张向涛,张丽丽,胡杰,等. 珠江口盆地深水区白云南洼-荔湾凹陷新生代构造-热演化模拟.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(6):1912-1926. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240251.

Zhang Xiangtao, Zhang Lili, Hu Jie, et al. Cenozoic Tectono-Thermal Modelling of Southern Subsag of Baiyun Sag-Liwan Sag in Deep Water Area of the Pearl River Mouth Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2024,54(6):1912-1926. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240251.

珠江口盆地深水区白云南洼-荔湾凹陷新生代构造-热演化模拟

张向涛[1,2],张丽丽[1,2],胡 杰[3,4],张青林[1,2],张 涛[3,4],郑文义[1,2],魏成豪[3,4]

1.中海石油(中国)有限公司深圳分公司,广东 深圳 518054
2.中海石油深海开发有限公司,广东 深圳 518054
3.油气藏地质及开发工程全国重点实验室(成都理工大学),成都 610059
4.成都理工大学能源学院(页岩气现代产业学院),成都 610059

摘要:白云南洼-荔湾凹陷位于南海北部珠江口盆地,为被动大陆边缘盆地,地质背景复杂,经历了多期拉张和沉降。始新世—中新世的构造演化包括裂谷作用和坳陷作用,形成多层沉积结构。本次研究利用构造-热演化模拟,揭示研究区的构造沉降史和基底热流史,从而探讨盆地演化的地球动力学背景。共选取19条测线(东西向7条,南北向12条),建立380口模拟井,进行构造-热演化模拟,恢复白云南洼-荔湾凹陷的构造沉降史及构造-热演化史。研究发现白云南洼-荔湾凹陷自始新世以来存在两期快速沉降,分别发生在始新世(47.8~33.9 Ma)和中新世(23.0~13.8 Ma),并且构造沉降具有显著的东西、南北差异。同时基底热流经历了两次显著上升:第一次在始新世,基底热流快速上升至约86 mW/m^2;第二次在中新世,基底热流在13.8 Ma达到最高值,其中荔湾凹陷南部达到125 mW/m^2。上述表明,白云南洼-荔湾凹陷的沉降和热流特征与其构造演化密切相关。

关键词:构造-热演化模拟;构造沉降;基底热流;白云南洼-荔湾凹陷;珠江口盆地

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240251 **中图分类号**:P51;P542 **文献标志码**:A

Cenozoic Tectono-Thermal Modelling of Southern Subsag of Baiyun Sag - Liwan Sag in Deep Water Area of the Pearl River Mouth Basin

Zhang Xiangtao[1,2], Zhang Lili[1,2], Hu Jie[3,4], Zhang Qinglin[1,2], Zhang Tao[3,4], Zheng Wenyi[1,2], Wei Chenghao[3,4]

收稿日期:2024-08-08

作者简介:张向涛(1969—),男,教授级高级工程师,硕士,主要从事海洋油气勘探地质方面的研究,E-mail: zhangxt1@cnooc.com.cn

基金项目:中国海洋石油有限公司"十四五"重大科技项目(KJGG2022-0102,WBS:E-YG22R003);中海石油(中国)有限公司科研项目(SCKY-2023-SHENHAI-01);国家自然科学基金项目(42302342)

Supported by the Major Science and Technology Project of CNOOC During the 14th Five-Year Plan Period (KJGG2022-0102, WBS:E-YG22R003), Project of CNOOC China Limited (SCKY-2023-SHENHAI-01) and the National Natural Science Foundation of China (42302342)

1. *CNOOC China Limited*, *Shenzhen Branch*, *Shenzhen* 518054, *Guangdong*, *China*
2. *CNOOC Deepwater Development Limited*, *Shenzhen* 518054, *Guangdong*, *China*
3. *State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation*(*Chengdu University of Technology*), *Chengdu* 610059, *China*
4. *College of Energy*(*College of Modern Shale Gas Industry*), *Chengdu University of Technology*, *Chengdu* 610059, *China*

Abstract: The southern subsag of the Baiyun sag - Liwan sag is a passive margins basin, located in the Pearl River Mouth basin, northern South China Sea. Its geological background is complex and it has experienced many periods of stretching and subsidence. The tectonic evolution from the Eocene to the Miocene includes rifting and downwarping, forming a multi-level sedimentary structure. In this study, tectonic-thermal modelling is used to recover the tectonic subsidence history and basement heat flow history, so as to explore the geodynamic background of the basin evolution. This study selected 19 seismic lines (7 east-west, 12 north-south), established 380 simulation Wells, carried out tectono-thermal modelling, and recovered the tectonic subsidence history and tectono-thermal evolution history of southern subsag of the Baiyun sag - Liwan sag. It is found that there are two periods of rapid subsidence in southern subsag of the Baiyun sag - Liwan sag since Eocene, which occurred in Eocene (47.8 -33.9 Ma) and Miocene (23.0 - 13.8 Ma), and their tectonic subsidence has significant differences between east-west and north-south. Meanwhile, the basement heat flow experienced two significant increases, the first time in the Eocene, the basement heat flow rapidly increased to about 86 mW/m^2. The second time in the Miocene, the basement heat flow reached the highest value at 13.8 Ma, and reached 125 mW/m^2 in the southern Liwan sag. The results show that the subsidence and heat flow characteristics of southern subsag of the Baiyun sag - Liwan sag are closely related to its tectonic evolution.

Key words: tectono-thermal modelling; tectonic subsidence; basement heat flow; southern subsag of Baiyun sag - Liwan sag; Pearl River Mouth basin

0　引言

南海拥有丰富的自然资源，包括油气、可燃冰以及其他固体矿产，这为能源开发提供了巨大的支持[1]。我国在南海北部浅海大陆架区域的油气勘探已经取得了较为成熟的成果，勘探技术正逐步完善。虽然近年来南海深水区油气勘探取得了突破性进展，但南海北部的整体勘探深度和覆盖范围仍不足，尚未完全开发，该地区蕴含巨大的油气资源潜力，仍是未来油气勘探的重点区域[2-4]。在当前全球能源需求日益增加的背景下，深入研究南海北部的构造和热演化过程，对推动我国油气资源的开发具有重要的战略意义。

珠江口盆地自新生代以来的构造-热演化过程，一直是国内外学者研究的重点[5-9]。研究的方向主要集中在两大方面：构造-热演化模拟和古温标热史恢复。Nissen 等[5]开展了南海北部大陆边缘的拉张机制研究，认为在分析大尺度张裂过程中，纯剪模型比单剪模型更具优势，且联合使用这两种模型可能更能解释复杂的拉张过程。Clift 等[6]通过对南海北部已钻井的构造沉降分析认为，岩石圈呈非均质拉张，而且地幔拉张强度小于地壳拉张强度；在盆地沉降研究方面，前人[7-9]认为珠江口盆地异常沉降与约 17 Ma 短暂高沉积速率和下地壳伸展相关。然而，针对荔湾凹陷的构造-热演化模拟相关研究较少，特别是对基底热流历史的探索有限，而基底热流的演化对理解盆地的构造背景和油气勘探至关重要。

为填补这一研究空白，本文以白云南洼-荔湾凹陷为研究区域，结合最新的三维地震剖面和钻井岩性数据，开展多期非瞬时伸展模型的构造-热演化模拟。通过分析 19 条地震解释剖面，揭示白云南洼-荔湾凹陷新生代不同地质时期的构造沉降过程，并开展盆地基底热流演化史研究。同时，针对白云南洼-荔湾凹陷的拉张强度和构造-热演化特征，开展时空差异性分析。期待这些研究对学者理解南海北

部盆地的构造演化及其深部动力过程提供新的视角,也为油气资源勘探提供科学的依据和理论支持。

1 地质背景

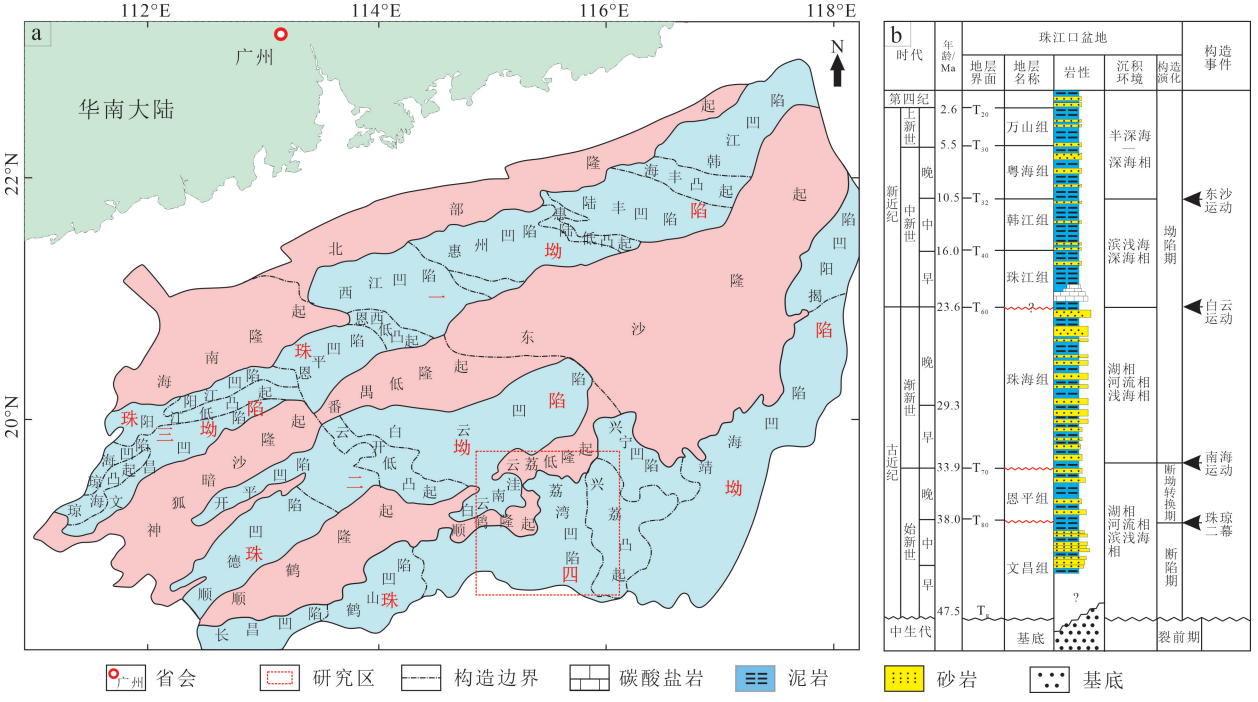
珠江口盆地是南海北部新生代的含油气盆地,具明显的"南北分带、东西分块"构造特征[10-12],其形成与南海的地质演化密切相关,同时受到菲律宾板块、印度洋板块与欧亚板块碰撞的影响[13-14]。珠江口盆地深水区发育多个新生代凹陷,其中包括白云凹陷、开平凹陷、顺德凹陷、荔湾凹陷等(图1),主要位于珠二坳陷和珠四坳陷。研究区为白云南洼和荔湾凹陷,两者被云荔低隆起隔开,水深300~3 000 m。研究区内新生代构造演化过程可以划分为3个阶段:断陷期、断坳转换期和坳陷期。断陷期,时间为早—中始新世,主要发育文昌组湖相沉积;断坳转换期,时间为晚始新世,开始出现恩平组滨浅海相沉积;坳陷期,时间为早渐新世至今,深水区主要发育深水扇沉积和半深海—深海相沉积(图1b)[18-19]。

荔湾凹陷作为珠江口盆地的重要组成部分,展布近正方形,与珠江口盆地内的其他凹陷(如珠一、珠二、珠三坳陷)展布特征不同,不具备典型的断陷型构造。南海的形成历经陆内裂陷至海底扩张的过程,主要受到珠琼运动和南海运动的影响,这些构造运动伴随海底扩张和洋壳形成,导致区域地壳的伸展和沉降,创造了油气资源富集的条件。荔湾凹陷新生代以来,依次发育文昌组、恩平组、珠海组、珠江组、韩江组、粤海组及万山组等沉积地层(图1)。地震资料显示,荔湾凹陷发育多个重要的地层界面,如T_{70}、T_{80}和T_{85}(图2),这些界面对凹陷的构造和沉积演化具有显著影响[20-21]。钻井和地震剖面分析显示,该区存在复杂的构造特征,包括滑脱构造和断层分布,为油气资源勘探提供了重要依据。

2 模拟方法及基础数据

2.1 构造沉降恢复

一般认为,盆地的总沉降量等于构造沉降量、沉积物负荷沉降、古水深以及海平面变化等导致的沉降之和[8,22]。为了简化和便捷地进行盆地构造-热演化模拟计算,首先需要了解在地质过程中盆地每一时期的构造沉降量,因此需要去除沉积物负荷沉降、古水深以及海平面变化等对各沉积时期沉积厚度的影响。获取盆地各时代构造沉降量常用且可靠



a据文献[15-16]修改;b据文献[17]修改。

图1 研究区构造位置(a)及珠江口盆地地层综合柱状图(b)

Fig.1 Location of the study area (a) and stratigraphic column of the Pearl River Mouth basin (b)

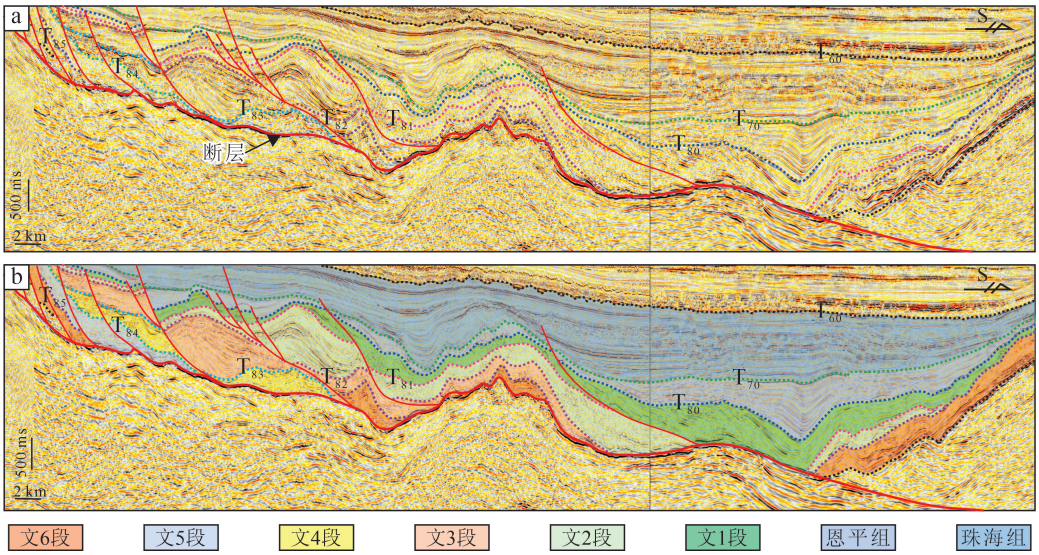


图 2　荔湾凹陷地层划分剖面图

Fig.2　Stratigraphic division of Liwan sag

性比较高的方法为回剥法[22]，基本原理：依据沉积压实的原理，假设地层骨架厚度固定不变，以钻井或者地震剖面获得具体分层为基础，根据沉积地层从上到下的顺序，把上覆地层逐层剥离，从而获得每个时期末地层古厚度及形态特征[6,23]。假设沉积发生在载水盆地中，那么恢复出来的沉降量称为载水构造沉降量。因此需要开展以下 3 个校正：1）脱压实校正；2）沉积物负荷校正；3）古水深、古海平面校正[24]。

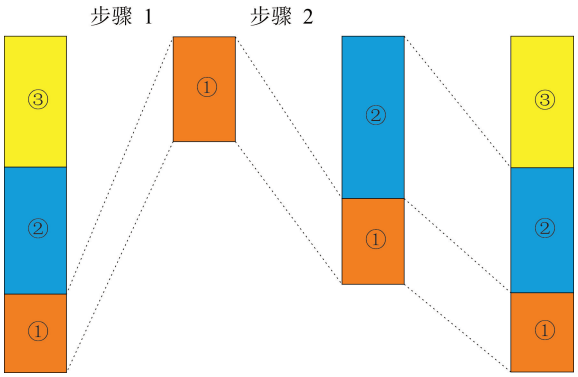
2.1.1　脱压实校正

脱压实校正是去除因压力作用导致地层厚度减小，将现今观察到的地层厚度恢复到各地质历史时期原始沉积状态的方法[23]。沉积物在埋藏过程中，其内部的孔隙流体、空气等会随着压力的增大而排出，导致孔隙度减小，岩石变得致密，地层厚度降低。脱压实校正根据压实定律和质量守恒原理，将因压实作用而导致的厚度变化扣除掉，流程为：步骤 1，先获取现今地层①厚度，根据脱压实校正恢复到原始沉积厚度；步骤 2，同样利用脱压实校正方法，获取地层①的上覆地层（地层②）原始沉积厚度（图 3）。

在正常压实下，孔隙度-深度两个参数呈指数分布：

$$\varphi = \varphi_0 \mathrm{e}^{-cy} \quad 。 \tag{1}$$

式中：φ 为埋深为 y 时的孔隙度，%；φ_0 为初始孔隙度，%；c 为压实因子；y 为埋藏深度，m。



①②③为地层。

图 3　脱压实校正步骤

Fig.3　De-compaction correctionsteps

在脱压实校正过程中，假设岩石体积全部由骨架和孔隙组成，其中：骨架体积为 V_s，在压实过程中保持不变；孔隙体积为 V_h，当沉积压实厚度增大时，孔隙体积呈指数降低：

$$V_h = \int_{y_1}^{y_2} \varphi_0 \mathrm{e}^{-cy} \mathrm{d}y \quad 。 \tag{2}$$

式中：y_1 为回剥地层的顶界深度，m；y_2 为回剥地层的底界深度，m；V_h 为地层中的孔隙体积，m^3。

沉积层的整体体积（V）可表示为 $V = V_s + V_h$。可以看成是岩石孔隙度的改变导致岩石体积发生了变化。单位骨架体积对应公式为

$$V_s = \int_{y_1}^{y_2} (1-\varphi) \mathrm{d}y \quad 。 \tag{3}$$

式中，V_s 为岩石中骨架颗粒的体积，m^3。

在此,假定岩石在回剥到新的深度 D' 时,沉积地层中的骨架厚度基本保持不变,有且只有岩石中的孔隙度发生膨胀。基于此假设,对式(3)求积分得

$$V_s = y_2' - y_1' = y_2 - y_1 - \frac{\varphi_0}{c}(e^{-cy_1} - e^{-cy_2}) + \frac{\varphi_0}{c}(e^{-cy_1'} - e^{-cy_2'})。 \tag{4}$$

式中:y_2' 为上层深度,m;y_1' 为下层深度,m。

通过层层回剥,并且对式(4)进行依次求解,即得到每一沉积时期内未受压实的地层厚度和深度信息。在新的深度,沉积层的平均孔隙度为

$$\varphi_{avg} = \frac{\varphi_0}{c} \cdot \frac{e^{-cy_1'} - e^{-cy_2'}}{y_2' - y_1'}。 \tag{5}$$

2.1.2 沉积物负荷校正

岩石圈伸展造成地壳均衡沉降后,发育的低洼区域被沉积物所充填。根据均衡原理,充填的沉积物会附加一个重量,导致盆地进一步的沉降。假设其沉降特征满足艾瑞均衡原理,则附加沉积对沉降量的影响关系可表述为

$$S = S^* \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_m - \rho_w}。 \tag{6}$$

式中:S 为岩层原始地层厚度,m;S^* 为岩层去压实后的厚度,m;ρ_s 为地层平均密度,kg/m^3;ρ_m 为岩层所在区域的地幔密度,kg/m^3;ρ_w 为水密度,kg/m^3。

2.1.3 古水深、古海平面校正

古水深与沉积物负载都会引起岩层出现额外的沉降,表达式为

$$S_L = \Delta S_L \frac{\rho_w}{\rho_m - \rho_w}。 \tag{7}$$

式中:S_L 为现今海平面高程,m;ΔS_L 为以 S_L 为基准,古海平面的高程,m。

构造沉降量经过古水深校正后,表达式为

$$Y = S' \frac{\rho_m - \rho_s}{\rho_m - \rho_w} - \Delta S_L \frac{\rho_w}{\rho_m - \rho_w} + W_d - \Delta S_L。 \tag{8}$$

式中:Y 为经校正后的构造沉降量,m;S' 为经过压实校正后的地层厚度,m;W_d 为盆地伸展阶段的古水深,m。

本次研究基于研究区内已钻井(5口)的砂泥比值,同时结合研究区内沉积相特征和基底岩性特征,对白云南洼-荔湾凹陷的地层岩性进行赋值(表1)。

表1 研究区地层岩性综合统计

Table 1 Comprehensive statistics of lithology in the study area

地层	φ_B/%			
	砂岩	粉砂岩	泥岩	碳酸盐岩
第四系+万山组+粤海组	20	0	80	0
韩江组	0	0	100	0
珠江组	8	2	82	8
珠海组	25	10	65	0
恩平组	17	8	75	0
文昌组	22	8	70	0

岩石的孔隙度与深度之间呈现指数关系,见式(1)。在本次研究中,根据 He 等[25]使用的孔隙度、压实系数等参数,对研究区砂岩泥岩进行岩石物理参数赋值,结果如表2所示。

表2 砂岩和泥岩的岩石物理参数

Table 2 Petrophysical parameters of sand and mud

岩性	初始孔隙度/%	压实系数/m^{-1}	密度/(kg/m^3)
砂岩	50.0	0.000 413 9	2 800
泥岩	59.8	0.000 502 3	2 400

在深水区中,构造沉降恢复的重要影响因素之一是古水深。为此,要开展盆地的古水深预测工作。首先在研究区内建立控制井(380口模拟井),用来获得不同地质历史时期的古水深,然后在研究区内进行插值。而各个时期的古水深主要通过研究区内的沉积相图和已钻井古生物数据确定。理论上,河流沉积环境的水深可以忽略不计,滨浅海沉积环境的水深为20~200 m,上陆坡沉积区的水深在200~500 m,下陆坡-深海沉积环境的水深500~2 000 m[24,26-27]。本文以陆架坡折和ODP 1148站的古水深数据为总体框架,基于研究区内的沉积相、古生物和古海底地形地貌等资料,对白云南洼-荔湾凹陷内的古水深进行了研究。

2.2 拉张模型

本次研究采用的是多期次非瞬时的伸展模型[28-29]。此模型认为岩石圈水平伸展会引起地层垂向减薄,使得软流圈物质以岩浆形式上涌(平流方式),从而传导热量导致岩石圈升温。而当岩石圈伸展停止后,主要通过物体互相接触时的方式传导热量,使得岩石圈冷却下来,引起盆地出现热沉降现

象[29-33]。在本次研究中，运用质点网格有限差分法对热传导方程进行求解，模型精度更高，并可实时监测模型中任一个质点的温压和速度[34-35]。

根据瞬时热传导方程，可以求解研究区内的岩石圈温度场，平流项可以通过质点移动完成[35]，表达式为

$$\rho C_p\left(\frac{\partial T}{\partial t}+v\nabla T\right)+\nabla(-k\nabla T)=A\ ; \quad (9)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\alpha\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+\frac{A}{\rho C_p}\ 。 \quad (10)$$

式中：v 为质点移动速度，m/s；k 为岩石热导率，W/(m·K)；α 为岩石热扩散系数，W/(m·K)；ρ 为岩石圈密度，kg/m³；C_p 为比热，J /(kg·℃)；A 为生热率，J/(kg·a)；T 为岩石圈温度，K；t 为质点移动时间，s；z 为深度，m。

在温度场的基础上，根据艾瑞均衡原理：

$$\rho_c y_c+\rho_m(y_L-y_c)=\rho_s y_s+\frac{\rho_c^* y_c}{\beta}+\rho_m^*\left(\frac{y_L}{\beta}-\frac{y_c}{\beta}\right)+\rho_a^*\left(y_L-\frac{y_L}{\beta}-y_s\right)\ ; \quad (11)$$

$$y_s=\frac{(\rho_m-\rho_c)\,y_c+(\rho_a-\rho_m)\,y_L}{\rho_a-\rho_s}\left(1-\frac{1}{\beta}\right)\ 。 \quad (12)$$

式中：ρ_c 为地壳密度，kg/m³；ρ_c^* 为伸展后地壳密度，kg/m³；ρ_m^* 为伸展后地幔密度，kg/m³；y_c 为地壳深度，m；y_L 为岩石圈深度，m；y_s 为拉张作用引起的构造沉降，m；β 为拉张系数；ρ_a 为软流圈密度，kg/m³；ρ_a^* 为拉张后软流圈密度，kg/m³。

反演计算过程中，首先改变岩石圈拉张速率，获得不一样的构造沉降曲线（H_{mod}），再将其与回剥地层后获得的构造沉降曲线（$H_{backstripping}$）进行比较，获得这两个曲线最相似时的拉张速率。而两条曲线的相似性可以通过所有对比年龄点 H_{mod} 与 $H_{backstripping}$ 差的绝对值（M）进行量化。基于此，可以求解 M 最小值时的岩石圈拉张速率。最后计算研究区内的热史。M 最优化算法采用顺序最小二乘编程 SLSQP (sequential least squares programming)[36]，表达式为

$$M=\sum_{i=1}^{n}\left|H^i_{backstripping}-H^i_{mod}\right|\ 。 \quad (13)$$

式中：i 为对比年龄点；n 为对比年龄点的总量。

在此拉张模型中，假定地层上边界温度是恒温状态（0 ℃），地层下边界保持在 90 km 不变，温度固定在 1 300 ℃，通过稳态热传导方程来获得初始温度场。Holloway[37]认为珠江口盆地为安第斯型大陆弧，其岩石圈在伸展前就已经发生减薄，岩石圈拉张前的厚度可能不是 125 km[31]，需要根据研究区实际情况计算。因此，通过对初始地壳厚度和岩石圈厚度进行不断赋值，且开展试算，获得的结果用研究区内 OBS1993 剖面[38]的现今热流和未强烈伸展区地壳厚度作为参考，推断荔湾凹陷初始岩石圈在拉张前已有不同程度减薄。最终，确定初始地壳厚度为 28 km，其中上地壳厚度为17 km，下地壳厚度为 11 km，初始岩石圈厚度为90 km。

此外，Liu 等[39]认为岩石热物性 10%的差异会引起总构造沉降及热流 1%和 3%的变化。但是研究区内缺乏地壳深部热物性参数，因此本次模拟中使用的是普适性热物性参数。软流圈对流时的热效应可以用不断提高热导率时热传导方程的计算结果来表征[40]。在此基础上，笔者确定了白云南洼-荔湾凹陷的等效热导率是 6.0 W/(m·k)。最终的拉张模型参数如表 3 所示。

表 3　运动学模型中使用参数及取值

Table 3　Parameters used in the kinematic model and their values

	厚度/km	密度/(kg/m³)	热导率/(W/(m·k))	生热率/(10^{-10}W/m³)	热容/(J/(kg·k))	热膨胀系数/(10^{-5}℃$^{-1}$)
上地壳	17	2 650	2.3	14 000	1 000	3.28
下地壳	11	2 850	2.5	2 000	1 000	3.28
岩石圈地幔	90	3 300	3.1	3	1 000	3.28
软流圈地幔	660	3 340	6.0	3	1 000	3.28

注：软流圈地幔为等效热导率。

2.3 模拟虚拟井选点

在研究区内,基于已钻井和地震反射特征,一共识别出10个地质时期的关键界面,分别为49.0,47.8,41.0,38.0,33.9,23.0,19.1,16.0,13.8,10.0 Ma的地层界面。本次选取了19条测线(东西向7条,南北向12条)(图4),覆盖了整个白云南洼-荔湾凹陷,共建立380口模拟井进行了构造-热演化模拟,恢复白云南洼-荔湾凹陷的构造沉降史及构造-热演化史。

3 模拟结果

3.1 构造沉降特征

基于在白云南洼-荔湾凹陷建立的380口虚拟井开展数值模拟,结果表明白云南洼-荔湾凹陷在新生代期间发生两期快速沉降事件,其时间分别为47.8～33.9 Ma与23.0～13.8 Ma,对应始新世和中新世(图5,图6)。这与研究区内地震剖面中呈现的始新统和中新统地层厚、渐新统地层薄的沉积现象一致(图2)。总体而言,构造沉降量在东西和南北方向上存在明显的差异(图7)。不同洼陷构造沉降量不同,而且凹陷内不同地方的构造沉降量也不同。隆起区的构造沉降量比较小,凹陷中央的构造沉降量最大;白云南洼构造沉降总量略小于荔湾凹陷构造沉降总量,白云南洼第一期强烈,荔湾凹陷第二期强烈。南、北方向上,南方最大沉降量高于北方,主要受古水深增加控制。

在图7中,47.8～41.0 Ma(图7a),沉降初期白云南洼沉降中心位于北部次洼和南部次洼东部,最大沉降量为1 400 m,荔湾凹陷沉降中心位于荔湾凹陷北部,最大沉降量为1 320 m;41.0～33.9 Ma(图7b、c),白云南洼沉降中心位于北部次洼和南部次洼,北部次洼最大沉降量为2 360 m,荔湾凹陷沉降中心向南部转移,最大沉降量为2 675 m;33.9～23.0 Ma(图7d),构造活动减弱,构造沉降对总沉降贡献较小,白云南洼-荔湾凹陷整体缓慢沉降,沉降中心不变,白云南洼北部次洼最大沉降量为2 845 m,荔湾凹陷最大沉降量为3 200 m;23.0～13.8 Ma(图7e、f、g),白云南洼-荔湾凹陷整体快速沉降,沉降中心不变,白云南洼北部次洼最大沉降量3 840 m,荔湾凹陷南部最大沉降量为4 220 m;13.8 Ma至今(图7h、i),白云南洼北部次洼沉降中心快速沉降,其他区域缓慢沉降,最大沉降量为4 600 m,荔湾凹陷北部次洼缓慢沉降,南部次洼快速沉降,最大沉降量为5 120 m。

整体上,白云南洼自始新世以来,盆地沉降具有中间高、边缘低的现象。推测引起这种现象的原因主要是白云南洼始新世经历了强烈伸展作用,伸展作用程度从中央向边缘地带渐渐地减小。现如今,荔湾凹陷北部沉降量主要为3 400～4 200 m,南部最大沉降量为5 120 m,表现为北低南高的特征(图7),沉降中心由北向南部转移,主要是裂后异常沉降导致,在南部深水区存在更大的裂后沉降。

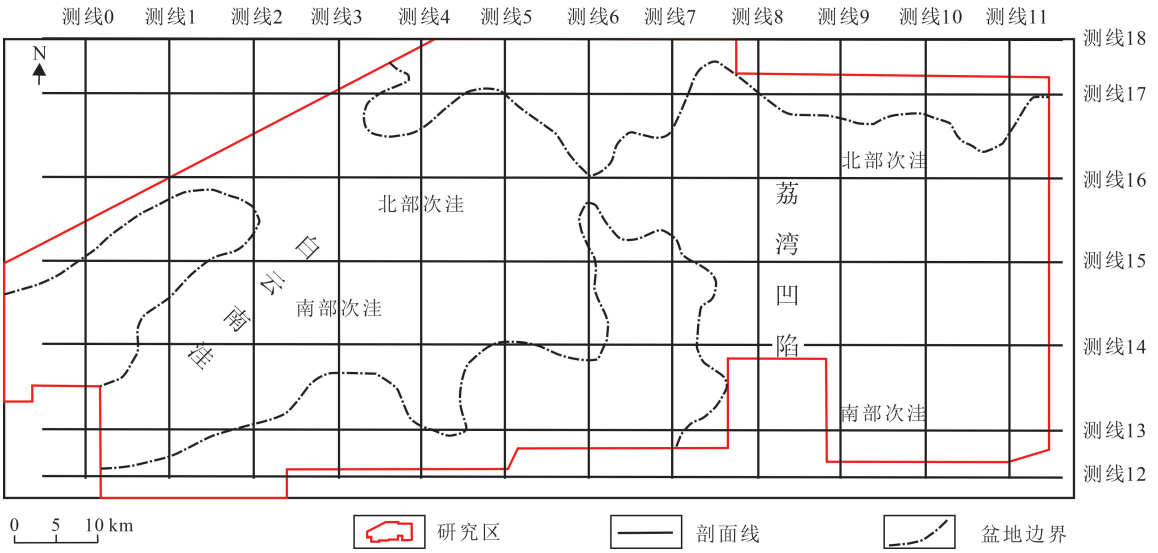
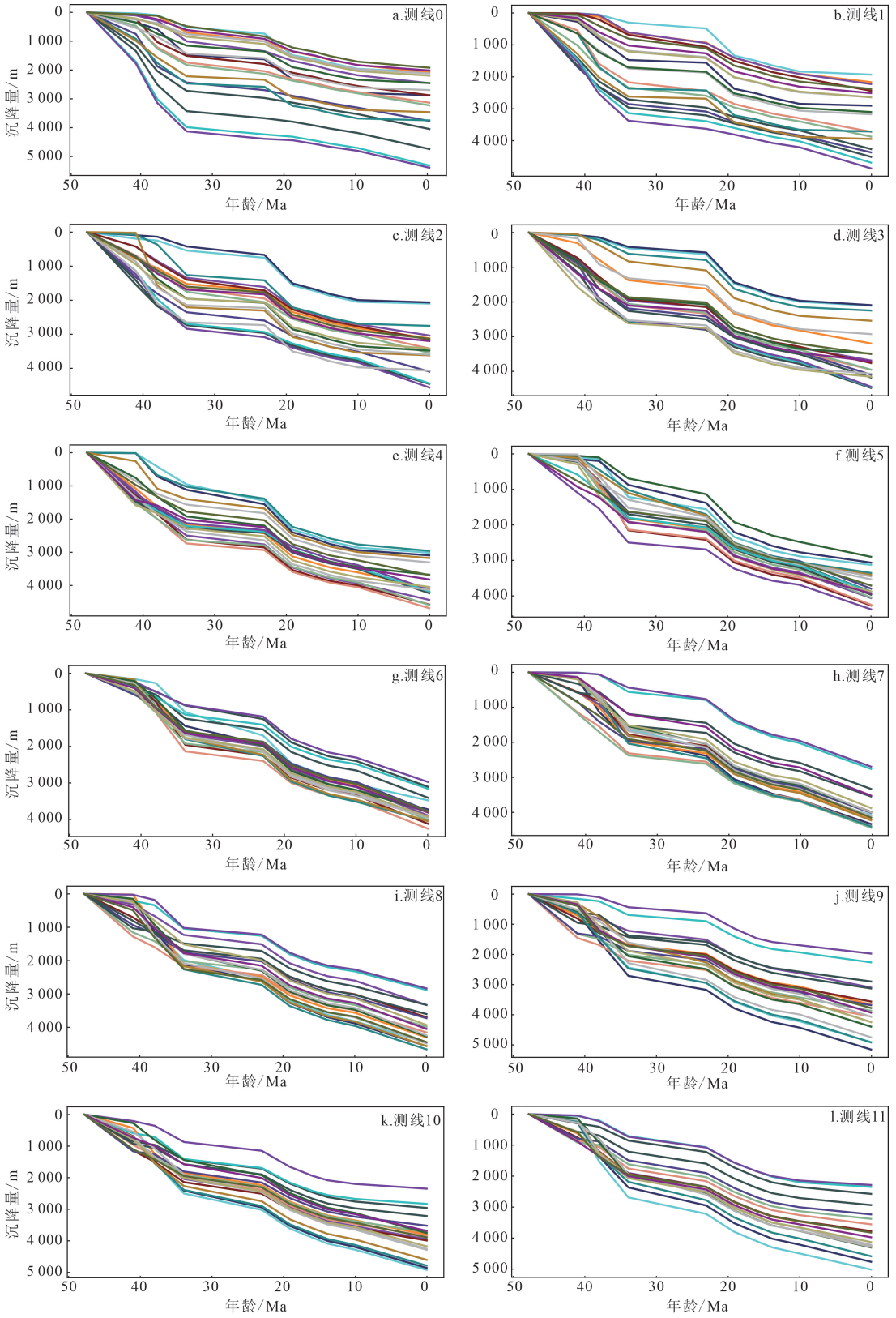


图4 白云南洼-荔湾凹陷剖面位置图

Fig.4 Profile location of southern subsag of the Baiyun sag - Liwan sag



1—20 为测线上不同位置测点信息。下同。

图 5　白云南洼-荔湾凹陷南北向剖面的构造沉降史

Fig.5　Tectonic subsidence history of southern subsag of north－south profile in the Baiyun sag－Liwan sag

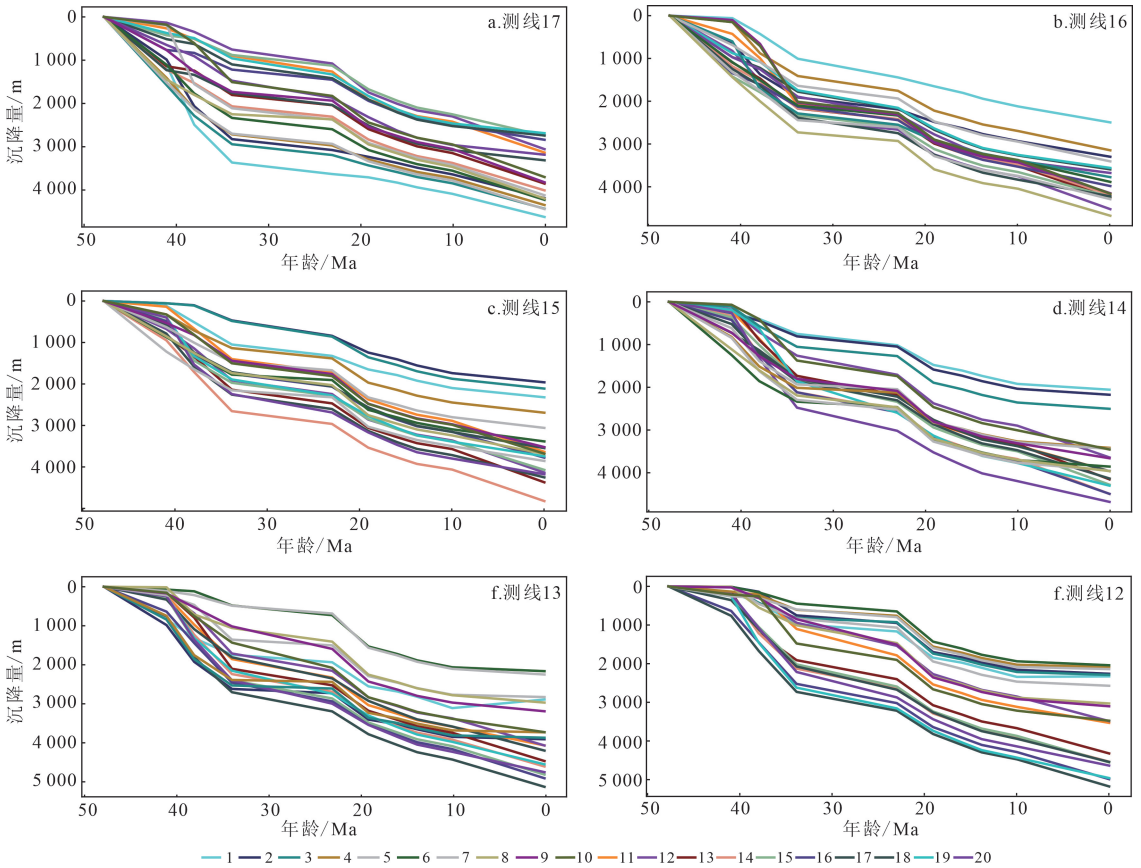


图6 白云南洼-荔湾凹陷东西向剖面的构造沉降史

Fig.6 Tectonic subsidence history of southern subsag of east-west profile in the Baiyun sag-Liwan sag

3.2 基底热流史及特征

研究区内发生两次强烈地热流值快速升高的过程,分别为始新世(47.8~33.9 Ma)和中新世(23.0~13.8 Ma)(图8,9)。总体而言,始新世,强烈张裂作用使白云南洼-荔湾凹陷的基底热流急速升高,最高可达约86 mW/m^2。中新世,白云南洼-荔湾凹陷的基底热流值再次增大。在13.8 Ma时,研究区内古基底热流值达到最高水平(图8)。其中,荔湾凹陷南部最高古基底热流值最大,为125 mW/m^2。13.8 Ma之后,研究区地壳开始进入冷却阶段,并且研究区热流逐渐向稳定状态靠近。

具体而言,白云南洼-荔湾凹陷初始基底热流为67.5 mW/m^2。47.8~33.9 Ma,白云南洼-荔湾凹陷基底热流随拉张作用逐渐升高,增加到86~90 mW/m^2,荔湾凹陷整体热流高于白云南洼(图8,9);33.9~23.0 Ma,白云南洼-荔湾凹陷基底热流缓慢上升,西北低,东南高,热流范围89~98 mW/m^2;23.0~13.8 Ma,白云南洼-荔湾凹陷整体快速沉降,基底热流快速上升,基底热流达到最大,热流值最大的地方位于荔湾凹陷南部,约125 mW/m^2;10 Ma至今,岩石圈开始发生热沉降,基底热流也开始渐渐降低。

在13.8 Ma时,白云南洼-湾荔凹陷古基底热流值达到最大,但由于不同区域的拉张程度不一样,使得不同区域的古基底热流值也不尽相同。荔湾凹陷现今某些区域内的基底热流值还超过110 mW/m^2,这可能是因为南海的不断打开,导致深水区的岩石圈发生强烈减薄,使得软流圈的物质上涌,深水区出现高热现象。10 Ma至今白云南洼-荔湾凹陷深水区局部存在升温过程,可能与新构造运动有关。白云南洼-荔湾凹陷热流分布具有北低南高、西低东高的特征。总体上来看,热流增高趋势与南海北部大陆边缘地壳厚度从陆架向着陆坡方向减薄的趋势相对应。

4 讨论

4.1 构造沉降的时空差异与区域构造背景的联系

根据模拟结果,白云南洼-荔湾凹陷的构造沉降

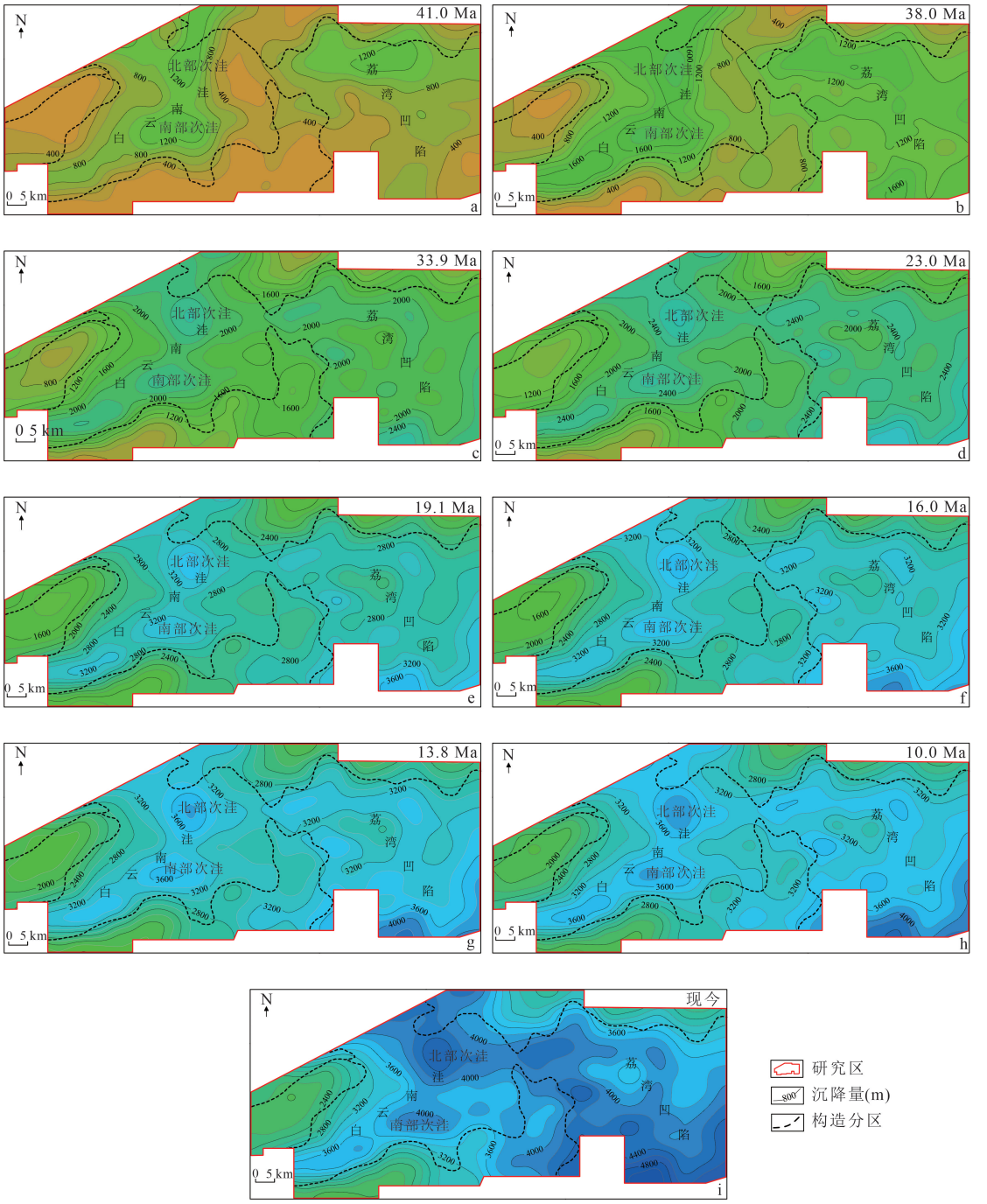


图 7　白云南洼-荔湾凹陷不同地质时期构造沉降量平面图

Fig.7　Structure settlement of southern subsag of the Baiyun sag - Liwan sag during different geological periods

具有明显的时空差异性，并且与南海扩张和区域构造演化密切相关。始新世和中新世两期快速沉降分别发生在 47.8～33.9 Ma 和 23.0～13.8 Ma，这与南海的裂谷作用和海盆扩张过程高度一致。第一期沉降主要受到南海早期裂谷活动的驱动[21]，该时期强烈的拉张作用导致白云南洼和荔湾凹陷中心区的快速沉降，尤其是在北部和南部次洼。白云南洼表现出中间高、边缘低的沉降特征，反映了裂谷作用从中央向边缘逐渐减弱的模式。荔湾凹陷则呈现出北低南高的特征，沉降中心从北部逐步向南迁移，这可能与南海持续扩张造成的构造应力重新分配有关。

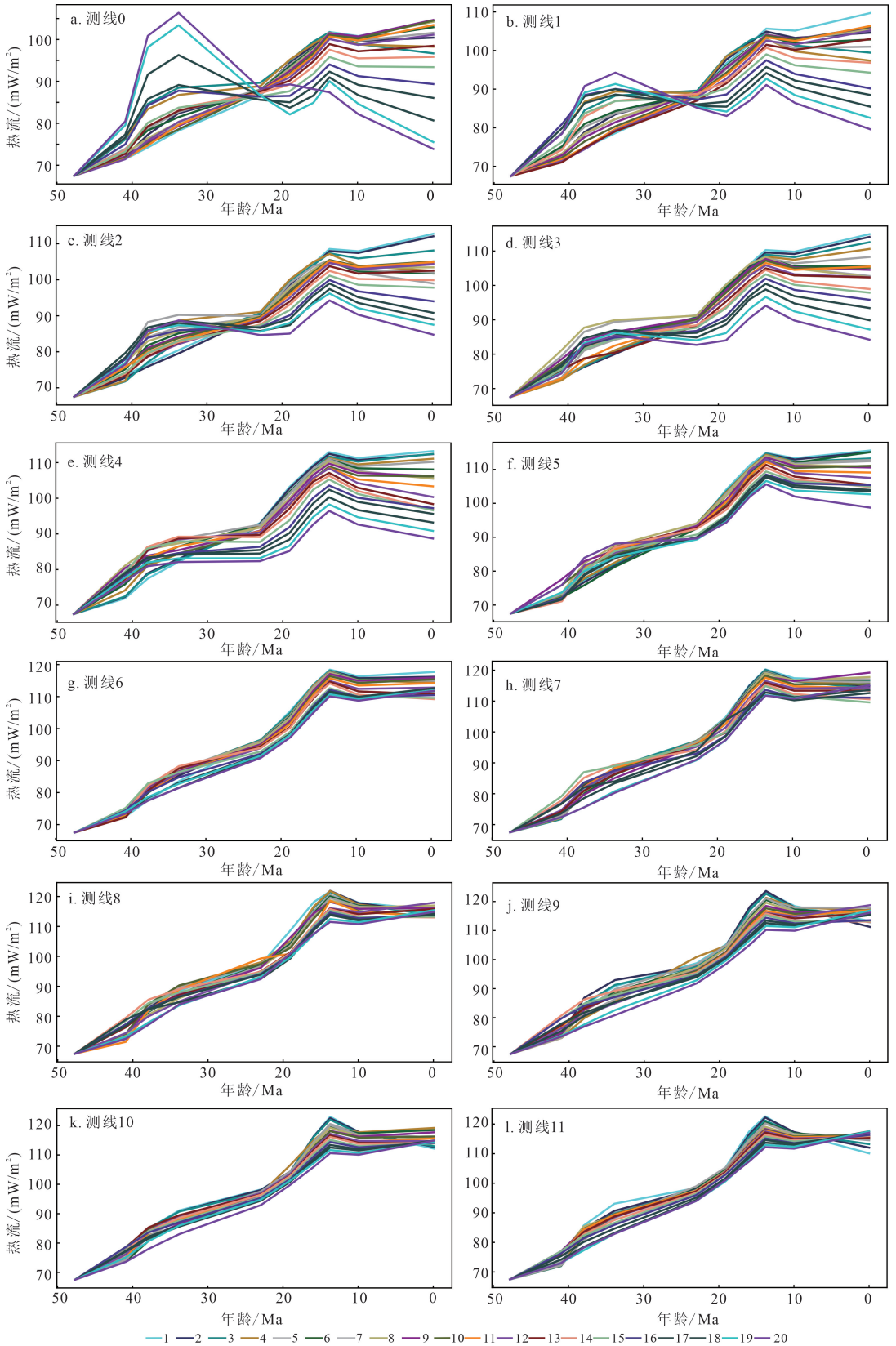


图 8 白云南洼-荔湾凹陷各剖面的基底热流史

Fig.8 Basement heat flow history of southern subsag of the Baiyun sag - Liwan sag

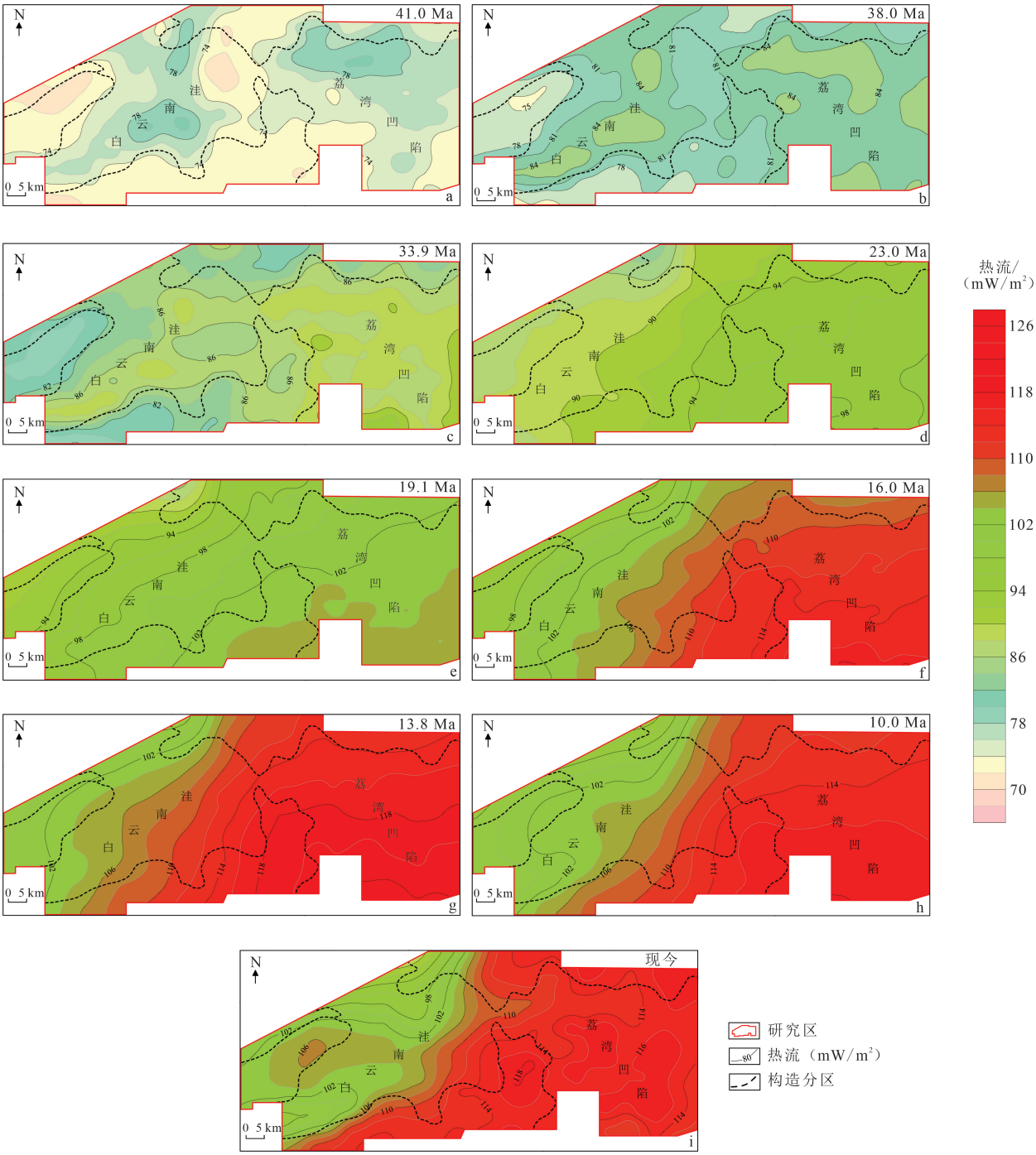


图 9　白云南洼-荔湾凹陷不同地质时期基底热流平面图

Fig.9　Basement heat flow of southern subsag of the Baiyun sag - Liwan sag during different geological periods

第二期沉降(23.0～13.8 Ma)期间，南海海盆进入加速扩张阶段[41]，尤其是荔湾凹陷南部深水区，沉降速率显著增加，裂后沉降导致了更大的构造沉降量。这一现象表明，随着南海海盆的继续打开，深水区受到更强的拉张应力，使得沉降量明显增大。此外，南北方向上，南部的最大沉降量明显高于北部，可能与南海扩张的构造运动逐渐向南推进有关，也与南部次洼更大的古水深变化一致。

4.2　基底热流演化与区域大地构造背景的联系

白云南洼-荔湾凹陷的基底热流演化与区域大地构造背景密切相关。模拟结果显示，始新世和中新世的两期拉张作用显著提升了基底热流，尤其是

在13.8 Ma达到最高值(荔湾凹陷南部达到125 mW/m^2),这与南海的强烈裂谷作用和大规模地壳减薄过程[42]直接相关。早期的拉张作用使得软流圈物质上涌,导致基底热流在裂谷中心区快速升高。荔湾凹陷南部深水区的高热流值,可能反映了该地区由于大洋扩张而产生的持续裂后沉降,这一过程导致了更大的地壳减薄和热流上升。

区域的基底热流分布表现为北低南高和西低东高(图9),与南海北部大陆边缘向南部深水区的地壳减薄趋势相对应[43]。这一热流分布特征表明,白云南洼-荔湾凹陷的地热演化不仅受到拉张作用的控制,还受到了大地构造背景中南海扩张和裂后沉降的影响。值得注意的是,珠江口盆地新构造运动始于13.8 Ma,在东沙运动(10.0 Ma)之后,上新世(5.3 Ma)是构造活动最强烈的时期[44],意味着10.0 Ma至今的局部升温可能与新构造运动有关,提示南海边缘地带在晚期仍保持了活跃的构造演化过程,这一现象在白云南洼和荔湾凹陷的深水区尤为明显,表明该区域仍可能处于区域拉张应力的作用之下,值得进一步研究。

5 结论

1)白云南洼-荔湾凹陷经历了始新世(47.8～33.9 Ma)和中新世(23.0～13.8 Ma)两期显著的沉降。南方沉降量大于北方,白云南洼沉降特征为中间高、边缘低,荔湾凹陷为北低南高。

2)两期拉张过程的分析显示,始新世期间,强烈的裂谷作用使基底热流快速上升至约86 mW/m^2;中新世时,热流在13.8 Ma达到峰值(荔湾凹陷南部约125 mW/m^2),之后进入冷却阶段。

3)白云南洼-荔湾凹陷的热流分布特征为北低南高、西低东高,这一特征与地壳厚度的变化趋势一致,反映了地壳减薄及拉张作用对热流背景的影响。

参考文献(References):

[1] 王子雯,汪贵锋,易春燕.南海油气资源勘探开发形势分析[J].中国石油和化工标准与质量,2018,38(20):131-132.
Wang Ziwen, Wang Guifeng, Yi Chunyan. Analysis of Exploration and Development Situation of Oil and Gas Resources in the South China Sea[J]. China Petroleum and Chemical Standards and Quality, 2018, 38(20): 131-132.

[2] 林闻,周金应.世界深水油气勘探新进展与南海北部深水油气勘探[J].石油物探,2009,48(6):601-605.
Lin Wen, Zhou Jinying. Progress of Deepwater Hydrocarbon Exploration Worldwide and the Exploration in the Deepwater Region of Northern South China Sea[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2009, 48(6): 601-605.

[3] 米立军.认识创新推动南海东部海域油气勘探不断取得突破:南海东部海域近年主要勘探进展回顾[J].中国海上油气,2018,30(1):1-10.
Mi Lijun. Continuous Breakthroughs on Petroleum Exploration of the Eastern South China Sea with Innovative Understanding: Review of Recent Exploration Progress[J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(1): 1-10.

[4] 朱伟林,张功成,钟锴.中国海洋石油总公司"十二五"油气勘探进展及"十三五"展望[J].中国石油勘探,2016,21(4):1-12.
Zhu Weilin, Zhang Gongcheng, Zhong Kai. Oil and Gas Exploration Progress of China National Offshore Oil Corporation During the 12～(th) Five-Year Plan and the Prospect During the 13～(th) Five-Year Plan[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(4): 1-12.

[5] Nissen S S, Hayes D E, Bochu Y, et al. Gravity, Heat Flow, and Seismic Constraints on the Processes of Crustal Extension: Northern Margin of the South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1995, 100(B11): 22447-22483.

[6] Clift P, Lin J. Preferential Mantle Lithospheric Extension Under the South China Margin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18(8): 929-945.

[7] Shi X, 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.

[8] 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.

[9] 张云帆,孙珍,庞雄.珠江口盆地白云凹陷下地壳伸展与陆架坡折的关系[J].中国科学:地球科学,2014,44(3):488-496.
Zhang Yunfan, Sun Zhen, Pang Xiong. The

Relationship Between Extension of Lower Crust and Displacement of the Shelf Break[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(3): 488 - 496.

[10] 龚再升，谢泰俊，张启民，等. 南海北部大陆边缘盆地分析及油气聚集[R].保定：中国海洋石油勘探开发研究中心，2002.
Gong Zaisheng, Xie Taijun, Zhang Qimin, et al. Analysis of Continental Margin Basin and Hydrocarbon Accumulation in Northern South China Sea[R]. Baoding: Research Institute of Petroleum Exploration & Development, 2002.

[11] 刘思青，张翠梅，孙珍，等. 珠江口盆地荔湾凹陷珠江组关键地质界面 SB21 的识别及地质意义[J].地球科学，2016，41(3)：475 - 486.
Liu Siqing, Zhang Cuimei, Sun Zhen, et al. Characteristics and Significances of the Geological Boundary SB21 in the Zhujiang Formation of the Liwan Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Earth Science, 2016, 41(3): 475 - 486.

[12] 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，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, 2015, 40(6): 1061 - 1071.

[13] Ru K, Pigott J D. Episodic Rifting and Subsidence in the South China Sea[J]. AAPG Bulletin, 1986, 70(9): 1136 - 1155.

[14] Taylor B, Hayes D E. Origin and History of the South China Sea Basin[J].The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands: Part 2, 1983, 27: 23 - 56.

[15] 朱伟林，钟锴，李友川，等. 南海北部深水区油气成藏与勘探[J].科学通报，2012，57(20)：1833 - 1841.
Zhu Weilin, Zhong Kai, Li Youchuan, et al. Characteristics of Hydrocarbon Accumulation and Exploration Potential of the Northern South China Sea Deepwater Basins[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(20): 1833 - 1841.

[16] 李小林，张冬丽，张培震，等.多源探测数据揭示的南海东北部三维地壳结构特征[J].地球物理学报，2020，63(4)：1538 - 1552.
Li Xiaolin, Zhang Dongli, Zhang Peizhen, et al. Three-Dimensional Crustal Structure in the Northeastern South China Sea Revealed by Multi-Source Geophysical Exploration Data[J]. Chinese J Geophys, 2020, 63(4): 1538 - 1552.

[17] 朱筱曦，赵中贤，卓海腾，等. 南海白云—荔湾深水区同扩张期岩浆活动特征及构造意义[J]. 地球科学，2023，48(10)：3781 - 3798.
Zhu Xiaoxi, Zhao Zhongxian, Zhuo Haiteng, et al. Characteristics of Syn-Spread Magmatism and Its Implication for Tectonic Evolution in Baiyun-Liwan Deep-Water Area of Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science, 2023, 48(10): 3781 - 3798.

[18] 柳保军，庞雄，颜承志，等. 珠江口盆地白云深水区渐新世—中新世陆架坡折带演化及油气勘探意义[J].石油学报，2011，32(2)：234 - 242.
Liu Baojun, Pang Xiong, Yan Chengzhi, et al. Evolution of the Oligocene-Miocene Shelf Slope-Break Zone in the Baiyun Deep-Water Area of the Pearl River Mouth Basin and Its Significance in Oil-Gas Exploration[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2): 234 - 242.

[19] 庞雄，申俊，袁立忠，等. 南海珠江深水扇系统及其油气勘探前景[J].石油学报，2006，27(3)：11 - 15.
Pang Xiong, Shen Jun, Yuan Lizhong, et al. Petroleum Prospect in Deep-Water Fan System of the Pearl River in the South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27 (3): 11 - 15.

[20] 傅恒，曾驿，周小康，等. 珠江口盆地新生代碳酸盐岩形成地质条件[J].地质学报，2018，92(11)：2349 - 2358.
Fu Heng, Zeng Yi, Zhou Xiaokang, et al. Geological Conditions of Formation of Cenozoic Carbonate Rocks in the Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(11): 2349 - 2358.

[21] 孙珍. 南海的形成与演变[J].自然杂志，2022，44(1)：31 - 38.
Sun Zhen. Evolution of the South China Sea[J]. Chinese Journal of Nature, 2022, 44(1): 31 - 38.

[22] 叶加仁，陆明德. 盆地地史模拟述评[J].地质科技情报，1995，14(2)：46 - 51.
Ye Jiaren, Lu Mingde. Review of Basin Geohistory Simulation[J]. Geological Science and Technology Information, 1995, 14(2): 46 - 51.

[23] Sclater 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, 1980, 85(7): 3711 - 3739.

[24] Allen P A, Allen J R.Basin Analysis: Principles and Application to Petroleum Play Assessment [M].

Chichester: Wiley-Blackwell, 2013.

[25] He M, Zhong G, Liu X, et al. Rapid Post-Rift Tectonic Subsidence Events in the Pearl River Mouth Basin, Northern South China Sea Margin[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2017, 147: 271-283.

[26] 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, 615/616: 182-198.

[27] 龚再升, 李思田, 杨甲明.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.
Gong Zaisheng, Li Sitian, Yang Jiaming. Dynamic Research of Oil and Gas Accumulation in Northern Marginal Basins of South China Sea [M]. Beijing: Science Press, 2004.

[28] Chen L. Stretching Factor Estimation for the Long-Duration and Multi-Stage Continental Extensional Tectonics: Application to the Baiyun Sag in the Northern Margin of the South China Sea [J]. Tectonophysics, 2014, 611: 167-180.

[29] He L J, Wang K L, Xiong L P, et al. Heat Flow and Thermal History of the South China Sea[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2001, 126(3/4): 211-220.

[30] Jackson J, Mckenzie D, Priestley K, et al. New Views on the Structure and Rheology of the Lithosphere[J]. Journal of the Geological Society, 2008, 165(2): 435-465.

[31] Mckenzie D. Some Remarks on the Development of Sedimentary Basins[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 40(1): 25-32.

[32] 袁玉松, 郑和荣, 张功成, 等. 南海北部深水区新生代热演化史[J].地质科学, 2009, 44(3): 911-921.
Yuan Yusong, Zheng Herong, Zhang Gongcheng, et al. Cenozoic Thermal History of the Deep Water Area of the Northern Margin of South China Sea [J]. Chinese Journal of Geology, 2009, 44(3): 911-921.

[33] 张林友, 刘琼颖, 何丽娟.华北克拉通热结构差异性特征及其意义[J].地球物理学报, 2016, 59(10): 3618-3626.
Zhang Linyou, Liu Qiongying, He Lijuan. The Different Lithospheric Thermal Structure of North China Craton and Its Implications [J]. Chinese J Geophys, 59(10): 3618-3626.

[34] Duretz T, Gerya T V. Slab Detachment During Continental Collision: Influence of Crustal Rheology and Interaction with Lithospheric Delamination[J]. Tectonophysics, 2013, 602: 124-140.

[35] Gerya T. Introduction to Numerical Geodynamic Modelling [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

[36] Kraft D. A Software Package for Sequential Quadratic Programming [R]. Oberpfaffenhofen: Institut fur Dynamik der Flugsysteme, 1988.

[37] Holloway N H. North Palawan Block, Philippines: Its Relation to Asian Mainland and Role in Evolution of South China Sea[J]. AAPG Bulletin, 1982, 66(9): 1355-1383.

[38] Yan P, Zhou D, Liu Z S. A Crustal Structure Profile Across the Northern Continental Margin of the South China Sea[J]. Tectonophysics, 2001, 338(1): 1-21.

[39] Liu Q Y, He L J. Tectono-Thermal Modelling of the Bohai Bay Basin Since the Cenozoic [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(1): 219-235.

[40] Liu Q Y, He L J. Discussion on Several Problems in Tectono-Themal Modelling of Rift Basins[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(2): 601-612.

[41] Li C F, Xu X, Lin J. Ages and Magnetic Structures of the South China Sea Constrained by Deep Tow Magnetic Surveys and IODP Expedition 349 [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2014, 15: 1-26.

[42] Larsen H C, Mohn G, Nirrengarten M, et al. Rapid Transition from Continental Breakup to Igneous Oceanic Crust in the South China Sea [J]. Nature Geoscience, 2018, 11: 782-789.

[43] 郑金云, 高阳东, 张向涛, 等. 珠江口盆地构造演化旋回及其新生代沉积环境变迁[J]. 地球科学, 2022, 47(7): 2374-2390.
Zheng Jinyun, Gao Yangdong, Zhang Xiangtao, et al. Tectonic Evolution Cycles and Cenozoic Sedimentary Environment Changes in Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science, 2022, 47(7): 2374-2390.

[44] 何敏, 朱伟林, 吴哲, 等.珠江口盆地新构造运动特征与油气成藏[J].中国海上油气, 2019, 31(5): 9-20.
He Min, Zhu Weilin, Wu Zhe, et al. Neotectonic Movement Characteristics and Hydrocarbon Accumulation of the Pearl River Mouth Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2019, 31(5): 9-20.