

文章编号: 0253-2697(2019)S1-0178-10 DOI:10.7623/syxb2019S1015

珠江口盆地地温场特征及构造-热演化

胡圣标^{1,2} 龙祖烈³ 朱俊章³ 胡迪^{1,2} 黄玉平³ 史玉玲³ 胡杰^{1,2}

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029; 2. 中国科学院大学 北京 100049;
3. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司 广东深圳 518067)

摘要:位于南海北缘的珠江口盆地作为中国海洋油气勘探的重点区域,具有良好的油气勘探前景。利用钻井地热测量数据分析了珠江口盆地现今地温场特征,利用古温标反演和拉张盆地模型正演相结合的方法定量揭示了盆地新生代以来的热演化史,并对比分析了浅水区和深水区构造-热演化的差异及主控因素,总结了不同地热地质条件对油气生成和富集的影响。研究表明,珠江口盆地具有“热盆”特征,地温梯度高。地温梯度值的总体变化趋势表现为从浅水区向深水区逐渐增高,与地壳和岩石圈向南减薄趋势一致。珠江口盆地始新世以来经历了两期裂陷拉张作用,其基底热流值表现为幕式升高的特征。浅水区珠一坳陷达到最高古热流的时间相对较早(约为 33.9 Ma),而盆地深水区(白云凹陷、荔湾凹陷)裂陷拉张时间可以持续到 23 Ma,随后才进入裂后热沉降期,盆地基底热流开始降低。白云凹陷磷灰石裂变径迹(AFT)热史模拟显示晚期约在 5 Ma 以来存在一期古地温快速增加,这可能与新构造运动有关。此外,由于深水区拉张强度大,加热时间长,陆坡区的白云凹陷最高古热流要高于陆架区的其他凹陷。

关键词:珠江口盆地;地温场;热流;磷灰石裂变径迹;构造-热演化

中图分类号:TE121.11 文献标识码:A

Characteristics of geothermal field and the tectonic-thermal evolution in Pearl River Mouth Basin

Hu Shengbiao^{1,2} Long Zhulie³ Zhu Junzhang³ Hu Di^{1,2} Huang Yuping³ Shi Yulin³ Hu Jie^{1,2}

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shenzhen Branch of CNOOC China Limited, Guangdong Shenzhen 518067, China)

Abstract: Situated on the northern margin of the South China Sea, the Pearl River Mouth Basin is a key area for off-shore hydrocarbon exploration, showing good oil and gas prospects. The characteristics of current geothermal field in Pearl River Mouth Basin was analyzed based on geothermal measurements. The Cenozoic thermal evolutionary history was reconstructed by the inversion of paleo-thermal indicators and the forward model of rift basin. Moreover, a comparative analysis was performed on the difference of tectonic-thermal evolution in the shallow and deep water areas as well as the main controlling factors. Finally, this paper summarizes the influences of different geothermal geological conditions on hydrocarbon generation and accumulation. The research results show that Pearl River Mouth Basin is a “hot basin” characterized by high geothermal gradient. The geothermal gradient presents an overall increasing trend from shallow to deep water areas, corresponding to the thinning trend of crust and lithosphere from north to south. The Pearl River Mouth Basin experienced two-phase rifting, showing an episodic increase in the basal heat flow. The Zhu I depression in shallow water area reached its maximum paleo-heat flow earlier at 33.9 Ma, but the rifting time of the basin in the deep water areas, including Baiyun sag and Liwan sag, continued until 23 Ma, followed by the post-rift thermal subsidence period, while the heat flow at the base began to decrease. The thermal history modelling of apatite fission track data (AFT) from Baiyun sag revealed that there existed a rapid increase in paleo-geotemperature in the later period since 5 Ma, which may be related with the Neo-tectonic movement. Moreover, the maximum paleo-heat flow was observed in Baiyun sag on the slope is greater than other sags on continental shelf.

Key words: Pearl River Mouth Basin; geothermal field; heat flow; apatite fission track; tectonic-thermal evolution

引用: 胡圣标, 龙祖烈, 朱俊章, 胡迪, 黄玉平, 史玉玲, 胡杰. 珠江口盆地地温场特征及构造-热演化[J]. 石油学报, 2019, 40(增刊 1): 178-187.

Cite: HU Shengbiao, LONG Zhulie, ZHU Junzhang, HU Di, HUANG Yuping, SHI Yulin, HU Jie. Characteristics of geothermal field and the tectonic-thermal evolution in Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40 (S1): 178-187.

珠江口盆地作为中国南海北部陆缘发育最大的新生代沉积盆地,一直以来都是海洋油气勘探的重点区域之一^[1-4]。从 2006 年白云凹陷深水扇气田的勘探突

破,到 2014 年深水区亿吨级原油的首次发现^[5],珠江口盆地展现了良好的油气勘探前景。

沉积盆地地热研究主要包括今、古地温场两方面,

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05026-003)资助。

第一作者及通信作者: 胡圣标,男,1963 年 1 月生,1985 年获成都地质学院学士学位,1990 年获中国科学院地质研究所地热物理学博士学位,现为中国科学院地质与地球物理研究所研究员,主要从事地热测量、盆地热史恢复及烃源岩热演化研究。Email: sbhu@mail.igcas.ac.cn

现今地温场不仅是岩石圈深部热状态的直接反映,也是盆地热演化史恢复的起点和检验热演化史恢复结果可靠性的参数之一。现今地温场制约着烃源岩现今的受热状态和生烃状况,而热演化历史则控制着有机质的生烃过程和特征,影响着油气资源的生成和富集^[6]。因此,温度在油气生成过程中起重要的作用,盆地地热学研究在油气勘探中具有重要意义^[7]。

珠江口盆地的地热学研究建立在大量钻井和海底探针地热数据资料之上^[8-13]。米立军等^[14]首次研究了南海北部深水地区地热特征及其成因。唐晓音等^[7]新增了 35 个大地热流数据,并且系统分析了盆地地温梯度、大地热流、深部温度和岩石圈热结构等现今地温场特征。在构造-热演化正演方面,从均匀拉张模型、有限拉张模型发展到多期有限拉张模型^[10,15-17],揭示了盆地自新生代以来多期加热事件。古温标反演的方法包括镜质组反射率(R_o)和磷灰石裂变径迹也在珠江口盆地中有一些应用^[18-19],但是对盆地热演化史一直还处于定性研究的状态。

笔者在前人研究珠江口盆地地温场的基础之上,结合最新的钻井测温资料,新增了 18 个大地热流数

据,进一步明晰了盆地现今地温场分布特征。结合拉张模型正演和古温标反演的方法定量勾勒了盆地新生代以来的热演化过程,并对比分析了浅水区和深水地区构造-热演化的差异及主控因素,总结了不同地热地质条件对油气生成的影响。该研究将对珠江口盆地的油气资源预测和有利勘探区带评价具有一定的应用价值。

1 地质背景

珠江口盆地的构造格局具有“东西分块、南北分带”特征,自北而南依次为北部断阶带、北部拗陷带,中部隆起带、南部拗陷带和南部隆起带^[20-21]。以 300 m 水深等深线为界,浅水区主要为珠一拗陷,自西向东包括恩平拗陷、西江拗陷、惠州拗陷、陆丰拗陷和韩江拗陷 5 个拗陷^[22];水深由 NW 向 SE 逐渐加深,深水地区主要位于珠 II 拗陷内,包括白云拗陷、荔湾拗陷、开平拗陷和顺德拗陷(图 1)。

南海处于太平洋、欧亚、菲律宾三大板块交汇处,大地构造位置特殊。珠江口盆地新生代以来先后经历了珠琼运动、南海运动、白云运动和东沙运动,显示出强烈的构造活动性。

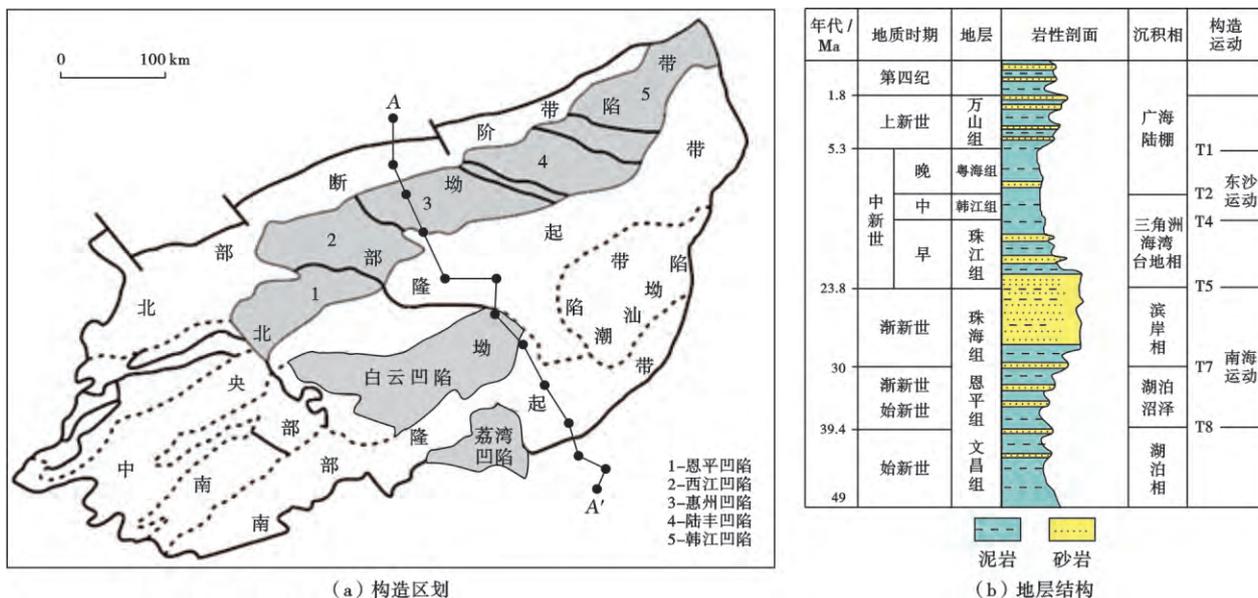


图 1 珠江口盆地构造区划及地层结构(据文献[23]修改)

Fig. 1 Tectonic units and strata structure in Pearl River Mouth Basin

2 现今地温场特征

沉积盆地现今地温场的刻画主要包括地温梯度、大地热流和深部温度分布特征等方面。研究沉积盆地现今地温场,一般从钻井地层温度数据出发,计算地温梯度和大地热流^[24]。结合前人报道的珠江口盆地地温梯度数据^[7,13,21,25-26]和新增的 18 口钻井数据

(表 1),获得 155 个地温梯度数据。其中,地温梯度是根据地层试油温度(DST)和校正后的孔底温度(BHT)等采用线性回归的方法计算得到。珠江口盆地现今属于热盆,3000 m 以浅深度段的地温梯度主要分布在 24.7~60.8℃/km(图 2),平均值为 38.2 ± 7.5℃/km,与中国东部华北盆地(33~35℃/km)和松辽盆地(38℃/km)^[27]等“热盆”的地温梯度相近,高于苏北

盆地(29.6°C/km)^[28],远高于中国西部的塔里木盆地(20.0°C/km)和准噶尔盆地(21.2~22.6°C/km)^[29-30]等克拉通盆地的地温梯度。与中国近海的其他盆地相比,其地温梯度较东海(32.7°C/km)和南黄海南

部(28.6°C/km)^[31-32]均高。

大地热流是表征由地球内部向地表传输并在单位面积上散发的热量,是地球内部的各种动力学过程的能量平衡在地表最直接的反映。大地热流值等于地温

表1 珠江口盆地新增18口钻井地温梯度和热流数据

Table 1 The newly acquired heat flow data of Pearl River Mouth Basin

序号	井名	深度/ m	水深/ m	海底温度/ °C	地温梯度/ (°C·km ⁻¹)	热导率/ [W·(m·K) ⁻¹]	热流/ (mW·m ⁻²)
1	LH23	2181~2230	487.0	8.9	37.0	1.68	62.16
2	LH29-B	1617~1797	741.8	6.4	38.8	1.62	62.86
3	LH29-A	2789~3201	624.4	7.4	38.4	1.78	68.35
4	LH28-A	1934~2089	705.5	6.7	41.7	1.66	69.22
5	LH28-B	2039~2291	653.0	7.1	39.6	1.68	66.53
6	LH28-C	2837~3216	563.5	8.0	38.9	1.78	69.24
7	LH27	2381~2488	457.2	9.4	39.6	1.70	67.32
8	KP11	2062~2082	260.3	13.4	36.2	1.65	59.73
9	PY35-A	2798~3054	210.3	15.0	36.4	1.76	64.06
10	PY35-B	3423~3447	304.0	12.2	36.7	1.80	66.06
11	PY36	3046~3060	347.0	11.3	41.7	1.76	73.39
12	LW2	2446~2970	1516.6	3.2	44.3	1.75	77.53
13	LW3	2000~2449	1275.5	3.8	52.6	1.70	89.42
14	LW9	1543~2008	1634.0	3.0	54.1	1.65	89.27
15	LW13	1095~2641	1920.6	2.5	46.9	1.72	80.67
16	LH26	2732~3192	467.0	9.2	37.5	1.77	66.38
17	PY30	1456~2584	194.2	15.6	30.3	1.71	51.81
18	LH32	2910~2955	704.8	6.7	43.5	1.76	76.56

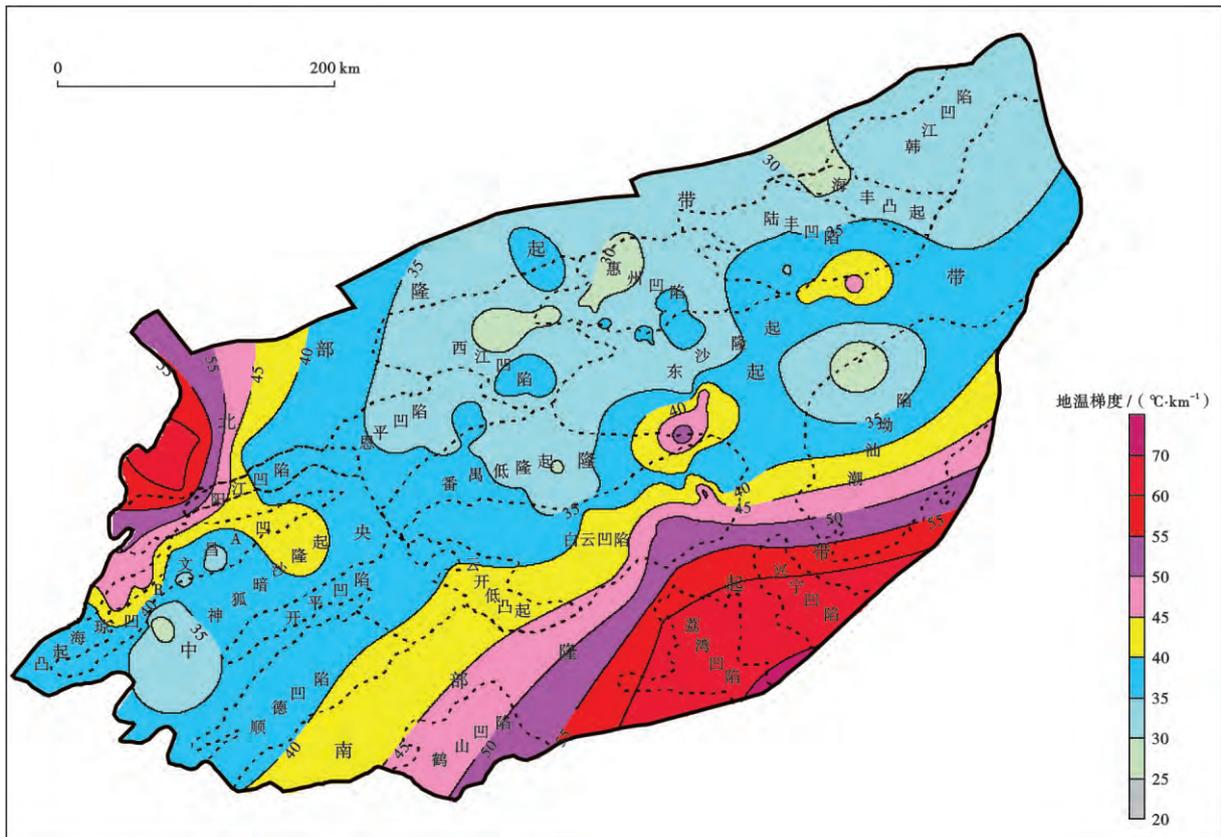


图2 珠江口盆地3000 m以浅深度段地温梯度等值线

Fig. 2 Contour of geothermal gradient of Pearl River Mouth Basin

梯度与地层热导率之积^[33],热导率数据均为钻井对应深度段岩心样品采用德国 TCS 自动扫描仪的测试结果。珠江口盆地大地热流值为 41.0~121.0 mW/m²,平均值为 71.6±13.4 mW/m²,远高于中国大陆地区的大地热流平均值(61.5±13.9 mW/m²)^[34]。根据盆地内现有热流数据,按克里格插值法绘制了珠江口盆地

大地热流分布(图 3)。盆地内大地热流具有 2 个显著分布特征:①从北到南(从陆架到陆坡方向)大地热流具有明显增高的趋势,这可能与地壳厚度强烈减薄相关^[35];②盆地内部存在阳江凹陷和顺德凹陷两个高热流异常区^[7],同时深水区尤其是白云凹陷、荔湾凹陷要比之前认识的温度更高一些。

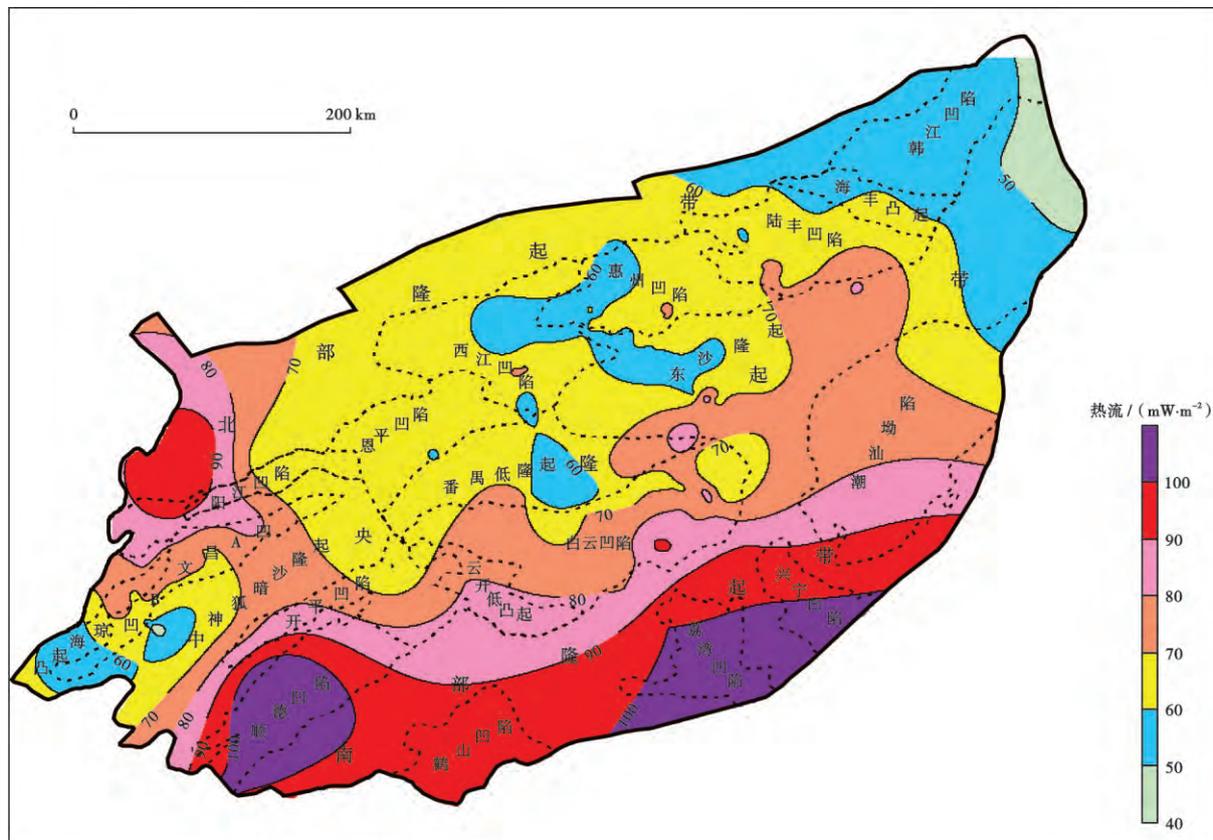


图 3 珠江口盆地大地热流分布

Fig. 3 Distribution of the heat flow values in Pearl River Mouth Basin

3 盆地构造-热演化

3.1 拉张模型正演

由于盆地构造沉降与其热演化之间存在密切关系,不同类型的沉积盆地其构造-热演化往往存在差异。根据盆地类型和沉降量及相应的盆地演化的地球物理模型,可以揭示沉积盆地的热历史。该方法在岩石圈尺度上,根据盆地形成演化的动力机制及地球内部热传播方式,建立相应的动力学模型,在已知或假定的初始和边界条件下,通过调整模型参数,使得模拟计算结果符合实际观测的盆地构造沉降史而确定盆地底部热流史,进而结合盆地的埋藏史正演盆地的热演化史,该方法通常称之为盆地热演化史恢复的构造-热演化法。在现有的盆地动力学模型中,拉张盆地模型的定量化程度最高。

珠江口盆地新生代以来经历了双幕式的(裂陷)构造沉降期、热沉降期和晚中新世以来的新构造期 3 个构造演化阶段^[1]。针对盆地多期拉张性质,选取多期有限拉张模型来计算珠江口盆地热演化史^[36]。珠江口盆地构造-热演化的计算流程为:①通过回剥法获得构造沉降曲线^[37-38];②根据构造沉降曲线,参考盆地构造演化过程初步划分断裂陷(构造沉降)期与裂后(热沉降)期;③不断地改变各期次的沉降量,根据多期有限拉张模型计算得到理论构造沉降量;④将理论构造沉降曲线量与回剥法得到的构造沉降曲线进行对比,直到满足拟合要求;⑤确定拉张因子后,便可获得基底热流史,结合埋藏史即可恢复出不同地层的热演化历史^[17,39]。

选取盆地西部浅水区西江凹陷和深水区白云凹陷为例,来展示拉张盆地热演化史恢复过程。图 4 分别为西江凹陷和白云凹陷构造沉降曲线和对应的基底热

流史。从构造沉降曲线可见,西江凹陷在 33.9 Ma(渐新世)后,沉降速率明显减小,而深水区白云凹陷沉降速率于 23 Ma 后才开始显著减小,且深水区沉降量明显大于浅水区。根据沉降曲线特征以及盆地的构造演化过程,可以发现:西江凹陷 XJ33 井自 49 Ma 以来经历了两期裂陷拉张,分别为 49~38 Ma、38~33.9 Ma,

热流值由 54.9 mW/m^2 升高到 73.3 mW/m^2 , 33.9 Ma 后为裂后热沉降期,盆地热流持续降低;盆地深水区的白云凹陷自 49 Ma 以来也经历两期裂陷拉张,分别为 49~33.9 Ma、33.9~23 Ma,盆地热流值从 55 mW/m^2 升高到 $66.7 \sim 97.3 \text{ mW/m}^2$, 23 Ma 后为裂后热沉降期,热流值开始逐渐降低(图 4)。

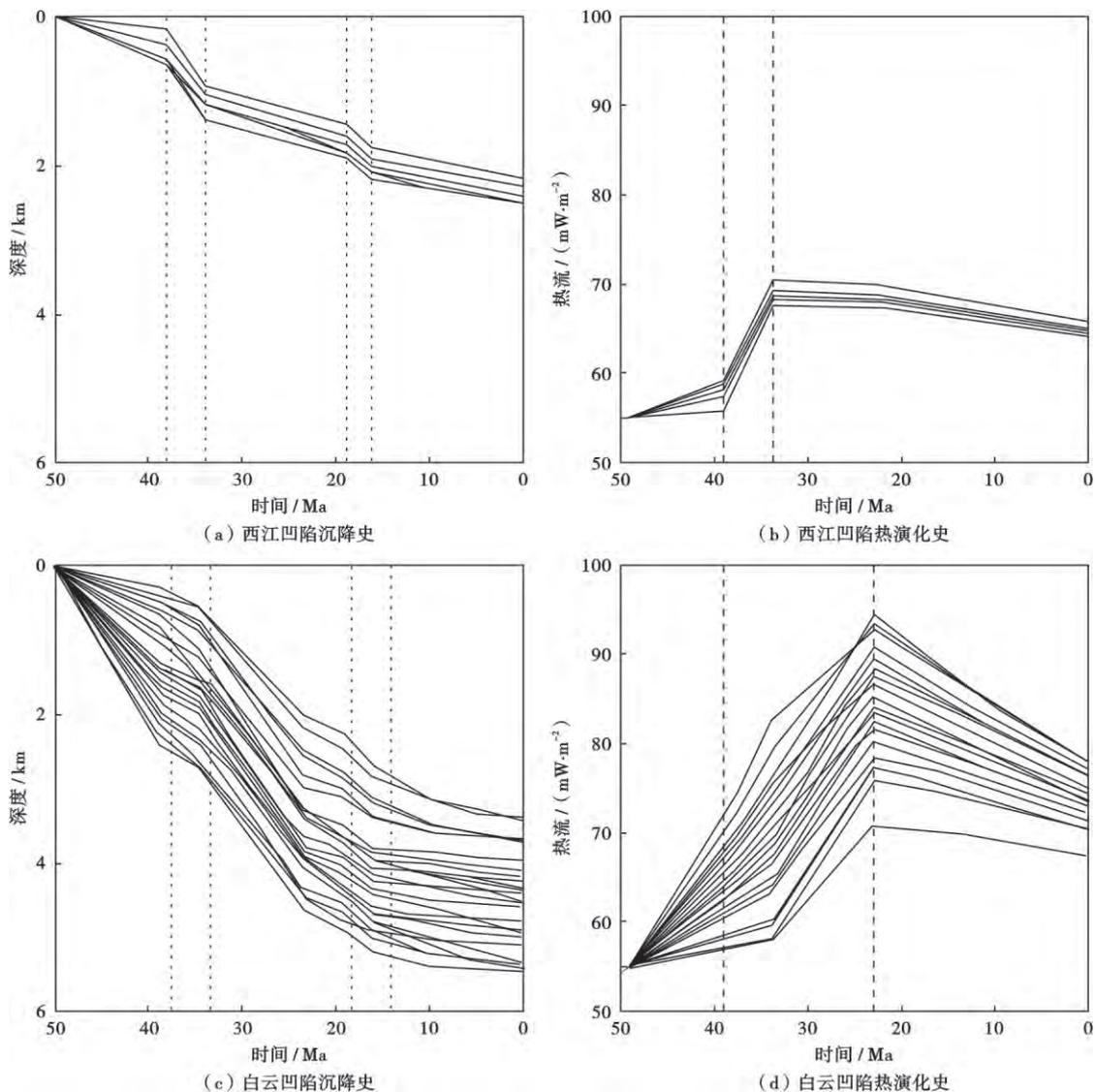


图 4 珠江口盆地浅水区西江凹陷和深水区白云凹陷构造-热演化特征

Fig. 4 Tectonic subsidence curves and reconstructed thermal history of Xijiang sag and Baiyun sag

3.2 古温标反演

盆地形成演化过程中,沉积物中的部分物质(如有机质、矿物、流体等)在一定时间内受热作用会发生物理化学变化,这些能够记载所经历的古地温信息指标的物质被称为古温标。珠江口盆地由于其独特的地热地质背景,后期存在持续的埋藏和加热事件,而多数古温标是最高古地温计,未必能记录采样地层完整的热演化史。此次在白云凹陷云开低凸起区得到一些较好的磷灰石裂变径迹样品,能对盆地的热演化史有所约束。

笔者选取了 BY13-2-1 井中的两个样品 BY1324 和 BY1323 来反演盆地的热演化史(表 2),样品分别来自前古近系(地层年龄大于 65 Ma)花岗岩与文昌组(地层年龄为 49~38 Ma)中砂岩。磷灰石裂变径迹的池年龄分别为 $53.8(+5.5-5.0)/\text{Ma}$ 、 $31.1(-9.1+12.9)/\text{Ma}$,均小于地层年龄。池年龄 $P(\chi^2)$ 值均大于或远远大于 5%,表明样品的磷灰石裂变径迹的年龄为单一年龄。磷灰石裂变径迹的平均径迹长度分别为 $11.8 \pm 0.11 \mu\text{m}$ 、 $12.25 \pm 0.27 \mu\text{m}$,小于标准径迹长度($16.3 \pm 0.9 \mu\text{m}$)^[40]。根据样

表 2 白云凹陷 BY13-2-1 井磷灰石裂变径迹测试结果

Table 2 Apatite fission track data from Well BY13-2-1 of Baiyun sag

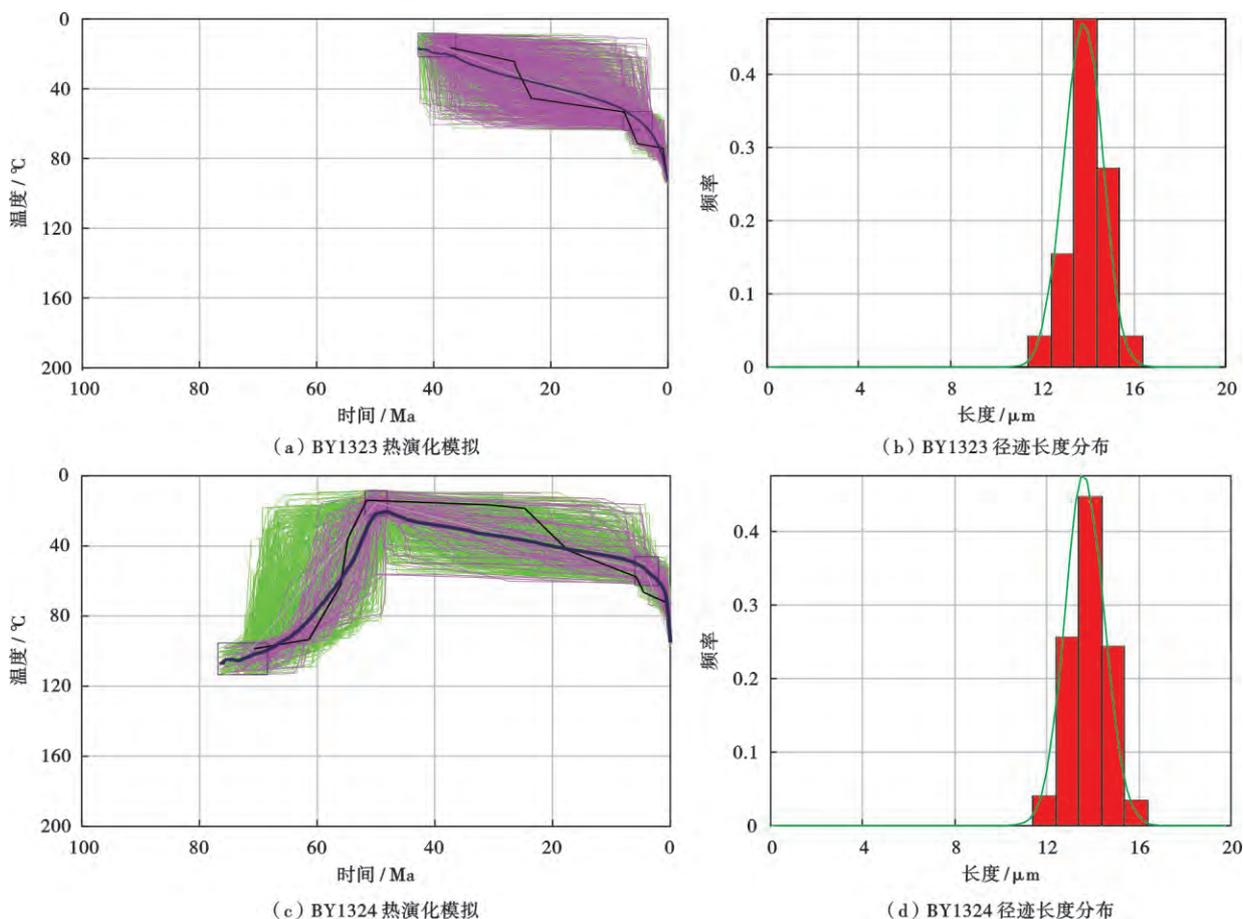
样品号	地层	深度/ m	自发径 迹数	平均 Dpar/ μm	$P(\chi^2)/$ %	Cl/ %	ζ	池年龄/Ma ($\pm 95\%$)	平均径迹 长度/ μm
BY1323	文昌组	1899~1914	599	1.96 \pm 0.38	279.3	0.17 \pm 0.05	8.27 \pm 0.14	31.07 -9.11 +12.88	12.25 \pm 0.27
BY1324	前古近系	2568~2685	504	1.94 \pm 0.37	71.98	0.19 \pm 0.09	8.27 \pm 0.14	52.54 -4.92 +5.42	11.8 \pm 0.11

注: Dpar 为与磷灰石 c 轴平行裂变径迹蚀刻的最大直径; $P(\chi^2)$ 为卡方检验概率; Cl 为磷灰石中氯含量及误差; ζ 为外探测器法 Zeta 常数数值及误差。

品表观年龄及径迹长度数据判断, 样品 BY1323 与样品 BY1324 在地质历史时期的埋藏过程中经历过部分退火。

样品磷灰石裂变径迹的表观年龄只有在持续抬升冷却条件下才能代表抬升至其封闭温度(110 $^{\circ}\text{C}$)的年龄, 其在多期复杂热演化史条件下为混合年龄, 并没有直接的地质意义^[41], 但结合裂变径迹的长度分布和磷

灰石自身的退火动力学参数所进行的模拟可以很好地揭示样品所经历的热演化历史。采用磷灰石多元动力学退火模型^[42-43]和蒙特卡罗逼近法以及 HeFTy 热演化历史模拟软件开展了模拟, 拟合曲线选取 10 000 条, 最后软件从中优选出拟合质量较高的热演化史曲线(图 5)。



注: 图(a)和(c)中绿色线表示可接受热演化史路径, 粉红色线表示好的热史路径, 蓝色线表示加权热演化史路径。

图 5 珠江口盆地热演化历史模拟, 裂变径迹长度分布及结果对比

Fig. 5 Modelled thermal history of apatite fission track in Pearl River Mouth Basin

从模拟结果来看, 珠江口盆地热演化历史总体特征如下: 晚白垩世—古新世抬升剥蚀, 温度从 110 $^{\circ}\text{C}$ 降至 20 $^{\circ}\text{C}$, 冷却速率约为 4.5 $^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$; 至早—中始新世, 大约 49 Ma 开始, 由于伸展拉张作用, 盆地开始沉积埋藏, 样品所在地层的温度开始缓慢升高, 这与拉张模型

正演得出的拉张时间是一致的。同时可以发现 5 Ma 至今, 盆地经历了一期较为快速的增温事件, 这可能与新构造运动或裂变径迹模型的时间效应有关。总体看, 磷灰石裂变径迹反演得出的温度演化路径与构造-热演化方法得到的热史演化路径具有很好的一致性。

4 浅水区和深水区热体制差异讨论

盆地内浅水区的地温梯度和大地热流明显低于深水区(图2和图3),由浅水区向深水区存在增热的趋势。盆地内部,不同凹陷地温梯度变化显著(20~60°C/km),从陆架到陆坡区显著增大,各拗陷地温梯度的分布也与地壳厚度密切相关(图6)。盆地现今热

状态是构造和深部岩石圈减薄的综合结果,珠江口盆地由于新生代的长期拉张,地壳或岩石圈厚度强烈减薄^[35],从陆架到陆坡区由窄裂隙逐渐变为宽深裂隙^[44]。大地热流由北向南(由陆至海)逐渐增高的总体趋势与地壳、岩石圈厚度和新生代岩石圈拉张程度相一致,因此,珠江口盆地现今的地热状态主要受控于多期拉张、裂隙导致的地壳减薄^[7,14]。

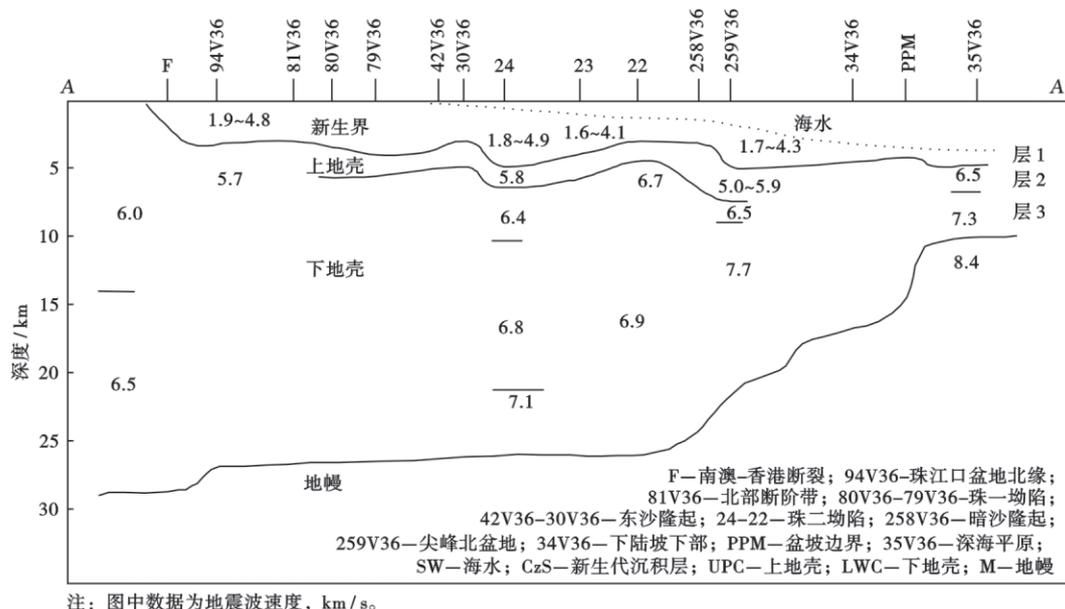


图6 珠江口盆地中部地学断面(据文献^[35]修改,剖面位置见图1)

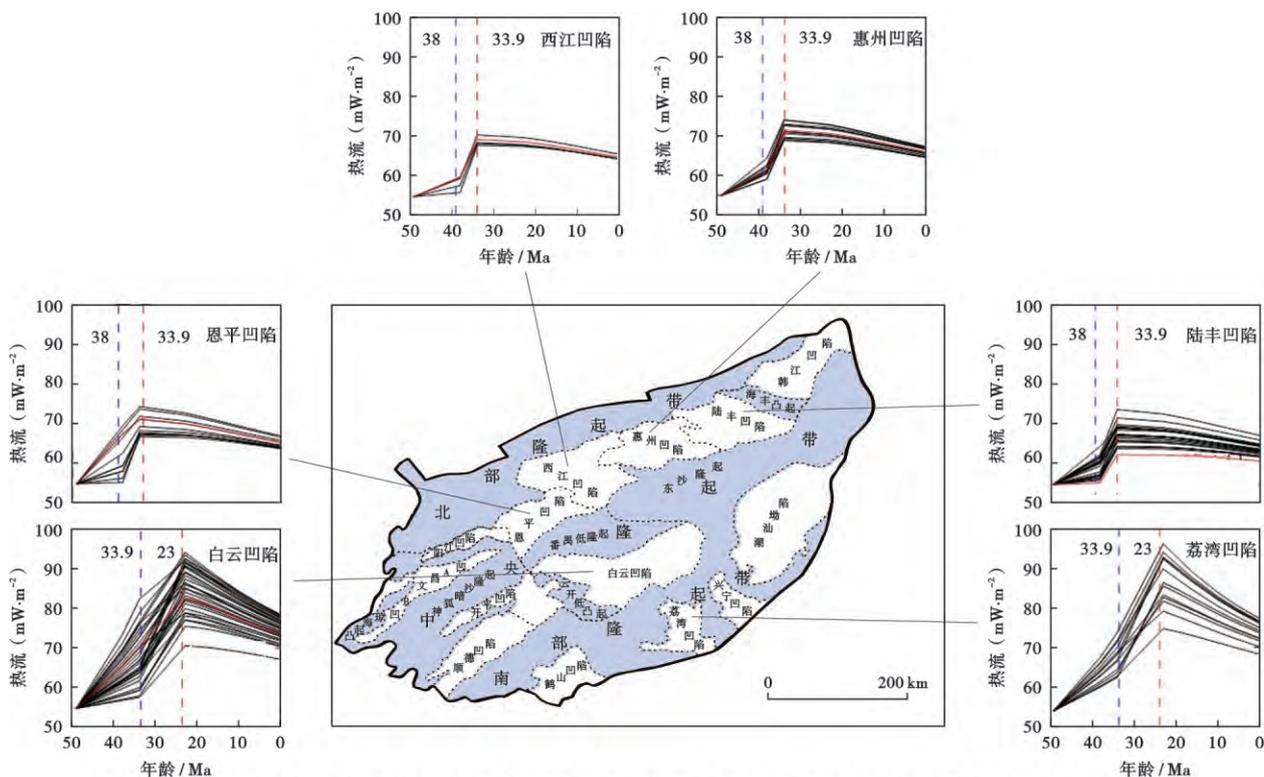
Fig. 6 The central transect of Pearl River Mouth Basin

将拉张模型正演的的方法推广到珠江口盆地的其他凹陷,包括浅水区的惠州凹陷、陆丰凹陷、恩平凹陷和深水区的荔湾凹陷(图7)。综合来看,珠江口盆地始新世以来经历了两期裂隙拉张过程,其基底热流值表现为幕式升高的特征。早一中始新世,太平洋板块对华南大陆的俯冲转向以及俯冲角度加大,引发珠琼一幕运动^[45],盆地开始裂隙,热流升高。随后中一晚始新世,太平洋板块继续对华南大陆NW向俯冲,华南大陆边缘形成近SN向张裂作用,引发珠琼二幕运动,盆地再次裂隙拉张,古热流相应升高。随后珠江口盆地开始进入裂后热沉降阶段,古热流开始降低,但在盆地不同区域,裂后热沉降开始的时间不一致。浅水区珠一拗陷达到最高古热流的时间相对较早(33.9 Ma),而盆地深水区(白云凹陷、荔湾凹陷)裂隙拉张时间则持续到23 Ma,随后才进入裂后热沉降期,盆地基底热流开始降低。

深水区白云凹陷渐新世末基底最高古热流可以达到90 mW/m²,高于浅水区其他凹陷。这可能与南海在持续扩张的过程中,随着海盆的打开,深水区受到了更高的拉张减薄作用,导致软流圈上涌,引起高热背景

有关^[46-49]。磷灰石裂变径迹的结果也揭示了珠江口盆地深水区明显在约5 Ma应该存在一期新的加热过程,这可能是新构造运动的结果,且区域的岩浆活动和大量的断裂发育能很好地对应这一期热事件^[50-51],而这一结果在浅水区没有明显表征。

基于“源热联控”理论^[44],深水区拉张强度高,基底热流升高所持续的时间更长,盆地深水区凹陷中烃源岩的热演化程度就更高。针对珠江口盆地广泛发育的文昌组、恩平组和珠海组3套主力烃源岩来说^[1,52],盆地内部各凹陷烃源岩普遍经历了两期快速成熟过程。珠江组底部成熟度主要处于未成熟状态,只有白云凹陷的有机质现今成熟度主体为1.0%~1.3%,处于生油高峰期;恩平组底部现今成熟度整体为1.0%~2.5%,整个盆地都处于成烃高峰期;而文昌组底部烃源岩现今成熟度状态普遍大于2.5%,在白云凹陷的深断陷部位 $R_o > 4.0\%$,整体处于干气阶段^[39-44]。总体来看,珠江口盆地具备着丰富的油气勘探潜力,盆地文昌组以及深水区凹陷存在长期持续生烃的“烃灶”,以气为主;浅水区珠一拗陷和深水区珠海组的成熟度相对较低,以油为主。



注: 各次级凹陷均呈现二次拉伸与加热过程, 但浅水区(陆架区)达到最高古热流的时间为 33.9 Ma, 深水区(陆坡区)则为 23 Ma。

图 7 珠江口盆地主要次级凹陷热演化过程

Fig. 7 Thermal evolution of main sags in Pearl River Mouth Basin

5 结 论

1) 珠江口盆地具有“热盆”特征, 地温梯度高, 深水区较浅水区更高。地温梯度值的总体变化趋势表现为由北(浅水区)向南(深水区)逐渐增高, 与地壳和岩石圈由北向南减薄的趋势一致, 同时深水区尤其是白云凹陷、荔湾凹陷要比之前认识的温度更高一些。

2) 珠江口盆地始新世以来经历了两期裂陷拉张作用, 其基底热流值表现为幕式升高的特征。浅水区珠一坳陷达到最高古热流的时间相对较早(33.9 Ma), 而盆地深水区白云凹陷裂陷拉张时间可以持续到 23 Ma。磷灰石裂变径迹(AFT)热演化史模拟给出了晚期约 5 Ma 以来存在一期古地温快速增加, 这可能与新构造运动有关。

致谢 大量钻井地温和基础地质资料的收集得到了中海石油(中国)有限公司深圳分公司的大力协助, 在此表示衷心感谢!

参 考 文 献

[1] 张功成, 米立军, 陶维祥, 等. 深水区——南海北部大陆边缘盆地油气勘探新领域[J]. 石油学报, 2007, 28(2): 15-21.
ZHANG Gongcheng, MI Lijun, TAO Weixiang, et al. Deepwater area—the new prospecting targets of northern continental margin

of South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2): 15-21.
[2] 朱伟林. 南海北部深水区油气地质特征[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 521-527.
ZHU Weilin. Petroleum geology in deepwater area of northern continental margin in South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 521-527.
[3] 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(24): 3121-3129.
[4] 米立军, 柳保军, 何敏, 等. 南海北部陆缘白云深水区油气地质特征与勘探方向[J]. 中国海上油气, 2016, 28(2): 10-22.
MI Lijun, LIU Baojun, HE Min, et al. Petroleum geology characteristics and exploration direction in Baiyun deep water area, northern continental margin of the South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2016, 28(2): 10-22.
[5] 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.
[6] TISSOT B, PELET R, UNGERER P. Thermal history of sedimentary basins, maturation indices, and kinetics of oil and gas

- generation[J]. AAPG Bulletin, 1987, 71(12): 1445-1466.
- [7] 唐晓音, 黄少鹏, 杨树春, 等. 南海珠江口盆地钻井 BHT 温度校正及现今地温场特征[J]. 地球物理学报, 2016, 59(8): 2911-2921.
TANG Xiaoyin, HUANG Shaopeng, YANG Shuchun, et al. Correcting on logging-derived temperatures of the Pearl River Mouth Basin and characteristics of its present temperature field[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(8): 2911-2921.
- [8] JESSOP A M, HOBART M A, SCLATER J G. The world heat flow data collection 1975 [R]. Ottawa, Canada: Earth Physics Branch, Energy, Mines and Resources, 1976.
- [9] 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.
- [10] RU Ke, PIGOTT J D. Episodic rifting and subsidence in the South China Sea[J]. AAPG Bulletin, 1986, 70(9): 1136-1155.
- [11] SHYU C T, HSU S K, LIU C S. Heat flows off southwest Taiwan; measurements over mud diapirs and estimated from bottom simulating reflectors[J]. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 1998, 9(4): 795-812.
- [12] XIA K Y, XIA S G, CHEN Z R. Geothermal characteristics of the South China Sea[M]//GUPTA M L, YAMANO M. Terrestrial Heat Flow and Geothermal Energy in Asia. New Delhi: Oxford & IBH Publishing, 1995: 113-128.
- [13] 饶春涛, 李平鲁. 珠江口盆地地热流研究[J]. 中国海上油气(地质), 1991, 5(6): 7-18.
RAO Chuntao, LI Pinglu. Study of heat flow in Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas(Geology), 1991, 5(6): 7-18.
- [14] 米立军, 袁玉松, 张功成, 等. 南海北部深水区地热特征及其成因[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 27-32.
MI Lijun, YUAN Yusong, ZHANG Gongcheng, et al. Characteristics and genesis of geothermal field in deep-water area of the northern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 27-32.
- [15] SU Daquan, WHITE N, MCKENZIE D. Extension and subsidence of the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. Basin Research, 1989, 2(4): 205-222.
- [16] HE Lijuan, WANG Kelin, XIONG Liangping, 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.
- [17] TANG Xiaoyin, YANG Shuchun, ZHU Junzhang, et al. Tectonic subsidence of the Zhu 1 sub-basin in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. Frontiers of Earth Science, 2017, 11(4): 729-739.
- [18] 汪缙安, 邓孝, 陈墨香, 等. 南海北部大陆架西段新生代热演化历史及其特点的分析[J]. 地质科学, 1995, 30(3): 220-232.
WANG Ji'an, DENG Xiao, CHEN Moxiang, et al. Analyses on cenozoic thermal history and its features in west sector shelf of northern South China sea[J]. Chinese Journal of Geology, 1995, 30(3): 220-232.
- [19] 邓孝, 陈墨香, 汪缙安, 等. 南海北部大陆架西区磷灰石裂变径迹的分析[J]. 岩石学报, 1997, 13(4): 507-514.
DENG Xiao, CHEN Moxiang, WANG Ji'an, et al. Apatite fission-track analysis in the west region of north shelf in South China Sea[J]. Acta Petrologica Sinica, 1997, 13(4): 507-514.
- [20] 龚再升, 李思田, 谢泰俊. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
GONG Zaisheng, LI Sitian, XIE Taijun. Continental margin basin analysis and hydrocarbon accumulation of the northern South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [21] 唐晓音, 胡圣标, 张功成, 等. 珠江口盆地大地热流特征及其与热岩石圈厚度的关系[J]. 地球物理学报, 2014, 57(6): 1857-1867.
TANG Xiaoyin, HU Shengbiao, ZHANG Gongcheng, et al. Characteristic of surface heat flow in the Pearl River Mouth Basin and its relationship with thermal lithosphere thickness[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(6): 1857-1867.
- [22] 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, 2000, 14(1): 2-9.
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, 2000, 14(1): 2-9.
- [23] 王福国, 梅廉夫, 施和生, 等. 珠江口盆地珠一坳陷古近系构造样式分析[J]. 大地构造与成矿学, 2008, 32(4): 448-454.
WANG Fuguo, MEI Lianfu, SHI Hesheng, et al. Structural styles of paleogene in Zhu 1 depression of Pearl River Mouth Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2008, 32(4): 448-454.
- [24] 邱柄生, 胡圣标, 何丽娟. 沉积盆地热体制研究的理论与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
QIU Nansheng, HU Shengbiao, HE Lijuan. The theory and application of thermal regime study in sedimentary basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [25] YUAN Yusong, ZHU Weilin, MI Lijun, et al. "Uniform geothermal gradient" and heat flow in the Qiongdongnan and Pearl River Mouth Basins of the South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(7): 1152-1162.
- [26] 李雨梁, 黄忠明. 南海北部大陆架西区热演化史[J]. 中国海上油气(地质), 1990, 4(6): 31-39.
LI Yuliang, HUANG Zhongming. Thermal evolution in the west of northern continental shelf of South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1990, 4(6): 31-39.
- [27] HU Shengbiao, HE Lijuan, WANG Jiyang. Heat flow in the continental area of China; a new data set[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 179(2): 407-419.
- [28] 袁玉松, 郭彤楼, 胡圣标, 等. 下扬子苏南地区构造-热演化及烃源岩成烃史研究——以圣科 1 井为例[J]. 自然科学进展, 2005, 15(6): 753-758.
YUAN Yusong, GUO Tonglou, HU Shengbiao, et al. Tectono-thermal evolution and hydrocarbon generation history in the south Jiangsu of the Lower Yangtze—demonstrated for Well 1 of Shengke[J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(6): 753-758.
- [29] 邱柄生, 王绪龙, 杨海波, 等. 准噶尔盆地地温分布特征[J]. 地质科学, 2001, 36(3): 350-358.
QIU Nansheng, WANG Xulong, YANG Haibo, et al. The characteristics of temperature distribution in the Junggar Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2001, 36(3): 350-358.
- [30] 王社教, 胡圣标, 汪集旻. 准噶尔盆地热流及地温场特征[J]. 地

- 球物理学报, 2000, 43(6): 771-779.
WANG Shejiao, HU Shengbiao, WANG Jiyang. The characteristics of heat flow and geothermal fields in Junggar Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(6): 771-779.
- [31] YANG Shuchun, HU Shengbiao, CAI Dongsheng, et al. Present-day heat flow, thermal history and tectonic subsidence of the East China Sea Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2004, 21(9): 1095-1105.
- [32] 杨树春, 胡圣标, 蔡东升, 等. 南黄海南部盆地地温场特征及热-构造演化[J]. 科学通报, 2003, 48(14): 1564-1569.
YANG Shuchun, HU Shengbiao, CAI Dongsheng, et al. Temperature field and tectonothermal evolution in south part of the South Yellow Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(14): 1564-1569.
- [33] 汪集旸. 地热学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
WANG Jiyang. Geothermics and its applications[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [34] 姜光政, 高棚, 饶松, 等. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J]. 地球物理学报, 2016, 59(8): 2892-2910.
JIANG Guangzheng, GAO Peng, RAO Song, et al. Compilation of heat flow data in the China continental area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(8): 2892-2910.
- [35] 姚伯初. 南海北部陆缘的地壳结构及构造意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18(2): 1-16.
YAO Bochu. Crust structure of the northern margin of the South China Sea and its tectonic significance[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1998, 18(2): 1-16.
- [36] JARVIS G T, MCKENZIE D P. Sedimentary basin formation with finite extension rates[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1980, 48(1): 42-52.
- [37] 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: Solid Earth, 1980, 85(B7): 3711-3739.
- [38] STECKLER M, WATTS A B. Subsidence of the Atlantic-type continental margin off New York[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 41(1): 1-13.
- [39] TANG Xiaoyin, YANG Shuchun, HU Shengbiao. Thermal-history reconstruction of the Baiyun sag in the deep-water area of the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. Frontiers of Earth Science, 2018, 12(3): 532-544.
- [40] GREEN P F, DUDDY I R, GLEADOW A J W, et al. Thermal annealing of fission tracks in apatite: 1. A qualitative description[J]. Chemical Geology: Isotope Geoscience Section, 1986, 59: 237-253.
- [41] GLEADOW A J W, BELTON D X, KOHN B P, et al. Fission track dating of phosphate minerals and the thermochronology of apatite[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2002, 48(1): 579-630.
- [42] KETCHAM R A, DONELICK R A, CARLSON W D. Variability of apatite fission-track annealing kinetics: III. Extrapolation to geological time scales[J]. American Mineralogist, 1999, 84(9): 1235-1255.
- [43] KETCHAM R A, DONELICK R A, DONELICK M B. AFT-Solve: a program for multi-kinetic modeling of apatite fission-track data[J]. American Mineralogist, 2003, 88(5/6): 929.
- [44] 张功成, 朱伟林, 米立军, 等. “源热联控论”: 来自南海海域油气田“外油内气”环带有序分布的新认识[J]. 沉积学报, 2010, 28(5): 987-1005.
ZHANG Gongcheng, ZHU Weilin, MI Lijun, et al. The theory of hydrocarbon generation controlled by source rock and heat from circle distribution of outside-oil Fields and inside-gas Fields in South China Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(5): 987-1005.
- [45] 夏斌, 崔学军, 谢建华, 等. 关于南海构造演化动力学机制研究的一点思考[J]. 大地构造与成矿学, 2004, 28(3): 221-227.
XIA Bin, CUI Xuejun, XIE Jianhua, et al. Thinking about the dynamics mechanism study on formation and evolution of South China Sea[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2004, 28(3): 221-227.
- [46] BARCKHAUSEN U, ENGELS M, FRANKE D, et al. Evolution of the South China Sea: revised ages for breakup and seafloor spreading[J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 58: 599-611.
- [47] BRIAIS A, PATRIAT P, TAPPONNIER P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1993, 98(B4): 6299-6328.
- [48] CULLEN A, REEMST P, HENSTRA G, et al. Rifting of the South China Sea: new perspectives[J]. Petroleum Geoscience, 2010, 16(3): 273-282.
- [49] HSU S K, YEH Y C, DOO W B, et al. New bathymetry and magnetic lineations identifications in the northernmost South China Sea and their tectonic implications[J]. Marine Geophysical Researches, 2004, 25(1/2): 29-44.
- [50] SUGGATE S M, COTTAM M A, HALL R, et al. South China continental margin signature for sandstones and granites from Palawan, Philippines[J]. Gondwana Research, 2014, 26(2): 699-718.
- [51] YAN Pin, DENG Hui, LIU Hailing, et al. The temporal and spatial distribution of volcanism in the South China Sea region[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2006, 27(5): 647-659.
- [52] 李友川, 张功成, 傅宁. 南海北部深水油气生成特性研究[J]. 中国海上油气, 2010, 22(6): 375-381.
LI Youchuan, ZHANG Gongcheng, FU Ning. A study on hydrocarbon generation characteristics in the deepwater region, the northern South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2010, 22(6): 375-381.

(收稿日期 2018-07-09 改回日期 2018-12-10 责任编辑 熊英)