宋俊兰, 庞玉茂, 杨传胜, 等. 东海陆架盆地长江凹陷构造变形过程及其动力学机制[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(12): 1-10. SONG Junlan, PANG Yumao, YANG Chuansheng, et al. Structural deformation and its dynamic mechanism of the Changjiang Sag in the East China Sea Shelf Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(12): 1-10.

东海陆架盆地长江凹陷构造变形过程 及其动力学机制

宋俊兰^{1,2,3}, 庞玉茂^{1,2}, 杨传胜^{2,3*}, 尚鲁宁^{2,3}, 杨艳秋^{2,3}, 孙晶^{2,3} (1山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛 266590; ; 2 青岛海洋科技中心海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237; 3 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237)

摘 要:长江凹陷位于东海陆架盆地北部,其构造发育特征记录了晚白垩世以来盆地形成演 化和板块汇聚过程的关键信息,但是目前对其构造变形和动力学机制的研究较为薄弱。本文 通过多道地震剖面的精细解释,分析了长江凹陷构造变形特征及时空差异,据此探讨了其构 造演化及变形过程的动力学机制。结果表明,长江凹陷具有"三凹两凸"的地质结构特征,发 育中生界与新生界两大构造层,以新生界为主,缺失渐新统;凹陷整体受到 NE 向、近 EW 向 和 NW 向 3 组断裂体系的控制,局部沿断裂发育岩浆岩侵入体。长江凹陷为典型双断结构, 地层受边界控凹断层控制呈现东厚西薄特征。新生代以来,受太平洋板块、印度板块和菲律 宾海板块多期俯冲汇聚及弧后拉张等过程影响,长江凹陷构造体制发生多次转变,同时发育 伸展构造和反转构造,空间叠置关系复杂,并且后者具有自西向东迁移的特征。中新世以来, 由于盆地内中央凸起带的缓冲作用,凹陷内地层变形程度减弱。基于构造变形特征,可将长 江凹陷构造演化可分为 5 个阶段:晚白垩——早古新世伸展断陷、晚古新——早始新世挤压反转、 始新世坳陷发育、渐新世构造抬升和中新世以来的整体拗陷稳定沉降。本研究能够为盆地构 造变形及区域构造演化研究提供参考。

关键词:构造变形;构造演化;动力学机制;长江凹陷;东海陆架盆地 中图分类号:P736;P738 文献标识码:A DOI:10.16028/j.1009-2722.2024.048

0 引言

东海陆架盆地位于欧亚板块东南缘,受中生 代以来古太平洋板块、太平洋板块、印度板块、菲 律宾海板块等的俯冲碰撞影响,构造演化过程复

收稿日期: 2024-02-29

资助项目: 崂山实验室科技创新项目(LSKJ202203401);山东省重大基础研 究项目(ZR2021ZD09);中国地质调查局项目(DD20221723, DD20230317, DD20243116, DD20242758)

第一作者: 宋俊兰(2000—),男,在读硕士,主要从事海洋油气地震资料 解释与盆地构造演化方面的研究工作. E-mail: 1941822911@qq.com

*通讯作者:杨传胜(1984—),男,博士,正高级工程师,主要从事海洋油 气资源调查评价与深部动力学机制方面的研究工作.E-mail:ychuansheng@mail.cgs.gov.cn 杂^[1-6]。长江凹陷作为东海陆架盆地内的重要构 造单元之一,记录了盆地晚白垩世以来的构造变 形、动力学过程等关键信息,其构造相关问题的研 究有利于更全面地认识东海陆架盆地的构造演化 过程。

早在 1974年,东海陆架盆地内的区域地质调查工作逐步展开。1988年,随着长江凹陷内普查井的钻探实施,初步开展了区内有利含油气区带的预测^[7-8]。之后,尤其 2010年以来,长江凹陷内开展了大量的二维地震调查工作,地质地球物理数据的不断积累,极大促进了凹陷内相关地质问题的研究和 深入探讨。

前人主要对长江凹陷油气资源潜力进行了研究,取得了一定的认识^[9-12],而凹陷内的构造变形研究相对较少,制约了凹陷构造演化与油气成藏

运移间耦合关系的分析。在东海陆架盆地的构造 演化和反转构造研究中,对西次凹的典型反转构 造进行了探讨^[13-18];也有学者对长江凹陷内的反 转构造进行研究^[19],但缺乏凹陷反转构造的迁移 规律研究,限制了对凹陷动力学机制的认识。长 江凹陷的构造变形特征、动力学机制是凹陷当前 研究中的薄弱环节,因此需要对这些方面进行研 究探讨。

针对上述问题,本文在长江凹陷区域二维多道 地震资料解释基础上,结合前人的研究成果,对凹 陷内的构造变形特征、反转构造迁移规律进行研究。 通过对构造变形的精细分析,梳理了晚白垩世以来 的构造演化过程,并探讨了其动力学机制。

1 地质背景

晚三叠世期间,古太平洋板块向欧亚板块俯冲, 印支构造运动强烈,华北板块与华南板块拼合,使 得古秦岭洋闭合,东部大陆雏形基本形成^[20]。东海 陆架盆地构造演化始于晚三叠世,经历了挤压拗陷、 伸展断陷、弧后伸展断陷、弧后伸展岛弧分裂等 4 个构造演化阶段^[21-23]。长江凹陷的形成演化大致 始于晚白垩世,主要受控于新生代以来的各期构造 运动。

东海陆架盆地整体位于浙江省、福建省、上海 市以东,呈 NNE 向发育^[24],西部为浙闽隆起,东部 为钓鱼岛隆褶带和冲绳海槽。东海陆架盆地自西 向东依次发育西部凹陷带、中部凸起带和东部凹陷 带,整体呈现"两凹一凸"的构造格局。长江凹陷位 于西部凹陷带的北部(图 1)。

东海陆架盆地地层整体表现出"东厚西薄"特征,中生代时期南部地层向东逐渐加厚且沉降中 心向东转移,北部地层遭到严重剥蚀并缺失^[25];新 生代时期,盆地内的沉降中心位于基隆凹陷,地层 在全区发育,由于构造运动活跃,部分地层缺失。 盆地内发育 NE—NNE、NW 和 EW 向 3 组断裂体 系,自西向东,断裂活动变强。断裂体系发育对盆 地构造演化具有控制作用,其中,NE—NNE 向断裂 分布最多,整体表现出自南向北分布由密变疏,呈 帚状^[26];EW 向断裂发育较晚,分布较少。随着板 块间相互作用逐渐增强,岩浆活动逐渐增强,主要 集中在盆地的构造活动活跃区内,进而盆地内岩浆 岩多沿断裂发育^[27],为盆地内构造变形的重要影响 因素。





2 构造变形与岩浆岩发育

2.1 地层发育

晚白垩世以来,长江凹陷发育于前中生界基底 之上,早期主要为伸展断陷,以范围较小的陆相沉 积为主^[28]。经历了新生代的挤压反转后,凹陷内形 成了垂向上双重断陷叠置的特征,地层整体具有 "东厚西薄"特征。凹陷内发育中生界和新生界两 大构造层,整体呈 NEE 向展布,沉降中心位于东次 凹,凹陷内最大沉积厚度为 7000 多米,往西厚度逐 渐减薄,埋深变浅。凹陷内主要发育新生界,厚度 大,而中生界厚度相对较小(表 1、图 2)。中生界顶 界一般埋深在 1 700 m 以上,遭到过严重的抬升剥 蚀,仅残留上白垩统石门潭组。新生界广泛发育, 仅渐新统发生缺失,而渐新统主要发育在东部西湖 凹陷和基隆凹陷内。新近纪以来,全区地层稳定 沉降。

2.2 构造变形特征

2.2.1 凹陷结构

长江凹陷具有"三凹两凸"的地质结构特征 (图 2)。3个次凹内均发育不同程度的地层剥蚀和 超覆构造,凸起部位发育较稳定。西次凹受断裂活 动影响强烈,地震剖面上见有"Y字型"断裂发育。

系	统	组	反射层		构造运动	凹陷演化	构造层
第四系	全新统	东海组			- 龙井运动 -	稳定沉积	新生界 构造层
	更新统		т0				
新近系	上新统	三潭组	T ¹				
	中新统	柳浪组	12				
		玉泉组					
		龙井组					
古近系	渐新统				玉泉运动	抬升	
	始新统	平湖组	13			拗陷	
		瓯江组	T 0		- 瓯江运动	挤压反转	
	古新统	明月峰组	14				
		灵峰组				伸展断陷	
		月桂峰组					
白垩系	上白垩统	石门潭组	т_5				中生界 构造层
前中生界			Ig]		

表1 长江凹陷地层划分及构造演化过程简表

Table 1 Stratigraphic division and tectonic evolution of the Changjiang Sag

注:此表源自文献[29]。



Fig.2 Seismic profile interpretation of Line 1 in the Changjiang Sag

中次凹整体呈现出明显的拗陷特征,中部地层由于 挤压向上凸起。东次凹内正断层发育,靠近凸起处 断距较大(图 2、3)。

2.2.2 断裂展布

长江凹陷主要发育有 NE、近 EW 和 NW 向 3 组断裂,与盆地内断裂走向一致。其中, NE 向断裂 是长江凹陷内的主控断裂,规模较大。受 NE 向断 裂影响,西次凹沿 NW 向拉张断陷,在后期出现反 转构造;中次凹内同样明显,东侧断裂上下盘出现 较大错动,而中间的断裂近乎切穿古近纪地层;东 次凹中断裂切至新近纪地层,正断层发育(图 2、3)。 断裂发育与凹陷演化相耦合,先拉张后挤压,与凹 陷内的构造变形特征相符。

近 EW 向断裂在挤压作用下产生, 对凹陷的影 响较小, 是中次凹的主控断裂, 呈剪切性质, 未见次 级断裂在中次凹发育(图 2、3)。NW 向断裂主要控 制了东次凹的发育, 在新生代时期较为活跃, 沿 SE 向断陷明显^[16], 且发育少量次级断裂。





基于地震剖面解释可见,断裂主要在古新世时 期活动,控制了凹陷内地层的沉积,多为晚中生代 时期活动断裂活动的继承。整体来看,断裂发育具 有从西向东,由老变新的特征^[20]。

2.2.3 构造样式

中一新生代以来,长江凹陷经历了伸展与挤压 构造环境,以及二者之间的转换,在不同地质时期 与构造应力场下,主要发育有伸展与反转2种构造 样式,共发现3种构造组合,相对较为简单(图4)。

晚中生代以来,西部凹陷带内拉张作用强烈, 长江凹陷即为典型代表且独具特色。古新世末— 始新世早期,受瓯江运动影响,长江凹陷内前期形 成的伸展构造受挤压进而反转变形,形成古新统正 反转背斜。反转背斜的走向与主断裂走向平行,背 斜顶部遭受剥蚀(图 4a),其中西次凹的美人峰构造 为区内典型反转构造。此外,反转背斜左侧发育相 伴生的向斜,该向斜同样受断裂发育的控制(图 4a)。

受燕山晚期和喜山期构造运动影响,3个次凹 内均发育地层尖灭和超覆构造(图4)。地堑与地垒 构造在中次凹中较发育,主要是在断裂受到挤压与 伸展作用的基础上产生的(图4b)。同时,中次凹地 层轻微反转,而背斜基本上没有发育。受瓯江运动 影响,东次凹内地层褶皱变形并轻微反转,多米诺 式正断层发育,岩浆岩向上侵入(图4c、4d)。

2.3 岩浆岩发育

长江凹陷内的岩浆岩具有多期次发育的特点, 主要为燕山期、喜山期2个期次的侵入,在燕山晚







期与喜山早一中期岩浆活动最为强烈^[1,17,30-34]。岩 浆岩在长江凹陷东次凹见有发育,沿着断裂向上, 侵入至始新统中,而在测线1中未见有岩浆岩发育。 岩浆岩的展布与断裂的展布具有较好的一致性 (图 3、4d)。

新生代时期,太平洋板块向欧亚板块俯冲碰撞, 使得东海陆架盆地岩浆活动活跃,而底部的地幔层 脱水可能是造成岩浆侵入的原因^[27]。岩浆侵入是 造成地层变形、断裂发育和褶皱形成的重要动力学 原因。

3 讨论

3.1 构造演化特征

晚中生代以来,东亚陆缘板块间作用十分强烈, 东海陆架盆地内构造活动随之更加频繁。长江凹 陷经历了雁荡运动、瓯江运动、玉泉运动、龙井运 动等多期构造活动,塑造了凹陷内的基本构造格局。 受上述构造运动影响,凹陷演化经历了伸展-挤压构 造环境及其转换,地层见有超覆、抬升剥蚀等现象。 综合凹陷构造变形与前人研究成果,长江凹陷的构 造演化可划分为5个阶段。

(1)晚白垩—早古新世伸展断陷阶段

随着太平洋板块不断以近 NNW 向高角度向欧 亚板块俯冲^[14-15,19],在早古新世,凹陷发生雁荡运动, 断陷活动增强。长江凹陷内形成了主要以湖相、河 流相等沉积相^[35]。凹陷基底在构造应力场下发生 张扭性断裂,继续向东伸展。同时凹陷内受到自东 向西海侵的影响,沉积范围扩大,长江凹陷为古新 世时期的断陷中心之一^[30]。

(2)晚古新一早始新世挤压反转阶段 瓯江运动作用下,凹陷内形成了古新统与始新 统间的角度不整合。同时,凹陷发生了由伸展向挤 压的构造环境转变,但转变前后的沉积方式没有较 大变化,仍以河流相沉积为主^[35]。可见,晚古新世 时期,长江凹陷整体处于构造反转阶段。

(3) 始新世拗陷发育阶段

随着太平洋板块的俯冲后撤,西部凹陷带出现 大规模的岩浆活动,之后长江凹陷发生广泛的热沉 积,凹陷在中一晚期由挤压向拗陷转变。受玉泉运 动影响,造成始新统与上覆地层的不整合接触。同 时,凹陷内的裂陷中心向东迁移,随之整个盆地的 沉降中心也由西部凹陷带逐渐迁移至东部凹陷带。

(4) 渐新世构造抬升剥蚀阶段

盆地西部凹陷带继续抬升并伴随着向东发生 海平面下降^[32-33],此时玉泉运动持续占主导作用, 凹陷内的地层遭受广泛剥蚀导致缺失,结束了拗陷 发展阶段。

(5) 中新世—现今的稳定沉降阶段

中新世,西部凹陷带形态基本为一向东微倾的 斜坡^[32],长江凹陷内整体稳定沉降。中新世以来, 凹陷内构造变形活动趋于稳定,沉积环境由海退转 变为海侵,地层整体进入稳定沉降。

3.2 构造反转分布与迁移规律

长江凹陷西次凹发育典型的反转背斜构造,在 早始新世瓯江运动时期最为发育,至中新世时期, 逐渐减弱。然而,中次凹和东次凹内的反转构造分 别位于边界处和岩浆岩的东南侧。此外,渐新世以 来,西湖凹陷发育广泛的反转构造。西湖凹陷西部 构造反转活动整体相对较弱,轻微反转,抬升较小, 可见微弱的角度不整合(图 5a)。西湖凹陷内的反 转构造主要发育在中央反转构造带、东部断阶带内, 是在中新世龙井运动强烈活动的情况下形成的 (图 5)^[36-39]。



整体来看,自长江凹陷至西湖凹陷,反转构造 呈现出自西向东逐渐迁移的规律,其分布、迁移与 区域应力场的变化具有较好的相关性(图 6)。但是, 长江凹陷与西湖凹陷构造反转的期次显然不同,推 测为在渐新世盆地东部板块间作用强烈,西湖凹陷 受到挤压作用的影响大,地层开始反转,至中新世 地层强烈反转,而长江凹陷整体抬升剥蚀,中新世 凹陷构造活动趋于稳定。

盆地受板块俯冲改变的影响,东部与西部构造 演化各具特点,表现出自西向东构造跃迁的特点, 而反转构造最具表征力。总体上来看,凹陷构造反 转迁移特征与盆地构造迁移演化规律具有较好的



一致性^[15,18,40-41]。故可以借此更进一步的探讨陆架 盆地北部构造变形的深部动力学机制。

3.3 构造变形动力学机制探讨

晚侏罗一早白垩世,古太平洋板块向欧亚大陆 以低角度俯冲,东海陆架盆地内挤压作用强烈,盆 地西侧向上抬升^[19-20,42-43],该过程为西部凹陷带的伸 展断陷奠定了基础。此时期西部凹陷带内岩浆活 动和断裂活动较弱。晚白垩世,太平洋板块以 NNW 向快速向欧亚板块俯冲后撤,造成岩石圈减薄,此 时长江凹陷受到强烈的拉张作用,凹陷内出现控次 凹断裂,并且东次凹中有岩浆侵入,岩浆活动持续 至渐新世。至早始新世,太平洋板块的俯冲速度加 剧,长江凹陷始终处于挤压应力场下,地层发生抬 升、剥蚀、褶皱和构造反转(图 6)。

始新世,太平洋板块的俯冲方向由 NNW 向转 为 NWW 向,长江凹陷在弧后岩浆冷静期进行超覆 沉积。末期,印度板块与欧亚板块产生相撞并逐渐 剧烈,使得欧亚板块下部岩石圈中的刚性块体向东 移动和地幔中的物质向东蠕散^[21,44-45];渐新世,菲律 宾海板块与欧亚板块东部碰撞,增强了欧亚板块东 部的挤压,长江凹陷内发生明显的抬升剥蚀,致使 渐新统的缺失,此时期对应的构造运动为玉泉运动。 中新世以后,长江凹陷远离构造活跃区,且中部低 凸起带降低了构造活动的向西传递。受太平洋板 块、菲律宾海板块和欧亚板块间的影响减小,凹陷 整体稳定沉积^[13],龙井运动主要集中在冲绳海槽和 东海陆架盆地东部凹陷带内活动(图 6)。

总的来说,长江凹陷主要受太平洋板块的影响, 凹陷内的各次凹均受到不同程度的影响,构造变形 叠加在一起,在渐新世受板块间作用最为强烈,而 后期构造活动受到中部凸起带的缓冲作用,凹陷趋 于稳定沉积。

4 结论

(1)长江凹陷发育中、新生界两大构造层,以新 生界为主,但渐新统整体缺失,垂向上为典型双断 结构,地层整体呈现出"东厚西薄"特征。长江凹陷 的各次凹中主要发育 NE、近 EW 和 NW 向 3 组断 裂,断裂发育对凹陷的演化有重要的控制作用。长 江凹陷具有"三凹两凸"的构造格局,主要发育有伸 展构造和反转构造 2 类构造样式,反转构造具有自 西向东迁移的特征。 (2)基于凹陷内部构造变形特征,结合区域构 造运动和板块间的相互作用背景,将凹陷的构造演 化分为 5 个阶段:晚白垩—早古新世伸展断陷、晚 古新—早始新世挤压反转、始新世坳陷发育、渐新 世构造抬升以及中新世以来的整体稳定沉降。

(3)新生代时期,古太平洋板块对长江凹陷的 影响减弱,太平洋板块、印度板块和菲律宾海板块 间的作用影响增强。由于伸展与挤压构造环境的 转变,凹陷内发育反转构造。盆地的构造活动中心 逐渐迁移至东部凹陷带,反转构造也逐渐向东迁移, 由于板块间作用受到中部凸起带的阻碍,长江凹陷 地层趋于平稳发育。

参考文献:

[1] 杨传胜,杨长清,杨艳秋,等.东海洋陆过渡带中—新生代构造变形及动力学机制[J].海洋地质与第四纪地质,2020,40(1):71-84.

YANG C S, YANG C Q, YANG Y Q, et al. Meso-Cenozoic deformation and dynamic mechanism of the ocean-continent transitional zone in the East China Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 40(1): 71-84.

[2] 娄敏,蔡华,何贤科,等. 地震沉积学在东海陆架盆地西湖凹 陷河流-三角洲相储集层刻画中的应用 [J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(1): 125-138.

> LOU M, CAI H, HE X K, et al. Application of seismic sedimentology in characterization of fluvial-deltaic reservoirs in Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(1): 125-138.

- [3] CHENG Y J, WU Z P, ZHANG J, et al. Cenozoic tectonic evolution of offshore Chinese Basins and its response to geodynamic processes of the East Asian continental margin[J]. Earth-Science Reviews, 2022, 232: 104140.
- [4] 杨长清,韩宝富,杨艳秋,等.东海陆架盆地中生界油气调查 进展与面临的挑战 [J].海洋地质前沿,2017,33(4):1-8. YANG C Q, HAN B F, YANG Y Q, et al. Oil and gas exploration in the Mesozoic of East China Sea Shelf Basin: progress and challenges[J]. Marine Geology Frontiers, 2017, 33(4):1-8.
- [5] 李家彪. 东海区域地质 [M]. 北京: 海洋出版社, 2008.
 LI J B. Geology of the East China Sea Region[M]. Beijing: China Ocean Press, 2008.
- [6] YANG C Q, YANG Y Q, LI G, et al. The Mesozoic basinmountain coupling process of the southern East China Sea Shelf Basin and its adjacent land area[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(3): 1051-1052.
- [7] 黄新年. 长江凹陷和瓯江凹陷油气普查新成果 [J]. 海洋地质动态, 1991, 7(9): 18-19.

HUANG X N. New results of oil and gas census in the Changjiang Sag and Oujiang Sag[J]. Marine Geology Letters, 1991, 7(9): 18-19. [8] 杨传胜, 李刚, 栾锡武, 等. 东海陆架盆地雁荡低凸起综合地 球物理解释及其成因探讨 [J]. 地球物理学报, 2014, 57(9): 2981-2992.

> YANG C S, LI G, LUAN X W, et al. The geophysical interpretation of Yandang Low Uplift and discussion on its genesis in the East China Sea Shelf Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(9): 2981-2992.

- [9] 江涛,张莱.东海陆架盆地西部凹陷带长江凹陷含煤层系分布特征分析与预测[J].地质科技情报,2012,31(3):77-81. JIANG T, ZHANG L. Analysis and forecast of coal-bearing strata distribution in Yangtze Depression in western depression belt, East China Sea Shelf Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(3): 77-81.
- [10] 赵艳秋.东海陆架盆地长江凹陷生油岩研究 [J]. 海洋石油,
 2003, 23(S1): 40-44.
 ZHAO Y Q. The study on source rock of Changjiang Sag of the

East China Sea Shelf Basin[J]. Offshore Oil, 2003, 23(S1): 40-44.

[11] 许怀智,张迎朝,蒋一鸣,等.东海盆地长江凹陷美人峰组的时代归属及其地质意义[J].地质学报,2022,96(6):1972-1984.

XU H Z, ZHANG Y C, JIANG Y M, et al. Age assignment and geological significance of Meirenfeng Formation in the Yangtze River Sag, East China Sea Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(6): 1972-1984.

[12] 袁灵聪,朱晓军,蔡进功,等.东海盆地长江坳陷美人峰组烃 源岩沉积环境与生烃潜力评价[J]. 沉积学报, 2021, 39(2): 506-514.

> YUAN L C, ZHU X J, CAI J G, et al. Sedimentary environment and hydrocarbon generation potential of source rocks from the Meirenfeng Formation in the Changjiang Depression, East China Sea Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(2): 506-514

- [13] ZHANG J P, LI S Z, SUO Y H. Formation, tectonic evolution and dynamics of the East China Sea Shelf Basin[J]. Geological Journal, 2016, 51: 162-175.
- [14] ZHANG G H, LI S Z, SUO Y H, et al. Cenozoic positive inversion tectonics and its migration in the East China Sea Shelf Basin[J]. Geological Journal, 2016, 51: 176-187.
- [15] 张国华,张建培.东海陆架盆地构造反转特征及成因机制探 讨[J].地学前缘, 2015, 22(1): 260-270.
 ZHANG G H, ZHANG J P. A discussion on the tectonic inversion and its genetic mechanism in the East China Sea Shelf Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(1): 260-270.
- [16] SU J B, ZHU W B, CHEN J, et al. Cenozoic inversion of the East China Sea Shelf Basin: implications for reconstructing Cenozoic tectonics of eastern China[J]. International Geology Review, 2014, 56(12): 1541-1555.
- [17] ZHU W L, ZHONG K, FU X W, et al. The formation and evolution of the East China Sea Shelf Basin: a new view. [J]. Earth-Science Reviews, 2019, 190: 89-111.
- [18] 索艳慧,李三忠,曹现志,等.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 [J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 249-267.

SUO Y H, LI S Z, CAO X Z, et al. Mesozoic-Cenozoic inversion tectonics of East China and its implications for the subduction process of the oceanic plate[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(4): 249-267.

- [19] 王锋,朱文斌,胡德昭,等.东海盆地长江坳陷新生代反转构造研究[J].大地构造与成矿学,2005,29(2):176-181.
 WANG F, ZHU W B, HU D Z, et al. Cenozoic inversion tectonics in Changjiang Depression of East China Sea Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2005, 29(2): 176-181.
- [20] 李三忠,余珊,赵淑娟,等.东亚大陆边缘的板块重建与构造 转换[J].海洋地质与第四纪地质,2013,33(3):65-94.
 LI S Z, YU S, ZHAO S J, et al. Tectonic transition and plate reconstructions of the East Asian continental magin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33(3):65-94.
- [21] LIANG X X, CHEN S, MA B S, et al. Changes of tectonic regime of the East China Sea Shelf Basin since Mesozoic: insights from the Tiantai Slope Belt, East China Sea[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2024, 259: 105900.
- [22] 朱珍君,李琦,陈贺贺,等.东海陆架盆地丽水凹陷古新统源-汇系统耦合及时-空演化 [J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 735-752.

ZHU Z J, LI Q, CHEN H H , et al. Source-to-sink coupling and temporal-spatial evolution in the Lishui Sag of East China Sea Shelf Basin during the Paleocene[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 735-752.

[23] 余浪,余一欣,蒋一鸣,等.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[J].石油与天然气地质, 2023,44(3):753-763.

> YU L, YU Y X, JIANG Y M, et al. Characteristics and forming mechanisms of transform zone in the Tiantai Slope, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 753-763.

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

> YANG C Q, YANG C S, SUN J, et al. Mesozoic evolution and dynamics transition in southern East China Sea Shelf Basin[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2019, 49(1): 139-153.

[25] 杨长清,杨传胜,杨艳秋,等.东海陆架盆地南部深部地层格架与油气资源潜力[J].海洋地质与第四纪地质,2022,42(5): 158-171.

> YANG C Q, YANG C S, YANG Y Q, et al. Deep stratigraphic framework and hydrocarbon resource potential in the southern East China Sea Shelf Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(5): 158-171.

[26] 王晋. 东海陆架盆地新生界地层断裂体系特征探析 [J]. 中国 新技术新产品, 2021(8): 129-131.

> WANG J. Exploration of the characteristics of the fault system in the Cenozoic strata of the East China Sea Shelf Basin[J]. New

Technology & New Products of China, 2021(8): 129-131.

- [27] YAO Z W, LI C F, HE G Y, et al. Cenozoic sill intrusion in the central and southern East China Sea Shelf Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 119: 104465.
- [28] 王磊,李春峰,李珂迪,等.东海陆架盆地中生代残留地层特 征及其构造启示 [J].海洋学研究,2022,40(4):11-24.
 WANG L, LI C F, LI K D, et al. Characteristics and tectonic implications of the Mesozoic residual strata in the East China Sea Shelf Basin[J]. Journal of Marine Sciences, 2022, 40(4): 11-24.
- [29] 杨传胜,杨长清,张剑,等.东海陆架盆地中生界构造样式及 其动力学成因探讨 [J].海洋通报,2017,36(4):431-439.
 YANG C S, YANG C Q, ZHANG J, et al. Mesozoic tectonic styles and their dynamic mechanisms in the East China Sea Shelf Basin[J]. Marine Science Bulletin, 2017, 36(4):431-439.
- [30] 郑求根,周祖翼,蔡立国,等.东海陆架盆地中新生代构造背景及演化[J].石油与天然气地质,2005,26(2):197-201. ZHENG Q G, ZHOU Z Y, CAI L G, et al. Meso-Cenozoic tectonic setting and evolution of East China Sea Shelf Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(2): 197-201.
- [31] 杨传胜,李刚,杨长清,等.东海陆架盆地及其邻域岩浆岩时 空分布特征 [J].海洋地质与第四纪地质,2012,32(3):125-133.

YANG C S, LI G, YANG C Q, et al. Temporal and spatial distribution of the igneous rocks in the East China Sea Shelf Basin and its adjacent regions[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(3): 125-133.

- [32] 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 J S, LIAO Z T, JIA J Y, et al. The Geological structure and tectonic evolution of the East China Sea Shelf Basin[J]. Shang-Hai Geology, 2003, 24(3): 1-6.
- [33] 杨传胜,杨长清,李刚,等.东海陆架盆地中一新生界油气勘 探研究进展与前景分析 [J].海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(2): 136-147.
 YANG C S, YANG C Q, LI G, et al. Prospecting of Meso-

Cenozoic hydrocarbon in the East China Sea Shelf Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2018, 38(2): 136-147.

- [34] 余明刚,洪文涛,钱迈平,等.浙东象山石浦生物礁灰岩时代 厘定及其层位归属 [J]. 华东地质, 2021, 42(3): 260-268.
 YU M G, HONG W T, QIAN M P, et al. Geochronological definition on Shipu biohermal limestone and its regional stratigraphic attribution in Xiangshan, eastern Zhejiang Province[J].
 East China Geology, 2021, 42(3): 260-268.
- [35] 杨文达, 崔征科, 张异彪. 东海地质与矿产 [M]. 北京: 海洋出版社, 2010: 390-405.
 YANG W D, CUI Z K, ZHANG Y B. Geology and Mineral Resources of the East China Sea [M]. Beijing: China Ocean Press, 2010: 390-405.
- [36] 郭真, 刘池洋, 田建锋. 东海盆地西湖凹陷反转构造特征及其 形成的动力环境 [J]. 地学前缘, 2015, 22(3); 59-67.
 GUO Z, LIU C Y, TIAN J F. Structural characteristics and main controlling factors of inversion structures in Xihu Depression in

Donghai Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3): 59-67.

[37] 胡梦颖, 李三忠, 戴黎明, 等. 西湖凹陷中北部反转构造动力
 学机制的数值模拟 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(4):
 151-166.

HU M Y, LI S Z, DAI L M, et al. Numerical dynamic modeling of tectonic inversion in the northeastern Xihu Sag[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2017, 37(4): 151-166.

[38] 张迎朝,邹玮,陈忠云,等.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[J]. 石油与天然气地质,2023,44(5):1256-1269. ZHANG Y Z, ZOU W, CHEN Z Y, et al. The mechanism of "convergence ahead of accumulation" and its geological signi-

ficance for gas reservoirs in Paleogene Huagang Formation across the central inverted structural zone of Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(5): 1256-1269.

[39] 张晓庆,廖计华,李峰,等.东海盆地反转背斜断裂特征及其 控藏作用:以西湖凹陷G构造为例[J].天然气地球科学, 2023,34(12):2136-2150.

> ZHANG X Q, LIAO J H, LI F, et al. The fault system characteristics and its control on reservoir formation of reverse anticline in the East China Sea Basin: an example from Structure G in the Xihu Sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(12): 2136-2150.

 [40] 徐发.东海陆架盆地新生界结构特征及迁移规律 [J]. 石油天 然气学报, 2012, 34(6): 1-7, 164.
 XU F. Characteristics of Cenozoic structure and tectonic migra-

tion of the East China Sea Shelf Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(6): 1-7, 164.

- [41] RODRIGUEZ S P, CHILDS C, SHANNON M P, et al. Structural evolution and the partitioning of deformation during basin growth and inversion; a case study from the Mizen Basin Celtic Sea, offshore Ireland[J]. Basin Research, 2020, 32(5): 830-853.
- [42] 尚鲁宁,潘军,曹瑞,等.基于重磁数据研究江苏岸外滨海断裂带及邻区构造特征 [J]. 华东地质, 2024, 45(1): 101-114. SHANG L N, PAN J, CAO R, et al. Structural characteristics of the Binhai Fault Zone offshore Jiangsu Province: implications from gravity and magnetic data[J]. East China Geology, 2024, 45(1): 101-114.
- [43] 闫峻. 长江中下游—大别造山带中生代火山岩特征及成因 [J].
 华东地质, 2022, 43(4): 375-390.
 YAN J. Characteristics and petrogenesis of the Mesozoic volcanic rocks form the Middle-Lower Yangtze River Belt and the Dabie Orogen[J]. East China Geology, 2022, 43(4): 375-390.
- [44] 张田,张建培,张绍亮,等.东海陆架盆地西部坳陷带构造特 征及演化 [J].海洋地质前沿,2015,31(5):1-7.
 ZHANG T, ZHANG J P, ZHANG S L, et al. Tectonic characteristics and evolution of the west depression belt of the East China Sea Shelf Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2015, 31(5): 1-7.
- [45] 任建业. 中国近海海域新生代成盆动力机制分析 [J]. 地球科 学, 2018, 43(10): 3337-3361.

REN J Y. Genetic dynamics of China offshore Cenozoic basins[J]. Earth Science, 2018, 43(10): 3337-3361.

Structural deformation and its dynamic mechanism of the Changjiang Sag in the East China Sea Shelf Basin

SONG Junlan^{1,2,3}, PANG Yumao^{1,2}, YANG Chuansheng^{2,3*}, SHANG Luning^{2,3}, YANG Yanqiu^{2,3}, SUN Jing^{2,3}

(1 College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China;

3 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China)

Abstract: The Changjiang Sag is located in the northern part of the East China Sea Shelf Basin. Its tectonic development characteristics recorded and reflected key information on the formation and evolution of the basin and the process of plate convergence since the Late Cretaceous. However, the study on its tectonic deformation and dynamical mechanism is relatively weak. In this regard, the structural deformation characteristics and spatiotemporal differences of the Changjiang Sag were analyzed through detailed interpretation of multiple seismic profiles, and the dynamic mechanisms of its structural evolution and deformation process were discussed. Results indicate that the Changjiang Sag features a "three-concave and two-convex" structural framework with two major lithostratigraphic suits: Mesozoic and Cenozoic, primarily the Cenozoic, with the absence of the Oligocene. The overall depression is controlled by three sets of fault systems: NE, near EW, and NW, with local magmatic intrusion along the fault. The Changjiang Sag has a typical double-fault structure, and the strata were controlled by boundary faulting, being thicker in the eastern part and thinner in the western. Since the Cenozoic, Changiang Sag has been influenced by multi-phased subduction and convergence of the Pacific Plate, the Indian Plate, and the Philippine Sea Plate, as well as the back-arc extensional processes. The tectonic system of the Changjiang Sag has undergone multiple transformations. Both extensional and inversional tectonics has developed, with complex spatial stacking relationships, and the latter features tectonic migration from west to east. Since the Miocene, stratigraphic deformation has been weak due to the buffering effect of the central uplift zone. Based on the characteristics of structural deformation, the tectonic evolution of the Changjiang Sag could be divided into five stages: extensional faulting in the Late Cretaceous-Early Paleocene, compressional and inversional activities in the Late Paleocene-Early Eocene, subsidence development in the Eocene, tectonic uplifting in the Oligocene, and overall depression, stabilization and deposition after the Middle Miocene. This study provided a reference for understanding the basin structural deformation and regional tectonic evolution in this area.

Key words: deformation; tectonic evolution; dynamic mechanism; Changjiang Sag; East China Sea Shelf Basin