

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2017052501

东海陆架盆地南部生长断层活动特征

冉伟民^{1,2}, 栾锡武^{2,3}, 邵珠福^{2,4}, 刘鸿^{2,3}, 李德勇¹, 赵洋⁵, 王慧东⁶, 颜中辉^{2,3}

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100
2. 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237
3. 自然资源部青岛海洋地质研究所, 青岛 266071
4. 东北石油大学地球科学学院, 大庆 163318
5. 中国石油天然气管道局, 廊坊 065000
6. 中国石油大学(华东), 青岛 266580

摘要:生长断层是在伸展和走滑盆地中一种重要且广泛存在的构造样式。通过地震资料定性识别出东海陆架盆地南部地区18条生长断层;根据断裂对研究区各级构造单元控制作用和纵向切穿地层情况,将其划分为一级控盆断裂、二级控凹断裂、三级控带断裂和盖层断裂;通过断裂平面分布特征研究认为研究区的断裂以NE、NNE延伸为主,少数为NEE方向;利用地震剖面在研究区识别出阶梯状组合断层带、“Y”字型组合断层、多米诺式断层带、地堑、地垒等多种断裂组合样式;又结合生长指数和断层落差两种方法对研究区生长断层的运动学特征进行了定量统计分析,发现研究区生长断层在古近纪时期活动强度具有自西向东逐渐递减趋势,区内断层活动期次自西向东逐渐变新,整个研究区内生长断层在古近纪盆地裂陷—断陷期活动强度最大,中新世后断裂活动趋于稳定。认为晚中生代以来太平洋板块西缘俯冲后撤和印度板块向亚欧板块俯冲碰撞在东海陆架盆地形成的远程蠕散效应,使东海陆架盆地形成了拉张伸展应力场环境,是研究区发育大量生长断层的首要原因。同时,加强对研究区生长断层伴生构造如滚动背斜和缓坡带阶梯状断裂组合封堵形成的岩性圈闭研究,有利于推动东海陆架中新世盆地资源勘探可持续发展。

关键词:生长断层;演化特征;生长指数;断层落差;东海陆架盆地南部

中图分类号:P736.1 **文献标识码:**A

Research on characteristics of growth faults in the southern East China Sea Shelf Basin

RAN Weimin^{1,2}, LUAN Xiwu^{2,3}, SHAO Zhufu^{2,4}, LIU Hong^{2,3}, LI Deyong¹, ZHAO Yang⁵, WANG Huidong⁶, YAN Zhonghui^{2,3}

1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China
2. Evaluation and Detection Technology Laboratory of Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China
3. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China
4. School of Earth Science, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China
5. China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd. (Engineering), Langfang 065000, China
6. China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

Abstract: The growth fault is an important and widely distributed structure in extensional and strike-slip basins. 18 growth faults have been identified by the authors with seismic data in the south East China Sea Shelf Basin (ECSSB). According to their roles in controlling tectonic units development and the vertical sequence they cut through, the faults may be divided into several orders, i.e. the 1st order basin-controlling faults, the 2nd order concave controlling faults, the 3rd order band controlling faults and cap faults. As to the distribution pattern, the majority of the growth faults of the study area are distributed

资助项目:国土资源部公益性行业科研专项“海底冷泉拖曳式快速成像系统”(201511037);青岛海洋科学与技术国家实验室基金项目“印尼爪哇盆地新生代构造变形及古地理演化”(QNL201708);“多分量地震波逆时偏移校正及其并行实现”(QNL2016ORP0206);鳌山科技创新计划项目“深海专项(预研)”(2017ASKJ01, 2017ASKJ02);山东省自然科学基金博士基金“地质约束下的重磁三维反演在南黄海盆地崂山隆起的应用”(ZR2016DB33);中国博士后科学基金“基于保幅波场分离的多分量地震波逆时偏移方法研究”(2017M612219)

作者简介:冉伟民(1990—),男,博士生,研究方向为大陆边缘构造与盆地分析, E-mail: ranweim@163.com

通讯作者:栾锡武(1966—),男,研究员, E-mail: xluan@qnlm.ac

收稿日期:2017-05-25; **改回日期:**2018-02-16. 周立君编辑

in NE and NNE directions with a few in NEE direction. Various types of faults combinations are identified in seismic profiles, such as the steplike faults, the “Y” type faults, the domino-type faults, and the combination of graben and horst faults. According to the kinematics characteristics of faults such as growth index and fault throw, it is found that the growth faulting movement of Paleogene was in a decreasing trend from west to east, and thus the faults became younger to the east. The intensity of growth faulting in the whole study area reached a peak in Paleocene and became stable after Miocene, resulted from the joint effects of the extension dynamics background, that is the retrogradation of the subduction slab of the west Pacific margin and the eastern vermiculation of the ECSSB due to the subduction and collision between the India plate and Eurasian plate. Further study on growth fault and associated structures as well as the steplike fault zone in gentle slope belts is suggested to push forward the exploration in ECSSB basins.

Key words: growth fault; evolution characteristics; growth index; fault throw; Southern East China Sea Shelf Basin (ECSSB)

生长断层是指在沉积物输入堆积过程中伴随断裂的连续或幕式活动,又称同生断层或同沉积断层。从 1930 年美国石油学家在墨西哥湾沿岸地区首次辨认出一种两盘相当层落差随深度增加而增大的断层,到 1981 年, Bally A W 定性讨论了生长断层在不同的构造背景中的几何形态、组合样式和形成机制等并细化“犁型断层”术语,再到目前通过生长指数、断层落差、断层活动速率、位移-长度关系分析法等多种定量方法综合研究生长断层活动演化特征,以揭示更多、更全面的地质和油气信息,这是盆地科学问题研究和资源勘探开发的发展趋势^[1-7]。

而针对东海陆架盆地生长断层的研究,前人也做了一定的工作,赵峰梅和李三忠等用平衡剖面技术通过计算凹陷盆地伸展率和压缩率定量探讨了东海新生代生长断层活动对盆地发育的差异控制作用^[8];张绍亮分析了东海西湖凹陷断裂样式存在南北差异的成因机制和演化模式^[9];秘从永详细揭示了东海西湖凹陷中央反转带和平湖斜坡带断裂几何学和运动学特征^[10];张国华讨论了东海陆架盆地内新生代地层中受“下正上逆”生长断层控制的同生反转构造特征^[11]。

尽管前人对东海陆架盆地新生代生长断层取得了一定的成果和认识,但仍存在地区和时空局限性,尤其对本文东海陆架南部研究区缺少关注,一些科学问题仍存在不同的理解或者争议,这其中就包括晚中生代到新生代成盆早期形成的大量生长断层下切深度及对早期盆地演化控制作用和燕山期火山岩基底分布的耦合关系等^[12-15]。由于生产的需要,对东海陆架盆地的地质与地球物理调查主要以新生界为目的层,由于东海陆架盆地新生界地层的巨厚沉积(最厚超过 10000m)和地震采集处理技术的限制,目前得到的地震剖面资料中生界地层反射品质较差,难以准确地解释东海陆架中生界盆地性质、范围、沉积特征和构造演化,晚古生代变质岩基底是否存在等问题更难以解释。目前少量涉及中生界的构

造解释主要是基于重磁反演得到的,也仍拘泥于新生界所建立的构造格局中。因此,东海陆架盆地构造几何学、运动学、动力学特征仍需要进一步深入研究,尤其是在新生界巨厚沉积之下有可能也存在巨大的资源潜力^[12,14],这对我国经济的可持续发展将会带来巨大的推动力。

1 地质背景

东海陆架盆地南部研究区位于钓鱼岛隆褶带和浙闽隆起区之间,南部与台湾岛、钓鱼岛接壤,北北东走向延伸,是中国近海重要的含油气盆地,以新生代沉积地层为主,最大沉积厚度超过 14000m。东海陆架盆地是发育于克拉通基底之上的中、新生代箕状充填盆地,属于西太平洋弧后构造域体系^[12-17],受弧后拉张应力作用和盆地持续沉降作用发育大量生长断层,本文研究主要针对东海陆架盆地南部,包括椒江-丽水凹陷、福州凹陷和钓北凹陷(图 1)。

我国自 20 世纪 60 年代以来在东海勘探和研究中投入了大量的人力和物力^[10,11],其中钻探井就已超过 70 余口,对东海陆架新生代沉积盆地的地质特征和含油气性有了较全面的了解和认识,对以新生代沉积为主的东海陆架盆地的形成时代、盆地类型和结构、成因机制和演化历史进行了深入的研究,其中周志武和王国纯对东海陆架盆地的形成演化分别提出了单剪^[16]和弧后盆地模式^[17];金翔龙通过重、磁资料解释对东海宏观构造格架进行研究^[18];李培廉综合地质和地球物理资料分析东海陆架盆地基底分布元古界片麻岩和一定范围的中生界及古生界^[19];武法东认为东海陆架盆地属于大陆边缘裂陷盆地,发育大量北东向张性断层^[20];冯晓杰论述了东海陆架盆地弧后拉张形成演化模式及太平洋板块俯冲的主控作用,并认为早期裂陷断陷期形成的生长断层中新世反转使西湖凹陷在该时期成为双断型断坳^[21];李家彪对边缘海盆地-冲绳海槽的动力学、

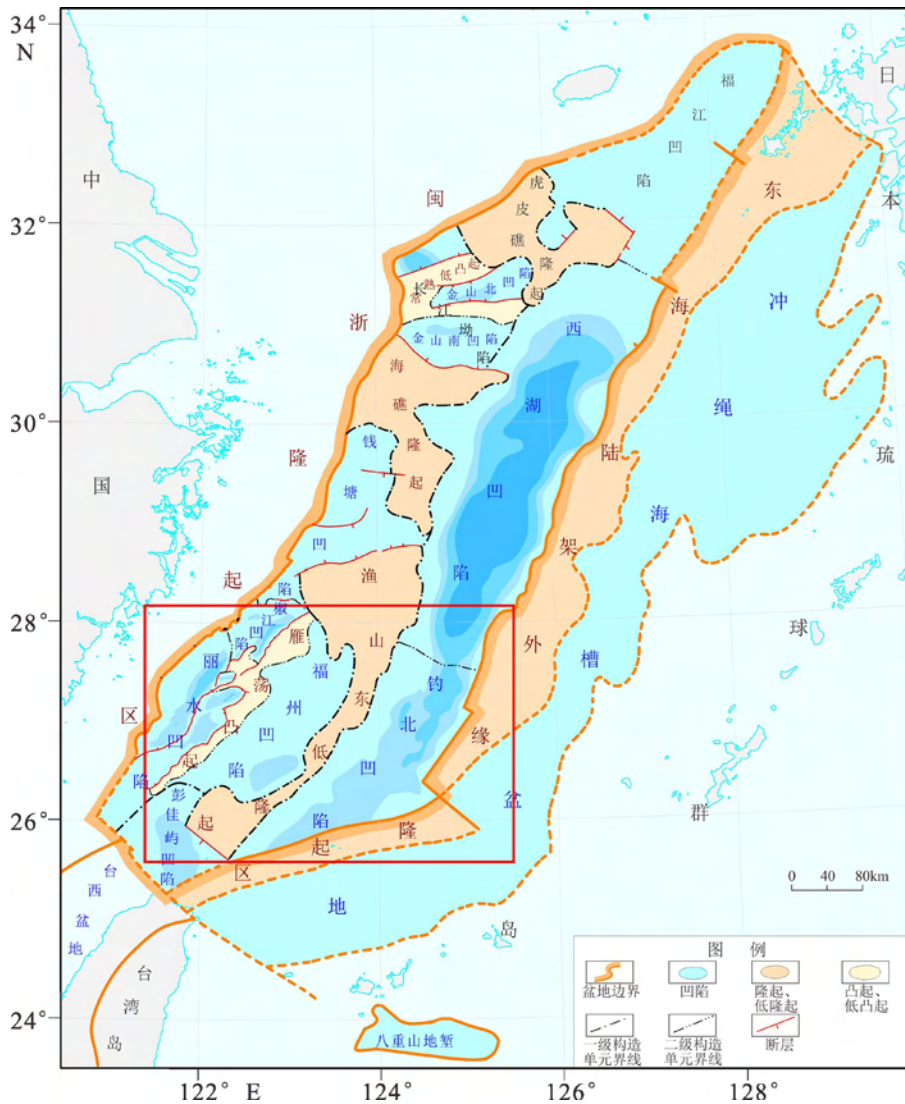


图1 东海陆架盆地地区构造图及研究区位置^[18,22,23]

Fig.1 The regional structural map of the East China Sea Shelf Basin and the study in red box ^[18,22,23]

岩石圈尺度的深层结构和表层沉积特征及沉积动力、浅层地层和古环境记录进行了研究^[22,23]。本文根据前人研究成果总结归纳了东海陆架盆地新生代地层表(表1)。

2 数据资料

本文利用钻探井标定的二维地震资料(图2联合解释剖面及位置),通过精细构造解释对东海陆架盆地南部地区的生长断层特征进行了研究,首先根据地震解释层位数据绘制等T₀反射层平面图,在综合各等T₀图基础上追踪识别出东海陆架盆地南部地区18条生长断层并绘制断裂平面分布图(图

2),主要统计了生长断层的断层性质和几何要素特征,包括断层走向、倾向、断层落差、最大落差层位、活动起止时间、下切地层和断裂级别。

3 结果

3.1 断裂要素及平面分布特征

本文共统计了18条主要生长断层(图2),并根据断裂对研究区各级构造单元控制作用和纵向切穿地层情况,将其划分为一级控盆断裂、二级控凹断裂、三级控带断裂和盖层断裂(表2)。

表 1 东海陆架盆地主要地质界面与相应构造运动^[24-30]

Table 1 A tectono-stratigraphic chart of the East China Sea Shelf Basin^[24-30]

地层系统				地质年代 /Ma	界面	构造运动	盆地演化	
系	统	组	段				西带	东带
第四系Q	更新统Q _u	东海群Q _{su}		2.6	T0	冲绳海槽运动		
新近系N	上新统N ₁	三潭组N _{1s}		5.3	T10	龙井运动	沉降期	沉降期
			柳浪组N _{1l}					
	中新统N ₁	玉泉组N _{1y}	上段					
			中段					
			下段					
			龙井组N _{1l}	上段				
下段								
古近系E	渐新统E ₁	花港组E _{1h}	上段	25.2	T20	花港运动	构造抬升期	拗陷反转
			下段					
	始新统E ₂	平湖组E _{2p}	一、二段	36	T30	玉泉运动	拗陷	断陷期
			三、四段					
			五段					
			六段					
	温州组E _{2w}							
	瓯江组E _{2o}							
	古新统E ₃	明月峰组E _{3m}	上段	53	T40	瓯江运动	断陷期	裂陷期
			下段					
灵峰组E _{3l}		上段						
		下段						
月桂峰E _{3y}								
白垩系K	上白垩统K ₂	石门潭组K _{2s}	66.5	T50	雁荡运动	裂陷期		
		闽江组K _{2m}						
	下白垩统K ₁	渔山组K _{1y}	131	Tg	基隆运动			

由断裂分布图可看出,研究区东海陆架盆地南部地区的断裂以 NE、NNE 向延伸为主,少数 NEE 方向。

(1)NE、NNE 向断裂:此组断裂在区内分布范围最广,对凹陷内区域构造的分带性和沉积规模起着控制作用。从断裂分级来看,两条一级控盆大断裂 F17 和 F18,直接限定了研究区东部边界,二级控凹断裂如 F2 和 F3 限定了研究区二级构造单元丽水凹陷的东部边界,更小规模的凹陷内三级控带断裂如 F4 对福州凹陷内中部沉积起控制作用。

(2)NEE 向断裂:此组断裂主要分布在研究区二级凹陷内部,如福州凹陷,F6 和 F8 断裂为 NEE 向,在东海陆架盆地南部边缘地区,F16 断裂的西南段也为 NEE 向。

3.2 断裂组合样式

通过地震剖面,本文识别出东海陆架盆地南部研究区内的主干生长断层和次级小型断层组合而成

的多种断裂组合样式,包括阶梯状组合断层带、“Y”型组合断层、多米诺式断层带和地堑、地垒构造组合样式。

(1)阶梯状组合断层带:断层在主测线剖面上呈阶梯状样式,从缓坡带向盆地凹陷中心方向依次叠置分布,构成一系列类似台阶形态的断阶带。这类断层通常分布于盆地缓坡区的浅部地层中,向下未断穿基底,其形成原因主要是受盆地沉降过程中缓坡区翘升产生的滑脱拉张等作用控制。如图 3 所示为东海陆架盆地南部生长断层形成的阶梯状断层组合。

(2)“Y”型断层:主断层与反向倾斜的次级断层组合为 Y 型。“Y”型断裂组合样式,向下断穿下部沉积层的通常为长期发育且规模较大的主断层,一般为控盆或控带断裂,而在地层凹陷侧浅部层段常伴生发育次级断层(图 4),两者通常相交呈“Y”字形。

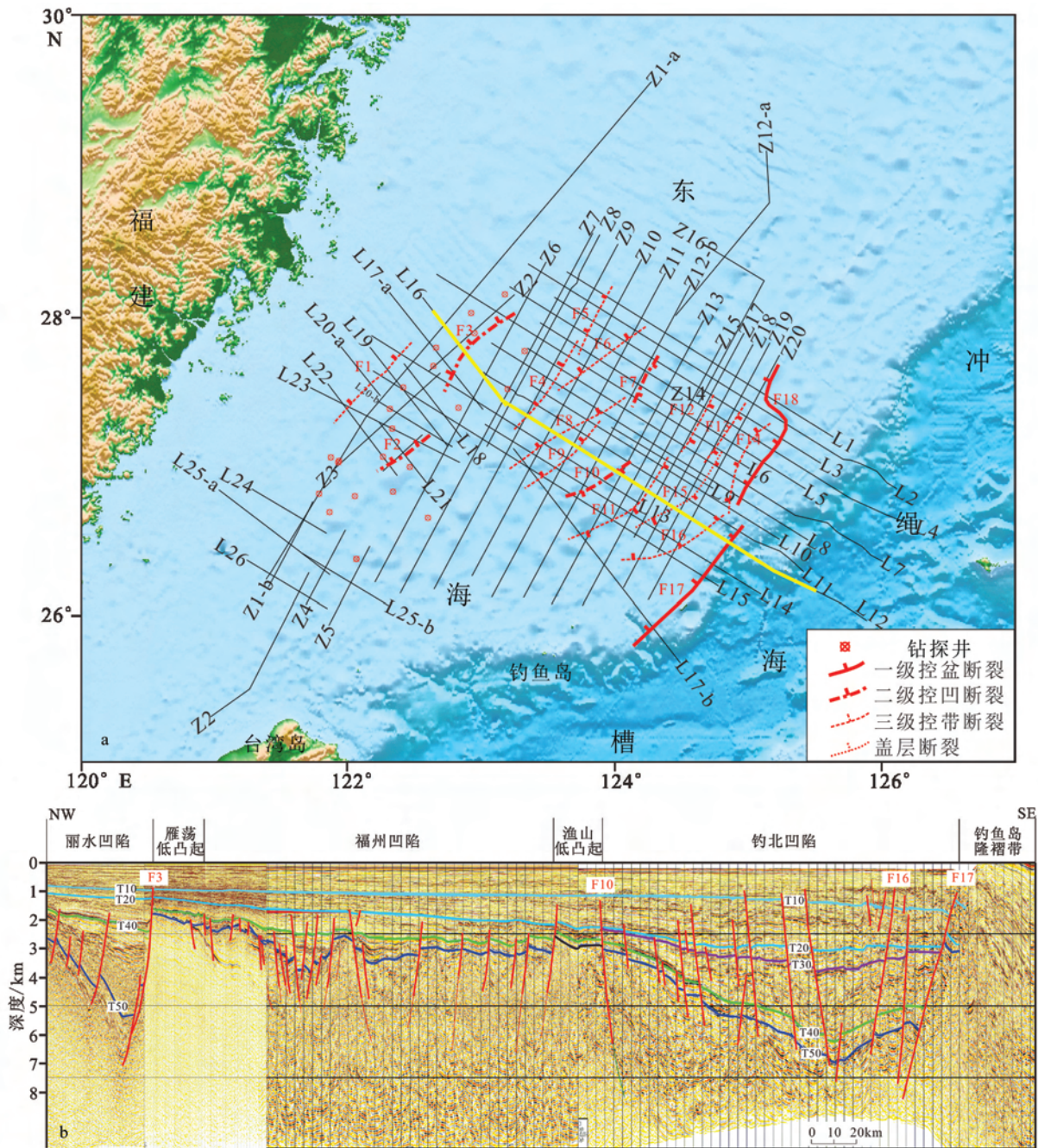


图2 东海陆架盆地南部地区生长断层分布图(a)及联合解释剖面(b)(L16和L12)

Fig.2 Growth fault distribution in southern East China Sea Shelf Basin and an interpreted seismic profile(L16 and L12)

(3)多米诺式断层带:在剖面上倾向一致或近似一致而平面上走向相互平行或近似平行的一系列断裂组成多米诺构造样式。如图5所示为雁荡低凸起中的多米诺式断层组合。

(4)地堑、地垒:断层倾向相对构成地堑,倾向相背构成地垒,同时在平面上断裂走向基本一致。而

断裂控制的地垒、地堑交替出现,也形成了形态各异的组合样式。东海陆架盆地南部可以找到具有代表性的组合:①同向倾斜的主断层控制的半地堑-半地垒组合(图6);②背向倾斜的半地堑-地垒组合(图7)。

表 2 生长断层断裂要素统计

Table 2 Characteristics of some growth faults

断层名称	性质	走向	倾向	最大落差/m	最大落差层位	起止时间	下切地层	断裂级别
F1	正	NE	NW	332	E ₁	K—E ₂	中生界	三级
F2	正	NE	NW	1244	E ₁	K—N ₁	中生界	二级
F3	正	NE—NEE	NW—NNW	1692	E ₁	K—N ₂	中生界	二级
F4	正	NNE	NWW	24	E ₁	K—E ₂	中生界	三级
F5	正	NNE	NWW	732	E ₁	K—N ₂	中生界	三级
F6	正	NEE	NNW	204	E ₂ —E ₃	K—N ₁	中生界	三级
F7	正	NNE	SEE	296	E ₁	K—N ₁	中生界	二级
F8	正	NEE	NNW	140	E ₁	K—E ₂	中生界	三级
F9	正	NE	NW	76	E ₁	K—E ₂	中生界	三级
F10	正	NE	SE	128	E ₁	K—N ₁	中生界	二级
F11	正	NE	SE	108	E ₂	K—N ₁	中生界	三级
F12	正	NNE	SEE	208	E ₂	K—N ₁	中生界	三级
F13	正	NNE	SEE	136	E ₃	K—N ₁	中生界	三级
F14	正	NNE—NE	NWW—NW	312	E ₂	K—N ₁	中生界	三级
F15	正	NEE	SSE	30	E ₃	E ₂ —N ₁	始新统	盖层
F16	正	NEE—NE	NNW—NW	180	E ₂	K—N ₂	中生界	三级
F17	正	NE	NW	2392	E ₁ —E ₃	K—N ₂	中生界	一级
F18	正	NNE	NWW	3016	E ₁ —E ₃	K—N ₂	中生界	一级

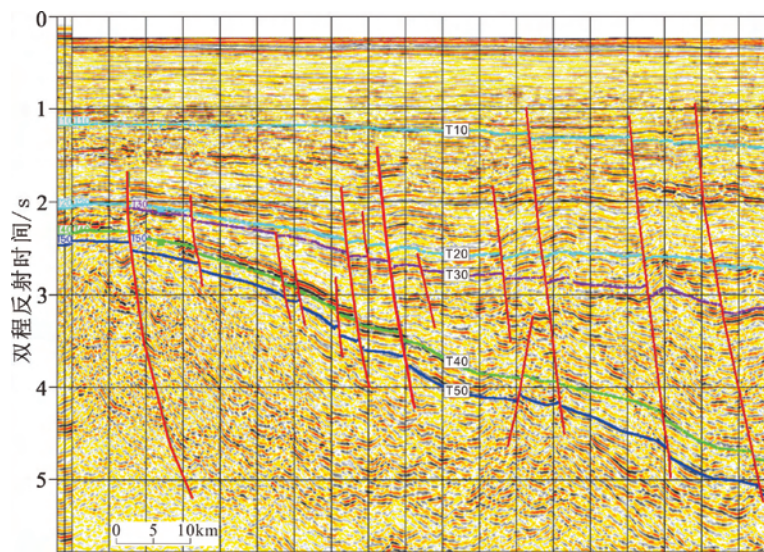


图 3 东海陆架盆地南部区域阶梯状断层样式(L12)

Fig.3 A steplike fault in southern East China Sea Shelf Basin

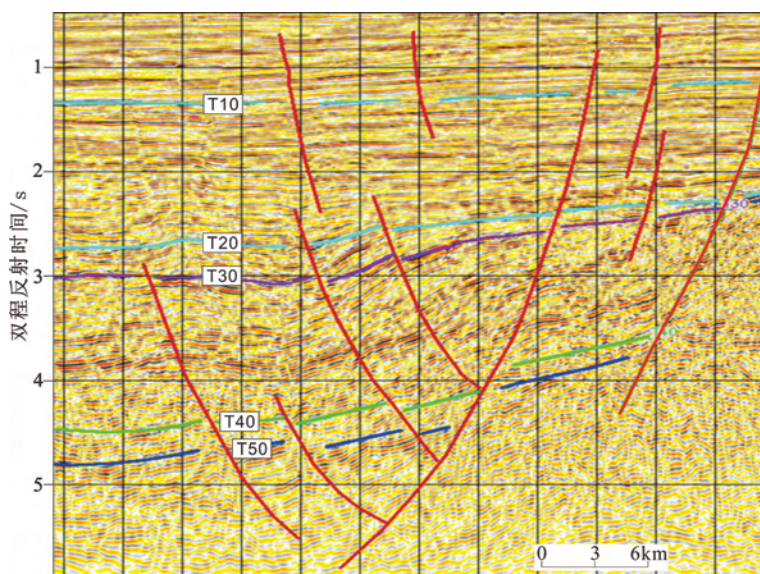


图4 东海陆架盆地鈎北凹陷“Y”型断层样式(L8)

Fig.4 A ‘Y’ type fault in Diaobei Sag of the southern East China Sea Shelf Basin

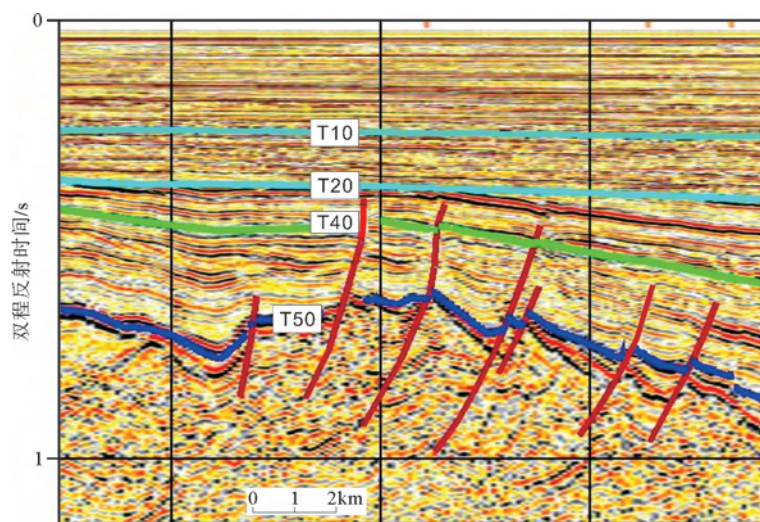


图5 东海陆架盆地丽水凹陷多米诺断层样式(L25-a)

Fig.5 Domino fault pattern in Lishui sag of the East China Sea Shelf Basin

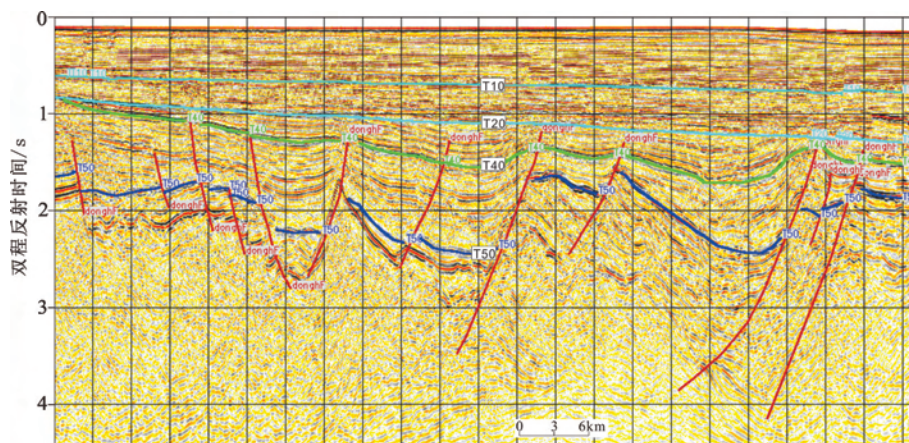


图6 东海陆架盆地南部同向倾斜半地堑-半地垒样式(L26)

Fig.6 Synthetic oblique half graben-half horst pattern in southern East China Sea Shelf Basin

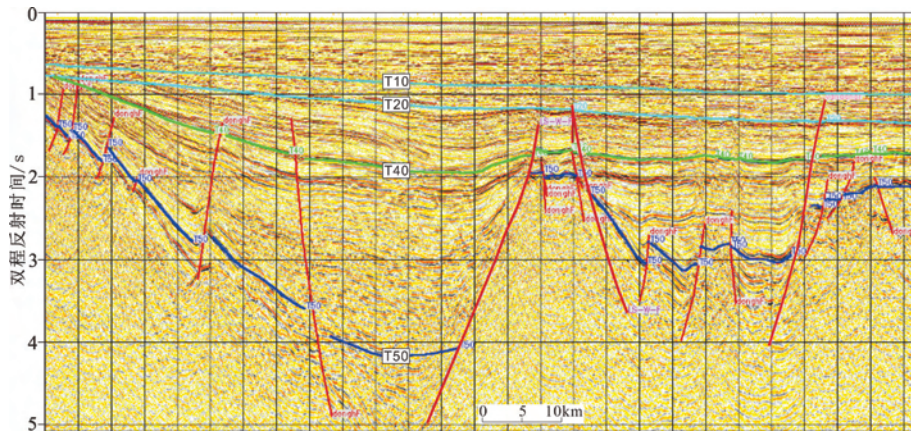


图 7 东海陆架盆地南部背向倾斜半地堑-地垒样式(L23)

Fig.7 A tilt half graben-horst structure in southern East China Sea Shelf Basin

3.3 断层时空迁移规律

3.3.1 断层生长指数分析

断层生长指数是同一地质历史时期下降盘沉积层厚度与上升盘沉积层厚度的比值,即断层生长指数=下降盘沉积层厚度/上升盘沉积层厚度,其值越大,表示断裂在相应时期活动越强烈^[7,29-31],可根据比较生长指数之间的相对数值大小从空间和时间上分析断层活动周期和运动迁移规律,并划分断裂的级别。

通过对东海陆架盆地南部地区的 10 条主干断裂的生长指数进行分析(图 8),发现研究区生长断层在古近纪活动强度具有自西向东逐渐递减趋势,同时区内断层活动期次自西向东逐渐变新,整个研究区内生长断层在古近纪盆地裂陷—断陷期活动强度最大,中新世断裂活动趋于稳定。

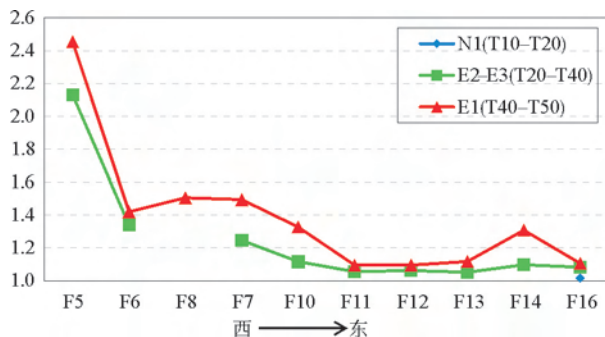


图 8 研究区断层(自西向东)生长指数折线图
Fig.8 The fault growth index line in the study area (from west to east)

(1)纵向上,东海陆架盆地南部区域从古新统(E₁)各地层到中新统(N₁)各地层沉积时期,各断层

生长指数整体呈下降趋势,研究区古新统(E₁)地层沉积时期的生长指数显著高于别的阶段,说明东海陆架南部研究区在古近纪构造活动强烈,中新世以后趋于平静。

(2)横向上,断层生长指数大致呈自西向东逐渐变小的趋势,说明在古近纪西部断层活动比东部断层活动强烈。F16 断裂向上切穿了中新统(N₁),说明中新世时研究区东部凹陷带内(钓北凹陷)断层仍在活动,西部凹陷带断层活动可能已经停止,反映了东海陆架研究区新生代构造活动具有分带性,研究区东部构造活动相对于西部在时间上具有滞后的特征。

3.3.2 断层落差

断层落差是在垂直断层走向的剖面上,两盘对应层(或对应点)之间的铅直距离。生长断层落差反映了断层两盘的下降幅度差及沉积充填和隆升剥蚀相对速率等地质信息。生长断层的活动具有连续或幕式特征,研究其演化活动史需要对比计算各地质时期的古落差^[7,29-36]。

某时期生长断层的古落差=该时期上盘沉积层厚度—该时期下盘沉积层厚度(图 9)。

(1)东海陆架盆地一级控盆大断裂

F17 和 F18 断层属于东海陆架盆地南部的东部边界,断层规模大,延伸长,剖面上显示向下切穿 T50 反射层,是控制东海陆架南部地区的一级边界大断裂。其中 F17 断层对应凌云大断裂,F18 断层呈“S”型弯曲延伸,对应于西湖基隆大断裂南段。两条断层的下降盘的派生断层多与主断层相交,上升盘地层被剥蚀,在地震反射界面上仅解释出 T10、T20 和 T50 反射界面,说明始新统完全被剥蚀,古新统和渐新统部分被剥蚀。

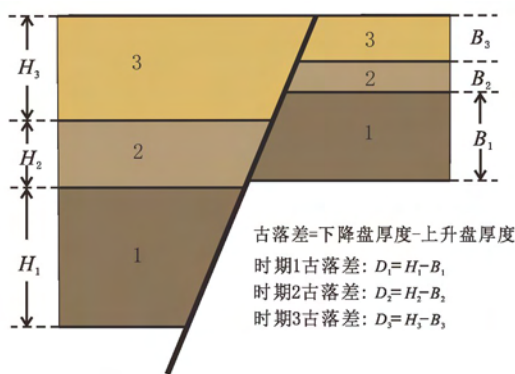


图9 生长断层落差简单示意图

Fig.9 A schematic diagram of the Growth fault throw

F17 和 F18 断层走向为北东到北北东向,倾向为北西到北西西向,F17 断层古近系断距最大达 2392m,F18 断层古近系断距最大达 3016m(图 10),

这两条断层基本限定了整个钩北凹陷的东部边界。通过断层落差图分析,古近系沉积时期活动最强烈,且 F18 断层古近纪时期断层落差明显大于 F17 断层,说明古近纪时期盆地北部活动强于南部地区;而在中新世时期,F17 断层落差大于 F18 断层落差,此时盆地南部活动强于北部地区,说明盆地活动中心有自北向南迁移的趋势。两条边界断层活动性总体来看中新世以后急剧减弱。对 F17 和 F18 两条边界断层计算断层古落差时,由于下盘受潮汐水流、波浪、海水化学作用等海洋地质营力因素和岩石抗风化强度、盆地边缘抬升速率等作用形成风化剥蚀,缺失部分地层,下盘剥蚀厚度无法准确得知,只能根据上盘沉积厚度或基于测井数据的波动方程理论进行推算,因此对于边界生长断层活动性定量研究存在误差。

(2) 二级控凹断裂

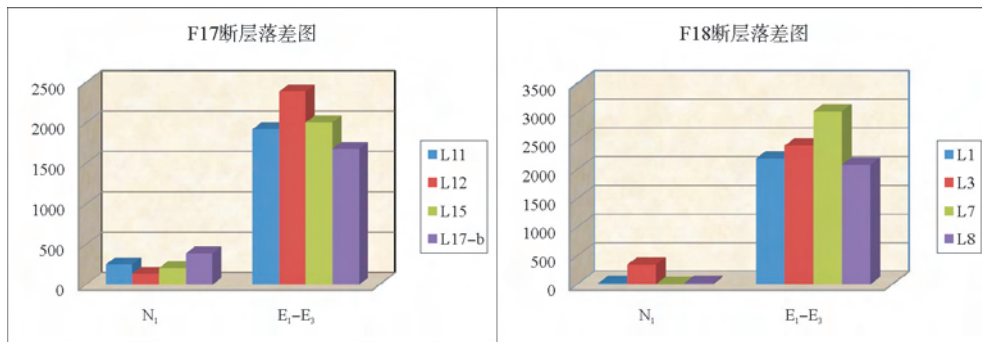


图 10 一级控盆大断裂断层落差图

Fig.10 Fault throw of the basin-controlling faults

F2 和 F3 断层属于丽水凹陷东部二级控凹分界断裂。F2 断层位于丽水凹陷南次凹,主要分割丽水南次凹与雁荡凸起南部,该断层古新世时期断层活动强度最大,其次是始新世时期和渐新世时期,而从平面上来说古新世断裂南段活动略强,始新世和渐新世阶段断裂北段活动略强;F3 断裂属于丽水凹陷西次凹和雁荡凸起北部的二级控凹断裂,古新世时期断层活动最为强烈,而从平面上来说古新统沉积期研究区内南侧活动强烈,始新统和渐新统沉积时期中部活动性较强,到了中新世阶段该断裂活动强度明显削弱。

F7 和 F10 断层位于钩北凹陷的西部边界,西侧为鱼山南低凸起,是钩北凹陷西部边界二级控凹断裂。其中 F7 断层走向为北北东向,倾向南西西,断层较为平直;F10 断层东南倾呈弧形展布,走向北东

东到北东。两条断层基本限定了整个钩北凹陷的西部边界,断裂活动持续时期较长,各时期活动强度存在差异,从断层落差图(图 11)来看两条断层古新世时期活动强度最大,始新世和渐新世时期断层活动强度次之,且古近纪后期南部 F10 断层落差相对于 F7 断层有增加,反映构造活动向南迁移的趋势。

(3) 三级控带断层

F6、F8 和 F9 断层位于福州凹陷的中部,这 3 条断层自北向南呈雁列状右行分布。走向为北东向或北北东向,倾向均为北西向,限制福州凹陷中部区域的构造特征和沉积物充填活动。F6 断层活动持续时间比 F8 和 F9 长,从白垩纪延续到中新世;根据 3 条断层落差(图 12),古新世时期,F6 断层活动强度最大,断层活动期和断层落差反映了福州凹陷内部构造活动具有从南向北迁移的特征。

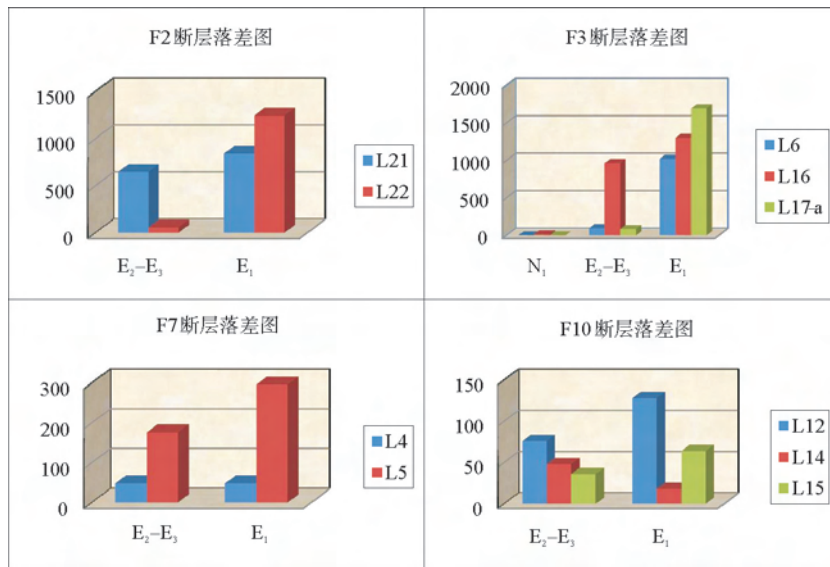


图 11 二级控凹断层落差图

Fig.11 Fault throw of the 2nd order structural unit

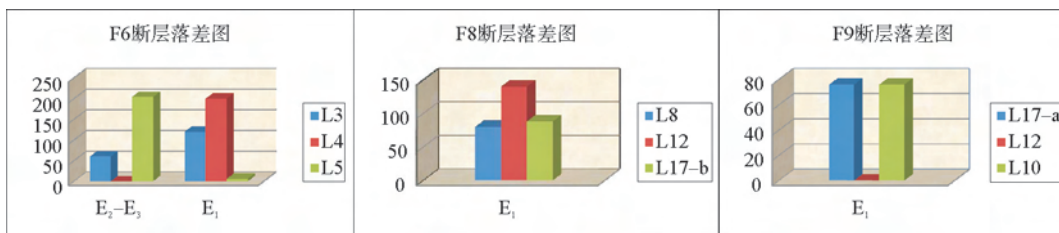


图 12 福州凹陷三级控带断层落差图

Fig.12 Fault throw of the Fuzhou Sag

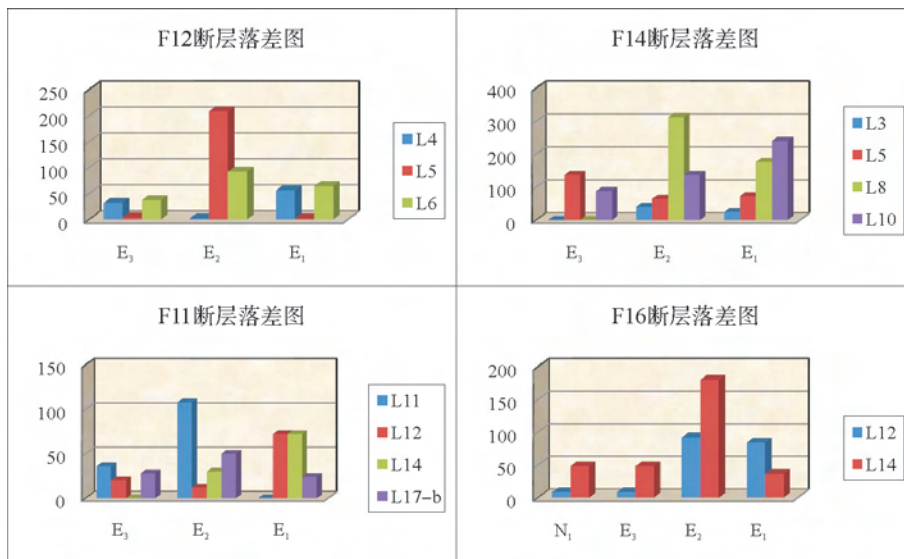


图 13 钓北凹陷三级控带断层落差图

Fig.13 Fault throw of the Diaobei Sag

F12 和 F14 断层位于钩北凹陷北部地区, F12 断层走向为北北东向, 倾向南东东, F14 断层南段走向北北东, 北段走向北东, 呈弧形展布, 倾向为北西西到北西, 古新世时期构造活动稍弱, 始新世和渐新世时期活动增强(图 13)。F11 和 F16 断层位于钩北凹陷南部, 均呈弧形展布, 平面延伸较长, F11 断层走向北东, 倾向南东, 古新世和始新世时期最为强烈; F16 断层走向北东东到北东, 倾向北北西到北西, 断裂连续活动时期较长, 向上切穿 T10 反射界面, 活动时期自白垩纪持续到上新世, 活动强度各时期具有差异性, 始新世时期断层落差最大, 古新世次之。断层活动持续时间和断层落差反映了钩北凹陷内部构造活动同样具有从南向北迁移特征。

3.3.3 两种研究方法优缺点分析

本文利用断裂生长指数分析法和断层落差法反映了东海陆架南部研究区发育断层的特征。两种方法本身都有其优缺点, 生长指数分析法是第一种经典定量对比分析生长断层相对活动特征的方法, 但生长指数在研究盆地边界断层或控带断层时, 可能会由于上升盘相对抬升剥蚀或沉积层厚度巨薄, 使得计算断层生长指数的数值非常大, 并且生长指数

是一个无量纲值, 不容易看出地质含义; 断层落差法不受断层下盘抬升遭受剥蚀的影响, 地质意义清楚, 但受断层产状影响突出且不能反映地质时间概念。因此, 本文同时采用两种研究方法进行对比研究, 可以取长补短, 更客观地反映东海陆架盆地南部地区生长断层的横向跃迁趋势和纵向演化特征。

4 生长断层区域动力学成因

结合大地构造背景和区域联合剖面(图 2)对东海陆架盆地南部地区恢复晚中生代到新生代盆地发育演化模式(图 14), 从晚中生代开始, 太平洋板块西缘与亚欧板块碰撞向下俯冲, 且太平洋板块俯冲位置在新生代以来大规模向东后撤^[17,21], 同时, 与印度板块向亚欧板块持续俯冲在亚欧板块东部边缘(如东海陆架盆地)产生的向东蠕散效应^[37,38]形成联合作用, 造成研究区应力场以 NW—SE 向拉张为主, 使东海陆架在新生代以来快速伸展扩张, 这种区域应力强度在晚中生代到渐新世时期明显大于中新世以后, 因此东海陆架盆地南部研究区新生代下部构造层发育大量的近 NE—SW 向生长正断层, 而一

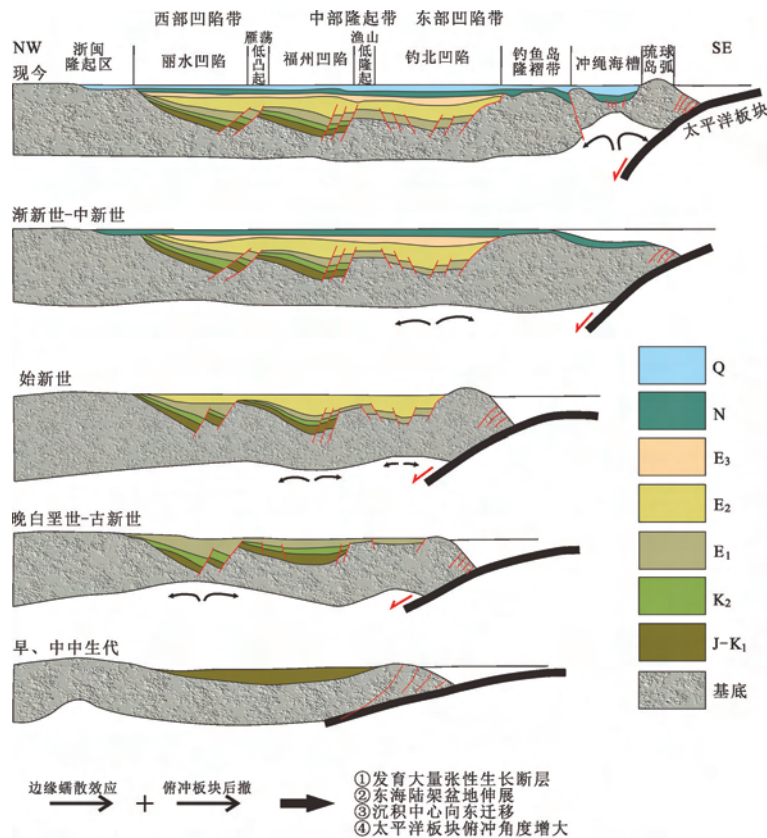


图 14 东海陆架盆地南部地区发育演化模式图

Fig.14 Evolution model of the southern East China sea shelf basin

级控盆断层和二级控凹断层在中新世以后持续活动,进一步促进了研究区“东西分带”构造格局形成。

5 结论

(1)东海陆架盆地南部研究区主要以雁形排列的NE—NNE向断裂体系为主,断层性质为生长正断层,走向与区域构造应力场近似垂直;(2)研究区内识别出阶梯状组合断层带、“Y”字型组合断层、多米诺式断层带、地堑、地垒等多种断裂组合样式;(3)断裂活动在时空上具有“自西向东,自南向北”迁移的趋势,区内西部坳陷带断裂发育较早,主要控制晚中生代—古新世地层,东部坳陷带断裂发育稍晚,控制始新世—中新世地层沉积;(4)研究区内不同级别生长断层对东海陆架盆地和各次级构造单元的形成和演化控制作用不同,可以说断裂活动是东海陆架盆地南部研究区中、新生代构造运动的主要表现形式。(5)在地震剖面上可见T50反射面之下存在一些断续层状反射特征,一、二、三级断层均向下切穿T50反射面,推测东海南部海相中生界地层保存相对完整,可能存在巨大的资源潜力。

参考文献(References)

- [1] Thorsen C E. Age of growth faulting in Southeast Louisiana [J]. Transactions, Gulf Coast Association of Geological Societies, 1963, 13:103-110.
- [2] Potter C J, Sanford W E, Yoos T R, et al. COCORP deep seismic reflection traverse of the interior of the North American Cordillera, Washington and Idaho; Implications for orogenic evolution[J]. Tectonics, 1986, 5(7): 1007-1025.
- [3] Potter C J. Origin, accretion and postaccretionary evolution of the Bridge River terrane, southwest British Columbia[J]. Tectonics, 1986, 5(7): 1027-1041.
- [4] Marc B, 周裕藩译. 斯瓦尔巴德上三叠统三角洲沉积物中的生长断层[J]. 大地构造与成矿学, 1978(1): 40-45. [Marc B. Growth faults developing in the upper Triassic delta sediments on the Svalbard[J]. AAPG Bulletin, 1978, 60(3).]
- [5] Garfunkel Z, 王闽. 地中海东部的大型海底旋转滑陷构造和生长断层[J]. 海洋地质译丛, 1985, 5(1): 35-43. [Garfunkel Z. The large rotation slump structure and growth fault on the eastern Mediterranean Sea[J]. Marine Geology, 1984, 55(3/4): 305-324.]
- [6] 徐开礼, 朱志澄. 构造地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1984. [XU Kaili, ZHU Zhicheng. Structural Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984.]
- [7] 雷宝华. 生长断层活动强度定量研究的主要方法评述[J]. 地球科学进展, 2012, 09: 947-956. [LEI Baohua. Review of methods with quantitative studies of activity intensity of the growth fault [J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(9): 947-956.]
- [8] 赵峰梅, 李三忠, 戴黎明, 等. 东海陆架盆地伸展率和压缩率及构造跃迁[J]. 地质科学, 2010(4): 1111-1124. [ZHAO Fengmei, LI Sanzhong, DAI Liming, et al. Extensional and compressive ratios from East China Sea shelf basin and their structural jumping[J]. Journal of Geological Science, 2010(4): 1111-1124.]
- [9] 张绍亮, 张建培, 唐贤君, 等. 东海西湖凹陷断裂系统几何学特征及其成因机制[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(1): 87-94. [ZHANG Shaoliang, ZHANG Jianpei, TANG Xianjun, et al. Geometry characteristic of the fault system in Xihu Sag in East China Sea and its formation mechanism[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2014, 34(1): 87-94.]
- [10] 秘丛永. 西湖凹陷中央反转带和平湖斜坡带断裂特征及演化[D]. 中国海洋大学, 2015. [BI Congyong. Fracture characteristics and evolution of the central inversion zone and the Pinghu slope zone in xihu depression zone[D]. Ocean University of China, 2015.]
- [11] 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 Guohua, ZHANG Jianpei. A discussion on the tectonic inversion and its genetic mechanism in the East China Sea Shelf Basin[J]. Geoscience Frontiers, 2015, 22(1): 260-270.]
- [12] 高乐. 东海陆架中生代残余盆地特征及勘探方向探讨[J]. 中国海上油气, 2005, 17(3): 148-152. [GAO Le. Characteristics of Mesozoic remnant basin on East China Sea shelf, and the prospecting direction [J]. China's Offshore Oil and Gas, 2005, 17(3): 148-152.]
- [13] 栾锡武, 高德章, 喻普之, 等. 中国东海及邻近海域一条剖面的地壳速度结构研究[J]. 地球物理学进展, 2001, 16(2): 28-34. [LUAN Xiwu, GAO Dezhong, YU Puzhi, et al. A section of the East China Sea and adjacent waters of the earth's crust velocity structure research[J]. Progress in Geophysics, 2001, 16(2): 28-34.]
- [14] 王可德, 王建平, 徐国庆, 等. 东海陆架盆地西南部中生代地层的发现[J]. 地层学杂志, 2000, 24(2): 129-131. [WANG Kede, WANG Jianping, XU Guoqing, et al. The Mesozoic strata found in southwest of the east China sea Shelf Basin [J]. Journal of Stratigraphy, 2000, 24(2): 129-131.]
- [15] 许薇龄, 乐俊英. 东海的构造运动及演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1988, 8(1): 9-21. [XU Weiling, LE Junying, The tectonic movement and evolution of the East China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1988, 8(1): 9-21.]
- [16] 周志武, 殷培龄. 东海地质调查的回顾与含油气远景展望[J]. 石油与天然气地质, 1985, 6(1): 1-14. [ZHOU Zhiwu, YIN Peiling. Review and the geological survey of the East China Sea oil and gas prospects [J]. Oil and Gas Geology, 1985, 6(1): 1-14.]
- [17] 王国纯. 东海盆地地质特征与油气富集有利地区探讨[J]. 石油实验地质, 1987, 9(1): 42-48. [WANG Guochun. The geological characteristics and the favorable area for oil and gas enrichment study on the East China sea basin [J]. Geological Oil Experiment, 1987, 9(1): 42-48.]

- [18] 金翔龙. 东海海洋地质[M].北京:海洋出版社,1992. [JIN Xianglong. The Marine Geology of East China Sea[M]. Beijing: Ocean Press, 1992.]
- [19] 李培廉,朱平. 试论东海陆架盆地的基底构造演化和盆地形成机制[J].海洋地质与第四纪地质,1992,12(3):37-43. [LI Peilian ZHU Ping. Discuss about the basement of the East China Sea Shelf Basin tectonic evolution and formation mechanism of the basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1992,12(1):37-43.]
- [20] 武法东,张燕梅,周平,等. 东海陆架盆地第三系沉积构造动力背景分析[J].现代地质,1999,2:37-41. [WU Fadong, ZHANG Yanmei, ZHOU Ping, et al. Tertiary sedimentary structure in the East China Sea shelf basin dynamic background analysis[J]. Modern Geology, 1999, 2:37-41.]
- [21] 冯晓杰,蔡东升,王春修,等. 东海陆架盆地中生代构造演化特征[J].中国海上油气,2003,17(1):33-37. [FENG Xiaojie, CAI Dongsheng, WANG Chunxiu, et al. The Cenozoic tectonic evolution characteristics of the East China Sea shelf basin[J]. China's Offshore Oil and Gas, 2003,17(1):33-37.]
- [22] 李家彪. 东海区域地质[M].北京:海洋出版社,2008. [LI Jiabiao. Regional Geology of the East China Sea[M]. Beijing: Ocean Press, 2008.]
- [23] 李家彪. 中国边缘海形成演化与资源效应[M].北京:海洋出版社,2008. [LI Jiabiao. China Marginal Sea Formation and Evolution of the Resource Effect[M]. Beijing: Ocean Press, 2008.]
- [24] 戴黎明,索艳慧,李三忠. 东海陆架盆地构造单元划分与特征[J].海洋地质与第四纪地质,2010,30(6):49-58. [DAI Liming, SUO Yanhui, LI Sanzhong. Division of tectonic units and the East China Sea shelf basin features[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2010, 30(6):49-58.]
- [25] 刘金水,廖宗延,贾健谊. 东海陆架盆地地质结构及构造演化[J].上海地质,2003(3):1-6. [LIU Jinshui, LIAO Zongyan, JIA Jianyi. The East China Sea shelf basin, the geological structure and structural evolution[J]. Shanghai Geological, 2003(3):1-6.]
- [26] 杨长清,杨传胜,李刚,等. 东海陆架盆地南部中生代构造演化与原型盆地性质探讨[J].海洋地质与第四纪地质,2012,32(3):105-112. [YANG Changqing, YANG Chuansheng, LI Gang, et al. The southern East China Sea shelf basin Mesozoic tectonic evolution and prototype basin nature[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(3):105-112.]
- [27] 杨艳秋,杨长清,李刚,等. 东海陆架盆地南部构造样式及分布特征[J].海洋地质与第四纪地质,2012,32(3):113-118. [YANG Yanqiu, YANG Changqing, LI Gang, et al. In the East China Sea shelf basin tectonic styles and distribution characteristics in the south[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(3):113-118.]
- [28] 龚建明,李刚,杨长清,等. 东海南部三叠纪地层分布[J].海洋地质与第四纪地质,2012,32(3):119-124. [GONG Jianming, LI Gang, YANG Changqing, et al. In the East China Sea south of the Triassic strata distribution[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(3):119-124.]
- [29] 张凡芹,王伟锋,戴俊生. 沾化凹陷断层活动性及其对层序发育的控制作用[J].石油与天然气地质,2003(3):253-259. [ZHANG Fanqin, WANG Weifeng, DAI Junsheng. Zhanhua sag of fault activity and its effect on the control of the sequence development [J]. Journal of Oil and Gas Geology, 2003(3):253-259.]
- [30] 赵密福,刘泽容,信荃麟,等. 惠民凹陷临南地区断层活动特征及控油作用[J].石油勘探与开发,2000,27(6):9-11. [ZHAO Mifu, LIU Zerong, XIN Quanlin, et al. Characteristics of fault activities in the huimin sag of south region and containment action[J]. Journal of Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(6):9-11.]
- [31] 陈刚,戴俊生,叶兴树,等. 生长指数与断层落差的对比研究[J].西南石油大学学报,2007(3):20-23. [CHEN Gang, DAI Junsheng, YE Xingshu, et al. Comparing the growth index and fault throw[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007(3):20-23.]
- [32] 赵勇,戴俊生. 应用落差分析研究生长断层[J].石油勘探与开发,2003(3):13-15. [ZHAO Yong, DAI Junsheng. Gap analysis is used to study growth fault[J]. Journal of Petroleum Exploration and Development, 2003(3):13-15.]
- [33] 李勤英,罗凤芝,苗翠芝. 断层活动速率研究方法及应用探讨[J].断块油气田,2000,7(2):15-17. [LI Qinying, LUO Fengzhi, MIAO Cuizhi. Fault activity rate method and application study[J]. Journal of Fault Block Oil and Gas Fields, 2000, 7(2):15-17.]
- [34] 杨茂新. 生长断层下降盘逆牵引背斜成因探讨[J].石油物探,1995(2):105-109. [YANG Maoxin. Growth fault down dropped block inverse traction anticline genesis study [J]. Journal of Petroleum Exploration, 1995(2):105-109.]
- [35] 陈刚,蒋弋平,周建新,等. 用古落差法研究沙埕地区断层活动强度[J].小型油气藏,2008,13(2):7-10. [CHEN Gang, JIANG Yiping, ZHOU Jianxin, et al. By the ancient drop method of sand Nian intensity of fault activity in the region [J]. Small Reservoirs, 2008, 13(2):7-10.]
- [36] 王冰洁,倪军娥,方度. 板桥凹陷钱圈地区主干断层活动性分析[J].新疆石油天然气,2008,4(1):26-33. [WANG Bingjie, NI June, FANG Du. Main fault activity in the Banqiao sag money area analysis[J]. Journal of Oil and Gas in Xinjiang, 2008, 4(1):26-33.]
- [37] 张琴华. 东海地区壳体构造演化及其盆地形成机制探讨[J].大地构造与成矿学,1994,18(4):311-320. [ZHANG Qin-hua. The tectonic evolution of shell and its formation mechanism in the East China Sea[J]. Geotectonica et Metallogenia, 1994, 18(4):311-320.]
- [38] 张海敏,张训华,孟祥君. 中国东部海域及邻区的几个地质问题-中国近海地质与矿产地质[M].北京:海洋出版社,2005:7-13. [ZHANG Haiqi, ZHANG Xunhua, MENG Xiangjun. Several geological problems in the eastern China seas and adjacent areas-China's offshore geology and mineral geology[M]. Beijing: Ocean Press, 2005:7-13.]