https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.105

西湖凹陷断裂体系发育特征及其控盆效应

蒋一鸣[1],郑津杭[2*],唐贤君[1],何新建[1],吴智平[2*],吴青波[2],程燕君[3]

1. 中海石油(中国)有限公司上海分公司,上海 200335
2. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛 266580
3. 山东科技大学地球科学与工程学院,山东青岛 266590

摘 要: 西湖凹陷是中国东部近海中、新生代叠合含油气盆地东海陆架盆地的重要组成部分,其断裂体系发育时空差异特征不仅决定了盆地结构,也控制了油气成藏.运用最新的三维地震连片资料及钻井资料,对西湖凹陷断裂体系的发育特征及其控盆效应进行了系统分析,区划出新生代盆地基底先存、裂陷拉张及反转挤压3类不同成因类型的断裂体系,明确了NW(NWW)向先存基底断裂对新生代西湖凹陷斜坡带、中央反转带的南北分区效应;揭示了新生代裂陷早期(前平湖组沉积期)由NE-SW向断裂主控至裂陷晚期(平湖组沉积期)由近SN向断裂主控的转变;阐明了纵张、横张及逆断(反转)等龙井、冲绳运动挤压反转形成的断裂体系与反转背斜的成因联系.研究成果对于认识西湖凹陷乃至整个东海陆架盆地构造差异演化过程与机理具有理论意义,也可为该地区油气勘探实践提供指导.

关键词: 断裂体系;控盆效应;西湖凹陷;石油地质学.

中图分类号: P618.13 **文章编号:** 1000-2383(2026)07-2663-19 **收稿日期:** 2025-11-28

Developmental Characteristics of Fault System and Its Basin-Controlling Effects in Xihu Sag

Jiang Yiming[1], Zheng Jinhang[2*], Tang Xianjun[1], He Xinjian[1], Wu Zhiping[2*], Wu Qingbo[2], Cheng Yanjun[3]

1. *Shanghai Branch of CNOOC Ltd.*, *Shanghai* 200335, *China*
2. *School of Geosciences*, *China University of Petroleum (East China)*, *Qingdao* 266580, *China*
3. *College of Earth and Engineering*, *Shandong University of Science and Technology*, *Qingdao* 266590, *China*

Abstract: The Xihu Sag is an important Meso-Cenozoic superimposed petroliferous basin in the East China Sea Shelf Basin offshore eastern China. The spatiotemporal variation characteristics of its fault system development not only determine the basin structure but also control hydrocarbon accumulation. This paper uses the latest integrated 3D seismic data and drilling data to systematically analyze the developmental characteristics and basin-controlling effects of the fault system in the Xihu Sag, classifying three genetically distinct fault types: pre-existing Cenozoic basement faults, rift-related extensional faults, and inversion-related compressional faults. It clarifies the north-south partitioning effect of NW (NWW)-trending pre-existing basement faults on the Cenozoic slope belt and central inversion zone of the Xihu Sag; reveals the transition from NE-SW-trending faults dominating the early rifting stage (pre-Pinghu Formation deposition) to near SN-

基金项目: 新型油气勘探开发国家科技重大专项(No. 2025ZD1402802);中海油(中国)有限公司重大三外项目(No. CCL2023SHPS002EM).
作者简介: 蒋一鸣(1983-),男,高级工程师,主要从事海洋油气勘探开发研究. E-mail:jiangym2@cnooc.com.cn
* **通讯作者:** 郑津杭,E-mail:1801040409@s.upc.edu.cn

引用格式: 蒋一鸣,郑津杭,唐贤君,何新建,吴智平,吴青波,程燕君,2026.西湖凹陷断裂体系发育特征及其控盆效应.地球科学,51(7):2663-2681.

Citation: Jiang Yiming, Zheng Jinhang, Tang Xianjun, He Xinjian, Wu Zhiping, Wu Qingbo, Cheng Yanjun, 2026. Developmental Characteristics of Fault System and ItsBasin-Controlling Effects in Xihu Sag. *Earth Science*, 51(7): 2663-2681.

trending faults dominating the late rifting stage (Pinghu Formation deposition); and elucidates the genetic relationships between compressional inversion fault systems (longitudinal tension, transverse tension, and reverse faults) formed during the Longjing and Okinawa tectonic movements and inversion anticlines. The research results hold theoretical significance for understanding the tectonic differential evolution process and mechanisms of the Xihu Sag and even the entire East China Sea Shelf Basin, and can provide guidance for hydrocarbon exploration practices in this region.

Key words: fault controlled system; basin-controlling effect; Xihu Sag; petroleum geology.

0 引言

西湖凹陷所在的东海陆架盆地是我国东部近海发育的一个大型的中、新生代叠合型含油气盆地,其形成、演化体现了特提斯-喜马拉雅构造域、濒太平洋构造域两大构造域的复合、交切效应,具有复杂的成盆背景,经历了多期次构造演化;(古)太平洋俯冲速率与方向的变化、菲律宾海板块的楔入、冲绳海槽扩张等区域重大地质事件,导致盆地演化经历了自西向东沉降迁移、区域拉张方向自NNW-SSE向至NWW-SEE向逆时针转变以及伸展至挤压的构造反转(朱伟林等,2015;赵志刚等,2016;周心怀等,2019;刘金水等,2020;Cheng *et al.*, 2022).响应于复杂的成盆背景与多期次的构造演化,西湖凹陷不同层系、不同区带、不同时期断裂发育特征存在明显差异,其不仅决定了盆地的构造格局,也控制了油气的差异富集成藏(屈童等,2024;晏玉环等,2024;张伯成等,2024;唐贤君等,2025).由于受资料等因素的限制,以往对西湖凹陷断裂体系及其控藏作用的研究多局限于西湖凹陷西部的平湖、天台斜坡带及中央反转带等勘探热点地区,对西湖凹陷断裂体系发育特征的整体、规律性认识尚有待深化,这也在一定程度上制约了西湖凹陷油气勘探的深入开展及新的有利勘探区带选择.

鉴于此,本文运用最新的三维地震及钻井资料,在对西湖凹陷断裂体系的发育特征进行系统梳理的基础上,依据其发育阶段及力学成因,区划了断裂类型,揭示了断裂体系的演化过程,分析了不同类型断裂的控盆效应,旨在为西湖凹陷油气勘探实践提供支撑.

1 西湖凹陷地质概况

西湖凹陷发育于东海陆架盆地东部坳陷带,面积超过5万平方公里,为中国东部近海最大的含油气凹陷,其东侧紧邻钓鱼岛隆起带,西侧为舟山隆起带,北临福江凹陷,南接钓北凹陷,整体表现为东断西超的箕状凹陷(蔡华等, 2014;蒋一鸣等, 2020;刘金水等,2020).自西向东可划分为西部斜坡带、中央凹陷带与中央反转带、东部陡坡带;自北向南,西部斜坡带又可分为杭州斜坡区、平湖斜坡区和天台斜坡区,中央反转带可划分为嘉兴反转带、宁波反转带、黄岩反转带和天台反转带,构造格架体现出东西分带、南北分区的特点(图1).

前人的大量研究表明,响应于特提斯构造域、濒太平洋构造域的叠加复合效应,西湖凹陷所在的东海陆架盆地中、新生代经历多期次的构造演化(图2).

三叠纪,华南块体南与印支地块拼接碰撞、北与华北块体俯冲碰撞(Gilder *et al.*, 1999;Faure *et al.*, 2014),东海盆地所在区域乃至整个华南地区受南北两侧板块NNE-SSW向挤压,发育NW向逆冲基底断层(Shi *et al.*, 2015;Cheng *et al.*, 2023);侏罗纪,华南完成了与印支、华北块体的拼接,成为欧亚板块的一部分,濒太平洋构造域的洋-陆板块作用成为主导,伊泽奈岐板块经历由NW向低速转为NNW向高速俯冲于欧亚大陆之下的过程(索艳慧等,2017;李三忠等,2018),华南板块发生大规模挤压、岩浆活动,受伊泽奈岐板块平板俯冲的影响,华南东部区域内发育NNE向逆断层(张岳桥等,2009;Liu *et al.*,2012);白垩纪,伊泽奈岐板块沿NNW向高速俯冲于欧亚大陆之下,太平洋板块由南向北逐渐取代伊泽奈岐板块,NNW向俯冲于欧亚板块,华南地区处于伸展作用背景下,发育大规模NE-NNE向断陷盆地(崔幸等,2017;Cheng *et al.*, 2023),并诱发大面积的岩浆侵入和火山作用,东海盆地西部坳陷带开始发育.

进入新生代,古新世由于太平洋板块俯冲速率骤降、后撤,长期处于挤压状态的岩石圈因应力松弛产生弹性回跳,造成地幔上涌、岩石圈减薄(Wang *et al.*, 2017;Chu *et al.*, 2019),东海盆地西部坳陷带内NNE向断裂强烈活动的同时,裂陷范围向东扩大,西湖凹陷所在的东部坳陷带进入初始裂陷发育阶段;始新世早、中期,在太平洋板块俯冲带

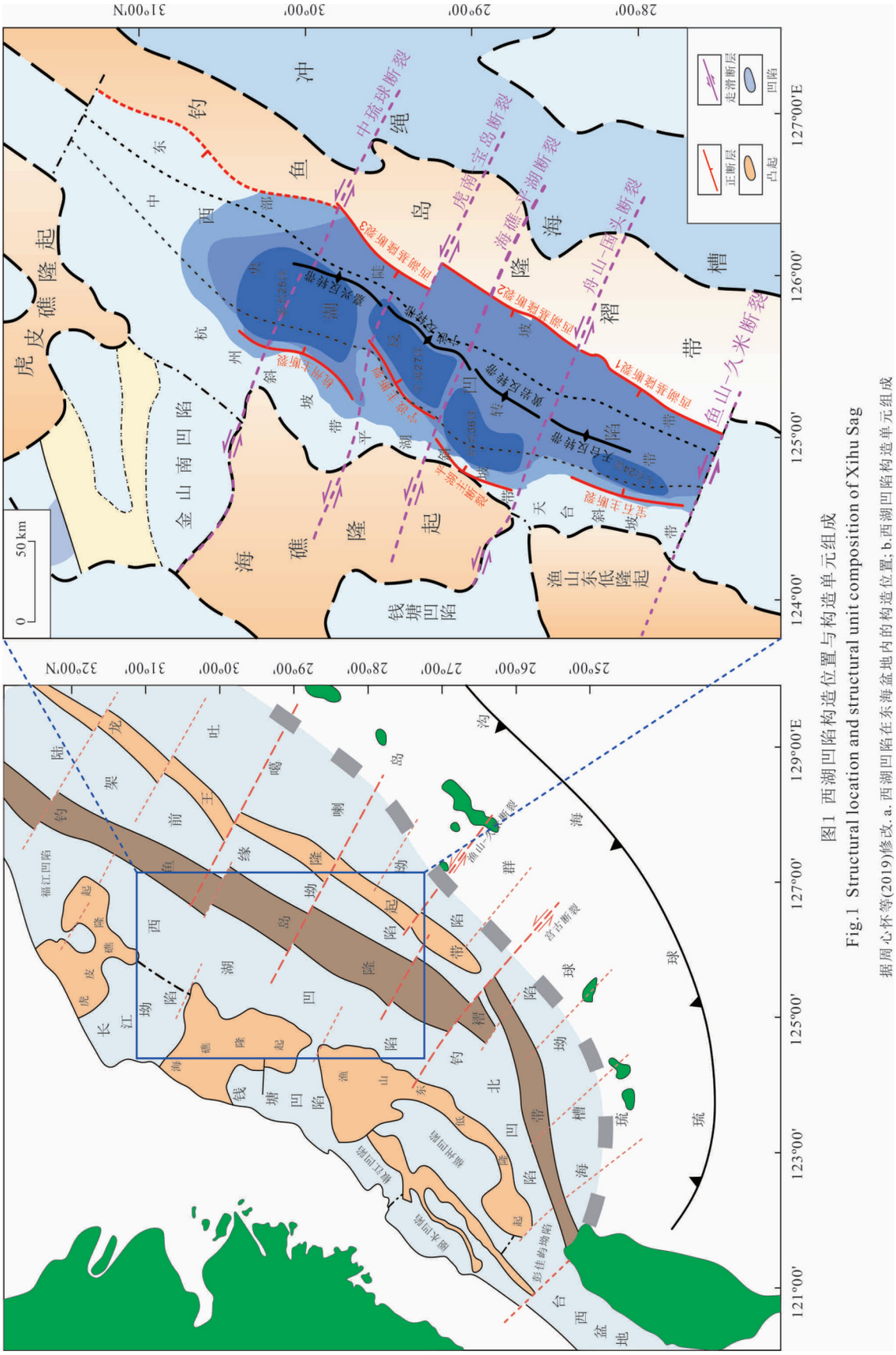


图1　西湖凹陷构造位置与构造单元组成

Fig.1　Structural location and structural unit composition of Xihu Sag

据周心怀等(2019)修改. a. 西湖凹陷在东海盆地内的构造位置; b.西湖凹陷构造单元组成

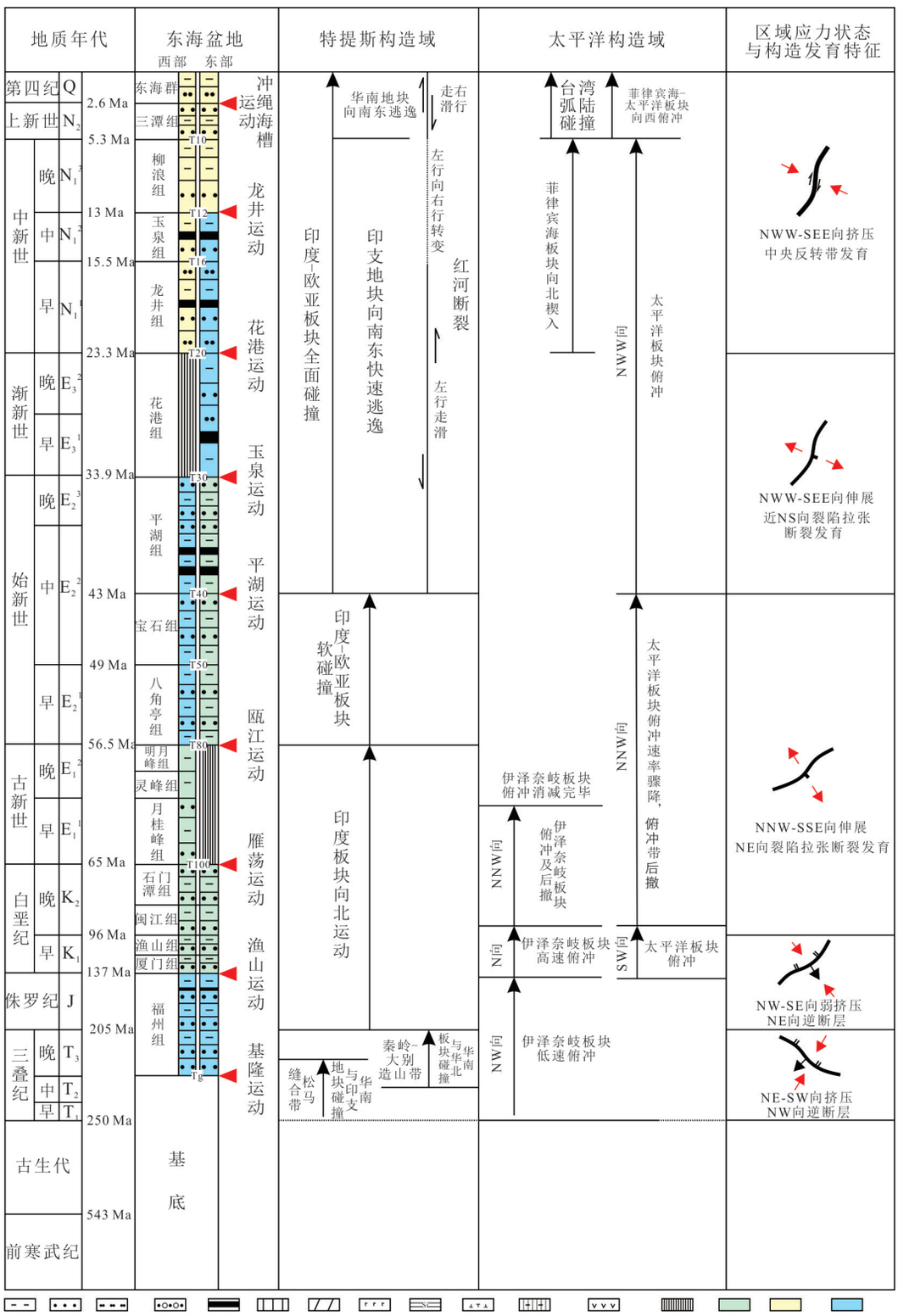


图 2 中、新生代东海盆地地层结构与构造演化综合柱状图

Fig.2 Comprehensive histogram of stratigraphic structure and tectonic evolution of the Mesozoic and Cenozoic East China Sea Basin

持续后撤背景下，印度板块前缘与欧亚板块沿 NE 向发生软碰撞，这种不对称的板块作用导致软流圈向东、南蠕散，使得东海陆架盆地裂陷中心向东迁移，西部坳陷带处于挤压坳陷阶段，而西湖凹陷所

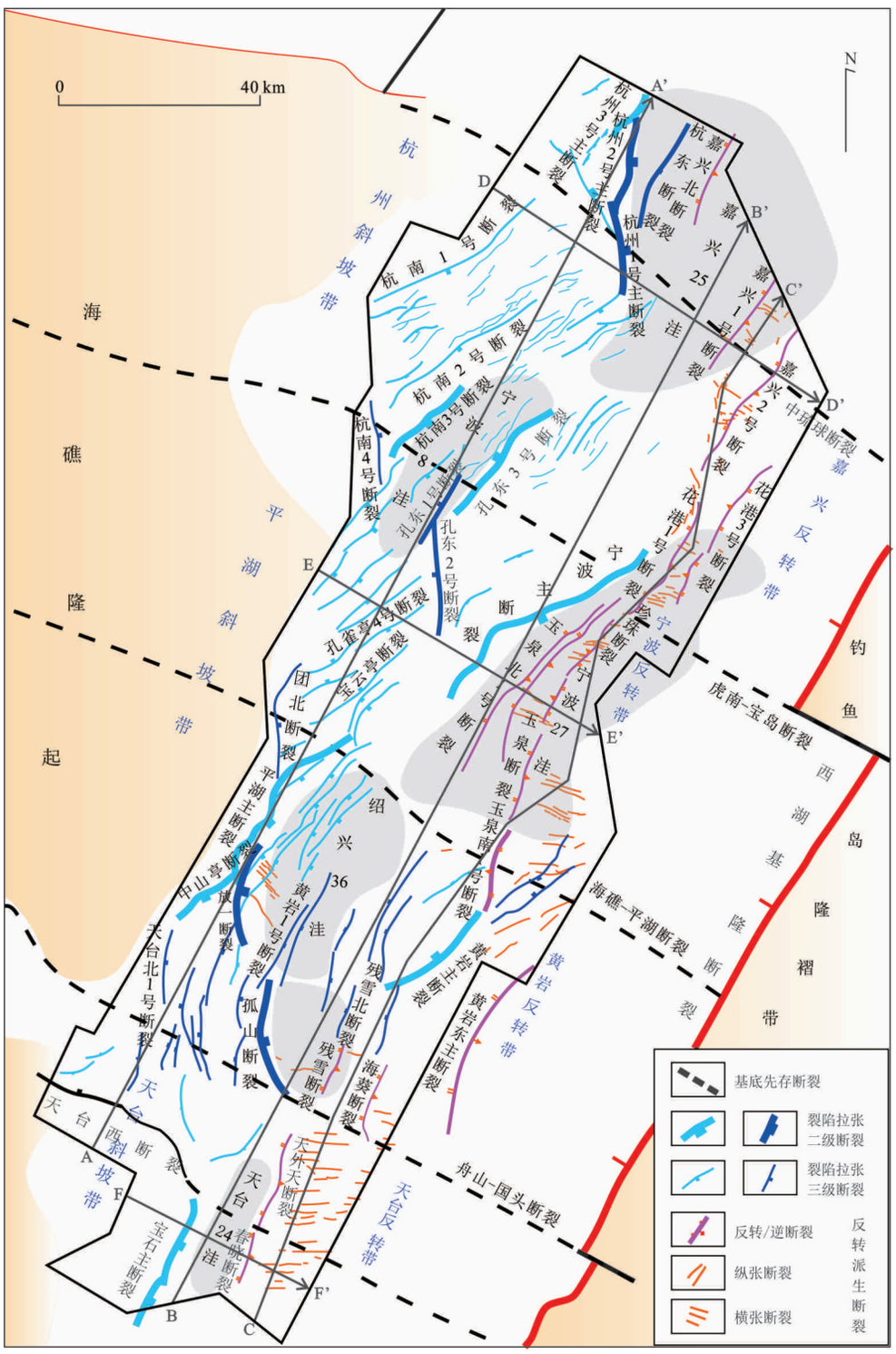


图 3　西湖凹陷断裂纲要图

Fig.3　Map showing the distribution of the fault system and structural units in the Xihu Sag

在东部坳陷带裂陷作用增强,至始新世晚期,太平洋板块俯冲方向由 NNW 转变为 NWW(Torsvik *et al.*, 2017;Stern *et al.*, 2018),印度板块与欧亚板块发生硬碰撞,从而引起印支地块旋转挤出,加之古南海板片向南拖曳俯冲作用,岩石圈进一步减薄,东海陆架盆地裂陷中心继续向东迁移,西部坳陷带整体抬升暴露地表,东部坳陷带 NNE 向断裂强烈活动,西湖凹陷成为沉积中心;渐新世,太平洋板块持续沿 NWW 向向欧亚大陆俯冲;菲律宾海板块开始楔入欧亚板块和太平洋板块之间(郑求根等,2005;

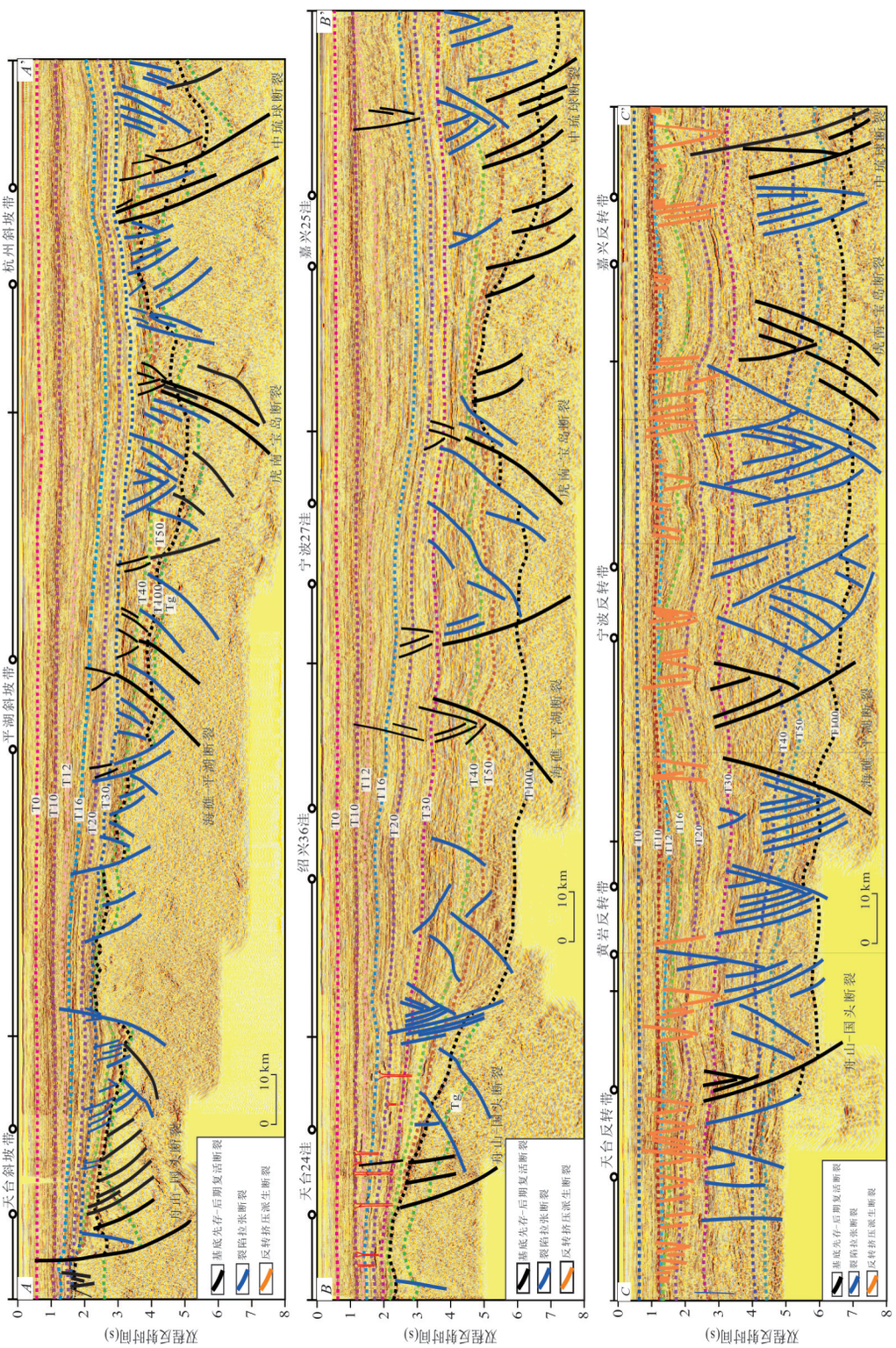


图4 西湖凹陷SSW-NNE向测线所揭示的断裂体系发育特征(测线位置见图3)

Fig.4 The development characteristics of the fault system revealed by the SSW-NNE trending line in the Xihu Sag

a.斜坡带*AA'*; b.凹陷中央带*BB'*; c.中央反转带*CC'*

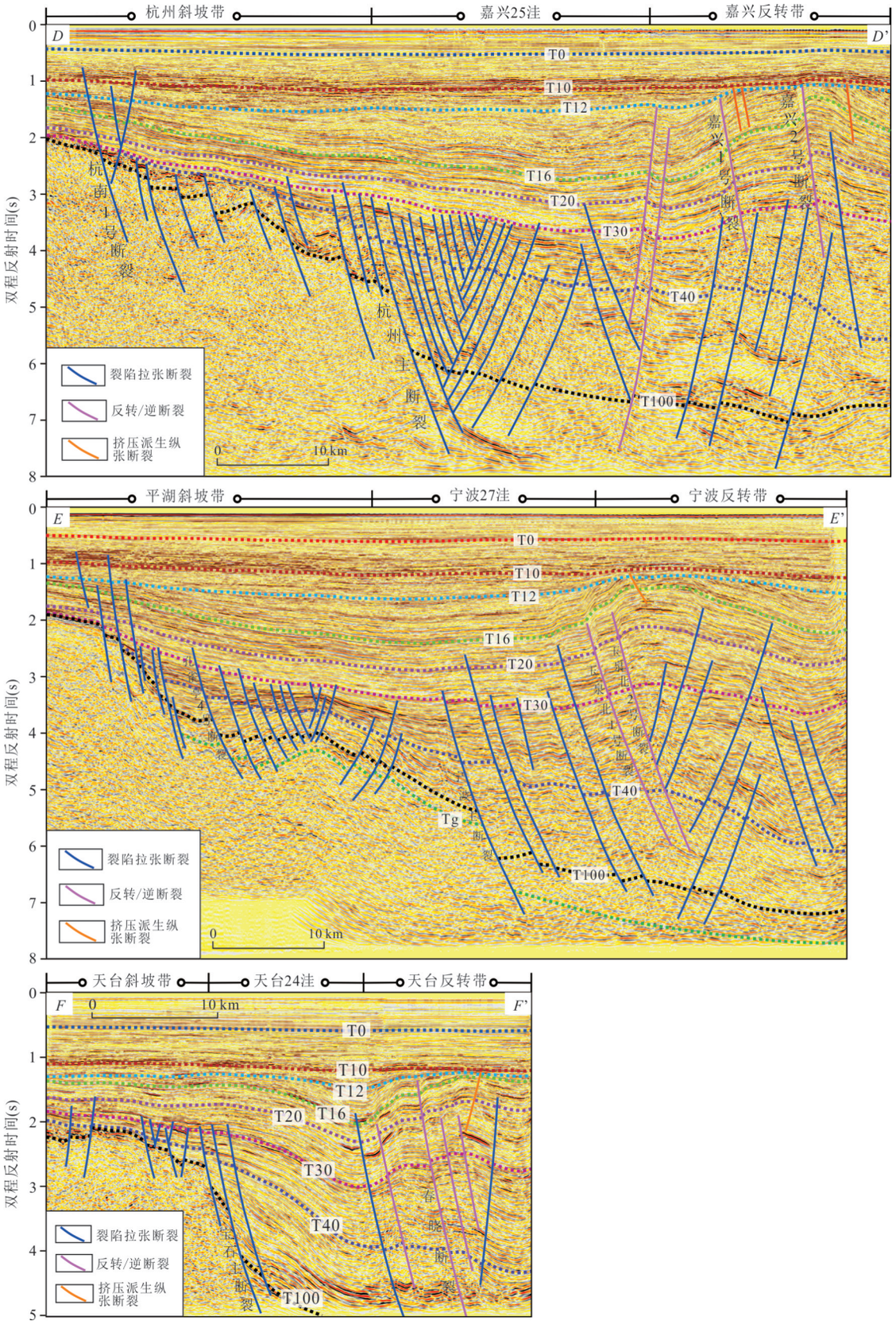


图 5　西湖凹陷 NW-SE 向测线所揭示的断裂体系发育特征(测线位置见图 3)

Fig.5　The development characteristics of fault system revealed by NW-SE trending survey line in the Xihu Sag

a.杭州斜坡–嘉兴反转带 *DD*';b.平湖斜坡–宁波反转带 *EE*';c.天台斜坡–天台反转带 *FF*'

Liu *et al.*, 2012)，东海陆架盆地经历近 EW 向(NWW-SEE 向)挤压，西部坳陷带抬升剥蚀，东部坳陷带挤压坳陷，局部地区发生构造反转；中新世的早-中期，太平洋板块俯冲速率下降，造成日本海盆等的强烈弧后扩张，并向西挤压中国东部陆缘，菲律宾海板块持续向欧亚板块平板俯冲，东部坳陷带强烈拗陷沉降，构造反转主要发生于西湖凹陷中央及东缘断裂附近，此时，钓鱼岛隆褶带也初步成型，冲绳海槽开始扩张；中新世晚期至上新世，太平洋板块俯冲速率增加，加剧对中国东部的挤压，菲律宾海板块与欧亚板块在台湾岛地区发生碰撞，此时东海陆架盆地处于整体沉降期，受太平洋构造域西向挤压、碰撞影响，盆内发生大规模构造反转(Dai *et al.*, 2014；Liu *et al.*, 2025)．

2 西湖凹陷断裂的成因类型划分

响应于复杂区域地质背景与多期次的构造运动，西湖凹陷断裂体系表现为由多方向、多期次、多性质断裂组成的复杂断裂网络体系(图 3)，通过运用地震资料的断裂解析，依据断裂对地层的切割关系、发育时期及其力学成因，可以将西湖凹陷断裂体系划分为新生代盆地先存基底断裂、裂陷拉张断裂及反转挤压断裂 3 类(图 4、图 5)．

2.1 先存基底断裂

西湖凹陷所在的新生代东海陆架盆地基底并非“平板一块”，印支期华南块体南、北分别与印支地块、华北块体碰撞拼接，经历了 NNE-SSW 向的区域挤压，导致 NW(NWW)向逆冲断层的发育，燕山期受控于伊泽奈岐板块、太平洋板块对欧亚板块的俯冲，东海陆架盆地所在区域经历了由近 E-W 向挤压到 NNW-SSE 向拉张的应力场转变，导致先期发育的 NW 逆推断层的反转与 NNE 向断裂的产生(Boschman and van Hinsbergen, 2016；Cheng *et al.*, 2023)，形成了前新生代 NW(NWW)与 NNE 向断裂相互切割的基底断裂体系(杨香华等，2003；杨长清等，2012，2019)．

尽管新生代西湖凹陷整体表现为 NNE-SSW 向展布的构造格局，但最新的重磁资料清晰的显示出了 NW 向先存基底断裂的存在(图 6)，自北向南，可识别出中琉球、虎南-宝岛、海礁-平湖、舟山-国头等多个 NW 向基底断裂带．

与 NW 向断裂近于垂直的 NNE 向地震测线显示，NW 向断裂向下切穿 Tg 界面(中生界底面)，向上大都消亡于 T30 界面(花港组底面)之下，且在 T100(新生界底面)-T30 界面之间地层垂向落差小，这表明 NW 向断裂的垂向活动期主要为中生代，新生代的垂向活动弱，且逐渐趋于消亡(图 4)．

值得关注的是，尽管地震剖面 T30 界面之上 NW 向先存基底断裂两侧地层没有明显垂向错断和落差，但对三维地震资料方差体属性分析表明，在对应深部 NW 向先存断裂的位置上，在浅部层系(T12 界面)表现为 NWW 向次级小断层沿深部 NW 向先存断裂雁行排列(或平行侧列)的特征(图 7a)，且在剖面上呈现出多级“Y”形构造(图 7b)，这表明先存 NW 向断裂在新生代发生了一定程度的走滑复活．

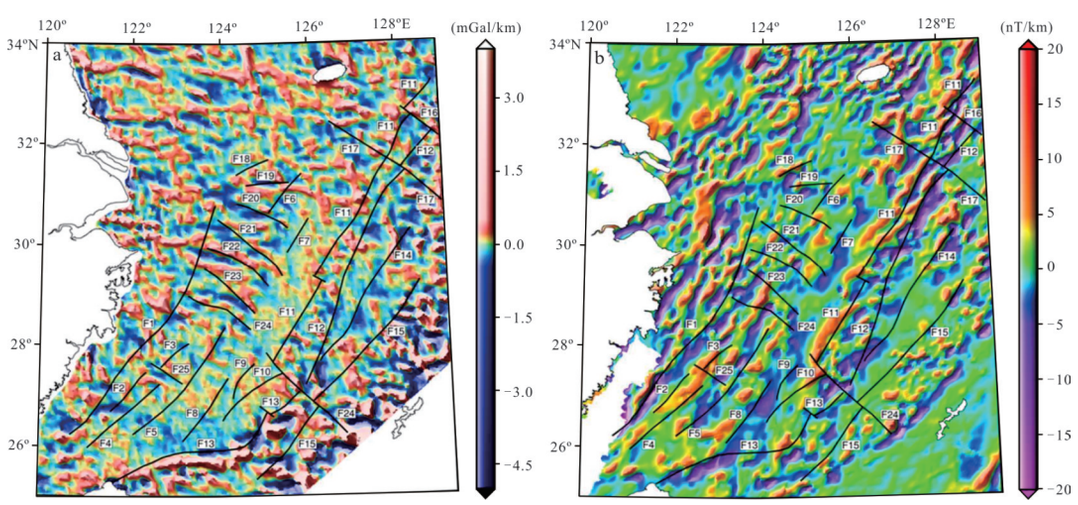


图 6 重力、磁力资料所揭示的东海盆地 NW 向基底断裂

Fig.6 The NW-trending basement faults in the East China Sea Basin revealed by gravity and magnetic data

a.重力异常图；b.磁力异常图

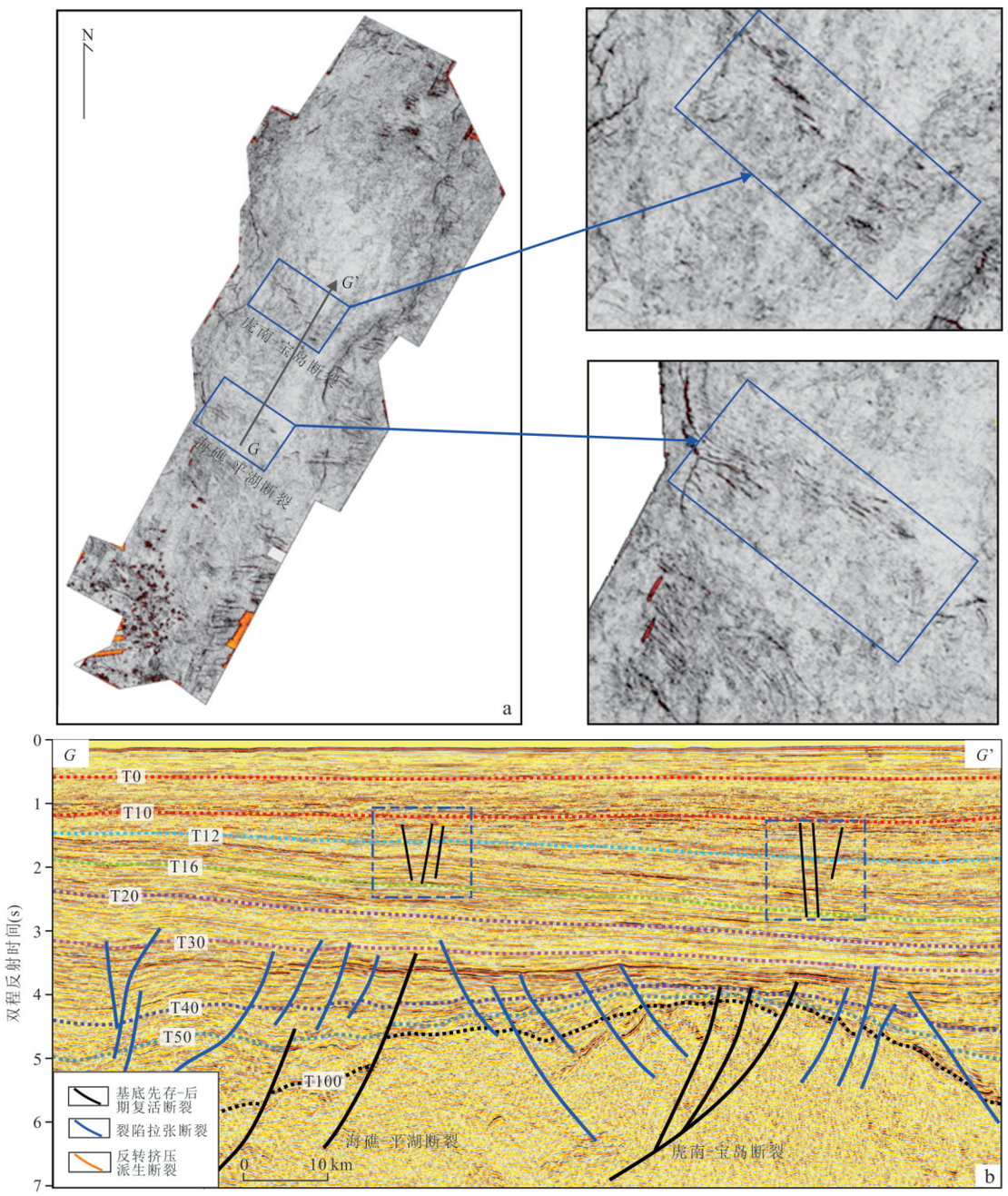


图 7　地震资料所揭示的 NW 向先存断裂在后期的走滑复活效应

Fig.7　The later strike-slip reactivation effect of NW-trending pre-existing faults revealed by seismic data

a.沿层属性相干切面(T12);b.地震测线(位置见图 a)

2.2　裂陷拉张断裂

八角亭组-宝石组-平湖组沉积期是西湖凹陷新生代裂陷发育期,东侧的 NE 向的西湖-基隆断裂控制了新生代西湖凹陷“东断西超”的整体格局.

最新的三维地震资料分析表明,西湖凹陷内部裂陷期断裂走向主要为 NE 向、NNE(近 SN)向,与之近于垂直的 NW-SE 向测线剖面资料显示(图 5),裂陷期断裂以顺向铲式正断为主,在斜坡带、中央凹陷带大部分断裂未切穿平湖组顶面(T30 界面),在花港组沉积期基本不活动,而在反转带,裂陷期发育的断裂在后期存在活化现象,表现为“下正上逆”的构造反转特征.

对西湖凹陷三维工区内 NE、近 SN 向主要断裂的活动性分析表明(图 8),在早期裂陷的前平湖组沉积期(T100-T40),杭州 3 号主断裂、宁波主断裂、平湖主断裂等 NE 向断裂断层落差明显大于杭州 1

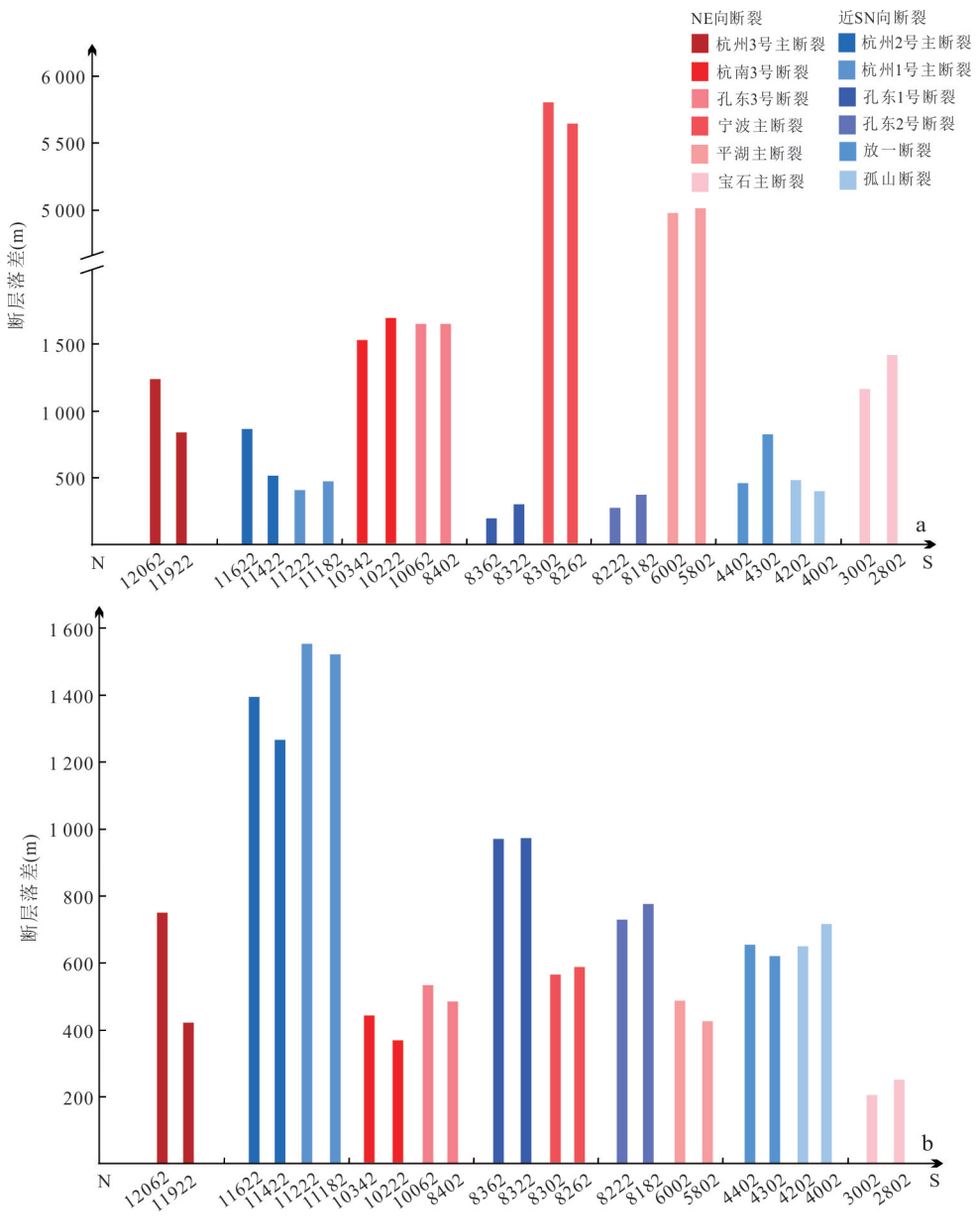


图 8 西湖凹陷三维工区主要断裂裂陷期的活动强度分析

Fig.8 The activity intensity analysis diagram of the main fault rifting period in the three-dimensional work area of the Xihu Sag

a. 新生代前平湖组沉积期(T100-T40)主要断层的落差; b. 新生代平湖组沉积期(T40-T30)主要断层的落差. 选择过各断裂中部且与之近于垂直的 NWW-SEE 向测线进行断层落差统计,图中横坐标为自北向南的各 NWW-SEE 向的测线号,纵坐标为各测线所切断层的落差;各断层的发育平面位置见图 3

号主断裂、孔东 1 号主断裂、放一断裂等近 SN 向断裂,而晚期裂陷的平湖组沉积期(T40-T30),近 SN 向断裂断层落差则整体大于 NE 向断裂,这体现出由前平湖组沉积期至平湖组沉积期,主控断裂发生了由 NE 向至 SN(NNE)向的转换,耦合于区域拉张应力方向由 NW-NE 向至近 E-W 向的逆时针转变.

2.3 反转挤压断裂

龙井运动阶段菲律宾海板块的平板俯冲以及冲绳海槽运动阶段的冲绳海槽强烈扩张所引发的西向挤压,这不仅导致了西湖凹陷近 SN 走向的中央反转带的形成(郑求根等,2005;何新建等,2023,2024),同时伴生有反转挤压断裂体系的产生.

从理论上而言,挤压褶皱形成过程中通常伴生有纵张断裂、横张断裂和逆断裂等不同类型的断裂发育(图 9).

横张断裂主要发育于背斜转折端,走向与背斜轴近于垂直,沿西湖凹陷中央反转背斜轴的地震剖面(图 4c)显示,其主要发育于 T10-

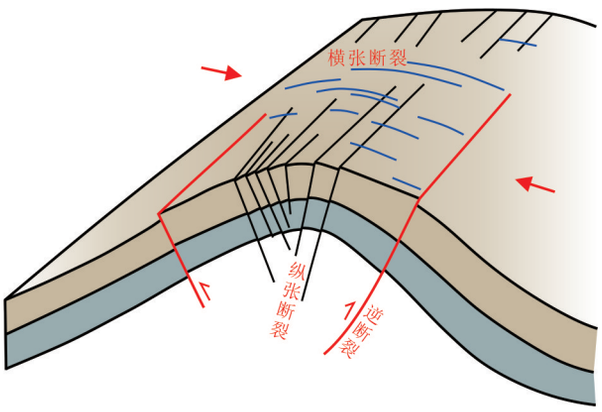


图 9　挤压反转褶皱伴生的断裂体系发育模式

Fig.9　Development mode of fault system associated with compressional inversion fold

T30 之间,自上往下切,“悬”于裂陷拉张断裂体系之上,也有少数切至 T30 之下,与裂陷期拉张断裂搭接;而在远离中央反转背斜带的凹陷带、斜坡带,横张断裂基本不发育(图 4a、4b).

纵张断裂的走向与褶皱轴近于平行,在背斜转折端数量相对较多;剖面上为板式正断,上可切 T12,其可为挤压期新产生,也可能是先期裂陷期近 SN 向断裂再复活(图 5).

挤压过程中,在褶皱的翼部还会发育有与褶皱轴近于平行、垂直挤压应力方向的逆断层.值得关注的是,西湖凹陷中央反转带的翼部不仅有龙井运动挤压所产生的逆断层,还发育有“下正上逆”的反转断层,这体现了平湖运动→花港运动→龙井运动,区域应力由 NWW-SEE 向拉张至 NWW-SEE 向挤压的转变(图 10).

为进一步明确挤压反转期断裂与挤压背斜发育间的成因联系,本文选择背斜形态显示相对完整的 T16 界面,对西湖凹陷中央反转背斜带不同位置的背斜幅度(背斜高度与背斜宽度的比值)及挤压派生断裂的数量进行了计算和统计,结果表明,反转所派生的横张、纵张及逆断裂(反转断层)的数量与背斜幅度具有明显的正相关,褶皱幅度越大,挤压强度越大,各类挤压派生断裂的数量越多(图 11).

3　西湖凹陷断裂的发育演化模式

在西湖凹陷各类断裂发育特征分析基础上,结合区域地质背景,可建立西湖凹陷断裂体系演化模式(图 12).

前古近纪,由于华南板块与印支、华北板块在印支期发生大规模碰撞、拼接,东海盆地所在的整个华南地区受南、北两侧板块 NNE-SSW 向挤压,发育 NW 向逆冲基底断层;燕山早期,濒太平洋构造域的洋-陆板块作用成为主导,伊泽奈岐板块的俯冲效应,导致华南板块发生大规模挤压,形成 NNE 向逆断层;燕山中、晚期,太平洋板块取代伊泽奈岐板块,NNW 向俯冲于欧亚板块,华南地区处于伸展作用背景下,产生大规模 NE、NNE 走向的断陷.印支期与燕山期构造作用的叠合效应导致新生代东海盆地基底发育有 NW(NWW)、NE

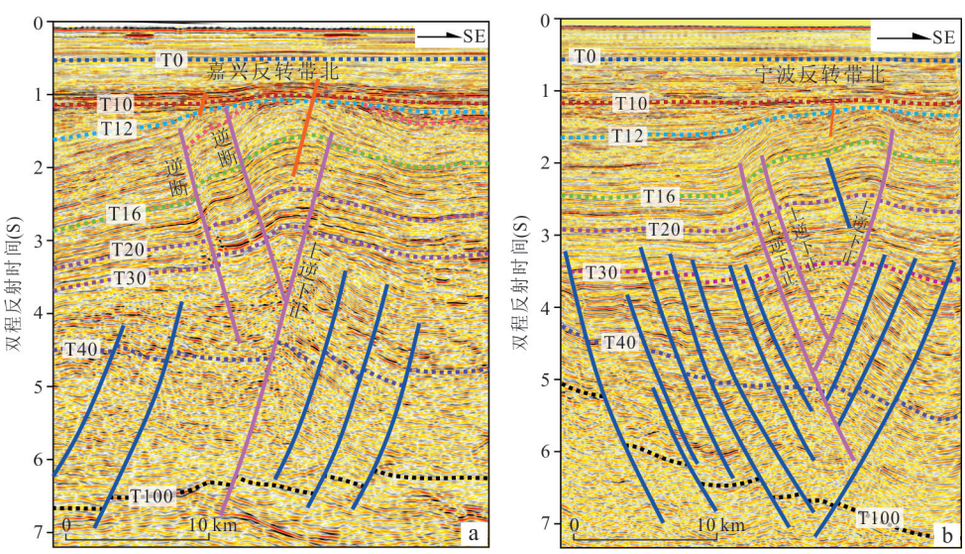


图 10　地震资料所揭示的西湖凹陷中央反转褶皱带逆断层与反转断层

Fig.10　The reverse faults in the central inversion zone of the Xihu Sag revealed by seismic data

a.嘉兴反转带北;b.宁波反转带北

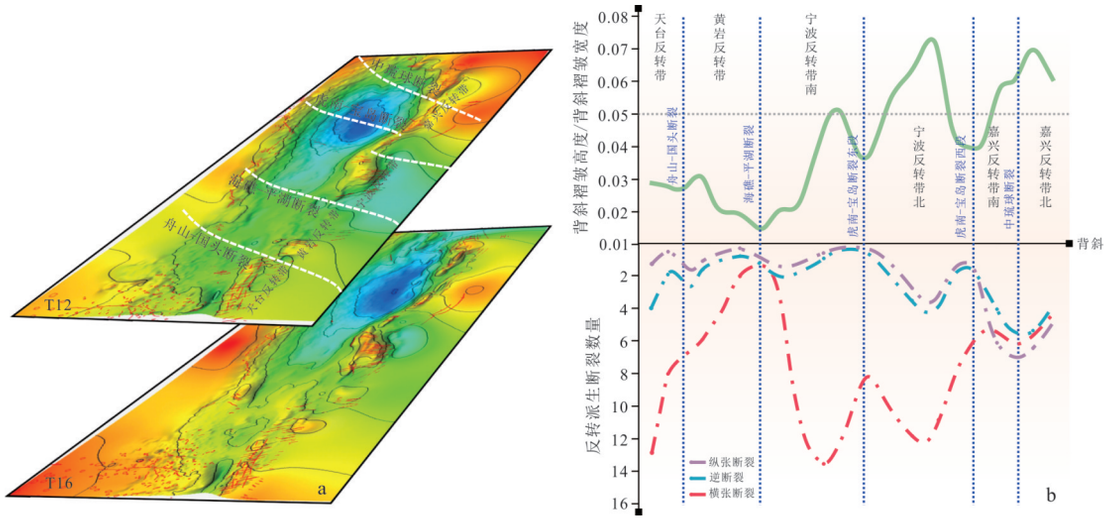


图 11　西湖凹陷中央反转带褶皱幅度与挤压派生断裂数量相关性分析

Fig.11　Correlation analysis between fold amplitude and number of compression-derived faults in central inversion zone of the Xihu Sag

a.中央反转带的背斜形态;b.褶皱幅度与派生断裂数量

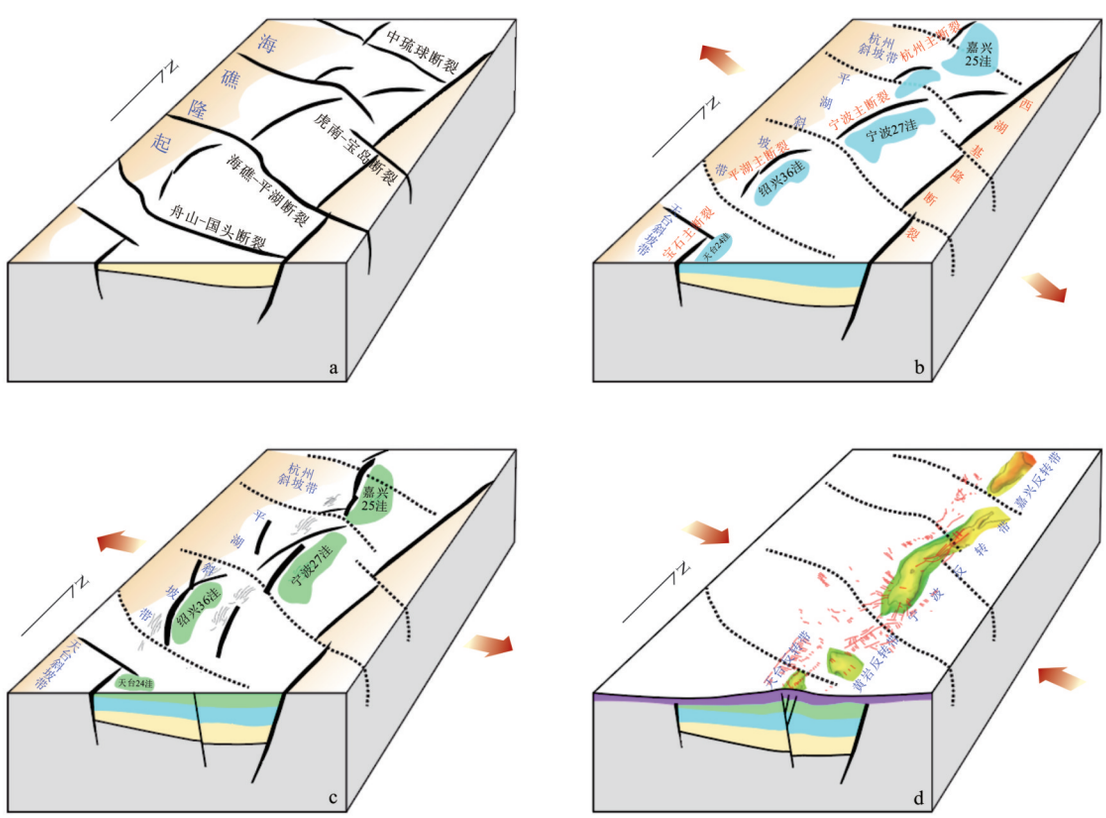


图 12　西湖凹陷断裂体系发育演化模式

Fig.12　Development and evolution model of fault system in the Xihu Sag

a.前古近纪;b.古近纪早期裂陷(前平湖组沉积期);c.古近纪晚期裂陷(平湖组沉积期);d.新近纪挤压反转

(NNE)两组先存基底断裂,且 NW(NWW)向断裂先于 NE(NNE)向断裂的形成,对 NE(NNE)发育具有转换作用(图 12a).

古近纪古新世至始新世早、中期的前平湖组沉积期(T100-T40),由于太平洋板块俯冲速率骤降、后撤,加之印度板块前缘与欧亚板块沿 NE 向发生软碰撞,这种不对称的板块作用导致软流圈向东、南蠕散,东海陆架盆地处于强烈的弧后扩张背景

下,使得东海陆架盆地裂陷中心向东迁移,西湖凹陷所在东部坳陷带裂陷作用增强,在NW-SE向区域伸展应力作用下,NE向断裂成为凹陷内部的主控断裂,这些高角度正断层切割深度大,控制了早期洼陷的形成及宝石组的沉积;先存NW向断裂发生斜向拉伸,走滑转换效应导致南北分区(图12b).

始新世中、晚期的平湖组沉积期(T40-T30),太平洋板块强烈俯冲所导致的地幔上涌、印度板块与欧亚板块硬碰撞所导致华南挤出效应及古南海板片向南拖曳俯冲作用,使得东海陆架盆地裂陷中心继续向东迁移,西湖凹陷进入强烈裂陷期;与前期裂陷相比,由于太平洋板块俯冲方向由NNW转变为NWW(蒋一鸣等,2024),西湖凹陷的伸展方向也由NW-SE向转变为NWW-SEE(近E-W)向,NNE(近SN)向断裂活动强度明显大于NE向断裂(图8b),断裂走向发生逆时针偏转,成为西湖凹陷内主控断裂,控制了凹陷内嘉兴25、宁波27、绍兴36等主要生烃洼陷的发育(图12c).

渐新世至中新世,西湖凹陷经历了由裂陷到拗陷的转换,裂陷期强烈活动的NNE、NE向断裂活动性逐渐减弱趋于消亡,与此同时,由于菲律宾板块西向平板俯冲以及冲绳海槽强烈扩张的西向挤压,使得西湖凹陷遭受近EW向的挤压反转,形成了中央反转褶皱带,并在反转背斜转折端及翼部伴生有纵张、横张、逆断(反转)等不同类型的断裂(图12d).

综合上述分析,发生于中生代的基隆运动、渔山运动导致西湖凹陷新生代盆地基底NW、NE向先存断裂的产生;古近纪雁荡运动→瓯江运动→平湖运动,拉张应力自NNW-SSE向至NWW-SEE向逆时针转变,导致西湖凹陷新生代裂陷期主控断裂出现时空差异;新近纪龙井运动、冲绳海槽运动自东向西NWW-SEE向的挤压,控制了西湖凹陷中央反转带的发育.

4　西湖凹陷断裂体系的控盆效应

作为中国东部海域最大的一个断陷型凹陷,西湖凹陷断裂体系的差异演化必然导致西湖凹陷盆地结构的时空差异.

首先,先存NW向基底断裂控制了西湖凹陷的南北分区效应,转换带两侧构造差异性明显,平面上两侧NE向断层被转换带明显分隔(图3),对西湖凹陷主控断层、斜坡带、中央反转带具有明显的分割、转换,因此导致了西湖凹陷盆地结构具有明显的南北分区效应(图4).就西部斜坡带而言,自北向南不同斜坡区的构造样式存在明显差异,北部的杭州斜坡区,受杭州主断层控制,呈单断式陡坡结构,杭州斜坡区南部由于断裂活动性减弱,呈断阶式缓坡;中北部的平湖北斜坡区受顺向、反向断层及古隆起综合控制,呈堑垒式缓坡结构;平湖南区受平湖主断层及次级断层形成的滑动断阶构造控制呈断阶式陡坡结构;天台斜坡区北部呈多条反向断层控制的反向断阶式缓坡结构,天台区南部受宝石主断层的控制呈单断式陡坡结构(图13).就中央反转带而言,背斜的隆升幅度及派生断裂发育特征也具有明显的南北分段效应(图11).

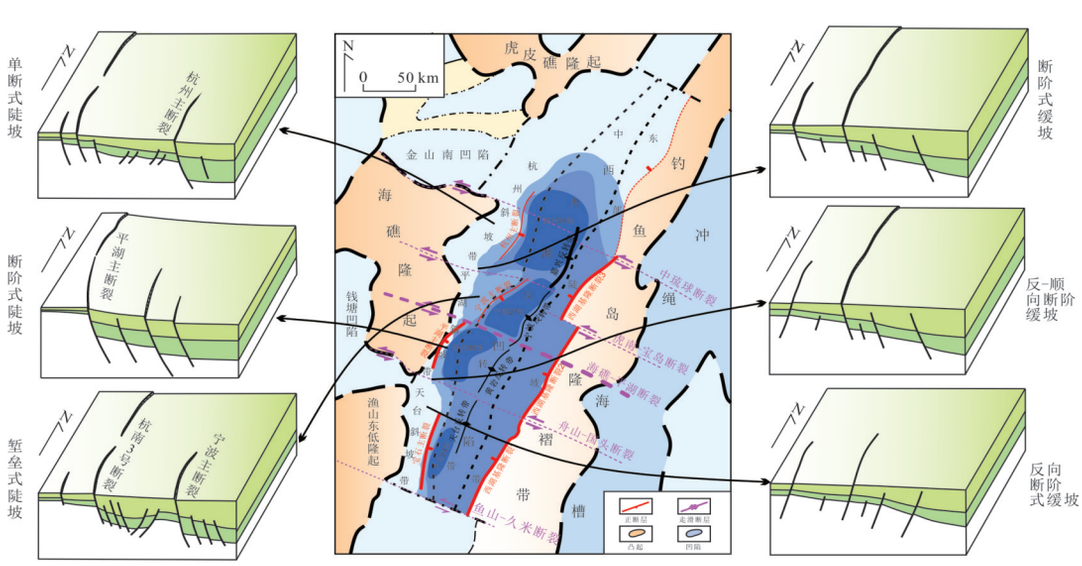


图13　西湖凹陷西部斜坡带的结构差异

Fig.13　Structural difference of western slope zone in the Xihu Sag

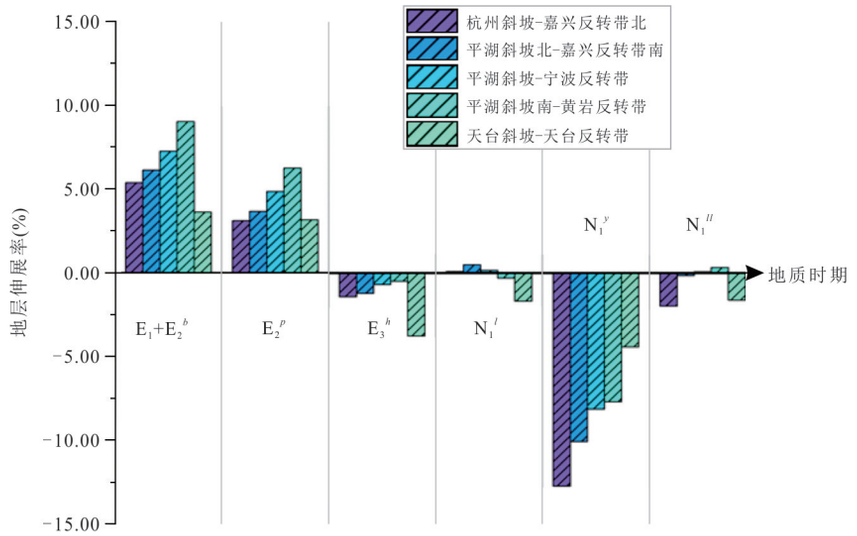


图 14 西湖凹陷南北不同区带测线的伸展率计算

Fig.14 Stretching rate calculation of survey lines in different zones in north and south of the Xihu Sag

纵坐标为依据所选各 NWW-SEE 向测线进行平衡剖面分析计算得出的各时期伸展率,其值为:(后期剖面长度-前期剖面长度)/前期剖面长度,正值体现伸展强度,负值体现挤压强度)



图 15 先存断裂对后期构造变形的调节转换所导致的分区效应

Fig.15 The zoning effect caused by the adjustment and transformation of the pre-existing fault to the later structural deformation

a.拉张转换(据 Uzel *et al.*, 2013 修改);b.挤压转换(据 Fossen and Rotevatn, 2016)

为进一步揭示西湖凹陷新生代构造发育的南北分区效应,本文选取横穿不同北、南区带的地震测线,在进行平衡剖面分析的基础上,计算了各演化阶段的伸展率(压缩率),分析结果表明(图 14),在拉张裂陷期,中北部伸展强度大,在挤压反转期,北部的挤压量强于南部,各区段无论是伸展率还是挤压率都存在明显差异.

值得关注的是,斜坡带分区、中央反转带分段转换处均重合于先存 NW 向断裂发育处.这并非巧合,而是先存断裂对后期构造发育的转换效应的必然体现.尽管先期断裂的走向与后期伸展(或挤压)应力方向近于平行,但地质过程中不可能存在绝对均匀的伸展和挤压,先存断裂的存在,往往成为后期构造发育的转换带,起到分区效应(Corti *et al.*, 2004;Uzel *et al.*, 2013;Fossen *et al.*, 2016)(图 15).构造转换带大多由 NW 向先存基底断裂和浅部隐性断层两部分组成,少量构造转换带仅发育浅部隐性断层;转换带浅部隐性断裂可以识别出“Y”字形构造、似花状构造、多级“Y”字形构造等多种组合(图 4a、4b).

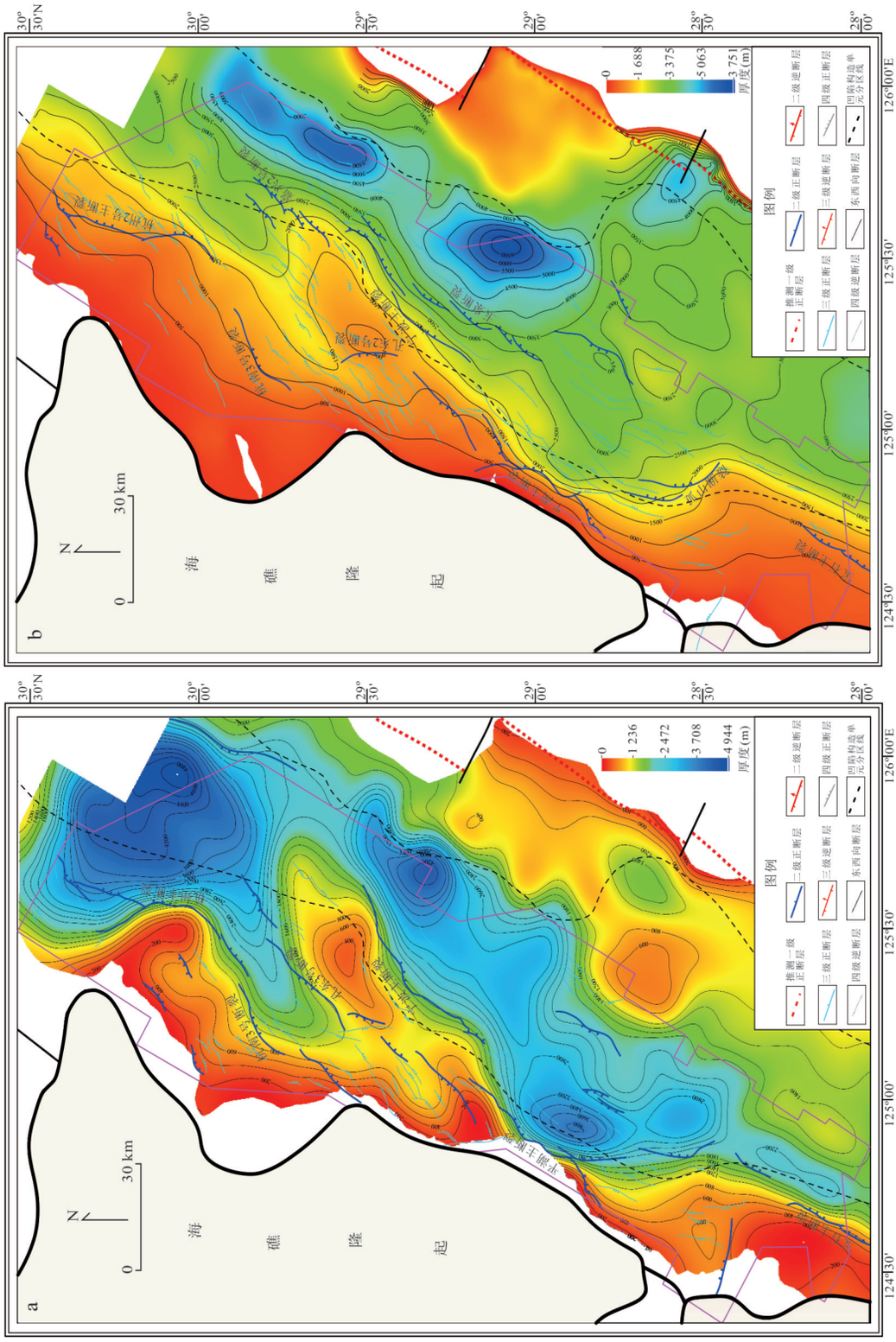


图16　西湖凹陷裂陷期主控断裂与地层展布

Fig.16　Main controlling faults and stratigraphic distribution in the Xihu Sag during rifting period

a. 宝石组沉积期; b. 平湖组沉积期

其次,西湖凹陷新生代裂陷期主控断裂的转变对凹内生烃洼陷展布具有重要的控制作用.

在新生代裂陷期,西湖凹陷所在东海陆架盆地区域拉张应力方向发生了由NW-NE向至近E-W向的逆时针转变,在早期裂陷的前平湖组沉积期,在NW-SE向区域拉张作用下,宁波主断裂、平湖主断裂等NE向断裂是凹陷内的主要控洼断裂,宝石组的地层呈现出NE-SW向展布的特点(图16a);至晚期裂陷的平湖组沉积期,区域拉张应力场转为NWW-SEE(近E-W)向,NNE-SSW(近SN)向的杭州2号主断裂、嘉兴2号断裂、玉泉断裂等断裂成为西湖凹陷内的主控断裂,这也导致了平湖组的地层呈现出近SN向的展布特征(图16b).裂陷早期NE向断裂控制了宝石组局限湖相优质烃源岩的发育,往往形成独立的生烃中心,各洼陷之间连通性差(唐贤君等,2024;谢晓军等,2024;王辉等,2025);裂陷晚期近SN向断裂的活动则控制了平湖组煤系地层的广泛发育,由于断裂连接性增强,水体范围扩大,形成了广覆式的煤系烃源岩分布格局(孙侨阳等,2024).

相较于先存断裂,裂陷期拉张断裂,反转挤压断裂主要形成于西湖凹陷整体拗陷期,其主要发育于凹陷东侧的中央反转带,垂向落差相对较小,但其对地层的切割效应对中央反转带的油气运聚与成藏具有重要影响(邹玮等,2021;余逸凡等,2022;张宙等,2022).

5 结论与启示

(1)响应于特提斯构造域、濒太平洋构造域的多期次、多幕式的构造叠加效应,西湖凹陷断裂体系由新生代盆地基底先存断裂、裂陷拉张断裂及反转挤压断裂这3类不同成因的断裂体系组成.

(2)新生代盆地基底断裂体现了印支期与燕山期构造作用的叠合效应,发育有NW(NWW)、NE(NNE)两组先存基底断裂,且NW(NWW)向先存基底断裂对新生代西湖凹陷构造发育具有调节、转换作用,控制了斜坡带的南北分区及中央反转带的南北分段.

(3)新生代裂陷期区域拉张应力方向发生逆时针偏转,导致凹陷内部不同裂陷阶段主控断裂的差异,裂陷早期(前平湖组沉积期)由NE-SW向断裂主控,裂陷晚期(平湖组沉积期)由近SN向断裂主控,这也导致了凹陷内部各生烃洼陷地层展布方向由前平湖组NE-SW向展布至平湖组近SN向展布的改变.

(4)龙井运动、冲绳海槽运动的西向挤压,不仅导致了西湖凹陷近NS走向的中央反转背斜带的形成,也伴生了反转挤压断裂体系,纵张、横张及逆断(反转)等不同性质、走向断裂的发育规模、数量与中央反转背斜的褶皱强度呈正相关,体现了反转挤压断裂体系与反转背斜的成因联系.

(5)西湖凹陷断裂体系的差异演化不仅控制了盆地结构的时空差异,也导致不同层系、不同区带油气成藏的差异,系统揭示断裂体系发育时空差异与源岩发育、油气运聚、有效圈闭形成的耦合关系,应成为今后西湖凹陷油气勘探研究的重点.

References

Boschman, L. M., van Hinsbergen, D. J. J., 2016. On the Enigmatic Birth of the Pacific Plate within the Panthalassa Ocean. *Science Advances*, 2(7): e1600022. https://doi.org/10.1126/sciadv.1600022

Cai, H., Zhang, J. P., Tang, X. J., 2014. Characteristics of the Fault Systems and Their Control on Hydrocarbon Accumulation in the Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin. *Natural Gas Industry*, 34(10): 18−26 (in Chinese with English abstract).

Cheng, Y. J., Wu, Z. P., Xu, B., et al., 2023. The Mesozoic Tectonic Evolution of the East China Sea Basin: New Insights from 3D Seismic Reflection Data. *Tectonophysics*, 848: 229717. https://doi. org/10.1016/j. tecto.2023.229717

Cheng, Y. J., Wu, Z. P., Zhang, J., et al., 2022.Cenozoic Tectonic Evolution of Offshore Chinese Basins and Its Response to Geodynamic Processes of the East Asian Continental Margin. *Earth - Science Reviews*, 232: 104140. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104140

Chu, Y., Lin, W., Faure, M., et al., 2019. Cretaceous Episodic Extension in the South China Block, East Asia: Evidence from the Yuechengling Massif of Central South China. *Tectonics*, 38(10): 3675−3702. https://doi.org/10.1029/2019tc005516

Corti, G., 2004. Centrifuge Modelling of the Influence of Crustal Fabrics on the Development of Transfer Zones: Insights into the Mechanics of Continental Rifting Architecture. *Tectonophysics*, 384(1−4): 191−208. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.03.014

Cui, X., Wang, L. L., Luo, H. M., et al., 2017. Sand-

box Modeling Test for Mesozoic Basins in Southern East China Sea Shelf Basin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 37(4): 181－192 (in Chinese with English abstract).

Dai, L. M., Li, S. Z., Lou, D., et al., 2014. Numerical Modeling of Late Miocene Tectonic Inversion in the Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 86: 25－37. https://doi. org/10.1016/j.jseaes.2013.09.033

Faure, M., Lepvrier, C., van Nguyen, V., et al., 2014. The South China Block‐Indochina Collision: Where, When, and How? *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 260－274. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.09.022

Fossen, H., Rotevatn, A., 2016. Fault Linkage and Relay Structures in Extensional Settings—A Review. *Earth-Science Reviews*, 154: 14－28. https://doi. org/10.1016/j.earscirev.2015.11.014

Gilder, S. A., Leloup, P. H., Courtillot, V., et al., 1999. Tectonic Evolution of the Tancheng-Lujiang (Tan-Lu) Fault *via* Middle Triassic to Early Cenozoic Paleomagnetic Data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B7): 15365－15390. https://doi. org/10.1029/1999jb900123

He, X. J., Jiang, Y. M., Li, L., et al., 2024. Progressive Deformation Characteristics and Mechanism of Longjing Movement in Xihu Sag. *China Offshore Oil and Gas*, 36(5): 34－43 (in Chinese with English abstract).

He, X. J., Tang, X. J., Jiang, Y. M., et al., 2023. Middle‐Late Miocene Fault Activity and Its Petroleum Exploration Significance of Middle-Shallow Layers in the Xihu Sag, East China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 43(3): 167－174 (in Chinese with English abstract).

Jiang, Y. M., Wu, L. L., Qin, J., et al., 2024. Deciphering Tectonic Mechanism and Origin of T85 Horizon in Lishui Depression, East China Sea Basin. *Earth Science*, 49(12): 4450－4464 (in Chinese with English abstract).

Jiang, Y. M., Zou, W., Liu, J. S., et al., 2020. Genetic Mechanism of Inversion Anticline Structure at the End of Miocene in Xihu Sag, East China Sea: A New Understanding of Basement Structure Difference. *Earth Science*, 45(3): 968－979 (in Chinese with English abstract).

Li, S. Z., Suo, Y. H., Li, X. Y., et al., 2018. Mesozoic Plate Subduction in West Pacific and Tectono‐Magmatic Response in the East Asian Ocean‐Continent Connection Zone. *Chinese Science Bulletin*, 63(16): 1550－1593 (in Chinese).

Liu, J. S., Xu, H. Z., Jiang, Y. M., et al., 2020. Mesozoic and Cenozoic Basin Structure and Tectonic Evolution in the East China Sea Basin. *Acta Geologica Sinica*, 94(3): 675－691 (in Chinese with English abstract).

Liu, L. P., Li, S. Z., Dai, L. M., et al., 2012. Geometry and Timing of Mesozoic Deformation in the Western Part of the Xuefeng Tectonic Belt, South China: Implications for Intra‐Continental Deformation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 330－338. https://doi. org/10.1016/j.jseaes.2011.09.026

Liu, Y. M., Hao, F., Wu, Z. P., et al., 2025. Characteristics and Origin of Rift Migration within the East China Sea Basin: Coupling Relation with Deep Mantle Dynamics. *Journal of Structural Geology*, 191: 105334. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2024.105334

Qu, T., Huang, Z. L., Li, T. J., et al., 2024. Formation Conditions and Reservoir Forming Characteristics of the Wuyunting Condensate Gas Field in Northern Pinghu Slope Zone of the Xihu Sag. *Acta Geologica Sinica*, 98(1): 247－265 (in Chinese with English abstract).

Shi, W., Dong, S. W., Zhang, Y. Q., et al., 2015. The Typical Large-Scale Superposed Folds in the Central South China: Implications for Mesozoic Intracontinental Deformation of the South China Block. *Tectonophysics*, 664: 50－66. https://doi. org/10.1016/j. tecto.2015.08.039

Stern, R. J., Gerya, T., 2018. Subduction Initiation in Nature and Models: A Review. *Tectonophysics*, 746: 173－198. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.10.014

Sun, Q. Y., Deng, H. D., Ji, M., et al., 2024. Characteristics of Multi-Phase Fracture Development in Cretaceous Granite from Coastal Region of South China and Its Implications for Buried-Hill Exploration. *Earth Science*, 49(7): 2570－2588 (in Chinese with English abstract).

Suo, Y. H., Li, S. Z., Cao, X. Z., et al., 2017. Mesozoic-Cenozoic Inversion Tectonics of East China and Its Implications for the Subduction Process of the Oceanic Plate. *Earth Science Frontiers*, 24(4): 249－267 (in Chinese with English abstract).

Tang, X. J., Li, N., Huang, X. S., et al., 2024. Reassessment of the Baoshi Formation of the Middle-Lower Eocene Series in the Xihu Sag of the East China Sea Basin. *Journal of Stratigraphy*, 48(4): 404－418 (in Chinese with English abstract).

Tang, X. J., Zhu, H. H., Li, N., et al., 2025. Segmented Differential Deformation of Inverted Anticlines and Its Significance on Hydrocarbon Accumulation in the Ningbo Structural Zone, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin. *Oil & Gas Geology*, 46(1): 167－177 (in Chinese

with English abstract).

Torsvik, T. H., Doubrovine, P. V., Steinberger, B., et al., 2017. Pacific Plate Motion Change Caused the Hawaiian-Emperor Bend. *Nature Communications*, 8: 15660. https://doi.org/10.1038/ncomms15660

Uzel, B., Sözbilir, H., Özkaymak, Ç., et al., 2013. Structural Evidence for Strike-Slip Deformation in the İzmir-Balıkesir Transfer Zone and Consequences for Late Cenozoic Evolution of Western Anatolia (Turkey). *Journal of Geodynamics*, 65: 94−116. https://doi.org/10.1016/j.jog.2012.06.009

Wang, H., Qin, L. Z., Xu, J. Q., et al., 2025. Sedimentary Filling Characteristics of the Paleogene Baoshi Formation in the Western Slope of Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin. *Oil & Gas Geology*, 46(3): 910−925 (in Chinese with English abstract).

Wang, S., Zhang, D., Wu, G. G., et al., 2017. Late Paleozoic to Mesozoic Extension in Southwestern Fujian Province, South China: Geochemical, Geochronological and Hf Isotopic Constraints from Basic-Intermediate Dykes. *Geoscience Frontiers*, 8(3): 529−540. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2016.05.005

Xie, X. J., Xiong, L. Q., Han, Y. K., et al., 2024.New Insights into Reservoirs Heterogeneous Genesis of Favorable Facies in Pinghu Formation, Xihu Depression. *Earth Science*, 49(4): 1400−1410 (in Chinese with English abstract).

Yan, Y. H., Yuan, Z. P., Zhu, B. L., et al., 2024.Reservoir-Control Effect of Faults in Pingbei Area of Xihu Depression. *Offshore Oil*, 44(2): 1−6 (in Chinese with English abstract).

Yang, C. Q., Yang, C. S., Li, G., et al., 2012. Mesozoic Tectonic Evolution and Prototype Basin Characters in the Southern East China Sea Shelf Basin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 32(3): 105−111 (in Chinese with English abstract).

Yang, C. Q., Yang, C. S., Sun, J., et al., 2019. Mesozoic Evolution and Dynamics Transition in Southern Shelf Basin of the East China Sea. *Journal of Jilin University* (*Earth Science Edition*), 49(1): 139−153 (in Chinese with English abstract).

Yang, X. H., Li, A. C., 2003. Basement Nature and Sedimentary Basins along the Continental Margin in East China Sea. *China Offshore Oil and Gas*, 17(1): 25−28, 56 (in Chinese with English abstract).

Yu, Y. F., Zhang, J. P., Cheng, C., et al., 2022. Main Controlling Factors and Reservoir Forming Model for Hydrocarbon Accumulation in the Xihu Sag, the East China Sea Shelf Basin. *Marine Geology Frontiers*, 38(7): 40−47 (in Chinese with English abstract).

Zhang, B. C., Liu, J., Jiao, S. B., et al., 2024.Characteristics of Strike-Transition System of Tiantai Structure of Xihu Sag and Its Reservoir-Controlling Effect. *China Offshore Oil and Gas*, 36(5): 44−56 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Y. Q., Xu, X. B., Jia, D., et al., 2009. Deformation Record of the Change from Indosinian Collision-Related Tectonic System to Yanshanian Subduction-Related Tectonic System in South China during the Early Mesozoic. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 234−247 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Z., He, X. J., Tang, X. J., et al., 2022. Structural Trap Characteristics and Reservoir Types in Xihu Sag, East China Sea Basin. *Marine Geology Frontiers*, 38(3): 27−35 (in Chinese with English abstract).

Zhao, Z. G., Wang, P., Qi, P., et al., 2016. Regional Background and Tectonic Evolution of East China Sea Basin. *Earth Science*, 41(3): 546−554 (in Chinese with English abstract).

Zheng, Q. G., Zhou, Z. Y., Cai, L. G., et al., 2005. Meso-Cenozoic Tectonic Setting and Evolution of East China Sea Shelf Basin. *Oil & Gas Geology*, 26(2): 197−201 (in Chinese with English abstract).

Zhou, X. H., Jiang, Y. M., Tang, X. J., 2019. Tectonic Setting, Prototype Basin Evolution and Exploration Enlightenment of Xihu Sag in East China Sea Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 31(3): 1−10 (in Chinese with English abstract).

Zhu, W. L., Wu, J. F., Zhang, G. C., et al., 2015. Discrepancy Tectonic Evolution and Petroleum Exploration in China Offshore Cenozoic Basins. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 88−101 (in Chinese with English abstract).

Zou, W., Yu, Y. X., Liu, J. S., et al., 2021.Main Controlling Factors of the Central Inversional Structure Belt and the Development of Ningbo Anticline in Xihu Sag, East China Sea Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 42(2): 176−185 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

蔡华, 张建培, 唐贤君, 2014. 西湖凹陷断裂系统特征及其控藏机制. 天然气工业, 34(10): 18−26.

崔幸, 王亮亮, 罗洪明, 等, 2017. 东海陆架盆地南部中生代盆地性质与演化: 砂箱物理模拟检验. 海洋地质与第四纪地质, 37(4): 181−192.

何新建, 蒋一鸣, 李磊, 等, 2024. 西湖凹陷龙井运动构造递进变形特征与机制. 中国海上油气, 36(5): 34−43.

何新建, 唐贤君, 蒋一鸣, 等, 2023. 东海西湖凹陷中新世中晚期断裂活动特征及中浅层勘探启示. 海洋地质与第四纪地质, 43(3): 167－174.

蒋一鸣, 吴路路, 覃军, 等, 2024. 东海盆地丽水凹陷T85构造变革界面的厘定及其成因模式探讨. 地球科学, 49(12): 4450－4464.

蒋一鸣, 邹玮, 刘金水, 等, 2020. 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. 地球科学, 45(3): 968－979.

李三忠, 索艳慧, 李玺瑶, 等, 2018. 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. 科学通报, 63(16): 1550－1593.

刘金水, 许怀智, 蒋一鸣, 等, 2020. 东海盆地中、新生代盆架结构与构造演化. 地质学报, 94(3): 675－691.

屈童,黄志龙,李天军,等,2024. 西湖凹陷平北地区武云亭凝析气田形成条件与成藏特征. 地质学报, 98(1): 247－265.

孙侨阳,邓洪旦,纪沫,等,2024. 华南沿海地区白垩纪花岗岩多期构造裂缝发育特征及其对潜山勘探的指示. 地球科学,49(7): 2570－2588.

索艳慧,李三忠,曹现志,等,2017. 中国东部中新生代反转构造及其记录的大洋板块俯冲过程. 地学前缘,24(4): 249－267.

唐贤君,李宁,黄晓松,等,2024. 东海盆地西湖凹陷中下始新统宝石组再认识. 地层学杂志,48(4): 404－418.

唐贤君,朱虹浩,李宁,等,2025. 东海陆架盆地西湖凹陷宁波构造带反转背斜分段差异变形及其油气地质意义. 石油与天然气地质,46(1): 167－177.

王辉,秦兰芝,徐靖琦,等,2025. 中国东海陆架盆地西湖凹陷西部斜坡带古近系宝石组沉积充填特征. 石油与天然气地质,46(3): 910－925.

谢晓军, 熊连桥, 韩雅坤, 等, 2024. 西湖凹陷平湖斜坡有利相带内储层非均质性成因新认识. 地球科学, 49(4): 1400－1410.

晏玉环,袁忠鹏,朱碧兰,等,2024. 西湖凹陷平北地区断裂控藏作用研究. 海洋石油,44(2): 1－6.

杨香华, 李安春, 2003. 东海大陆边缘基底性质与沉积盆地. 中国海上油气地质,17(1): 25－28, 56.

杨长清, 杨传胜, 孙晶, 等, 2019. 东海陆架盆地南部中生代演化与动力学转换过程. 吉林大学学报(地球科学版), 49(1): 139－153.

杨长清,杨传胜,李刚,等,2012. 东海陆架盆地南部中生代构造演化与原型盆地性质. 海洋地质与第四纪地质,32(3): 105－111.

余逸凡,张建培,程超,等,2022. 东海陆架盆地西湖凹陷油气成藏主控因素及成藏模式. 海洋地质前沿,38(7): 40－47.

张伯成,刘江,焦社宝,等,2024. 西湖凹陷天台构造走滑-转换体系特征及控藏作用. 中国海上油气,36(5): 44－56.

张岳桥,徐先兵,贾东,等,2009. 华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录. 地学前缘,16(1): 234－247.

张宙,何新建,唐贤君,等,2022. 东海盆地西湖凹陷构造圈闭特征及其油气藏类型. 海洋地质前沿,38(3): 27－35.

赵志刚,王鹏,祁鹏,等,2016. 东海盆地形成的区域地质背景与构造演化特征. 地球科学,41(3): 546－554.

郑求根, 周祖翼, 蔡立国, 等, 2005. 东海陆架盆地中新生代构造背景及演化. 石油与天然气地质,26(2): 197－201.

周心怀, 蒋一鸣, 唐贤君, 2019. 西湖凹陷成盆背景、原型盆地演化及勘探启示. 中国海上油气, 31(3): 1－10.

朱伟林,吴景富,张功成,等,2015. 中国近海新生代盆地构造差异性演化及油气勘探方向. 地学前缘, 22(1): 88－101.

邹玮,余一欣,刘金水,等,2021. 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. 石油学报, 42(2): 176－185.