

低角度断陷盆地成因模式及结构特征

——以珠江口盆地恩平低角度断陷为例

何勇^{1,2}, 梅廉夫², 施和生³, 舒誉³, 陈杨¹

1 四川省煤田地质工程勘察设计院; 2 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室

3 中国海洋石油(中国)有限公司深圳分公司

摘要 目前地质学界普遍认为低角度断陷盆地是由低角度正断层拆离形成的, 具有上拆离裂离和上拆离斜坡两种成因模式。介绍、评论了5种低角度正断层成因模型。以珠江口盆地恩平低角度断陷为例, 通过三维地震解释以及平衡剖面恢复, 提出了一种新的模式——先存低角度逆断层负反转成因模式。认为不同成因的盆地具有不同的结构特征, 低角度上拆离断陷盆地湖盆浅且无裂后沉积, 低角度负反转断陷盆地湖盆深且裂后沉积厚度大, 前者往往不具备勘探价值, 而后的勘探潜力巨大。

关键词 断陷盆地; 上拆离盆地; 低角度正断层(LANF); 负反转模式; 恩平凹陷; 珠江口盆地

中图分类号: TE121.1⁺2

文献标识码: A

0 前言

低角度断陷盆地是发育在低角度正断层 (Low-angle Normal Fault, 简称LANF) 上盘的一类特殊的盆地, 其形成过程与结构特征都与低角度正断层息息相关, 这类盆地形成于伸展率大, 并且有限应变强烈的伸展构造区域, 如美国盆岭^[1]、北美科迪勒拉^[2]、希腊爱琴海^[3]、内蒙古大青山^[4]和意大利亚平宁^[5]等地区。Fillmore等^[1]区分出了3种与低角度拆离断层相关的盆地类型: (1) 位于主拆离断层破裂面之后断层下盘的盆地; (2) 位于拆离断层上盘的破裂盆地; (3) 位于拆离断层上盘远离破裂面的盆地。其中第一类不是典型的低角度断陷盆地。Friedmann等^[6]把与低角度拆离断层相关并发育在其上盘的盆地称之为上拆离盆地(supradetachment basins), 他们的研究具有里程碑式的意义。之后大批地质学家在深入研究低角度正断层形成机制的基础上, 继续探讨上拆离盆地的成因模式和结构特征, 逐渐完善了上拆离盆地的相关理论, 尤其是Vetti等^[7]提出了上拆离斜

坡盆地模式(supradetachment ramp basin model)和上拆离裂离盆地模式(supradetachment breakaway basin model), 该研究具有突破性的意义。

然而, 除了上拆离盆地模式之外, 低角度断陷盆地是否还有其他的成因模式, 目前并没有太多的相关报道, 其根源在于低角度正断层的成因之谜并没有很好地解决^[8-9], 已有的多种低角度正断层模式^[10-15]都是基于岩石圈强烈伸展区的变质核杂岩构造而提出的, 且还没有相关文献来报道大型低角度正断层形成于其他构造环境。本次研究以珠江口盆地恩平凹陷为例, 通过详细的地震资料解释和平衡剖面恢复, 提出了先存逆断层负反转的低角度正断层成因模式, 在该模式下形成的恩平低角度断陷盆地与上拆离盆地在形成机制和结构特征上具有较大的差异, 并且前者具有较好的油气勘探价值^[16], 而后者却被认为是贫烃盆地^[6,17]。对恩平凹陷的低角度正断层成因机制的探索, 既能丰富低角度断陷盆地的相关理论认识, 又有助于讨论不同类型低角度断陷盆地的油气勘探价值。

收稿日期: 2018-01-02; 改回日期: 2018-03-09

本文受“十三五”国家科技重大专项“南海北部陆缘深部构造作用与新生代成盆演化耦合特征”(编号: 2016ZX05026-003-001)和构造与油气资源教育部重点实验室开放研究基金“珠江口盆地恩平凹陷古近系低角度断陷盆地成因、演化机制及构造特征响应”(编号: TPR-2011-07)共同资助

何勇: 1986年生, 2013年毕业于中国地质大学(武汉), 获矿产普查与勘探专业硕士学位, 现从事油气、页岩气及煤层气资源调查评价工作。通信地址: 610072 四川省成都市青羊区青华路39号; E-mail: heyong21065@126.com

1 低角度上拆离断陷模式

相对于裂谷环境下形成的高角度断陷盆地而言,在强烈拉伸构造环境下形成的、受控于低角度拆离断层的上拆离盆地的研究相对滞后。直到 20 世纪 80 年代初,Wernicke^[18]在美国西部盆岭区首次确立大型低角度正断层,才逐渐被引起重视,他认为拆离盆地的成因及几何学、运动学特征都直接受控于低角度正断层。

1.1 低角度正断层成因机制

低角度正断层在力学上与莫尔-库伦定律 (Mohr-Coulomb Law) 不符,并且与安德森模式^[19]所预测的正断层倾角大于 45°相矛盾。国内外学者近三十年

来一直在致力于解决低角度正断层成因之谜^[10-12,14-15],提出了多种成因模式(表1),从力学机制上一定程度地协调了LANF与安德森模式的矛盾,但这在实际应用中却具有一定的局限性。综合起来,主要是没能圆满解释如下地质事实:(1)发育在脆性地壳之上的低角度正断层的初始低角度成因^[8];(2)低角度断层上盘出现的大规模位移,尤其是断裂带缺少M(里氏)>5.5的地震记录^[9,20];(3)多数都不能解释低角度正断层两盘之间的大规模位移和不能形成规模较大的上拆离盆地。核心矛盾在于割裂了LANF成因与活化的联系,不能解释低角度正断层的后期活化问题。因此,笔者认为结合岩石力学机制、断裂带结构,以及利用先存构造来综合分析LANF的成因,再对LANF的成因及再活动进行一体化研究是重要的突破口。

表 1 5 种低角度正断层成因模型

| 模 型 | 实 例 | 断裂特征 | 动力机制 | 矛盾之处 | 参考文献 |
|---------|-----------|---|--|--|------------|
| 滚动枢纽模型 | 科迪勒拉变质核杂岩 | 15°~20°倾角,变质核杂岩内呈穹窿状拆离面,主应力发生旋转 | 断层下盘均衡抬升,接近地表时发生弹性弯曲,凸面拉伸、凹面挤压而发生破裂。在不断抬升过程中,主断裂因袭了这些局部缩短而发生新的破裂面,形成了一个比一个更平缓的断面,构成一系列低角度断层 | Chemehuevi 拆离断层形成时就是缓倾角,并非高角度旋转形成,同伸展沉积物无明显的掀斜 | [10,21] |
| 岩浆驱动模型 | 美国盆岭地区 | 15°~20°倾角,变质核杂岩内呈穹窿状拆离面,主应力发生旋转,伴生岩浆活动 | 韧性下地壳中的伸展应变主要由韧性流变调节,当大规模岩浆活动在中、下地壳快速侵位时,导致韧性-脆性转换带抬升,并使上地壳中的应力重新配置,即主应力轴发生偏转,如果偏应力足够大便可形成 LANTF | 难以解释 LANTF 上盘大规模位移和同一区域的变质核杂岩具有相同方位的拉伸线理 | [14,22] |
| 上地壳弹性模型 | 加利福尼亚惠普尔 | 10°~15°倾角,晚中新世在垂直 σ_1 的压力场下活动,流体超压增加 | 重力扩展会诱发下地壳基底近水平的剪切应力,使得底界面的主应力方向偏转,当水平剪切力大于 100 MPa 时,在该应力作用下产生 LANTF | 模型底部边界的剪切应力只有极端条件下才会达到 100 MPa | [10,12-13] |
| 应力导层模型 | 惠普尔拆离断层 | 15°~25°倾角,韧性剪切带平缓,主应力轴被旋转到 45°,主拆离断层向上逐渐变陡 | 增温使岩石产生韧性变形,并且在中地壳产生韧性-脆性转换带,该带岩石破裂强度最大,它的上、下应力均指向这个带,之下形成近水平韧性剪切带,并最终衍生 LANTF | 与现今地震研究结果矛盾;只适合于有韧性-脆性转换带存在的 LANTF 成因 | [11,23] |
| 伸展褶皱理模型 | 内蒙亚干拆离断层 | 倾角小于 30°,出露椭圆形穹窿状石英长石糜棱岩和片麻岩,并被火成岩切割 | 据最大有效力矩准则,预测伸展褶皱理与 LANTF 产状具有密切联系,通过应变集中和应变软化,伸展褶皱理的扩展可演化为低角度正断层 | 不能解释某些在脆性地壳中形成的 LANTF | [15,24-25] |

1.2 上拆离盆地成因模式

上拆离盆地多数位于弧后沉降带内(属热流活动频繁的地壳增厚区域^[6])。拆离构造体系边界断层倾角很小(<30°),并且主拆离断层的滑移速度极高^[26-27](>3 mm/a),使得拆离盆地具有演化历史相对短暂(5~10 Ma)、伸展率高(达 15 mm/a)、伸展总量大(50%~200%)的构造特点^[4,6,28]。

前人研究证实有多处低角度断陷盆地是上拆离成因的,如美国 Chemehuevi 盆地^[29]、内蒙古大青

山盆地^[4]、北美科迪勒拉^[2]、希腊爱琴海地区^[3]等,并提出了上拆离盆地模式。该模式中盆地紧邻拆离断层上盘的断面沉积(图 1 中的 A 位置),由于铲式拆离断面的滑动,导致地层旋转并产生反向的翘倾断块,而断块作用使拆离断层上盘解体,并随着上、下两盘的相对位移而产生有限的可容纳空间(图1b中的 A 位置);另外,因下盘隆升作用而产生的构造剥蚀,部分补偿了区域性沉降的影响,使得盆地始终维持着浅缓的形态,较高的隆升速率导致盆地的物源主要来自断层下盘,并且通过径向沉积形

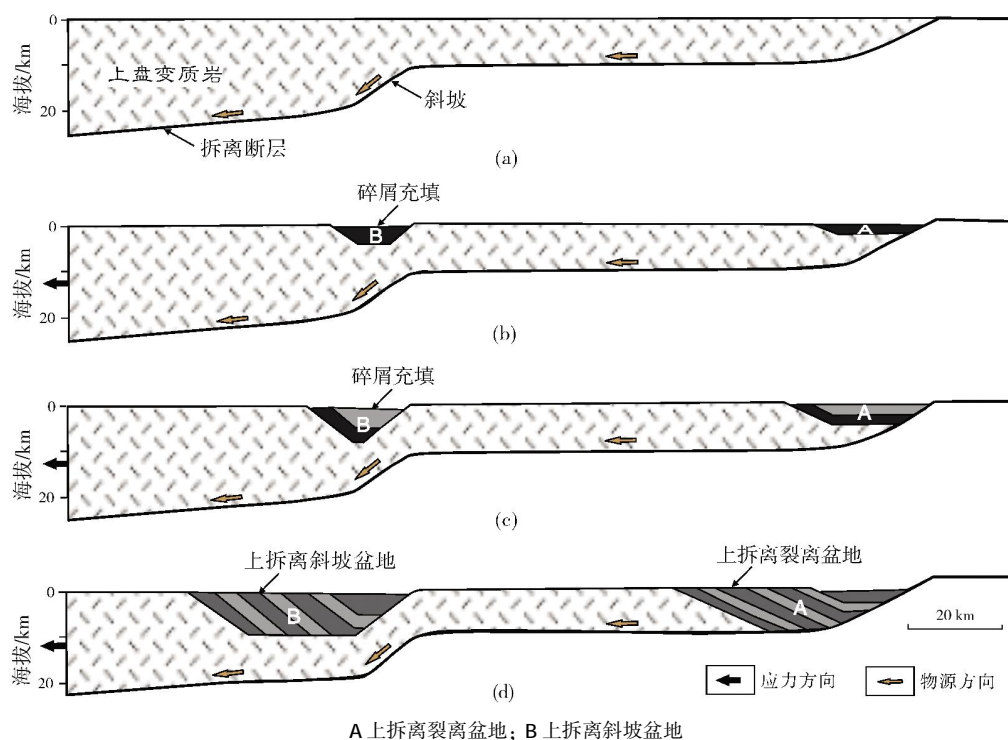


图1 两种类型的上拆离盆地成因模式^[7]

成扇体;又由于风化、削截、侵蚀以及重力滑动作用,引起了下盘古地形向盆地内部不断回剥,从而给盆地提供了充足的物源,并逐渐形成了径向的沟谷体系(图1c中的A位置);沿断层面发育的角砾岩化岩石,以及上盘岩石进入下盘数米范围内的短程搬运,形成了一个具有一定厚度的、破碎的物源区^[30],加之重力滑塌作用^[31],最终形成以粗碎屑和砾石沉积为主的浅而薄的盆地(图1d中的A位置)。

Vetti^[7]根据盆地与主拆离断面的距离远近,以及拆离断层对盆地形成演化和沉积充填的控制作用差异,划分出2类上拆离盆地:一类是前文述及的由于拆离断层上盘与下盘产生相对位移而导致盆地被拉开所形成的上拆离盆地,命名为上拆离裂离盆地(图1中的A位置);另外一类则是作为对拆离断层斜坡面的响应,由于沉积物不整合沉积于远离断面的上盘基底岩石之上而形成的盆地,命名为上拆离斜坡盆地(图1中的B位置)。

上拆离斜坡盆地形成的前提条件是拆离断层具有坡坪式的几何学特征,盆地的形成是拆离断层伸展拆离过程在坡坪式断面的斜坡顶部岩层上的远程响应。代表性的地区如挪威西南部Hasteinen盆地^[7]、意大利平宁Siena盆地^[5]、美国爱达荷州和蒙大拿州始

新世—中新世伸展拆离盆地^[32]、美国和墨西哥北部盆地岭地区^[33]等。拆离断层上盘的伸展导致斜坡盆地开始发育(图1a),被拉开的凹槽内充填碎屑沉积物,作为对坡坪式拆离断面的响应,该凹槽逐渐演变成尖顶褶皱式背斜形态(图1b中的B位置),随着伸展作用的继续,尖顶背斜的核部变宽缓,盆地的可容纳空间不断增大(图1c中的B位置),沉积地层均呈明显的角度不整合覆盖在基底斜坡之上,并且由于断面的坡坪效应,使得地层具有较大的旋转(图1d中的B位置)。上拆离斜坡盆地的厚度与斜坡的垂直高度有关,它的水平延伸长度则直接受拆离断层的总伸展量所控制。

2 恩平负反转低角度断陷模式

恩平凹陷位于南海北部珠江口盆地珠一坳陷的最西部(图2),凹陷西北以大型基底低角度断层(F_1)为界,与北部断阶带和西江凹陷相邻,西南与文昌凹陷、神狐暗沙隆起相邻,东南部与番禺低隆起、东沙隆起相邻。凹陷呈低角度半地堑的结构。

2.1 边界断层(F_1)特征及成因机制

2.1.1 F_1 断层特征

F_1 断层整体呈NE—NEE向弓形展布(图2),从

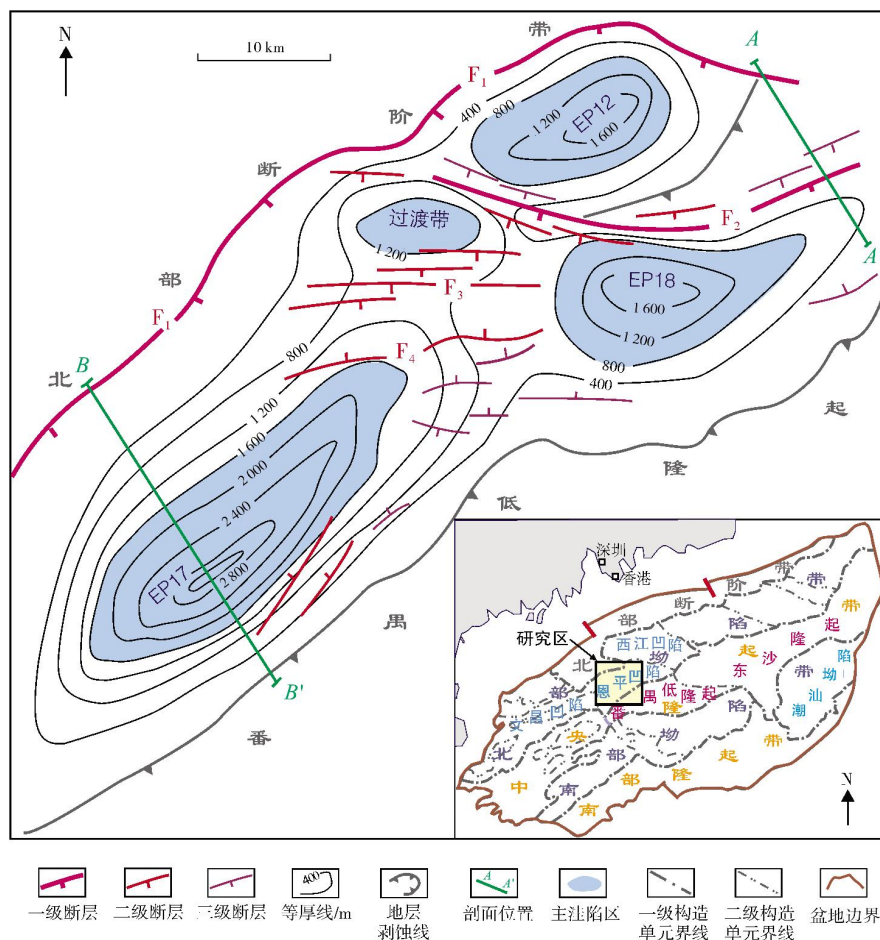


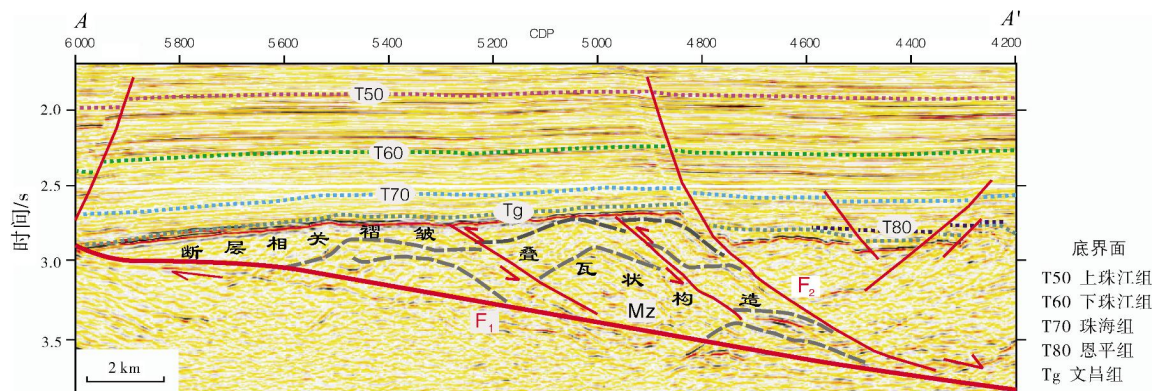
图 2 珠江口盆地恩平凹陷构造位置及文昌组地层厚度分布

EP17 洼的西北部延伸至 EP12 洼的东北部, 延伸长度约为 61 km。该断层在 EP17 洼段和 EP12 洼段表现为坡坪式的断面形态, 在过渡带为低角度的铲式断面, 角度约 14° , 而在 EP17 洼段, 坡位角度约为 30° , 坪位角度约为 15° ; 在 EP12 洼段偏东位置, F_1 边界断层的坡位倾角约为 22° , 在坪位处倾角约为 14° 。EP17 洼和 EP12 洼直接受到 F_1 边界断层的控制, 在 EP17 洼段断层活动最强烈, 表现为 EP17 洼地层厚度最大(达到 4000 m), 在 EP12 洼段断层活动性弱, 洼陷地层厚度小(最厚 2400 m), EP18 洼则是受到 F_1 断层和 F_2 断层的联合控制, 洼陷地层厚度在 2200 m 左右。恩平凹陷在 F_1 断层以及南部隆起的联合控制下, 呈现出典型的半地堑形态。 F_1 断裂带的物质组成与低角度拆离断层具有较大差异, 前者是由 S 型花岗岩^[34]、绿泥石化花岗岩^[35]以及沉积岩^[36]组成, 后者则是由变质核杂岩组成。用前文表 1 中的 5 种低角度正断层模式显然难以解释 F_1 断层的成因。

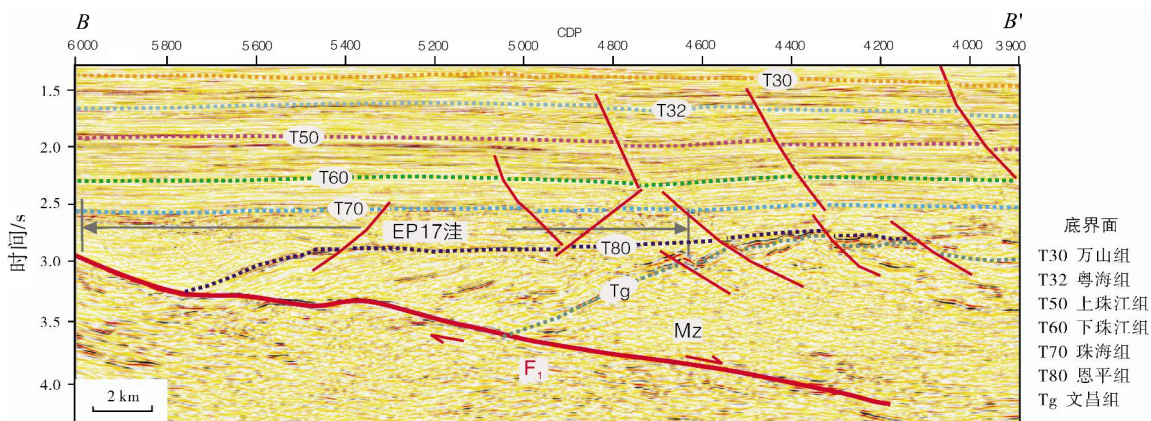
2.1.2 F_1 断层成因机制

本次研究通过三维地震解释和平衡剖面恢复, 并综合恩平凹陷区域构造背景分析, 得出 F_1 断层是形成于早白垩世的先存逆断层, 从晚白垩世—古新世开始负反转, 从而演变为低角度正断层。

控洼生长正断层与洼陷同时期形成, 随着断层的不断活动, 洼陷规模逐渐变大, 并且断层会随着洼陷的逐渐消失而尖灭^[37]。从 F_1 断层与恩平凹陷的平面位置关系(图2)以及地震剖面对比(图3, 图4), 可见 F_1 断层在洼陷消失的地方仍然稳定存在, 说明 F_1 断层在凹陷形成之前就已经存在, 是一条先存基底断层。叠瓦状构造是逆断层的典型特征^[38], 由图3可见, 与 F_1 断层相伴生的有叠瓦状构造和相关褶皱, 这证实了 F_1 断层是逆断层。 F_1 断层形成的具体时间可以由基底花岗岩的年代学数据来得到, 已有研究证实恩平凹陷基底的花岗岩为燕山期中酸性侵入岩^[39], 属于 S 型花岗岩, 是挤压阶段熔融或部分熔融的产物^[32], 其侵入



剖面位置见图2

图3 珠江口盆地恩平凹陷横切 F_1 断层北部的 A—A'地震构造解释剖面

剖面位置见图2

图4 横切珠江口盆地恩平凹陷的 B—B'地震构造解释剖面

时间在 $(100.5 \pm 1.7) \text{ Ma} \sim (130.0 \pm 5.0) \text{ Ma}$ 之间^[32-33], 说明 F_1 断层形成于早白垩世。

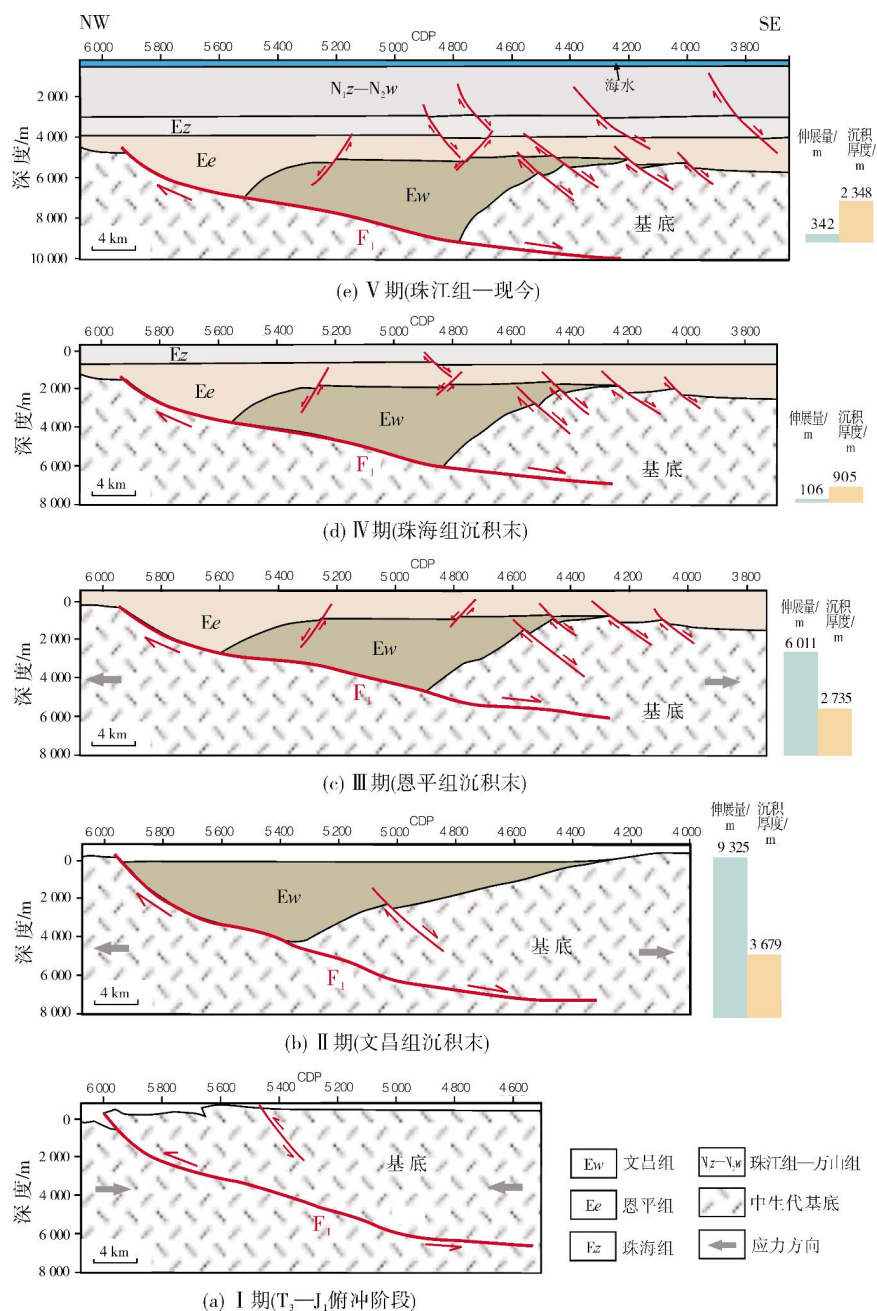
从珠江口盆地中生代基底的逆冲构造格局来看^[40], 恩平凹陷南部已发现的燕山期早白垩世末期的古太平洋俯冲增生带^[41-42], 以及邻区东沙隆起与潮汕坳陷发育有燕山期的大型北东向逆断层^[43], 都表明恩平凹陷在中生代具有形成大型逆断层的区域构造背景。至新生代, 由于太平洋板块与华南板块的汇聚速率大幅度降低^[44], 致使整个中国东南沿海地区逐渐处于拉张的环境^[45-46], 珠江口盆地从古新世开始发生断陷裂谷作用^[47], 笔者认为 F_1 断层就是从这一时期开始反转, 并经历了多幕裂陷拉张作用, 从而形成了低角度正断层(图5)。

2.2 恩平低角度断陷形成模式

中生代以来, 珠江口盆地的基底经历了复杂的

演化。南海在中生代位于欧亚大陆的东南缘, T_3 — J_1 期, 受到中特提斯与古太平洋的联合影响^[48-49], J_3 — K_1 期, 中特提斯洋和古太平洋强烈活动形成规模巨大的俯冲^[36, 38], 这在华南板块边缘表现出强烈的岩浆活动和断裂活动, 由此形成了一系列大型北东向左旋压扭性逆冲断层^[41], 恩平凹陷基底控洼断层 F_1 亦形成于该时期(图5a)。晚白垩世的区域性剥蚀作用, 导致隆起部位花岗岩穹窿和背斜的形成, 此后新生代沉积物覆盖在花岗岩背斜和穹窿之上^[41]。

晚白垩世以来, 随着南海北部大陆边缘的扩张, 恩平凹陷先存基底断层 F_1 开始负反转, 并产生大规模的位移滑动, 从而为凹陷提供了可容纳空间, 恩平低角度断陷也逐渐形成。在古新世—渐新世经历了多幕裂陷作用^[47], 以始新世文昌期(图5b)和渐新世恩平期(图5c)的裂陷作用最为强烈, 沉积速率最大, 由此产生了 15 km 的伸展量, 沉积厚度达 6 km, 沉积



剖面位置见图 2

图 5 珠江口盆地恩平凹陷 B—B'地震测线构造演化剖面

中心靠近边界断层,文昌组和恩平组构成了盆地的下构造层,并且它们均发育烃源岩层^[50]。随着拉张的持续进行,逐渐形成了以 F_1 为边界断层的、具半地堑结构特征的恩平低角度裂陷盆地。渐新世恩平期末—珠海期(图5c,5d)是断陷的断—拗转换阶段,在这阶段形成了区域性不整合面,并且裂后热沉降开始。渐新世从珠江期(图5e)开始,断陷进入热沉降拗

陷阶段,该期断裂活动和岩浆活动频繁,沉积了较厚的以滨海相为主的地层。

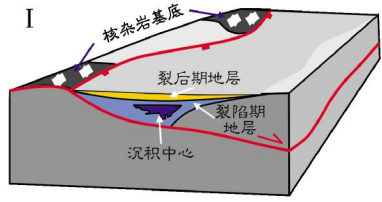
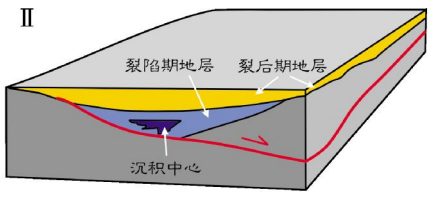
3 低角度断陷盆地结构特征及勘探意义

低角度断陷盆地发育在低角度正断层的上盘,这类盆地具有特殊的结构特征,盆地的几何形态大多为半地堑,仅上拆离斜坡盆地还有呈碟形的^[5,7];

地层均有不同程度的翘倾,翘倾方向与边界断层倾向相反,并且不整合于远离边界断层的斜坡顶面;与高角度断陷盆地相比,由于盆地经受了强烈而快速的拉伸,导致湖盆开阔,裂陷期的地层沉积厚度较

小,而裂后期持续沉降时间较长,从而沉积了较厚的地层;而且由于受控于不同类型的低角度边界断层,低角度断陷盆地可在沉积厚度、沉积相、物源体系等方面表现出明显的差异性(表2)。

表 2 2类低角度断陷盆地结构特征对比

| 低角度断陷盆地类型 | 上拆离盆地 | 恩平低角度断陷盆地 |
|-----------|---|--|
| |  |  |
| 边界断层成因 | 以滚动枢纽模式为主 | 先存逆断层发生负反转 |
| 边界断层活动 | 下盘上隆作用强于上盘沉降,水平位移大于垂直位移 | 上盘沉降作用强于下盘上隆,水平位移大于垂直位移 |
| 盆地形态 | 半地堑、碟形 | 半地堑 |
| 构造拉伸 | 拉伸速率快,伸展量大,持续时间短 | 拉伸速率较快,伸展量大,持续时间较短 |
| 沉积厚度 | 沉积厚度小,裂后地层很薄,甚至无裂后沉积 | 相对较厚,裂后地层厚度大 |
| 湖盆发育情况 | 湖盆浅,不发育深湖相 | 发育深湖相 |
| 沉积相 | 冲积扇、重力流沉积 | 扇三角洲、水下扇、浊积扇 |
| 沉积中心 | 远离边界断层 | 靠近边界断层 |
| 物源体系 | 不发育轴向水道,断层下盘通过径向水道提供物源 | 轴向和径向水道均较发育,断层上盘和两侧共同提供物源 |
| 沉积物 | 粗粒碎屑、砾石沉积 | 细粒湖相砂、泥岩 ^[50] |
| 生烃潜力 | 贫烃 | 富烃 ^[16] |
| 实例 | 内蒙古大青山盆地 ^[4,51] 挪威西南部 Hasteinen 盆地 ^[7] 美国 Chemehuevi 盆地 ^[27] 松辽南部阜新盆地 ^[28] 等 | 恩平凹陷 |

其中,湖盆的发育深度以及裂后的地层沉积厚度直接决定了这两类盆地具有不同的勘探潜力。上拆离盆地湖盆较浅且无裂后沉积,往往贫烃,储盖组合较差,勘探潜力差;而恩平凹陷湖盆发育深,且裂后沉积厚度大,烃源岩充足,储盖组合良好,具有较大的勘探价值。

4 结 论

(1)低角度断陷盆地与低角度正断层(LANF)密切相关,LANF是低角度断陷盆地形成的先决条件,但并非所有的LANF都能形成盆地,目前认为低角度断陷盆地都是上拆离成因的,对于是否还存在其他成因模式尚缺乏相关研究。LANF的成因机制中还有着一定的矛盾,限制了人们对低角度断陷盆地的成因模式以

及结构特征的进一步认识,因此探索低角度断层成因机制是推进低角度断陷盆地研究的重要途径。

(2)珠江口盆地恩平凹陷控洼断层F₁是形成于早白垩世的先存低角度逆断层,它经历了古新世以来的强烈负反转,导致了恩平低角度断陷的形成,这为非变质核杂岩构造背景下形成的低角度断陷盆地提供了一种新的成因模式,即低角度负反转断陷模式。对于此模式的认识还需有更多的实例论证和更深入的机制分析。

(3)低角度上拆离盆地经历了强烈而快速的水平伸展,呈现半地堑或碟形的结构形态,沉积厚度小、缺乏深湖相沉积,勘探意义不大。相比之下,负反转的恩平低角度断陷沉积了较厚的深湖相泥岩,而且储盖组合良好,具有极大的勘探价值。

参考文献

- [1] FILLMORE R P, WALKER J D, BARTLEY J M, et al. Development of three genetically related basins associated with detachment-style faulting: predicted characteristics and an example from the central Mojave Desert, California[J]. *Geology*, 1994, 22(12):1087-1090.
- [2] MCCLAUGHRY J D, GAYLORD D R. Middle Eocene sedimentary and volcanic infilling of an evolving supradetachment basin: White Lake Basin, south-central British Columbia[J]. *Canadian journal of earth sciences*, 2005, 42(1): 49-66.
- [3] HINSBERGEN D J V, MEULENKAMP J E. Neogene supradetachment basin development on Crete(Greece) during exhumation of the South Aegean core complex[J]. *Basin research*, 2006, 18(1): 103-124.
- [4] RITTS B D, BERRY A K, JOHNSON C L, et al. Early Cretaceous supradetachment basins in the Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China[J]. *Basin research*, 2010, 22(1): 45-60.
- [5] BROGI A. Bowl-shaped basin related to low-angle detachment during continental extension: the case of the controversial Neogene Siena Basin(central Italy, Northern Apennines)[J]. *Tectonophysics*, 2011, 499(1): 54-76.
- [6] FRIEDMANN S J, BURBANK D W. Rift basins and supradetachment basins: intracontinental extensional end-members[J]. *Basin research*, 1995, 7(2): 109-127.
- [7] VETTI V V, FOSSEN H. Origin of contrasting Devonian supradetachment basin types in the Scandinavian Caledonides[J]. *Geology*, 2012, 40(6): 571-574.
- [8] 任建业, 张俊霞. 低角度正断层的形成模式[J]. *地质科技情报*, 1995, 14(3): 9-14.
- [9] COLLETTINI C. The mechanical paradox of low-angle normal faults: current understanding and open questions[J]. *Tectonophysics*, 2011, 510(3/4): 253-268.
- [10] BARTLEY J M, FLETCHER J M, GLAZNER A F. Tertiary extension and contraction of lower-plate rocks in the Central Mojave Metamorphic Core Complex, southern California[J]. *Tectonics*, 1990, 9(3): 521-534.
- [11] LISTER G S, DAVIS G A. The origin of metamorphic core complexes and detachment faults formed during Tertiary continental extension in the northern Colorado River region, USA[J]. *Journal of structural geology*, 1989, 11(1/2): 65-94.
- [12] YIN An. Origin of regional, rooted low-angle normal faults: a mechanical model and its tectonic implications[J]. *Tectonics*, 1989, 8(3): 469-482.
- [13] YIN An, HACKER B R, CHRISTIE J M. Stress magnitude during the formation of mylonitic rocks in the Ruby Mountains and Snake Ranges, Eas Trans[J]. *AGU*, 1988, 69:1462-1463.
- [14] PARSONS T, THOMPSON G A. Does magmatism influence low-angle normal faulting?[J]. *Geology*, 1993, 21(3): 247-250.
- [15] ZHENG Yadong, WANG Tao, MA Mingbo, et al. Maximum effective moment criterion and the origin of low-angle normal faults[J]. *Journal of structural geology*, 2004, 26(2): 271-285.
- [16] 刘丽华, 陈胜红, 于水明, 等. 恩平凹陷成藏条件分析及商业性突破[J]. *中国海上油气*, 2011, 23(2): 76-80.
- [17] 任建业, 解习农. 大陆裂陷作用及盆地发育系统[J]. *地质科技情报*, 1996, 15(4): 26-32.
- [18] WERNICKE B. Low-angle normal faults in the Basin and Range Province: nappe tectonics in an extending orogen[J]. *Nature*, 1981, 291(5817): 645-648.
- [19] ANDERSON B E M. The dynamics of faulting[M]. London: Oliver and Boyd Edinburgh, 1951: 206.
- [20] LECOMTE E, POURHIET L L, LACOMBE O. Mechanical basis for slip along low-angle normal faults[J]. *Geophysical research letters*, 2012, 39(3): 75-81.
- [21] WERNICKE B, AXEN G J. On the role of isostasy in the evolution of normal fault systems[J]. *Geology*, 1988, 16(9): 848-851.
- [22] LISTER G S, BALDWIN S L. Plutonism and the origin of metamorphic core complexes[J]. *Geology*, 1993, 21(7): 607-610.
- [23] DAVIS G A, LISTER G S. Detachment faulting in continental extension: perspectives from the Southwestern U.S. Cordillera[J]. *Special paper of the Geological Society of America*, 1988, 218: 133-159.
- [24] ZHENG Yadong. A Quantitative analysis of the angle between conjugate sets of extensional crenulation cleavages: an explanation of the low-angle normal fault development[C]. Abstracts of 29th IGC, Kyoto, Japan, 1992, 3-1:131.
- [25] 郑亚东, 张青. 内蒙古亚干变质核杂岩与伸展拆离断层[J]. *地质学报*, 1993, 67(4): 301-309, 388.
- [26] SPENCER J E, REYNOLDS S J. Tectonics of Mid-Tertiary Extension along a transect through west central Arizona[J]. *Tectonics*, 1991, 10(6): 1204-1221.
- [27] WERNICKE B, SNOW J K, HODGES K V, et al. Structural constraints on Neogene tectonism in the southern Great Basin [M]//LAHREN M M, TREXLER J H, SPINOSA C. Crustal evolution of the Great Basin and the Sierra Nevada. Department of Geological Sciences, University of Nevada, 1993: 453-479.
- [28] WEI Honghong, LIU Junlai, MENG Qingren. Structural and sedimentary evolution of the southern Songliao Basin, northeast China, and implications for hydrocarbon prospectivity[J]. *AAPG bulletin*, 2010, 94(4): 533-566.
- [29] JOHN B E, HOWARD K A. Disharmonic drape folds in the highly attenuated Colorado River extensional corridor, California and Arizona[M]// MCGILL S F, ROSS T M. Geological investigations of an active margin. Geological Society of America, 1994: 94-106.
- [30] STEWART I S, HANCOCK P L. Normal fault zone evolution and fault scarp degradation in the Aegean region[J]. *Basin research*, 1988, 1(3): 139-153.
- [31] DAVIS G A, FRIEDMANN S J. Large-scale gravity sliding in the Miocene Shadow Valley Supradetachment Basin, Eastern Mojave Desert, California[J]. *Earth science reviews*, 2005, 73(1/4): 149-176.
- [32] JANECKE S U, BLANKENAU J C. Extensional folds associated

- with Paleogene detachment faults in SE part of the Salmon basin[J]. *Northwest geology*, 2003, 32: 51-73.
- [33] DORSEY R, MARTIN-BARAJAS A. Sedimentation and deformation in a Pliocene-Pleistocene transtensional supradetachment basin, Laguna Salada, northwest Mexico [J]. *Basin research*, 1999, 11(3): 205-221
- [34] 李平鲁, 梁慧娴, 戴一丁, 等. 珠江口盆地燕山期岩浆岩的成因及构造环境[J]. *广东地质*, 1999, 14(1): 1-9.
- [35] 易海. 南海东北部中生界发育特征与盆地分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011: 19-23, 42-46.
- [36] 鲁宝亮, 孙晓猛, 张功成, 等. 南海北部盆地基底岩性地震-重磁响应特征与识别[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(2): 563-572.
- [37] 王有功, 吕延防, 付广, 等. 复式断陷边界控陷断层生长特征及油气地质意义——以松辽盆地长岭早白垩世复式断陷群东部为例[J]. *地质学报*, 2014, 88(9): 1666-1676.
- [38] 朱志澄. 构造地质学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999: 173-174.
- [39] 刘安, 吴世敏. 珠江口盆地花岗岩成因探讨及其对油气资源指示意义[J]. *地学前缘*, 2011, 18 (1): 141-148.
- [40] 王家林, 张新兵, 吴健生, 等. 珠江口盆地基底结构的综合地球物理研究[J]. *热带海洋学报*, 2002, 21(2): 13-22.
- [41] 周蒂, 王万银, 庞雄, 等. 地球物理资料所揭示的南海东北部中生代俯冲增生带[J]. *中国科学: D辑 地球科学*, 2006, 36 (3): 209-218.
- [42] 闵慧, 任建业, 高金耀, 等. 南海北部古俯冲带的位置及其对南海扩张的控制[J]. *大地构造与成矿学*, 2010, 34(4): 599-605.
- [43] 杨少坤, 林鹤鸣, 郝沪军. 珠江口盆地东部中生界海相油气勘探前景[J]. *石油学报*, 2002, 23(5): 28-33.
- [44] 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.
- [45] 陈长民, 施和生, 许仕策, 等. 珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 1-35.
- [46] 陈汉宗, 吴湘杰, 周蒂, 等. 珠江口盆地中生代主要断裂特征和动力背景分析[J]. *热带海洋学报*, 2005, 24 (2): 52-61.
- [47] 何家雄, 陈胜红, 马文宏, 等. 南海东北部珠江口盆地成生演化与油气运聚成藏规律[J]. *中国地质*, 2012, 39(1): 106-118.
- [48] 周蒂, 孙珍, 陈汉宗, 等. 南海及其围区中生代岩相古地理和构造演化[J]. *地学前缘*, 2005, 12(3): 204-218.
- [49] HAQ B U. Sequence stratigraphy, sea-level change, and significance for the deep sea[J]. *International Association of Sedimentologists, special publication*, 1991, 12: 3-39.
- [50] 傅宁, 丁放, 何仕斌, 等. 珠江口盆地恩平凹陷烃源岩评价及油气成藏特征分析[J]. *中国海上油气*, 2007, 19(5): 295-299, 305.
- [51] 彭向东, 徐仲元, 刘正宏. 大青山地区侏罗纪陆相沉积盆地形成、迁移及演化规律[J]. *世界地质*, 2001, 20(3): 231-236.

编辑: 黄革萍

Structural characteristics and genetic model of the low-angle fault depression: a case in Enping Depression of Pearl River Mouth Basin

HE Yong, MEI Lianfu, SHI Hesheng, SHU Yu, CHEN Yang

Abstract: Up to now, in the geological community, it is generally believed that the low-angle rift basin was formed by low-angle normal detachment fault, and it can be divided into two genetic models: supradetachment breakaway model and supradetachment ramp model. In this paper five kinds of genetic models of low-angle normal fault are introduced and reviewed. Taking Enping low-angle fault depression of Pearl River Mouth Basin as an example, based on the 3D seismic profile interpretation and balanced cross-section restoration, this paper proposed a new model: negative reversion took place after the pre-existing low-angle reverse fault. It is shown that the different genetic basins have different structural characteristics. Low-angle supradetachment basin with shallow lake experienced minor post-rift subsidence, while low-angle negative reversion fault basin with deep lake underwent prominent post-rift subsidence, and the former tend to have no exploration potential, but the latter has a huge exploration potential.

Key words: graben basin; supradetachment basin; low-angle normal fault (LANF); negative inversion; Enping Depression; Pearl River Mouth Basin

HE Yong: MSc. Major in oil and gas, shale gas and coal-bed methane resources investigation and evaluation. Add: No. 39 Qinghua Rd., Qingyang District, Chengdu, Sichuan 610072, China