

doi:10.3799/dqkx.2015.012

北部湾盆地福山凹陷古近系双层结构形成机制

林正良^{1,2}, 王 华³, 李红敬¹, 马庆林⁴, 李 媛³, 赵淑娥³

1. 中国石化石油物探技术研究院, 江苏南京 211103

2. 中国石油大学地球科学学院, 北京 102249

3. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

4. 中石油南方石油勘探开发有限责任公司, 广东广州 510240

摘要: 以北部湾盆地区域构造分析为基础, 在福山凹陷构造活动性研究的基础上探讨了福山凹陷形成的动力学机制, 分析了凹陷东部地区古近系地层中双层结构的形成机制问题。研究认为: 福山凹陷在平面上受红河断裂的左行走滑和海南隆起顺时针旋转的双重作用, 流三段沉积期凹陷在旋转—拉分作用下发生强烈的水平伸展, 为东部地区下构造层中的反向断层提供动力源, 海南隆起的快速隆升作用形成了上构造层中的重力滑动生长断层, 渐新统早期在流二段泥岩中发育的火成岩侵入体在凹陷的东部地区形成一道天然屏障, 最终形成双层结构。结果表明, 双层结构形成过程可划分为裂陷雏形期、下构造层伸展断裂期、中部塑性层发育期、上构造层形成期以及双层结构定型期 5 个主要阶段。

关键词: 差异伸展; 双层结构; 成因机制; 福山凹陷; 北部湾盆地; 石油地质。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2015)01-0169-10

收稿日期: 2014-09-03

Genetic Mechanism of Double-Layer Structure in Paleogene of Fushan Sag, Beibu Gulf Basin

Lin Zhengliang^{1,2}, Wang Hua³, Li Hongjing¹, Ma Qinglin⁴, Li Yuan³, Zhao Shu'e³

1. SINOPEC Geophysical Research Institute, Nanjing 211103, China

2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

3. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. China Southern Petroleum Exploration and Development Corporation, Guangzhou 510240, China

Abstract: Based on the regional tectonic analysis of Beibu Gulf basin, in this paper, the tectonic activities of Fushan sag is studied, the dynamic formation mechanism of the sag is discussed, and the formation mechanism of double-layer structure in Paleogene strata of the eastern area is analyzed. It is regarded that Fushan sag was under the dual effect of sinistral strike-slip of Red River fault and clockwise rotation of Hainan uplift. During the deposition period of the third member of Liushagang Formation (Els₃), intense horizontal extension occurred during the rotation and pull-apart of the sag, which provided dynamic source for the antithetic faults of the lower tectonic layer in the eastern area. The rapid uplift of Hainan uplift led to the formation of gravity slumping growth faults in the upper tectonic layer. In the Early Oligocene, the intrusive igneous rocks in the second member of Liushagang Formation (Els₂) formed a natural barrier. Finally, there formed the double-layer structure. The forming process of the double-layer can be divided into five major stages as follows: rifting embryonic period, extending faulted period of the lower tectonic layer, development period of middle plastic layer, formation period of tectonic system, and finalizing period of double-layer structure.

Key words: difference extension; double-layer structure; genetic mechanism; Fushan sag; Beibu Gulf basin; petroleum geology.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(No.2014CB239201); 国家自然科学基金项目(Nos.41272722, 41172123).

作者简介: 林正良(1978—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事构造地质学方面的研究工作. E-mail: lzl-lll@163.com

引用格式: 林正良, 王华, 李红敬, 等, 2015. 北部湾盆地福山凹陷古近系双层结构形成机制. 地球科学——中国地质大学学报, 40(1): 169-178.

0 引言

从 20 世纪 80 年代开始,伸展构造成为一项重要的研究课题,学者们论述了伸展作用和相应的模式(Wernicke, 1981; Lister, 1986).朱志澄(1987)系统地论述了伸展构造和拆离断层的关系,总结了伸展构造的类型、模式以及伸展量的估算等问题.至此开启了中国研究有关伸展构造的热潮.学者们从伸展构造与油气成藏(刘和甫等, 2005)、伸展构造演化的模拟(时秀朋和李理, 2010)等方面对伸展构造进行了研究.在强烈的伸展背景下,盆地内部会形成复杂的应力状态,进而在盆地的不同位置形成伸展、走滑、反转等不同构造样式(姜华等, 2008; 李德威, 2008; 徐先兵等, 2014).近年来由于地震勘探技术的快速发展,使不同地区、不同层次、不同类型的伸展构造及其派生出来的构造样式被大量揭示,并不断地丰富着人们对伸展构造体系的认识.

北部湾盆地属板内裂谷盆地,处于大地伸展构造背景下,但由于接近板块边缘,同时也受到板块碰撞、分离的影响,其构造活动比内陆盆地要强一些.而福山凹陷位于北部湾盆地的东南端,与海南隆起相临,其构造位置更为特殊.与相临的莺歌海盆地以及珠江口盆地相比,福山凹陷内古近系沉积地层发育,并详细记录了大量新生界早期中国南海陆架区的构造以及沉积事件信息.

福山凹陷东部地区古近系地层发育典型,由上、下两套断裂系统构成双层结构.关于福山凹陷双层结构的成因问题,于俊吉等(2004)和罗群等(2007)

认为,凹陷内下构造系统中发育的南倾反掉正断裂系统的原因如下:流三段至流二段沉积时期由于临高断裂的强烈活动,导致凹陷中部马袅断层以南的地区发生强烈掀斜作用,产生向南的拉张力,进而形成了南倾正断层系统.这组断裂为后生断裂,不控制沉积,且形成以后就不再活动,从而为深层反向遮挡油气成藏提供了有利遮挡条件.流二段以上的浅层断裂系统是在基底大断层的控制下,由于临高断裂强烈活动,凹陷的沉降中心向北迁移,使沉降、沉积中心移到福山凹陷北部地区.与此同时由于海南隆起的抬升,形成南部高北部低的区域构造背景,早期沉积的地层在重力作用下向北发生滑移,由此产生向北的拉张作用力,进而形成产状为向北倾的正断层组合.这种解释模型在近年来的精细勘探中遇到了问题.该模型没有解释为什么只有凹陷东部地区发育双层结构,以及为什么上构造系统中的断裂在后期的持续活动中始终没有穿过流一段的底界面(T_5)等问题.

通过对福山凹陷内构造进行活动性研究,结合区域构造分析以及前人研究成果,本文系统分析了福山凹陷东部地区双层结构的形成机制问题.

1 区域地质概况

北部湾盆地位于欧亚板块东南缘,并与印度—澳大利亚板块以及太平洋板块毗邻(图 1).在地质发展历史中,该盆地受到中国大陆边缘、太平洋、菲律宾海板块以及南海壳形成演化的深刻影响.该地

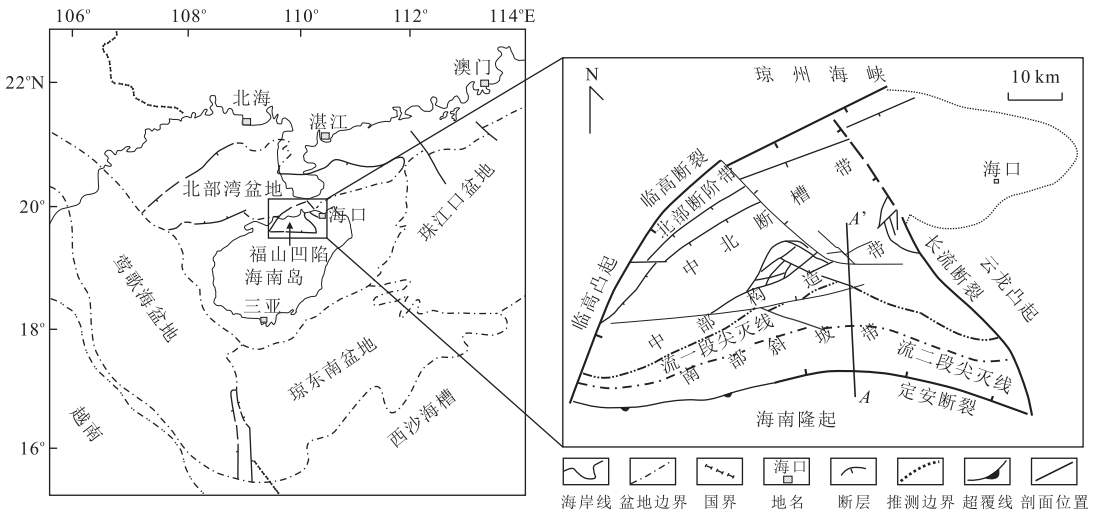


图 1 福山凹陷构造位置
Fig.1 The structural location map of Fushan sag

区是新生代构造活动最活跃的地区之一,具有其独特构造演化特征(田在艺和王善书,1985;徐亚东等,2014).

福山凹陷为北部湾盆地中一个新生代生油凹陷,位于北部湾盆地东南缘,海南隆起区的北部斜坡带上.按古近系地层的分布范围计算,凹陷总面积约为 2 920 km²,新生界地层最大厚度约 9 000 m.福山凹陷平面展布总体呈北东、北东东向,具有南北分带、东西分块的构造特征(石彦民等,2007;马庆林等,2012).

在平面上福山凹陷北部地区受临高断裂、东部地区的长流断层和南部地区的定安断层控制,呈现出与北部湾盆地相近的三角形形态.南部地区以定安断层为界,并向上超覆于海南隆起,呈典型的北断南超结构.根据地质结构,凹陷内部可以划分为 4 个次级构造带,即南部斜坡带、中部构造带、中北断槽带以及北部断阶带,在每个构造带内又可以进一步划分出多个次级构造单元(图 1).凹陷中部的花场地区发育一个大型的构造转换带,转换带将凹陷分为两个伸展构造体系(刘恩涛等,2012).福山凹陷构造演化过程经历了古近纪张裂阶段(断陷)和新近纪裂后阶段(拗陷),张裂时期构造沉降中心的空间迁移较大,使得凹陷的结构及构造特征复杂化(于俊吉等,2004).

福山凹陷东部地区古近系地层发育典型,由两套断裂系统构成双层结构,其中下构造层发育的基底断裂,产状南倾,向上消失于流二段泥岩中,并与区域北倾的地层构成反向正断层发育区;上构造层

发育的断层产状北倾,呈上陡下缓铲状形态,与区域地层构成顺向张性正断层发育区.上构造层中的铲状断层具有重力滑脱特征,下降盘地层在重力作用下发生滑动挤压并发生塑性变形,在地震剖面上表现为丘状反射特征.上、下构造层的分界面位于流二段中部地层中(图 2).而这种双层构造只在福山凹陷的东部地区发育.双层结构中上下两套断裂系统的成藏条件具有较大差异性.罗群和庞雄奇(2008)总结了福山凹陷内顺向和反向断裂的控藏机理及油气聚集模式,并提出了下构造层的反向断层控制的下盘圈闭是最有利的油气勘探目标.深层反向正断层发育为区域断块、断鼻等为圈闭形成提供了良好的边界条件,形成了众多断层相关圈闭,加上深层反向断层具有良好的封闭性,对油气成藏极为有利.流三段烃源岩产生的油气沿着不整合面向上运移,有利于形成构造-岩性油气藏.

2 构造特征

盆地的形成和演化过程与区域性构造运动密切相关.对于福山凹陷而言,其构造演化与其西侧相邻的红河断裂带、南部的海南隆起以及研究区深部动力学过程密切相关,因此通过分析该盆地临区古近纪的构造活动特征,对于认识福山凹陷东部地区双层结构的形成演化具有重要的意义.

2.1 区域构造背景分析

白垩纪晚期以来,南海北部大陆边缘岩石圈是

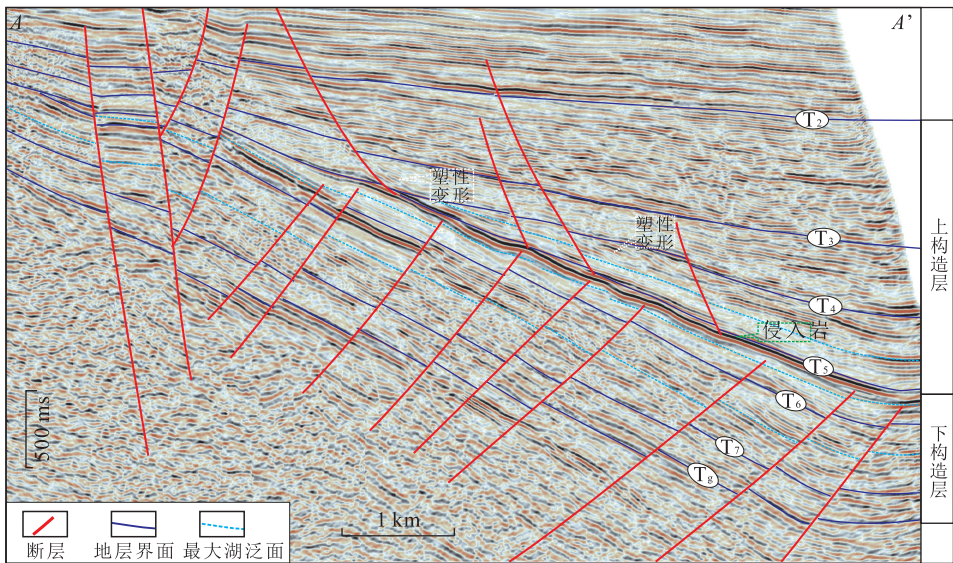


图 2 双层结构典型地震剖面(剖面位置见图 1)

Fig.2 Typical seismic section of double-layer structure

在整体拉伸的构造作用下发生减薄和裂隙,从而形成了珠江口盆地、莺歌海盆地、琼东南盆地以及北部湾盆地等陆缘含油气盆地,但这些盆地的构型、构造活动特征等皆有不同.从空间上来看,这几个盆地的断陷规模从西北向东南方向增大,这种现象也反映了随着南海北部地区基底的拉张作用,地壳由陆壳向着洋壳的方向逐渐伸展拉薄的一个动力学过程(施小斌等,2000).

红河断裂带是东南亚地区最重要的构造带之一,既是印支板块与扬子地块的构造分界线,也是特提斯构造演化的重要组成部分(王宇,1994;郝天珧等,2005).在古近纪红河断裂东段的活动性研究方面,目前的意见相对统一,即红河断裂在古近纪时间范围内运动特征主体为左旋走滑,根据 Ar-Ar 年代学分析结果,左旋走滑作用最早开始于 58 Ma(张建国等,2009).据此,在古近纪范围内,红河断裂是沿

着莺歌海盆地进入中国南海海域,由于其左行走滑作用,在造成印支板块顺时针旋转的同时,会在北部湾盆地形成北西向的作用力,从而影响整个北部湾盆地的构造演化.

海南岛的构造研究方面,莫宴情和施央申(1987)通过对地层分布、岩浆事件以及古地磁分析对比后认为,晚白垩到古近纪早期,由于澳大利亚—印度板块以及太平洋板块的综合影响,中国西部地壳遭受强烈挤压收缩,而东部地壳则被拉张挤出,北部湾一带出现堑垒式断陷,从而造成北部湾地区地壳被拉张伸长.受其影响海南岛在沿红河断裂带向东南方向迁移,向低纬度方向移动了 4°左右,在向南移的过程中同时发生顺时针旋转运动,旋转的幅度较小,约 15°.晚古近纪的晚期,由于拉张中心的南移,北部湾地壳伸张趋于停止并下拗成盆,随后海水进入湾内.新近纪开始,由于扩张中心南移至南海海

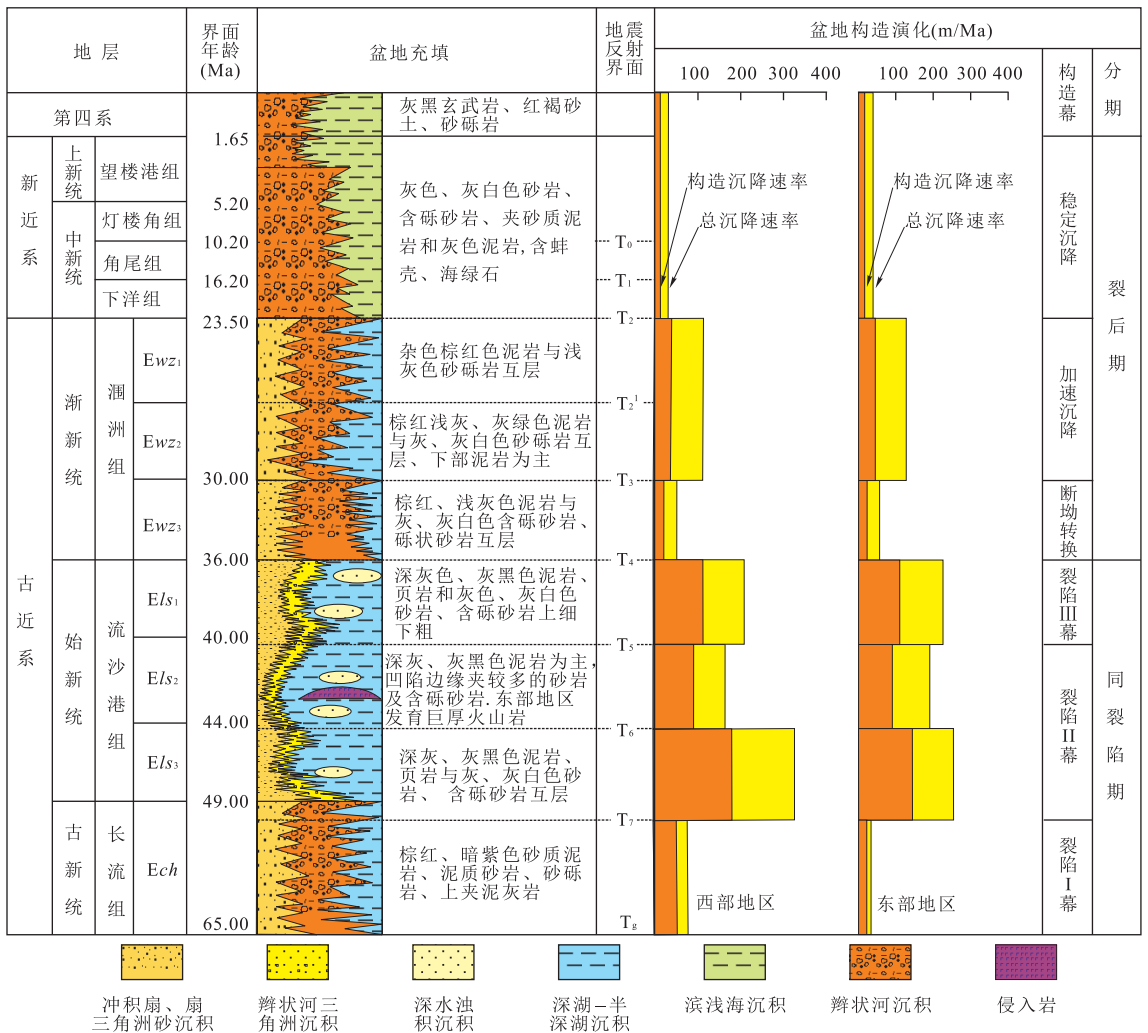


图 3 福山凹陷地层与构造运动事件

Fig.3 Strata and tectonic movement events of Fushan sag

盆,由于南海海盆的扩张作用使海南岛在向北移动的同时,并做逆时针旋转至现今位置(莫宴情和施央申,1987).

2.2 构造演化与沉积充填

在盆地分析过程中,沉降史分析已经成为一项重要的技术方法之一(李思田等,2004).通过盆地内部不同地区沉降量的定量分析可以再现盆地在垂向上的构造演化历史.

通过典型断陷盆地的类比分析,福山凹陷古近系沉积地层可以划分出两个一级构造层序,古近系的长流组及流沙港组和古近系的涠洲组及新近系和第四系地层各为一个构造层序.古近系的长流组及流沙港组构造层序对应着同裂陷期沉积,古近系的涠洲组及新近系和第四系构造层序对应裂后期沉积地层.通过沉降史分析可知,福山凹陷古近系、新近系和第四系地层的沉降具有典型的“幕式”沉降特征(图3).

福山凹陷古近系、新近系和第四系经历了两期构造作用,即同裂陷期和裂后期.其中同裂陷期分3幕,裂后期也分3幕.裂陷I幕对应E_{ch}段沉积,裂陷II幕对应于E_{ls₃}-E_{ls₂}段沉积,裂陷III幕对应E_{ls₁}段沉积,裂后期的断拗转换期对应E_{wz₃}段沉积,裂后加速沉降期和裂后稳定沉降期分别对应E_{wz₂}-E_{wz₁}和N+Q段沉积.东西部地区的沉降速率总体趋势一致,但沉降的强弱不同,裂陷早期凹陷西部地区沉降速率大,到裂陷II晚期时东部地区的沉降速度开始显著增大(图3).

福山凹陷古近系沉积充填过程与构造活动紧密相关.长流组沉积期,凹陷开始断陷沉降,并进入初始扩张期,凹陷内的沉积地层以高位体系域为主,发育冲积—河流相沉积物,沉积一套棕红、暗紫红色砂质泥岩、泥质砂岩、砂砾岩不等厚互层.流三段沉积期由于沉降与伸展作用的同时加强,导致凹陷断层活动剧烈,为湖盆形成期,全区低位、湖扩、高位体系域均有发育,但不同地区层序、沉积的充填样式又各具特点;流二段时期,凹陷强烈沉降,进入区域湖扩时期,湖盆扩张范围最广,低位体系域、湖扩体系域和高位体系域均有发育,因水体深度加深,沉降速率大于沉积速率,凹陷内沉积了一套巨厚的暗色泥质烃源岩.三角洲砂体发育规模也较流三段时期小很多,高位体系域砂体缺乏,斜坡上部地层局部削截;流一段沉积期对应裂陷III幕,凹陷内断层活动减弱,海南隆起进一步隆升,湖盆萎缩,除北部深凹区外,凹陷南部斜坡上部大面积遭受剥蚀;东部地区低位

体系域发育范围小,高位扇三角洲发育范围广泛.涠洲组沉积期,边界断层活动减弱,凹陷进入裂后期,凹陷作用逐步增强,凹陷内快速堆积了厚度巨大的河流相砂砾岩地层.

3 双层结构形成机制分析

3.1 构造响应特征

根据福山凹陷古近系3大主控边界断层不同时期的走向演化特征可以发现,在不同时期,3条控凹断裂的水平位移量和走向变化特征各不相同.在古近纪,临高断裂向北西方向水平移动约16.0 km,接近于福山凹陷古近纪的最大伸展量;而长流断层水平移动约2.5 km,定安断层水平移动只有约1.0 km,表明在福山古近纪的形成演化过程中长流断层和定安断层只起到了边界调节作用,而临高断裂的强烈活动对凹陷的形成演化起主要控制作用.

根据临高断裂不同时期走向变化可以看出,临高断裂从古新世早期(约65 Ma),即凹陷形成到渐新世末期(约23.5 Ma),其走向发生了约13°的逆时针旋转作用(图4).而海南隆起在古近纪向东南方向移动的过程中也发生了约15°的顺时针旋转,这个旋转角度与临高断裂的走向旋转角度相近.因此,可以初步判断临高断裂走向的变化与海南隆起在顺时针旋转过程中的反向运动作用关系明显,即福山凹陷在构造演化过程中受到水平方向的伸展作用和旋转拉分作用的共同影响.

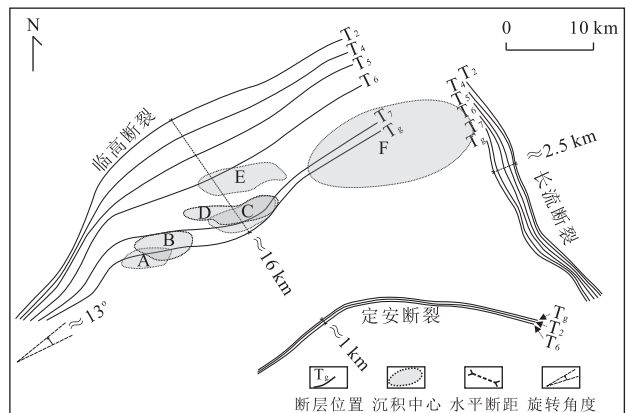


图4 福山凹陷古近系主控断层走向演化及沉积中心演化
Fig.4 The evolution of the main fault structure and deposition center of Fushan sag in Paleogene

A.长流组,1 000 m 厚度等值线;B.流三段段,1 000m 厚度等值线;
C.流二段,500 m 厚度等值线;D.流一段,1 000 m 厚度等值线;E.涠
三段+涠二段,800 m 厚度等值线;F.涠一段,800 m 厚度等值线

在断陷型沉积盆地中,由于幕式构造运动会造成盆地内部沉积地层在空间分布上的变化响应.反之,从沉积地层的空间分布也可以推测不同沉积盆地的构造活动性以及环境应力场变化.即由构造形迹和沉积充填形态可反推盆地形成时的应力状态以及活动方式(张兴和马寅,1996;林正良等,2009).从福山凹陷古近纪不同时期地层的最大沉积中心空间位置以及形态上可以看出,各时期最大沉积厚度展布方向都以北东-南西向为主,反映出在地层沉积过程中都不同程度上受临高断裂的控制.另外,从福山凹陷古近系最大沉积中心分布位置可以看出,早期位于凹陷的西部地区,然后逐渐向东北方向迁移,而沉积中心在空间上迁移的速度也具有幕式移动的特征,并且最大沉积中心的分布范围也在不断地扩大.这就说明福山凹陷具有早期(裂陷 I 幕)从凹陷的西部地区伸展开裂,后不断向东北方向逐渐开始扩张的特征.

结合红河断裂的左行走滑作用在北部湾盆地所形成的北西向作用力(Leloup *et al.*, 1995),则进一步地加剧了这种伸展作用.从时间对应关系上来看,海南隆起顺时针旋转开始于古新世,而红河断裂的左行走滑大概是从始新世开始,从而造成长流断层的走向在不同时期的差异性,即早期旋转幅度大,晚期旋转幅度小.也就是说,福山凹陷是在海南隆起与临高凸起两个刚性块体非对称性的旋转-拉分作用力下,呈剪刀状裂开,西部的美台地区最早开始活动,而后逐渐向东北方向扩张到达白莲次凹,进而形

成福山凹陷这种三角形形态(图 1).在这种非对称性的区域拉伸作用下,在凹陷内部形成差异伸展作用,从而导致在凹陷内部形成大量具有伸展、旋转、走滑等复杂的构造样式.

福山凹陷新生代岩浆岩活动异常的频繁,凹陷内分布大量的火成岩.中生代主要以中性岩浆岩为主,新生界基底发育安山岩、安山玢岩与凝灰岩等火成岩.进入第三纪以来,由于张裂作用增强,伴随着多期火山活动,凹陷内的中深层、浅层及地表都大面积分布火成岩(罗群和庞雄奇,2008).通过钻井标定,地震资料解释可知,在古近系地层中,火成岩主要发育于流沙港组二段,平面上主要分布于凹陷东部的白莲次凹、花东以及红光地区,单井钻遇到最大累积厚度达到 220 m(图 5).整体分布特征表现为大套湖相泥岩中发育大量顺层侵入的火成岩体,由北向南沿着海南隆起抬升方向,其埋深逐渐减小(图 2).通过对该段火成岩系统取心,进行锆石 LA-LCP-MS U-Pb 年代学研究后发现,该套火成岩的侵入时间为 35.0 ± 2.8 Ma(林正良,2011),接近于始新世与渐新世的分界,其对应于 T_4 地震反射界面(图 2).

根据鄯全树和石学法(2007)地幔柱理论提出的南海及海南岛的演化模式,流二段地层中的辉绿岩为地幔柱早期活动的产物,而对福山凹陷的影响是在其活动高峰期导致整个凹陷大幅隆升并遭受剥蚀,形成分布较广的不整合界面(T_4).而在福山凹陷的内部,这种隆升作用也存在较大的差异性.从凹陷南部斜坡带各时期地层分布范围可以看出,从流三

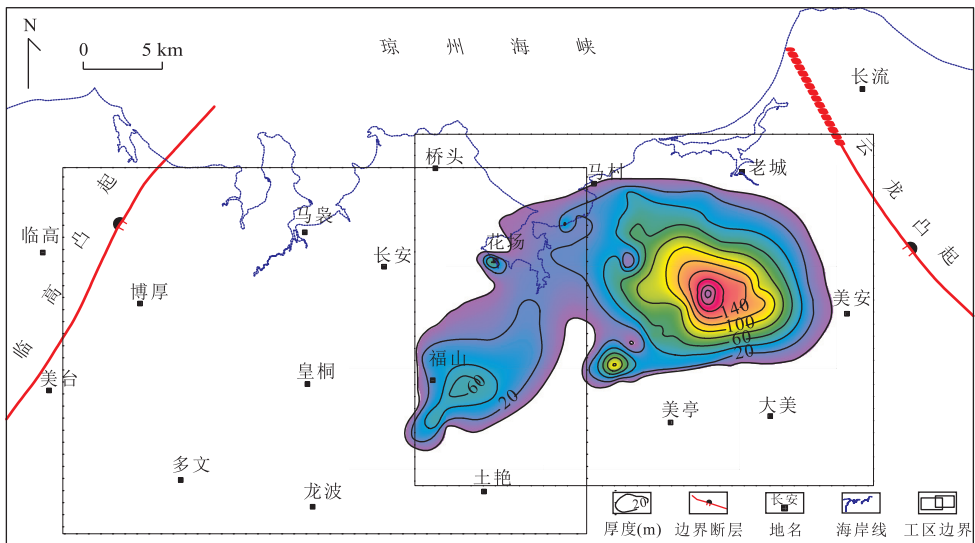


图 5 福山凹陷流二段侵入岩厚度分布

Fig.5 The isopach map of the Intrusive rocks in the second member of the Liushagang Formation, Fushan sag

段至流一段,福山凹陷南部斜坡区的剥蚀范围一直在增大,残余地层范围在缩小,说明凹陷南部地区处于一个持续的隆升剥蚀期,但是东部地区的剥蚀程度要大于西部地区(图 6a),反映出凹陷地区东部的隆升程度要强于西部地区(图 6b)。

结合侵入岩的空间分布可以判断,福山凹陷东西部地区的差异隆升作用与深部岩浆活动密切相关。凹陷东部地区由于岩浆的上涌作用形成强烈的隆升,从而导致早期的沉积地层抬升并遭受剥蚀。

3.2 双层结构形成演化过程

结合前文分析结果可知:流三段沉积期凹陷在旋转作用下发生强烈的横向伸展,可以为东部地区下构造层中的反向断层提供动力源;海南隆起的快速隆升可形成上构造层中的重力滑动生长断层;渐新统早期在流二段泥岩中形成的火成岩侵入体最终使双层构造系统成形。双层构造的形成和演化过程可分为以下 5 个主要阶段(图 7)。

(1) 裂陷锥形期。长流组沉积期,伴随着边界断层的活动形成凹陷锥形,内部沉积大量冲积相地层,北部临高断裂开始活动,凹陷内部断裂不发育。

(2) 下构造层伸展断裂期。流三段沉积期为凹陷湖盆形成期,凹陷内沉积大面积湖相背景下的三角洲沉积地层。随着凹陷整体在旋转拉分作用的增强以及海南隆起的早期隆升,在凹陷的东部地区形成较强的伸展作用,进而形成了与主控断裂同向的反向正断层。由于西部地区伸展作用相对较弱,因此没有形成这一组断层。

(3) 中部塑性层发育期。流二段沉积期为福山凹陷进入湖盆鼎盛期,凹陷内部沉积了巨厚的塑性泥岩,在伸展作用下,下覆地层中的早期断裂继续活

动,但由于流二段泥岩还未固结成岩,流动性较强,因此断层只在其下部地层中活动。该沉积晚期海南隆起强烈隆升,造成凹陷东部地区的斜坡带发生强烈掀斜作用而被大面积的剥蚀,形成了古近系内部的第一个不整合面(T_5)。

(4) 上构造系统形成期。流一段沉积期,福山凹陷湖盆继续发育,凹陷内沉积大面积湖相背景下的三角洲沉积地层。随着海南隆起隆升幅度增大,在凹陷东部和西部地区都形成了大量向北掉的重力滑脱型断层。凹陷的东部地区由于流二段塑性泥岩层的存在,上部流一段的断层并未向下穿过流二段地层;西部地区的美台滑动大断裂也形成于这个阶段。渐新世早期由于火山活动,下覆流二段泥岩中顺层侵入了巨厚的基性火成岩,形成一道天然屏障,阻碍了上构造系统中滑脱断层的向下生长,并最终消失在流二段的塑性泥岩中。至此,福山凹陷东部地区的双层结构基本形成。这个阶段的晚期斜坡区地层遭受剥蚀形成了凹陷内的第二个不整合面(T_4)。

(5) 发育定型期。涠洲组沉积期凹陷内湖盆大量萎缩,物源充足,上构造层中正向的重力滑动断层快速生长,表现为继承性发育特征。

在双层结构形成过程中,流一段重力滑脱断层的发育与渐新世早期辉绿岩的侵入关系紧密。上构造系统中的滑脱断层在活动早期,流二段上部地层中所形成的塑性滑动面可以为辉绿岩的侵入提供通道,并控制侵入岩的就位;而晚期随着辉绿岩的快速侵入,形成大范围的片状分布后,又会阻止上构造层中滑脱断层向流二段地层中生长,从而在侵入岩的顶面形成新的滑脱面。

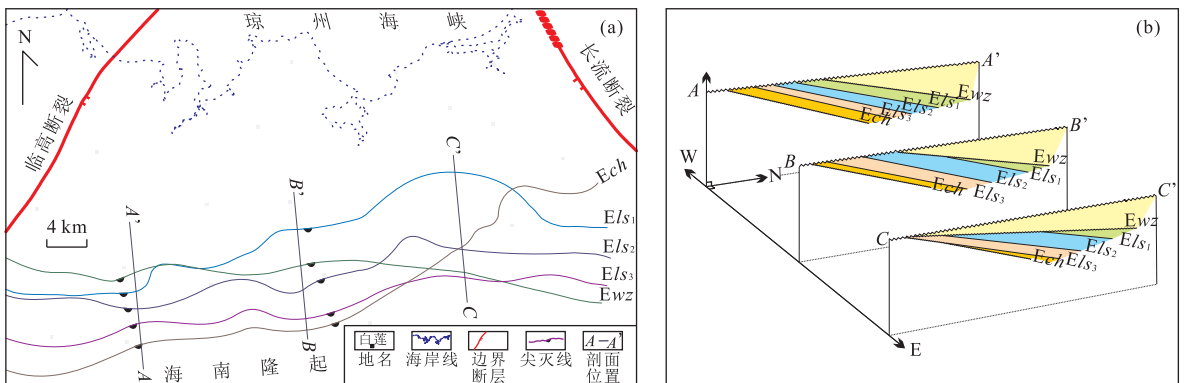


图 6 福山凹陷南部斜坡带地层分布特征

Fig.6 Stratigraphic distribution characteristics of the south slope belt

a. 地层分布范围; b. 地层产状

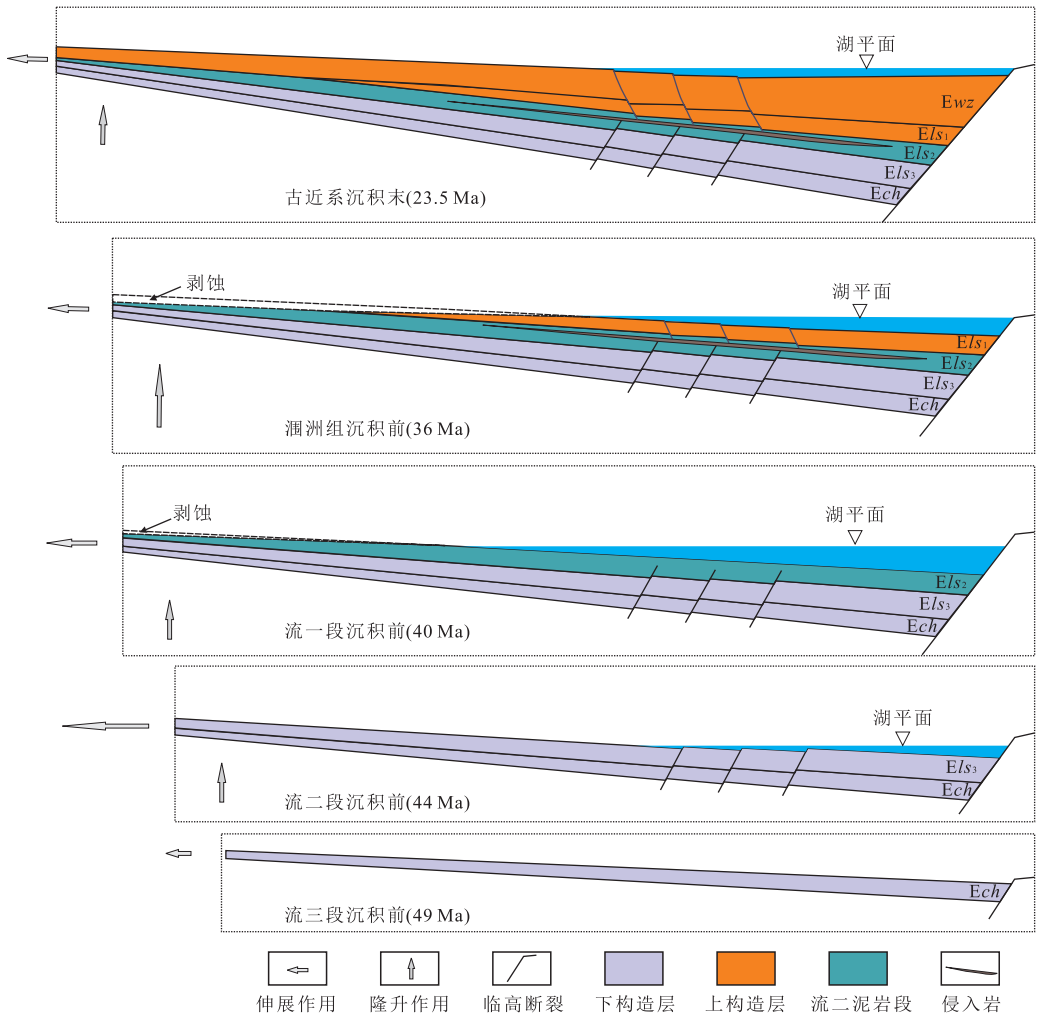


图 7 福山凹陷双层结构形成过程

Fig.7 Schematic diagram for the formation process of double-layer structure of Fushan sag

4 结论

福山凹陷古近系沉积期构造活动强烈,东西部地区水平方向的差异伸展和垂向的差异隆升作用是双层结构形成的主要动力学因素,而在差异隆升过程中特定时期塑性泥岩中火成岩的侵入为双层结构的主体形成及空间分布起到了决定性作用。

在这个过程中,流三段沉积期凹陷在海南隆起顺时针旋转作用下发生强烈的横向伸展,为东部地区下构造层中的反向断层提供动力源;之后海南隆起的快速隆升形成了上构造层中的重力滑动生长断层;渐新统早期在流二段巨厚泥岩中形成的火成岩侵入体成为上、下构造系统之间的一道天然屏障,最终使双层构造系统成形。

由于福山凹陷所处的特殊的大地构造位置,在沉积地层中更为详细的记录了北部湾及周缘地区这

个时期的一系列构造事件,而对这一作用过程的认识也可以帮助进一步分析整个北部湾盆地古近纪的构造活动特征以及演化历史。

References

Hao, T. Y., Jiang, W. W., Xu, Y., et al., 2005. Geophysical Research on Deep Structure Feature in Study Region of Red River Fault Zone. *Progress in Geophysics*, 20(3): 584—593(in Chinese with English abstract).

Jiang, H., Wang, H., Xiao, J., et al., 2008. Tectonic Inversion and Its Relationship with Hydrocarbon Accumulation in Zhu-3 Depression of Pearl River Mouth Basin. *Acta Petroleoi Sinica*, 29(3): 372—377(in Chinese with English abstract).

Leloup, P. H., Lacassin, R., Tapponnier, P., 1995. The Ailao Shan-Red River Shear Zone (Yunnan, China), Tertiary Transform Boundary of Indochina. *Tectonophysics*, 251(1—4): 3—84. doi:10.1016/0040—1951(95)00070—4

- Li, D. W., 2008. Three-Stage Tectonic Evolution and Metallogenic Evolution in the Qinghai-Tibet Plateau and Its Adjacent Area. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(6): 723—742 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. T., Xie, X. N., Wang, H., et al., 2004. Sedimentary Basin Analysis Principle and Application. Higher Education Press, Beijing, 275—305 (in Chinese).
- Lin, Z. L., 2011. Research on the Tectonic Characteristics of Paleogene in Fushan Sag, Beibuwan Basin (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan, 37—40 (in Chinese with English abstract).
- Lin, Z. L., Wang, H., Jiang, H., et al., 2009. The Association Analysis of Tectonic Stress Field to Episodic Rifting in Cenozoic of Beitang Sag of Bohai Bay Basin. *Journal of Oil and Gas Technology*, 31(3): 24—29 (in Chinese with English abstract).
- Lister, G. S., 1986. Detachment Faulting and the Evolution of Passive Continental Margins. *Geology*, 14(10): 890—891. doi: 10.1130/0091-7613(1986)14<890:CAROD F>2.0.CO;2
- Liu, E. T., Wang, H., Lin, Z. L., et al., 2012. Characteristics and Hydrocarbon Enrichment Rules of Transfer Zone in Fushan Sag, Beibuwan Basin. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 43(10): 3946—3953 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. F., Li, X. Q., Liu, L. Q., et al., 2005. Petroleum Plays in Rift Basins and Extensional Structures. *Oil & Gas Geology*, 26(5): 537—552 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Q., Jiang, Z. X., Pang, X. Q., 2007. Mechanism and Model of Fault Controlling Petroleum Accumulation. Petroleum Industry Press, Beijing, 68—70 (in Chinese).
- Luo, Q., Pang, X. Q., 2008. Reservoir Controlling Mechanism and Petroleum Accumulation Model for Consequent Fault and Antithetic Fault in Fushan Depression of Hainan Area. *Acta Petrolei Sinica*, 29(3): 363—367 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Q. L., Zhao, S. E., Liao, Y. T., et al., 2012. Sequence Architectures of Paleogene Liushagang Formation and Its Significance in Fushan Sag of the Beibuwan Basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(4): 667—678 (in Chinese with English abstract).
- Mo, Y. Q., Shi, Y. S., 1987. Paleomagnetic Study and Tectonic Evolution of Hainan Terrane and Its Vicinal Continental Coast the Late Mesozoic to Cenozoic. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition)*, 23(3): 521—532 (in Chinese with English abstract).
- Shi, X. B., Zhou, D., Zhang, Y. X., 2000. The Continental Margin of the Northern South China Sea Lithospheric Thermo Rheological Structure. *Chinese Science Bulletin*, 45(15): 1660—1665 (in Chinese).
- Shi, X. P., Li, L., 2010. Modeling Experiments of Structural Evolution since Late Mesozoic in West Shandong Uplift, China. *Journal of China University of Petroleum*, 34(3): 25—29, 33 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y. M., Liu, J., Zhang, M. Z., et al., 2007. Experience and Understand in Oil and Gas Exploration in Fushan Sag, Hainan Province. *South China Journal of Seismology*, 27(3): 57—68 (in Chinese with English abstract).
- Tian, Z. Y., Wang, S. S., 1985. Geological Structures and Oil and Gas Sedimentary Basins in the China Seas. *Acta Petrolei Sinica*, 6(3): 1—10 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., 1994. Analysis of Activity of the Red River Fault. *Geological Hazards and Environment Preservation*, 5(2): 28—35 (in Chinese).
- Wernicke, B., 1981. Low-angle Normal Faults in the Basin and Range Province: Nappe Tectonics in an Extending Orogen. *Nature*, 291(25): 645—648.
- Xu, X. B., Li, Y., Xue, D. J., et al., 2014. Deformation Characteristics and Geochronological Constraints of Late Mesozoic Extensional Structures in Quanzhou, Fujian Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(8): 1079—1098 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. D., Liang, Y. P., Jiang, S. S., et al., 2014. Evolution of Cenozoic Sedimentary Basins in Eastern China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(1): 45—63 (in Chinese with English abstract).
- Yan, Q. S., Shi, X. F., 2007. Hainan Mantle Plume and the Formation and Evolution of the South China Sea. *Geological Journal of China Universities*, 13(2): 311—322 (in Chinese with English abstract).
- Yu, J. J., Luo, Q., Zhang, D. J., et al., 2004. Characteristics of Faults in the Fushan Depression of Hainan, the Beibuwan Basin and Their Controlling Roles to Hydrocarbon Pool-Formation. *Petroleum Geology & Experiment*, 26(3): 241—248 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. G., Huangfu, G., Xie, Y. Q., et al., 2009. Study on the Activity of Red River Fault in Vietnam. *Seismology and Geology*, 31(3): 389—400 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X., Ma, Y., 1996. Photoelastic Modeling Experiment of Tectonic Stress Field Evolution in Huanghua Depression. *Petroleum Exploration and Development*, 23(1):

21—24(in Chinese with English abstract).

Zhu, Z. C., 1987. Extensional Tectonics and Detachment Fault. *Geological Science and Technology Information*, 6(1): 18—25(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

郝天珧, 江为为, 胥颐, 等, 2005. 红河断裂带研究区深部结构特点的地球物理研究. *地球物理学进展*, 20(3): 584—593.

姜华, 王华, 肖军, 等, 2008. 珠江口盆地珠三坳陷构造反转与油气聚集. *石油学报*, 29(3): 372—377.

李德威, 2008. 青藏高原及邻区三阶段构造演化与成矿演化. *地球科学——中国地质大学学报*, 33(6): 723—742.

李思田, 解习农, 王华, 等, 2004. 沉积盆地分析基础与应用. 北京: 高等教育出版社, 275—305.

林正良, 2011. 北部湾盆地福山凹陷古近纪构造特征研究(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学(武汉), 37—40.

林正良, 王华, 姜华, 等, 2009. 渤海湾盆地北塘凹陷新生代幕式裂陷过程与构造应力场变化的关联分析. *石油天然气学报*, 31(3): 24—29.

刘恩涛, 王华, 林正良, 等, 2012. 北部湾盆地福山凹陷构造转换带及其油气富集规律. *中南大学学报*, 43(10): 3946—3953.

刘和甫, 李晓清, 刘立群, 等, 2005. 伸展构造与裂谷盆地成藏区带. *石油与天然气地质*, 26(5): 537—552.

罗群, 姜振学, 庞雄奇, 2007. 断裂控藏机理与模式. 北京: 石油工业出版社, 68—70.

罗群, 庞雄奇, 2008. 海南福山凹陷顺向和反向断裂控藏机理及油气聚集模式. *石油学报*, 29(3): 363—367.

马庆林, 赵淑娥, 廖远涛, 等, 2012. 北部湾盆地福山凹陷古近系流沙港组层序地层样式及其研究意义. *地球科*

学——中国地质大学学报, 37(4): 667—678.

莫宴情, 施央申, 1987. 海南岛地体及其毗邻陆缘晚中生代—新生代古地磁研究和构造演化. *南京大学学报*, 23(3): 521—532.

施小斌, 周蒂, 张毅祥, 2000. 南海北部陆缘岩石圈热—流变结构. *科学通报*, 45(15): 1660—1665.

时秀朋, 李理, 2010. 鲁西隆起中—新生代伸展构造演化的模拟试验. *中国石油大学学报*, 34(3): 25—29, 33.

石彦民, 刘菊, 张梅珠, 等, 2007. 海南福山凹陷油气勘探实践与认识. *华南地震*, 27(3): 57—68.

田在艺, 王善书, 1985. 我国海域地质构造与含油气沉积盆地特征. *石油学报*, 6(3): 1—10.

王宇, 1994. 红河断裂南段活动性分析. *地质灾害与环境保护*, 5(2): 28—35.

徐先兵, 李源, 薛德杰, 等, 2014. 福建泉州晚中生代伸展构造变形特征与年代学制约. *地球科学——中国地质大学学报*, 39(1): 45—63.

徐亚东, 梁银平, 江尚松, 等, 2014. 中国东部新生代沉积盆地演化. *地球科学——中国地质大学学报*, 39(8): 1079—1098.

鄢全树, 石学法, 2007. 海南地幔柱与南海形成演化. *高校地质学报*, 13(2): 311—322.

于俊吉, 罗群, 张多军, 等, 2004. 北部湾盆地海南福山凹陷断裂特征及其对油气成藏的控制作用. *石油实验地质*, 26(3): 241—248.

张建国, 皇甫岗, 谢英情, 等, 2009. 越南红河断裂活动性研究. *地震地质*, 31(3): 389—400.

张兴, 马寅, 1996. 黄骅坳陷构造应力场演化光弹模拟实验. *石油勘探与开发*, 23(1): 21—24.

朱志澄, 1987. 伸展构造和拆离断层. *地质科技情报*, 6(1): 18—25.