

于佳富, 于福生, 陈忠云, 刘春锋, 齐伊犁, 刘鑫. 2026. 东海西湖凹陷西部斜坡弧形断裂带构造演化特征与成因物理模拟. 地质科学, 61(2): 606-621. DOI: 10.12017/dzxx.2026.041. CSTR: 32087.14.dzxx.2026.041.

Yu Jiafu, Yu Fusheng, Chen Zhongyun, Liu Chunfeng, Qi Yili, Liu Xin. 2026. Structural evolution characteristics and analogue modelling of the arcuate fault zone in the western slope of Xihu Sag, East China Sea shelf basin. *Chinese Journal of Geology*, 61(2): 606-621. DOI: 10.12017/dzxx.2026.041. CSTR: 32087.14.dzxx.2026.041.

东海西湖凹陷西部斜坡弧形断裂带构造 演化特征与成因物理模拟*

于佳富¹ 于福生^{1,2} 陈忠云³ 刘春锋³ 齐伊犁¹ 刘鑫¹

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249;
3. 中海石油(中国)有限公司上海分公司 上海 200335)

摘要 东海陆架盆地西湖凹陷经历多期构造运动, 油气成藏条件优越, 具有良好的油气勘探前景。西部斜坡弧形断裂带内部断层交织发育, 演化过程复杂, 目前对其南北段差异发育特征及形成机制仍存在争议。本文基于三维地震资料解释, 明确研究区具有北段NNE向伸展断裂组合和南段NNW向走滑断裂组合的分段发育特征, 并识别出地堑、Y型、“人”字型等构造样式及负花状构造; 通过平衡剖面技术揭示, 西部斜坡南北部在不同时期处于差异伸展或差异挤压的构造环境。结合砂箱物理模拟实验分析, 弧形断裂带先后经历“断陷期独立生长—断—拗转换期相互连接—拗陷期分段生长—反转期定型”的演化过程。新生代以来, 在NW-SE向区域伸展应力作用下, 北段受凹陷边界断层控制发育正断层组合, 南段由于NW向基底孤山断裂再活化引起差异伸展作用而形成走滑断裂组合, 最终南北段断裂硬连接形成弧形断裂带。通过对比模型I和II实验结果与实际地质特征, 发现塑性层在研究区构造变形过程中起到关键调节作用, 认为其与基底断裂再活化共同控制弧形断裂带的形成。

关键词 东海陆架盆地 西湖凹陷 弧形断裂 构造演化 物理模拟

中图分类号: P544

文献标识码: A

文章编号: 0563-5020(2026)02-606-16

Structural evolution characteristics and analogue modelling of the arcuate fault zone in the western slope of Xihu Sag, East China Sea shelf basin

Yu Jiafu¹ Yu Fusheng^{1,2} Chen Zhongyun³ Liu Chunfeng³ Qi Yili¹ Liu Xin¹

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249; 3. CNOOC China Limited, Shanghai Branch, Shanghai 200335)

Abstract The Xihu Sag has experienced multi-stage tectonic movements, creating favorable conditions for hydrocarbon accumulation and making it a highly prospective exploration target. The arcuate fault zone on the western slope is characterized by complex fault interactions, yet the contrasting development of its northern and southern segments remains controversial. Based on 3D seismic interpretation, we identify NNE-trending extensional faults in the north and NNW-trending strike-slip faults in the south, along with graben, Y-shaped, and negative flower structures. Balanced cross-section analysis reveals alternating extensional and compressional regimes across different evolutionary stages. Sandbox physical modeling experiments suggest that the arcuate fault zone experienced a four-stage evolution: independent growth in the rifting period, linkage of fault-depression

* 基金项目: 中海石油(中国)有限公司上海分公司科技项目“西湖凹陷中南部低幅背斜区平湖—花港组构造差异对油气成藏的控制作用”(编号: CCL2022XHPS015EM)资助

本文作者: 于佳富, 男, 1997年生, 博士, 地质学专业。E-mail: yu1605123510@163.com

收稿日期: 2025-02-11, 修回日期: 2025-09-14

transformation, segmented growth in the depression period and termination of development in the inversion period. Since the Cenozoic, NW-SE-oriented regional extension promoted normal fault systems in the north, whereas reactivation of the NW-trending Gushan basement fault in the south induced strike-slip deformation. The final hard linkage between the two segments formed the arcuate fault zone. Comparison between experimental models and geological observations highlights the pivotal role of the plastic layer, which, together with basement fault reactivation, jointly controlled the development of the arcuate fault zone.

Keywords East China Sea shelf basin, Xihu Sag, Arcuate fault, Structural evolution, Analogue modelling

东海陆架盆地位于欧亚板块东南缘，是我国近海面积最大的中、新生代含油气盆地之一，其构造演化主要受伊泽奈歧板块、太平洋板块和菲律宾海板块俯冲作用的影响(郭令智等，1983；李三忠等，2013；王光增等，2019)。盆地整体呈NE向展布，构造形态表现为“两坳夹一隆”，从西至东依次为西部坳陷带、中央隆起带和东部坳陷带(张建培等，2014；张迎朝等，2024)。因其独特的构造背景、丰富的油气资源和重要的战略地位，该盆地备受国内外地质学家和油气勘探家的关注(赵峰梅等，2010；周心怀等，2019；Zhu et al., 2019；Yang et al., 2024；程琦等，2025；Jiang et al., 2025)。

西湖凹陷是东海陆架盆地内构造活动最为复杂的区域之一，发育走滑构造、伸展构造以及构造转换带等多种构造类型(张建培，2013；唐贤君等，2024a；王辉等，2025)。其中，西部斜坡发育的弧形断裂带受到了较大的关注。弧形构造作为走滑和伸展构造体系中常见的构造形态(Benesh et al., 2014)，明确其形成演化过程，不仅有助于深入揭示区域构造动力特征，也对分析油气圈闭分布规律至关重要。前人对研究区弧形断裂带的分段特征已基本达成一致，但对其南北段差异性的成因及演化模式仍存在诸多争议。例如，Zhang et al.(2023)根据地震剖面特征和断距分布规律分析，天台斜坡弧形断裂演化过程可分为5个阶段：在早期独立阶段，南北段分别发育独立的NNE向和SE向断裂；在硬连接阶段，相邻的伸展断裂硬连接并形成弧形带；在弱活动阶段，断层活动强度逐渐减弱；在断层分段阶段，应力减弱导致断层规模减小，弧形带被分割为独立的断层；在反转阶段，伸展环境转为挤压环境，发育背斜隆起。余浪等(2023)根据三维地震解释和平衡剖面技术，分析天台斜坡结构、构造特征及演化过程，认为

构造变换带的形成是由于在中生界发育天台西断裂和孤山断裂等NW向伸展滑脱断层的基础上，南北段伸展作用强度不同导致的调节和变换。张伯成等(2024)根据地震剖面分析、方差体切片和统计南北构造形变参数，划分天台构造特征和南北段构造差异，分析天台构造在伸展阶段，北段伸展量明显大于南段，断裂大量发育；挤压阶段形成整个背斜，局部火成岩发育，从而形成北段走滑断裂体系、南段转换断裂体系、中段为南北体系交汇的构造格局。

在研究方法上，已有成果多依赖地震剖面及构造解释，对断裂系统的几何学特征、动力学特征与演化模拟的结合研究相对不足。本文基于三维地震资料综合解释，结合区域动力背景与研究区南北段的构造变形特征，设计等比例对照组模拟实验，再现研究区自新生代以来的构造演化过程，为剖析西湖凹陷复杂构造体系的形成机制及油气地质意义提供了新的证据与思路。

1 地质背景

西湖凹陷位于东海陆架盆地东部坳陷带内，整体呈NNE向展布，南北长约440 km，东西宽约70~130 km，总面积约 $5.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ (周心怀等，2019)(图1b)。其南侧分别与钓北凹陷、渔山东低隆起、钱塘凹陷、海礁隆起、长江坳陷、虎皮礁隆起和福江凹陷相邻，东侧紧邻钓鱼岛隆褶带(Zhu et al., 2019)(图1a)。西湖凹陷内以新生代碎屑沉积为主，自下而上依次发育白垩系石门潭组，古近系前宝石组、宝石组、平湖组、花港组，新近系龙井组、玉泉组、柳浪组、三潭组和第四系东海群地层(杨潘等，2025)(图2)。西湖凹陷经历多期构造运动，其演化阶段可划分为断陷阶段、断—拗转换阶段、拗陷阶段、反转阶段和区域沉降阶段(王辉等，2025)(图2)。

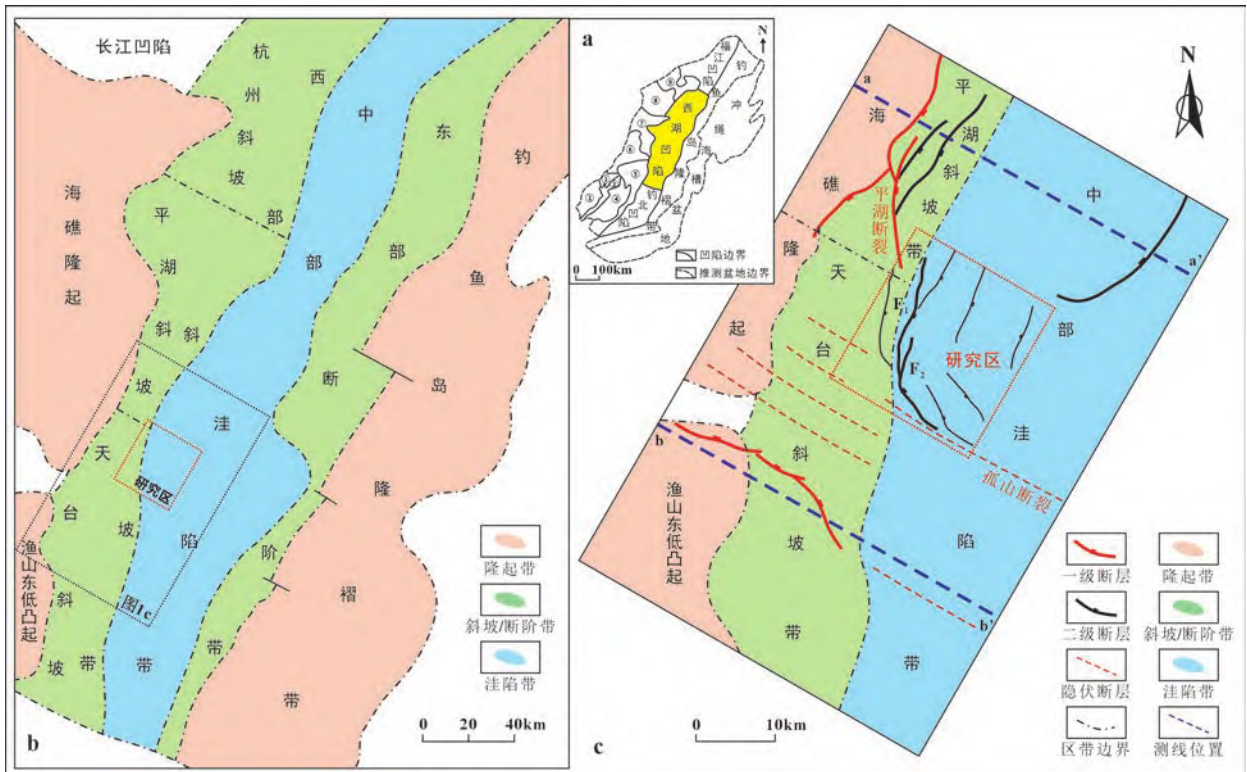


图1 东海陆架盆地西湖凹陷区域地质背景(据周心怀, 2020)

a. 东海陆架盆地构造单元分布图; b. 西湖凹陷构造单元分布图; c. 研究区位置图

图中: ①丽水凹陷; ②雁荡凸起; ③椒江凹陷; ④福州凹陷; ⑤渔山东隆起; ⑥钱塘凹陷; ⑦海礁隆起; ⑧长江拗陷; ⑨虎皮礁隆起

Fig. 1 Regional geological background of Xihu Sag, East China Sea shelf basin (after Zhou, 2020)

在平面结构上, 西湖凹陷表现为“东西分带、南北分块”的特征(张迎朝等, 2025), 凹陷内部可划分为西部斜坡带、中部洼陷带和东部断阶带。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、平湖斜坡和天台斜坡(唐贤君等, 2024b)(图 1b)。垂向上, 古近系地层结构呈现为东断西超的箕状形态, 新近系地层呈现反转背斜形态(周心怀, 2020)。研究区位于东海西湖凹陷西部斜坡带中天台斜坡和平湖斜坡的转换区域, 同时也位于西部斜坡带与中部洼陷带的交界处, 发育在基底断裂孤山断裂的上盘(图 1c), 断裂形态表现为弧形特征。

2 断裂带发育特征

弧形断裂带表现为“南北分段、垂向分层”的构造特征。在平面上, 以拐点为界可划分为南北两段, 北段发育 NNE 向伸展断裂组合, 南段发育 NNW-NW 向走滑断层体系; 在垂向上, 断陷期—断—拗转换期—拗陷期—反转期界限分明, 具有

明显分层特征。

2.1 平面特征

研究区自北向南断裂走向呈 NNE-NNW-NW 向的转变特征(图 3)。北段断裂属于平湖大断裂(图 1b)控制下发育的次级断裂, 受平湖断裂早期扭动作用影响, 形成了 NNE-NE 向正断裂(刘亚茹等, 2020; Zhang et al., 2023)。由图 3 可见, 这些断层以东倾为主, 形成以 F_1 和 F_4 为边界断层, 多条次级断层依次发育的构造格局。宝石组顶面、平湖组顶面及花港组下段顶面的断裂展布特征基本一致, 但宝石组顶面断裂最为发育, 花港组下段顶面则基本仅发育主干断裂。因此推测断裂活动始于平湖组沉积前, 并持续至花港组沉积之后, 表现出明显的继承性特征, 指示研究区在花港组地层沉积之前长期处于稳定的伸展应力环境。南段区域位于 NE 倾向的张性基底断裂——孤山断裂之上, 发育一系列近 NNW 向断裂, 与北段断裂共同构成弧形断裂带, 具有构造转换性质。南段以 F_2 为主控断层, 其余同倾向次级断层向 F_2 东端收

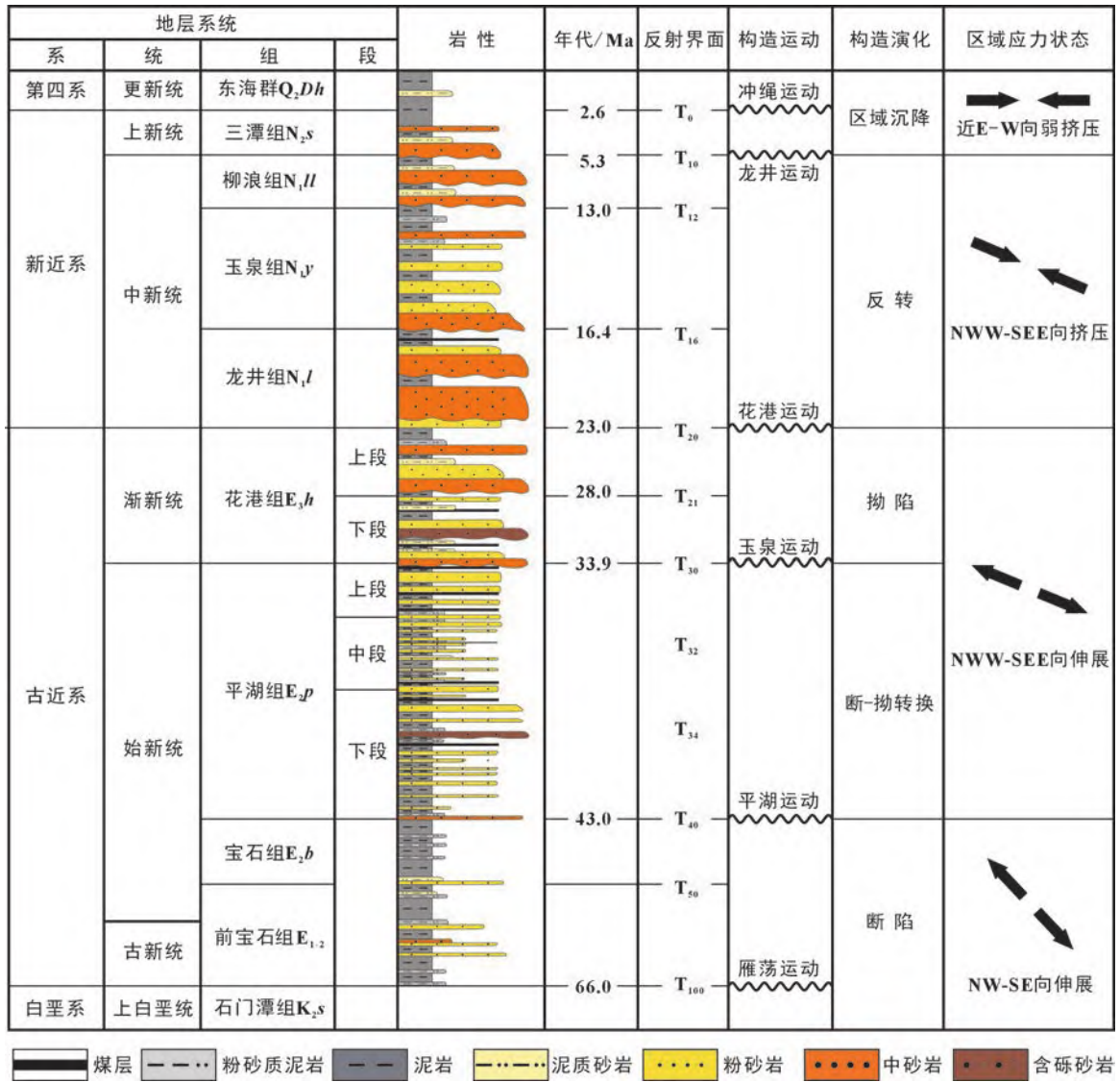


图2 西湖凹陷地层划分和构造运动特征(据张伯成等, 2024; Tian et al., 2025)

Fig. 2 Main stratigraphic units and tectonic movements in the Xihu Sag (after Zhang et al., 2024; Tian et al., 2025)

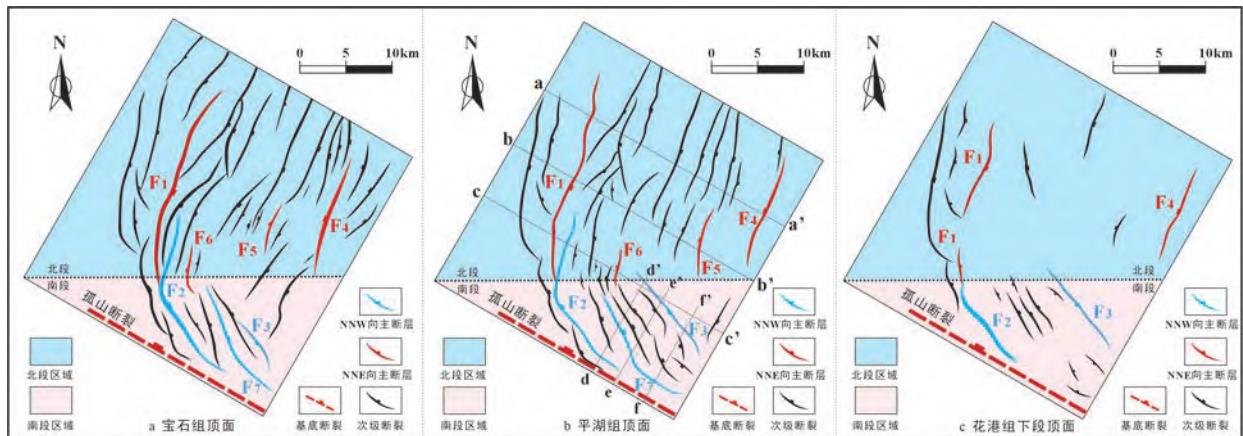


图3 研究区断裂平面分布图

Fig. 3 Faults plane distribution in the study area

敛，向东 F_7 延续在 F_2 末端，呈现出帚状结构，因此推测发育为走滑断裂体系。平湖组沉积之后，在 F_3 控制下发育了一系列反向倾斜的次级断层，拐点处可见如 F_5 等小型弯曲断裂。

2.2 剖面特征

拐点以北(图4a~图4c)，整个伸展体系在断裂 F_1 和 F_4 反向发育控制下形成，构造带内断层上切到 T_{20} 界面，下切到基底，断面形态较为陡峭，倾角较大；在断陷—拗陷期，逐渐形成阶梯状断

层体系，断层间呈现出地堑特征，并且可见Y型、反Y型、“入”字型等多种构造样式。从空间分布上看，自北向南，Y型构造逐渐打开，形成阶梯状排列，表明越靠近拐点处伸展位移量越小，这可能是由于靠近拐点区域受到周边构造的约束更强，使得伸展作用受到一定程度的抑制。进入反转期，在Y型构造的中央部位发育了轻微隆起，表明研究区在反转期受到挤压应力作用影响，导致地层发生轻微的变形和隆升。

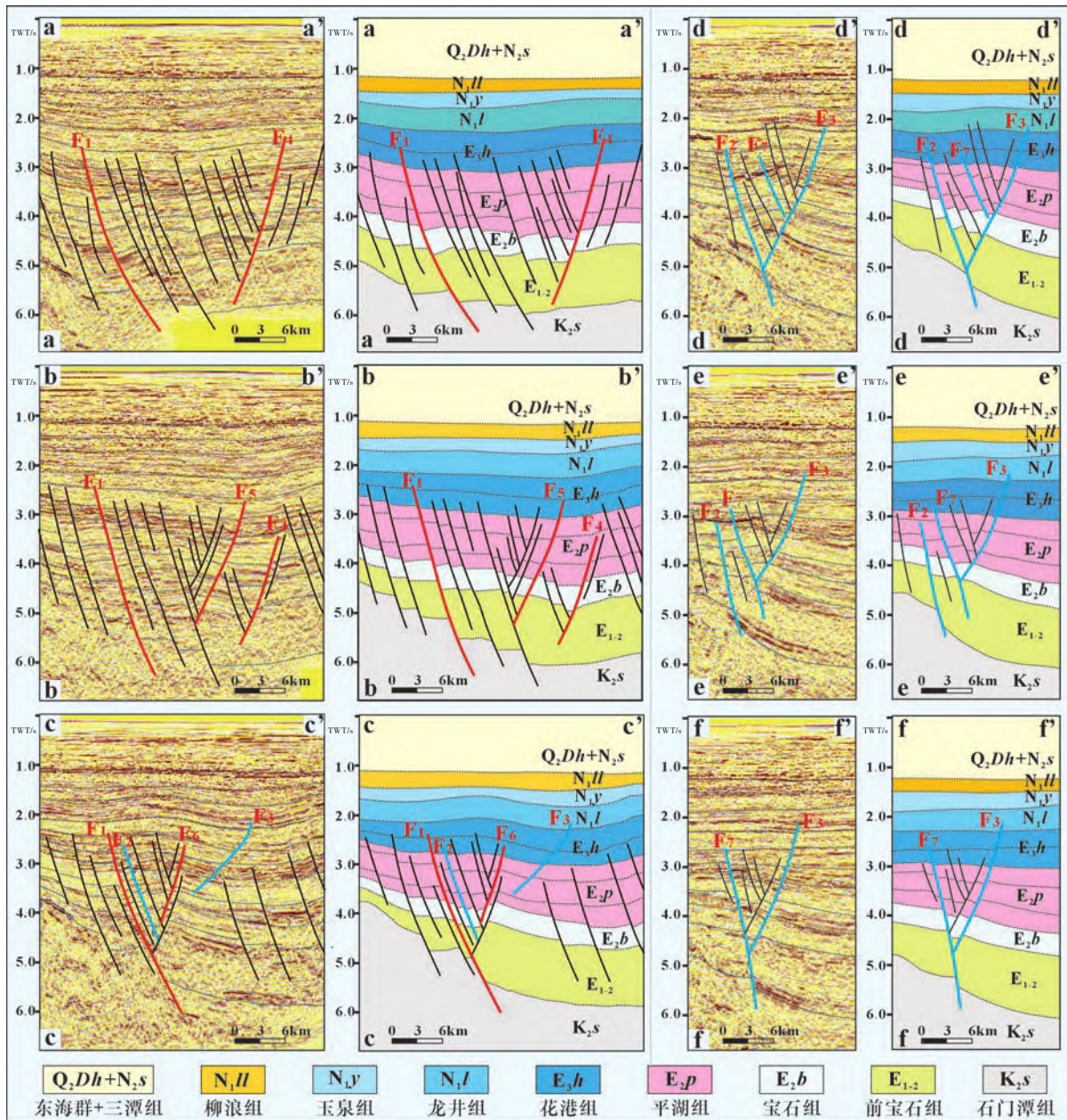


图4 研究区地震剖面特征(测线位置见图3)

Fig. 4 Characteristics of seismic sections in the study area (see Fig. 3 for the location of the sections)

拐点以南(图4d~图4f),接近拐点处, F_2 与 F_3 等断裂相互组合形成负花状构造,负花状构造的形成通常与张扭性应力环境有关。逐渐向东,主控断层由 F_2 向 F_7 过渡, F_7 性质与 F_2 相似,下切到基底,但是没有上切到 T_{20} 界面; F_3 作为反向主断裂,向上达到 T_{20} 界面,向下与 F_2 、 F_7 相交。浅层地层形成小规模背斜,是地层在挤压应力作用下发生褶皱变形的结果,对于油气聚集和储存具有重要意义。拐点两侧不同的构造特征反映,构造演化过程中,研究区在同一时期、不同部位受到不同应力作用的影响。

3 构造演化模式

3.1 区域构造作用

研究区南北两段在平面和剖面上均呈现出显著的构造差异,这种差异与基底断裂引发的走滑作用紧密相关。前人研究表明,差异伸展作用是造成盆地内同一构造单元构造特征出现明显分异的关键因素之一(江汝锋等,2020),同时也是导致研究区发生走滑作用的重要诱因。为明确凹陷内不同时期的差异性伸展作用,本文运用平衡剖面技术,通过确定钉线、恢复地层剥蚀量、去压实校正、消除断距4个步骤(何心月和李理,2019;刘文峰等,2024),对基底断裂向南和向北区域关键时期的伸展率和挤压率进行了精确计算,结果如图5和图6所示。自新生代以来,在断陷一拗陷期的各个地层沉积阶段,北部的伸展量均远大于南部。其中,在前宝石组沉积时期,伸展率达到最大值,南部为6.18%,北部高达11.21%,相对伸展率为5.03%;而在花港组沉积时期,伸展率降至最低,南部为0.83%,北部为3.49%,相对伸展率为2.66%。平湖组沉积时期处于断一拗转换阶段,区域伸展应力强度有所减弱,但由于北部测线位于凹陷沉降中心,南部测线位于凹陷南部,此时北部的伸展强度相较于南部仍然较大。因此,北部在平湖组沉积时期的伸展率与宝石组沉积时期相近,而南部宝石组沉积时期的伸展率则远高于平湖组沉积时期,这一差异使得研究区在平湖组沉积时期的相对伸展率达到最大值5.12%。进入反转期,北部挤压率为2.33%,南部挤压率为0.64%,相对挤压率为1.69%。综合分析上述数据,可以明确研究区自新生代以来,基

底断裂的上下盘始终处于相对伸展与相对挤压的环境中,且以相对伸展环境为主导,挤压作用的影响相对较小。

3.2 弧形断裂带发育模式

在太平洋板块和菲律宾海板块俯冲作用的影响下(李三忠等,2013;祁鹏等,2022),西湖凹陷在中、新生代时期区域应力强度及方向发生多次改变(周心怀等,2019;何新建等,2023)。西湖凹陷在中生代受NE-SW向的区域伸展应力的持续作用,发育一系列NW走向的深大基底断裂(余浪等,2023),如渔山—久米断裂带、舟山—国头断裂带等。孤山断裂作为舟山—国头断裂带的分支,表现为NW走向和NE倾向的正断层形态。新生代以来,差异伸展作用在孤山断裂上下盘体现得尤为明显。因此,在中生代基底断裂形成的基础上,根据区域构造背景、断裂发育特征和差异伸展作用,推测研究区新生代演化过程主要有两个阶段,即早期伸展发育阶段和晚期挤压沉降发育阶段。

古新世—早始新世时期(断陷期),受太平洋板块俯冲后撤影响,西湖凹陷所受伸展应力发生由NNW-SSE向到NW-SE向的转变(李三忠等,2013;张建培等,2014;张迎朝等,2023),在NW向基底断裂基础上发育NNE-NE向的正断层断裂体系,同向和反向的次级断裂开始在凹陷内出现,共同控制地层的沉积作用,如平湖大断裂、钓鱼岛隆褶带等新生界凹陷边界及主要断裂均于此时形成。这一时期,研究区北段的NNE-NE向断裂受平湖断裂带影响开始发育。随着区域应力方向转变,中生代发育的基底断裂张性作用减弱,扭动调节作用增强(王超等,2020)。孤山断裂上盘因此重新活化并缓慢沉降,结合上下盘差异强度的伸展作用,研究区在孤山断裂上盘形成滑脱伸展构造(张伯成等,2024),呈现出NWW走向的雁列式正断层排列(图7a)。中-晚始新世时期(断一拗转换时期),凹陷内NNE-NE向的正断层持续发育,研究区内NWW走向与北段NNE走向正断层发生硬连接作用形成弧形断裂带(图7b)。渐新世时期(拗陷期),随着区域伸展应力的衰弱,研究区内断裂数量急剧下降,弧形断裂断开,在浅层表现为分段生长的特征。

渐新世末—中新世时期(反转期),太平洋板

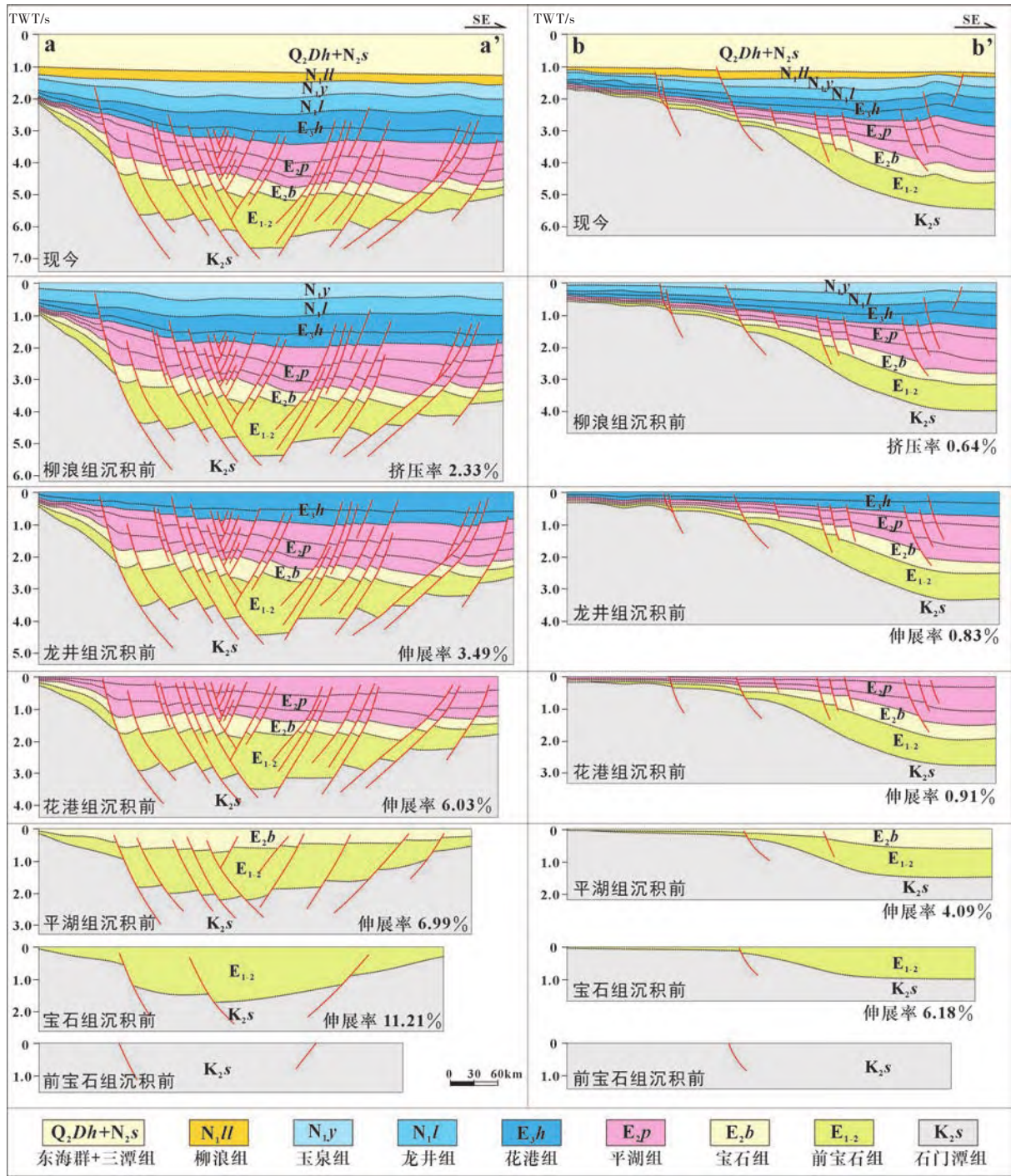


图 5 西湖凹陷西部斜坡南、北部平衡演化剖面对比图(剖面位置见图 1)

Fig. 5 Comparison of balanced cross-sections of the southern and northern parts of the western slope in the Xihu Sag (see Fig. 1 for the location of the sections)

块向东北方向挤出,受菲律宾海板块俯冲作用影响,东海陆架盆地进入挤压反转阶段(李三忠等, 2013; 张建培等, 2014; 张迎朝等, 2023)。在这一过程中,西湖凹陷是关键构造活动区域之一,且呈现出鲜明的空间差异特征,具体表现为北强

南弱、东强西弱的构造格局(索艳慧等, 2017)。研究区位于西部斜坡带与中部洼陷带的交界处,属于西湖凹陷的西南部,所处位置属于相对较弱的挤压环境(唐贤君等, 2024b),从图 5 和图 6 也可看出,西湖凹陷西部斜坡带北段挤压率明显大

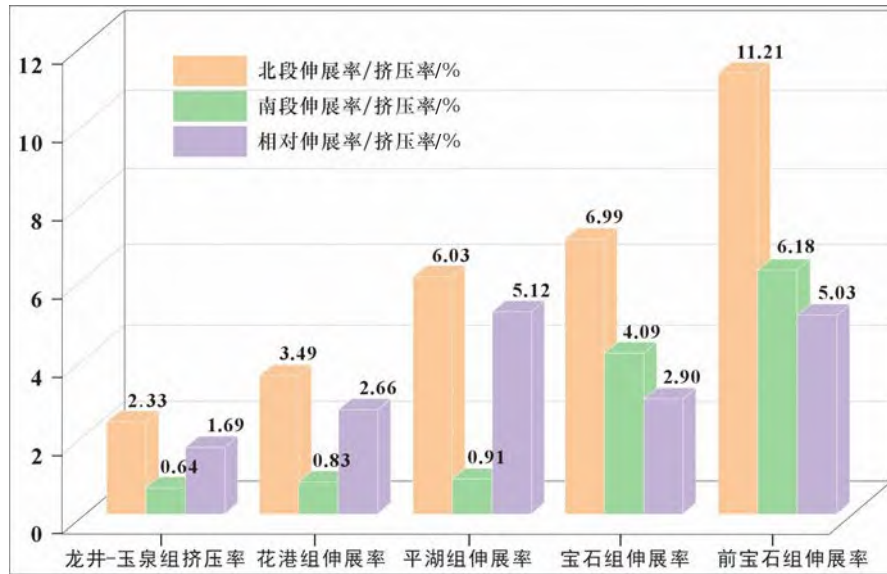


图 6 西湖凹陷西部斜坡南、北部伸展和挤压率分布图

Fig. 6 Distribution maps of extension and compression rates in the southern and northern parts of the western slope in the Xihu Sag

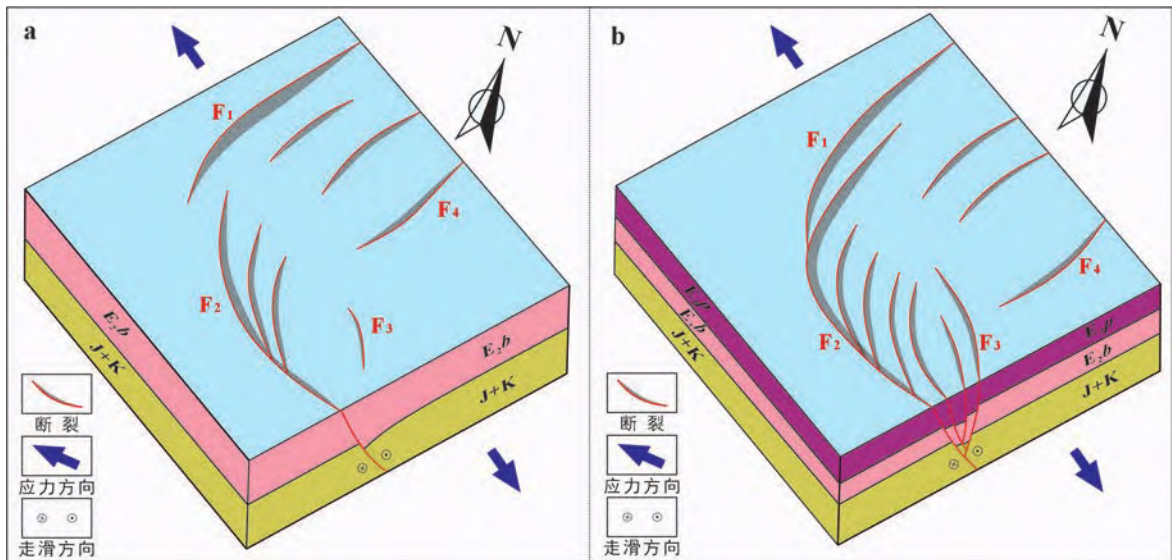


图 7 研究区早期伸展发育阶段构造演化模式

Fig. 7 Tectonic evolution model of the early extension development stage in the study area

于南段挤压率，在此时期研究区挤压应力较弱，地层缓慢变形，从地震剖面中可以观察到宽缓的地层隆起形态(图4)。中新世末—现今(弱挤压—稳定沉降时期)，区域构造活动趋于稳定，西湖凹陷所受挤压应力进一步减弱(王辉等，2025)，研究区内断层不再发育，地层稳定沉降。

4 实验设计

构造物理模拟砂箱实验作为构造演化正演的

重要手段之一，常用于模拟复杂的地壳变形过程和成因机制(Withjack et al., 2000; 于福生等, 2011; 闫兵等, 2023)。在复杂的地质环境中，晚期断裂的发育常常受到先存构造的控制(Morley et al., 2004)。

实验模型设计严格保证几何学、运动学和动力学相似(Yu and Koyi, 2016a)。几何学上，模型构建为一个60 cm(长)×35 cm(宽)×15 cm(高)的半封闭空间(图8)，四周由透明玻璃板和可移动挡板

组成，装置固定在水平钢板之上，基底铺设一块尺寸为35 cm×60 cm的橡胶布，两侧分别与挡板连接，确保在运动过程中模型受力均匀；在橡胶布之上，放置一块规模为60 cm(长)×35 cm(宽)的硬塑板，一侧与挡板C紧密相连来控制实验进程。研究区弧形断裂带起始于早古近系断陷期，现今宝石组顶面与平湖组顶面主断裂F₁和F₂夹角约为120°，断裂带拐点北段长度约22 km，拐点南段长度约14.5 km。因此，实验的模型边界条件设置为44 cm、120°、29 cm，与实际地质模型等比例相似。模型采用1：50 000的比例尺(1 cm砂层≈0.5 km真实地层)，并根据研究区内各地层厚度来等比例设置模拟实验中的砂层厚度(表1)。设计两组基底条件对照实验(模型I和模型II)(图8)来分析塑性层的影响。两组实验在基础物质条件完全一致的

前提下，通过改变基底滑脱层设置进行对比：模型I铺设2 cm厚砂层模拟纯脆性地层；模型II则沿预设的弧形边界先铺设1 cm厚硅胶层来增强滑脱作用，再覆盖1 cm砂层。

运动学上，实验过程精确模拟了研究区的构造演化期次和强度：分阶段模拟断陷期(阶段1~2，强伸展)、断—拗转换期(阶段3~5，同沉积响应)和拗陷期(阶段6~7，弱伸展)的伸展作用以及晚期的挤压作用，并严格控制了伸展率和挤压率，使其与实际地质过程相似(表1)。

动力学上，选用干燥石英砂(密度为2.3 g/cm³，内摩擦角为37°，内摩擦系数约为0.74)模拟脆性岩石的破裂行为，其变形符合库伦破裂准则(McClay and White, 1995; 张婧琪等, 2024); 硅胶(黏度为1.2×10⁴ Pa·s，密度约为0.93 g/cm³)具有

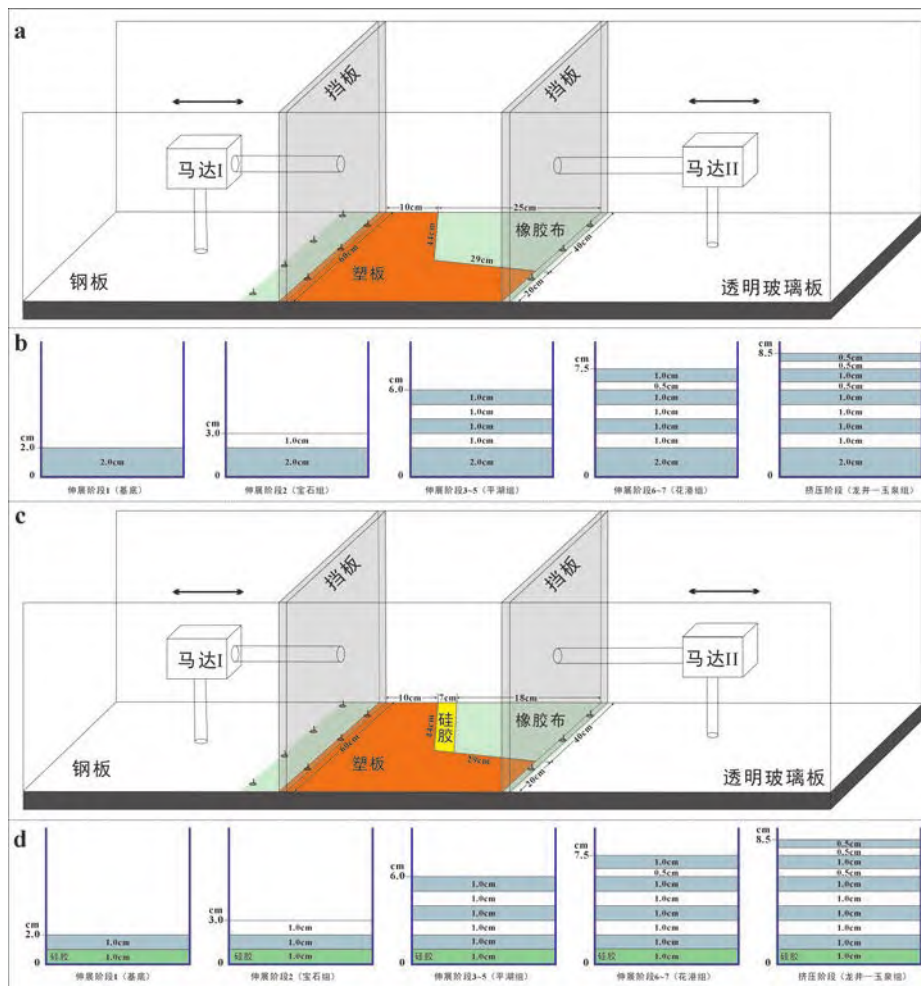


图8 构造物理模拟实验模型设计

a. 模型I几何学特征; b. 模型I砂层铺设序列; c. 模型II几何学特征; d. 模型II砂层铺设序列

Fig. 8 Design of the structural physical simulation experiment model

表 1 构造模拟实验运动学设置

Table 1 Kinematic settings for the structural analogue modelling

实验模型	变形阶段	总砂层厚度/cm	对比模拟地层	运动学特征	实际伸展/挤压率/%	模拟伸展/挤压率/%
I / II	9	8.5	玉泉组	挤压, 位移量 0.7 cm	1.69	1.72
I / II	8	8.0	龙井组			
I / II	7	7.5	花港组上段	伸展, 位移量 0.4 cm	2.66	2.51
I / II	6	6.5	花港组下段	伸展, 位移量 0.6 cm		
I / II	5	6.0	平湖组上段	伸展, 位移量 0.6 cm	5.12	5.01
I / II	4	5.0	平湖组中段	伸展, 位移量 0.6 cm		
I / II	3	4.0	平湖组下段	伸展, 位移量 0.7 cm		
I / II	2	3.0	宝石组	伸展, 位移量 1.1 cm	2.98	2.99
I / II	1	2.0	前宝石组	伸展, 位移量 1.8 cm	5.03	5.14

较好的连续变形特性, 因此用于模拟塑性层(Yu et al., 2016b; 张晓玉等, 2024)。实验结束后, 在模型顶部铺设 2 cm 砂层, 用于模拟第四系未经强烈构造活动的自然沉降地层, 并对模型进行浇水固结处理。静置 1 天后, 进行等间距切片, 并对典型剖面进行解释研究。

5 实验结果

本次物理模拟实验设置两个主要阶段, 实验中的伸展率和挤压率与实际地质情况高度契合, 早期伸展阶段运动速率为 0.2 cm/min, 累计运动时间为 29 min, 模拟新生代以来研究区从断陷期到拗陷期的构造演化过程; 晚期挤压阶段运动速率为 0.1 cm/min, 累计运动时间为 7 min, 模拟龙井运动时期的挤压反转过程。

5.1 模型 I 实验结果

平面上可见(图 9a~图 9g), 伸展阶段主要发育北段地堑组合、南段雁列式断层体系和整体的弧形断裂形态, f_1 、 f_3 组成的地堑组合在阶段 1~阶段 7 持续发育, 随着砂层的增厚, 地堑规模逐渐增大, 断层表现为同沉积特征; 在发育过程中, 地堑中发育次级断层也表现出从形成到消亡的过程。雁列式断层组合表现为, 阶段 1 时期 f_2 主控独立发育; 阶段 3~阶段 5 时期 $f_5 \sim f_8$ 收敛; 阶段 6~阶段 7 时期 f_7 、 f_8 反向发育。整体上, 南北段断层在阶段 1~阶段 2 时期独立发育, 阶段 3~阶段 5 时期连接发育, 可见弧形断裂形态, 阶段 6~阶段 7 时期再次独立发育。挤压阶段(图 9h)仅引起地层轻微隆起, 未见明显断层。

剖面上可见, 北段(图 9i~图 9l)以高角度正

断层为主, 受 f_1 与 f_3 控制发育, 表现为明显的地堑结构, 主断裂贯穿绿色标志层与基底, 次级断裂部分切穿深层; 南段(图 9m~图 9p)主断层 f_2 断面较陡, 与 f_5 等断层组成负花状构造, 具有走滑构造特征。

5.2 模型 II 实验结果

平面上可见(图 10a~图 10g), 伸展阶段主要发育北段半地堑—地堑组合、南段雁列式断层体系和整体的弧形断裂形态。半地堑—地堑组合表现为由阶段 1 时期 f_1 单断控制, 发育到阶段 2~阶段 7 时期的 f_1 和 f_3 双断控制发育的演化过程, f_1 南端在不同时期发生了形态上的弯曲, f_3 由独立发育转变为 $f_9 \sim f_{11}$ 等组成的西倾雁列断层体系; f_1 与 f_3 之间也在阶段 3 时期发育同向的雁列断层 $f_{12} \sim f_{14}$, 并在阶段 5 时期逐渐消亡, 反映该时期强烈的伸展作用。南段雁列式断层组合以 f_2 为主干, 发育帚状构造, $f_4 \sim f_8$ 等一系列断层呈弧形收敛于 f_2 。随着实验进行, 部分断层发生连接、合并或消失。整体上可见, 阶段 3~阶段 5 时期南北断层相互连接, 形成弧形断层形态, 阶段 6 时期断裂规模普遍减小, 断层再次分开或消失, 显示构造活动逐渐减弱。挤压阶段(图 10h)仅引起地层轻微隆起, 未见明显断层。

剖面上可见, 北段(图 10i~图 10l)断层 f_1 为高角度正断层, 依次与 f_9 、 f_3 共同控制北段发育, 这些断层向上延伸到绿色标志层, 向下可至基底; 可见一些次级断裂发育在较深地层, 呈地堑、Y 型、“入”字型及阶梯状等典型伸展构造。南段(图 10m~图 10p)断层 F_2 断面陡立, 贯穿绿色标志层与基底, 自西向东与断层 f_8 等组成负花状构造,

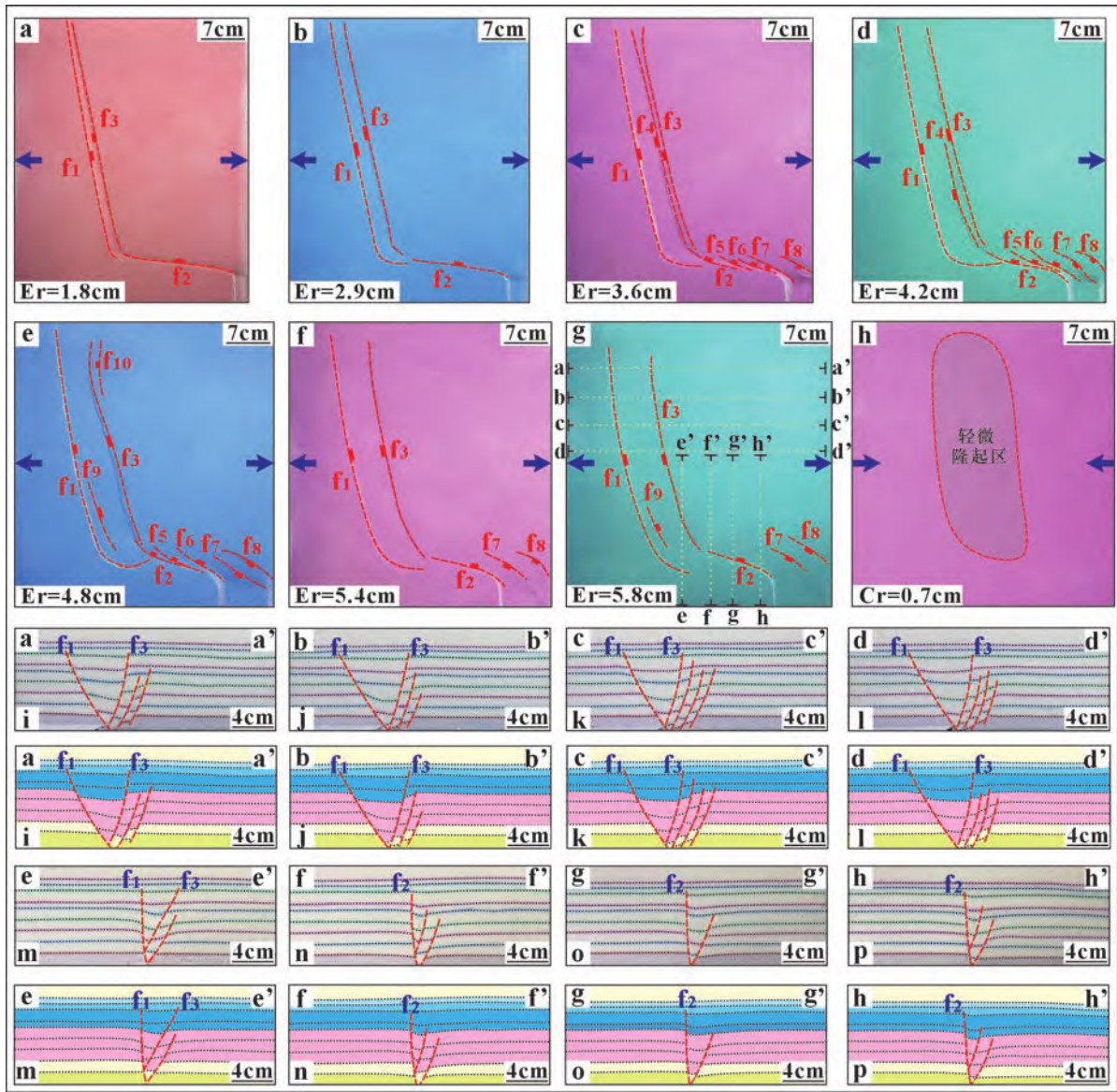


图9 模型 I 实验结果图
 a ~ h. 模拟平面结果; i ~ p. 实验切片(位置见图9g); Er. 伸展位移量; Cr. 压缩位移量
 Fig. 9 Experimental results for model I

表现为明显的走滑特征。

6 讨论

本次物理模拟实验揭示了研究区差异伸展的形成机制。实验过程及结果中，模型 I 与 II 在总体演化趋势上保持一致，但模型 II 在构造演化过程和变形特征上更接近实际地质情况(图 11)。阶段 1、阶段 2 对应古新世—早始新世时期，研究区北段 NNE-NE 向伸展断层和 NW 向走滑断层开始初始发育；实验中，模型 I 与 II 在平面上均体现出北段伸展断裂组合和南段走滑断裂组合分段生

长的南北分段特征，与地质模型的初始发育模式匹配。阶段 3 ~ 阶段 5 对应平湖组构造沉积过程，此时研究区处于断—拗转换时期，其南段 NW 走向与北段 NNE 走向断层发生硬连接作用，进而形成弧形断裂带；实验中，北段伸展断层延续性发育，有较好的继承性，南段的 NW 向断层开始增多；相比之下，模型 I 弧形断裂发育较少，模型 II 伸展强度更大，断层规模以及数量更多，而且可见明显的走滑断层与正断层硬连接形成的 NW-NNE 向弧形断裂。阶段 6、阶段 7 对应花港组构造沉积过程，此时研究区处于拗陷期，伸展

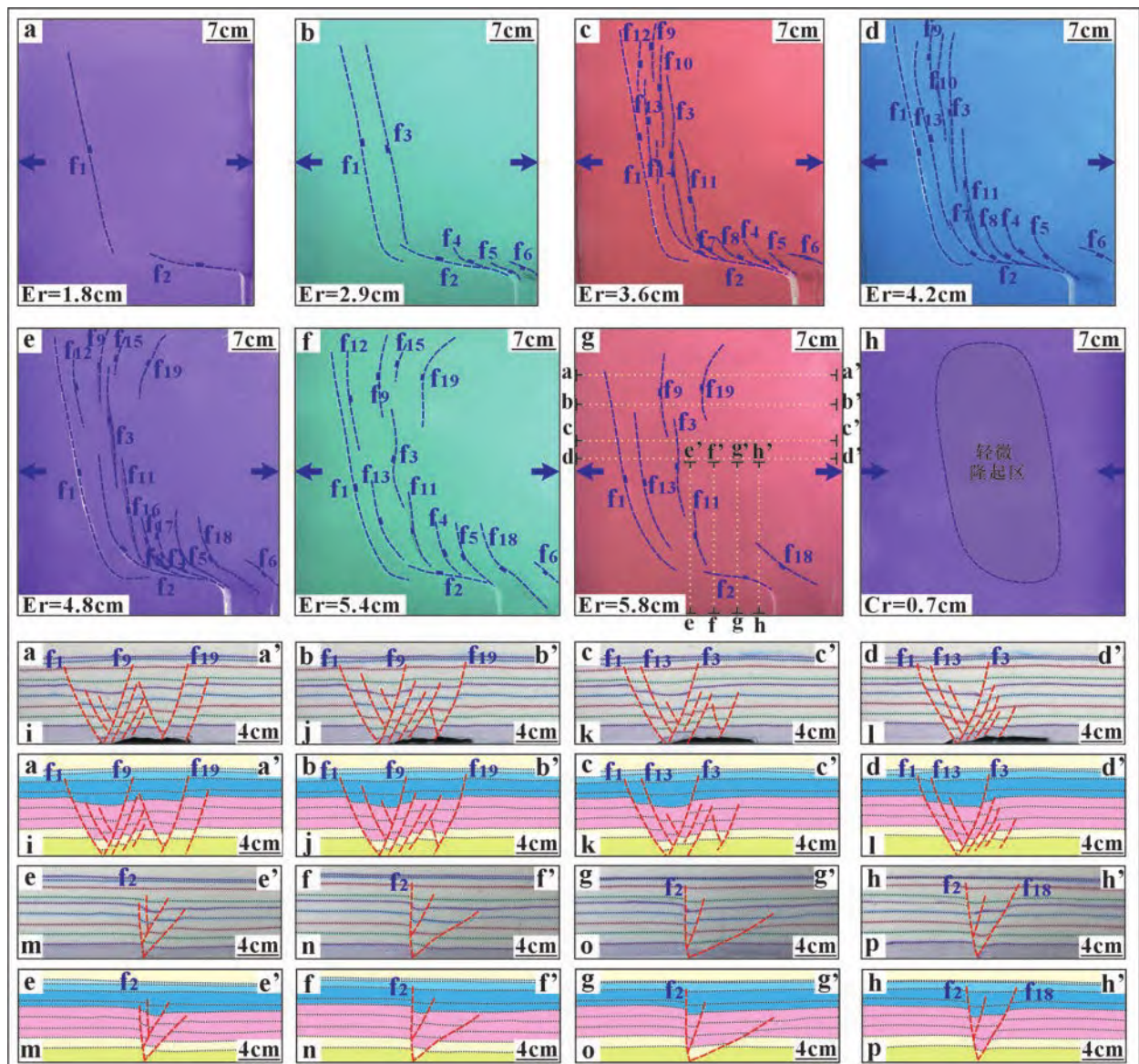


图 10 模型 II 实验结果图

a ~ h. 模拟平面结果；i ~ p. 实验切片(位置见图 10g)

Fig. 10 Experimental results for model II

应力逐渐减弱，断层发育规模逐渐减小，弧形断裂断开并开始分段生长。挤压阶段对应龙井—玉泉组沉积过程，研究区处于弱挤压环境，浅层地层在平剖面上均未见明显断层分布，仅见地层轻微隆起现象。总体而言，模型 II 相比于模型 I，在平面上发育更多的正断层组合，两侧主断裂形成的洼陷区域也更大，剖面上也发育更多 Y 型、“入”字型和阶梯状构造样式，且距离拐点越远，断裂数量和规模也越大。断距位移分布图(图 12)反映了断层在不同演化阶段活动强度的差异。结果表明，模型 II 中断层 f_1 在阶段 1 ~ 阶段 7 期间持

续受伸展应力场的控制，断距自深部向浅部呈现逐渐减小的趋势，与实际地质模型中断层 f_1 的同沉积发育特征基本一致。因此，模型 II 能更动态、真实地再现研究区差异伸展的演化过程，也体现塑性层在伸展构造变形中发挥重要的调节作用，其作用类似“润滑剂”(李涛等，2012)，既加速断裂生长，又增强断裂之间的硬连接和继承性，从而促进弧形断裂的形成，是构造演化过程中不可忽视的因素。

已有研究认为，天台斜坡的构造演化分为 5 个阶段(Zhang et al., 2023)，差异伸展作用主要由孤

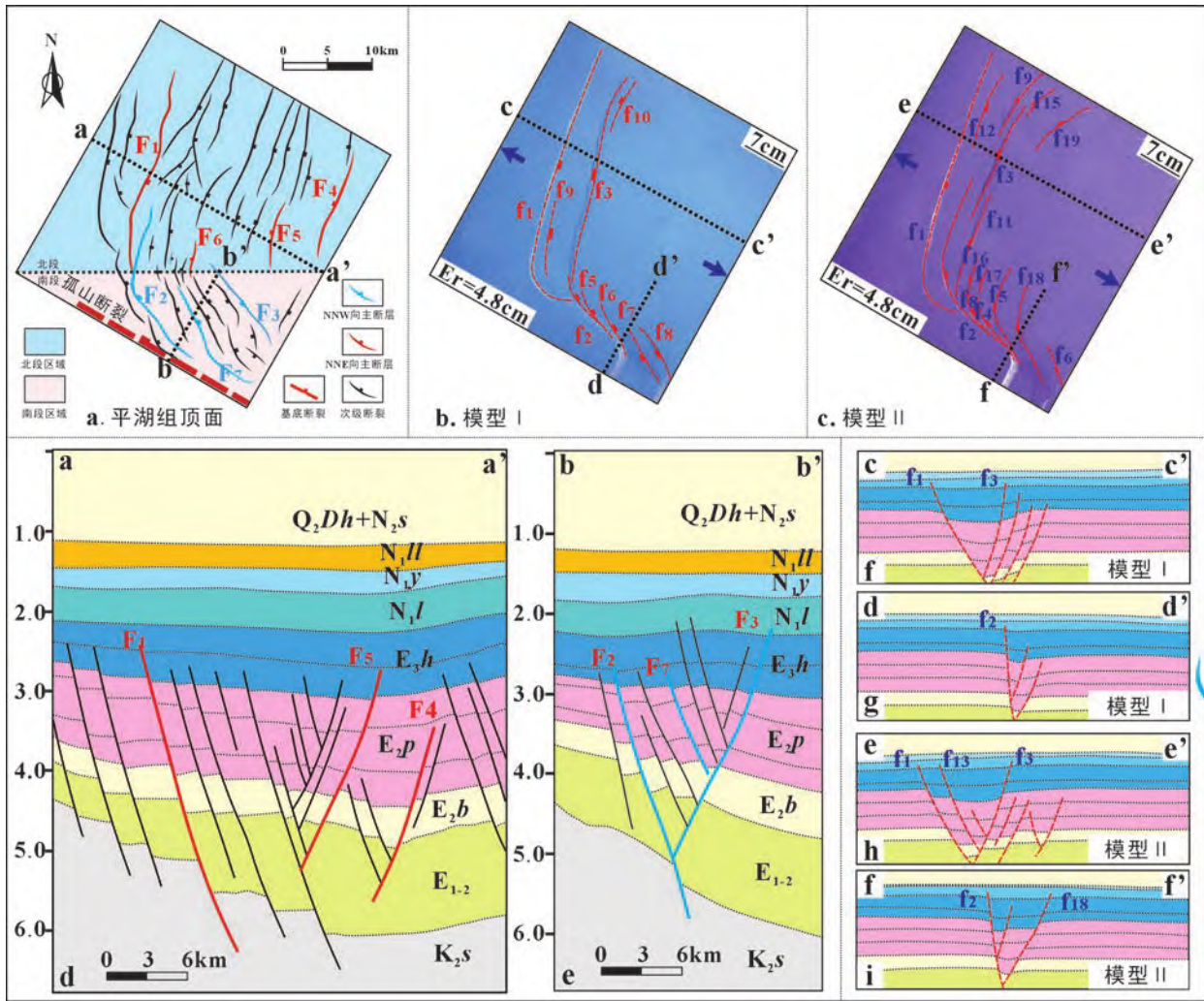


图 11 实验结果与实例对比图

Fig. 11 Comparison between experimental profile results and seismic interpretation of study area

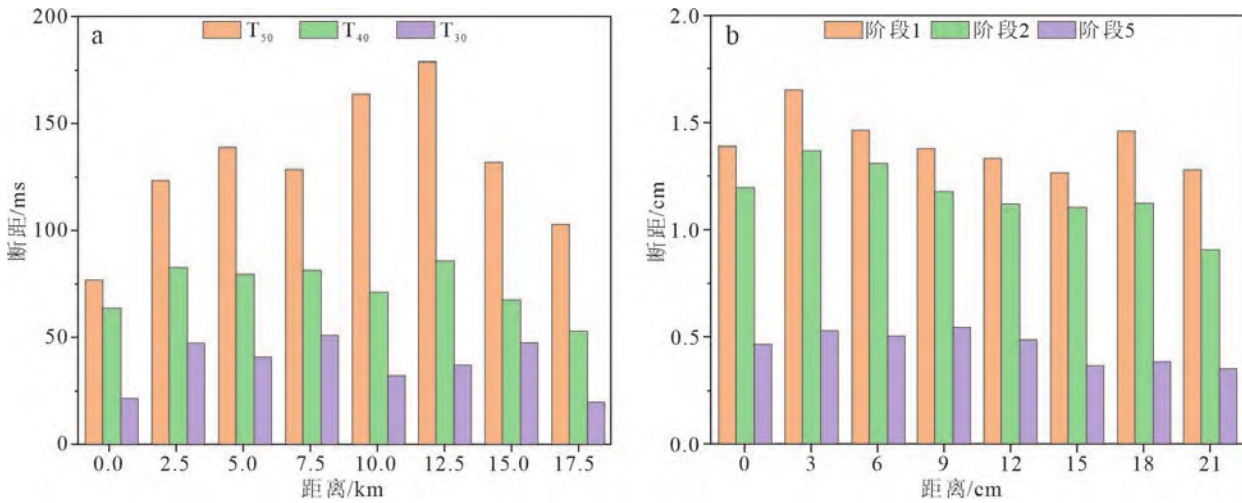


图 12 研究区与实验结果断距位移分布对比图

a. 研究区断层 F₁; b. 模型 II 实验结果断层 f₁

Fig. 12 The comparison diagram of the displacement distribution between the study area and the experimental results

山断裂等基底断裂的再活化作用导致(王超等, 2020; 余浪等, 2023; 张伯成等, 2024)。本文在此基础上, 将演化过程概括为4个主要阶段: 独立发育期—硬连接期—分段生长期—挤压反转期。这不仅更契合物理模拟的演化规律, 也与沉积充填阶段高度一致。实验结果也进一步揭示研究区南北段差异发育特征: 北段以基底主断裂的继承性活动为主导, 发育规模较大、控沉积作用强、继承性明显的正断层群; 而南段则受区域走滑应力背景控制, 形成雁列式走滑断裂, 其构造组合和控制机制与北段截然不同。实验中塑性层的分布与厚度差异直接影响断裂的生长速率、连接方式及弧形断裂的形成模式。这种差异演化不仅反映了伸展强度和方向的空间变化, 同时可以明确研究区差异伸展的成因机制并非单一的基底断裂继承性活动所能解释, 而是基底断裂再活化与塑性层调节作用共同驱动的结果。两者的耦合作用促进了区域弧形断裂的形成及伸展—走滑构造的发育, 这也为解释东海陆架盆地的伸展—走滑构造研究提供了新的证据。

7 结 论

通过对西湖凹陷西部斜坡弧形断裂带地震资料的精细解释和构造物理模拟对比分析, 得出如下结论:

(1) 研究区自北向南断裂走向呈NNE-NNW-NW向的转变特征, 以拐点为界, 具有北段发育NNE向伸展断裂组合和南段发育NNW-NW向走滑断层体系的南北分段特征; 垂向上, 断陷期、断—拗转换期、拗陷期和反转期界限分明, 具有垂向分层的构造特征。地震剖面上可见伸展应力作用时期发育的Y型、反Y型、“入”字型等构造样式。

(2) 研究区的构造演化受西湖凹陷区域构造应力背景影响, 新生代演化过程可划分为两个主要阶段: 早期伸展阶段发育在断陷—拗陷期, 此期间NNE向和NNW向断层发育“独立生长—硬连接—分段生长”的过程; 晚期挤压沉降阶段发育在反转—沉降期, 研究区断层活动基本停止, 仅表现为地层的轻微隆升变形。

(3) 对比实验显示模型Ⅱ在平剖面上的构造变形特征和断层的活动性特征均与实际地质模型

特征更加吻合, 能更真实地再现研究区差异伸展的演化过程, 也体现塑性层在伸展构造变形中发挥重要的调节作用, 从而明确研究区差异伸展的成因机制是基底断裂再活化与塑性层调节作用共同驱动的结果。

参 考 文 献

- 程琦, 刘彬, 郭晋威等. 2025 东海盆地丽水凹陷古元古代片麻岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其对古老基底属性的指示. *地质科学*, 60(4): 975-990.
- Cheng Qi, Liu Bin, Guo Jinwei et al. 2025. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Paleoproterozoic gneisses from the Lishui Sag of East China Sea Basin: Indication of ancient basement attributes. *Chinese Journal of Geology*, 60(4): 975-990.
- 郭令智, 施央申, 马瑞士. 1983. 西太平洋中、新生代活动大陆边缘和岛弧构造的形成及演化. *地质学报*, 57(1): 11-21.
- Guo Lingzhi, Shi Yangshen and Ma Ruishi. 1983. On the formation and evolution of the Mesozoic-Cenozoic active continental margin and island arc tectonics of the western Pacific Ocean. *Acta Geologica Sinica*, 57(1): 11-21.
- 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.
- He Xinjian, Tang Xianjun, Jiang Yiming 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.
- 何心月, 李理. 2019. 复杂伸展盆地区平衡剖面的恢复方法. *地质科学*, 54(4): 1210-1222.
- He Xinyue and Li Li. 2019. Method for restoring balanced evolution profile in complex extensional basin area. *Chinese Journal of Geology*, 54(4): 1210-1222.
- 江汝锋, 周家雄, 杨希冰等. 2020. 文昌B凹陷差异伸展—走滑机制及控藏作用研究. *地质学报*, 94(8): 2422-2432.
- Jiang Rufeng, Zhou Jiexiong, Yang Xibing et al. 2020. The different extension and strike-slip mechanism and its accumulation controlling effect in Wenchang B Sag. *Acta Geologica Sinica*, 94(8): 2422-2432.
- 李三忠, 余珊, 赵淑娟等. 2013. 东亚大陆边缘的板块重建与构造转换. *海洋地质与第四纪地质*, 33(3): 65-94.
- Li Sanzhong, Yu Shan, Zhao Shujuan et al. 2013. Tectonic transition and plate reconstructions of the East Asian continental margin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 33(3): 65-94.
- 李涛, 胡望水, 于水等. 2012. 西非被动大陆边缘重力滑脱构造体系下的塑性构造. *海洋地质与第四纪地质*, 32(3): 69-76.
- Li Tao, Hu Wangshui, Yu Shui et al. 2012. Ductile structures in

- gravitational decollement structures system at passive continental margin of West Africa. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 32(3): 69-76.
- 刘文峰, 司崇禄, 王宇涵等. 2024. 二维定量平衡剖面技术在雄安牛驼镇地区的应用. *复杂油气藏*, 17(3): 281-287.
- Liu Wenfeng, Si Chonglu, Wang Yuhan et al. 2024. Application of 2D quantitative balanced profile technology in the Niutuozhen area of Xiong'an. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 17(3): 281-287.
- 刘亚茹, 高顺莉, 周平等. 2020. 西湖凹陷转换断裂发育特征及其油气地质意义. *海洋地质前沿*, 36(10): 42-49.
- Liu Yaru, Gao Shunli, Zhou Ping et al. 2020. Characteristics of transform faults in the Xihu Sag and their significance to hydrocarbon accumulation. *Marine Geology Frontiers*, 36(10): 42-49.
- 祁鹏, 郭刚, 崔敏等. 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 Peng, Guo Gang, Cui Min et al. 2022. 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, 曹现志等. 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 Yanhui, Li Sanzhong, Cao Xianzhi 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.
- 唐贤君, 李宁, 黄晓松等. 2024a. 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.
- Tang Xianjun, Li Ning, Huang Xiaosong et al. 2024a. 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.
- 唐贤君, 钟荣全, 陈永军等. 2024b. 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 Xianjun, Zhong Rongquan, Chen Yongjun et al. 2024b. 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.
- 王超, 唐贤君, 蒋一鸣等. 2020. 西湖凹陷天台斜坡带北部构造变换带特征及油气地质意义. *海洋地质与第四纪地质*, 40(6): 93-105.
- Wang Chao, Tang Xianjun, Jiang Yiming et al. 2020. Characteristics of the structural transfer zone of northern Tiantai slope in Xihu Sag of the East China Sea Basin and their petroleum geological significances. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 40(6): 93-105.
- 王光增, 李三忠, 索艳慧等. 2019. 转换型微板块类型、成因及其大地构造启示. *大地构造与成矿学*, 43(4): 700-714.
- Wang Guangzeng, Li Sanzhong, Suo Yanhui et al. 2019. Transform-derived microplates: Classification, mechanism and tectonic significance. *Geotectonica et Metallogenia*, 43(4): 700-714.
- 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.
- Wang Hui, Qin Lanzhi, Xu Jingqi 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.
- 闫兵, 贾东, 赖文等. 2023. 走滑断层相关源—汇体系演化的砂箱物理模拟实验. *地质学报*, 97(9): 3043-3055.
- Yan Bing, Jia Dong, Lai Wen et al. 2023. Sandbox modeling on development of source-to-sink system along strike-slip fault. *Acta Geologica Sinica*, 97(9): 3043-3055.
- 杨潘, 李磊, 陈忠云等. 2025. 东海盆地西湖凹陷平北地区平湖组复杂地貌与河潮交互作用及沉积响应. *地质论评*, 71(4): 1265-1276.
- Yang Pan, Li Lei, Chen Zhongyun et al. 2025. Complex geomorphology and fluvio-tidal interaction and sedimentary response of the Pinghu Formation in Pingbei area, the Xihu Sag, East China Sea Basin. *Geological Review*, 71(4): 1265-1276.
- 于福生, 王彦华, 李学良等. 2011. 柴达木盆地狮子沟—油砂山构造带变形特征及成因模拟. *大地构造与成矿学*, 35(2): 207-215.
- Yu Fusheng, Wang Yanhua, Li Xueliang et al. 2011. Deformation characteristics and genesis simulation of the Shizigou-Youshashan structural belt in Qaidamu Basin. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(2): 207-215.
- 余浪, 余一欣, 蒋一鸣等. 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 Lang, Yu Yixin, Jiang Yiming et al. 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.
- Zhang Bocheng, Liu Jiang, Jiao Shebao 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.
- 张建培. 2013. 东海西湖凹陷平湖斜坡带断裂系统特征及成因机制探讨. *地质科学*, 48(1): 291-303.
- Zhang Jianpei. 2013. Fault system and its genetic mechanism in the Pinghu slope of the Xihu Sag in the East China Sea shelf basin. *Chinese Journal of Geology*, 48(1): 291-303.
- 张建培, 张田, 唐贤君. 2014. 东海陆架盆地类型及其形成的动力学环境. *地质学报*, 88(11): 2033-2043.
- Zhang Jianpei, Zhang Tian and Tang Xianjun. 2014. Basin type and dynamic environment in the East China Sea shelf basin. *Acta Geologica Sinica*, 88(11): 2033-2043.
- 张婧琪, 于福生, 庞福基等. 2024. 准噶尔盆地中部永进地区走滑

- 断裂发育特征及成因物理模拟. 地质学报, 98(2): 397-420.
- Zhang Jingqi, Yu Fusheng, Pang Fuji et al. 2024. Development characteristics and analogue modelling of strike-slip faults in the Yongjin area, central Junggar Basin. *Acta Geologica Sinica*, 98(2): 397-420.
- 张晓玉, 李江海, 王利杰等. 2024. 志留系泥页岩滑脱层对大巴山前陆冲断带构造样式的影响——基于物理模拟研究. 大地构造与成矿学, 48(4): 698-708.
- Zhang Xiaoyu, Li Jianghai, Wang Lijie et al. 2024. Influence of Silurian shale detachment on the structural style of the Dabashan foreland thrust belt: Based on physical simulation. *Geotectonica et Metallogenia*, 48(4): 698-708.
- 张迎朝, 邹玮, 陈忠云等. 2023. 东海陆架盆地西湖凹陷中央反转构造带古近系花港组气藏“先汇后聚”机制及地质意义. 石油与天然气地质, 44(5): 1256-1269.
- Zhang Yingzhao, Zou Wei, Chen Zhongyun et al. 2023. The mechanism of “convergence ahead of accumulation” and its geological significance for gas reservoirs in Paleogene Huagang Formation across the central inverted structural zone of Xihu Depression, East China Sea shelf basin. *Oil & Gas Geology*, 44(5): 1256-1269.
- 张迎朝, 陈忠云, 刁慧等. 2024. 东海盆地X凹陷油气成藏模式与勘探突破. 中国海上油气, 36(2): 1-12.
- Zhang Yingzhao, Chen Zhongyun, Diao Hui et al. 2024. Reservoir-forming models and exploration breakthroughs in X Sag of East China Sea Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 36(2): 1-12.
- 张迎朝, 蒋一鸣, 刁慧等. 2025. 东海盆地西湖凹陷低渗—特低渗天然气勘探开发实践、地质新认识及资源潜力. 石油学报, 46(6): 1074-1088.
- Zhang Yingzhao, Jiang Yiming, Diao Hui et al. 2025. Exploration and development practice, new geological understanding and resource potential of low to ultra-low permeability gas reservoirs in Xihu Sag of East China Sea Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 46(6): 1074-1088.
- 赵峰梅, 李三忠, 戴黎明等. 2010. 东海陆架盆地伸展率和压缩率及构造跃迁. 地质科学, 45(4): 1111-1124.
- Zhao Fengmei, Li Sanzhong, Dai Liming et al. 2010. Extensional and compressive ratios from East China Sea shelf basin and their structural jumping. *Chinese Journal of Geology*, 45(4): 1111-1124.
- 周心怀. 2020. 西湖凹陷地质认识创新与油气勘探领域突破. 中国海上油气, 32(1): 1-12.
- Zhou Xinhuai. 2020. Geological understanding and innovation in Xihu Sag and breakthroughs in oil and gas exploration. *China Offshore Oil and Gas*, 32(1): 1-12.
- 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.
- Zhou Xinhuai, Jiang Yiming and Tang Xianjun. 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.
- Benesh N P, Plesch A and Shaw J H. 2014. Geometry, kinematics, and displacement characteristics of tear-fault systems: An example from the deep-water Niger delta. *AAPG Bulletin*, 98(3): 465-482. DOI: 10.1306/06251311013.
- Jiang Y M, Tang X J, Fu X W et al. 2025. Differential geological responses and geodynamic mechanisms of major Cenozoic tectonic movements in the East China Sea shelf basin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 284: 106569. DOI: 10.1016/j.jseas.2025.106569.
- McClay K R and White M J. 1995. Analogue modelling of orthogonal and oblique rifting. *Marine and Petroleum Geology*, 12(2): 137-151. DOI: 10.1016/0264-8172(95)92835-K.
- Morley C K, Haranya C, Phoosongsee W et al. 2004. Activation of rift oblique and rift parallel pre-existing fabrics during extension and their effect on deformation style: Examples from the rifts of Thailand. *Journal of Structural Geology*, 26(10): 1803-1829. DOI: 10.1016/j.jsg.2004.02.014.
- Tian A Q, Liu C L, Liu C X et al. 2025. Origin of the Cenozoic faults in the “B” structure of the central inversion belt in the northern part of the Xihu Sag, East China Sea Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 178: 107429. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2025.107429.
- Withjack M O and Callaway S. 2000. Active normal faulting beneath a salt layer: An experimental study of deformation patterns in the cover sequence. *AAPG Bulletin*, 84(5): 627-651. DOI: 10.1306/C9EBCE73-1735-11D7-8645000102C1865D.
- Yang Y Z, Huang Z L, Pan Y S et al. 2024. Hydrocarbon accumulation process and reservoir-forming models of structure A in the central inversion tectonic belt of the Xihu Depression, East China Sea Basin. *Natural Gas Industry B*, 11(4): 341-356. DOI: 10.1016/j.ngib.2024.07.001.
- Yu F S and Koyi H. 2016a. Cenozoic tectonic model of the Bohai Bay Basin in China. *Geological Magazine*, 153(5-6): 866-886. DOI: 10.1017/S0016756816000492.
- Yu F S, Koyi H and Zhang X T. 2016b. Intersection patterns of normal faults in the Lufeng Sag of Pearl River Mouth Basin, China: Insights from 4D physical simulation. *Journal of Structural Geology*, 93: 67-90. DOI: 10.1016/j.jsg.2016.10.007.
- Zhang X Q, Zhang G C, Jiang Y M et al. 2023. The control of curved faults on structural trap formation: Tiantai slope belt, Xihu Sag, East China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 156: 106464. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2023.106464.
- Zhu W L, Zhong K, Fu X W et al. 2019. The formation and evolution of the East China Sea shelf basin: A new view. *Earth-Science Reviews*, 190: 89-111. DOI: 10.1016/j.earscirev.2018.12.009.