

琼东南盆地新生代 伸展过程及其区域性差异定量研究

张焱^{1,2}, 熊小峰², 唐历山², 杨希冰², 朱继田²

1 广州海洋地质调查局; 2 中海石油(中国)有限公司湛江分公司

摘要 以琼东南盆地研究对象,自西向东选取了能控制盆地构造格局的7条骨干大剖面,应用 Move 软件中的 2D 模块分别对这 7 条骨干大剖面进行平衡剖面恢复,并计算了各剖面不同时期的伸展量、伸展率和伸展速率,在此基础上对琼东南盆地的构造演化过程及其区域性差异进行定量研究。研究表明:琼东南盆地自新生代以来处于一个持续伸展的过程,在 36~28.4 Ma 期间(崖城组沉积期)出现一个伸展高峰期,在 36~23 Ma 期间(渐新世)伸展速率达到最大值,说明渐新世断层活动最强烈,为盆地的主要伸展阶段;从 23 Ma 至今整体来说伸展率和伸展速率呈现逐渐减小的趋势,盆地伸展逐渐减弱。

关键词 构造演化; 伸展率; 伸展速率; 新生代; 琼东南盆地

中图分类号: TE121.2 **文献标识码**: A

0 前言

琼东南盆地位于南海西北部陆缘,呈北东向延伸,东西长 290 km,南北宽 181 km,大体围绕海南岛南部呈弧形展布^[1-4],属新生代含油气盆地。盆地的形成和构造演化显示了南海扩展及太平洋板块运动的大量信息,同时还控制着新生代的沉积、烃源岩的发育及油气的运移和聚集。因此,研究琼东南盆地构造演化特征对揭示该区石油地质条件及太平洋板块运动过程有重要的意义。前人对琼东南盆地的形成和演化已有相关的分析和结论^[2-4],但利用区域多剖面来分析全盆地伸展过程及其差异性的并不多见。本文自西向东选取了能控制琼东南盆地构造格局的 7 条骨干剖面,应用 2D Move 软件分别对其进行平衡剖面恢复,并计算各剖面不同时期的伸展率、伸展速率和伸展量,以此为基础对琼东南盆地的构造演化过程及其区域差异进行了定量研究。

1 区域地质概况

南海西部琼东南盆地深水区(水深 300~3 000 m)

的面积约五万多平方千米,是我国南海近年来深水油气勘探的重要战略区和油气发现区之一,目前全部为自营勘探区^[5-7]。区域剖面几何学特征分析显示:琼东南盆地是一个新生代陆缘拉张盆地,为位于南海西北陆缘呈北东走向的伸展裂陷带,具有“南北分带、东西分块”的构造特点,主要包括北部坳陷带、中央坳陷带和南部隆起等 3 个一级构造单元^[8-13](图 1)。

琼东南盆地的形成演化受印支板块与欧亚板块碰撞、华南陆缘裂谷、南海扩张等多种区域构造作用所影响:始新世,发育初始裂陷,盆地以北东—北东向展布为主;渐新世早期,印支板块与欧亚板块强烈碰撞,青藏高原隆升,红河断裂走滑活动,形成挤出拉张效应,琼东南盆地沉降加剧,断裂以北东东—近东西向为主;渐新世晚期,断裂活动逐渐减弱,以北西向为主,东区受南海扩张效应影响,地幔隆升显著,岩浆侵入活动加强;新近纪,进入裂后拗陷期,早期盆地整体沉降,从晚中新世(10 Ma)开始,早期断陷北部控凹边界断裂 2 号断裂等又加速活动,促成深水陆坡的发育,形成典型的陆架—陆坡沉积体系,中

收稿日期: 2018-11-26; 改回日期: 2020-08-28; 网络出版日期: 2020-11-12

本文受“十三五”国家重大科技专项所属课题“琼东南盆地深水区大中型气田形成条件及勘探关键技术”(编号: 2016ZX05026-002)资助

第一作者: 张焱, 博士, 高级工程师, 从事石油地质、数学地质综合研究。通信地址: 510730 广东省广州市黄埔区南岗街道广海路 188 号大院办公区; E-mail: zhang_yan1117@163.com

央坳陷带与南部隆起区成为深水区^[14]。

新近系下中新统(三亚组)、中中新统(梅山组)主要为浅海沉积,上中新统(黄流组)沉积时盆地北部已形成典型的陆架陆坡体系,发育深水陆坡沉

积,坳陷中部近似平行坡折带的中央峡谷处于发育鼎盛期,浊积水道砂和块体流分布广。上新统莺歌海组一第四系为半深海沉积,莺歌海组局部发育大型海底扇^[7,15-16](表1)。

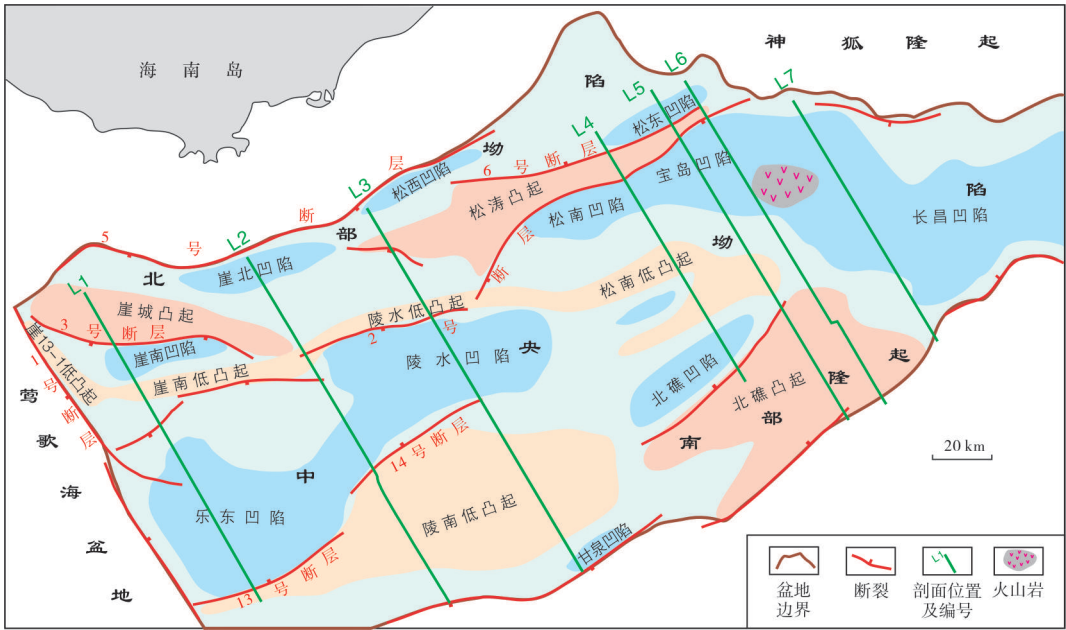


图1 琼东南盆地构造单元划分图

Fig. 1 Division map of tectonic units in Qiongdongnan Basin

表1 琼东南盆地新生代构造演化与活动特征(据文献[7])

Table 1 Tectonic evolution and activity characteristics of Cenozoic in Qiongdongnan Basin(cited from reference [7])

地 层			演化阶段	地震反射界面	地质年龄/Ma	构造运动	沉积环境	构造活动特征
第四系	更新统	乐东组	拗陷阶段	T20	1.8	东沙运动	浅海—半深海	陆坡推进—重力断裂作用
	上新统	莺歌海组		T30	5.5			
	中新统	黄流组		T40	11.6			
		梅山组		T50	16.0			
		三亚组	断—拗阶段	T60	23.0	南海运动	滨浅海	弱伸展构造作用
古近系	渐新统	陵水组	拗—断阶段	T70	28.4	珠江运动Ⅱ幕	浅海—海陆过渡	主要伸展变形期
		崖城组		T80	36.0	珠江运动Ⅰ幕		
		岭头组		T100	45.0	神狐运动		
	始新统		断陷阶段					

2 平衡剖面恢复

2.1 骨干剖面的选取

平衡剖面是研究构造地质学的重要手段之一,其遵循的基本原则是体积守恒原理,即岩石变形只是形态发生改变。通常为了方便,在实际应用过程中采用面积守恒、层长守恒、位移守恒等一系列几何法则,以此来制约剖面解释的随意性。

琼东南盆地的地表和近地表区域构造线方

向为北东—南西向,新生代以来以北西—南东向张裂为主,而且盆地内部没有物质的塑性流动,符合平衡剖面应用的基本条件。进行平衡剖面恢复时最好选取垂直于盆地区域构造线的剖面。依据该原则,本次研究选取横跨琼东南盆地的、能够控制盆地基本构造格局的7条北西—南东向区域性地震—地质大剖面,这7条剖面自西向东依次命名为L1—L7,剖面的地震—地质综合解释见图2,平面位置见图1,各剖面的基本情况如表2所示。

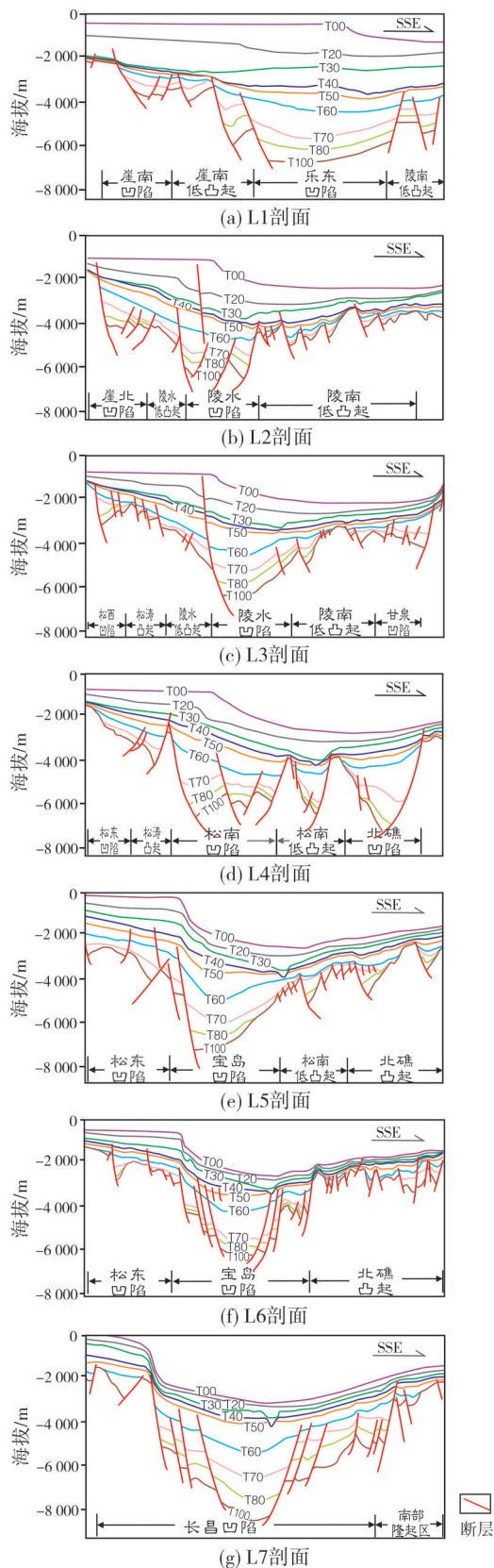


图2 琼东南盆地区域地震-地质综合解释剖面图
Fig. 2 Regional seismic-geological interpretation profiles of Qiongdongnan Basin

表2 琼东南盆地7条大剖面的基本情况

Table 2 Basic information of 7 key profiles in Qiongdongnan Basin

剖面名称	剖面长度/m	剖面所经过的构造单元
L1	112 120.5	崖城凸起、崖南凹陷、崖南低凸起、乐东凹陷、陵南低凸起
L2	151 805.8	崖北凹陷、陵水低凸起、陵水凹陷、陵南低凸起
L3	140 304.9	松西凹陷、松涛凸起、陵水低凸起、陵水凹陷、陵南低凸起、甘泉凹陷
L4	91 096.1	松东凹陷、松涛凸起、松南凹陷、松南低凸起、北礁凹陷、北礁凸起
L5	124 957.6	松东凹陷、松涛凸起、宝岛凹陷、松南低凸起、北礁凸起
L6	162 626.7	松东凹陷、宝岛凹陷、北礁凸起
L7	114 769.6	长昌凹陷、南部隆起区

2.2 平衡剖面恢复与计算结果

依据平衡剖面恢复的原理,应用软件2DMove对7条剖面进行平衡和恢复^[17],通过平衡剖面恢复,得到剖面变形前的长度,从而计算每个时期地层的伸展量和伸展率。7条骨干剖面各时期的伸展量所占总伸展量的百分比情况如图3所示。7条剖面各时期的伸展量(ΔL)、伸展量占总伸展量的比重(R)、伸展率(r)和伸展速率(v)的计算结果见表3。表3中, ΔL 为伸展后剖面长度减去伸展前剖面长度(m); r 为伸展量与伸展前剖面长度的比值(%); v 为伸展量与伸展持续时间的比值(mm/a)。这4个参数的值越大,表明构造活动越强烈,断层活动性越强。图4为测线L4的平衡剖面恢复结果图。

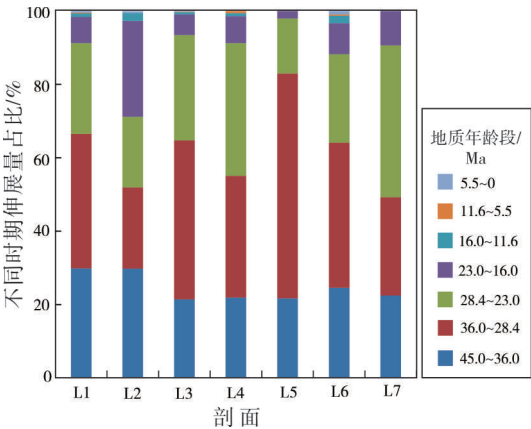


图3 琼东南盆地7条大剖面不同时期的伸展量
占总伸展量的百分比棒图

Fig. 3 The proportion bar graph of extension amount in different periods to total extension amount of 7 key profiles in Qiongdongnan Basin

表3 琼东南盆地7条剖面不同变形时期伸展量(ΔL)、伸展量占总伸展量比重(R)、伸展率(r)和伸展速率(v)

Table 3 The amount of extension, the proportion of extension amount to total extension amount, extension rate and extension velocity of 7 key profiles in different deformation periods of Qiongdongnan Basin

变形 时期/ Ma	L1剖面				L2剖面				L3剖面				L4剖面			
	$\Delta L/m$	$R/\%$	$r/\%$	$v/(mm\cdot a^{-1})$	$\Delta L/m$	$R/\%$	$r/\%$	$v/(mm\cdot a^{-1})$	$\Delta L/m$	$R/\%$	$r/\%$	$v/(mm\cdot a^{-1})$	$\Delta L/m$	$R/\%$	$r/\%$	$v/(mm\cdot a^{-1})$
45~36	8 489.4	27.25	7.57	0.943	10 917.1	27.21	7.19	1.213	4 930.5	20.24	3.51	0.548	8 796.3	18.77		
36~28.4	11 248.4	36.11	9.33	1.480	8 727.2	21.75	5.36	1.148	10 337.3	42.44	7.12	1.360	14 619.0	31.20		
28.4~23	8 280.6	26.58	6.28	1.533	7 965.0	19.85	4.65	1.475	7 325.0	30.07	4.71	1.356	18 281.1	39.01		
23~16	2 544.5	8.17	1.82	0.364	11 335.6	28.25	6.32	1.619	1 513.3	6.21	0.93	0.216	4 299.9	9.18		
16~11.6	342.4	1.10	0.24	0.078	1 180.1	2.46	0.52	0.215	159.8	0.66	0.10	0.036	502.8	1.07		
11.6~5.5	76.1	0.24	0.05	0.012	0	0	0	0	31.8	0.13	0.02	0.005	358.3	0.76		
5.5~0	170.3	0.55	0.12	0.046	0	0	0	0	59.1	0.24	0.04	0.016	0	0		
变形 时期/ Ma	L4剖面				L5剖面				L6剖面				L7剖面			
	$r/\%$	$v/(mm\cdot a^{-1})$	$\Delta L/m$	$R/\%$	$r/\%$	$v/(mm\cdot a^{-1})$	$\Delta L/m$	$R/\%$	$r/\%$	$v/(mm\cdot a^{-1})$	$\Delta L/m$	$R/\%$	$r/\%$	$v/(mm\cdot a^{-1})$	$r/\%$	$v/(mm\cdot a^{-1})$
45~36	9.66	0.977	5 435.4	20.53	4.35	0.604	10 479.2	22.30	6.44	1.164	6 123.1	20.67	5.34	0.680		
36~28.4	14.63	1.924	16 005.5	60.45	12.27	2.106	17 984.4	38.30	10.40	2.366	7 703.8	26.00	6.37	1.014		
28.4~23	15.96	3.385	4 425.5	16.71	3.02	0.820	12 105.0	25.80	6.33	2.242	12 640.5	42.67	9.83	2.341		
23~16	3.24	0.614	610.5	2.31	0.40	0.087	4 499.0	9.59	2.21	0.643	3 159.6	10.66	2.24	0.451		
16~11.6	0.37	0.114	0	0	0	0	1 153.6	2.46	0.56	0.262	0	0	0	0		
11.6~5.5	0.26	0.059	0	0	0	0	168.1	0.36	0.08	0.028	0	0	0	0		
5.5~0	0	0	0	0	0	0	530.1	1.13	0.25	0.143	0	0	0	0		

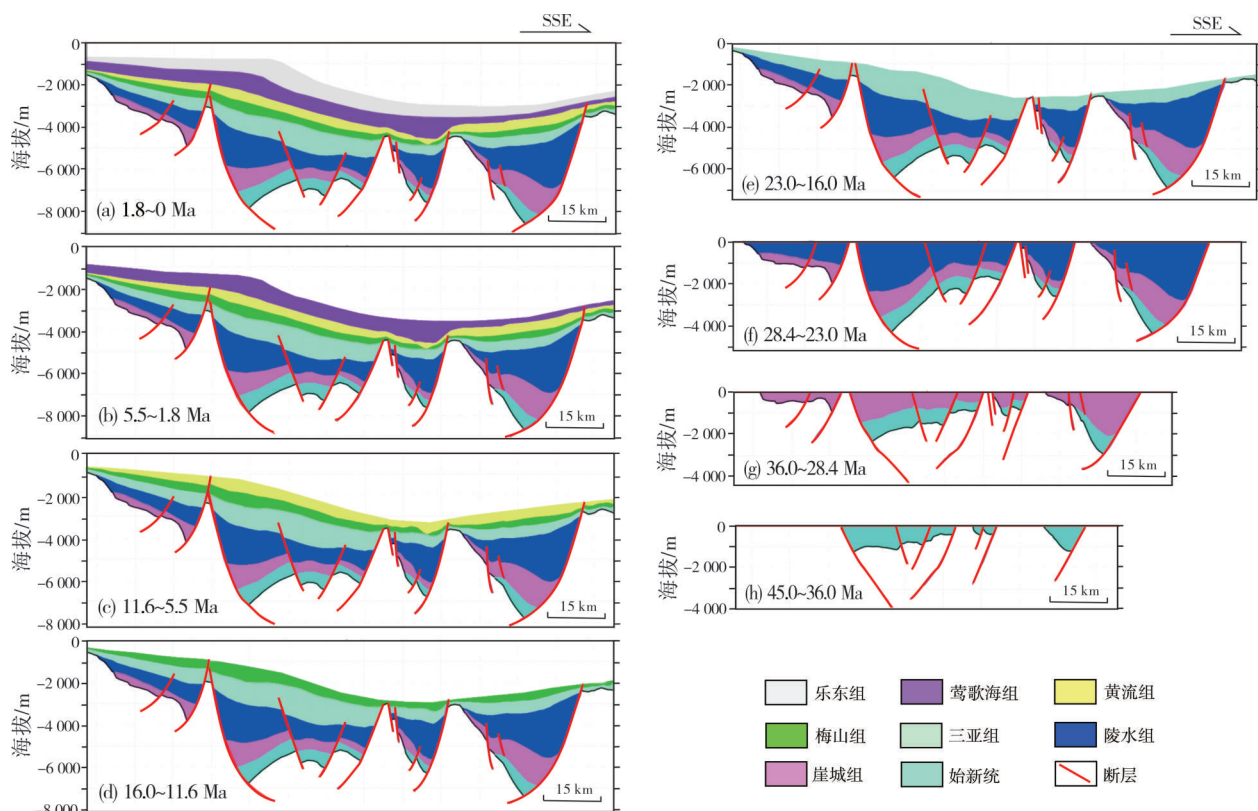


图4 琼东南盆地L4剖面的平衡剖面恢复结果

Fig. 4 Restoration results of the balanced profile L4 in Qiongdongnan Basin

3 讨论

这7条骨干剖面尽管其原始长度不同,但在伸展率、伸展速率及区域构造位置等方面显示出一定的规律性。

3.1 阶段性伸展差异

45~36 Ma期间,L1—L7各剖面伸展量占总伸展量的比重、伸展率都较大,但伸展速率均不大,这说明这一时期盆地总体处于缓慢伸展状态。

36~28.4 Ma期间,各剖面伸展量占总伸展量的比重总体来说大于45~36 Ma期间,位于东区的L4—L6剖面伸展率均大于西区,伸展速率也较45~36 Ma时期有所增大。这说明36~28.4 Ma期间构造活动较上一时期强烈。

28.4~23 Ma期间,大多数剖面伸展量占总伸展量的比重较上一时期来说相对减小,伸展率也多不同程度地减小,但位于东西区之间的L4剖面的 R 和 r 均达到最大值。总的来说,该时期地壳仍然较快地伸展减薄,构造活动较为强烈。

23~16 Ma期间,除了L2剖面外,其他剖面地层

伸展量占总伸展量的比重、伸展率和伸展速率较上一时期明显减小,这说明盆地在该时期内伸展变形开始明显减弱,地层沉积不完全受断层控制。

16~11.6 Ma期间,各剖面伸展量占总伸展量的比重、伸展率和伸展速率进一步减小,说明该时期构造活动非常微弱,伸展变形程度更低,地层沉积几乎不受断层控制。

通过对比各剖面各阶段伸展特征,并结合前人研究成果^[7],认为琼东南盆地新生代以来的构造活动在不同阶段具有不同的特征^[18-21]:断陷阶段(45~36 Ma,古新世—始新世),断裂控制了盆地的沉降和沉积充填,南部隆起区凹陷的规模较小;拗—断阶段(36~23 Ma,渐新世),构造沉降、地层沉积中心不沿主干断裂分布,盆地处于一个持续伸展的过程,在36~28.4 Ma期间出现一个伸展高峰期,伸展速率达到最大值,该时期断层活动最强烈,为盆地的主要伸展阶段;断—拗阶段(23~16 Ma,早中新世),在拗陷基础上发生断裂作用,拗陷作用占主导,这一时期盆地伸展活动明显减弱,盆地断层活动性减弱,盆地大多数断层不再活动;拗陷阶段(16~0 Ma,中中新世—更

新世),上新世(5.5 Ma)以来整个盆地的演化进入了一个新的阶段,与裂后缓慢的热沉降不同,该时期盆地的沉降速率突然加快,特别是在跨过了陆架坡折进入深水区之后,盆地的沉降速度明显加快,形成的可容纳空间增大,但由于物源因素的影响,盆地南部沉积地层较薄。

基底性质和先存断裂是影响伸展作用差异性的重要原因,基底性质的差异造成了盆地东、西部凹陷在古近纪阶段的断裂构造形态差异明显,而先存断裂的位置及断裂走向影响了裂陷盆地内凹陷发育位置及平面展布方向,进而导致伸展作用的不同^[22]。

3.2 区域性伸展差异

从伸展速率图(图5)和伸展率直方图(图6)可知:45~23 Ma期间是研究区的主要伸展变形时期,盆地不同区块伸展变形存在明显差异,即盆地东区的伸展率和伸展速率明显大于西区;在23~1.8 Ma期间,断层活动较弱,伸展变形强度较小,L1至L7各剖面的伸展率和伸展速率均较小,不同区域之间的差异不大。

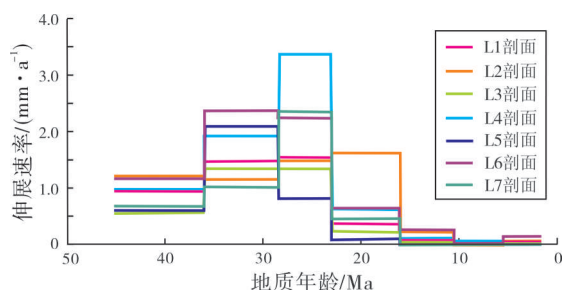


图5 琼东南盆地7条大剖面伸展速率图

Fig. 5 Extensional velocity graph of 7 key profiles in Qiongdongnan Basin

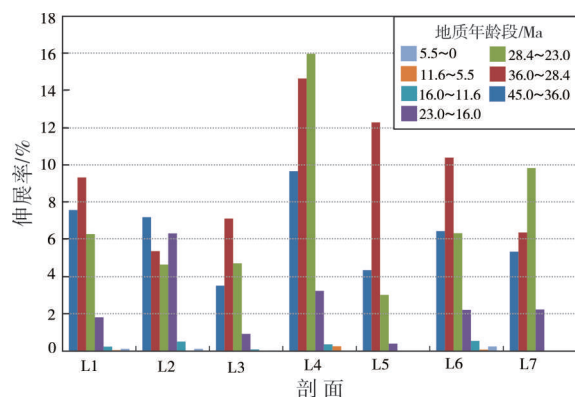


图6 琼东南盆地7条大剖面伸展率直方图

Fig. 6 Histogram of extension rate of 7 key profiles in Qiongdongnan Basin

4 结论

琼东南盆地新生代以来一直处于一个持续伸展的过程,并于36~23 Ma期间出现一个伸展高峰期,之后整体呈现伸展率和伸展速率都逐渐减小的趋势。上新世(5.5 Ma)以来,整个盆地的演化进入了一个新的阶段,与裂后缓慢的热沉降不同,该时期盆地的沉降速率突然加快,特别是在跨过陆架坡折进入深水区,盆地的沉降明显加快,形成的可容纳空间增大,但由于物源因素的影响,盆地南部沉积地层较薄。

从琼东南盆地7条骨干剖面不同时期的伸展速率和伸展率对比可知:在45~23 Ma期间研究区的主要伸展变形时期,盆地不同区块伸展变形存在明显差异,即盆地东区的伸展率和伸展速率明显大于西区;23 Ma至现今,断层活动较弱,伸展变形强度较小,伸展率和伸展速率都较小,不同区域之间的差异性不大。

参考文献

- [1] 蔡乾忠. 中国海域油气地质学[M]. 北京: 海洋出版社, 2005: 74.
- [2] 谢玉彦, 王涛, 张一伟, 等. 琼东南盆地西南部新生代裂陷特征与岩浆活动机理[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(2): 199-205.
- [3] 谢玉彦, 张一伟, 孙珍, 等. 琼东南盆地新生代发育机制的模拟研究[J]. 地质前缘, 2008, 15(2): 232-241.
- [4] 谢玉洪, 童传新, 范彩伟, 等. 琼东南盆地断裂系统特征与演化[J]. 大地构造与成矿学, 2015, 39(5): 795-807.
- [5] 张焱, 裴健翔, 周永章, 等. 非线性技术在琼东南盆地深水区陵水17-2气田物源分析和储层预测中的应用[J]. 地质学报, 2016, 90(3): 559-568.
- [6] 张焱, 张迎朝, 杨希冰, 等. 琼东南盆地深水区中央峡谷油气指标的多重分形性分析[J]. 海洋学报, 2016, 38(5): 133-140.
- [7] 张迎朝, 甘军, 杨希冰, 等. 琼东南盆地陵水凹陷构造演化及其对深水大气田形成的控制作用[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(10): 22-31.
- [8] 龚再升, 李思田, 等. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [9] 龚再升, 李思田, 等. 南海北部大陆边缘盆地油气成藏动力学研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [10] 李绪宣, 朱光辉. 琼东南盆地断裂系统及其油气输导特征[J]. 中国海上油气, 2005, 17(1): 1-7.
- [11] 吕宝凤, 袁亚娟. 南海北部深水盆地沉积-构造的差异性及其油气意义[J]. 大地构造与成矿学, 2008, 32(4): 441-447.
- [12] 谢玉洪. 南海北部自营深水天然气勘探重大突破及其启示

- 示[J]. 天然气工业, 2014, 34(10): 1-8.
- [13] 张功成. 南海北部陆坡深水区构造演化及其特征[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 528-533, 541.
- [14] 能源, 吴景富, 漆家福, 等. 南海北部深水区新生代盆地三层结构及其构造演化[J]. 地质学报, 2013, 87(3): 403-414.
- [15] 李俊良, 左倩媚, 解习农, 等. 琼东南盆地深水区新近系沉积特征与有利储盖组合[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(6): 109-116.
- [16] 左倩媚, 张道军, 王亚辉, 等. 琼东南盆地深水区新近系海底扇沉积特征与资源潜力[J]. 海洋学报, 2016, 38(11): 105-116.
- [17] 王雪, 吕宝凤, 梁捷尉, 等. 南海北部珠江口盆地新生代伸展过程及其区域差异性定量研究[J]. 海洋通报, 2016, 35(5): 507-515, 544.
- [18] HAYES D E. The tectonic and geologic evolution of Southeast Asia seas and islands [M]. Washington D C: American Geophysical Union Geophysical Monograph, 1980, 23: 89-104.
- [19] NORTHROP C J, ROYDEN L H, BURCHFIEL B C. Motion of the Pacific plate relative to Eurasia and its potential relation to Cenozoic extension along the eastern margin of Eurasia [J]. Geology, 1995, 23(8): 719-722.
- [20] TAPPONNIER P, PELTZER G, ARMIJO R. On the mechanics of the collision between India and Asia [M]// Geological Society of London special publications 19, 1986: 113-157.
- [21] TAYLOR B, HAYES D E. Origin and history of the South China Sea Basin [M]// The tectonic and geologic evolution of Southeast Asian seas and islands: part 2. Washington DC: American Geophysical Union Geophysical Monograph, 1983, 27: 23-56.
- [22] 张佳星, 尹宏伟, 朱继田, 等. 基底性质对断裂构造的影响: 以琼东南盆地为例 [J]. 高校地质学报, 2018, 24(4): 563-572.

编辑: 黄革萍

Quantitative study on Cenozoic extension process and regional differences in Qiongdongnan Basin

ZHANG Yan, XIONG Xiaofeng, TANG Lishan, YANG Xibing, ZHU Jitian

Abstract: Taking Qiongdongnan Basin as the research object, 7 key sections that can control the basin's tectonic pattern are selected from west to east to restore the balanced profile by using 2D Module of Move software. The extension distances, extension rates and extension velocities of these 7 sections in different periods are calculated. On this basis, the tectonic evolution process and its regional differences in the Qiongdongnan Basin are quantitatively studied. The results show that: (1) the Qiongdongnan Basin has been in a continuous extension process since Cenozoic, and an extension peak appeared during 36 to 28.4 Ma (deposition period of Yacheng Formation), and the extension rate reached the highest value during 36 to 23 Ma (Oligocene), which indicates that the fault activity is the most intense in Oligocene, and Oligocene is the main extension period of the basin; (2) from 23 Ma to the present, the extension rate and extension velocity have shown a gradual decreasing trend, and the extension of the basin has gradually weakened.

Key words: tectonic evolution; extension rate; extension velocity; Cenozoic; Qiongdongnan Basin

ZHANG Yan, First author: PhD, Senior Engineer, engaged in comprehensive research of petroleum geology and mathematical geology. Add: No. 188 Guanghai Rd., Huangpu District, Guangzhou, Guangdong 510730, China