

# 东海陆架盆地西湖凹陷西部斜坡带 始新世“断-洼”耦合过程研究\*

赵瑞祥<sup>1,2</sup> 刘 豪<sup>1,2</sup> 秦兰芝<sup>3</sup> 李 帅<sup>3</sup> 王 辉<sup>3</sup> 陈贺贺<sup>1,2</sup>

1 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083

2 极地地质与海洋矿产教育部重点实验室, 北京 100083

3 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335

**摘要** 西湖凹陷是东海陆架盆地最重要的油气勘探区, 始新世断裂体系复杂, 开展多期构造作用下的“断-洼”耦合过程研究对本地区古地理重建和油气勘探具有十分重要的意义。论文以高精度三维地震资料为基础, 聚焦西湖凹陷西部斜坡带始新世断裂发育特征, 系统分析了断裂几何样式及活动规律, 并进一步探讨了“断-洼”耦合过程及其对沉积体系的控制作用。研究表明: (1) 受基底构造和区域应力场控制, 始新世断裂体系具有显著分带性与分段性, 西部斜坡带南部发育单断式、复合地垒式的断裂组合样式, 中部具有地垒地堑、反向断阶等多种断裂组合样式, 北部断裂组合样式具有同向断阶和次级地垒地堑式等特征。(2) 平湖主断裂、杭州主断裂和宝云亭-武云亭断裂为控盆断裂体系, 这些断裂的活动强度在宝石组下段沉积时期最大, 至平湖组沉积时期逐渐减弱。(3) 盆地构造演化过程受太平洋板块俯冲速率变化的驱动, 裂陷期盆地强烈伸展形成断控沉积的格局, 同沉积断裂差异活动主导了沉积中心的迁移与展布: 裂陷 II 幕(宝石组沉积时期)受断裂差异伸展的控制, 盆内发育多个孤立沉积中心; 断-拗转换期(平湖组沉积时期), 早期多隆多洼的古地理格局发生改变, 各孤立沉积中心合并, 并向南迁移。本研究阐明了西湖凹陷始新世断-洼耦合动态响应机制, 为东海陆架盆地进一步的油气勘探提供理论依据。

**关键词** 断裂组合样式 同沉积断裂 “断-洼”耦合 始新世 西湖凹陷 东海陆架盆地

**第一作者简介** 赵瑞祥, 男, 2001 年生, 在读硕士研究生, 主要研究方向为沉积盆地构造分析。E-mail: zhaoruixiang2022@163.com。

**通讯作者简介** 刘豪, 男, 1974 年生, 博士, 教授, 主要研究方向为海洋油气资源、含油气盆地分析。E-mail: lhucgb@163.com。

中图分类号: P542<sup>+</sup>.3 文献标志码: A

## Study on “fault-sag” coupling process of the Eocene in western slope belt of Xihu sag, East China Sea Shelf Basin

ZHAO Ruixiang<sup>1,2</sup> LIU Hao<sup>1,2</sup> QIN Lanzhi<sup>3</sup> LI Shuai<sup>3</sup> WANG Hui<sup>3</sup> CHEN Hehe<sup>1,2</sup>

1 School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

2 Key Laboratory of Polar Geology and Marine Mineral, Beijing 100083, China

3 Shanghai Branch of CNOOC (China) Limited, Shanghai 200335, China

\* 国家自然科学基金项目(编号: 42230816)资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 42230816)]

收稿日期: 2025-07-10 改回日期: 2025-10-09

**Abstract** As the most significant area for oil and gas exploration in the East China Sea Shelf Basin, the Xihu sag was characterized by a complex fault system during the Eocene. Investigating the “fault-sag” coupling process under multi-phase tectonic activity is crucial for palaeogeographic reconstruction and hydrocarbon exploration in this region. Based on high-resolution 3D seismic data, this study focuses on the characteristics of Eocene fault development in the western slope belt of the Xihu sag. It systematically analyzes the geometric patterns and activity history of the faults, and further investigates the “fault-sag” coupling process and its control on sedimentary systems. The results indicate that: (1) Controlled by basement structures, palaeo-uplifts, and the regional stress field, the Eocene fault system exhibits significant zonation and segmentation. The southern part of the western slope belt is characterized by single-fault and composite horst assemblages; the central part is dominated by various fault assemblages, including horst-graben and reverse fault terrace structures; while the northern part features homoclinal fault terraces and secondary horst-graben structures. (2) The Pinghu main fault, Hangzhou main fault, and Baoyunting-Wuyunting fault constitute the basin-controlling fault system. The intensity of fault activity peaked during the deposition of the lower Baoshi Member and gradually weakened throughout the depositional period of the Pinghu Formation. (3) The tectonic evolution of the basin was driven by variations in the subduction rate of the Pacific Plate. During the rifting stage, intense extensional tectonics formed a fault-controlled depositional framework, in which syn-sedimentary fault activity governed the migration and distribution of sedimentary centers. In the second rifting episode (Baoshi Formation depositional period), differential fault extension led to the development of multiple isolated sedimentary centers within the basin. During the fault-sag transition period (Pinghu Formation depositional period), the earlier palaeogeographic pattern of multiple uplifts and sags was transformed, as the isolated sedimentary centers merged and migrated southward. This study elucidates the dynamic response mechanism between faulting and sedimentation during the Eocene in the Xihu sag, providing a theoretical basis for further oil and gas exploration in the East China Sea Shelf Basin.

**Key words** fault assemblage style, syn-sedimentary fault, fault-depression coupling, Eocene, Xihu sag, East China Sea Shelf Basin

**About the first author** ZHAO Ruixiang, born in 2001, is a master candidate. His research focuses on sedimentary basin structural analysis. E-mail: zhaoruixiang2022@163.com.

**About the corresponding author** LIU Hao, born in 1974, is a Ph.D. and professor. His research focuses on marine petroleum resources and basin analysis. E-mail: lhcuqb@163.com.

## 0 引言

东海陆架盆地是中国近海海域油气赋存较为丰富的中生代含油气盆地（周祥林等，2014；蔡华等，2019）。其中，西湖凹陷油气资源占比达1/4，是东海陆架盆地油气资源最丰富、勘探潜力最大的二级构造单元（李上卿和李纯洁，2003）。长期以来学者们对西湖凹陷开展了大量研究，并在构造沉积学等方面取得了丰硕的成果（李昆等，2019；祁鹏等，2023；徐东浩等，2024）。

西湖凹陷新生代历经多期构造运动，受多幕裂隙作用与反转构造作用叠加控制，形成了现今复杂

的断裂体系和凹陷结构（雷闯等，2014；蒋一鸣等，2019；伍亮等，2025）。整体上，凹陷具有“东西分带、南北分块”的构造格局（张绍亮等，2014），新生代以来复杂的构造演化过程控制了凹陷不同的构造样式发育和沉积中心的迁移（张敏强等，2011；蔡华等，2014）。其中，始新世是西湖凹陷十分重要的构造演化和沉积充填阶段。至中始新世，太平洋板块向欧亚板块俯冲的方向由早始新世 NNW 向转变为 NWW 向，造成西湖凹陷所受应力环境由拉张向挤压过渡，西湖凹陷由裂陷期进入断拗转换期（Li *et al.*, 2009；索艳慧等，2017；

Zhu *et al.*, 2019; 赵军等, 2020), 这种区域应力场的改变不仅对本地区始新世断裂体系、构造样式的差异发育产生影响, 还对盆地的沉积层序、古地理格局起到至关重要的控制作用。前人针对西湖凹陷的西部斜坡带开展了包括断裂特征及其发育模式(蔡华和张建培, 2013; 杨彩虹等, 2014; 周祥林等, 2014; 伍亮等, 2025)、构造转换带形成机理及演化(Cheng *et al.*, 2023; 余浪等, 2023)等方面的研究。特别是, 近年来大量研究通过解析断裂特征及组合样式, 分析构造演化与地层充填的响应关系(唐贤君等, 2024; Zhou *et al.*, 2025), 总结了西湖凹陷始新世多类型断裂控层、控相和控砂模式(陈哲等, 2020; 黄启彰等, 2025), 对于西湖凹陷有利储集砂体预测以及油气勘探等起到了重要的推动作用。尽管前人研究已关注到西湖凹陷始新世断裂组合的多样性和差异性, 但由于受早期地震数据分布和分辨率的限制, 有关断裂发育特征及演化、断裂对沉积层序的控制作用等方面有待进一步深入、系统地开展研究。

在东海陆架盆地区域构造背景综合分析的基础上, 利用高精度三维地震和钻井等资料, 以西湖凹陷西部斜坡为重点研究区域, 通过始新世构造精细解释和主要控盆断裂及同沉积断裂活动期次及活动强度分析, 进一步阐明断裂体系与盆内洼陷之间的内在联系, 探讨盆地构造演化对沉积层序的控制作用, 为研究区油气勘探提供理论指导。

## 1 地质背景

东海盆地位于中国东部大陆边缘, 主体分布于东海大陆架区域。依据盆地的结构差异性, 可进一步划分为中部的西湖凹陷、北部的福江凹陷和南部的钩北凹陷(Xu *et al.*, 2014;; Liang and Wang, 2019; Ding *et al.*, 2021)。西湖凹陷西邻海礁隆起、虎皮礁隆起和渔山低隆起, 东邻钓鱼岛隆褶带, 凹陷内部呈“东西分带、南北分块”的构造格局, 自西向东划分为西部斜坡带、中央洼陷反转带和东部断阶带(张绍亮等, 2014; 李磊等, 2023)。西湖凹陷的西部斜坡带可进一步分为 3 个构造带, 分别是: 杭州斜坡、平湖斜坡、天台斜坡(图 1-a)。

东海陆架盆地的弧后断陷始于晚白垩世, 一直持续到始新世末, 而西湖凹陷的主要断陷层序则自

古新世开始发育(Li *et al.*, 2009)。裂谷序列的发育可分为 5 个阶段: (1) 初期裂谷阶段(古新世—始新世早期); (2) 强烈裂谷阶段(始新世中期); (3) 断—拗转换阶段(晚始新世)(Su *et al.*, 2018; Zhu *et al.*, 2019); (4) 拗陷阶段(渐新世); (5) 区域性挤压事件: 龙井运动引起褶皱和正反转构造(Yang *et al.*, 2009), 随后发生区域沉降, 直到现今的大陆架阶段。裂谷初期, 部分区域沉积了较厚的地层, 但其确切年龄和岩性仍存在较大争议, 其顶部可能是始新世早期的瓯江运动不整合面(Zhu *et al.*, 2019)。裂陷期至断—拗转换期对应的始新统总厚度达 10 km, 顶部以玉泉运动不整合面为界(32 Ma)。始新统之上为渐新统花港组以及中新统龙井组、玉泉组和柳浪组, 记录了盆地从半封闭海湾—浅海相逐渐过渡到河流相的沉积充填过程(图 1-b)(Su *et al.*, 2018; Liang and Wang, 2019; Zhu *et al.*, 2019)。然而, 由于裂陷早期地层埋深大、钻井数稀疏, 不同研究对裂陷早期地层的命名存在差异(Abbas *et al.*, 2018; Su *et al.*, 2018; Liang and Wang, 2019)。本研究区裂陷期的沉积地层包括平湖组和宝石组, 主要沉积相包括潮坪、潮汐三角洲和辫状河三角洲等(Abbas *et al.*, 2018; Zhu *et al.*, 2019)。

## 2 数据和方法

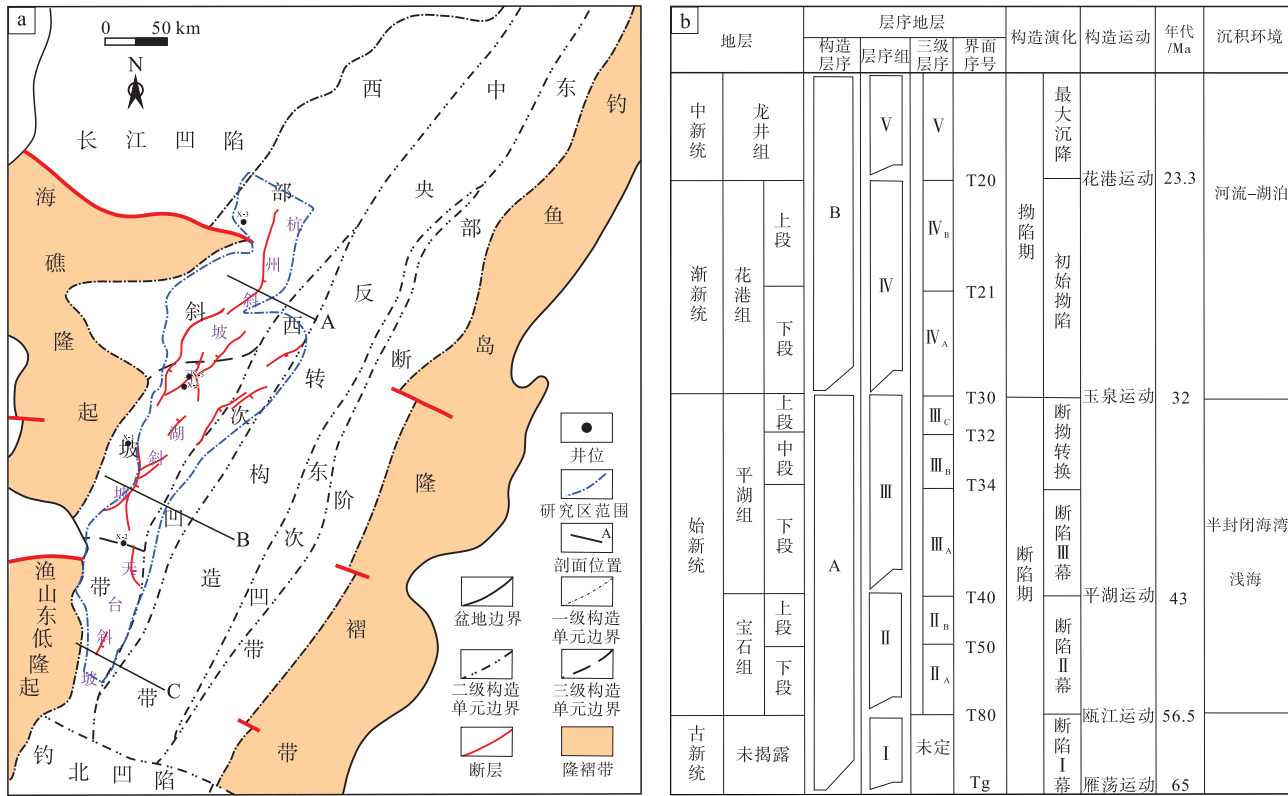
### 2.1 数据

研究使用的数据主要包括三维地震数据和钻井数据, 来自于中海油(上海)有限公司。其中, 三维地震数据覆盖面积约 26 000 km<sup>2</sup>。这些高精度的三维地震资料主要用于西湖凹陷断裂体系分析, 通过与钻井数据结合实现地层的精细解释和划分。

### 2.2 方法

断裂系统平面识别与组合: 在 GeoFrame 软件平台上, 通过追踪地震层位与断层, 完成了主要目的层(平湖组与宝石组)的断裂平面展布图。在此基础上, 依据断裂的走向、倾向及空间关系, 进行了断裂的组合, 从而建立了西湖地区主要的断裂格架。

剖面特征分析与断距计算: 本研究为验证断裂平面组合的合理性和量化断裂的活动强度, 沿垂直断裂走向的方向, 以 1000 m 间距对断裂的剖面进行精细解释。在这些剖面上, 通过测量断裂两盘同



a—西湖凹陷构造划分及研究区主要断裂；b—西湖凹陷地层格架及演化阶段

图1 西湖凹陷构造位置及地层综合柱状图

Fig. 1 Comprehensive columnar section of tectonic location and stratigraphy in Xihu sag, East China Sea Shelf Basin

一地层界面的垂直落差（即“断距”），对断裂位移进行了定量分析。

构造沉降量的计算：为定量恢复研究区的构造沉降史，采用经典的回剥法进行分析。其基本原理是：通过剔除沉积地层负载（压实效应与古水深变化）对盆地基底造成的影响，从而获取由地球深部动力过程（如岩石圈拉张、挠曲等）控制的构造沉降量（Perrie and Qiublier, 1974）。本研究选用了X-1、X-2、X-3、X-4及X-5等多口井的钻井数据，用于模拟基底沉降史。

压实的校正对于沉降历史和速率的定量模拟至关重要。由于西湖凹陷是1个断陷湖盆，沉积过程中水深的影响被认为可以忽略不计。井的泥岩声波时差用于计算相应深度的孔隙度（Wylliel *et al.*, 1958）。随后，记录不同深度的各种类型的岩性（主要是砂岩和泥岩）的孔隙度，并拟合出井的孔隙度曲线（Athy, 1930）。对所选层进行逐层回剥，来计算不同地质时期的顶部和底部边界深度（Perrie and Qiublier, 1974），得出构造沉降量。

洼陷面积的计算：根据地震相、岩相和沉积体

边界的综合解释，在不同地点确定了特定研究单元（扇形三角洲、潮汐三角洲等）的最大范围，最后，通过GeoFrame 2012 4.3版软件的计算面积功能来计算洼陷面积。

可容空间的计算：在断陷湖盆中，构造沉降作用可能对可容空间的控制作用更大，因此，通过计算不同洼陷或盆地的构造活动强度，可以直接指示盆地沉积时的可容空间大小。故可容空间的计算公式为：可容空间 = 构造沉降量 × 洼陷面积（Liu *et al.*, 2020）。

### 3 始新世断裂发育特征

#### 3.1 西湖凹陷西部斜坡带断裂几何特征

西湖凹陷西部斜坡带构造样式复杂，受控于多期构造活动，具有明显的分段性与分带性特征。在宝石组沉积时期，受宝云亭-武云亭古隆起影响，这种复杂构造特征尤其显著，故在始新世断裂特征分析时，将西部斜坡带主要分为4个区域进行研究，分别以天台斜坡、平湖斜坡、宝云亭-武云亭

古隆起以及杭州斜坡等 4 个构造单元进行描述。

3.1.1 剖面特征

西部斜坡带主要发育 2 种断裂样式：单断式和断阶式。其中断阶式可进一步划分同向断阶、反向断阶和复合断阶等样式。天台斜坡主要发育同向断阶构造和复合断阶样式，中部平湖斜坡和宝云亭-武云亭古隆起主要发育单断式构造、反向断阶构造、断鼻状和地垒地堑式，北部杭州斜坡主要发育同向断阶构造和次级地垒(图 2)。

西部斜坡带	断裂组合样式		原始地震
杭州斜坡	同向断阶		
	次级地垒		
宝云亭-武云亭古隆起	反向断阶		
	断鼻状		
平湖斜坡	地垒地堑状		
	单断式		
天台斜坡	复合地垒状		
	单断式		

图 2 西湖凹陷始新世西部斜坡带断裂样式差异特征

Fig. 2 Variations in fault styles of western slope belt during the Eocene in Xihu sag

在杭州斜坡，多条东倾正断裂构成了典型的同向断阶构造，地层自西向东逐级下降，整体呈现断裂缓坡的特征(图 2)。但在杭州斜坡中部，受到杭

州主断裂影响，发育同向断阶陡坡型构造样式。

在平湖斜坡的北部，由于受宝云亭-武云亭古隆起的影响，在古隆起两翼发育了东倾、西倾反向断裂组合的地垒、地堑复合断裂样式，以及以 NE 向延伸的地堑构造样式、断鼻状构造样式和由西倾正断裂构成的反向断阶状构造(图 2)。受海礁隆起的隆升作用控制，在宝云亭-武云亭古隆起东侧发育与杭州斜坡类似的同向断阶陡坡型断裂样式。在平湖斜坡南部，主要发育多期断裂叠加陡坡型断裂，平湖主断裂及其派生断裂起到主要控制作用(图 2)。

天台斜坡北部断裂发育较为复杂，总体上靠近隆起一侧发育垒状复合断阶构造，靠东部洼陷地区主要发育同向协调缓坡型断裂。在天台斜坡中南部，受宝石断裂的控制，以发育简单的单断式为主(图 2)。

3.1.2 平面特征

由研究区关键构造界面断裂体系分布图(图 3)可见，西湖凹陷西部斜坡带断裂平面展布具有明显的分区性差异特征。各次级构造单元断裂展布规律具体如下：

天台斜坡南段以 NE 向正断裂为主，具有同沉积特征；北段受渔山东低隆起与区域剪切应力联合作用，发育多条 NW 向正断层，断裂组合样式复杂。平湖斜坡带发育 NE 向展布的大型同沉积正断层(如平湖主断裂)，伴生多级次生断层，形成阶梯状断阶构造体系；平湖斜坡北部受宝云亭-武云亭古隆起控制，古隆起东侧发育 NE 向高角度正断层，断层规模较大且延伸稳定，平面呈雁列状分布；古隆起西侧因基底差异隆升诱发局部应力分异，断裂走向多变，呈 NNE-NE 向交织分布，平面组合样式杂乱。杭州斜坡以 NE-NEE 向大型伸展断裂(如杭州断裂)为主导，断裂带内发育多组平行的次级正断层，剖面组合样式以同向断阶及梳状构造样式为主，反映区域性 NW-SE 向伸展应力场特征。研究区断裂平面展布规律与基底构造格局、古隆起分布及多期次区域应力场转换密切相关。T80-T30 反射界面的断裂体系分布表明，深部构造层(T40 以下)断层密集发育，以伸展正断层为主；浅层构造(T30 以上)断层活动性减弱。

3.2 主要同沉积断裂及活动特征

西湖凹陷发育的同沉积断裂从南到北主要为宝

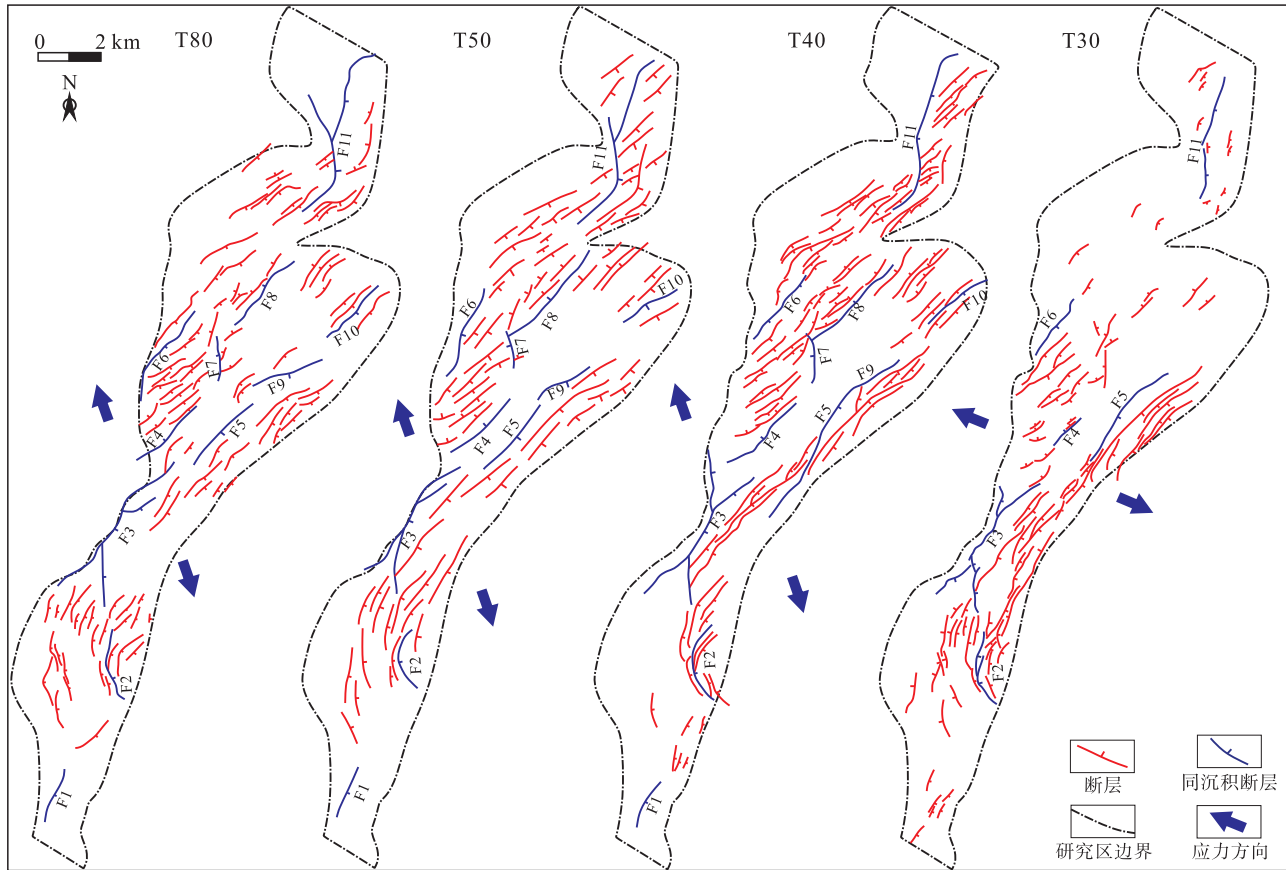


图 3 西湖凹陷始新世西部斜坡带断裂平面分布图

Fig. 3 Map of fault systems of western slope belt during the Eocene in Xihu sag

石断裂 (F1)、平湖主断裂 (F3) 及其派生断裂 (F2)、宝武古隆起东侧的断裂 (F5、F9、F10)、古隆起西侧的断裂 (F4、F7、F8)、孔雀亭断裂 (F6) 以及杭州主断裂 (F11) 等。天台斜坡同沉积断裂发育规模较小, 以宝石断裂 (F1) 为代表, 在凹陷中部的平湖斜坡, 发育了大型同沉积断裂, 即平湖主断裂 (F3), 是控制该区域构造变形的主要因素。值得注意的是, 在平湖斜坡与杭州斜坡的过渡带, 受宝云亭-武云亭古隆起的影响, 在古隆起周缘发育了一系列同沉积断裂, 这些断裂对本地区的差异沉积具有明显的控制作用。在杭州斜坡, 以杭州主断裂 (F11) 为典型代表, 系列断裂的同沉积活动明显控制了杭州斜坡多期三角洲的发育 (图 4-a)。

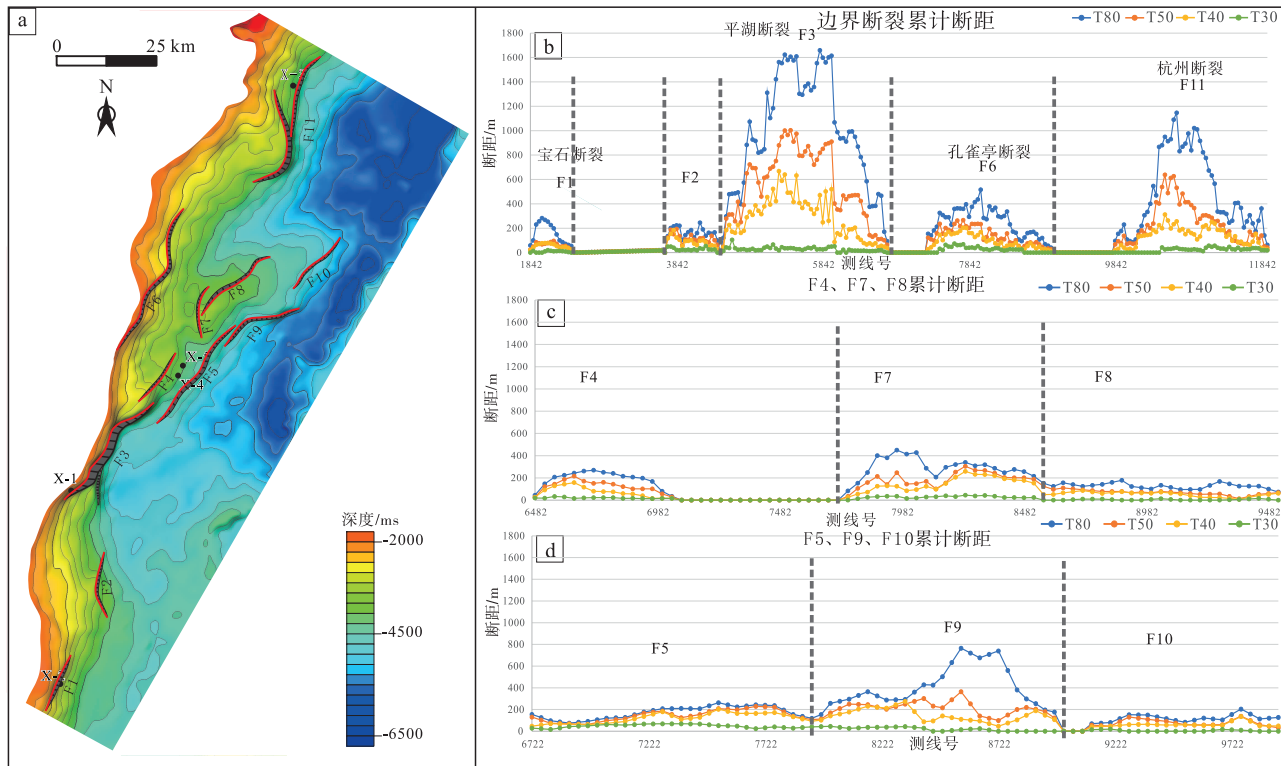
### 3.2.1 平湖主断裂

平湖主断裂 (F3) 是西部斜坡带平湖斜坡宝石组沉积期的控边断裂, 穿越 T80-T30 之间的地层, 主要为 NE 向和 NNE 向展布 (图 4-a)。F3 断

裂的活动性在不同时期、不同部位存在差异。早始新世 (T80-T50), 西湖凹陷正处于强烈裂谷阶段, 断距最大达到了 2400 ms。早中始新世 (T50-T40), 尽管西湖凹陷依然为强烈裂谷阶段, 但相较于早期断裂活动有所减弱, 断距最大为 1500 ms。晚始新世 (T40-T30), 西湖凹陷逐渐步入断-拗阶段, 此时断裂活动强度下降, 最大断距仅为 648 ms。始新世末期, F3 断裂活动几乎停止, 断裂北部的断距为 0。

### 3.2.2 杭州主断裂系统

杭州主断裂 (F11 断裂) 是西湖凹陷杭州斜坡带上的由 2 条同沉积断层组合成的一个 Y 字型断裂 (图 4-a), 断裂穿越 T80-T30, 从南到北断层走向由 SW 转为 NW, 断裂的活动性在不同时期和不同部位存在明显差异。由图 4-b 可见在早始新世 F11 断裂活动性最大, 断裂中部断距最大, 达到了 1580 ms。在早中始新世, 虽然西湖凹陷仍为强烈断陷期, 但断裂活动性减弱, 最大断距仅为



a—西湖凹陷始新世西部斜坡带主要同沉积断裂分布；b—边界断裂的累计断距；c—宝云亭-武云亭古隆起西侧断裂累计断距；d—宝云亭-武云亭古隆起东侧断裂累计断距

图 4 西湖凹陷始新世主要同沉积断裂及其累计断距

Fig. 4 Displacement-distance plot of syn-sedimentary fault for different stratigraphic sequences during the Eocene in Xihu sag

828 ms。到了晚始新世，该断裂活动速率明显下降，至渐新世该断裂基本停止活动。F11 断裂由南到北活动强度差异性明显，断裂中南部活动强度最大，北部活动较为稳定。

### 3.2.3 宝云亭—武云亭断裂系统

受宝云亭—武云亭古隆起影响，平湖斜坡、杭州斜坡过渡带发育了一系列东倾和西倾的正断裂，这些断裂对古隆起两侧的沉积中心具有明显的控制作用。具体而言，古隆起的西侧发育了一系列西倾正断裂，走向为 NE 向；古隆起东侧则发育了东倾正断裂，呈现雁列式排列，其走向同样为 NE 向。这种隆起两翼断裂系统的发育模式不仅体现了古隆起对沉积环境的分区控制，还反映了其在构造演化中的重要地位。

在古隆起西侧，断裂 F4、F7、F8 构成了 1 个二级断裂系统，共同控制了断层下降盘沉积中心的发育(图 4-a)。F4 与 F8 的走向均为 NE 向，而 F7 的走向为 NW 向，表现出一定的构造复杂性。由(图 4-c)可见这些断裂在早始新世活动强烈，南

部和中部断距最大，达到了 776 ms(图 4-c)。然而，进入早中始新世后，断裂活动强度逐渐减弱，尤其在南部和中部表现尤为明显，而断裂北部在各个时期的活动强度差异较小，表明断裂的稳定程度较高。至始新世末期断裂基本停止了活动。

断裂 F6 是平湖斜坡北部的边界断裂(图 4-a)，在 T80-T30 之间的地层发育。从平面展布看，F6 断裂自南向北呈现走向变化，由 NE 向逐渐转为近 N 向。由图 4-b 可见，在早始新世，断裂活动最为强烈，断裂中部断距最大，达到 580 ms，断裂活动强度呈现出明显的中部强、两侧弱的特点。进入中晚始新世，F6 断裂的活动强度明显减弱，不同位置的断裂活动强度趋于稳定。至始新世末期，断裂基本停止活动。

在古隆起东侧，断裂 F5、F9、F10 共同控制了斜坡东部沉积中心的发育，其中 F5 和 F9 为二级断裂，F10 发育相对独立(图 4-a)。由图 4-a 可见 3 条断裂发育均为 NE 走向。F9 在早始新世活动强烈，断距最高达到 1108 ms。然而，进入中始新

世之后, 该断裂活动强度开始减弱, 对地层控制作用逐渐减弱。晚始新世, 断裂开始复活, 主要表现为断裂活动强度由 F9 向 F5 转移。

## 4 讨论

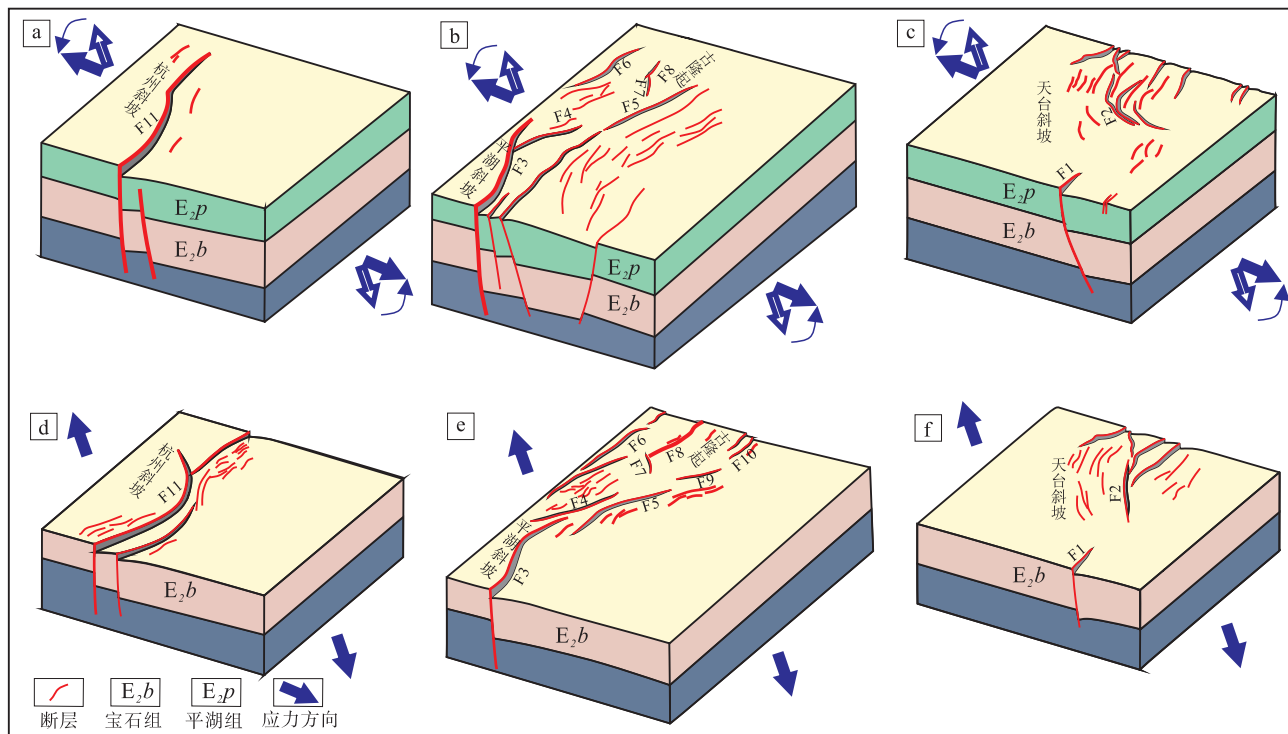
### 4.1 西湖凹陷构造演化的动力学背景

西湖凹陷的形成与欧亚板块和太平洋板块的构造活动密切相关, 凹陷的构造演化反映了多期板块运动和区域应力场的调整。

在晚白垩世至早始新世期间, 古太平洋板块向欧亚板块东侧俯冲速度显著下降, 同时印度-澳大利亚板块向欧亚板块的挤压速度逐渐增加, 挤压方向由 NE 方向转为 NNE 方向 (Zhang *et al.*, 2016; Zhao *et al.*, 2025)。在这一构造背景下, 古新世的基隆运动 (Tg) 引发了西湖凹陷的初始拉张, 此时西湖凹陷受到 NW-SE 向的伸展作用而开始张裂。早始新世断裂独立性强, 活动速率大, 导致断裂坡度陡峭, 且断裂活动发育密集, 产生了一系列 NE 向、控制沉积和次级构造单元的同生正断裂

(图 5)。西部斜坡带断裂发育具有明显的分带性, 受渔山东低隆起的影响, 天台斜坡与平湖斜坡过渡带发育 NW 向正断裂与 NE 向正断裂(图 5), 杭州斜坡发育大型断裂且周围发育次级断裂。在平面上 NE 向次级断裂一般和主干断裂呈雁列状排列, 剖面上呈断阶式分布(图 2)。

中始新世, 太平洋板块向欧亚板块俯冲方向由 NNW 向转变为 NWW 向, 造成西湖凹陷所受应力环境由拉张向挤压过渡 (索艳慧等, 2017; Su *et al.*, 2018; Zhu *et al.*, 2019; 赵军等, 2020)。在晚始新世, 主要的断裂活动中心开始向盆地中部迁移, 天台斜坡发育的新生界浅层 NE 向断裂继承性活动, 同时 NW 向基底断裂发生强烈的走滑活动, 促使部分 NE 向正断裂与 NW 向调节断裂在强烈挤压背景下硬连接, 形成弧形断裂 (张伯成等, 2024)。平湖斜坡 NE 向断裂活动性减弱, NNE 向断裂开始发育, 但活动中心已从西部转移至盆地中部。宝云亭-武云亭古隆起西侧断裂活动开始减弱。杭州斜坡断裂活动近乎停滞(图 5)。



a—杭州斜坡带平湖组裂发育模式图; b—平湖斜坡带平湖组断裂发育模式图; c—天台斜坡带平湖组断裂发育模式图; d—杭州斜坡带宝石组断裂发育模式图; e—平湖斜坡带宝石组断裂发育模式图; f—天台斜坡带宝石组断裂发育模式图

图 5 西湖凹陷始新世西部斜坡带断裂发育模式

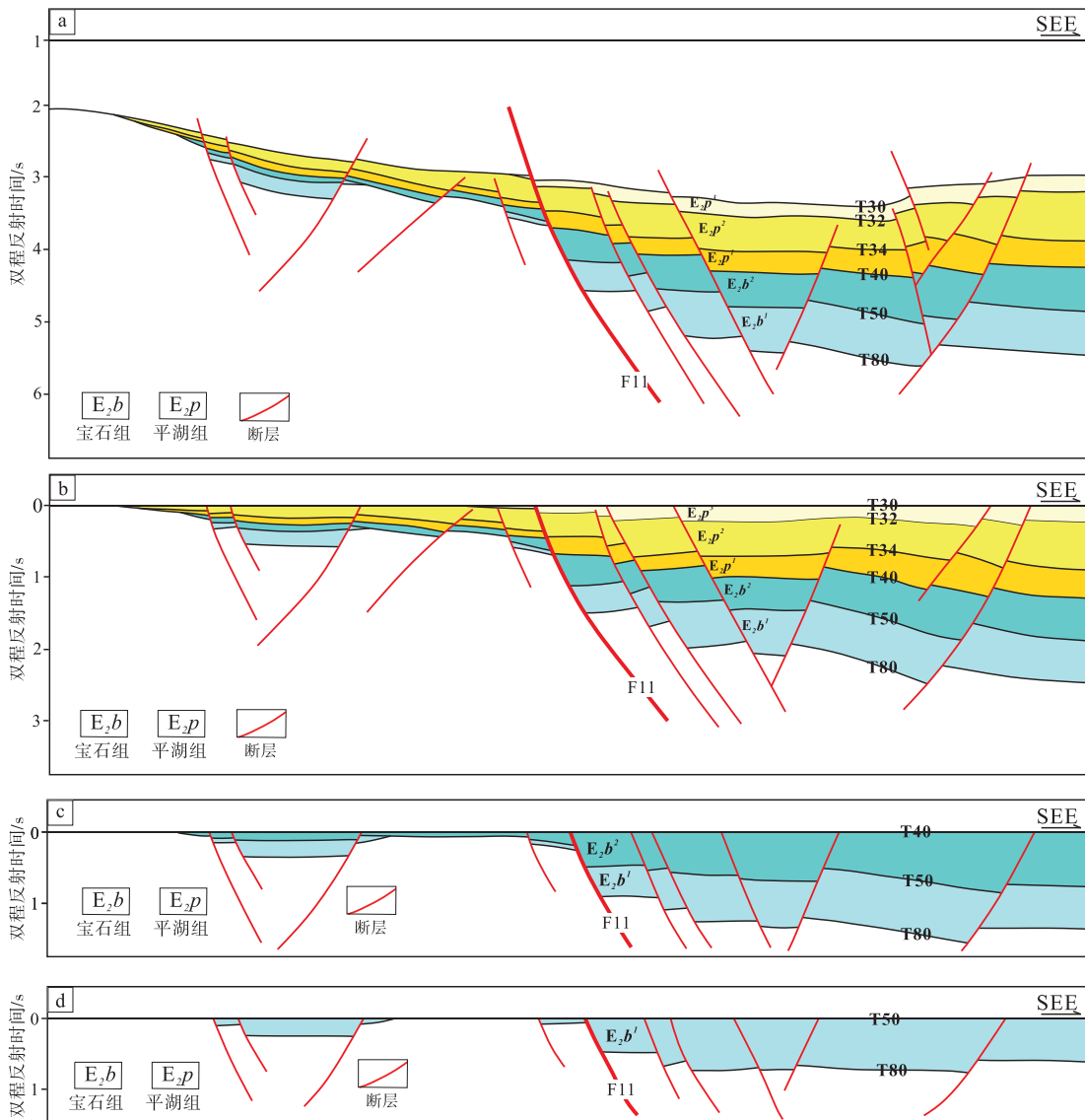
Fig. 5 Schematic diagrams showing tectonic evolution of western slope belt during the Eocene in Xihu sag

## 4.2 始新世断裂体系对沉积中心的控制

### 4.2.1 西部斜坡带构造演化过程

始新世以来，由于太平洋板块向欧亚板块俯冲的方向由 NNW 向转变为 NWW 向，导致西湖凹陷受到的伸展作用减弱，拉伸方向由 NW-SW 向转变为 NWW-SWW 向（索艳慧等，2017；Su *et al.*, 2018；Zhu *et al.*, 2019；赵军等，2020）。在该构造背景下，西湖凹陷西部斜坡带的构造活动强烈，发育大量 NE 向和 NNE 向断裂，这些断裂控制了凹陷内部的构造格局。

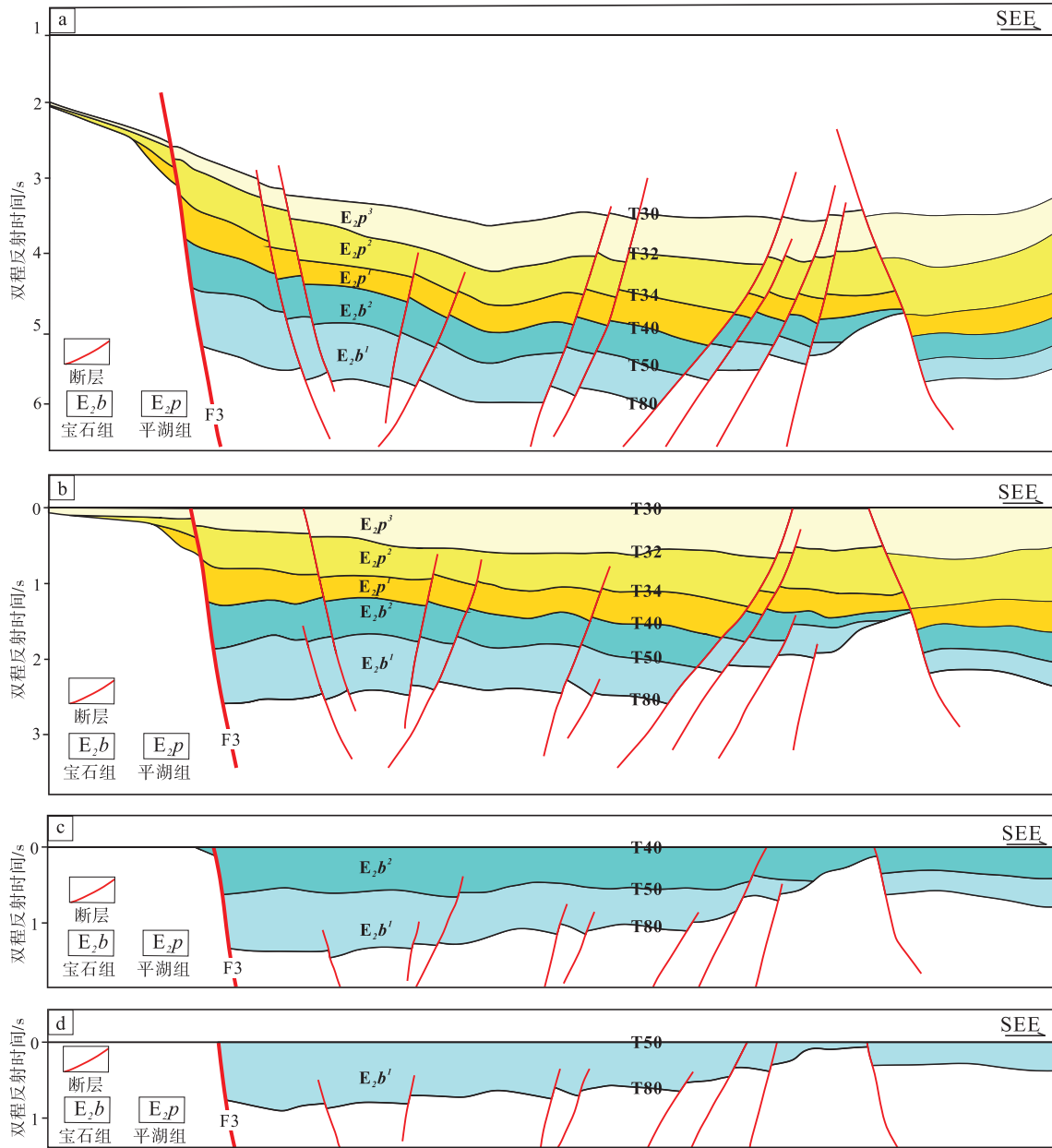
宝石组沉积时期，西湖凹陷处于 NW-SE 向伸展作用控制的强裂陷阶段，盆内断裂大量发育，控制了多隆多洼的构造格局。其中天台斜坡受到渔山东低隆起以及舟山国头构造带影响，导致天台斜坡北部发育 NW 向构造转换带，该转换带的存在使得天台斜坡所受伸展作用相对较弱。西湖凹陷的平湖斜坡和杭州斜坡，受到强烈的伸展作用，发育大量近平行排列的 NE 向同沉积断裂，剖面上多表现为同向陡坡断阶式或地垒-地堑式断裂组合样式(图 6；图 7)；天台斜坡表现为弱伸展区，发育 NW 向断裂与 NE 向同沉积断



a—现今；b—平湖组沉积末期；c—宝石组上段沉积末期；d—宝石组下段沉积末期

图 6 西湖凹陷杭州斜坡始新世-渐新世构造演化剖面（剖面 A 位置见图 1）

Fig. 6 Balanced profiles showing tectonic and sedimentary evolution from the Eocene to Oligocene in Hangzhou slope, Xihu sag (Section location A in Fig. 1)



a—现今；b—平湖组沉积末期；c—宝石组上段沉积末期；d—宝石组下段沉积末期

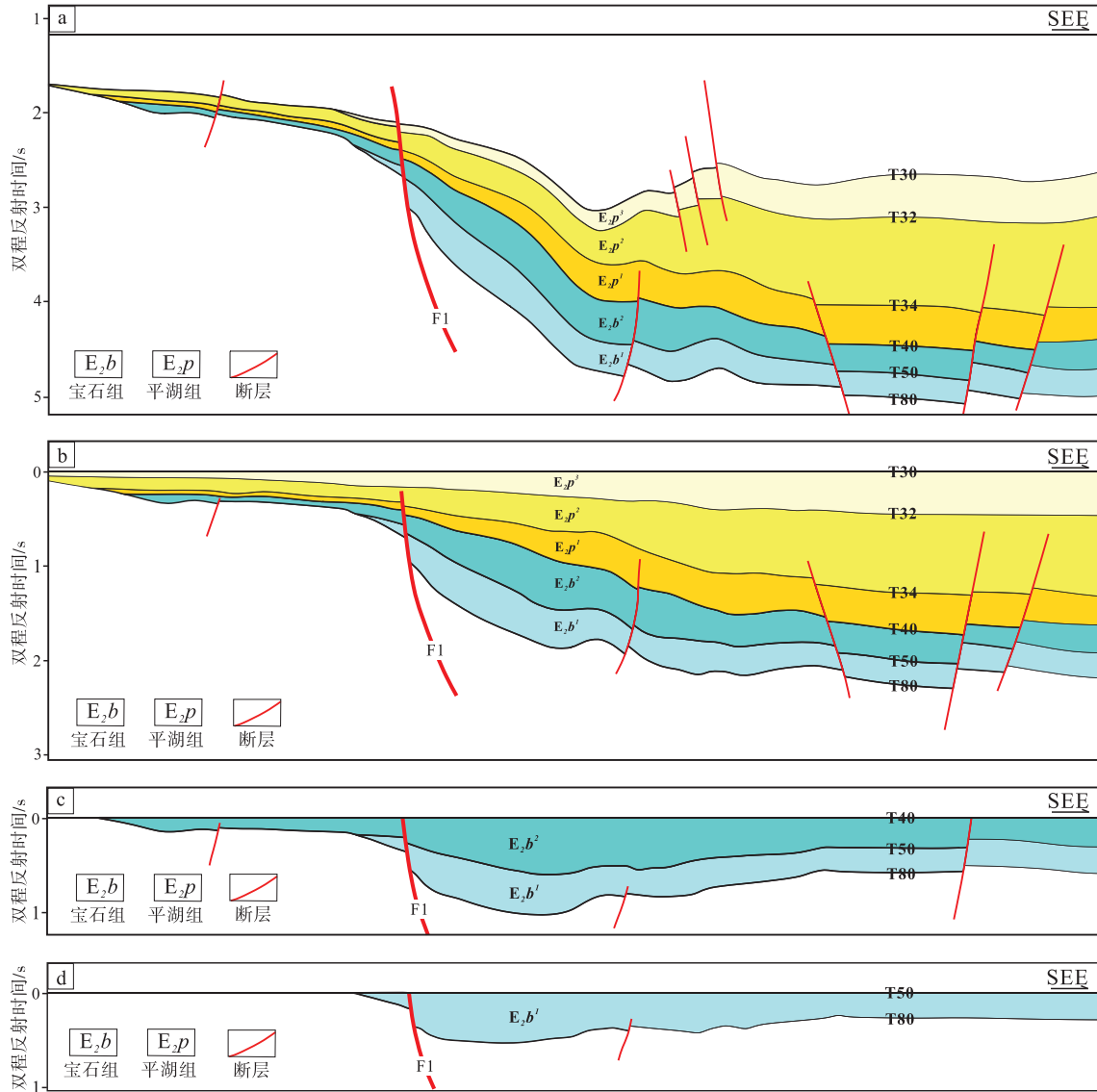
图 7 西湖凹陷平湖斜坡始新世-渐新世构造演化剖面（剖面 B 位置见图 1）

Fig. 7 Balanced profiles showing tectonic and sedimentary evolution from the Eocene to Oligocene in Pinghu slope, Xihu sag (section location B in Fig. 1)

裂如 F1 (图 8)，断裂剖面组合样式为缓坡单断式与复合地垒地堑式。

平湖组沉积时期，太平洋板块向欧亚板块俯冲方向由 NNW 向转变为 NWW 向，西湖凹陷所受应力环境由伸展向挤压过渡（索艳慧等，2017；赵军等，2020）。西湖凹陷杭州斜坡与平湖斜坡的 NE 向断裂活动性减弱，而平湖斜坡的 NNE 向断裂开始强烈活动(图 3)，导致了凹陷的沉积中心南

迁；天台斜坡的同沉积断裂 F1 活动性明显减弱，断裂两侧的地层厚度相差不大，对平湖组的沉积充填不再起控制作用(图 8)。受隐伏基底断裂影响，杭州斜坡形成双向断裂控制的复杂断裂坡折带(图 6)。平湖斜坡表现为陡坡洼陷边缘断裂构造坡折带特征(图 7)，天台斜坡表现为缓坡洼陷边缘断裂坡折带样式(图 8)，至此西湖凹陷西部的斜坡结构基本定型。



a—现今；b—平湖组沉积末期；c—宝武组上段沉积末期；d—宝武组下段沉积末期

图 8 西湖凹陷天台斜坡始新世-渐新世构造演化剖面（剖面 C 位置见图 1）

Fig. 8 Balanced profiles showing tectonic and sedimentary evolution from the Eocene to Oligocene in Tiantai slope, Xihu sag (section location C in Fig. 1)

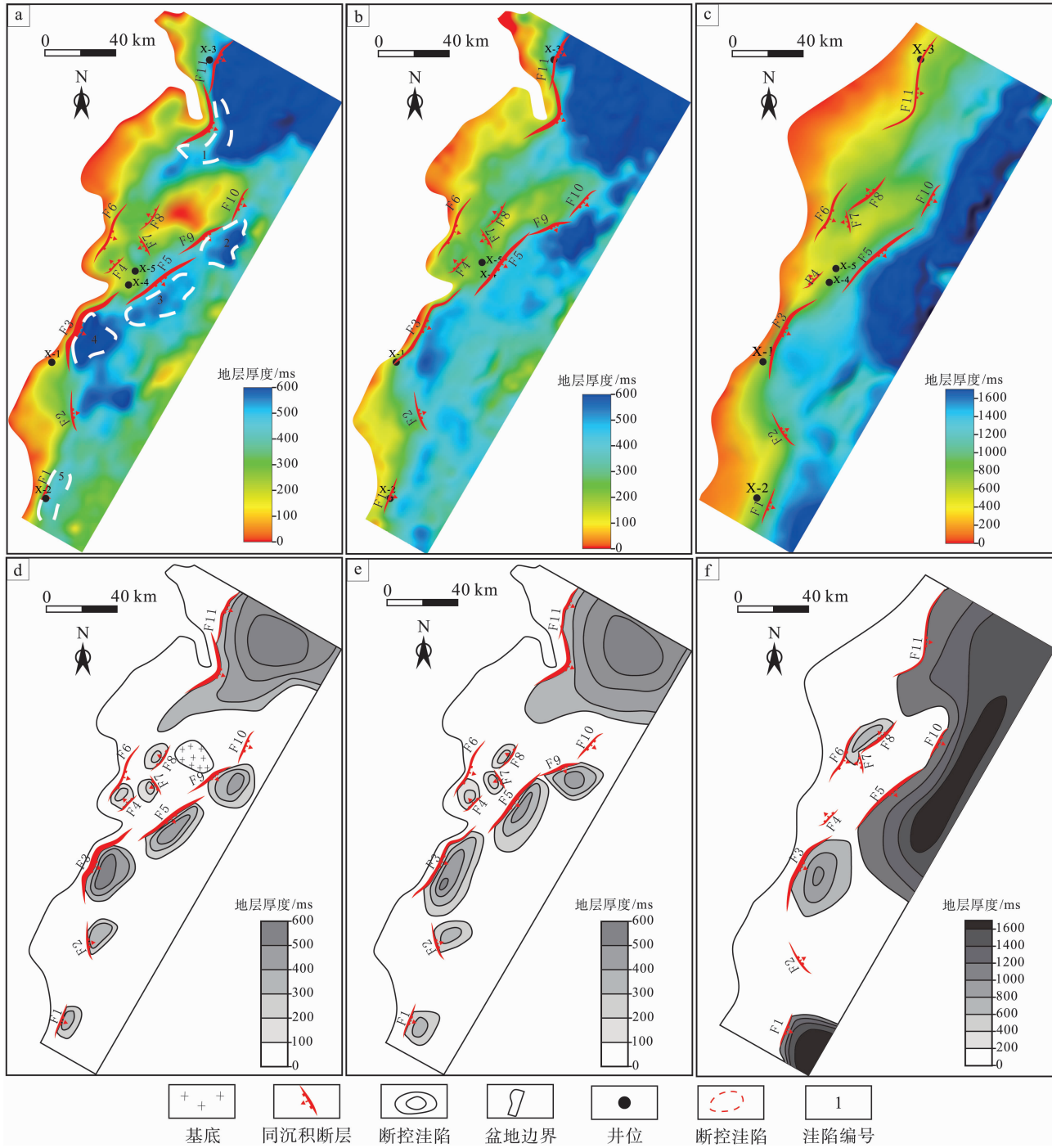
#### 4.2.2 始新世断裂发育对沉积中心迁移的控制作用

幕式构造活动对盆地的构造格局及沉积中心规模具有重要控制作用。在裂陷湖盆中，断裂活动是构造作用最主要的表现形式（管红和朱筱敏，2008；Zhou *et al.*, 2025）。始新世以来，受板块运动影响（索艳慧等，2017；赵军等，2020），西湖凹陷不同构造单元的发育在不同时期的断裂活动表现出显著差异，进而导致各洼陷的规模及沉积体的空间展布特征发生明显变化。

宝武组下段沉积时期，西湖凹陷北部和中部的

NE 向断裂强烈活动，控制了平湖斜坡与杭州斜坡的快速断陷，形成较大可容空间(图 9)。宝武组上段沉积时期，凹陷内沉积中心呈继承性发育，其分布范围持续扩大。

平湖组沉积时期，西湖凹陷进入断-拗转换阶段，此时断裂活动整体趋于平稳，主干断裂继承性发育。其中，杭州斜坡断裂活动性减弱，宝云亭-武云亭古隆起东侧的断裂连接并且持续活动，控制西湖凹陷沉积中心南迁。在该沉积期，杭州沉积中心、平北沉积中心与宝武东南沉积中心相连接形成



a—宝石组下段残余厚度图及其同沉积断裂分布；图中洼陷编号：1为杭州沉积中心；2为宝武东南沉积中心；3为平湖北沉积中心；4为平湖沉积中心；5为宝石沉积中心；b—宝石组上段残余厚度图及其同沉积断裂分布；c—平湖组残余厚度图及其同沉积断裂分布；d—宝石组下段沉积中心及其同沉积断裂分布；e—宝石组上段沉积中心及其同沉积断裂分布；f—平湖组沉积中心及其同沉积断裂分布

图 9 西湖凹陷始新世残余厚度图及其同沉积断裂分布

Fig. 9 Thickness maps showing distribution of depocenters and major faults of the Eocene in Xihu sag

条带状分布(图 9)。而天台斜坡断裂活动性显著减弱，导致宝石沉积中心逐渐脱离断裂控制，并整体向盆地东部迁移(图 9)。

#### 4.2.3 始新世断裂活动与沉积中心规模定量关系分析

西湖凹陷经历了多期构造变革，各期次构造运

动对盆地的地层充填具有显著控制作用。本研究聚焦于始新世同沉积断裂对沉积体系的控制机制，选取杭州、宝武东南、平湖北、平湖及宝石 5 个典型沉积中心作为重点研究对象(图 9-c)，基于地质—地球物理资料与钻井数据综合分析，系统计算了主控断裂的活动速率、构造沉降量及沉降速率、洼陷面积和可容空间等关键参数(表 1)，其中洼陷命名均与主控断裂相对应。依托上述参数的关系构建，结合构造层序分析，以期进一步揭示沉积中心的空间展布特征与迁移规律。

由表 1 可见，在早始新世，断裂活动最为强烈，断裂活动速率和沉积中心的构造沉降速率均达到峰值。此时，断裂的最大位移量和长度直接控制了沉积中心的沉积厚度与规模，显示出断裂活动对沉积格局重要的控制作用。随着构造演化的持续进行，至始新世末期，西湖凹陷进入断—拗转换期，断裂活动速率及洼陷的构造沉降速率开始明显减小。在这一背景下，沉积中心的范围进一步扩大，反映了盆地动力学机制的转变。

从图 10-a 可以看出，构造沉降速率与断裂活动速率之间表现出高度正相关，这一关系明确指示同沉积断裂活动是控制基底沉降的主导因素。另一方面，洼陷面积与构造沉降量呈负相关关系(图 10

-b)，表明随着构造沉降量减小，洼陷面积会增大，反映出在构造沉降减弱背景下，有利于拗陷期水浅、坡缓的规模型连通性洼陷的发育，而对于断陷期则相反。此外，构造沉降量、断裂活动速率均与可容空间呈明显正相关(图 10-c)，说明二者协同作用明显控制了沉积物可容空间范围，进而影响沉积中心的发育与演化。

综上所述，西湖凹陷西部斜坡带在始新世差异伸展作用的控制下，杭州斜坡与平湖斜坡广泛发育 NE 向与 NNE 向断裂，而天台斜坡则主要发育少量 NE 向及 NW 向断裂。西湖凹陷内断裂的差异性发育导致西部各次级构造单元形成不同类型的构造坡折带。断裂系统的差异演化对古地貌格局、沉积中心规模及迁移具有重要控制作用。此种“断-洼”耦合的构造-沉积模式，对研究区油气勘探具有重要的理论指导意义。

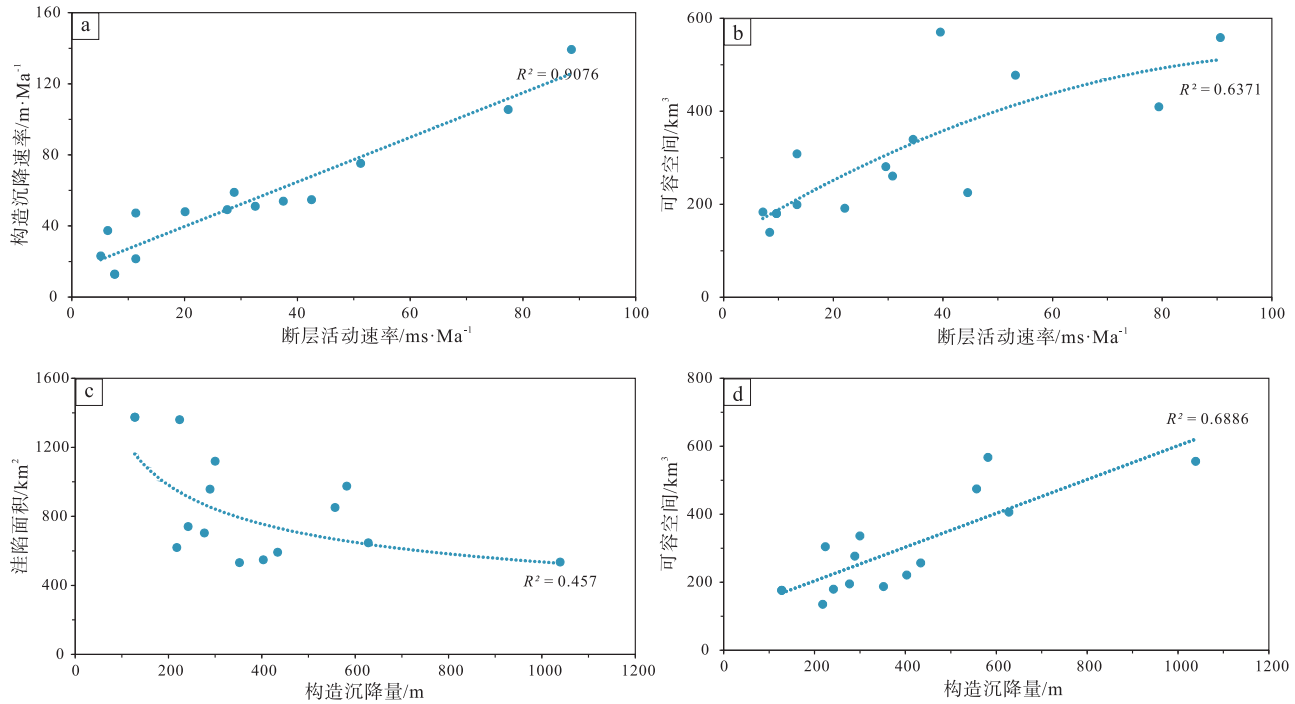
## 5 结论

1) 西湖凹陷西部斜坡带始新世断裂体系具有显著的分带性与分段性。平面上，断裂展布受基底构造、古隆起及区域应力场控制，表现为 NE 向断裂为主，少量发育 NW 向断裂的分区展布特征；剖面上，以单断式、断阶式（同向、反向、复合型）

表 1 西湖凹陷同沉积断裂及其对应洼陷参数统计

Table 1 Parameters statistical for syndepositional faults and associated subsags in the Xihu sag

洼陷名称	断裂	沉积时期	断裂活动速率 /ms·Ma <sup>-1</sup>	构造沉降量 /m	洼陷面积 /km <sup>2</sup>	可容空间 /km <sup>3</sup>	构造沉降速率 /m·Ma <sup>-1</sup>
杭州沉积中心	F11	宝石组下段	46	557	852	475	74
		宝石组上段	30	300	1120	336	50
		平湖组	13	224	1360	305	20
宝武东南沉积中心	F9	宝石组下段	37	403	548	221	54
		宝石组上段	26	289	958	277	48
		平湖组	9	128	1375	176	12
平湖北沉积中心	F5	宝石组下段	26	434	592	257	58
		宝石组上段	14	277	704	195	46
		平湖组	9	128	1375	176	12
平湖沉积中心	F3	宝石组下段	77	1039	535	556	139
		宝石组上段	69	628	647	406	105
		平湖组	36	582	975	567	53
宝石沉积中心	F1	宝石组下段	20	352	532	187	47
		宝石组上段	8	218	620	135	36
		平湖组	7	242	741	179	22



a—断裂活动速率与构造沉降速率的关系；b—断裂活动速率和可容空间的关系；c—洼陷面积和构造沉降量的关系；  
d—可容空间和构造沉降量的关系；图中数据均源于表 1

图 10 西湖凹陷构造活动与洼陷发育规模相关性分析

Fig. 10 Relationships between various parameters involved in the sub-sag development scale system

为主，不同次级构造单元断裂组合样式差异显著。平湖主断裂、杭州主断裂及宝云亭-武云亭断裂为研究区主要同沉积断裂，其活动强度、空间展布及演化规律存在显著时空分异。早始新世为断裂活动高峰期，至晚始新世，断裂活动逐渐减弱并趋于停滞。

2) 同沉积断裂活动主导了始新世的沉积中心的迁移与演化。早中始新世，杭州主断裂、平湖主断裂及古隆起周缘断裂联合控制多个孤立沉积中心；晚始新世，伴随西湖凹陷过渡为断—拗转换期，沉积中心逐渐合并向东迁移。早中始新世断裂差异活动直接控制沉积厚度分布与洼陷位置，表现为“断—控洼陷”的耦合特征。

3) 西湖凹陷多个沉积中心的构造沉降量、断裂活动速率与可容空间呈正相关关系，断裂活动速率与洼陷面积呈负相关关系，构造活动与可容空间和洼陷面积之间存在定量关系。同沉积断裂的强烈活动加剧了地壳的差异沉降，为断裂上盘沉积中心的形成及规模性可容纳空间增长提供了构造背景，从而控制了沉积中心的分布与地层厚度的差异发育。

参考文献 (References)

蔡华, 张建培. 2013. 东海西湖凹陷平湖斜坡带断裂特征及其封闭性. 海洋地质前沿, 29(4): 20-26. [Cai H, Zhang J P. 2013. Characteristics of faults on the Pinghu slope of Xihu sag, the East China Sea Shelf Basin and their sealing capacity. Marine Geology Frontiers, 29(4): 20-26]

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. [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]

蔡华, 秦兰芝, 刘英辉. 2019. 西湖凹陷平北斜坡带海陆过渡相源-汇系统差异性及其耦合模式. 地球科学, 44(3): 880-897. [Cai H, Qin L Z, Liu Y H. 2019. Differentiation and coupling model of source-to-sink systems with transitional facies in Pingbei slope of Xihu sag. Earth Science, 44(3): 880-897]

陈哲, 张昌民, 侯国伟, 冯文杰, 徐清海. 2020. 东海陆架盆地西湖凹陷平湖组断裂组合样式及其控砂机制. 石油与天然气地质, 41(4): 824-837. [Chen Z, Zhang C M, Hou G W, Feng W J, Xu Q M. 2020. Fault distribution patterns and their control on sand bodies in Pinghu Formation of Xihu sag in East China Sea Shelf Basin. Oil & Gas Geology, 41(4): 824-837]

管红, 朱筱敏. 2008. 南堡凹陷东营组层序地层格架与沉积体系. 沉

- 积学报, 26(5): 730-736. [Guan H, Zhu X M. 2008. Sequence framework and sedimentary facies of Ed Formation in Paleogene, Nanpu sag, Bohai Bay Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(5): 730-736]
- 黄启彰, 李文俊, 刘春锋, 胡碧瑶. 2025. 西湖凹陷平湖斜坡带平湖组断裂展布与控砂模式研究. *天然气与石油*, 43(2): 58-65. [Huang Q Z, Li W J, Liu C F, Hu B Y. 2025. Study on fault distribution and sand-controlling pattern of the Pinghu Formation in the Pinghu Slope Zone of the Xihu sag. *Natural Gas and Oil*, 43(2): 58-65]
- 蒋一鸣, 邹玮, 刘金水, 唐贤君, 何新建. 2019. 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. [Jiang Y M, Zou W, Liu J S, Tang X J, He X J. 2019. Genetic mechanism of Late Miocene anticlinal inversion in Xihu sag, East China Sea: a new understanding from basement structural differences. *Earth Science*, 45(3): 968-979]
- 雷闯, 叶加仁, 吴景富, 单超, 田杨, 殷世艳. 2014. 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. *地球科学*, 39(7): 837-847. [Lei C, Ye J R, Wu J F, Shan C, Tian Y, Yin S Y. 2014. Dynamic process of reservoir formation in basins with low exploration degree: a case study of the central part of Xihu Depression. *Earth Science*, 39(7): 837-847]
- 李昆, 周兴海, 丁峰, 袁竞, 沈珊, 吕鹏. 2019. 西湖凹陷保叙斜坡带平北地区平湖组“多元控砂”机制分析. *海洋地质与第四纪地质*, 39(6): 115-123. [Li K, Zhou X H, Ding F, Yuan J, Shen S, Lü P. 2019. “Multi-factor control of sandboies distribution” in the Pinghu Formation, Pingbei region of Baochu slop, the Xihu sag. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 39(6): 115-123]
- 李磊, 张武, 何新建, 孙永壮, 赵天亮. 2023. 东海西湖凹陷平湖斜坡带基底潜山储层发育模式. *上海国土资源*, 44(2): 134-139. [Li L, Zhang W, He X J, Sun Y Z, Zhao T L. 2023. Development model of basement buried hill reservoir in Pinghu slope belt, Xihu sag, East China Sea. *Shanghai Land & Resources*, 44(2): 134-139]
- 李上卿, 李纯洁. 2003. 东海西湖凹陷油气资源分布及勘探潜力分析. *石油实验地质*, 25(6): 721-728. [Li S Q, Li C J. 2023. Analysis on the petroleum resource distribution and exploration potential of the Xihu depression, the East China Sea. *Petroleum Geology & Experiment*, 25(6): 721-728]
- 祁鹏, 郭刚, 崔敏, 王欣, 李峰, 李林致. 2023. 西湖凹陷天台斜坡新生代构造差异特征及其形成机制. *现代地质*, 37(2): 307-315. [Qi P, Guo G, Cui M, Wang X, Li F, Li L Z. 2023. Cenozoic tectonic difference and its formation mechanism of the Tiantai slope in the Xihu sag. *Geoscience*, 37(2): 307-315]
- 索艳慧, 李三忠, 曹现志, 李玺瑶, 刘鑫, 曹花花. 2017. 中国东部中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. [Suo Y H, Li S Z, Cao X Z, Li X Y, Liu X, Cao H H. 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]
- 唐贤君, 钟荣全, 陈永军, 何新建, 代勇. 2024. 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)*, 54(6): 2047-2060. [Tang X J, Zhong R Q, Chen Y J, He X J, Dai Y. 2024. Segmentation and genetic mechanism of Pinghu Fault Zone in Xihu sag slope area, East China Sea Basin. *Journal of Jilin University( Earth Science Edition)*, 54(6): 2047-2060]
- 伍亮, 李昆, 周锋, 谢春雨, 唐大卿. 2025. 西湖凹陷冷泉亭地区断裂构造特征及演化. *海洋地质前沿*, 41(1): 31-43. [Wu L, Li K, Zhou F, Xie C Y, Tang D Q. 2025. Characteristics and evolution of fault structures in Lengquanting area of Xihu sag. *Marine Geology Frontiers*, 41(1): 31-43]
- 徐东浩, 秦兰芝, 李帅, 蔡坤, 王宇. 2024. 西湖凹陷平北斜坡平湖组潮坪环境砂体沉积模式及控制因素. *中国海上油气*, 36(5): 57-67. [Xu D H, Qin L Z, Li S, Cai K, Wang Y. 2024. Sedimentary models and controlling factors of sand bodies in tidal flat environment of Pinghu Formation on Pingbei slope of Xihu sag. *China Offshore Oil and Gas*, 36(5): 57-67]
- 杨彩虹, 曾广东, 李上卿, 梁若冰. 2014. 东海西湖凹陷平北地区断裂发育特征与油气聚集. *石油实验地质*, 36(1): 64-69. [Yang C H, Zeng G D, Li S Q, Liang R B. 2014. Fault development characteristics and hydrocarbon accumulation in Pingbei area of Xihu sag, East China Sea. *Petroleum Geology & Experiment*, 36(1): 64-69]
- 余浪, 余一欣, 蒋一鸣, 邹玮, 陈石. 2023. 东海陆架盆地西湖凹陷天台斜坡构造变换带发育特征及形成机理. *石油与天然气地质*, 44(3): 753-763. [Yu L, Yu Y X, Jiang Y M, Zou W, Chen S. 2023. Characteristics and forming mechanisms of transform zone in the Tiantai slope, Xihu sag, East China Sea Shelf Basin. *Oil & Gas Geology*, 44(3): 753-763]
- 张伯成, 刘江, 焦社宝, 王军, 陈春峰, 唐贤君. 2024. 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. [Zhang B C, Liu J, Jiao S B, Wang J, Chen C F, Tang X J. 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]
- 张敏强, 徐发, 张建培, 张田. 2011. 西湖凹陷裂陷期构造样式及其对沉积充填的控制作用. *海洋地质与第四纪地质*, 31(5): 67-72. [Zhang M Q, Xu F, Zhang J P, Zhang T. 2011. Structural pattern during the rifting stage of the Xihu sag and its control of sediment infilling. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 31(5): 67-72]
- 张绍亮, 张建培, 唐贤君, 张田. 2014. 东海西湖凹陷断裂系统几何学特征及其成因机制. *海洋地质与第四纪地质*, 34(1): 87-94. [Zhang S L, Zhang J P, Tang X J, Zhang T. 2014. Geometry characteristic of the fault system in Xihu sag in East China Sea and its formation mechanism. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 34(1): 87-94]
- 赵军, 唐贤君, 蒋一鸣, 邹玮, 刘亚茹. 2020. 东海盆地西湖凹陷西北缘中始新世构造变革厘定及成因探讨. *地质科技通报*, 39(3): 58-67. [Zhao J, Tang X J, Jiang Y M, Zou W, Liu Y R. 2020. Confirmation and genesis of the Middle Eocene tectonic transformation in northwestern margin of Xihu Depression, East China Sea Basin. *Bul-*

- letin of Geological Science and Technology, 39(3): 58–67]
- 周祥林, 高伟中, 张建培, 张年念, 田超. 2014. 东海西湖凹陷平北断裂特征及其对油气成藏的控制. 上海国土资源, 35(2): 54–57. [Zhou X L, Gao W Z, Zhang J P, Zhang N N, Tian C. 2014. Fractures in the Pingbei area and their control on hydrocarbon accumulation in the Xihu sag of the East China Sea. Shanghai Land & Resources, 35(2): 54–57]
- Abbas A, Zhu H T, Zeng Z W, Zhou X H. 2018. Sedimentary facies analysis using sequence stratigraphy and seismic sedimentology in the Paleogene Pinghu Formation, Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin. Marine and Petroleum Geology, 93: 287–297.
- Athy L F. 1930. Density, porosity, and compaction of sedimentary rocks. AAPG Bulletin, 14: 1–24.
- Cheng Y, Wu Z, Xu B, Zhang J, Chu Y C, Dai Y N, Xu L L, Sun W J, Ma S T. 2023. Structural characteristics and genetic mechanism of transfer zones in an extensional rift zone: an example from the Xihu sag, East China Sea Basin. Tectonophysics, 856: 229852.
- Ding F, Xie C, Zhou X, Jiang C, Li K, Wan L, Zhang P, Niu H. 2021. Defining stratigraphic oil and gas plays by modifying structural plays: a case study from the Xihu sag, east China Sea Shelf Basin. Energy Geoscience, 2(1): 41–51.
- Li C F, Zhou Z Y, Ge H P, Mao Y X. 2009. Rifting process of the Xihu Depression, East China Sea Basin. Tectonophysics, 472(1): 135–147.
- Liang J T, Wang H L. 2019. Cenozoic tectonic evolution of the East China Sea Shelf Basin and its coupling relationships with the Pacific Plate subduction. Journal of Asian Earth Sciences, 171: 376–387.
- Liu H, van Loon A J T, Xu J, Tian L X, Du X F, Zhang X T, Chen D L. 2020. Relationships between tectonic activity and sedimentary source-to-sink system parameters in a lacustrine rift basin: a quantitative case study of the Huanghekou Depression (Bohai Bay Basin, E China). Basin Research, 32(4): 587–612.
- Perrie R, Qiublier J. 1974. Thickness changes in sedimentary layers during compaction history, methods for quantitative evolution. AAPG Bulletin, 58: 507–520.
- Su A, Chen H H, Chen X, He C, Liu H P, Li, Q, Wang C W. 2018. The characteristics of low permeability reservoirs, gas origin, generation and charge in the central and western Xihu depression, East China Sea Basin. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 53: 94–109.
- Wylliel M R, Gregory A R, Gardner L W. 1958. An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media. Geophysics, 23: 459–493.
- Xu J Y, Ben-Avraham Z, Kelty T, Yu H S. 2014. Origin of marginal basins of the NW Pacific and their plate tectonic reconstructions. Earth-Science Reviews, 130(1): 154–196.
- Yang L F, Yu H X, Zhang Q L, Li Q Y. 2009. Correlations between shortening rate, uplift rate, and inversion rate in central inversion zone of Xihu Depression, East China Sea Basin. Journal of Earth Science, 20(4): 699–708.
- Zhao R J, Liu H, Jiang Y M, Chen H H. 2025. Paleogene geomorphology and formation process of the Diaoyu Islands folded-uplift belt, East China Sea Basin: insights of the dynamics of subducting slab on the control of tectonic evolution in back-arc basins. Applied Sciences, 15(16): 8878.
- Zhang J, Li S, Suo Y. 2016. Formation, tectonic evolution and dynamics of the East China Sea Shelf Basin. Geological Journal, 51: 162–175.
- Zhou X, Zhao X, Ge J, Bouchakour M, Yin G, Wang J, Yan S, Liu X. 2025. Tectono-stratigraphic evolution of multiphase rifts in a hanging wall dip-slope setting: a case study in Eocene western slope, Xihu sag of East China Sea Shelf Basin. Marine and Petroleum Geology, 177: 107382.
- Zhu W L, Zhong K, Fu X W, Chen C F, Zhang M Q, Gao S L. 2019. The formation and evolution of the East China Sea Shelf Basin: a new view. Earth-Science Reviews, 190: 89–111.

(责任编辑 郑秀娟)