

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2017.06.005

南海北缘珠三坳陷新生代构造沉降特征

陈梅^{1,2}, 施小斌¹, 刘凯³, 任自强^{1,2}, 于传海¹

(1. 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 湛江 524057)

摘要:盆地的构造沉降史是盆地基底垂向升降的历史记录,不仅可以反映盆地形成演化历史,而且可能记录了深部地质过程的信息。近年来,越来越多的地球物理证据显示,雷琼地区深部存在延伸到下地幔的柱状低速异常体。为了揭示该深部异常体的活动信息,利用地震资料和钻孔资料,采用回剥和应变速率反演技术,计算了珠三坳陷各构造单元的构造沉降曲线和理论构造沉降曲线。结果显示,珠三坳陷新生代构造沉降可划分为 5 个阶段:初始张裂慢速沉降(65~49.5 Ma),张裂期快速沉降(49.5~30 Ma),裂后慢速热沉降阶段 I(30~23.03 Ma),裂后加速沉降(23.03~16.5 Ma),裂后慢速热沉降阶段 II(16.5~0 Ma)。珠三坳陷在裂陷期存在沉降亏损现象,裂后期存在 300~800 m 异常沉降可能是对前期沉降不足的补偿,可能与裂陷期软流圈热物质上涌和消退有关。研究结果还表明 23.03~10.5 Ma 珠三坳陷构造沉降中心发生北东向的迁移,是否与深部异常体活动有关或受区域应力场影响,还需进一步研究。

关键词:构造沉降;沉降亏损;异常沉降;珠三坳陷

中图分类号:P736.1

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2017)06-0047-10

近年来,越来越多的研究表明海南岛和雷州半岛下方存在延伸到下地幔的柱状低速异常体^[1-8],但是该异常体是什么时间发生的,对南海北部盆地发育有何影响等仍有待深入研究。McKenzie 提出一维瞬时均匀拉张模型,认为张性盆地岩石圈经过快速拉张、减薄,形成速度较快的初始沉降,拉张结束后岩石圈进入热松弛阶段,盆地发生热沉降^[9]。初始沉降和热沉降统称为构造沉降,可以反映盆地形成演化的历史^[10,11],也可能记录了深部地质过程的信息^[10,11]。珠三坳陷位于海南岛东部,处于该低速异常体^[1-8]东南上方(图 1),其构造沉降历史很可能记录了其下方低速体活动的信息。珠三坳陷经过 40 多年的油气勘探^[12],积累了丰富的地震资料和钻孔数据。为了考察深部异常体活动信息及其对浅部盆地发育的影响,本文以地震资料和井资料为基础,采用回剥和应变速率反演技术,揭示了珠三坳陷新生代构造沉降的时空分布特征,试图探寻深部异常体的可能活动记录。

1 区域地质背景

南海北部边缘为伸展大陆边缘,新生代以来发

育一系列伸展沉积盆地,珠江口盆地为南海北部最大的新生代沉积盆地^[13]。珠三坳陷位于该盆地西部陆架区,东接珠一坳陷,西靠海南岛,南临神狐隆起,北靠北部隆起带,面积约 $1.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。坳陷新生代沉积厚度近 10 km,包含 9 个构造单元:文昌 A 凹陷、文昌 B 凹陷、文昌 C 凹陷、琼海凹陷、阳江 A 凹陷、阳江 B 凹陷、阳江凸起、阳江低凸起和琼海凸起^[14-16](图 1)。

珠三坳陷新生代构造演化可划分为 3 个阶段:断陷阶段(65~30 Ma)、断坳转换阶段(30~16.5 Ma)和坳陷阶段(16.5~0 Ma)^[17]。古新世早期—早渐新世,南海北部陆缘开始张裂,形成一系列北东向的断陷盆地,珠三坳陷沉积了神弧、文昌组和恩平组巨厚陆相地层。晚渐新世,发生南海运动,南海开始海底扩张,珠三坳陷沉积了一套海陆交互相地层(珠海组)。早中新世,海水未全部覆盖神狐隆起区,珠三坳陷为局限海沉积环境,沉积了潟湖—潮坪为主的珠江组。中中新世以来,海水大规模侵入,坳陷由局限海环境转变为开阔海环境,沉积了以滨浅海相为主的韩江组、浅海相为主的粤海组、万山组和琼海组^[15,17-21]。

2 方法与数据

2.1 方法

首先采用回剥法计算单井实测构造沉降史;然

基金项目:国家自然科学基金项目(41576036)

作者简介:陈梅(1988—),女,博士生,主要从事海洋构造地质与盆地演化研究, Email: chenmei@scsio.ac.cn.

收稿日期:2017-05-30; **改回日期:**2017-07-18. 文凤英编辑

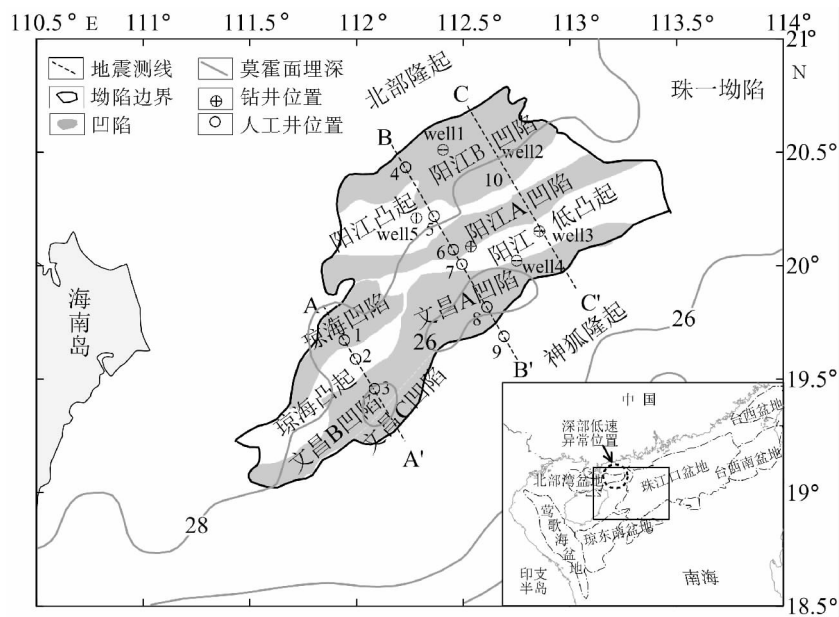


图 1 研究区构造划分及回剥点位置^[15]

Fig. 1 Tectonic units of study area and location of sections and wells^[15]

后利用 White^[22] 的拉张应变速率法,由构造沉降史反演该井的拉张应变速率史,根据裂陷阶段的拉张应变速率史计算出理论的裂后构造沉降史^[22,23],实测构造沉降量减去理论构造沉降量即为裂后异常沉降量;最后,根据现今地壳厚度计算拉张因子,采用正演模块,计算张裂期均匀拉张理论构造沉降曲线。文中共计算了 3 种类型的构造沉降曲线:

(1)实测构造沉降:根据现今地层厚度,采用回剥法计算得到总沉降曲线,经过去压实、古水深、载荷、海平变化矫正后,得到实测构造沉降曲线。

假设艾利均衡,某时刻载水构造沉降 Y 为^[24]:

$$Y = \left[\frac{\rho_m - \rho_s}{\rho_m - \rho_w} \right] s^* - \Delta sl \left(\frac{\rho_m}{\rho_m - \rho_w} \right) + W_d \quad (1)$$

式中: Y 为水盆构造沉降(m); ρ_m, ρ_s, ρ_w 分别为地幔、沉积层和水的平均密度(kg/m^3); s^* 为去压实后的沉积层厚度(m); Δsl 为古海平面相对于现今海平面的变化(m); W_d 为沉积时期的古水深(m)。

文中选取了 11 个界面进行回剥计算,即 Tg(65 Ma)、T9(49.5 Ma)、T80(35 Ma)、T70(30 Ma)、T60(23.03 Ma)、T50(18.5 Ma)、T41(17.5 Ma)、T40(16 Ma)、T20(10.5 Ma)、T10(5.5 Ma)、T0(2.5 Ma)(表 1),界面深度根据中海油时-深转换公式计算。古水深依据前人的沉积相进行估算^[16,17,25]。全球海平面变化根据 Haq(1987)等发表的全球海平面变化曲线,取三级层序对应的海平面值,Haq 的海平面变化曲线中海退界面是一个突变面,文中取它的中值^[26](表 1)。砂泥岩百分含量根

表 1 珠三坳陷地层界面年龄及全球海平面变化(据 Haq 等,1987)

Table 1 Age of the sequence boundaries in Zhu III depression (The ages used from CNOOC and sea level changes from Haq et al 1987)

地层界面	年龄/Ma	全球海平面/m
海底	0	0
T0	2.5	-30
T10	5.5	3
T20	10.5	-10
T40	16	95
T41	17.5	124
T50	18.5	128
T60	23.03	139
T70	30	100
T80	35	160
T9	49.5	148
Tg	65	212

据钻井数据或根据地震相特征估算^[15, 18, 21]。去压实过程中,采用的是 Scalater 和 Christie(1980)指数模型:

$$\phi = \phi_0 * e^{-C * z} \quad (2)$$

ϕ 为孔隙度, ϕ_0 为原始孔隙度, C 为压实系数(km^{-1}), Z 为深度(km)。

(2)理论构造沉降 I:由实测构造沉降史,采用

White^[22] 拉张应变速率反演法,通过拟合实测构造沉降史,计算其拉张应变速率史,再根据张裂期应变速率,计算理论构造热沉降曲线 I^[23, 27, 28]。

该方法的正演模块假定岩石圈以水平速度 $u(x, t)$ 伸展,软流圈物质通过底边界 $z=0$ 填补岩石圈底界拉伸所产生的空间(图 2)。在均匀拉张模型中若 $G(t)$ 为垂向应变速率(s^{-1}),则水平应变速率为 $-G(t)$ 。 $G(t)$ 已知时,可根据下式求不同时刻拉张后均衡调整前的节点位置:

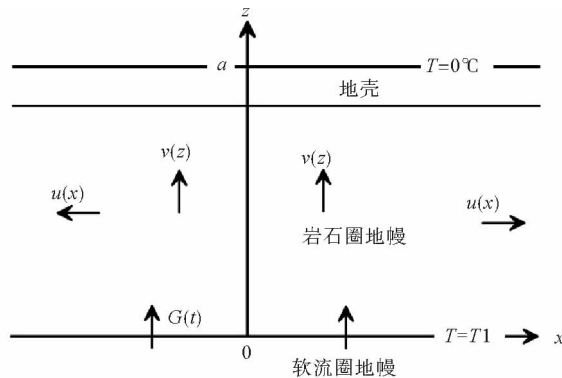


图 2 与时间相关的岩石圈拉伸模型^[22, 23]

a 为地壳厚度, T_1 为软流圈温度, $u(x)$ 为岩石圈水平伸展速度, $v(z)$ 垂向速度(参数见表 2)

Fig. 2 Physical model for time-dependent stretching of the lithosphere^[22, 23]

a -the thickness of earth crust; T_1 -the temperature of the asthenosphere; $u(x)$ - horizontal velocity of lithosphere; $v(z)$ -vertical velocity. (see table 2 for detailed parameters)

$$V(z, t) = (a - z)G(t) \quad (3)$$

$$u(x, t) = xG(t) \quad (4)$$

均衡调整需要计算补偿深度以上的负载。计算负载时物质密度与温度的关系为:

$$\rho = \rho_0 (1 - \alpha T) \quad (5)$$

ρ_0 为物质在 0°C 时的密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); α 为热膨胀系数($^\circ\text{C}^{-1}$)。其中温度场 $T(z, t)$ 按热传输方程计算:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + G(a - z) \frac{\partial T}{\partial z} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (6)$$

式中, k 为热扩散率(m^2/s); z 为深度(km)。模型上边界取 0°C , 下边界取 1333°C , 两侧取绝热边界^[23]。

(3) 理论构造沉降 II: 据现今地壳厚度与初始张裂厚度的比值计算现今拉张因子 β_0 , 假设珠三坳陷在张裂期($65 \sim 30 \text{ Ma}$)以该拉张因子均匀拉张, 得另一预测理论构造沉降曲线 II。假定研究区初始地壳厚度为 32 km ^[23], 现今莫霍面埋深据广州海洋地

质调查局资料^[29] 获得。

表 2 模型参数值^[23, 24, 28]

Table 2 Values of model parameters^[23, 24, 28]

参数物理含义	参考值	参数符号/单位
岩石圈初始厚度	125	a/km
地壳初始厚度	32	T_c/km
热膨胀系数	3.28×10^{-5}	$\alpha/^\circ\text{C}^{-1}$
地幔密度	3 330(0°C)	$\rho_m/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
软流圈密度	3 185(1350°C)	$\rho_a/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
海水密度	1 030	$\rho_w/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
砂岩骨架密度	2 650	$\rho_{\text{sand}}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
泥岩骨架密度	2 720	$\rho_{\text{mud}}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
粉砂岩骨架密度	2 650	$\rho_{\text{time}}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
砂岩初始孔隙度	0.49	ϕ_0
泥岩初始孔隙度	0.63	C
粉砂岩初始孔隙度	0.56	
砂岩压实系数	0.27	
泥岩压实系数	0.51	
粉砂岩压实系数	0.39	

2.2 数据

由于研究区钻孔分布不均,且多分布在构造高部位,地层钻遇不完整,因此文中选取了过坳陷东部、中部、西部的 3 条地震测线,覆盖了研究区所有构造单元,在凸起和凹陷中心选择了 10 口人工井(图 1、图 3)进行回剥计算,同时还选择了 7 口钻孔进行计算,文中展示了其中 5 口(图 1)。

3 结果

3.1 新生代构造沉降的时间差异

珠三坳陷新生代沉降可划分为 5 个阶段:初始张裂慢速沉降($65 \sim 49.5 \text{ Ma}$),张裂期快速沉降($49.5 \sim 30 \text{ Ma}$),裂后慢速热沉降阶段 I($30 \sim 23.03 \text{ Ma}$),裂后加速沉降($23.03 \sim 16.5 \text{ Ma}$),裂后慢速热沉降阶段 II($16.5 \sim 0 \text{ Ma}$)。

(1) 初始张裂慢速沉降($65 \sim 49.5 \text{ Ma}$)

本阶段为盆地初始拉张期,主要在凹陷中心有残留沉积,构造沉降速率较小,约为 $17 \sim 30 \text{ m/Ma}$ (图 4-3, 8)。

(2) 张裂期快速沉降($49.5 \sim 30 \text{ Ma}$)

本阶段为快速张裂期。文昌组沉积期($49.5 \sim 35 \text{ Ma}$)正向构造单元为隆起区(图 4-5, 9),为各凹

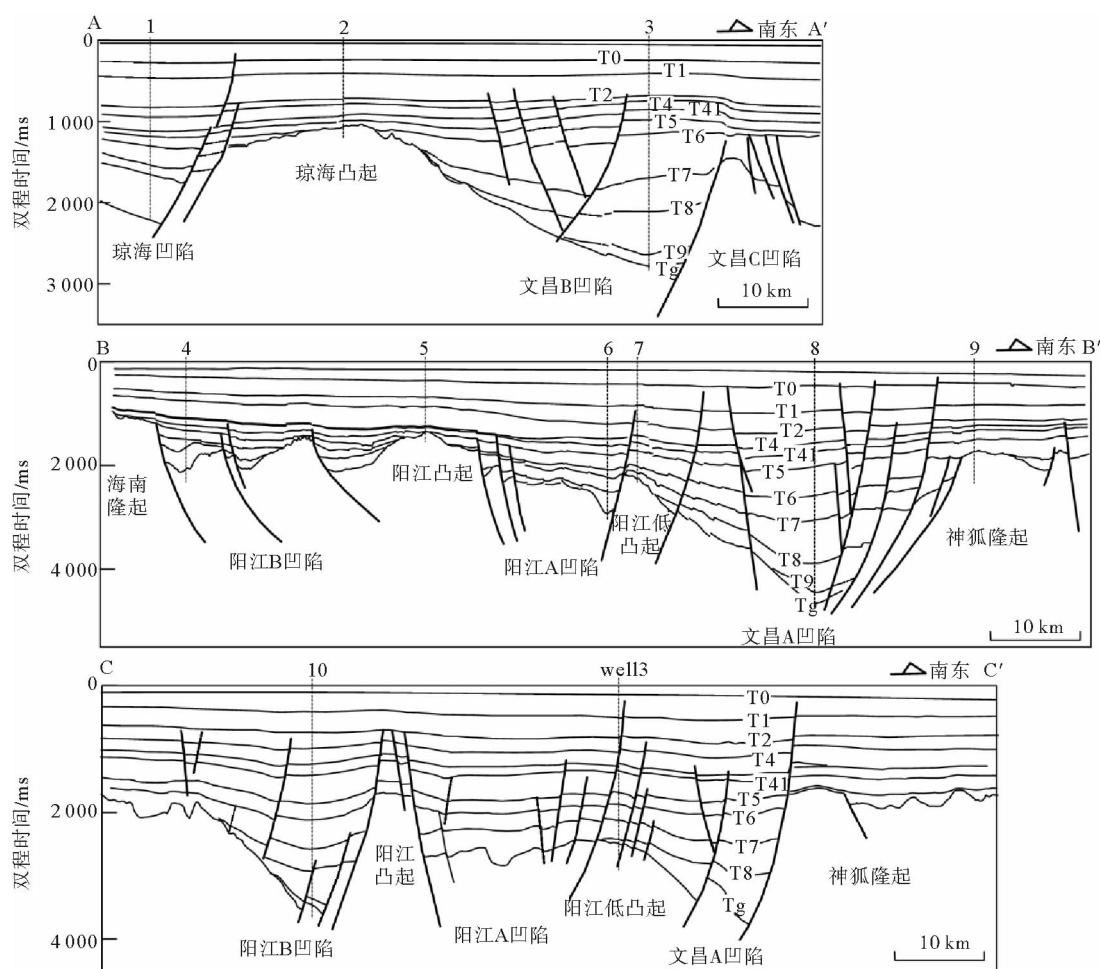


图 3 地震剖面简图及人工井位置(剖面位置见图 1)

Fig. 3 Simplified seismic sections and locations of man-made wells (See Fig. 1 for location)

陷发育鼎盛期,文昌 A、B 凹陷和琼海凹陷的沉降速率最高,达 $60 \sim 71$ m/Ma;阳江 A 凹陷和阳江 B 凹陷的沉降速率约 50 m/Ma(图 4-6, 10)。恩平组沉积期($35 \sim 30$ Ma)为珠三拗陷的快速沉降阶段,文昌 A 凹陷的沉降速率最高,达 162 m/Ma(图 4-8);阳江 A 凹陷、文昌 B 凹陷构造沉降速率为 $80 \sim 88$ m/Ma(图 4-3);琼海凹陷、阳江 B 凹陷和阳江低凸起的构造沉降速率相当,约为 50 m/Ma(图 4-1, 10, 5),琼海凸起、阳江凸起和神狐隆起区为古隆起区。

(3) 裂后慢速热沉降阶段 I ($30 \sim 23.03$ Ma)

本阶段为珠三拗陷的慢速热沉降阶段,文昌 A、B 凹陷构造沉降速率最大,约为 30 m/Ma;阳江地区(阳江 A、B 凹陷、阳江低凸起)和文昌 B 凹陷沉降速率最小,约为 10 m/Ma;琼海凹陷的沉降速率介于文昌 A、B 凹陷和阳江地区之间。琼海凸起、阳江凸起和神狐隆起区依旧为古隆起。

(4) 裂后加速沉降 ($23.03 \sim 16.5$ Ma)

本阶段为珠三拗陷的裂后加速沉降阶段,尤其

是在 $18.5 \sim 16.5$ Ma 构造沉降速率最高达 160 m/Ma。 $23.03 \sim 18.5$ Ma,文昌 A 凹陷沉降速率最大,达 64 m/Ma(图 4-8);阳江低凸起和阳江 A 凹陷次之;其余构造单元沉降速率相当,为 18 m/Ma。 $18.5 \sim 17.5$ Ma,珠三拗陷全区快速沉降,凹陷与凸起的构造沉降速率都很高,文昌 A 凹陷、阳江低凸起、阳江 A 凹陷、阳江凸起构造沉降速率达 $100 \sim 145$ m/Ma(图 4);其余构造单元构造沉降速率达 $68 \sim 78$ m/Ma。 $17.5 \sim 16.5$ Ma 期间珠三拗陷的沉降速率依然很高,琼海凸起、阳江低凸起、阳江 A 凹陷和文昌 A 凹陷构造沉降大,沉降速率为 $120 \sim 160$ m/Ma;阳江 B 凹陷、阳江凸起构造沉降速率为 $60 \sim 70$ m/Ma。

(5) 裂后慢速热沉降阶段 II ($16.5 \sim 0$ Ma)

16.5 Ma 之后,珠三拗陷进入稳定的裂后慢速热沉降阶段。 $16.5 \sim 10.5$ Ma,琼海凹陷、琼海凸起、文昌 B 凹陷、文昌 A 拗陷沉降速率低于阳江 B 凹陷、阳江凸起、阳江 A 凹陷和阳江低凸起,前者构

造沉降速率为 26~38 m/Ma,后者为 50~80 m/Ma。10.5~0 Ma 为稳定慢速沉降阶段,各构造单元沉降速率介于 10~56 m/Ma 之间(图 4)。

3.2 新生代构造沉降的空间差异

研究区构造单元呈北东—南西向展布,可划分 3 个区带,南部包含文昌 A、B 凹陷,中部包含阳江 A 凹陷、琼海凹陷,北部为阳江 B 凹陷,各凹陷之间构造沉降差异较大。空间上构造沉降量具有南大北小、东大西小的特征。构造沉降最大的为文昌 A、B 凹陷,达 3 000 m;其次为阳江 A 凹陷、琼海凹陷、阳江 B 凹陷,构造沉降量近 2 000 m;阳江凸起和琼海凸起的构造沉降最小,约 1 000 m(图 4)。

裂陷期沉降中心位于文昌 A 凹陷和文昌 B 凹陷,珠江组沉积期构造沉降中心开始向北东向迁移,阳江低凸起、阳江 A 凹陷、琼海凸起构成中部构造带,沉降速率最高。16.5~10.5 Ma,构造沉降中心迁移至坳陷北部阳江凸起、阳江 A 凹陷和阳江 B 凹陷。10.5~0 Ma,各构造单元构造沉降速率差异不大。

3.3 裂后异常沉降与张裂期沉降不足

计算结果表明,珠三坳陷裂后期存在异常沉降。裂后阶段,实测构造沉降曲线(图 4,实线)开始偏离理论构造沉降曲线(图 4,粗虚线),18.5~16.5 Ma 偏离加剧,表现为明显的快速沉降(图 4)。裂后异常沉降量普遍介于 300~800 m 之间,从坳陷北部向南部呈增大趋势。

图 4 还显示张裂阶段实测构造沉降量(图 4,实线)明显小于据现今拉张因子均匀拉张的理论沉降量(图 4,三角形虚线),但均匀拉张的理论沉降总量与实测回剥构造沉降总量基本相当,表明珠三坳陷在张裂阶段的实际构造沉降存在“亏损”,后期的加速沉降很可能是对前期沉降亏损的补偿。

4 讨论

4.1 珠三坳陷裂后异常沉降机制探讨

近年来,许多张性盆地发现裂后沉降量远大于按 McKenzie 模型预测的裂后沉降量,即存在裂后异常沉降,如南非的加蓬盆地南部存在裂后早期异常沉降^[30]、泰国湾的北大年盆地和马来盆地沉积了巨厚的裂后层序^[31]。南海北部新生代构造沉降已有诸多研究,揭示南海北部存在裂后快速沉

降^[13,23,27,28,32-34],南海北部陆架区存在 300~700 m 的裂后异常沉降,陆坡区存在 900~1 200 m 的异常沉降等^[33]。前人也提出了诸多异常沉降机制,包括动力地貌^[33]、岩浆活动^[23,33,35]、沉积物负载引起的下地壳流^[31,34,36]、深部热异常的支撑和消退^[27,28]等。

珠三坳陷存在 300~800 m 的裂后异常沉降,这一结果与前人^[33]基本一致,18.5~16.5 Ma 期间加速沉降,时间上与珠一坳陷一致^[37]。珠江口盆地的海平面变化曲线^[38]揭示,18.5~16.5 Ma 珠江口盆地海平面快速升高,与珠江口盆地 18.5~16.5 Ma 期间高沉降速率对应,而全球海平面却相对稳定^[39],表明珠三坳陷该时期的快速沉降不是由全球海平面升高引起,而是基底发生了快速沉降。

珠三坳陷的新生代构造沉降特征与琼东南盆地^[27,28]具有相似性,但也有不同之处。相似性表现为“先抑后扬”,不同之处是裂后异常沉降的时间不同,琼东南盆地主要在 10.5 Ma 之后发生加速沉降^[23,27,28,32,34],珠三坳陷在 18.5~16 Ma 发生快速沉降^[37]。导致这种“先抑后扬”的原因,可能是岩石圈强度变化。珠三坳陷现今地壳拉张因子 β 为 1.25~1.8,张裂期地壳并未经过强烈减薄,因此岩石圈在张裂阶段保持高强度的可能性很大,导致张裂期沉降不足。裂后阶段沉积物厚度增大、岩石圈埋深增加,导致岩石圈强度降低,发生裂后补偿性沉降,但这一点不足以解释珠三坳陷裂后异常沉降,因为珠三坳陷发生快速沉降的时间是 18.5~16.5 Ma,此时的裂后沉积物厚度并不大。

Reston 认为大陆裂解过程中,上涌的软流圈物质与岩石圈底部之间若存在 100 K 的温差,可导致 600 m 的沉降亏损^[40]。近年来,越来越多的研究表明南海西北部下面存在深部异常体:①层析成像结果显示,海南岛和雷州半岛下方存在明显延伸到地幔的柱状低速异常结构^[1-7];②海南岛东北部存在一个直径 200 km 的薄地幔过渡区^[41];③南海及周边发育大量碱性玄武岩,地球化学指示可能为地幔柱成因^[42-44];④南海地区存在较高的地幔潜在温度^[45,46];⑤雷琼地区和印支半岛新近纪玄武岩具有 OBI 特征^[47-51],表明南海北部岩石圈在拉张减薄过程中,除了受温度较高的软流圈物质上涌影响,还可能受深部异常体持续的热浮力影响。前人认为琼东南盆地“先抑后扬”是深部地幔热物质上涌及随后的消退、以及晚中新世岩浆活动加速冷却作用造成的^[27,28]。然而,虽然琼东南盆地和珠三坳陷均存在裂陷期沉降亏损和裂后期沉降补偿,但它们发生加速沉降的时间并不相同,且珠三坳陷在裂后期岩浆

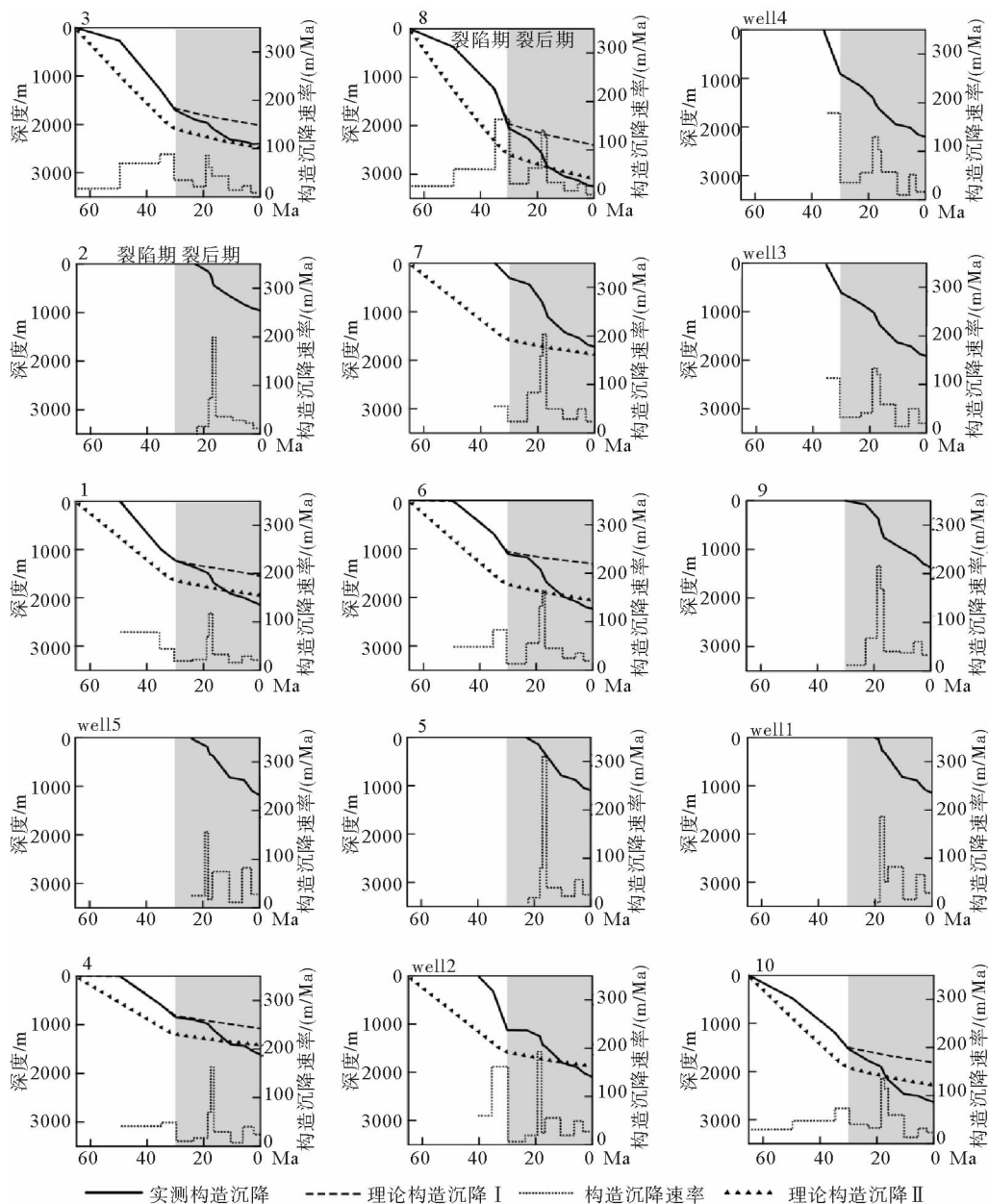


图 4 代表井构造沉降特征(人工井 1-9 和钻井 well 1-5 位置见图 1)
Fig. 4 The characteristics of tectonic subsidence in representative wells

活动并不活跃,因此它们“先抑后扬”的原因可能还不尽相同。珠三和珠一坳陷地理位置相邻,同处于南海北部陆架区,构造沉降特征一致,在 18.5~16.5 Ma 之间均表现为加速沉降,16.5 Ma 之后为稳定而缓慢的热沉降^[36,52]。若珠三坳陷的异常沉降受到深部异常体的热浮力影响,说明珠一坳陷也同时受到影响,但深部异常体是否能影响这么大范围,目前还不清楚,需要进一步研究。因此,导致珠三坳陷裂陷期沉降亏损和裂后期补偿沉降最可能是张裂期软流圈热物质上涌及随后消退。

4.2 裂后期构造沉降中心迁移

坳陷的沉降是否受到深部异常体影响,目前还没有明确定论。理论上沉积记录能反映深部异常体的活动信息,但如何从沉积记录中提取出仅代表深部异常的信息却难以实现。地震剖面中能较容易识别出与构造运动有关的角度不整合,雷琼深部异常体靠近陆地地区,处于地形高部位,沉积记录也相对复杂。深部异常的热浮力效应可能导致基底隆升,形成局部剥蚀面。珠三坳陷位于内、中陆架区,中新世以来一直处于滨浅海沉积环境,越靠近陆地基底地

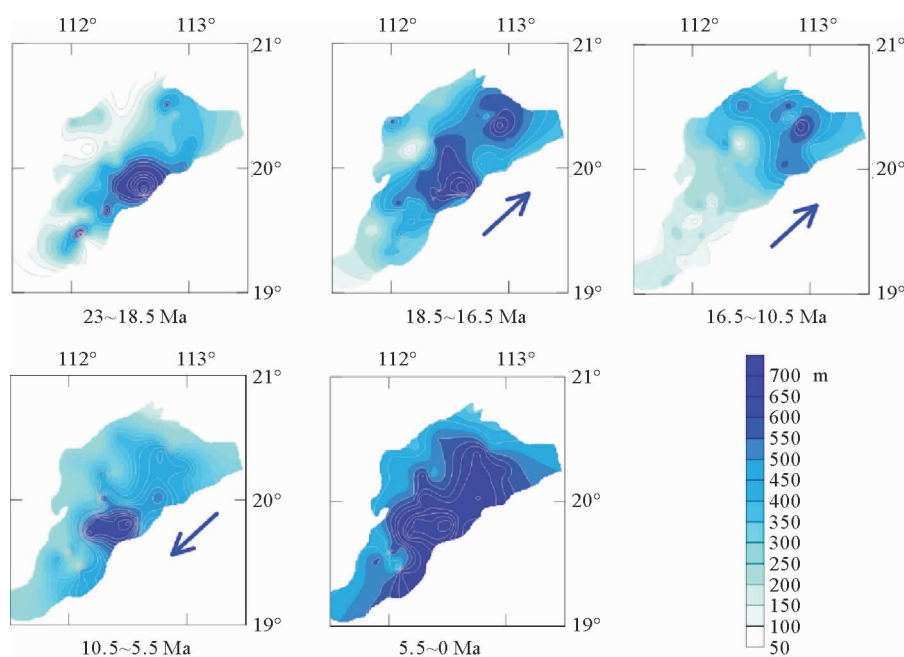


图 5 珠三坳陷 23.03 Ma 以来地层等厚度图(蓝色箭头表示沉积中心迁移方向)

Fig. 5 The isopach map of strata since 23.03 Ma in Zhu III Depression

(The blue arrows represent the migration direction of sedimentary center)

形越高,海平面周期性升降也可导致靠陆一侧暴露形成局部剥蚀面。这两种剥蚀面靠地震剖面往往难以分辨。同时,深部异常体的规模、形成时间等也是制约其在浅部沉积记录中是否存在响应的因素。通过沉降史研究,我们发现珠三坳陷裂后期构造沉降中心发生了向北东向的迁移,裂后期等厚度图(图 5)也清楚地展示了 23.03~10.5 Ma 期间沉积中心向北东向迁移的过程,这一过程可能与雷琼附近深部异常体活动有关,也可能是区域应力场改变引起,具体成因还需进一步研究。

5 结论

(1)珠三坳陷新生代构造沉降可划分为 5 个阶段:初始张裂慢速沉降(65~49.5 Ma),张裂期快速沉降(49.5~30 Ma),裂后慢速热沉降阶段 I(30~23.03 Ma),裂后加速沉降(23.03~16.5 Ma),裂后慢速热沉降阶段 II(16.5~0 Ma)。

(2)珠三坳陷 23.03~10.5 Ma 构造沉降中心向北东向发生迁移,可能与雷琼附近深部异常体活动有关,也可能是区域应力场改变引起,具体成因还需进一步研究。

(3)珠三坳陷裂陷期存在 300~800 m 的沉降亏损,裂后期存在相当量的异常沉降,我们推断裂后异常沉降可能是对裂陷期沉降亏损的补偿,裂陷期

软流圈热物质上涌形成沉降亏损,后期热物质快速消退引起补偿沉降。

参考文献(References)

- [1] Huang J L, Zhao D P. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, 111(B9): B9305.
- [2] Lebedev S, Nolet G. Upper mantle beneath southeast Asia from S velocity tomography[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108(B1): 2048.
- [3] Montelli R, Nolet G, Dahlen F A, et al. A catalogue of deep mantle plumes: New results from finite-frequency tomography [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2006, 7(11): Q11007.
- [4] Montelli R, Nolet G, Dahlen F A, et al. Finite-frequency tomography reveals a variety of plumes in the mantle[J]. *Science*, 2004, 303(5656): 338-343.
- [5] Xia S H, Zhao D P, Sun J L, et al. Teleseismic imaging of the mantle beneath southernmost China: New insights into the Hainan plume[J]. *Gondwana Research*, 2016, 36: 46-56.
- [6] Zhao D P. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: insight into deep Earth dynamics[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2004, 146(1-2): 3-34.
- [7] Zhao D P. Seismic images under 60 hotspots: Search for mantle plumes[J]. *Gondwana Research*, 2007, 12(14): 335-355.
- [8] 雷建设, 赵大鹏, 沈繁奎, 等. 海南地幔柱新的成像结果[J].

- 国际地震动态, 2008(11): 31. [LEI Jianshe, ZHAO Dapeng, SHEN Fanluan, et al. A new tomographic image of the Hainan plume in the upper mantle[J]. Recent Developments in World Seismology, 2008(11): 31.]
- [9] McKenzie D. Some remarks on the development of sedimentary basins[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 40(1): 25-32.
- [10] 张金川, 李桂群. 盆地沉降分析及其应用[J]. 青岛海洋大学学报, 1995, 25(3): 391-399. [ZHANG Jinchuan, LI Guiqun. Subsidence analysis and its application to basins[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1995, 25(3): 391-399.]
- [11] 李超, 姜承鑫. 盆地沉降分析中的两类沉降[J]. 中国科技信息, 2011(19): 48-49. [LI Chao, JIANG Chengxin. Two kinds of subsidence in basin subsidence analysis[J]. China Science and Technology Information, 2011(19): 48-49.]
- [12] 张功成, 金莉, 兰蕾, 等. “源热共控”中国油气田有序分布[J]. 天然气工业, 2014, 34(5): 1-28. [ZHANG Gongcheng, JIN Li, LAN Lei, et al. Analysis of the regular distribution of oil and gas fields in China based on the theory of hydrocarbon generation controlled by source rocks and geothermal heat[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 34(5): 1-28.]
- [13] Xie H, Zhou D, Li Y P, et al. Cenozoic tectonic subsidence in deepwater sags in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. Tectonophysics, 2014, 615: 182-198.
- [14] Nie F J, Li S T, Wang H, et al. Lateral migration pathways of petroleum in the Zhu III subbasin, Pearl River Mouth basin, South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18(5): 561-575.
- [15] 官贺晏. 珠江口盆地珠三坳陷构造演化及其对煤系烃源岩的控制[D]. 徐州: 中国矿业大学硕士学位论文, 2014. [GONG Heyan. Tectonic evolution and its control on coal-measure source rocks in Zhu-3 depression of pearl river mouth basin[D]. Xuzhou: Master's Thesis of China University of Mining and Technology, 2014.]
- [16] 刘志峰, 刘志鹏, 肖伶俐, 等. 珠三坳陷北部珠海组—韩江组沉积演化及储盖组合[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(9): 25-31. [LIU Zhifeng, LIU Zhipeng, XIAO Lingli, et al. Facies evolution and reservoir-seal assemblages in the Zhuhai and Hanjiang formations, North of Zhu3 Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2013, 29(9): 25-31.]
- [17] 张迎朝, 陈志宏, 李绪深, 等. 珠江口盆地西部油气成藏组合和成藏模式[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(1): 108-117, 123. [ZHANG Yingzhao, CHEN Zhihong, LI Xushen, et al. Hydrocarbon plays and pool forming patterns in the western part of the Pearl River Mouth Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2011, 32(1): 108-117, 123.]
- [18] 何光玉, 吴景富, 刘海滨, 等. 南海珠三坳陷油气系统分析[J]. 石油实验地质, 2000, 22(1): 35-39. [HE Guangyu, WU Jingfu, LIU Haibin, et al. Study on petroleum systems in Zhu III subbasin of South China Sea[J]. Experimental Petroleum Geology, 2000, 22(1): 35-39.]
- [19] 张功成, 刘震, 米立军, 等. 珠江口盆地—琼东南盆地深水区古近系沉积演化[J]. 沉积学报, 2009, 27(4): 632-641. [ZHANG Gongcheng, LIU Zhen, MI Lijun, et al. Sedimentary evolution of Paleogene series in deep water area of Zhujiangkou and Qiongdongnan basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(4): 632-641.]
- [20] 朱伟林. 中国近海含油盆地古湖泊学研究[D]. 上海: 同济大学博士学位论文, 2002. [ZHU Wei. Oil-bearing basin offshore China: a paleolimnological perspective[D]. Shanghai: Doctor Dissertation of Tongji University, 2002.]
- [21] 张景茹. 珠江口盆地珠二坳陷、珠三坳陷含油气系统及油气成藏模式[D]. 广州: 中国科学院大学博士学位论文, 2014. [ZHANG Jingru. Research on petroleum system and hydrocarbon pooling pattern in the Zhu-II and Zhu-III Depression, Pearl River Mouth Basin[D]. Guangzhou: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.]
- [22] White N. An inverse method for determining lithospheric strain rate variation on geological timescales[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1994, 122(3-4): 351-371.
- [23] 李亚敏, 施小斌, 徐辉龙, 等. 琼东南盆地构造沉降的时空分布及裂后期异常沉降机制[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(1): 47-57, 65. [LI Yamin, SHI Xiaobin, XU Huilong, et al. Temporal and spatial distribution of tectonic subsidence and discussion on formation mechanism of anomalous post-rift tectonic subsidence in the Qiongdongnan Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(1): 47-57, 65.]
- [24] Selater J G, Christie P A F. Continental stretching: an explanation of the post-mid-cretaceous subsidence of the central North Sea Basin[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1980, 85(B7): 3711-3739.
- [25] 吕学菊, 肖力, 林正良, 等. 珠江口盆地西部珠三坳陷沉降史分析[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(2): 195-197, 205. [LV Xueju, XIAO Li, LIN Zhengliang, et al. Analysis of subsidence history of Zhusan Depression in Western Pearl River mouth basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(2): 195-197, 205.]
- [26] Hap B U, Hardenbol J, Vail P R. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic[J]. Science, 1987, 235(4793): 1156-1167.
- [27] 杨军, 施小斌, 王振峰, 等. 琼东南盆地张裂期沉降亏损与裂后期快速沉降成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(1): 81-90. [YANG Jun, SHI Xiaobin, WANG Zhenfeng, et al. Origin of syn-rift subsidence deficit and rapid post-rift subsidence in Qiongdongnan Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(1): 81-90.]
- [28] Shi X B, Jiang H Y, Yang J, et al. Models of the rapid post-rift subsidence in the eastern Qiongdongnan Basin, South China Sea: implications for the development of the deep thermal anomaly[J]. Basin Research, 2017, 29(3): 340-362.
- [29] 南海地质地球物理图系(1: 200 万)[M]. 广州: 广州海洋地质调查局, 2016. [Atlas of geology and geophysics of the South

- China Sea (1: 2000000)[M]. Guangzhou: Guangzhou Marine Geological Survey, 2016.]
- [30] Dupré S, Bertotti G, Cloetingh S. Tectonic history along the South Gabon Basin: Anomalous early post-rift subsidence[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24(3): 151-172.
- [31] Morley C K, Westaway R. Subsidence in the super-deep Patani and Malay Basins of Southeast Asia: a coupled model incorporating lower-crustal flow in response to post-rift sediment loading[J]. *Basin Research*, 2006, 18(1): 51-84.
- [32] Zhao Z X, Sun Z, Sun L T, et al. Cenozoic tectonic subsidence in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. *Basin Research*, 2016, doi: 10.1111/bre.12220.
- [33] Xie X N, Müller R D, Li S T, et al. Origin of anomalous subsidence along the Northern South China Sea margin and its relationship to dynamic topography[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23(7): 745-765.
- [34] Zhao Z X, Sun Z, Wang Z F, et al. The dynamic mechanism of post-rift accelerated subsidence in Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. *Marine Geophysics Research*, 2013, 34(3-4): 295-308.
- [35] Shi X B, Burov E, Leroy S, et al. Intrusion and its implication for subsidence: A case from the Baiyun Sag, on the northern margin of the South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 2005, 407(1-2): 117-134.
- [36] 付洁, 黎明碧, 唐勇, 等. 珠江口盆地白云凹陷裂后异常沉降研究及成因分析[J]. *海洋学研究*, 2013, 31(1): 1-15. [FU Jie, LI Mingbi, TANG Yong, et al. Post-rift subsidence anomaly and its mechanism in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2013, 31(1): 1-15.]
- [37] 赵中贤, 周蒂, 廖杰, 等. 珠江口盆地陆架区岩石圈伸展模拟及裂后沉降分析[J]. *地质学报*, 2010, 84(8): 1135-1145. [ZHAO Zhongxian, ZHOU Di, LIAO Jie, et al. Lithospheric stretching modeling of the continental shelf in the pearl river mouth basin and analysis of post-breakup subsidence[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(8): 1135-1145.]
- [38] 秦国权. 珠江口盆地新生代晚期层序地层划分和海平面变化[J]. *中国海上油气(地质)*, 2002, 16(1): 1-11, 18. [QIN Guoquan. Late Cenozoic sequence stratigraphy and sea-level changes in Pearl River Mouth Basin, South China Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 2002, 16(1): 1-11, 18.]
- [39] Haq B U, Jan H, Vail P. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic[J]. *Science*, 1987, 235(4793): 1156-1166.
- [40] Reston T J. The extension discrepancy and syn-rift subsidence deficit at rifted margins[J]. *Petroleum Geoscience*, 2009, 15(3): 217-237.
- [41] Wang C Y, Huang J L. Mantle transition zone structure beneath Hainan and adjacent areas derived from receiver function analysis[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(6): 658-665.
- [42] Wang X C, Li Z X, Li X H, et al. Identification of an ancient mantle reservoir and young recycled materials in the source region of a young mantle plume: Implications for potential linkages between plume and plate tectonics[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 377-378: 248-259.
- [43] Zou H B, Fan Q C. U - Th isotopes in Hainan basalts: Implications for sub-asthenospheric origin of EM2 mantle end-member and the dynamics of melting beneath Hainan Island[J]. *Lithos*, 2010, 116(1-2): 145-152.
- [44] 鄢全树, 石学法. 海南地幔柱与南海形成演化[J]. *高校地质学报*, 2007, 13(2): 311-322. [YAN Quanshu, SHI Xuefa. Hainan mantle plume and the formation and evolution of the South China Sea[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(2): 311-322.]
- [45] Wang X C, Li Z X, Li X H, et al. Temperature, pressure, and composition of the mantle source region of late Cenozoic basalts in Hainan island, SE Asia: a consequence of a young thermal mantle plume close to subduction Zones? [J]. *Journal of Petrology*, 2012, 53(1): 177-233.
- [46] Hoang N, Flower M. Petrogenesis of Cenozoic basalts from Vietnam; implication for origins of a 'Diffuse Igneous Province'[J]. *Journal of Petrology*, 1998, 39(3): 369-395.
- [47] 邹和平, 李平鲁, 饶春涛. 珠江口盆地新生代火山岩地球化学特征及其动力学意义[J]. *地球化学*, 1995, 24(S1): 33-45. [ZOU Heping, LI Pinglu, RAO Chuntao. Geochemistry of Cenozoic volcanic rocks in Zhujiangkou Basin and its geodynamic significance[J]. *Geochimica*, 1995, 24(S1): 33-45.]
- [48] Flower M F J, Zhang M, Chen C Y, et al. Magmatism in the South China Basin 2. Post-spreading quaternary basalts from Hainan Island, south China[J]. *Chemical Geology*, 1992, 97(1-2): 65-87.
- [49] Nguyen H, Flower M F J, Carlson R W. Major, trace element, and isotopic compositions of Vietnamese basalts: Interaction of hydrous EM1-rich asthenosphere with thinned Eurasian lithosphere[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(22): 4329-4351.
- [50] Tu K, Flower M F J, Carlson R W, et al. Sr, Nd, and Pb isotopic compositions of Hainan basalts (south China): Implications for a subcontinental lithosphere Dupal source[J]. *Geology*, 1991, 19(6): 567-569.
- [51] Zhou P B, Mukasa S B. Nd-Sr-Pb isotopic, and major- and trace-element geochemistry of Cenozoic lavas from the Khorat Plateau, Thailand: sources and petrogenesis[J]. *Chemical Geology*, 1997, 137(3-4): 175-193.
- [52] 王聪, 梅廉夫, 陈汉林, 等. 珠江口盆地惠州凹陷裂后期沉降特征及成因分析[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2016, 47(3): 807-818. [WANG Cong, MEI Lianfu, CHEN Hanlin, et al. Post-rift subsidence history and mechanism of Huizhou depression in the Pearl River Mouth Basin[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2016, 47(3): 807-818.]

CENOZOIC TECTONIC SUBSIDENCE OF THE ZHU III DEPRESSION IN THE PEARL RIVER MOUTH BASIN, NORTHERN SOUTH CHINA SEA

CHEN Mei^{1,2}, SHI Xiaobin¹, LIU Kai³, REN Ziqiang^{1,2}, YU Chuanhai¹

(1. Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd., Zhanjiang 524057, China)

Abstract: The history of tectonic subsidence is the record of basement movement in vertical direction. It is not only the reflection of basin evolution, but also the record of deep geological process. More and more geophysical evidence accumulated in recent years suggest that there is a low velocity anomaly under the Leiqiong area and its adjacent. In order to reveal the movement information of this deep low velocity anomaly body, we calculated the real tectonic subsidence curves as well as the theoretical tectonic subsidence curves for each tectonic units of the Zhu III depression by backstripping and strain rate inversion, based on seismic and drilling data. Results show that the Cenozoic tectonic subsidence of the Zhu III depression can be divided into five stages: slow syn-rift tectonic subsidence (65~49.5 Ma), rapid syn-rift tectonic subsidence (49.5~30 Ma), slow post-rift thermal subsidence I (30~23.03 Ma), accelerated post-rift subsidence (23.03~16.5 Ma), slow post-rift thermal subsidence II (16.5~0 Ma). We find that the Zhu III depression exists 300~800 m syn-rift subsidence deficit, and the rapid post-rift subsidence might be the compensation to the deficit probably caused by the dynamic support of the influx of warmer asthenosphere material. The results also show that the tectonic subsidence center of the Zhu III depression migrated to the northeast during 23.03~10.5 Ma, together with the deep low velocity anomaly body.

Key words: tectonic subsidence; anomalous post-rift subsidence; backstripping; the Zhu III depression