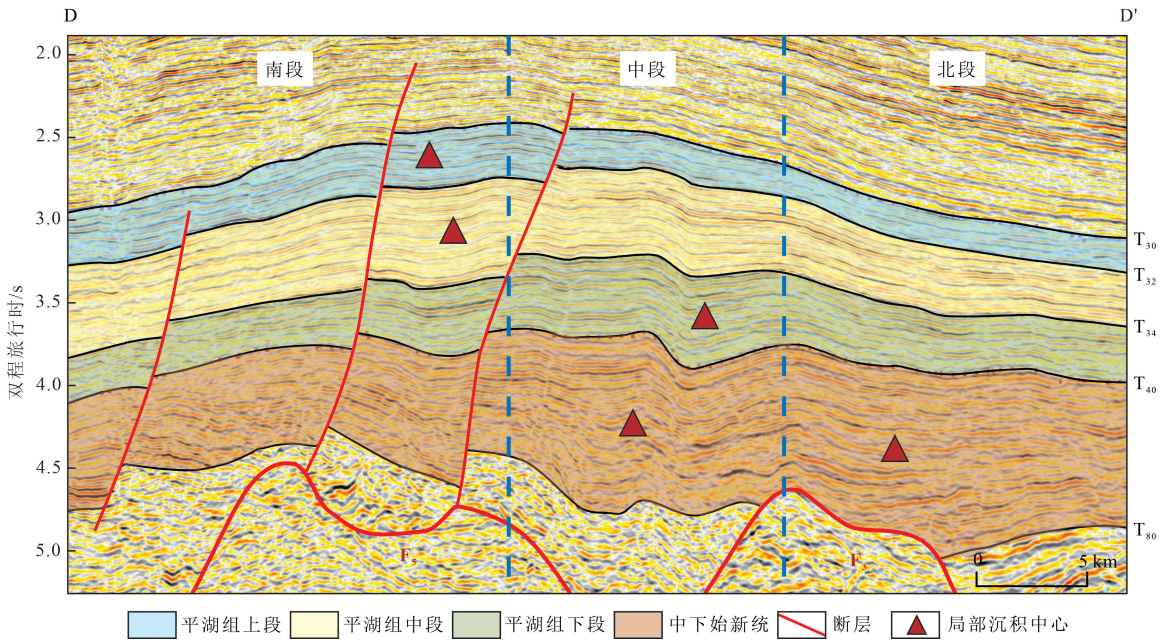
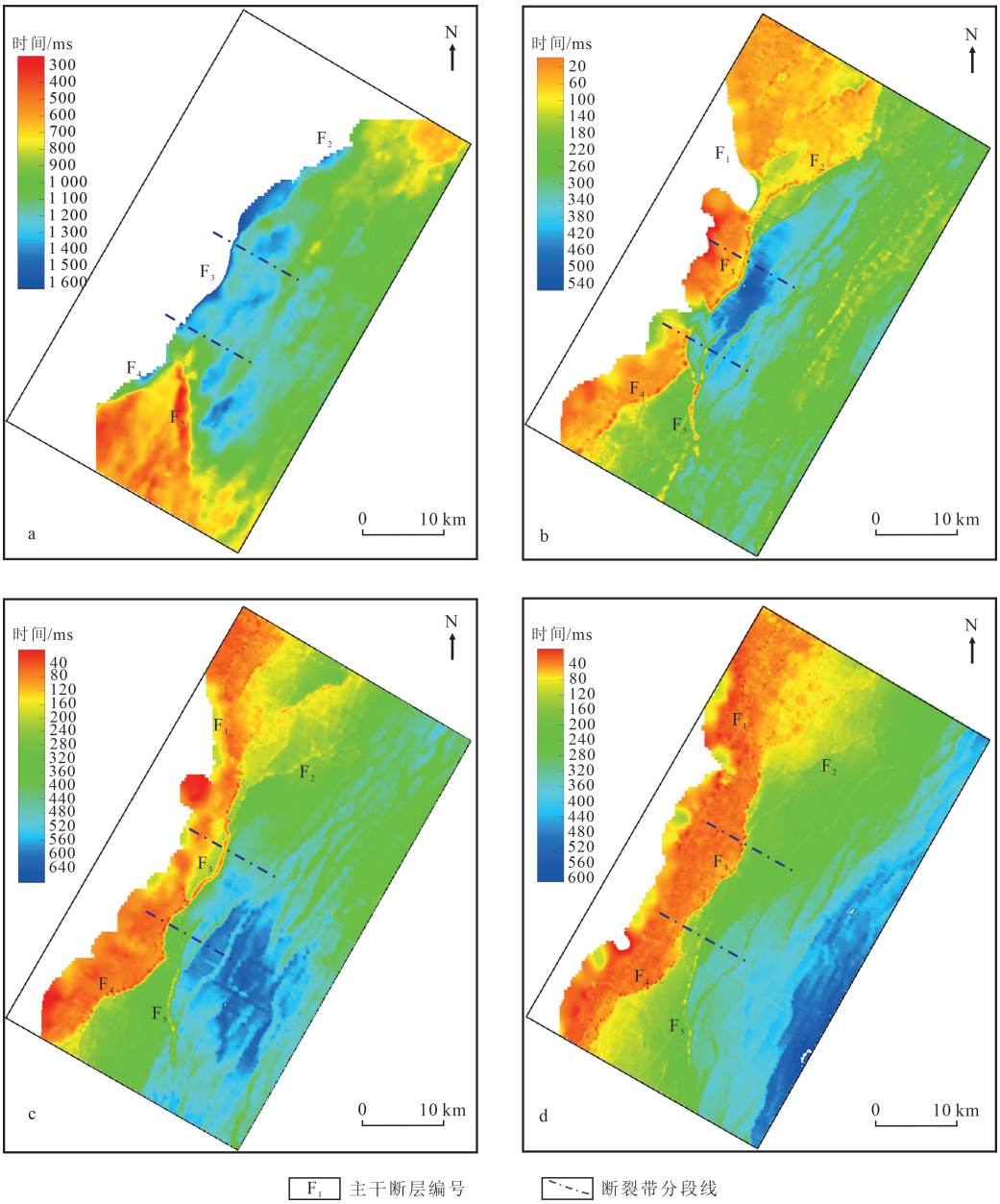


图 7　横切平湖断裂带下降盘任意线剖面

Fig.7　Arbitrary line section across down-thrown of Pinghu fault zone



a. 中下始新统;b. 平湖组下段;c. 平湖组中段;d. 平湖组上段。

图8 平湖断裂带及邻区始新统残余时间域厚度图

Fig.8 Residual time domain thickness map of Pinghu fault zone and its adjacent areas in Eocene

1)中下始新统(图8a)厚度中心主要沿NE向断裂展布,自北向南具有多中心发育的特点,在NE向断裂之间的近NS向弯折链接处则表现出地层明显减薄的特点,导致沿NE向断层分布的局部地层厚度中心具有一定的分隔性。此外,南段东支的F_5也表现出一定的控沉积作用,但更多表现为沿NE方向地层分布趋势向南顺F_5终止的现象。

2)平湖组下段(图8b)沉积范围显著增大,地层厚度中心的范围则相对集中,主要处于F_3下降盘的区域。残余地层厚度表明,在以平湖断裂带中段为中心的区域内,NE向断裂及邻近的NS向、NNE向断裂对沉积地层均有明显的控制作用;此外,在南、北段中的NE向和近NS向主干断裂均表现出一定的控沉积作用。

3)平湖组中、上段(图8c、d)沉积范围进一步增大。平湖组中段厚度中心处于平湖断裂带南段东支的F_5下降盘,平湖组上段厚度中心顺F_5下降盘的NNE向断裂进一步向洼陷中心迁移。残余地层厚

度表明：断裂带外缘由 F_4、F_3 和 F_1 构成的盆缘断裂部分表现出两侧地层厚度显著差异；断裂带内缘 F_2 和 F_5 则表现出显著的南强北弱差异，即 NE 走向的 F_2 控制地层厚度最弱，而近 NS 向的 F_5 则表现出和邻近 NNE 向断裂共同控制局部地层厚度中心的特点。

综合上述断裂活动性及地层充填特征分析可知，平湖断裂带的发育演化经历了早期分段到后期整体链接的生长发育过程，断裂带发育过程中不同走向段主干断裂活动强度具有交替性强弱变化特点，并在断裂带下降盘地层充填特征上有明显的响应。

4　平湖断裂带分段发育机制及生长模式

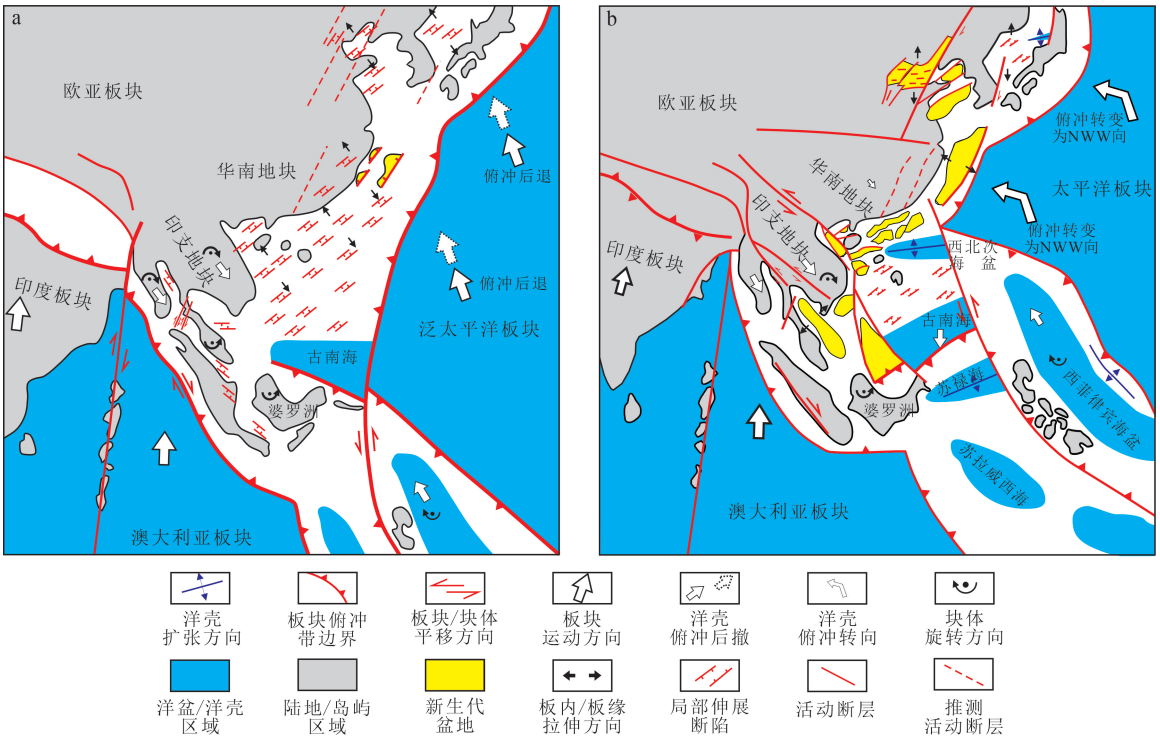
4.1　分段发育机制及控制因素

近年来，国内外相关研究[1-2,4-5,23-24]揭示盆地中大型生长正断层表现出明显的分段性，并发现复杂构造现象也多与断层分段发育有关。这些大型断裂通常由多个不同走向、不同位移量的断层段组成，这些不同走向的断层段在发育早期具有相对独立的运动学特征，通过断裂几何学、运动学等方面的相关参数分析，可以建立正断层分段生长模式。中国近海珠江口盆地、渤海湾盆地等断陷盆地大型断裂多具有类似的分段生长特点，同时，不同阶段、不同走向段断裂活动强弱的交替变化，亦可以揭示盆地断陷阶段的区域应力场演变规律[9,25-29]。

本文认为除了断陷阶段生长断层分段发育这一因素外，平湖断裂带这种复杂的分段活动还受到始新世时期区域应力场旋转作用的影响。区域应力场旋转控制下的多期断裂活动在中国近海断陷盆地中较为常见，最典型的如珠江口盆地古新世—始新世区域应力场顺时针旋转控制了盆地内各凹陷断裂走向由 NE 向逐步转变为近 EW 向[30-31]。东海盆地在始新世时期，受太平洋板块俯冲方向由 NW 向转变为 NWW 向的影响[32-33]，同样存在区域应力场的旋转，即伸展方向由早中始新世的 NW—SE 向伸展转为 NWW—SEE 向（图 9）。本次平湖断裂带断裂活动性及其控制地层充填厚度变化不仅证实了这一重大构造转折事件在斜坡区平湖断裂带中的响应规律，且揭示了构造转折时期发生平湖组下段沉积期，这也是首次在杭州斜坡带以外的区域揭示了中始新世平湖运动（T_{40}）对区域断裂、沉积充填演化的影响。

4.2　平湖断裂带生长模式

本文依据平湖断裂带几何学及运动学特征分



a. 古新世—早中始新世；b. 中晚始新世。据文献[32]修编。

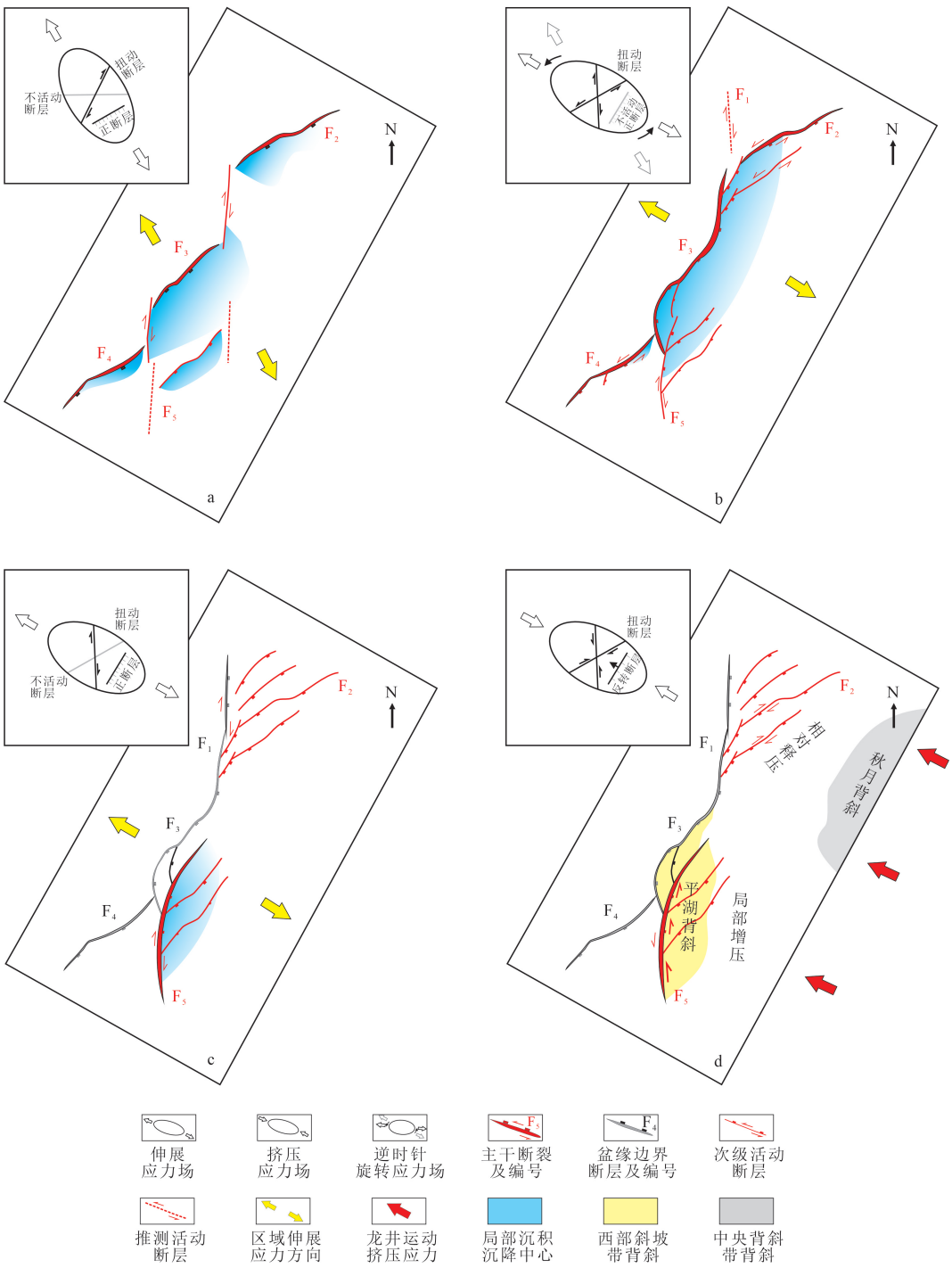
图 9　东亚陆缘古新世-始新世板块演变过程及成盆应力背景

Fig.9　Paleocene Eocene plate evolution process and basin forming stress background of East Asian Continental Margin

析,将其断陷阶段生长演化过程划分为早期NE向断裂分段发育阶段、中期NE—近NS向断裂硬链接阶段和晚期近NS—NNE/NE向断裂张扭改造阶段(图10)。

1)早期NE向断裂分段发育阶段

早中始新世为西湖凹陷强断陷阶段,整个东海盆地受太平洋板块俯冲处于NW—SE向伸展背景影响(图9a)。平湖断裂带北、中、南段中的NE向



a. 早期NE向断裂分段发育阶段;b. 中期NE—近NS向断裂硬链接阶段;c. 晚期近NS—NNE/NE向断裂张扭改造阶段;d. 中新世末期分段活化。

图10 平湖断裂带生长发育模式

Fig.10 Growth and evelopment model of Pinghu fault zone

F_2、F_3中部和 F_4已经开始发育，呈左阶雁列，各段断裂活动性均较强，并处于相对独立的发育阶段，尚未完全硬链接为一条断裂带（图 10a）。各段 NE 向断裂之间通过近 NS 向右行扭动断层转换调节，近 NS 向断裂活动性数据显示其规模和活动强度不及 NE 向断裂。

2）中期 NE—近 NS 向断裂硬链接阶段

中始新世平湖组早期为西湖凹陷强断陷转向断-拗转换的过渡阶段，在该阶段整个东海盆地受太平洋板块俯冲转向影响发生了平湖运动，且区域应力场已经由 NW—SE 向强伸展转为 NWW—SEE 向弱伸展背景（图 9b）。平湖断裂带北、中、南段先期发育的 NE 向 F_2、F_3和 F_4发生斜向拉伸，为左行张扭性断裂，但断裂活动性明显减弱，尤其是处于西南支的 F_4。在上述三条断裂之间的近 NS 向扭动转换断层由于与区域伸展方向近于垂直，活动性略强于邻近的 NE 向断层段，这些近 NS 向的断层由于活动强度增大，最终导致了平湖断裂带南北分段的 NE 向主干断裂发生硬链接，大型断裂带初步形成。该阶段 F_3为平湖断裂带断裂强活动中心，控制了局部沉积、沉降中心（图 10b）。

3）晚期近 NS—NNE/NE 向断裂张扭改造阶段

晚始新世平湖组中晚期，太平洋板块俯冲转向后，西湖凹陷进入了相对稳定的断-拗转换阶段，NWW—SEE 向区域伸展作用持续减弱，且西湖凹陷的沉积、沉降中心已迁移至东部断阶带。平湖断裂带先期形成的断裂虽仍持续活动，但总体活动强度已明显减弱，并呈现出一定的东西分带差异：处于西部邻近海礁隆起的 F_1、F_3和 F_4已沿各走向段南北贯通，形成断裂带外缘的盆缘边界断层；而更靠近西湖凹陷沉积中心的断裂带内缘，F_2、F_5及其次级断裂优势发育方向转为 NNE 向及近 NS 向，断裂发育密度增大。值得注意的是，该时期平湖断裂带中近 NS 向断裂作为区域内中期（即中始新世平湖组早期）强活动的先存断裂，在 NE 向断裂活动性进一步减弱的背景下已成为区域内主控断层，包括北段 F_1和南段 F_5。通过应力椭球分析可知，这些主控断层在平湖组中晚期表现为右行张扭，与局部活动较弱的 NE、NNE 走向张性次级断层构成帚状断裂体系。由于南段的 F_5相对于北段的 F_1处于断裂带内缘，更接近平湖组中晚期的沉积、沉降中心，因此，F_5及其伴生次级断层的活动性更强，控制了局部沉积、沉降中心（图 10c）。

晚始新世末期，随着西湖凹陷区域伸展作用减弱并逐步转入拗陷-反转阶段，断陷阶段大量发育的生长正断层逐步停止活动，平湖断裂带也在该时期最终定型。

4.3　断裂带分段性对反转背斜的影响

渐新世以来，西湖凹陷逐步进入挤压环境，平湖断裂带在经历整体定型后转为局部分段弱活化，尤其是中新世末的龙井运动对平湖断裂带活化及反转背斜形成产生了较大的影响。

龙井运动时期，菲律宾海板块向北移动，板块向西碰撞、俯冲的挤压力直接传递到东海盆地，导致西湖凹陷发生强烈的 NWW—SEE 向挤压[33]。由于区域挤压应力主要来自东侧，在西湖凹陷内主要表现为东部断阶带地层掀斜翘倾及中央背斜带 NNE 向大型反转背斜发育；对于西部斜坡带，龙井运动的影响则明显较弱，主要表现为大型断裂带附近中—小型反转背斜发育。平湖断裂带内缘，接近中央背斜带的 F_2、F_5及其次级断裂受龙井运动影响更易产生局部活化，但仅在断裂带中南段 F_5附近形成反转背斜（图 10d）。平湖断裂带南段受 NWW—SEE 向挤压影响，近 NS 向 F_5作为主控断层产生左行压扭，并在其下盘中 NNE 向次级断层中形成局部增压，控制了挤压褶皱，产生近 NS 向延伸的平湖背斜。而在平湖断裂带北段，由于该段以东中央背斜带已通过控制 NNE 向秋月背斜发育释放了较大的挤压应力，传递至平湖断裂带的挤压应力作用更弱，且北段的 NE 向 F_2与挤压应力方向存在较大角度的斜交，仅产生一定的右行扭动，将挤压应力向西南传递至断裂带中段，因此，平湖断裂带北段在龙井运动时期表现为相对释压，并未形成反转背斜。

综上所述，在中新世末龙井运动时期，平湖断裂带表现为南段增压、北段相对释压和中段转换调节，反转背斜仅在断裂带中南段显著发育。

5　结论

1）平湖断裂带具有明显的南、中、北三段式发育特征，主要存在 NE 向和近 NS 向两组延伸方向。其中 NE 向断层段形成时间较早，具有分段发育特征，近 NS 向断层段形成时间较晚，但其控制了南、中、北段的分段连接。

2）结合区域应力场演变分析可知，平湖断裂带复杂断裂的形成受始新世时期断裂分段生长发育和区域应力场旋转两种因素的共同控制。

3)综合区域应力场演变和断裂活动强度分析认为,平湖断裂带断陷期生长演化过程可划分为早期NE向断裂分段发育阶段、中期NE—近NS向断裂硬链接阶段和晚期近NS—NNE/NE向断裂张扭改造阶段。

4)平湖断裂带发育受区域应力场旋转影响,有别于典型正断层生长模式,并对裂后期龙井运动挤压反转背斜产生了显著影响,造成了龙井运动期南段增压、北段相对释压和中段转换调节的差异反转。可见平湖断裂带发育演化的时空差异,对该地区局部沉积、沉降中心迁移及裂后期挤压反转背斜差异发育具有重要的控制作用。

参考文献(References):

[1] Anders M H, Schlische R W. Overlapping Faults, Intrabasin Highs, and the Growth of Normal Faults [J]. The Journal of Geology, 1994, 102(2): 165-179.

[2] Morley C K, Haranya C, Phoosongsee W, et al. Activation of Rift Oblique and Rift Parallel Pre-Existing Fabrics During Extension and Their Effect on Deformation Style: Examples from the Rifts of Thailand[J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26(10): 1803-1829.

[3] 刘哲,吕延防,孙永河,等.同生断裂分段生长特征及其石油地质意义:以辽河西部凹陷鸳鸯沟断裂为例[J].中国矿业大学学报,2012,41(5):793-799.
Liu Zhe, Lü Yanfang, Sun Yonghe, et al. Characteristics and Significance of Syngenetic Fault Segmentation in Hydrocarbon Accumulation: An Example of Yuanyanggou Fault in Western Sag, Liaohe Depression[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(5): 793-799.

[4] 付晓飞,孙兵,王海学,等.断层分段生长定量表征及在油气成藏研究中的应用[J].中国矿业大学学报,2015,44(2):271-281.
Fu Xiaofei, Sun Bing, Wang Haixue, et al. Fault Segmentation Growth Quantitative Characterization and Its Application on Sag Hydrocarbon Accumulation Research[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(2): 271-281.

[5] 王海学,李明辉,沈忠山,等.断层分段生长定量判别标准的建立及其地质意义:以松辽盆地杏北开发区萨尔图油层为例[J].地质论评,2014,60(6):1259-1264.
Wang Haixue, Li Minghui, Shen Zhongshan, et al. The Establishment and Geological Significance of Quantitative Discrimination Criterion of Fault Segmentation Growth: An Example from Saertu Reservoir in Xingbei Development Area of Songliao Basin[J]. Geological Review, 2014, 60(6): 1259-1264.

[6] 王有功,吕延防,付广,等.复式断陷边界控陷断层生长特征及油气地质意义:以松辽盆地长岭早白垩世复式断陷群东部为例[J].地质学报,2014,88(9):1666-1676.
Wang Yougong, Lü Yanfang, Fu Guang, et al. Growth Characteristic of Boundary Control Faults and Its Significance to Oil and Gas Geology: An Example from the Early Cretaceous Compound Fracture in Changling, Songliao Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(9): 1666-1676.

[7] 潘国强.塔南凹陷断层分段生长与"源-储"的耦合关系[J].大庆石油地质与开发,2015,34(6):20-26.
Pan Guoqiang. Coupling Relationships Between the Fault Segmentation Growth and "Source-Reservoir" for Tanan Sag[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(6): 20-26.

[8] 李娟,陈红汉,张光亚,等.Muglad盆地凯康坳陷生长断层活动定量分析及对油气成藏的控制[J].地学前缘,2018,25(2):51-61.
Li Juan, Chen Honghan, Zhang Guangya, et al. Quantitative Study on Growth Faults Activity and Its Controlling on Hydrocarbon Accumulation in the Kaikang Sag, Muglad Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(2): 51-61.

[9] 王迪,吴智平,李伟,等.济阳坳陷惠民凹陷夏口断裂带的分段性及其成因机制[J].地质论评,2018,64(6):1356-1364.
Wang Di, Wu Zhiping, Li Wei, et al. Segmentation Characteristics and Genetic Mechanism of Xiakou Fault Zone in Huimin Sag, Jiyang Depression[J]. Geological Review, 2018, 64(6): 1356-1364.

[10] 陈桂华,李友川,付宁,等.平湖油气田油气分布主控因素分析[J].中国海上油气:地质,2003,17(3):17-22.
Chen Guihua, Li Youchuan, Fu Ning, et al. The Control Factors on Hydrocarbon Distribution in Pinghu Oil-Gas Field[J]. China Offshore Oil and Gas: Geology, 2003, 17(3): 17-22.

[11] 梁若冰,李玉珍,李纯洁,等.平湖油气田地质特征与勘探方向[J].海洋石油,2008,28(2):7-13,57.
Liang Ruobing, Li Yuzhen, Li Chunjie, et al. Geological Characteristics and Exploration Targets of Pinghu Oilfiled[J]. Offshore Oil, 2008, 28(2): 7-13,

57.

[12] 郭刚，李鑫，韩雅坤，等.东海盆地西湖凹陷平湖斜坡始新统平湖组成岩相类型及对储层的控制[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2024，54(5)：1494－1505.
Guo Gang，Li Xin，Han Yakun，et al. Diagenetic Facies Types and Their Control on Reservoirs of Eocene Pinghu Formation in Pinghu Slope，Xihu Sag，East China Sea Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition)，2024，54(5)：1494－1505.

[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] 杨彩虹，曾广东，李上卿，等.东海西湖凹陷平北地区断裂发育特征与油气聚集[J].石油实验地质，2014，36(1)：64－69，82.
Yang Caihong，Zeng Guangdong，Li Shangqing，et al. Fault Development Characteristics and Hydrocarbon Accumulation in Pingbei Area of Xihu Sag，East China Sea [J]. Petroleum Geology and Experiment，2014，36(1)：64－69，82.

[15] 唐贤君，蒋一鸣，张绍亮.平湖斜坡带火山岩层发育构造环境及油气地质意义[J].地质科技情报，2018，37(1)：27－36.
Tang Xianjun，Jiang Yiming，Zhang Shaoliang. Tectonic Environment of Volcanic Rock in the Pinghu Slope Belt and Its Petroleum Geological Significance [J]. Geological Science and Technology Information，2018，37(1)：27－36.

[16] 唐贤君，蒋一鸣，张建培，等.东海盆地西湖凹陷平北区断陷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 Xianjun，Jiang Yiming，Zhang Jianpei ，et al. Fault Characteristic and Its Control on Traps of Fault Structural Layer in the Northern Pinghu Slope Belt，Xihu Sag，East China Sea Shelf Basin[J]. Marine Geology Frontiers，2019，35(8)：34－43.

[17] 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)：19－24，75.
Yang Lina，Wang Lishun. The Effect of Rupture on Oil Accumulation in Baochu Slope of Xihu Sag[J]. Offshore Oil，2007，27(1)：19－24，75.

[18] 蔡华，张建培.东海西湖凹陷平湖斜坡带断层特征及其封闭性[J].海洋地质前沿，2013，29(4)：20－26.
Cai Hua，Zhang Jianpei. Characteristics of Faults on the Pinghu Slope of Xihu Sag，the East China Sea Shelf Basin and Their Sealing Capacity[J]. Marine Geology Frontiers，2013，29(4)：20－26.

[19] 张欣.蚂蚁追踪在断层自动解释中的应用：以平湖油田放鹤亭构造为例[J].石油地球物理勘探，2010，45(2)：278－281，320，162.
Zhang Xin. Application of Ant Tracing Algorithm in Fault Automatic Interpretation：A Case Study on Fangheting Structure in Pinghu Oilfield [J]. Oil Geophysical Prospecting，2010，45(2)：278－281，320，162.

[20] 张娟.西湖凹陷平湖油气田断层封闭性评价[J].油气地质与采收率，2012，19(4)：18－20，112.
Zhang Juan. Study on Fault-Sealing in Pinghu Oil and Gas Field，Xihu Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency，2012，19(4)：18－20，112.

[21] 张迎朝，陈忠云，刁慧，等.东海盆地 X 凹陷油气成藏模式与勘探突破[J].中国海上油气，2024，36(2)：1－12.
Zhang Yingzhao，Chen Zhongyun，Diao Hui，et al. Reservoir-Forming Models and Exploration Breakthroughs in X Sag of East China Sea Basin[J]. China Offshore Oil and Gas，2024，36(2)：1－12.

[22] 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，2003，24(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，2003，24(3)：1－6.

[23] Soliva R，Benedicto A. A Linkage Criterion for Segmented Normal Faults[J]. Journal of Structural Geology，2004，26：2251－2267.

[24] Soliva R，Benedicto A，Schultz R A，et al. Displacement and Interaction of Normal Fault Segments Branched at Depth：Implications for Fault Growth and Potential Earthquake Rupture Size[J]. Journal of Structural Geology，2008，30：1288－1299.

[25] 王洪宇，付晓飞，王海学，等.渤海湾盆地歧口凹陷断裂活动定量分析和评价对油气成藏的控制作用研究[J].地质学报，2020，94(10)：3062－3073.
Wang Hongyu，Fu Xiaofei，Wang Haixue，et al. Research on the Controlling Effect of Quantitative Analysis and Evaluation of Fault Activity on Oil and Gas Accumulation in Qikou Sag of Bohai Bay Basin [J]. Acta Geologica Sinica，2020，94(10)：3062－3073.

[26] 孙思敏,季汉成,王建伟,等.渤海湾盆地南堡凹陷西南庄断层分段特征及演化[J].石油实验地质,2016,38(5):628-634.
Sun Simin, Ji Hancheng, Wang Jianwei, et al. Segmentation Characteristics and Evolution of Xinanzhuang Fault in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(5): 628-634.

[27] 刘欣颖,吴静,朱定伟,等.珠江口盆地多期走滑构造与叠合型拉分盆地:以阳江东凹为例[J].大地构造与成矿学,2021,45(1):6-19.
Liu Xinying, Wu Jing, Zhu Dingwei, et al. Superimposition of Strike-Slip Faults and Pull-Apart Basins in the Pearl River Mouth Basin: A Case Study from the Eastern Yangjiang Sag[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2021, 45(1): 6-19.

[28] 李康,单玄龙,郝国丽,等.珠江口盆地西江凹陷裂陷期构造转换及其对沉积的意义[J].吉林大学学报(地球科学版),2024,54(4):1095-1109.
Li Kang, Shan Xuanlong, Hao Guoli, et al. Tectonic Transformation of Xijiang Sag During Rifting and Its Significance to Sedimentation in Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(4): 1095-1109.

[29] 王琦,孙永河,付晓飞,等.冀中坳陷南部中—新生代构造转换及其油气地质意义[J].吉林大学学报(地球科学版),2024,54(2):447-460.
Wang Qi, Sun Yonghe, Fu Xiaofei, et al. Mesozoic Cenozoic Tectonic Transition and Its Significances for Petroleum Exploration in the Southern Jizhong Depression[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(2): 447-460.

[30] 程燕君,吴智平,张杰,等.西江凹陷早新生代断裂演化及其对南海北缘应力场顺时针旋转的响应[J].地球科学,2020,45(6):2199-2209.
Cheng Yanjun, Wu Zhiping, Zhang Jie, et al. Early Cenozoic Evolution of Fault System in Xijiang Sag and Its Implication to Clockwise Rotation of Extension Stress in Northern Margin of South China Sea[J]. Earth Science, 2020, 45(6): 2199-2209.

[31] 张向涛,彭光荣,王光增,等.珠江口盆地惠州运动的断裂响应研究:以阳江东凹为例[J].地学前缘,2022,29(5):161-175.
Zhang Xiangtao, Peng Guangrong, Wang Guangzeng, et al. Fault Response to the Huizhou Movement in the Pearl River Mouth Basin: Insights from a Case Study of the Eastern Yangjiang Sag[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(5): 161-175.

[32] 朱伟林,吴景富,张功成,等.中国近海新生代盆地构造差异性演化及油气勘探方向[J].地学前缘,2015,22(1):88-101.
Zhu Weilin, Wu Jingfu, Zhang Gongcheng, et al. Discrepancy Tectonic Evolution and Petroleum Exploration in China off Shore Cenozoic Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(1): 88-101.

[33] 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 Xinhuai, 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.