

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.02.009

珠江口盆地惠州凹陷西南部地区古近纪构造特征及其演化模式

陈翔¹, 张成^{1,2}, 秦成岗³, 刘坊¹, 朱雪颖¹, 李赫男¹

1. 中国地质大学(武汉)海洋学院, 武汉 430074

2. 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室, 武汉 430074

3. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司研究院, 广州 510240

摘要: 研究区位于珠江口盆地惠州凹陷西南部, 毗邻西江凹陷, 属于 NEE 走向和 NE 走向两组构造体系的转换部位。该地区古近系主要发育近 EW 走向、NW 走向和 NE 走向的 3 组断裂, 剖面上总体呈平直和铲状两种形态。3 组断裂共同控制了研究区古近系不同时期的断陷结构特征。断层活动性和构造沉降分析表明, 文昌组沉积期研究区东部北倾断层和西部南倾断层活动强烈, 沉降量和沉降速率均较大; 恩平组沉积期, 受南海扩张影响, 总体呈现南倾断层, 即向海倾断层活动明显增强, 沉降量和沉降速率显著增大的特点; 至珠海组沉积期断层活动总体较弱。构造格局及其演化明显控制沉积物充填。快速生长断层因两盘差异沉降显著, 其下降盘往地层厚度大, 以发育扇三角洲沉积体系为特征; 慢速生长断层下降盘的地层厚度相对较薄, 以发育沿断层转换带延伸的辫状河三角洲沉积体系为主。研究区古近纪的构造演化并非简单继承, 而是重大转换(T80 面是重要的构造变革面), 且这种转换是被动大陆边缘近端带对南海扩张作用远程响应的结果。

关键词: 断层活动性; 演化模式; 古近系; 惠州凹陷; 珠江口盆地

中图分类号: X141

文献标识码: A

Characteristics and evolutionary model of Paleogene structures in southwestern Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin

CHEN Xiang¹, ZHANG Cheng^{1,2}, QIN Chenggang³, LIU Fang¹, ZHU Xueying¹, LI Henan¹

1. College of Marine Science and Technology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources (China University of Geosciences), Ministry of Education, Wuhan 430074, China

3. Institute of Shenzhen Branch of China National Offshore Oil Company Ltd., Guangzhou 510240, China

Abstract: The study area is located in the southwest of the Huizhou Depression of the Pearl River Mouth Basin next to the Xijiang Depression at the transitional part of two tectonic systems trending in NEE and NE respectively. Three sets of fault systems, trending in EW and NW as well as NE directions, have been identified within the Depression. The faults may be classified into flat-type and shovel-type according to their profile patterns. And the three sets of faults jointly control the structural features of the Paleogene fault depression in different stages. The activity of N-dipping faults is stronger than the S-dipping faults in the east of the study area whereas the S-dipping faults are more active in the west of the study area during the stage when the WenChang Formation was deposited. With a high settlement rate, the activity of S-dipping faults, i.e., the sea-faced-dipping faults, were obviously intensified during the Enping stage because of the spreading of the South China Sea. The settlement and sedimentation rate increased significantly in the Zhuhai stage, although the activities of all faults were weakened. The sediment infilling is obviously controlled by the tectonic framework and its evolution. For rapid growing faults, due to the large difference between the hanging wall and footwall, thick deltaic depositional system will be developed on the subsiding plate. However, for the faults which grow slowly, thin braided river and its deltaic depositional system will develop on the declining plate along the fault transfer zone. The structural pattern of the study area in the Paleogene is not a simple copy of the former, but a significant structural conversion taking T80 as an important tectonic interface, as a long distance response to the South China Sea spreading.

资助项目: 国家自然科学基金“南海北部陆缘大型深水峡谷体系形成机制及充填构型对比研究”(41002031, 41372112)

作者简介: 陈翔(1991—), 女, 硕士生, 主要从事海洋地质与资源方面研究。

通讯作者: 张成(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事海洋地质与资源方面教研工作, E-mail: zhangch@cug.edu.cn

收稿日期: 2016-09-23; **改回日期:** 2016-12-11. 文凤英编辑

Key words: fault activity; evolutionary model; Paleogene; Huizhou depression; Pearl River Mouth Basin

1 区域地质背景

珠江口盆地位于中国南海北部,是中国最大的新生代准被动大陆边缘盆地。受印度洋板块、太平洋板块和欧亚板块交汇作用的影响,动力学背景复杂^[1,2]。惠州凹陷位于珠江口盆地珠一坳陷中部,整体呈菱形,呈 NE 走向,其北依北部断阶带,南部与中央隆起带的东沙隆起相邻,东边与惠西低凸起相接,西靠西江凹陷^[3]。研究区位于惠州凹陷西南部,面积约 1400km²,主要包括 A、B 和 C 等 3 个洼陷以及其间的凸起和斜坡等构造单元(图 1)。近些年来,前人针对珠一坳陷,乃至惠州凹陷古近纪构造演化曾开展过不同程度的研究。施和生等认为惠州凹陷古近纪构造演化属于典型的构造格局未发生变化的裂谷盆地幕式裂陷过程^[4];于水明等提出惠州凹陷古近纪断陷具有过渡动力学背景下的张扭性特征^[5];王维等认为惠州凹陷古近纪发生了三幕裂陷作用,早、晚文昌期的构造转换对沉积充填具有重要影响^[6];田巍等提出惠州凹陷古近纪构造演化受边界断裂联接模式制约,软、硬联接形成的构造样式具有显著差别等^[7]。这些成果均不同程度地揭示了珠江口盆地古近纪构造特征及其演化历史,但尚不能合理地解释惠州凹陷古近纪断裂活动的区段差异及其区域动力学机制。本文基于重新处理的三维地震资料,在构建古近系构造-地层格架的基础上,重点

分析了裂陷期构造-沉积特征,并结合区域背景和最新成果探讨了其区域动力学机制,为该地区基础地质研究和油气勘探提供了新参考。

2 构造几何学特征

2.1 断层几何学特征

断裂在盆地演化过程中起着重要的作用,它既可以控制盆地的空间形态,又可以控制盆地沉积充填过程及构造。研究区古近系以发育张性或张扭性正断层为主。平面特征上,研究区南部 C 洼陷以发育近 EW 走向断层为主,东北部以发育 NW 走向断层为主,西北部以发育 NE 走向断层为主(图 1)。剖面形态上,绝大多数断层产状较陡,倾角多在 50° 以上,且断面平直,呈板式,部分呈铲式;少数断层产状很缓,倾角甚至小于 30°,且断面形态多变,或呈低缓铲式,或呈坡坪式(图 2)。F1 至 F5 断层属控洼断层,它们或以单一式,或以雁列式组合控制了 A、B 和 C 等 3 个洼陷的发育和结构。其中,F2 断层为由一系列 NWW—NW 向延伸的高角度平直断层组成的总体 NW 走向的雁列式断层系;F3 断层自 SW 向 NE 逐渐由 NE 走向低角度铲式断层过渡为 NEE 走向低角度坡坪式断层;F5 断层自 W 向 E 逐渐由近 EW 走向高角度板式断层过渡为 NE 走向高角度铲式断层(图 1,2)。

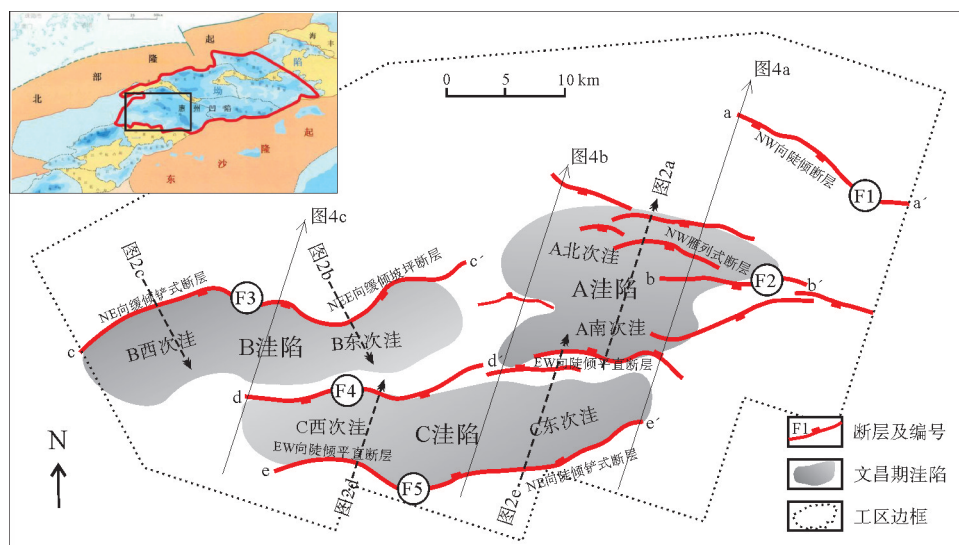


图 1 研究区位置、工区范围、断裂系统分布及文昌期构造单元划分图

Fig.1 Tectonic map of the study area in Wenchang stage

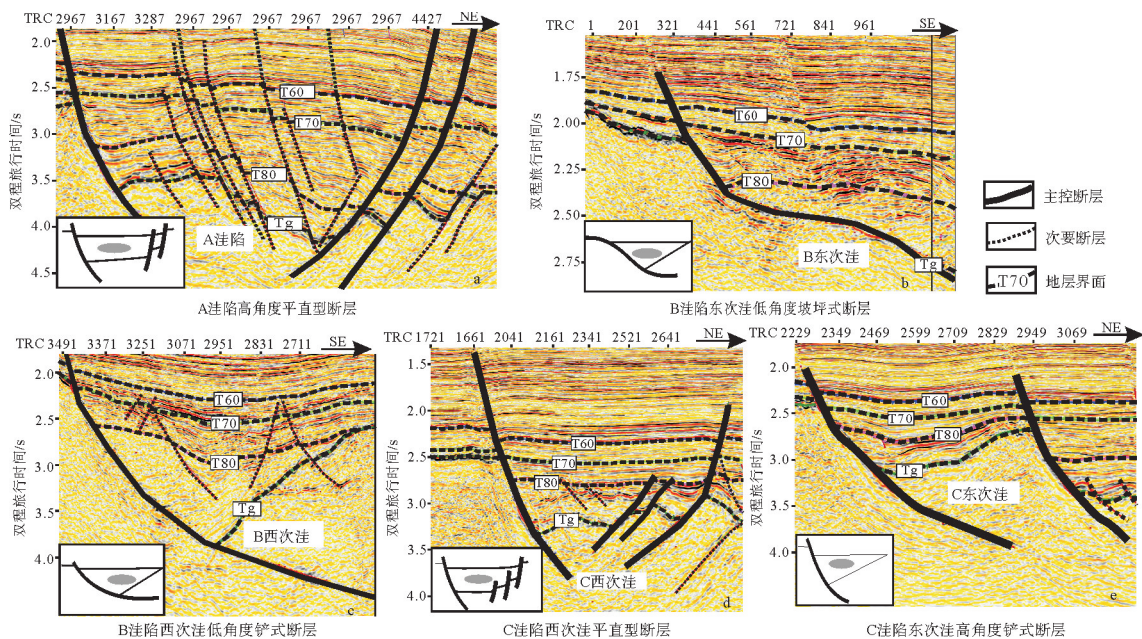


图2 控洼断层形态及洼陷结构剖面图

Fig.2 Profiles showing the shape of the main faults and internal structure of sags

2.2 洼陷结构特征

构造样式一般与地层的力学性质、变形机制、岩层变形与地层形成的年代关系、先存构造的影响等因素有关^[8],而区域的地质应力状态对断层的发育样式具有决定性影响。惠州凹陷古近纪为断陷结构,新近纪断陷特征基本消亡,为坳陷结构^[9]。

A 洼陷北部受一系列南倾的雁列式正断层控制,南部总体受多条北倾的规模稍小的断层控制,总体呈地堑式结构(图 2a);平面上呈 NWW 走向的带状,受伸入洼陷内部的凸起构造带分隔,分为南、北两个次洼(图 1)。A 南次洼呈近 EW 向延伸椭圆形,剖面上呈基底双侧断阶控边的地堑形态;A 北次洼呈 NW 向延伸沙漏形,剖面上呈双侧陡倾断层控边的地堑形态(图 2a);两者在洼陷内串联式组合。

B 洼陷剖面上总体呈半地堑形态,地层北厚南薄,向东南方向超覆(图 2c),平面上总体呈 NEE 向延伸的椭圆形(图 1)。F3 断层产状和活动性的区段式差异导致该洼陷以洼中隆为界分为东、西两个次洼。B 东次洼呈 NE 向延伸胖椭圆形,剖面上呈坡坪式断层控边的半地堑;B 西次洼呈 NEE 向延伸瘦椭圆形,剖面上呈缓倾铲式断层控边的半地堑(图 2c);两个次洼在洼陷内串联式组合。

C 洼陷剖面上总体呈南断北超的半地堑形态,地层厚度在洼陷东侧南厚北薄明显,向西地层厚度南北差异明显减弱(图 2d, 2e),平面上呈 EW 向延

伸的长椭圆形。F5 断层产状和活动性的区段式差异以及 F4 断层作用导致该洼陷以洼中脊为界分为东、西两个次洼。C 东次洼呈 NE 向延伸的椭圆形,剖面上呈陡倾铲式断层控边的半地堑形态(图 2e);C 西次洼呈近 EW 向延伸的长椭圆形,剖面上呈基底单侧断阶控边的地堑形态(图 2d);两个次洼在洼陷内串联式组合。

3 构造活动特征

3.1 断层活动性特征

断层活动性分析是沉积盆地分析的重要内容之一,本文采用断层活动速率来分析断层活动性特征。断层活动速率是指某一地层单元在一定时期内因断裂活动形成的落差与相应沉积时间的比值^[10-12]。研究区内 5 条主控断层的活动速率如图 3 所示。

文昌组沉积时期(49.0~39.0Ma),研究区北部的 F1 和 F2 断层活动速率较小,总体小于 50 m/Ma;F4 断层在 A 洼陷南侧活动速率最大,达 137 m/Ma;F5 断层的活动性也较强,其活动速率最大值达到 129m/Ma;F3 断层活动剧烈,最大活动速率达 202m/Ma。

恩平组沉积时期(39.0~33.9Ma),研究区北部的 F1 和 F2 断层活动性开始明显增强,F1 断层活动速率最大值达到 105 m/Ma。处于南部的 F4 和 F5

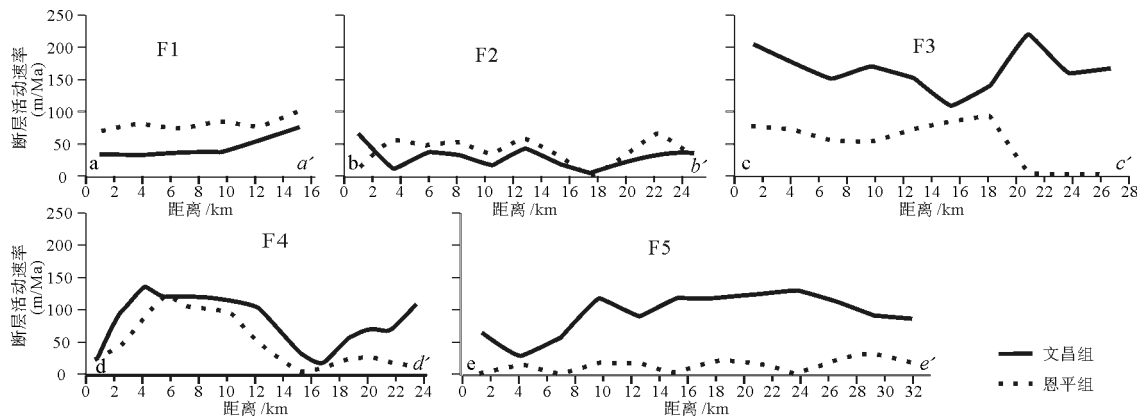


图 3 控注断层活动速率对比图

Fig.3 Comparison of moving rates of main faults

断层活动性明显减弱。F3 断层的活动性具有良好的继承性,在此时期活动也较强。

断层活动性特征表明,文昌组沉积期,研究区东部北倾断层活动强度总体高于南倾断层,西部 F3 断层活动强度较大;至恩平组沉积期,研究区东部北倾断层活动强度显著减弱,南倾断层活动性显著增强,而西部 F3 断层持续保持较大的活动强度。

3.2 沉降特征

本次研究利用回剥法,借助 Backang 软件模拟了研究区古近纪沉降史。沉降量和沉降速率计算结果表明,文昌组沉积期,研究区东部北倾断层的沉降量与沉降速率明显大于南倾断层的对应值(图 4a, 4b);而在恩平组沉积期,研究区东部南倾断层活动性增强,其沉降量与沉降速率明显大于北倾断层;沉降中心从文昌期至恩平期发生了自南向北的跷跷板式转换。研究区西部 B 洼陷的沉降量和沉降速率在文昌组沉积期和恩平组沉积期具有相似分布特征,总体表现为北侧大于南侧的特点,但恩平组沉降中心较文昌组沉降中心向北迁移(图 4c)。

断层活动特征以及区域沉降特征均表明,研究区文昌组与恩平组之间存在显著的构造转换,即 T80 界面为显著的构造转换面,其上、下具有完全不同的构造体制,属于两个不同的构造层。

4 沉积响应特征

4.1 地层厚度分布特征

文昌组和恩平组地层厚度的分布特征也显示了两个时期构造演化的区域性差异(图 5a, b)。总体来说,研究区文昌组至恩平组地层厚度变化呈现出

“东西不同、南北各异”的特点。大致以 B 洼陷和 A 洼陷过渡带为界划分为东、西两个区域;以 A 洼陷南侧断层带为界分为南、北两个带。剖面图和平面图均显示,研究区东部 A 和 C 两个洼陷文昌组的地层厚度总体呈南厚北薄特征(图 4, 图 5a),尤其是 C 洼陷东部地层厚度向北减薄的楔形特征非常明显,指示了北倾断层的强烈活动特征;而恩平组地层厚度则总体显示为北厚南薄的特点,厚度中心位于 F2 断层附近(图 4, 图 5b),说明该时期南倾断层活动性显著增强,控制了洼陷充填。研究区西部 B 洼陷文昌组地层厚度呈北厚南薄的特点,但厚度中心距离断层相对较远(图 4, 图 5a),指示了 F3 断层倾角较小、坡度较缓、活动性较强的特点;恩平组地层总体亦呈现北厚南薄的特点(图 4, 图 5b),南侧局部有一个小的厚度中心,反映了该时期 F3 断层持续活动,控制了沉积。

4.2 沉积体系展布特征

沉积体系类型及展布特征在一定程度上可以反映源汇系统和古地貌特征,进而可以反映形成古地貌的构造活动特征。当断层活动性强,物源通道与断层走向近乎垂直时,沿断层陡崖往往容易发育冲积扇和扇三角洲体系;相反,如断层活动性弱或不活动,即便物源通道与断层走向近乎垂直时,沿断面斜坡仍以发育辫状河三角洲体系为特征。研究区东部北倾 F5 断层附近在文昌组以发育扇三角洲为主,恩平组以辫状河三角洲为特征,说明该断层文昌组沉积期活动性强,上下盘落差大,易发育短源快速堆积,而恩平组沉积期活动性显著减弱,上下盘落差小,地形坡度变缓,有利于碎屑物质分选,形成成熟度相对较高的辫状河三角洲体系(图 5c, d)。研究区西部南倾 F3 断层在文昌组沉积期活动强度明显

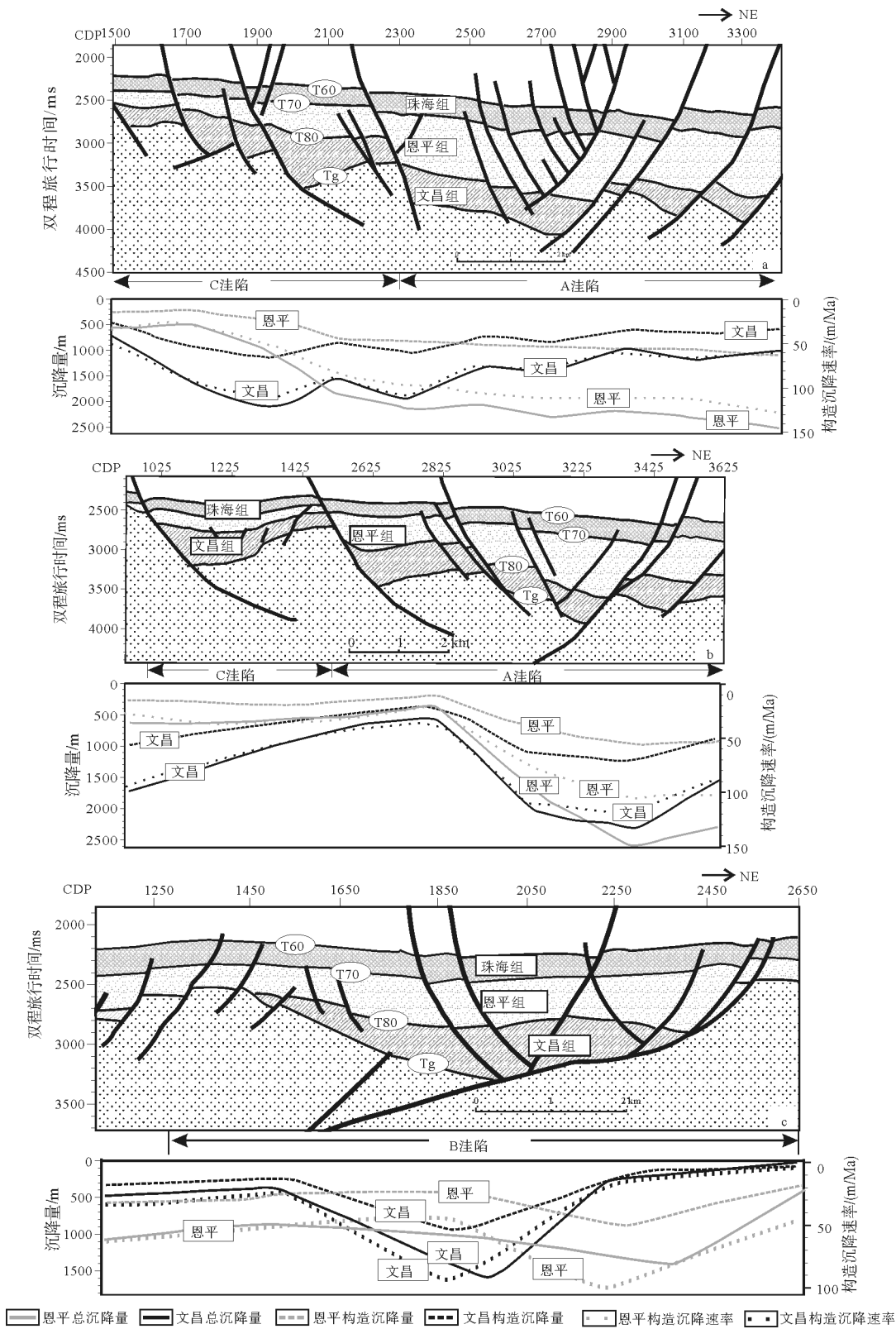


图 4 构造-地层格架、沉降量与沉降速率剖面图

Fig.4 Profiles showing the tectono-stratigraphic framework, subsiding quantities and rates

大于恩平组沉积期活动强度,因而文昌期以发育扇三角洲为主,而恩平期则以发育辫状河三角洲为特

征(图 5c,d),反映该断层继承性控制洼陷沉积、但强度有所减弱的演化特点。

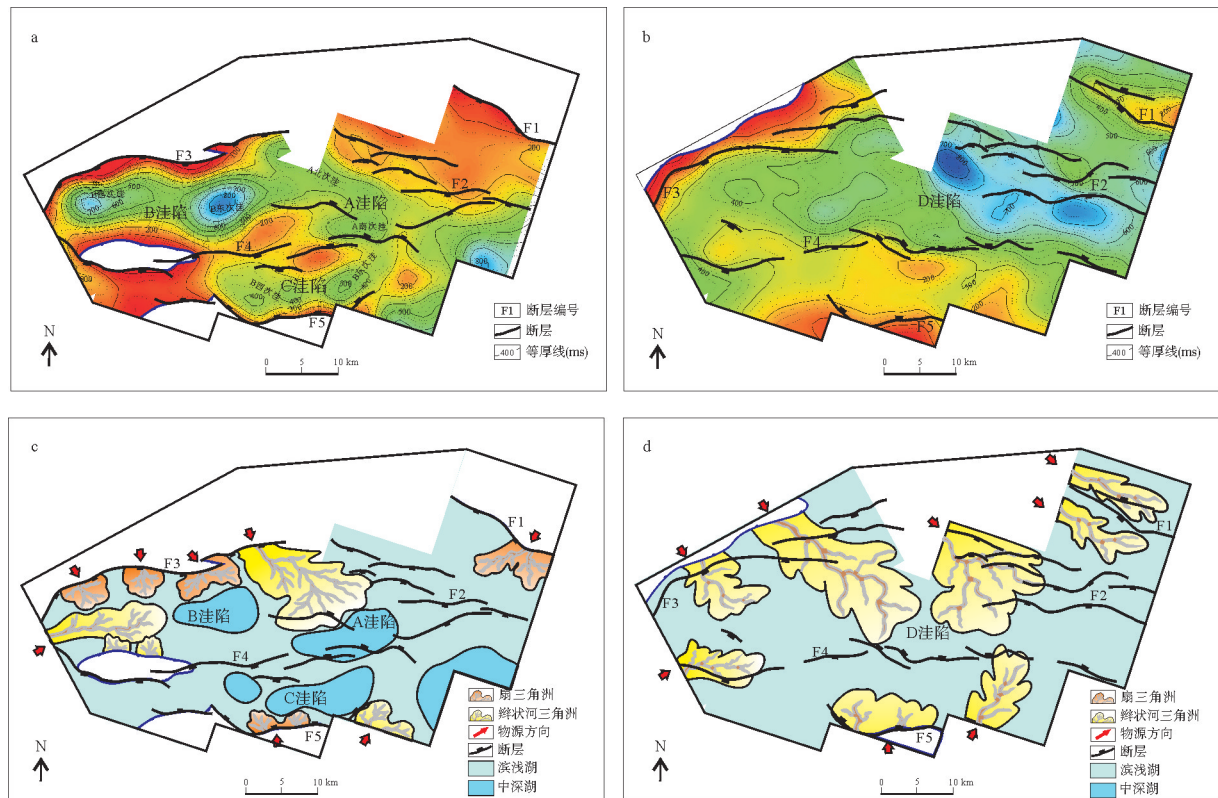


图 5 研究区古近纪不同时期地层厚度与沉积体系平面展布图

a:文昌组时间域厚度图;b:恩平组时间域厚度图;c:文昌组沉积体系平面图;d:恩平组沉积体系平面图

Fig.5 Paleogene maps of isopach and depositional systems in various periods in the study area

5 构造演化模式

珠江口盆地新生代时期属于被动大陆边缘,由于其毗邻南海中央海盆,故南海扩张对陆缘盆地的影响十分明显,该盆地中渐新世末即恩平组沉积之后即进入裂后期。这一变化特征是由于南海扩张脊向南跃迁所致。近期研究表明,被动大陆边缘岩石圈的伸展破裂并非简单的瞬时过程^[13],而是随时间经历了不同的变形机制及相应的变形过程,如大西洋 Iberia 边缘经历了均一纯剪切变形到不对称的简单剪切变形,构成了从伸展(纯剪切)-薄化(简单剪切)-剥露(简单剪切)-裂解(纯剪切)的岩石圈裂解阶段^[14]。因而,珠江口盆地裂陷拉张过程并不是简单的拉张过程,而可能是复杂的、多幕的非均质伸展过程。

文昌组沉积时期,在弥散式裂陷背景下发育了不同活动强度的南倾和北倾断层,总体上研究区东部北倾断层活动性强于南倾断层,研究区西部南倾断层活动强烈。由于断层的强烈分割,在研究区发育了 A、B 和 C 等 3 个洼陷,且总体上东部的两个洼

陷以南断北超的半地堑为特征(图 6a, c),西部的 B 洼陷以北断南超为特征,但断层倾角相对较小,沉积中心距离断层根部相对较远(图 6a, d)。

恩平组沉积时期,在拉张应力集中向南迁移至南海的背景下,南倾断层活动性强,北倾断层活动性减弱,进入非对称伸展时期^[15,16],断陷结构格局发生了很大变化,研究区所处位置为整个南海北部陆缘的近端带^[17,18]。文昌期的 C 洼陷至恩平期沉降幅度明显减小,逐渐演变成了缓坡带;B 洼陷在恩平期持续沉降,但 F3 断层产状变陡,控制 B 洼陷范围内的恩平组沉积,但沉积中心略向南迁移(图 6b, d);A 洼陷在恩平期持续沉降,但沉降中心明显向北迁移(图 6b)。因此,文昌组的各个洼陷至恩平组沉积期后,由于断层活动和沉降作用的差异,通过同向叠置和反向叠置的继承性发育,逐渐连通成为一个比较统一的结构实体,称为恩平期的 D 洼陷(图 6c)。恩平组沉积由北部边界断裂体系和南部边界断裂体系共同控制,北部断层活动相对更剧烈,下沉幅度更大,起主控作用,沉积中心相对统一于北部,地层北厚南薄,向南逐渐超覆,整个洼陷呈现半地堑结构特征(图 6b)。

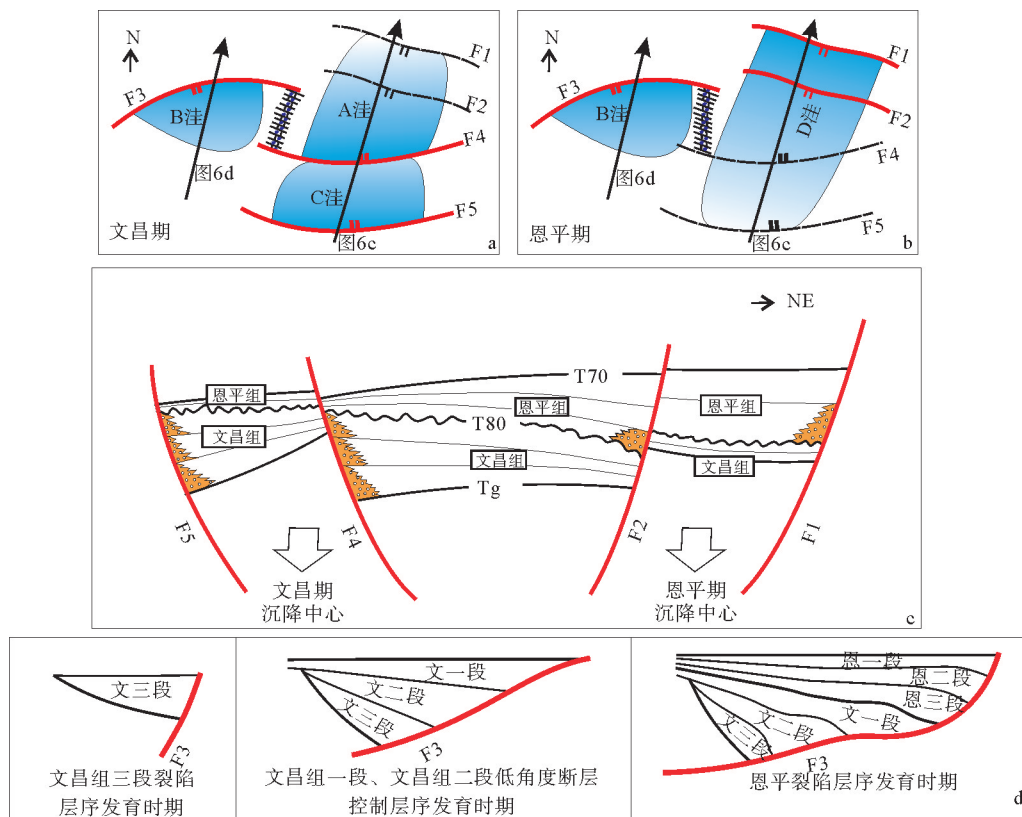


图6 惠西南地区古近纪构造演化模式

a: 文昌期洼陷结构样式; b: 恩平期洼陷结构样式; c: "跷跷板"型垂向叠置样式; d: 低角度铲式-坡坪式断层继承性叠置样式

Fig.6 Paleogene tectonic evolution model of southwest Huizhou Depression

珠琅运动二幕形成的 T80 界面,分隔了文昌组和恩平组两个构造幕的充填地层(图 6c)。区域上,该界面之下地层剥蚀明显,之上地层超覆于其上。界面上、下构造活动特征,地层发育特征差异明显,说明文昌组和恩平组两套地层发育期的构造体制具有显著差别,即 T80 界面为研究区乃至整个珠江口盆地古近系非常重要的构造转换面。

诚然,也有学者认为,珠江口盆地文昌组和恩平组时期的构造转换,特别是研究区范围内文昌期和恩平期断层活动性的差异是由于区域构造应力场从文昌期的近 SN 向伸展转换为恩平期的 NNE—SSW 向伸展的结果。

6 结论

(1) 区域构造位置决定了断层系统的空间分布和展布特征。惠西南地区位于珠江口盆地珠一坳陷中 NEE 向延伸的惠州凹陷向 NE 向延伸的西江凹陷构造转换部位,发育了 NW、NE 和近 EW 等 3 组不同走向的断裂系统,共同影响和控制了研究区的洼陷结构特征。NE 走向断裂系统主要发育在研究

区西部;近 EW 走向断裂系统主要分布在研究区东南部;NW 走向断裂系统主要发育在研究区东北部。

(2) 构造体制决定了断层系统在不同时期的发育强度明显不同。文昌期以弥散式裂陷为主,西南部南倾的 NE 走向断层和东部北倾的近 EW 走向断层活动明显,洼陷结构分别为北断南超和南断北超的半地堑,且西部 B 洼陷以低角度缓倾断层控洼为特征;恩平期在拉张应力集中向南迁移的背景下,南倾断层活动性强,北倾断层活动性减弱,西部的 NE 走向断层持续活动但产状变陡,洼陷结构具有一定的继承性,与早期洼陷呈同向叠置,东部的 NW 走向断层活动增强,形成了北断南超的半地堑,与早期洼陷呈反向叠置,且呈超覆特点。

(3) T80 界面是研究区重要的构造转换面。该界面上、下构造特征、地层展布均存在显著差别,是珠琅运动二幕形成的重要不整合界面。该界面的准确识别和厘定对于揭示研究区,乃至整个珠江口盆地古近纪的构造演化具有重要意义。

参考文献 (References)

- [1] Brian K H, Matthew M S. Sedimentology and chronology of paleogene coarse clastic rocks in east-central tibet and their relationship to early tectonic uplift[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(3): 398-408.
- [2] Zhou D, Ru K, Chen H Z. Kinematics of Cenozoic extension on the South China Sea continental margin and its implications for the tectonic evolution of the region[J]. *Tectonophysics*, 1995, 251(1-4): 161-177.
- [3] 郭伯举, 谢家声, 向凤典. 珠江口盆地珠一坳陷含油气系统研究[J]. *中国海上油气(地质)*, 2000, 14(1): 1-8. [GUO Boju, XIE Jiasheng, XIANG Fengdian. The study of the petroleum system in the Zhu I depression in Pearl River Mouth basin[J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 2000, 14(1): 1-8.]
- [4] 施和生, 于水明, 梅廉夫, 等. 珠江口盆地惠州凹陷古近纪幕式裂陷特征[J]. *天然气工业*, 2009, 29(1): 35-37. [SHI Hesheng, YU Shuiming, MEI Lianfu, et al. Features of paleogene episodic rifting in Huizhou fault depression in the Pearl River Mouth basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(1): 35-37.]
- [5] 于水明, 施和生, 梅廉夫, 等. 过渡动力学背景下的张扭性断陷——以珠江口盆地惠州凹陷古近纪断陷为例[J]. *石油实验地质*, 2009, 31(5): 485-489. [YU Shuiming, SHI Hesheng, MEI Lianfu, et al. Analysis of tense-shearing characteristics of Huizhou paleogene fault depression in Pearl River Mouth basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2009, 31(5): 485-489.]
- [6] 王维, 叶加仁, 杨香华, 等. 珠江口盆地惠州凹陷古近纪多幕裂陷旋回的沉积物源响应[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2015, 40(6): 1061-1071. [WANG Wei, YE Jiaren, YANG Xianghua, et al. Sediment provenance and depositional response to multistage rifting, Paleogene, Huizhou depression, Pearl River Mouth basin[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2015, 40(6): 1061-1071.]
- [7] 田巍, 何敏, 杨亚娟, 等. 珠江口盆地惠州凹陷北部边界断裂复合联接和转换[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2015, 40(12): 2037-2051. [TIAN Wei, HE Min, YANG Yajuan, et al. Complex linkage and transformation of Boundary Faults of Northern Huizhou Sag in Pearl River Mouth Basin[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2015, 40(12): 2037-2051.]
- [8] 吴艳婷, 邓宏文, 芮志峰, 等. 珠江口盆地惠州凹陷西区珠江组层序地层学研究[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(7): 111-116. [WU Yanting, DENG Hongwen, RUI Zhifeng, et al. Research on sequence stratigraphy of Zhujiang Formation in Western Huizhou Sag[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(7): 111-116.]
- [9] Zhu J Z, Shi H S, Deng H W, et al. Geochemistry of source rocks in paleogene sequence of Huizhou depression, Pearl River Mouth Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(5): 709-714.
- [10] Kim Y S, Sanderson D J. The relationship between displacement and length of faults: a review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2005, 68(3-4): 317-334.
- [11] 刘忠亚, 彭轩明, 赵铁虎, 等. 渤海海峡及邻区活动断裂分布及其活动特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(1): 87-97. [LIU Zhongya, PENG Xuanming, ZHAO Tiehu, et al. The distribution and activities of active faults in the Bohai Strait and its adjacent areas[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(1): 87-97.]
- [12] 王冠民, 付尧, 张健, 等. 渤中凹陷古近纪控盆断裂的活动速率与沉积响应[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(4): 85-92. [WANG Guanjin, FU Yao, ZHANG Jian, et al. Mobility of paleogene basin-controlling faults in the Bozhong Sag and depositional responses[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(4): 85-92.]
- [13] Hauptert I, Manatschal G, Decarlis A, et al. Upper-plate magma-poor rifted margins: Stratigraphic architecture and structural evolution[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2015, 69: 241-261.
- [14] Sutra E, Manatschal G, Mohn G, et al. Quantification and restoration of extensional deformation along the Western Iberia and Newfoundland rifted margins[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, 14(8): 2575-2597.
- [15] Wernicke B, Burchfiel B C. Models of Extensional Tectonic[J]. *Journal of Structural Geology*, 1982, 4(2): 105-115.
- [16] Xie X N, Müller R D, Ren J Y, et al. Stratigraphic architecture and evolution of the continental slope system in offshore Hainan, northern South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2008, 247(3-4): 129-144.
- [17] 任建业, 庞雄, 雷超, 等. 南海北部陆缘深水-超深水盆地结构和演化[C]//第十七届中国科协年会论文集. 广州: 中国科学技术协会, 2015. [REN Jianye, PANG Xiong, LEI Chao, et al. Structure and evolution of deep water/superdeep water basins in the northern continental margins of south China Sea [C]//Annual meeting of the seventeenth China Association for science and technology-Proceedings of 9 Symposium on deepwater oil and gas exploration and development technology in South China Sea. Guangzhou: China Association for Science and Technology, 2015.]
- [18] Lavie L L, Manatschal G. A mechanism to thin the continental lithosphere at magma-poor margins[J]. *Nature*, 2006, 440(7082): 324-328.