

珠江口盆地珠一坳陷地温场特征与主控因素分析

黄玉平^{1,2*}, 龙祖烈^{1,2}, 石 创^{1,2}, 史玉玲^{1,2}, 张小龙^{1,2},
胡 杰³, 郑立庆^{1,2}, 蔡俊杰^{1,2}

1. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518054;

2. 中海石油深海开发有限公司, 深圳 518054;

3. 油藏地质及开发工程全国重点实验室(成都理工大学), 成都 610059

[摘要] 地温场研究是油气成烃、成藏及资源评价工作的重要基础, 因此作为珠江口盆地原油勘探核心区域的珠一坳陷, 其地温场研究意义重大。为了精细研究珠一坳陷现今地温场特征及其主控因素, 本研究采用多维度数据采集与分析相结合的方法, 系统整理了珠一坳陷 204 口探井地温数据, 应用光学扫描热导率测试仪开展 211 块样品岩石热导率测试, 基于上述参数计算珠一坳陷现今的地温梯度与大地热流。研究结果显示: 珠一坳陷地温梯度主要分布在 27~40 °C/km, 平均为 (33±2) °C/km; 岩石热导率值主体分布在 1.0~3.0 W/(m·k), 平均值为 2.61 W/(m·k); 大地热流分布在 55~75 mW·m⁻², 平均值为 64 mW·m⁻²。分析表明: (1) 珠一坳陷地温梯度整体呈现出东高西低、北高南低、凸起区高于凹陷区的特点, 不同凹陷之间的地温梯度存在一定差异, 其中西江主洼的地温梯度最低, 大地热流的分布差异与地温梯度具有耦合性; (2) 与其他盆地相比, 珠一坳陷属于“热盆”, 其热流值高于中国西部的塔里木盆地和准噶尔盆地, 低于南海北部的莺歌海盆地和琼东南盆地; (3) 珠一坳陷现今地温场的差异分布主要受深部岩石圈热结构、断裂、岩浆岩分布及岩石热物性共同影响。本研究能够有效指导珠一坳陷深层油气勘探部署、助力烃源岩成熟度评价、油气成藏有利区预测等工作, 为珠江口盆地油气资源的勘探开发提供科学依据。

[关键词] 珠江口盆地; 珠一坳陷; 地温梯度; 热导率; 大地热流

[分类号] P314

[文献标志码] A

The characteristics of the geothermal field and main controlling factors of the Zhu I Depression in the Pearl River Mouth Basin

HUANG Yuping^{1,2*}, LONG Zulie^{1,2}, SHI Chuang^{1,2}, SHI Yuling^{1,2}, ZHANG Xiaolong^{1,2},
HU Jie³, ZHENG Liqing^{1,2}, CAI Junjie^{1,2}

1. Shenzhen Branch of CNOOC (China) Co., Shenzhen 518054, China;

2. CNOOC Deepwater Development Limited, Shenzhen 518054, China;

收稿日期: 2025-07-22; **改回日期:** 2025-09-20。 **责任编辑:** 魏 巍。

基金项目: “十四五”全国油气资源评价项目(QGYQZYPJ2022-3); 中海石油(中国)有限公司深圳分公司重大生产性科研项目(SCKY-2025-SZ-YJYKT-03); 国家自然科学基金(42302342)。

***通信作者:** 黄玉平(1985—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 盆地模拟与油气资源评价, E-mail: huangyp11@cnooc.com.cn。

引用格式: 黄玉平, 龙祖烈, 石创, 等, 2026. 珠江口盆地珠一坳陷地温场特征与主控因素分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 53(3): 584—596.

Huang Y P, Long Z L, Shi C, et al., 2026. The characteristics of the geothermal field and main controlling factors of the Zhu I Depression in the Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 53(3): 584—596.

3. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology,
Chengdu 610059, China

Abstract: Studying geothermal fields provides information related to hydrocarbon generation, petroleum entrapment, and resource assessment. As a core area for crude oil exploration in the Pearl River Mouth Basin, studies of the current geothermal field and its main controlling factors in the Zhu I Depression hold significant importance. To conduct such an in-depth study, we adopted a method that combines multidimensional data collection and analysis. Based on 204 borehole temperature measurements and more than 211 thermal physical parameters, we studied the current geothermal gradient and heat flow, regional geological characteristics, and distribution characteristics of the Zhu I Depression. The results show that the geothermal gradient of the Zhu I Depression is mainly between 27–40 °C/km, with an average of (33 ± 2) °C/km; the rock thermal conductivity is between 1.0 and 3.0 W/(m·k), with an average of 2.61 W/(m·k); and the current heat flow is between 55 to 75 mW/m², with an average of 64 mW/m². Our research indicates that the geothermal gradient of the Zhu I Depression is higher in the east and lower in the west, high in the north and low in the south, and high in uplift areas and low in depression areas. There are certain differences in geothermal gradients between different depressions, among which the geothermal gradient of the main Xijiang Sag is the lowest. The different distributions of terrestrial heat flow are coupled with the geothermal gradient. These new data confirm that the Zhu I Depression has a relatively high heat flow, which is higher than those measured in western China, such as the Tarim Basin and Junggar Basin; however, it is lower than that of the northern South China Sea, such as the Yinggehai Basin and Qiongdongnan Basin. The distribution characteristics of the current geothermal field in the Zhu I Depression are mainly controlled by the deep lithospheric thermal structure, faults, magmatic rock distribution, and its thermal and physical parameters. This study effectively promotes deep oil and gas exploration in the Zhu-1 Depression, facilitating future work related to hydrocarbon source rock maturity evaluation and favorable oil-gas reservoir formation area predictions, and provides a scientific basis for the exploration and development of oil and gas resources in the Pearl River Mouth Basin.

Key words: Pearl River Mouth Basin; Zhu I Depression; geothermal gradient; thermal conductivity; heat flows

南海北部的珠江口盆地作为中国重要的含油气盆地,其地温场特征一直是油气勘探领域关注的重点。地温场作为油气资源形成过程中的关键物理场之一,不仅控制着烃类物质的生成与演化过程,还对现今的油气相态起着决定性作用,同时在油气的运移、聚集以及保存等环节中也有着重要的作用(刘雨晨等, 2023)。基于此,众多学者针对珠江口盆地的地温场分布特征开展了一系列的研究。2020年之前,前人在有限的资料条件下,开展过珠江口盆地现今地温场研究,揭示南海北部深水地区地温梯度为29.4~52.2 °C/km,平均为 (39.1 ± 7.4) °C/km(米立军等, 2009; 胡圣标等, 2019; 龙祖烈等, 2020); 张功成等(2012)认为珠江口盆地平均地温梯度集中在 (36.6 ± 6.0) °C/km,大地热流平均值为 (66 ± 9.8) mW·m⁻²; 唐晓音等(2023)对中国海及邻区盆地的地热研究中揭示珠江口盆地地温梯度平均值为 (52.6 ± 30.4) °C/km,大地热流平均值为 (75.3 ± 18.4) mW·m⁻²。尽管不同学者对珠江口盆地地温场的认识存在差异,但

是这些区域的地温场认识为后续研究珠江口盆地地热背景提供了坚实的基础。

作为珠江口盆地重要的石油富集区域的珠一坳陷,其石油探明储量占珠江口盆地总探明储量的三分之二,但是,目前针对珠一坳陷现今地温场的系统性研究却存在明显的不足。造成这一现象的原因主要有2个,一方面是基础研究数据,前人关于珠江口盆地地温场的研究数据多为2020年之前收集的,地温数据集中分布在浅层或者凸起区。从2020年以来,随着珠江口盆地勘探逐步走向深层古近系和古潜山等“双古”领域,深层探井不断增多,早期浅层探井的地温数据已经难以精确地反映当前珠江口盆地的地温场真实情况,严重制约了珠一坳陷深层油气成藏条件的深入研究。另一方面,在前人的研究中,鲜少有对珠一坳陷地温场的主控因素进行深入且系统地探讨。

地温场的空间分异是地球深部过程与浅部地质条件协同作用的产物。现有研究表明,地温

场的分布格局主要受控于岩石圈结构、断裂、岩石热物性等多因素的动态耦合。岩石放射性生热、沉积物隔热效应及岩石圈-软流圈热边界深度共同调控浅层热场格局(Gholamrezaie et al., 2018)。Kassa et al.(2022)和 Kolawole and Evenick(2023)的研究揭示地温梯度与岩石圈厚度、居里面深度呈现负相关关系;也有研究认为断裂、岩性和地下水活动共同调控地热场,且断裂对地热场的影响强度超越岩性变化和地下活动水(Wang et al., 2020);Duwiquet et al.(2022)佐证了在走滑断裂周缘孔隙弹性力驱动下,垂直断裂带周围呈现温度异常;刘雨晨等(2023)在对松辽盆地现今地温梯度研究中同样证实盆演化动力学背景、岩石热物性特征、岩浆作用等因素耦合作用共同影响地温场分布特征。但目前对于这些因素如何控制珠一坳陷地温场的分布,尚未有明确的认识。这使得对珠一坳陷地温差异分布特征的理解不够深入,无法为油气勘探开发提供更为精准的地热学依据。

综上所述,虽然前人对珠江口盆地地温场的研究奠定了一定的基础,但针对盆地重点油气勘探领域珠一坳陷地温场的研究,较难满足当前珠一坳陷深层油气勘探开发对精细化的地温研究的需求。本次研究统计整理了珠一坳陷 52 口探井的试油温度和 152 口探井的孔底温度数据,结合 47 口探井的岩石热导率及 147 块岩石样品放射性生热率计算结果,重新解析了珠一坳陷的现今地温梯度和大地热流的分布特征,更真实地反映了珠一坳陷现今的地热状态。此次测试样品数据涵盖珠江口盆地所有层位及岩性,平面上覆盖了整个珠一坳陷,数据代表性强。同时,综合前人对珠江口盆地珠一坳陷区域地质背景研究,探讨断裂、岩石热导率、岩石圈结构等因素对现今地温场分布的影响,加深珠一坳陷地温差异分布特征的认识。这一研究为珠一坳陷油气勘探开发提供精细的地热学参数,助力珠一坳陷深层“双古”领域勘探部署、烃源岩成熟度与成藏有利区预测,降低勘探风险,为珠江口盆地油气勘探开发提供科学依据,具有重要的地质意义。

1 地质背景

南海处于太平洋板块、欧亚板块与菲律宾板块的三方交汇地带,其大地构造位置颇具特殊

性,动力学背景也较为复杂(施和生等, 2015; 胡圣标等, 2019)。珠江口盆地位于中国南海北部,它是在中生代褶皱基底之上形成的,属于规模庞大且地质特征具有典型性的新生代裂陷盆地,呈现出“东西分块、南北分带”的特点,整体被划分为北部断阶带、北部坳陷带、中部隆起带、南部坳陷带和南部隆起带 5 个构造带(唐晓音等, 2014)。本次研究的区域位于北部坳陷带的珠一坳陷,该坳陷从西向东由恩平凹陷、西江凹陷、惠州凹陷、陆丰凹陷等二级负向构造单元构成(图 1-A、B),整体水深为 50~150 m,属于浅水区。由于洼陷之间构造演化存在差异,各个凹陷又被分割成多个三级洼陷。珠江口盆地整体上分为同裂陷期和裂陷后期 2 个主要演化阶段,先后经历了珠琼运动、南海运动、白云运动和东沙运动,构造活动十分活跃。裂陷期的珠琼运动一幕,使得 NE 向断裂得到进一步发育;珠琼运动二幕的裂陷方向从 NE 向转变为近 EW 向,继承了珠琼运动一幕。裂后活化期之后,珠江口盆地处于印度板块 NE 向和菲律宾板块 NW 向的共轭挤压环境中,这导致先存的近 EW 向与 NWW 向控盆断裂重新活动,并且形成了一系列 NWW 向新生小断裂(施和生等, 2017, 2020; 李博等, 2023)。其中,珠一坳陷西部的恩平凹陷和西江凹陷发育有 NE 向、NNE 向以及近 EW 向的控洼断裂,NE 向低角度主干断层是其独特的构造特征(Ye et al., 2018; Ma et al., 2020);东部的惠州凹陷、陆丰凹陷等则主要发育近 EW 向和 NWW 向的控洼断裂,二者存在的差异可能是由基底差异以及应力场变化所控制(刘海伦等, 2018)。多期次的构造演化对珠江口盆地的沉积演化起到了控制作用,从下到上依次发育了始新统文昌组、恩平组、渐新统珠海组、中新统珠江组、韩江组、粤海组、上新统万山组以及第四系地层(图 1-C)。其中,文昌组与恩平组为陆相沉积体系,是珠江口盆地主要的烃源岩层系。文昌组以中深湖相、浅湖相及辫状河三角洲相沉积为主,发育大套暗色泥岩,其间夹杂砂岩夹层。恩平组以湖沼相、河流相及三角洲平原相沉积为主,岩性呈现砂泥岩互层的特点。自渐新世珠海组至第四系,地层沉积环境转变为海相,珠海组在海相背景下发育大套海相砂岩,其间夹有薄层泥岩,整体呈现下粗上细的岩性特征。而从中新世珠江组到第四系,岩

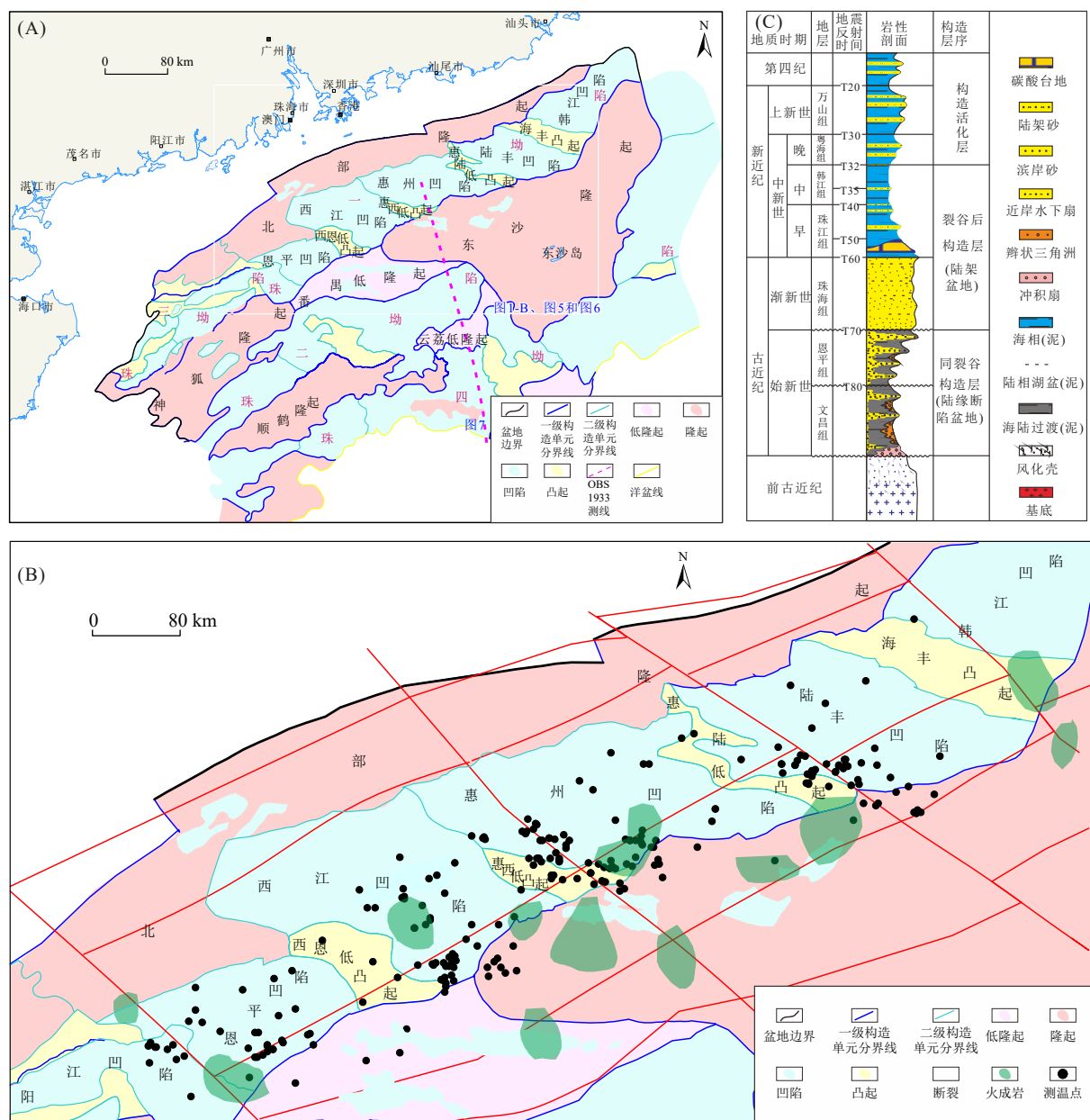


图 1 珠江口盆地地区构造图及地层柱状图
Fig. 1 Regional tectonic map and stratigraphic column of the Pearl River Mouth Basin
(A) 珠江口盆地地区构造图; (B) 珠一坳陷地区构造与断裂、火成岩叠合图 (修改自高中亮等, 2022);
(C) 珠江口盆地地层综合柱状图 (修改自朱明等, 2019)

性以厚层泥岩为主, 夹有薄层砂岩, 不同层位的泥岩与砂岩组合虽存在细节差异, 但厚泥岩夹薄砂岩的整体特点贯穿其中(施和生等, 2017; 朱明等, 2019)。

2 井温数据与热物性参数

地层温度、岩石热导率、生热率等参数, 是探究盆地现今温度场分布特征的核心参数。地层温度直接反映地下热状态, 为地温梯度计算提

供依据; 岩石热导率直接影响地球内部各圈层热量传输效率, 放射性生热是岩石圈内热的主要来源之一, 这些参数协同支撑温度场的研究(汪集场, 2015)。

2.1 钻孔温度

地层温度数据作为研究现今地温场的根基, 主要涵盖稳态测温 and 静井温度 2 类。受海上作业复杂性的影响, 研究区的地层温度数据以静井温度为主。静井温度包含地层试油温度(DST)、

孔底温度(BHT)、地层随压测试温度(MDT)等。在这些温度数据中,地层试油温度(DST)具有较高的可靠性,具体是指在关井数天甚至长期关井之后,将仪器下放到射孔井段所测得的试油温度,在一定程度上能够替代研究区域的系统稳态测温。而其他测井温度数据因静井时间不足,需经校正后方可使用。汪集旻(2015)研究表明,钻井过程中,循环的泥浆井液在钻井深部段低于原始地温或井壁岩温,对井壁围岩构成冷却效应,导致孔底温度通常低于地层的真实温度。而泥浆循环结束至温度测试的时间差(TSC)越长,岩温会逐渐恢复,测试的孔底温度越接近真实的地层温度。前人通过对南海西南部的马来盆地测井井温数据统计分析,然后利用试油温度数据作为参考标准,提出的一种新的井底温度校正方法,方法中充分考虑了泥浆循环结束至温度测试间的时间差,能很好地恢复原始地层温度(Waples and Ramly, 2001; Waples et al., 2004)。这一方法在珠江口盆地、东海陆架盆地的丽水凹陷都得到很好地验证(唐晓音等, 2016; 黄玉平等, 2022; 于仲坤等, 2023),说明该方法的可靠性较高。

孔底温度(BHT)的 Waples 校正方法(Waples and Ramly, 2001; Waples et al., 2004)如下所示。

对于深度小于 3 500 m 的 BHT 数据采用公式 1:

$$T_c = T_s + f \cdot (T_m - T_s) \quad (1)$$

式中: T_c 为校正后的温度数据, $^{\circ}\text{C}$; T_s 为地表温度, $^{\circ}\text{C}$; f 为校正因子; T_m 为测试 BHT 数据, $^{\circ}\text{C}$ 。

对于单个测试 BHT, 校正因子由公式 2 计算得出:

$$f_s = [-0.1462 \ln(TSC) + 1.699] / (0.572 \cdot Z^{0.075}) \quad (2)$$

式中: TSC 为泥浆循环结束至温度测试间的时间(静井时长), h; Z 为温度数据所在深度, m。

对于深度大于等于 3 500 m 的 BHT 数据采用公式 3:

$$T_c = T_s + f \cdot (T_m - T_s) - 0.001391(Z - 4498) \quad (3)$$

校正因子由公式 4 计算得出:

$$f = 1.32866^{-0.005289TSC} \quad (4)$$

本研究运用上述方法,对珠一坳陷各凹陷 152 口探井的孔底温度展开校正。重点探井孔底校正温度(附表 1)与试油温度对比结果显示,校

正后的孔底温度与同深度的试油温度数据偏差较小(图 2-A),这一结果证实了校正方法的可靠性,说明校正后的孔底温度数据可用于地温场研究。借助上述地温数据构建珠一坳陷测温剖面后发现,探井地层温度数据与深度呈现出良好的线性关系(图 2-B),这一特征与地层温度的热传导特性相契合。基于此类数据的地温场分析结果,能够有效规避偶然热扰动带来的误差,准确揭示区域地热场的宏观规律。

2.2 岩石热导率

岩石热导率作为基础的岩石热物性参数,用于表征岩石的导热能力,其定义为沿热传导方向单位长度上温度降低 1 开尔文时,单位时间内通过单位面积的热量,单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})$ (汪集旻, 2015; 任战利等, 2020)。精确测试岩石热导率,是计算大地热流、探究现今地温场的关键环节。热导率测试方法多样,其中光学扫描法因具有对样品无损、测试效率高等优势,在当前热导率测试中应用广泛。本次研究测试了珠一坳陷 211 个岩石样品的热导率,所使用的仪器是德国生产的 TCS(thermal conductivity scanning)光学扫描热导率测试仪,仪器测量范围为 $0.2 \sim 25.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k})$,测量误差在 $\pm 3\%$ 以内。其工作原理是:对被测样品与作为对照的已知热导率标样进行等量激光扫描加热,通过红外温度感应器分别测定两者的温度变化,再依据标样已知热导率,即可计算出被测样品的热导率。其具体计算公式(公式 5)可以简化为:

$$K_x = K_0 \cdot \frac{\Delta T_0}{\Delta T_x} \quad (5)$$

式中: K_x 为待测样品的热导率; K_0 为对照组标样的热导率; ΔT_0 为待测样品的温度变化; ΔT_x 为对照组标样的温度变化。

珠一坳陷 211 个岩石热导率样品在平面上覆盖了恩平凹陷、西江凹陷、惠州凹陷、陆丰凹陷,层位涉及韩江组、珠江组、珠海组、恩平组、文昌组及前古近系等,岩性则包含砂岩、粉砂岩、泥岩、砾岩、灰岩、花岗岩等多种类型。样品的岩性与层位覆盖全面,在区域空间上的控制效果较好。珠一坳陷热导率分布直方图显示,岩石热导率值分布较为集中,主体分布在 $1.0 \sim 3.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k})$,约占测试样品总量的 90%,平均值为 $2.61 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k})$ (附表 2、图 3-A)。前人研究

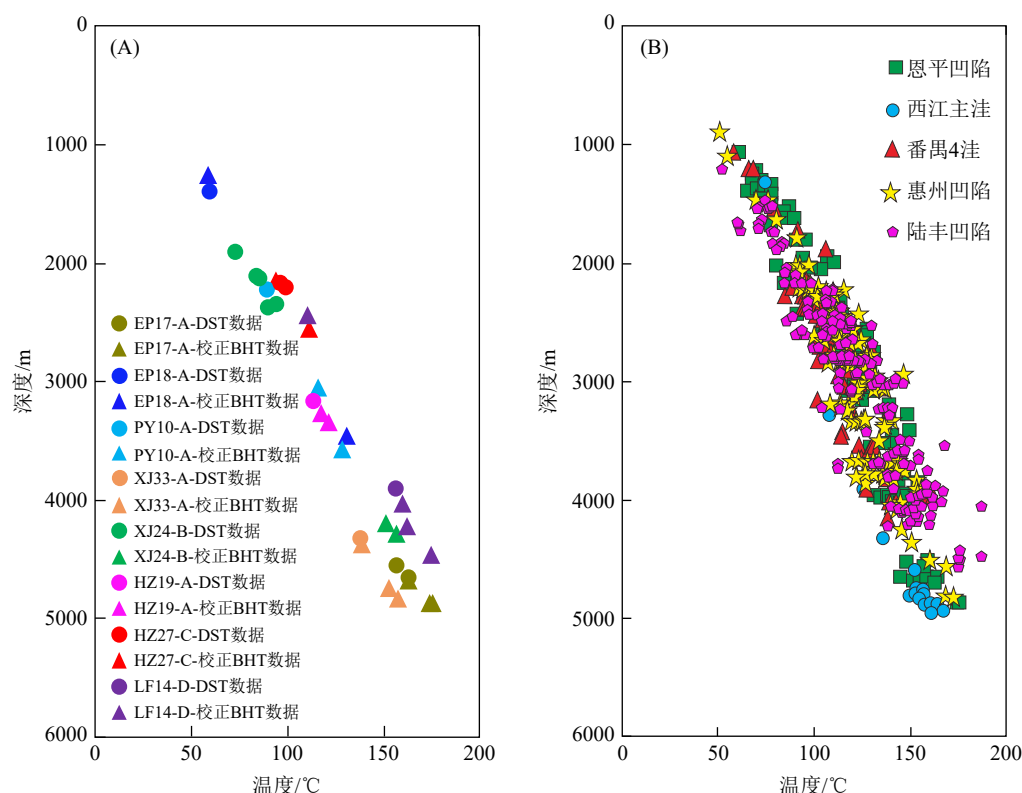


图2 珠一坳陷重点探井地温剖面

Fig. 2 Temperature profile of key exploration wells in the Zhu I Depression

(A) 重点探井 DST 温度与校正后 BHT 温度对比图; (B) 珠一坳陷地层温度与深度关系图

(汪集旻, 2015; 唐晓音等, 2016; 任战利等, 2020)指出岩石热导率的大小受多种因素影响, 岩石成分、结构、所含矿物性质及埋深等均对其有重要作用。珠一坳陷的岩石热导率测试结果显示, 相同岩性的岩石热导率与测试深度呈正相关(图 3-B), 且从泥岩到砾岩, 热导率逐步增大。这一现象主要由岩石结构与岩性决定: 在埋藏压实过程中, 随着深度增加, 压实作用愈发显著, 岩石孔隙度不断降低, 使得相同岩性的岩石埋深越大, 热导率值越高。

2.3 岩石放射性生热率

岩石生热率是指单位体积的岩石内部, 放射性元素在单位时间里发生衰变时所释放出的能量。要获取这一参数, 首先需要测定岩石样品中铀(U)、钍(Th)以及氧化钾(K_2O)的含量, 随后结合岩石的密度, 运用 Rybach (1976) 提出的计算公式进行推导得出。本研究对珠一坳陷沉积盖层的 147 个样品开展生热率测试, 样品深度为 1 285~4 900 m, 取样层位涵盖韩江组、珠江组、珠海组、恩平组、文昌组及前古近系等。经样品

测试与计算, 得到相应的生热率数据。生热率计算参考公式 6:

$$A = 0.01\rho(9.52C_U + 2.56C_{Th} + 3.48C_K) \quad (6)$$

式中: A 为样品的放射性生热率, $\mu W/m^3$; ρ 为岩石密度, g/cm^3 ; 而 C_U 、 C_{Th} 、 C_K 分别为样品中铀、钍、钾这 3 种放射性元素的质量分数, 其单位依次为 $\mu g/g$ 、 $\mu g/g$ 、 $\%$ 。

本研究对 147 个样品的测试结果显示, 珠一坳陷岩石生热率为 $0.52 \sim 3.39 \mu W/m^3$, 平均值为 $1.74 \mu W/m^3$ 。由图 4 可知, 岩石生热率与深度无显著关联, 同一深度不同岩石的生热率差异明显。具体来看, 泥岩生热率平均值为 $1.95 \mu W/m^3$, 砂岩为 $1.48 \mu W/m^3$, 砾岩为 $1.26 \mu W/m^3$, 火山岩类为 $0.89 \mu W/m^3$, 灰岩为 $1.2 \mu W/m^3$ 。其中泥岩生热率平均值最高, 这主要源于泥岩中铀、钍、钾等放射性元素含量较高。

3 现今地温梯度与大地热流分布特征

3.1 地温梯度分布特征

地温梯度与深度密切相关, 本次研究采用一

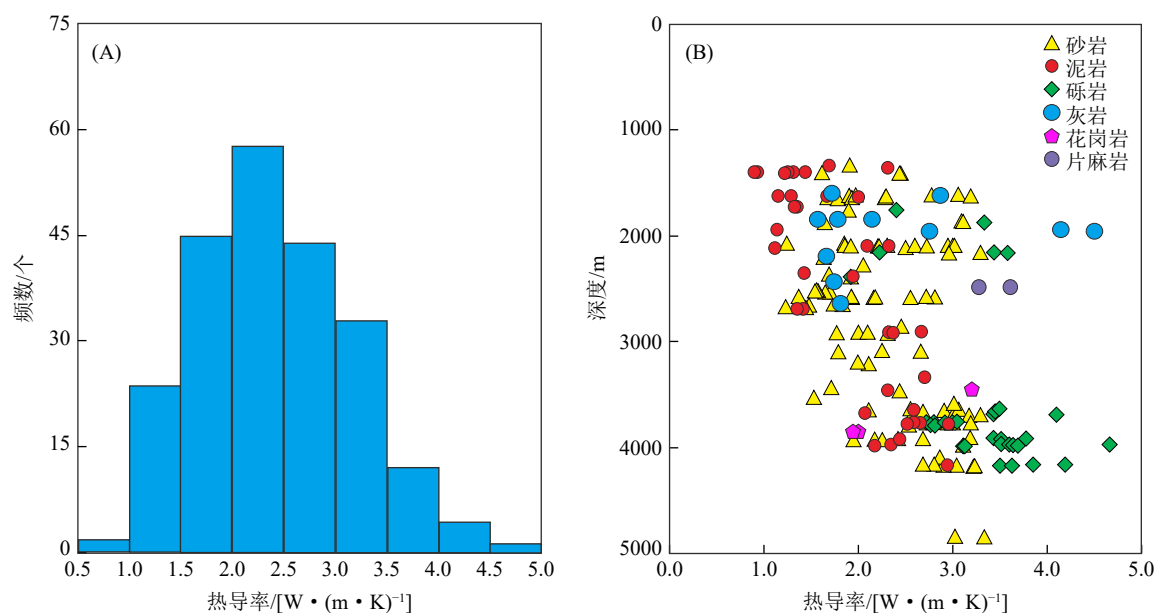


图 3 珠一坳陷实测岩石热导率直方图及不同岩性热导率-深度关系图

Fig. 3 Histogram of measured thermal conductivity in the Zhu I Depression and relationship between thermal conductivity and depth in different lithologies

(A) 珠一坳陷实测岩石热导率直方图; (B) 不同岩性热导率-深度关系图

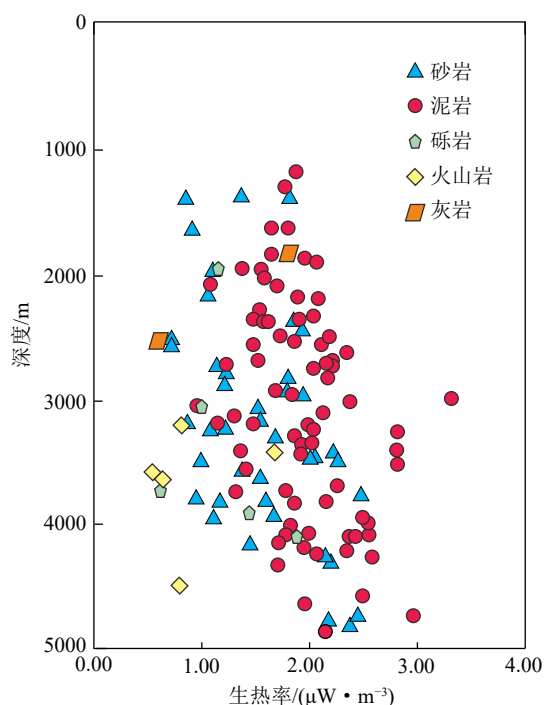


图 4 珠一坳陷岩石生热率与深度关系剖面图

Fig. 4 Relationship between rock heat production rate and depth in the Zhu I Depression

维热传导公式(公式 7)计算了珠一坳陷代表性探井统一深度的平均地温梯度,并基于 204 口探井的地温数据,应用最小二乘法(公式 8)的拟合计算珠一坳陷现今地温梯度。

$$T_i^{\pm} = T_i^{\pm} + (q_i^{\pm} \times Z_i) / K_i - A_i \times Z_i^2 / (2 \times K_i) \quad (7)$$

式中: i 为构造层数; $T_i^{\pm}$ 、 $T_i^{\pm}$ 表示第 i 层构造上下界面的温度, $^{\circ}\text{C}$; A_i 表示第 i 层的岩石生热率, $\mu\text{W}/\text{m}^3$; $q_i^{\pm}$ 为第 i 层上面的热流值, $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$; K_i 表示第 i 层岩石热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; Z_i 表示第 i 层厚度, m 。

$$G = (T_s - T_0) / (D_i - D_0) \quad (8)$$

式中: G 为地温梯度, $^{\circ}\text{C}/\text{km}$; T_s 为地层温度, $^{\circ}\text{C}$; T_0 为海底温度, $^{\circ}\text{C}$; D_i 为测温深度, m ; D_0 为海底深度, m 。

结果显示,珠一坳陷现今地温梯度主体分布在 $27 \sim 40$ $^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 平均为 (33 ± 2) $^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 与中国东部 ($33 \sim 35$ $^{\circ}\text{C}/\text{km}$) “热盆”地温梯度相当, 高于中国中西部的塔里木盆地 [(22.6 ± 3.0) $^{\circ}\text{C}/\text{km}$] (冯昌格等, 2009)、四川盆地 (20.9 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$) 和准噶尔盆地 [(21.3 ± 3.7) $^{\circ}\text{C}/\text{km}$] (饶松等, 2013)。其中, 恩平凹陷地温梯度平均约 34.2 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$; 西江凹陷地温梯度平均约 33.5 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 南北地温梯度差异较大, 西江主洼地温梯度整体偏低, 最小值为 27 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$; 惠州凹陷地温梯度平均约 34.5 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$; 陆丰凹陷地温梯度平均约 35.2 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$; 恩西低凸起地温梯度平均约 35.7 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$; 惠西低凸起地温梯度平均约 36.0 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$; 惠陆低凸起地温梯度平均约 36.2 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$; 海丰凸起地温梯度平均约 36.5 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。整体而

言,珠一坳陷的地温梯度呈现出东高西低、南高北低的特点,且凸起区域的地温梯度高于凹陷中心。在断裂带及火成岩分布的区域,地温出现异常高现象(图5)。

3.2 大地热流分布特征

大地热流指的是在单位时间内,通过单位面积从地球内部向地表传输并最终散发出去的热量。与其他地热参数相比,大地热流能够更为精准地体现地温场的特性。

大地热流值 q 的计算公式为:

$$q = -K \frac{dT}{dz} \quad (9)$$

式中: q 为大地热流, $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$; dT/dz 为地温梯度, $^{\circ}\text{C}/\text{km}$; K 为地温梯度测试段对应的岩石热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

结合珠一坳陷 204 口探井的地温数据与本次实测的热导率数据,本次研究重新计算了这 204 口探井的大地热流,附表 3 展示了珠一坳陷 4 个凹陷 16 口重点探井地温梯度及计算的大地热流值,本次根据计算的大地热流值编制出珠一坳陷现今大地热流分布图(图 6)。结果显示,珠一坳陷现今大地热流主要分布在 $55 \sim 75 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 平均值为 $64 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。其分布特征与地温梯度

相似,呈现北低南高的格局。其中,西江主洼大地热流值最低,主体处于 $52 \sim 65 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 平均约 $60 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$; 坳陷南部北东向分布的岩浆岩分布区周边热流值较高,普遍超 $65 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 特别是在断裂及岩浆分布周缘,最高可达 $75 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

4 地温场分布主控因素分析

珠一坳陷现今大地热流主要分布在 $55 \sim 75 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 平均为 $64 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。与中国东部及其他海域沉积盆地相比,其大地热流值低于琼东南盆地 [$(72.3 \pm 14.7) \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$]、莺歌海盆地 [$(74.9 \pm 18.4) \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$] 及南海北部深水区 [$(75.3 \pm 18.4) \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$], 与东海盆地 [$(68.1 \pm 8.2) \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$] 和南黄海盆地 [$(67.3 \pm 3.4) \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$] 相当(唐晓音等, 2023); 但明显高于西部的塔里木盆地 ($43 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$) 和准噶尔盆地 ($43 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$) (Qiu et al., 2008; Liu et al., 2019)。盆地当前地温场的分布受到诸多因素综合作用,构造运动的活跃程度、末次热事件的出现时间、岩石圈的伸展拉张幅度、地壳的厚度大小、壳内高导层的埋藏深度以及断裂活动情况等,都有可能对地温场的分布态势产生影响。袁玉松等(2006)研究指出,那些构造运动较为活跃、末次

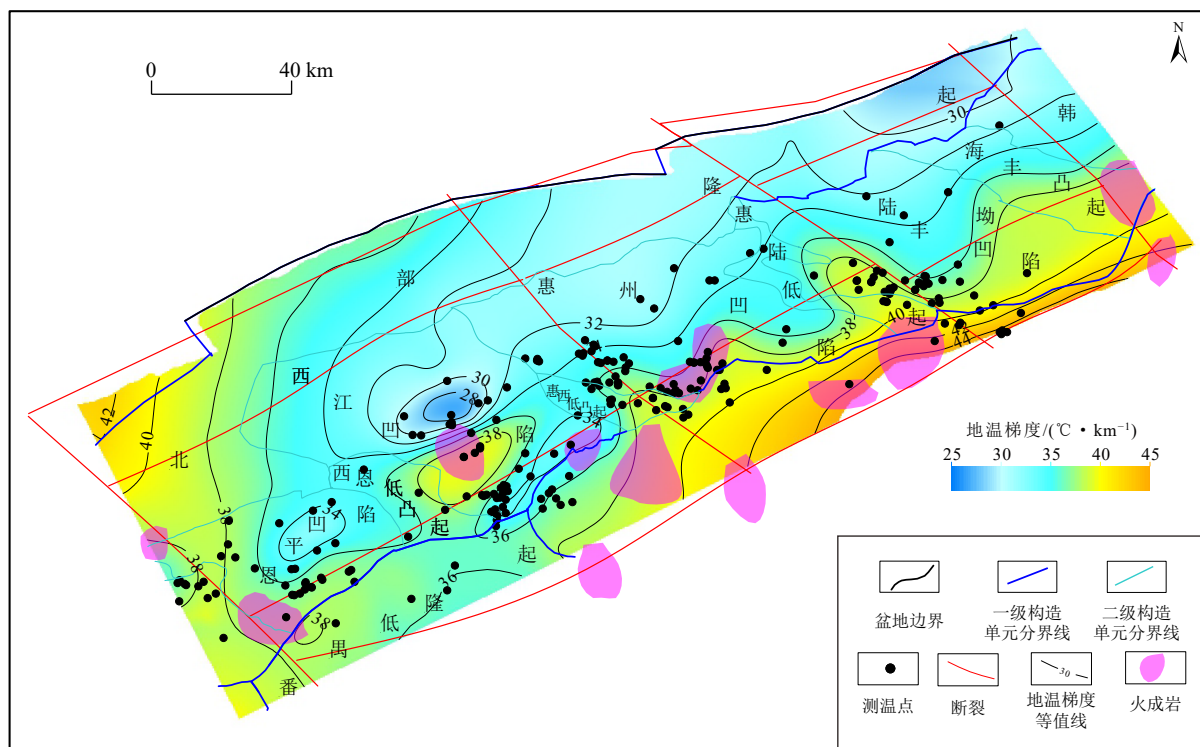


图 5 珠一坳陷现今地温梯度分布图

Fig. 5 Distribution map of the current geothermal gradient in the Zhu I Depression

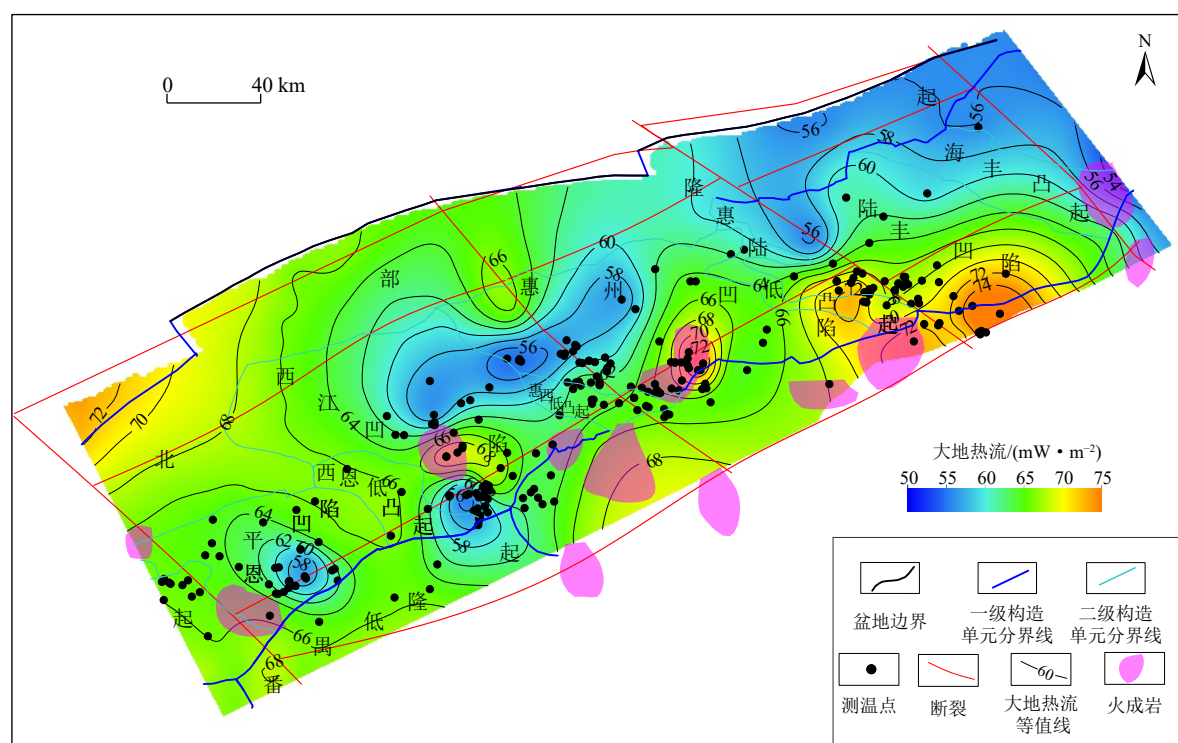


图 6 珠一坳陷现今大地热流等值线分布图

Fig. 6 The distribution pattern of the present-day heat flow in the Zhu I Depression

热事件发生时间较晚、岩石圈拉张幅度较大、岩石圈与地壳厚度较薄、壳内高导层埋藏较浅且断裂活动较强的区域,其地温梯度和大地热流值往往较高,反之则相对较低。从整体来看,珠江口盆地当前地温场的分布特点与地壳厚度的变化趋势相吻合,这意味着地壳厚度对该盆地当前地温场的整体变化趋势起到了控制作用,而局部的高热区域与断裂及岩浆的分布位置有着较为紧密的关联。下文将逐一分析这些因素对珠一坳陷当前地温场分布的控制效应。

4.1 深部热结构的控制作用

盆地所处的大地构造背景以及深部动力学过程,是决定其温度分布的首要控制因素(刘雨晨等, 2023)。同样的,前人针对珠江口盆地岩石圈热结构研究表明,珠江口盆地地表热流的变化主要是受深部热作用的控制(唐晓音等, 2018)。研究发现,南海北部陆缘的地壳呈现出从陆架、陆坡到洋盆逐步减薄的阶梯状特征。具体而言,大陆架与上陆坡的地壳厚度为 26~30 km,向下陆坡逐渐减薄至 13~22 km,其中洋壳区域的地壳最薄,厚度约为 8 km。该区域盆地岩石圈厚度的变化规律与地壳厚度的变化规律相吻合。珠江口盆地的热岩石圈在大陆架区域厚度约为

90 km,朝着陆坡方向逐渐减薄,至下陆坡、西沙海槽及洋壳区时,热岩石圈厚度减至 60~65 km(施小斌等, 2000)。盆地岩石圈厚度变化与地壳减薄趋势呈现高度耦合性,这种地壳结构特征与深部动力学过程也存在紧密联系。受新生代多期拉张作用影响,地壳和岩石圈伸展减薄,为软流圈热物质的上涌创造了条件(Tapponnier et al., 1982)。在裂后活化期之后,珠江口盆地处于印度板块 NE 向和菲律宾板块 NW 向的共轭挤压背景下,引发大规模的软流圈热物质被动上涌,而地壳的阶梯状减薄使得软流圈热物质上涌的路径和效率在不同区域存在差异。在陆架区域,较厚的地壳对软流圈热物质上涌的阻挡作用较强,热物质带来的热量传递相对有限;陆坡区域地壳减薄,阻挡作用减弱,热物质上涌带来的热量能更有效地影响该区域的温度;洋盆地壳最薄,软流圈热物质上涌的阻力最小,大量的热量得以传输至浅部,进一步加剧了该区域地温的升高。由此可见,南海北部陆缘地壳阶梯状减薄的特点,是大地构造背景和深部动力学过程共同作用的结果,它通过影响热量的传导效率和软流圈热物质的作用范围,成为控制珠江口盆地温度分布的重要因素,使得盆地不同区域的地温呈现出与地

壳厚度变化相呼应的分布特征。随着珠江口盆地岩石圈与地壳自北向南持续减薄,前人针对过珠一坳陷的 OBS1993 剖面(位置见图 1-A)实测热流的分析结果同样显示,珠一坳陷大地热流自北向南,随着地壳厚度的减薄,热流增大(图 7)。这一研究也证实了岩石圈与地壳厚度配置关系,叠加新生代岩石圈拉张作用强度,共同调控着珠一坳陷现今地温场的空间分布特征。

4.2 导热通道的输导作用

前人针对珠江口盆地裂陷结构与形成演化的研究显示,该盆地基底内部发育有大量规模不等的先存逆冲断层与岩浆弧。其中,先存逆冲断裂的主体走向为 NE-NEE 向和 WE-NNW 向,这些逆冲断裂不仅规模宏大,且切割深度大(高中亮等, 2022; 徐长贵等, 2025)。复活的深大断裂作为深部热流体向浅部运移的天然通道,断裂的活动性越强,其沟通深部热源与浅部地层的能力就越强,能将地幔或地壳深部的高温能量高效输送至浅部,直接提升浅部地温梯度;深大断裂不仅是热流体的通道,还会在断裂带内及周边引发强烈的水热循环或热液蚀变作用,深部高温热流体与浅部冷水混合或与围岩发生化学反应时,会释放额外热量,进一步加剧浅部地层的温度异常。此外,周蒂等(2005)研究发现,珠江口盆地的岩浆活动自晚中新世起逐渐活跃,至晚上新世—更新世达到鼎盛阶段,发育大规模中基性火山喷发,现今岩浆活动均处于冷却状态。南

海扩张停歇之后,特别是上新世以来,陆缘的岩浆活动变得越来越活跃,进而形成了一条呈 NEE 走向的断续火山岩带(Ru and Pigott, 1986)。这些岩浆岩基本分布在深大断裂周缘,说明深大断裂的活化对岩浆活动发育有重要的作用。岩浆活动期,源于深部地壳的高温岩浆向上侵位或喷发至浅部地层时,会通过热传导、热辐射直接加热周围岩石。而伴随的幔源气体上涌会携带巨大的热能向浅部地层传导,导致地表或浅部地层的大地热流值异常偏高。深大断裂与岩浆活动的协同作用,导致珠一坳陷地温梯度在断裂—岩浆带的展布明显高于周边区域,这一现象直观反映出深大断裂与岩浆活动影响珠一坳陷地温异常。

4.3 岩石热物性的再分配作用

受基底构造形态差异作用,研究区形成凸起与凹陷交替分布的构造格局。这种构造分异造成地层岩性空间展布不均,热导率差异显著,进而在热流上传导过程中引发“热折射”效应(朱传庆等, 2022),导致地温梯度呈现差异化分布。根据热传导原理,热流在传递时更易向热导率较高的区域聚集,使局部热流密度增大,地层温度随之升高(熊亮平和张菊明, 1984)。珠一坳陷浅层广泛发育区域性海相泥岩盖层,凸起区域低热导率海相泥岩厚度较薄,下伏高热导率砂岩埋藏较浅;凹陷区则以厚层海相泥岩盖层为主,高热导率砂岩埋藏较深。相同深度条件下,凸起

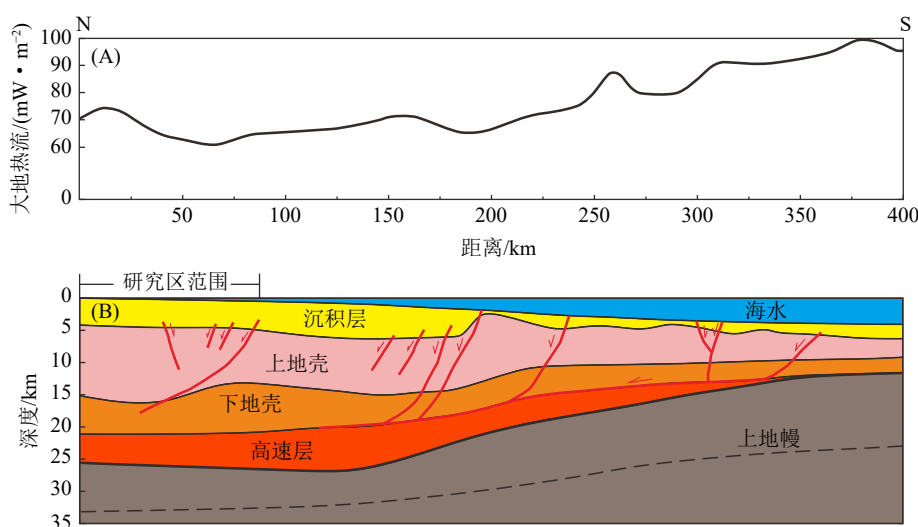


图 7 OBS1993 测线沿线的地壳结构与实测热流

Fig. 7 The crustal structure along profile OBS1993 and the observed heat flow

(A) OBS1993 剖面实测热流分布图(修改自 Hu et al., 2020); (B) OBS1993 测线沿线的地壳结构(修改自 Guo et al., 2016)

区多为热导率更高的基岩,这种岩性差异促使热流优先向凸起区浅部汇聚,显著提升其地层温度,导致地温梯度明显增大。与珠一坳陷其他洼陷相比,西江主洼自珠海组沉积期起便处于古珠江入口区,浅层砂岩发育充分,对应地层含沙量超 60%(杜家元等, 2008)。因缺乏隔热性良好的泥岩盖层对热量的封闭,热流难以在浅层聚集,使得该区域地温梯度显著低于周边洼陷。

5 结论

(1) 珠一坳陷地温梯度集中分布在 $27\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 平均为 $(33\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。坳陷内不同二级构造单元地温分布存在差异, 总体呈现东高西低、北高南低、凸起上高于凹陷中心的特征, 其中, 西江主洼地温梯度最低。珠一坳陷现今大地热流主体分布在 $55\sim 75\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$, 平均为 $64\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 。不同构造单元大地热流的分布差异与地温梯度具有耦合性; 珠一坳陷地温场分布特点反映珠一坳陷在新生代经历了复杂的构造环境和深部热背景, 其热流高于西部的塔里木盆地和准噶尔盆地, 低于南海北部的琼东南盆地和莺歌海盆地, 总体表现为“热盆”特点。

(2) 珠一坳陷当前地温场呈现出的差异分布状态, 主要受到成盆演化的动力学背景、深大断裂、岩浆活动以及岩石热物性参数等诸多因素的综合作用。受新生代的多期拉张影响, 珠一坳陷的地壳和岩石圈伸展减薄, 盆地发育一系列切割至岩石圈的深大断裂, 造成深部地幔热物质沿着基底断裂运移至浅部, 且受岩石热物性参数差异影响, 总体形成现今北低南高、断裂及岩浆岩周缘局部热异常的分布格局。

附加材料: 附表由作者提供, 数据真实性由作者负责, 在线查看网址: <https://xbzrkx.cdut.edu.cn/article/doi/10.12474/cdlgzrkx.2025072203>。

利益冲突声明: 本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

作者贡献声明: 黄玉平、龙祖烈、胡杰负责论文构思、数据分析、研究方法和论文写作和绘图; 石创、史玉玲、张小龙、郑立庆、蔡俊杰参与数据分析; 黄玉平、胡杰参与数据分析、研究方法和修改。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

[参 考 文 献]

- 杜家元, 施和生, 朱明, 等, 2008. 西江主洼相对低地温条件下油气成藏特征和勘探潜力分析[J]. 中国海上油气, 20(5): 287—292.
- Du J Y, Shi H S, Zhu M, et al., 2008. An analysis of hydrocarbon accumulation and exploration potential under a lower geothermal condition in Xijiang sag[J]. China Offshore Oil and Gas, 20(5): 287—292. (in Chinese)
- 冯昌格, 刘绍文, 王良书, 等, 2009. 塔里木盆地现今地温特征[J]. 地球物理学报, 52(11): 2752—2762.
- Feng C G, Liu S W, Wang L S, et al., 2009. Present-day geothermal regime in Tarim Basin, Northwest China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 52(11): 2752—2762. (in Chinese)
- 高中亮, 王艳飞, 雷胜兰, 等, 2022. 珠江口盆地 CO_2 分布特征与成藏机制浅析[J]. 地质科技通报, 41(4): 57—68.
- Gao Z L, Wang Y F, Lei S L, et al., 2022. Distribution characteristics and accumulation mechanism of carbon dioxide gas reservoirs in the Pearl River Mouth Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 41(4): 57—68. (in Chinese)
- 胡圣标, 龙祖烈, 朱俊章, 等, 2019. 珠江口盆地地温场特征及构造-热演化[J]. 石油学报, 40(增刊 1): 178—187.
- Hu S B, Long Z L, Zhu J Z, et al., 2019. Characteristics of geothermal field and the tectonic-thermal evolution in Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 40(S1): 178—187. (in Chinese)
- 黄玉平, 龙祖烈, 朱俊章, 等, 2022. 珠江口盆地白云凹陷地温场特征及烃源岩热演化[J]. 现代地质, 36(1): 130—139.
- Huang Y P, Long Z L, Zhu J Z, et al., 2022. Geothermal field characteristics and maturity history of source rocks in Baiyun Sag, Pearl River Estuary Basin[J]. Geoscience, 36(1): 130—139. (in Chinese)
- 李博, 邓超, 周亮, 等, 2023. 珠江口盆地恩平凹陷与惠州凹陷断裂特征差异及构造演化[J]. 海洋地质前沿, 39(7): 34—46.
- Li B, Deng C, Zhou L, et al., 2023. Difference in fault characteristics and tectonic evolution between Enping Sag and Huizhou Sag in Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 39(7): 34—46. (in Chinese)
- 刘海伦, 梅廉夫, 施和生, 等, 2018. 珠江口盆地珠一坳陷裂陷结构: 基底属性与区域应力联合制约[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉): 1—146.
- Liu H L, Mei L F, Shi H S, et al., 2018. Rift style controlled by basement attribute and regional stress in Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan): 1—146. (in Chinese)
- 刘雨晨, 柳波, 朱焕来, 等, 2023. 松辽盆地现今地温场分布特征及主控因素[J]. 地质学报, 97(8): 2715—2727.
- Liu Y C, Liu B, Zhu H L, et al., 2023. The distribution characteristics and main controlling factors of present-day geothermal regime of the Songliao Basin[J]. Acta Geologica Sinica,

- 97(8): 2715—2727. (in Chinese)
- 龙祖烈, 黄玉平, 朱俊章, 等, 2020. 南海珠江口盆地白云凹陷现今地温场与新生代构造-热演化特征[J]. 地质科学, 55(4): 1266—1276.
- Long Z L, Huang Y P, Zhu J Z, et al., 2020. Present-day temperature field and the Cenozoic tectono-thermal evolution in Baiyun Sag of the Pearl River Mouth Basin, South China Sea[J]. Chinese Journal of Geology, 55(4): 1266—1276. (in Chinese)
- 米立军, 袁玉松, 张功成, 等, 2009. 南海北部深水地区地热特征及其成因[J]. 石油学报, 30(1): 27—32.
- Mi L J, Yuan Y S, Zhang G C, et al., 2009. Characteristics and genesis of geothermal field in deep-water area of the northern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 30(1): 27—32. (in Chinese)
- 饶松, 胡圣标, 朱传庆, 等, 2013. 准噶尔盆地大地热流特征与岩石圈热结构[J]. 地球物理学报, 56(8): 2760—2770.
- Rao S, Hu S B, Zhu C Q, et al., 2013. The characteristics of heat flow and lithospheric thermal structure in Junggar Basin, Northwest China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 56(8): 2760—2770. (in Chinese)
- 任战利, 刘润川, 任文波, 等, 2020. 渭河盆地地温场分布规律及其控制因素[J]. 地质学报, 94(7): 1938—1949.
- Ren Z L, Liu R C, Ren W B, et al., 2020. Distribution of geothermal field and its controlling factors in the Weihe Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 94(7): 1938—1949. (in Chinese)
- 施和生, 代一丁, 刘丽华, 等, 2015. 珠江口盆地珠一坳陷油气藏地质特征与分布发育基本模式[J]. 石油学报, 36(增刊2): 120—133.
- Shi H S, Dai Y D, Liu L H, et al., 2015. Geological characteristics and distribution model of oil and gas reservoirs in Zhu I depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 36(S2): 120—133. (in Chinese)
- 施和生, 杜家元, 梅廉夫, 等, 2020. 珠江口盆地惠州运动及其意义[J]. 石油勘探与开发, 47(3): 447—461.
- Shi H S, Du J Y, Mei L F, et al., 2020. Huizhou Movement and its significance in Pearl River Mouth Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 47(3): 447—461. (in Chinese)
- 施和生, 舒誉, 杜家元, 等, 2017. 珠江口盆地古近系石油地质[M]. 北京: 地质出版社: 1—320.
- 施小斌, 周蒂, 张毅祥, 2000. 南海北部陆缘岩石圈热-流变结构[J]. 科学通报, 45(15): 1660—1665.
- 唐晓音, 胡圣标, 张功成, 等, 2014. 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, 57(6): 1857—1867.
- Tang X Y, Hu S B, Zhang G C, et al., 2014. Characteristic of surface heat flow in the Pearl River Mouth Basin and its relationship with thermal lithosphere thickness[J]. Chinese Journal of Geophysics, 57(6): 1857—1867. (in Chinese)
- 唐晓音, 黄少鹏, 杨树春, 等, 2016. 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, 59(8): 2911—2921.
- Tang X Y, Huang S P, Yang S C, et al., 2016. Correcting on logging-derived temperatures of the Pearl River Mouth Basin and characteristics of its present temperature field[J]. Chinese Journal of Geophysics, 59(8): 2911—2921. (in Chinese)
- 唐晓音, 黄少鹏, 张功成, 等, 2018. 南海北部陆缘珠江口盆地岩石圈热结构[J]. 地球物理学报, 61(9): 3749—3759.
- Tang X Y, Huang S P, Zhang G C, et al., 2018. Lithospheric thermal structure of the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 61(9): 3749—3759. (in Chinese)
- 唐晓音, 钟畅, 杨树春, 等, 2023. 中国海及邻区盆地现今地温场特征及其影响因素[J]. 地质学报, 97(3): 911—921.
- Tang X Y, Zhong C, Yang S C, et al., 2023. Characteristics and influence factors of the present geothermal field for basins in China's offshore and adjacent areas[J]. Acta Geologica Sinica, 97(3): 911—921. (in Chinese)
- 汪集旻, 2015. 地热学及其应用[M]. 北京: 科学出版社: 1—539.
- Wang J Y, 2015. Geothermics and its applications[M]. Beijing: Science Press: 1—539. (in Chinese)
- 熊亮平, 张菊明, 1984. 热流的折射和再分配的数学模拟[J]. 地质科学, 19(4): 445—454.
- Xiong L P, Zhang J M, 1984. Mathematical simulation of refract and redistribution of heat flow[J]. Chinese Journal of Geology, 19(4): 445—454. (in Chinese)
- 徐长贵, 高阳东, 刘军, 等, 2025. 复合陆缘盆地成盆机制及其控藏作用——以中国南海北部珠江口盆地为例[J]. 石油与天然气地质, 46(3): 719—739.
- Xu C G, Gao Y D, Liu J, et al., 2025. Formation mechanisms of composite continental-margin basins and their control of hydrocarbon accumulation: a case study of the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. Oil & Gas Geology, 46(3): 719—739. (in Chinese)
- 于仲坤, 侯读杰, 沈伟锋, 等, 2023. 东海盆地西湖凹陷构造热演化及煤系烃源岩生烃史恢复[J]. 长江大学学报(自然科学版), 20(4): 43—52.
- Yu Z K, Hou D J, Shen W F, et al., 2023. Tectonic-thermal evolution and hydrocarbon generation history of coaly source rocks in Xihu Sag of East China Sea Basin[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 20(4): 43—52. (in Chinese)
- 袁玉松, 马永生, 胡圣标, 等, 2006. 中国南方现今地热特征[J]. 地球物理学报, 49(4): 1118—1126.
- Yuan Y S, Ma Y S, Hu S B, et al., 2006. Present-day geothermal characteristics in South China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 49(4): 1118—1126. (in Chinese)
- 张功成, 陈国俊, 张厚和, 等, 2012. “源热联控”中国近海盆地

- 油气田“内油外气”有序分布[J]. 沉积学报, 30(1): 1—19.
- Zhang G C, Chen G J, Zhang H H, et al., 2012. Regular distribution of inside-oil fields and outside-gas fields controlled by source rocks and heat in China Offshore Basins[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 30(1): 1—19. (in Chinese)
- 周蒂, 刘海龄, 陈汉宗, 2005. 南沙海区及其周缘中—新生代岩浆活动及构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 29(3): 354—363.
- Zhou D, Liu H L, Chen H Z, 2005. Mesozoic-Cenozoic magmatism in southern South China Sea and its surrounding areas and its implications to tectonics[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(3): 354—363. (in Chinese)
- 朱传庆, 陈驰, 杨亚波, 等, 2022. 岩石热导率影响因素实验研究及其对地热资源评估的启示[J]. 石油科学通报, 7(3): 321—333.
- Zhu C Q, Chen C, Yang Y B, et al., 2022. Experimental study into the factors influencing rock thermal conductivity and their significance to geothermal resource assessment[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 7(3): 321—333. (in Chinese)
- 朱明, 张向涛, 黄玉平, 等, 2019. 珠江口盆地烃源岩特征及资源潜力[J]. 石油学报, 40(增刊 1): 53—68.
- Zhu M, Zhang X T, Huang Y P, et al., 2019. Source rock characteristics and resource potential in Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 40(S1): 53—68. (in Chinese)
- Duwiquet H, Magri F, Lopez S, et al., 2022. Tectonic regime as a control factor for crustal fault zone (CFZ) geothermal reservoir in an amagmatic system: a 3D dynamic numerical modeling approach[J]. *Natural Resources Research*, 31(6): 3155—3172.
- Gholamrezaie E, Scheck-Wenderoth M, Sippel J, et al., 2018. Variability of the geothermal gradient across two differently aged magma-rich continental rifted margins of the Atlantic Ocean; the Southwest African and the Norwegian margins[J]. *Solid Earth*, 9(1): 139—158.
- Guo L L, Li S Z, Zhao S J, et al., 2016. Final breakup of continental block and opening of oceanic lithosphere: insights from deep crustal structure and tectonic evolution of the ocean-continent transition zone in the northern South China Sea[J]. *Geological Journal*, 51(S1): 318—330.
- Hu J, Tian Y T, Long Z L, et al., 2020. Thermo-rheological structure of the northern margin of the South China Sea: structural and geodynamic implications[J]. *Tectonophysics*, 777: 228338.
- Kassa M, Alemu A, Muluneh A, 2022. Determination of Conrad and Curie point depth relationship with the variations in lithospheric structure, geothermal gradient and heat flow beneath the central main Ethiopian rift[J]. *Heliyon*, 8(11): e11735.
- Kolawole F, Evenick J C, 2023. Global distribution of geothermal gradients in sedimentary basins[J]. *Geoscience Frontiers*, 14(6): 101685.
- Liu Y C, Qiu N S, Li H L, et al., 2019. Terrestrial heat flow and crustal thermal structure in the northern slope of Tazhong uplift in Tarim Basin[J]. *Geothermics*, 83: 101709.
- Ma B S, Qi J F, Chen W C, et al., 2020. Fault interaction and evolution during two-phase rifting in the Xijiang Sag, Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. *Geological Journal*, 55(2): 1128—1147.
- Qiu N S, Zhang Z H, Xu E S, et al., 2008. Geothermal regime and Jurassic source rock maturity of the Junggar Basin, Northwest China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 31(4/5/6): 464—478.
- Ru K, Pigott J D, 1986. Episodic rifting and subsidence in the South China Sea[J]. *AAPG Bulletin*, 70(9): 1136—1155.
- Rybach L, 1976. Radioactive heat production in rocks and its relation to other petrophysical parameters[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 114(2): 309—317.
- Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, et al., 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia; new insights from simple experiments with plasticine[J]. *Geology*, 10(12): 611—616.
- Wang L T, Liu Q M, Yang S, 2020. Research on the distribution law and influencing factors of ground temperature in Xutuan Coal Mine[J]. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 8(10): 88—101.
- Waples D W, Pacheco J, Vera A, 2004. A method for correcting log-derived temperatures in deep wells, calibrated in the Gulf of Mexico[J]. *Petroleum Geoscience*, 10(3): 239—245.
- Waples D W, Ramly M, 2001. A statistical method for correcting log-derived temperatures[J]. *Petroleum Geoscience*, 7(3): 231—240.
- Ye Q, Mei L F, Shi H S, et al., 2018. A low-angle normal fault and basement structures within the Enping Sag, Pearl River Mouth Basin: insights into Late Mesozoic to Early Cenozoic tectonic evolution of the South China Sea area[J]. *Tectonophysics*, 731/732: 1—16.