

https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.044



南黄海盆地地层生热率及岩石圈热结构

孙旭东^{1,2,3}, 郭兴伟^{2,3*}, 张训华^{1,2,3}, 李子渊⁴, 刘怀山¹, 张升升^{1,2,3}

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东青岛 710069
2. 青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266071
3. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东青岛 266237
4. 中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司蜀南气矿, 四川泸州 646001

摘要: 岩石圈热结构的研究不仅可以了解岩石圈深部动力学演化机制,也是含油气区油气资源评价的重要组成部分.由于南黄海盆地生热率数据的匮乏,阻碍了岩石圈热结构的研究进展.本文通过GR(伽马值)-A(岩石生热率)的经验关系,计算了南黄海盆地沉积地层的生热率;在大地热流、地层生热率、南北向贯穿盆地的二维多道地震剖面及OBS2013地壳速度结构剖面的约束下,建立了南黄海盆地地壳生热模型,计算了盆地的岩石圈热结构.岩石圈热结构计算结果表明:(1)南黄海盆地北部拗陷、中部隆起及南部拗陷3个次级单元的平均莫霍面温度依次为 602.2 ± 15.25 °C、 592.7 ± 2.56 °C、 650.6 ± 20.24 °C;(2)平均热岩石圈厚度依次为 99.7 ± 2.20 km、 101.7 ± 0.51 km、 88.2 ± 2.49 km;(3)壳幔热流比分别为 0.76 ± 0.02 、 0.88 ± 0.01 、 0.71 ± 0.15 ,具有“冷壳热幔”的特征.研究表明,南黄海盆地现今具有与全球新生代拉张构造区相似的较高热流,处于构造活动区向构造稳定区转换的过渡阶段.此外,现今南黄海盆地3个次级单元展现的不同岩石圈热结构特征,可能与印支期至早燕山期扬子块体与华北块体的俯冲碰撞,在苏鲁造山带南侧(现今北部拗陷的位置)形成类前陆盆地的构造背景有关.

关键词: 南黄海盆地;自然伽马值;岩石生热率;岩石圈热结构;热岩石圈厚度;地热能.

中图分类号: P314

文章编号: 1000-2383(2023)03-1040-18

收稿日期: 2022-04-30

Radiogenic Heat Production of Formation and Thermal Structure of Lithosphere in the South Yellow Sea Basin

Sun Xudong^{1,2,3}, Guo Xingwei^{2,3*}, Zhang Xunhua^{1,2,3}, Li Ziyuan⁴, Liu Huaishan¹, Zhang Shengsheng^{1,2,3}

1. College of Marine Geoscience, Ocean University of China, Qingdao 710069, China
2. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China
3. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China
4. PetroChina Co. Ltd., Petrochina Southwest Oil and Gas Field Company South Sichuan Gas District, Luzhou 646001, China

Abstract: The study of lithosphere thermal structure state can not only understand the deep dynamic evolution mechanism of the lithosphere, but also be an important part of the evaluation of oil and gas resources in oil-bearing areas. The lack of heat generation rate data in the South Yellow Sea basin gets in the way of the research progress of lithospheric thermal structure. In this paper, the

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 41776081, 91958210).

作者简介: 孙旭东(1994—),男,在读博士研究生,从事海洋构造地质及地球动力学方面的研究. ORCID:0000-0002-6307-2170. E-mail: Sunxudong_work@163.com

* **通讯作者:** 郭兴伟, E-mail: xwguo_qd@126.com

引用格式: 孙旭东, 郭兴伟, 张训华, 李子渊, 刘怀山, 张升升, 2023. 南黄海盆地地层生热率及岩石圈热结构. 地球科学, 48(3): 1040-1057.

Citation: Sun Xudong, Guo Xingwei, Zhang Xunhua, Li Ziyuan, Liu Huaishan, Zhang Shengsheng, 2023. Radiogenic Heat Production of Formation and Thermal Structure of Lithosphere in the South Yellow Sea Basin. *Earth Science*, 48(3): 1040-1057.

heat generation rate of sedimentary strata in the South Yellow Sea basin is calculated by the empirical relationship of GR (gamma value)- A (rock heat generation rate). Under the constraints of the terrestrial heat flow, the formation heat generation rate, the two-dimensional multi-channel seismic profile that passes through the basin in the south-north direction and the crust velocity structure profile OBS2013, the crust heat generation model of the South Yellow Sea basin was established, and the lithospheric thermal structure of the basin was calculated. The calculated results of lithospheric thermal structure show that: (1) the Moho average temperature of the three sub-units of the north depression, the central uplift and the south depression of the South Yellow Sea basin are 602.2 ± 15.25 °C, 592.7 ± 2.56 °C and 650.6 ± 20.24 °C, respectively; (2) The average thermal lithosphere thickness is 99.7 ± 2.20 km, 101.7 ± 0.51 km, 88.2 ± 2.49 km; (3) The crust-mantle heat flux ratios are 0.76 ± 0.02 , 0.88 ± 0.01 , and 0.71 ± 0.15 , respectively, with the characteristics of "cold crust and hot mantle". The results of this paper reveal that the South Yellow Sea basin not only has a high heat flow background, but also is in the transition stage from tectonic active area to tectonic stable area. In addition, the different lithospheric thermal structure characteristics of the three sub-units in the present South Yellow Sea basin may be related to the tectonic setting of the para-foreland basin formed on the south side of the Sulu orogenic belt (present northern depression) by the subduction collision of the Yangtze block and the North China block in the Late Triassic.

Key words: South Yellow Sea basin; natural gamma value; heat generation rate of rock; thermal structure of lithosphere; thermal thickness of lithosphere; geothermal energy.

0 引言

地球内热驱动着板块运动,塑造了现今丰富多彩的地形地貌.自然界中的岩石存在着放射性生热元素(主要为 U^{238} 、 U^{235} 、 Th^{232} 和 K^{40} 四种元素),在衰变过程中会释放出热能,是地球内热的主要来源之一.岩石放射性生热作为计算岩石圈热结构的重要热参量,其在空间上的分布状态,制约着岩石圈的构造热演化,是地球动力学和盆地动力学的重要研究内容,同时与沉积盆地内油气的生成、运移和聚集有着密切的关联,是油气资源勘探研究中不可或缺的一环.

南黄海盆地作为扬子块体东延的海域区块(Guo *et al.*, 2019),不仅是东亚大陆边缘的重要组成部分,也是扬子块体向华北块体俯冲的前缘地区之一.南黄海盆地在印支期至早燕山期遭受到构造挤压导致扬子块体向华北块体俯冲产生前陆形变(郑洪伟等, 2020; 张田等, 2021),在晚白垩世至古近纪则与整个东亚大陆边缘共同经历整体性的拉张减薄.因此,南黄海盆地是研究岩石圈热结构和深部动力机制等许多基础地质和构造问题的理想场所.

目前有不少学者在南黄海盆地的地壳结构(Zhao *et al.*, 2019)、岩石热物性参数-岩石生热率及热导率(庞玉茂等, 2017)、大地热流(Lim and Kim, 1997; 杨树春等, 2003; 郭兴伟等, 2023)、构造热演化史(庞玉茂等, 2017; 李志强等, 2022)等方面做了大量的工作,取得了较好

的研究成果,但是针对影响盆地动力学演化、有机质成熟度的岩石生热率这一热物性参数尚未开展系统性的工作,未能建立起盆地尺度的生热率模型,也缺乏对盆地岩石圈热结构的研究.

因此,本文利用南黄海盆地13口井的自然伽马数据(共17 257个点位)以及OBS2013剖面P波速度资料,首次建立了地壳尺度的生热率模型;在表层热流、岩石热物性参数、二维多道地震剖面以及OBS2013速度地壳结构等资料的多重约束下,计算了南黄海盆地北部坳陷、中部隆起、南部坳陷3个次级单元的岩石圈热结构,分析了盆地现今的热状态并探讨了盆内3个次级单元热结构差异性的缘由.本文的研究结果,不仅为南黄海盆地油气资源评价提供依据,也可为进一步理解东亚大陆边缘地球动力学演化机制提供基础资料.

1 区域地质背景

南黄海位于我国大陆和朝鲜半岛之间,南北长约870 km,东西宽约550 km,最窄处仅190 km,平均水深46 m,面积约 32×10^4 km²(张训华等, 2013).黄海南盆地属于下扬子块体向海域的延伸部分,其西邻苏北盆地,东至朝鲜半岛西缘断裂带,北依苏鲁造山带,南抵江绍断裂带,南北分别与华北块体和华南块体相连(李乃胜, 1995).现今重、磁、地震等地质地球物理探测手段证明南黄海盆地存在双层基底,即太古代-早元古代刚性的深变质岩和中-新元古代相对韧性的浅变质岩(黄松等, 2010; 李志强等, 2022).在双层基底之上,南黄海盆地自下而上依

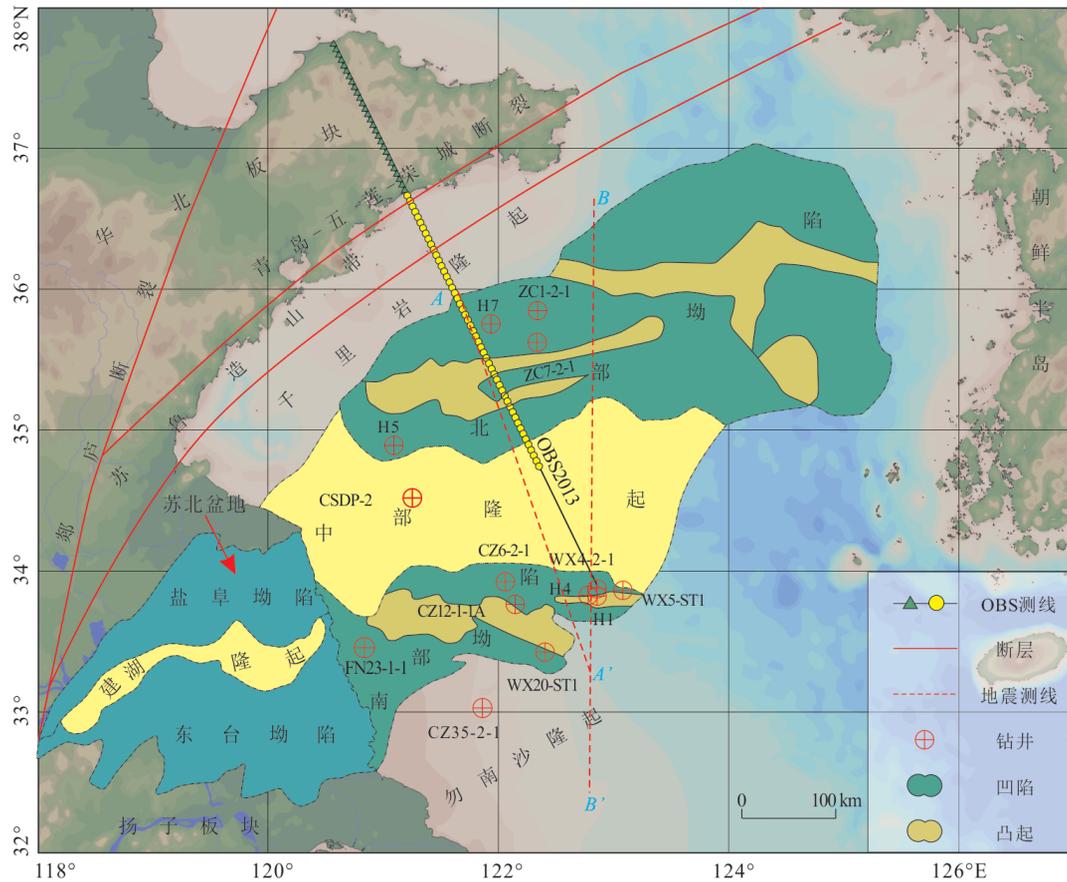


图1 南黄海及周边主要构造单元简图

Fig.1 Schematic diagram of main structural units in and around the South Yellow Sea

OBS2013 测线据 Zhao *et al.* (2019); AA', BB' 两条二维多道地震测线据张训华等 (2017); 主要构造区块、钻井及断层据侯方辉等 (2019)、Wang *et al.* (2020)

次发育海相中-古生界、湖相中生界与河流相、海陆交互为主的沉积地层,经过中、新生代构造运动的强烈改造,形成一个独特、复杂、大型的多期叠合盆地。根据中、新生代陆相沉积盆地基底性质、沉积及构造特征,自北向南可将盆地依次划分为千里岩隆起、北部拗陷、中部隆起、南部拗陷和勿南沙隆起5个二级构造单元(庞玉茂等,2017;任艳等,2017),形成“三隆夹两拗”的构造格局(图1),其中中部隆起和勿南沙隆起属于残余的中-古生代海相盆地,北部拗陷和南部拗陷属于中-新生代裂谷盆地(邢涛等,2014)。

从南北向横贯盆地的二维多道地震剖面的形态结构来看(图2),南黄海盆地具有台地-断拗复合结构(侯方辉等,2008),垂向上盆地先期挤压逆冲,后期伸展断陷进而构造反转叠加,具有层次性,在断裂和地层变形构造上均有反映。

研究区北部拗陷地区北部以千里岩隆起为界,南部以中部隆起为界,面积41 233 km²,中新世地层厚度较大,为南黄海中新生代地层最厚的地方,

沉积层往南向中部隆起区超覆。从图2剖面上来看,南黄海北部拗陷地层具有北断南超、北浅南深的复式箕状特征。自下而上,北部拗陷依次发育隆升背景下的上白垩统赤山组、浦口组和泰州组;隆升剥蚀背景下的古新统阜宁组、始新统戴南组和三垛组;拗陷背景下的新近系盐城组和第四系东台群,缺失渐新系(任艳等,2017;熊忠等,2018)。盆地北部拗陷东北凹地区,据实钻S1井揭示的地层,结合钻遇地层的反射特征、典型岩性剖面及沉积碎屑样品的孢粉组合特征,对比邻区的地层发育状况,高顺莉和周祖翼(2014)认为北部拗陷东北部地区存在100~5 000 m厚的中生界(白垩系+侏罗系),平面上呈“西北厚东南薄”的格局。

中部隆起CSDP-2井的钻探,自上而下钻遇第四纪东台群、下三叠统青龙组、二叠系大隆组、龙潭组、孤峰组和栖霞组、石炭系船山组、黄龙组和高骊山组、泥盆系五通群以及志留系坟头组和高家边组(郭兴伟等,2019)。从解释的深大剖面来看(图

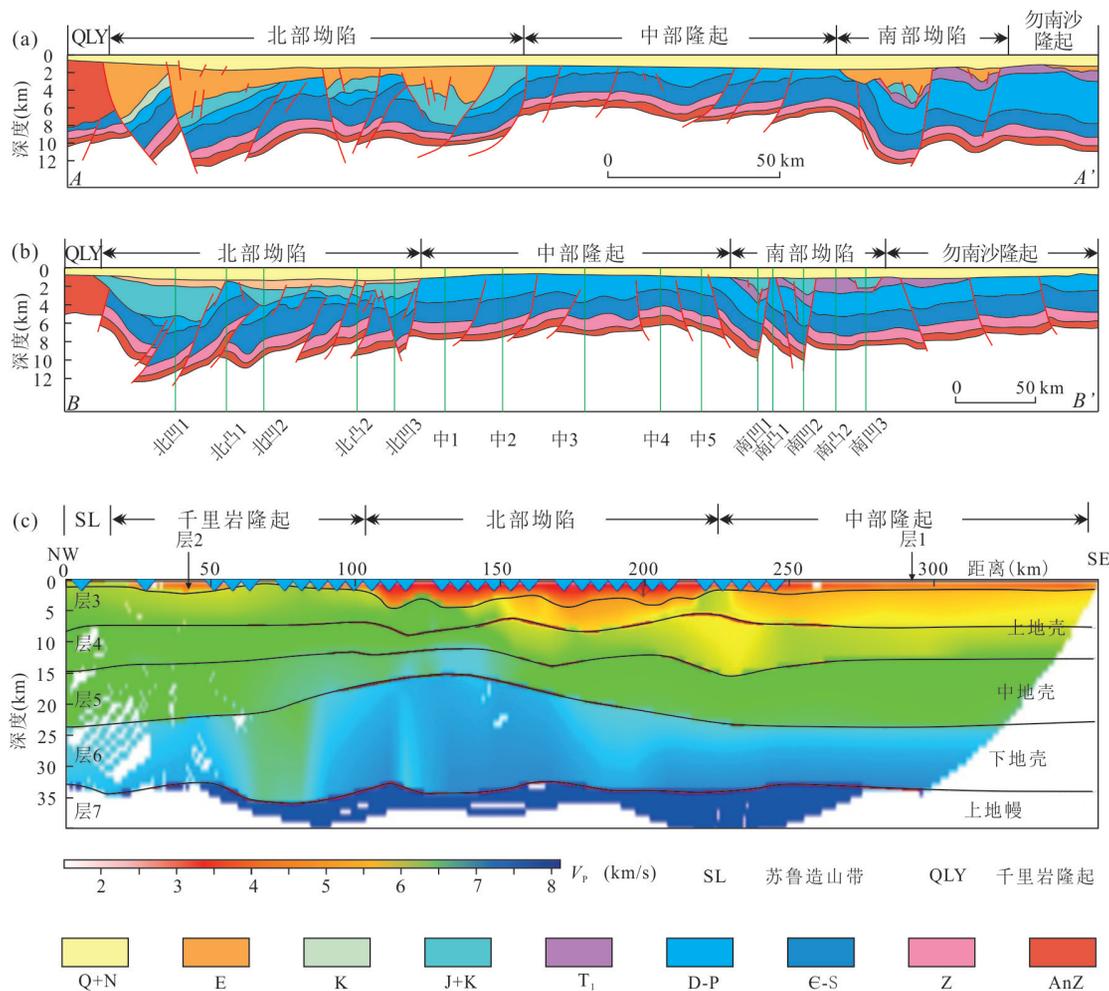


图2 南黄海盆地2条综合解释剖面及 OBS2013 速度地壳模型
 Fig.2 Two comprehensive interpretation sections in the South Yellow Sea basin
 剖面位置见图1,据张训华等(2013)、Zhao *et al.*(2019)修改

2),中部隆起缺失古近纪和中生界上部地层,在新近纪强反射界面下发育海相的下中生代和古生代地层.CSDP-2井的钻探,证实了中部隆起区受印支期以来构造运动的抬升与剥蚀,中生代地层残余较少,局部地区零星展布.

南部拗陷面积约 28 845 km²,东西走向,南侧以断层为界与勿南沙隆起相接;北侧以断层或者古近系的尖灭线与中部隆起相接;西侧向西延伸与苏北盆地相接,习惯上统称“苏北-南黄海盆地”;东侧可能超覆在高隆之上(张训华等,2017).从纵向剖面上来看(图2),南部拗陷整体结构上“南断北超”,发育一定厚度的中、新生代地层.与北部拗陷地层相比较,存在3个明显特征(图2):(1)不发育侏罗系,白垩系残留厚度很小,呈零星展布;(2)新生界古近系剥蚀严重,残留厚度很小,约0~600 m,局部地区可厚达1 000 m;(3)较北部拗陷而言,拗陷

规模小,中-新生代地层厚度介于1 000~6 000 m.

从解释的OBS2013剖面上来看,前人给出了南黄海盆地的速度界面模型(Zhao *et al.*, 2019),将南黄海盆地地壳结构划分为7个层位,第1层代表海水,P波速度约为1.5 km/s;2~4层代表研究区上地壳,第2层代表沉积层,P波速度从1.7 km/s增加到5 km/s,第3层P波平均速度从顶部的5.2 km/s增至6 km/s,第4层P波平均速度从6.1 km/s增至6.2 km/s;第5层代表中地壳,P波速度从6.25 km/s增至6.45 km/s;第6层代表下地壳,P波速度从6.5 km/s增至6.9 km/s;第7层代表上地幔顶部,P波速度从8.0 km/s增至8.2 km/s.前人通过面波层析成像、接收函数、重磁资料、OBS广角地震数据等方法对莫霍面深度进行了计算(黄忠贤等,2009;Li *et al.*, 2014;吴健生等,2014;Zhao *et al.*, 2019),综合考量,平均深度约为33 km,其中北部拗陷中地

壳深 $\sim 12.0\sim 18.5$ km, 中部隆起深 $\sim 13.5\sim 23.0$ km, OBS2013 剖面上北部拗陷下地壳存在明显上涌的高速体, 是由于造山运动的强烈挤压所致, 造成北部拗陷中地壳的抬升; 南部拗陷中地壳的埋深情况依然未知, 现今普遍的观点认为南黄海南部拗陷是苏北盆地在海域的延伸, 因此, 本文采用苏北盆地的中地壳顶底深度对其进行约束, 设定南黄海地壳深 $13\sim 18$ km (陈艳等, 2017), 埋深略高于中部隆起、低于北部拗陷。

2 计算方法

2.1 岩石生热率的计算方法

岩石生热率指的是生热元素在单位时间内产生的热能, 单位: $\mu\text{W}/\text{m}^3$ 。自然界的岩石中存在放射性元素, 其衰变过程中会产生热能, 是岩石圈内热的主要来源之一。在自然界中, 只有 U、Th、K 三种元素满足一定的丰度、产热量大和半衰期长这 3 个条件。岩石生热率与 3 种元素含量的关系, 目前广泛使用 Rybach (1988) 修正过的计算公式:

$$A = 10^{-5} \rho (9.51C_U + 2.56C_{Th} + 3.48C_K), \quad (1)$$

公式(1)中 A 为岩石放射性生热率, 单位: $\mu\text{W}/\text{m}^3$; ρ 为岩石密度, 单位: kg/m^3 ; C_U 、 C_{Th} 、 C_K 分别是 U (10^{-6})、Th (10^{-6})、K (%) 的含量。用此方法计算的岩石生热率结果精度高, 但周期长、成本高。

然而海区钻井少、样品获取难、测试成本高, 采用上述方法来计算整个盆地地层、甚至更深部地层的岩石生热率, 在客观条件下难以实现。因此, 本文采用如下方法来对计算盆地沉积地层的生热率 (Bucker, 1996)。

$$A = 0.0158(GR - 0.8), \quad (2)$$

其中, GR 为岩石自然伽马值 (API); 线性相关系数 $r=0.98$ 。此方法适合各类岩石, 收敛范围为 $0\sim 350$ API 和 $0.03\sim 7.00 \mu\text{W}/\text{m}^3$, 所得结果误差小于 10%。本文 13 口井的自然伽马值都在 350 API 之内, 可由此计算出岩石生热率。

对于深部地壳生热率的计算, 上述的两种方法在客观上不适用, 难以对整个地壳的岩石生热率进行约束。本文依据 Rybach (1984) 对岩石生热率和地震波速之间的经验关系公式对深部地区岩石的生热率进行约束, 公式如下:

$$\ln A = B - 2.17V_p, \quad (3)$$

式中, V_p 代表 P 波速度, 单位为 km/m ; B 为常数值, 显生宙岩石取值为 12.6, 前寒武系的岩石取值为

13.7, 深部地层都在前寒武系之前, 故 B 值取 13.7。

2.2 南黄海盆地莫霍面温度、地幔热流及热岩石圈厚度的估算

本文假设壳内热源呈阶状分布, 建立地壳尺度的一维现今稳态热结构模型, 大地热流与岩石圈底部流入岩石圈的热量 (地幔热流) 和岩石圈内部产生的放射性热 (地壳热流) 处于平衡状态, 公式如下 (Roy *et al.*, 1968):

$$q_o = q_m + \int_0^{Z_{\text{Moho}}} A(z) dz = q_m + \sum_{i=1}^n A_i \cdot Z_i, \quad (4)$$

$$q_m = q_o - \sum_{i=1}^n A_i \cdot Z_i, \quad (5)$$

$$q_c = DA_o = \sum_{i=1}^n A_i \cdot Z_i, \quad (6)$$

其中, q_o 、 q_c 、 q_m 分别为大地热流、地壳热流和地幔热流, 单位为 mW/m^2 ; D 为地壳的厚度, 单位为 km ; A_o 代表地壳的平均生热率, 单位为 $\mu\text{W}/\text{m}^3$; $A(z)$ 表示岩石的生热率, 单位为 $\mu\text{W}/\text{m}^3$; Z_{Moho} 代表地壳 (莫霍面) 的厚度, 单位 km ; A_i 和 Z_i 分别代表不同地层的生热率及厚度。

$$T_b = T_t + \frac{q_t}{K} \Delta z - \frac{A}{2K} \Delta z^2, \quad (7)$$

$$q_b = q_t - A \Delta z, \quad (8)$$

式中: A 是地层的平均生热率, 单位 $\mu\text{W}/\text{m}^3$; Δz 是地层的厚度, 单位 km ; K 代表地层的平均热导率, 单位为 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; T_t 和 T_b 代表地层上下的温度, 单位 $^{\circ}\text{C}$; q_t 和 q_b 代表上下地层的热流, 单位 mW/m^2 。本文通过上述方法, 表层温度设为 15°C , 盆地 3 个次级单元 (北部拗陷、中部隆起、南部拗陷) 的大地热流分别设置为 63.5 、 66.7 、 $67.9 \text{ mW}/\text{m}^2$, 通过反复迭代, 计算出各个次级单元岩石圈尺度上的一维稳态温度场。

热岩石圈厚度是指具有热传导温度梯度的地壳外层, 是地球在外面的热传导层 (软流圈之上), 其下部由于长时间尺度和高温的影响而表现出地幔对流的特征。众所周知, 软流圈物质类似于玄武岩且呈熔融状态, 故软流圈的温度应高于玄武岩的固相线温度, 上部刚性岩石圈的温度应低于固相线温度。本文采用如下方法来约束热岩石圈厚度 (Artemieva and Mooney, 2001):

$$\text{上边界: } T1 = 1200 + 0.5Z, \quad (9)$$

$$\text{下边界: } T2 = 1300 + 0.4Z. \quad (10)$$

3 南黄海沉积地层生热率

本文收集了南黄海盆地13口井的自然伽马值(图3),其中北部拗陷4口,分别为H5、H7、ZC1-2-1、ZC7-2-1井;中部隆起1口,为科钻CSDP-2井;南部拗陷7口,分别为H1、H4、CZ6-2-1、CZ12-1-1A、WX4-2-1、WX5-ST1、WX20-ST1井;勿南沙隆起1口,为CZ35-2-1井,自然伽马点位总计17257个,覆盖第四纪-晚志留世的地层,各个沉积层组的样本数如表1、图4所示.根据经验公式(2),计算出相应点位的岩石生热率,对各个钻井相同层位的岩石生热率进行厚度加权平均处理,计算出南黄海盆地各个沉积层的平均生热率(表1、图5).本文计算的沉积地层的生热率总体上与郭兴伟等(2023)用U、Th、K和密度计算的结果基本一致(图6),二者相关系数 $R^2=0.84$,但孤峰组用两种方式测得的生热率有较大的差别,主要是由于样品数少且含有煤层,数据比较离散.

4 南黄海盆地地壳模型

4.1 地壳模型的建立

建立高精度的地壳模型是地学研究的基础,对盆地动力学研究和油气资源评价有重要的实践意义.对于研究区南黄海盆地而言,前人经过数十年的研究,对获取的重、磁、电、震资料进行解析,特别是海区钻井的实施,作为标定层位,实现了南黄海地层格架的厘定(Zhang *et al.*, 2007;魏文博等, 2009;郭兴伟等, 2019;Zhao *et al.*, 2019).本文借助

N-S向贯穿盆地纵深十数公里的剖面BB'(图1和图2),用以约束其上部第四纪-前寒武纪之前的地层;用OBS2013测线的速度结构来约束中、下地壳及莫霍面的深度,建立了南黄海盆地北部拗陷、中部隆起、南部拗陷3个次级构造单元的地壳模型,再根据其中-新生代基底起伏的格局,分别对北部拗陷、中部隆起及南部拗陷建立5个一维稳态生热模型(图2、图7和图8).千里岩隆起和勿南沙隆起缺乏深部地层或大地热流的约束,本文暂不作讨论.将南黄海盆地莫霍面深度设置为33 km,其中北部拗陷、中部隆起、南部拗陷中地壳顶底深依次为~12~18.5 km、~13.5~23 km、~13~18 km,南部拗陷埋深略高于中部隆起、低于北部拗陷.

4.2 地壳模型热物性参数的选取

4.2.1 热物性参数的来源 对建立的地壳模型进行合理准确的热物性参数(大地热流、生热率和热导率)设置是计算深度温度场、壳幔热流配分、热岩石圈厚度、岩石圈流变结构的关键.对于大地热流而言,本文选取南黄海盆地已经公布的11口井的大地热流(见表2);对于沉积地层的热导率和生热率而言,本文在前人(庞玉茂等, 2017;郭兴伟等, 2023)对二者研究的基础上,参照了下扬子地区前人的研究成果(王良书等, 1995;陈沪生等, 1999;Wang *et al.*, 2020),初步建立了南黄海盆地的完整的地层生热率和热导率模型(表3).

4.2.2 热物性参数的选取原则及其取值 大地热流作为计算岩石圈热结构、深部温度场的边界初始约束条件,影响着计算结果的质量.北部拗陷现今

表1 南黄海盆地地层生热率及样本数

Table 1 Radiogenic heat production and sample number of formation in the South Yellow Sea basin

地层	数目	生热率($\mu\text{W}/\text{m}^3$)		地层	数目	生热率($\mu\text{W}/\text{m}^3$)	
		范围	均值±标准偏差			范围	均值±标准偏差
东台群	1362	0.10~2.63	0.85±0.43	孤峰组	26	0.37~4.61	1.69±1.19
上盐城组	1783	0.42~2.31	1.32±0.44	栖霞组	278	0.80~4.69	1.96±0.50
下盐城组	2199	0.36~3.19	1.28±0.49	船山组	162	0.17~2.14	0.58±0.31
三垛组	1501	0.36~2.32	1.23±0.37	黄龙组	248	0.17~1.62	0.63±0.27
戴南组	1446	0.52~2.60	1.32±0.49	和州组	228	0.10~1.38	0.52±0.21
阜宁组	2226	0.18~2.71	1.14±0.37	高骊山组	109	0.33~2.40	1.48±0.35
泰州组	1053	0.29~2.36	1.26±0.42	五通群	121	0.51~3.79	2.06±0.73
赤山组	848	0.31~1.92	1.11±0.32	茅山组	83	0.85~3.35	2.14±0.68
浦口组	785	0.27~1.38	0.69±0.33	坟头组	107	0.47~3.72	2.46±0.82
青龙组	1646	0.60~2.21	1.22±0.52	侯家塘组	66	0.47~3.72	1.74±0.86
大隆组	206	0.16~2.28	0.85±0.44	高家边组	50	0.73~3.34	2.65±0.57
龙潭组	724	0.15~4.53	1.70±1.03	-	-	-	-

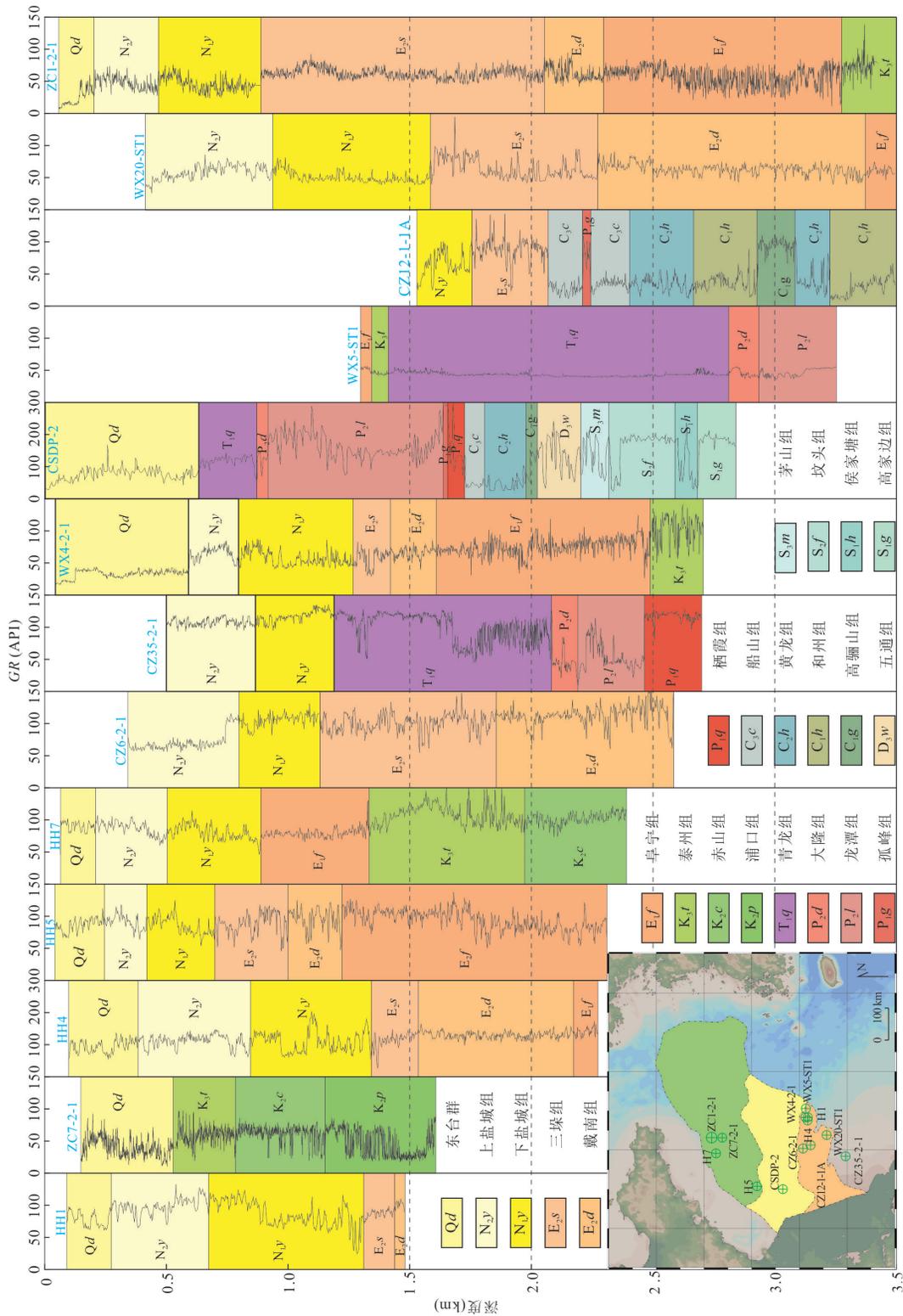


图 3 南海盆地 13 口钻井的自然伽马曲线
Fig.3 Natural gamma curves of 13 wells in the South Yellow Sea basin

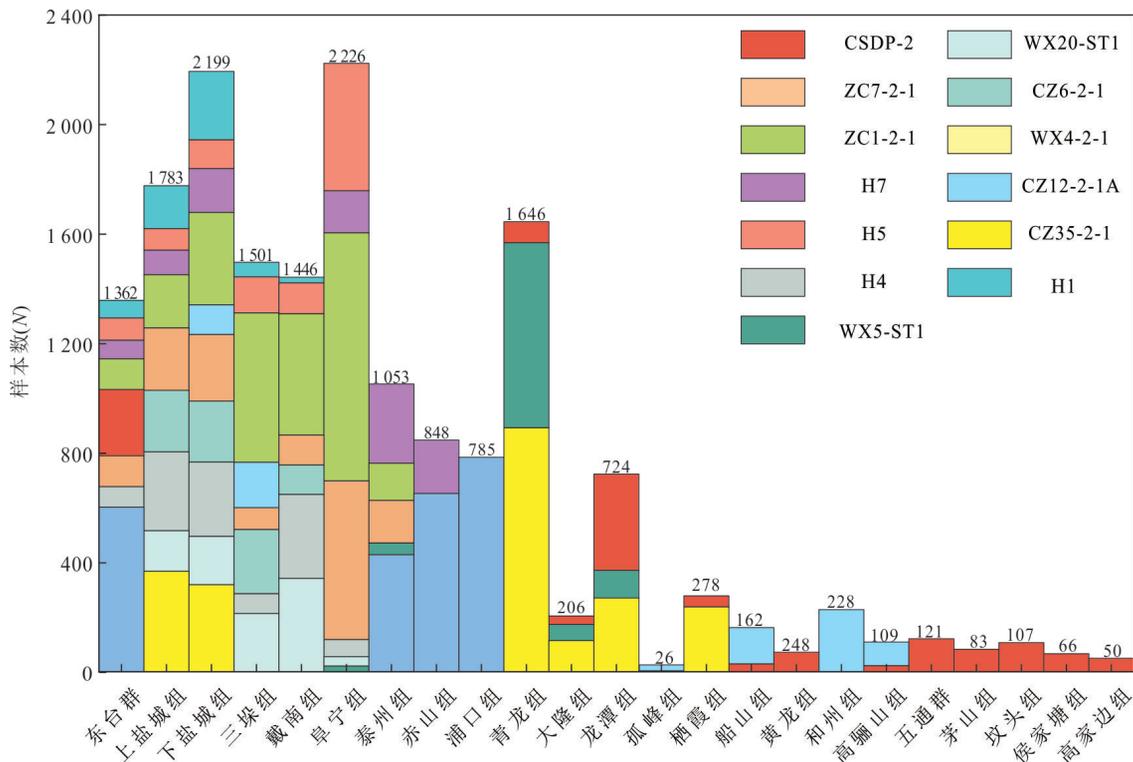


图 4 南黄海地区地层生热率样本采集堆积柱状图

Fig.4 Stacked histogram of formation radiogenic heat production rate in South Yellow Sea area

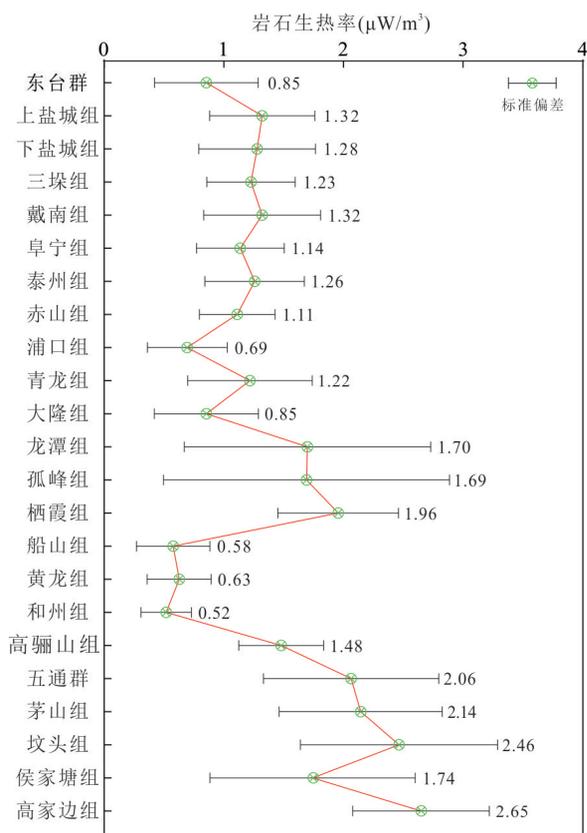


图 5 南黄海地区地层生热率折线和标准偏差

Fig.5 Line chart and standard deviation of radiogenic heat production rate in South Yellow Sea area

公开的大地热流来自于韩国两口钻井(Kachi-1、Inga-1),分别为 61 和 66 mW/m² (Lim and Kim, 1997),平均值为 63.5±3.5 mW/m²;中部隆起仅 1 口钻井(CSDP-2 井),大地热流为 66.7 mW/m² (郭兴伟等, 2023);南部坳陷现已经公布出 7 口钻井的大地热流,介于 65.3~73.6 mW/m²,平均值为 67.9±2.65 mW/m² (表 2)。

根据南黄海盆地二维多道地震剖面的形态结构以及 OBS2013 速度地壳模型(图 2),同时考虑到盆地 3 个次级单元地层存在的差异性,将南黄海盆地地壳结构划分为 10 层,各层位的生热率及其热导率结果参见表 4(其中沉积地层热参数的结果是对表 3 结果进行加权平均处理而得)。

对于深部上、中、下地壳和上地幔的生热率取值,本文据 OBS2013 所探明的边界 P 波速度,利用公式(3)计算出其生热率分别为 1.43、0.95、0.47、0.02 μW/m³。中地壳生热率的计算结果与邻区苏鲁造山带(0.83 μW/m³)、中国东部(0.96 μW/m³)、华北块体(0.9 μW/m³)的中地壳数值相差不大(迟清华和鄢明才,1998;高山等,1999;He *et al.*, 2009;饶松等, 2016;夏冰,2018);下地壳的生热率低于中国东部下地壳的生热率(0.67 μW/m³),略高于苏鲁造山带

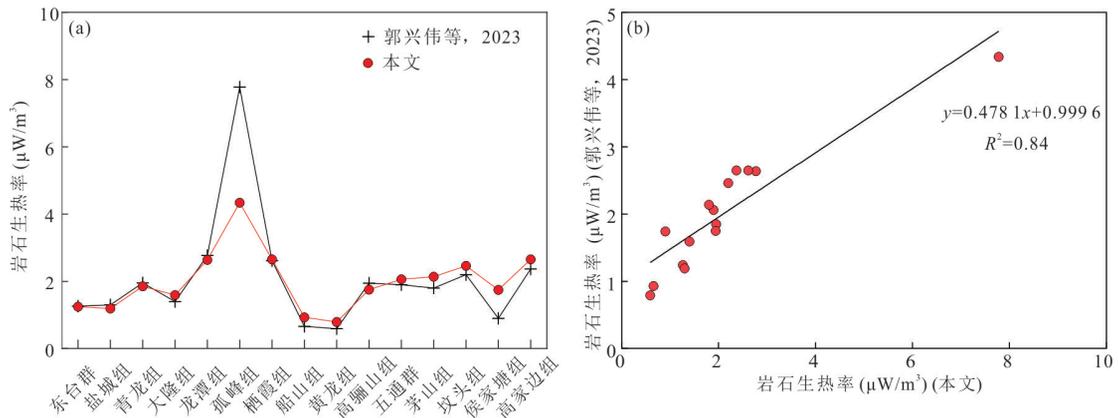


图 6 CSDP-2井 U、Th、K 计算的生热率与 GR 计算的生热率比较(a)及二者相关性分析(b)

Fig.6 Comparison of heat generation rates calculated by U, Th and K and GR in CSDP-2 Well (a) and theirs correlation analysis (b)

表 2 南黄海盆地大地热流

Table 2 Heat flow in South Yellow Sea basin

位置	井号	经度	纬度	热流(mW/m ²)	均值±标准差(mW/m ²)	数据来源
北部坳陷	Inga-1	124.95°	35.40°	61.0	63.5±3.5	Lim and Kim, 1997
	Kachi-1	123.35°	35.31°	66.0		
中部隆起	CSDP-2	121.26°	34.56°	66.7	66.7	郭兴伟等, 2023
南部坳陷	FN23-1-1	120.78°	33.45°	68.0	67.9±2.65	杨树春等, 2003
	CZ24-1-1	121.96°	33.50°	65.5		
	WX20ST1	122.17°	33.49°	67.0		
	WX-13-3-1	122.12°	33.63°	65.3		
	CZ12-1-1A	121.94°	33.82°	73.6		
	CZ6-1-1A	121.92°	33.92°	66.7		
	WX5T1	122.79°	33.94°	69.3		
勿南沙隆起	CZ35-2-1	121.68°	33.09°	70.4	70.4	杨树春等, 2003

表 3 南黄海盆地地层生热率及热导率

Table 3 Radiogenic heat generation and thermal conductivity of Formation in the South Yellow Sea basin

时代	生热率(μW/m ³)			热导率(W/(m·K))		
	范围	数目	均值±标准差	范围	数目	均值±标准差
Q	0.10~2.63	1 362	0.85±0.43	1.49~2.19	17	1.85±0.24
N	0.36~3.19	3 982	1.30±0.47	1.19~2.75	39	1.74±0.40
E	0.36~2.71	5 173	1.22±0.41	-	30	2.18
K	0.29~2.36	2 686	1.05±0.43	-	17	2.42
J	-	5	1.02	-	5	2.37
T	0.60~2.21	1 646	1.22±0.52	2.23~3.55	24	3.00±0.33
P	0.16~4.69	1 234	1.62±0.93	1.89~5.11	97	3.28±0.68
C	0.10~2.40	747	0.71±0.42	2.89~6.67	32	3.64±0.84
D	0.15~3.79	121	2.06±0.73	1.98~6.60	17	4.57±1.59
S	0.28~2.37	17	1.50±0.59	2.20~6.82	71	3.23±1.23
O	0.10~0.62	28	0.28±0.16	-	22	3.43
Є	0.05~6.63	40	0.92±1.60	-	14	4.51

注:地层生热率:Q-K、T-D来源于本文计算;J来源于庞玉茂等(2017);S-Є来源于野外露头样品(测量结果详见附件1);地层热导率:Q-N、T-S来源于郭兴伟等(2023);E来源于陈沪生等(1999);K-J来源于庞玉茂等(2017);O来源于陈沪生等(1999)、Wang *et al.* (2020);Є来源于王良书等(1995)、Wang *et al.* (2020).

($0.37 \mu\text{W}/\text{m}^3$)和扬子苏北盆地($0.25 \mu\text{W}/\text{m}^3$)的下地壳的生热率;上地幔的成分接近于超基性岩,生热率极低,大约为 $0.02 \mu\text{W}/\text{m}^3$,与前人结果一致(欧新功等,2004;Furlong and Chapman,2013).

对于深部上、中、下地壳和上地幔的热导率取值,参考前人的研究成果,本文分别采用 3.00 、 2.60 、 2.50 、 $3.40 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (Ray *et al.*, 2003; 欧新功等, 2004; 邱楠生等, 2015; Xia *et al.*, 2020).

5 现今的岩石圈热结构

5.1 地壳热流、地幔热流以及壳幔热流配分

南黄海盆地北部拗陷地壳热流介于 $26.8\sim 27.9 \text{ mW}/\text{m}^2$,平均为 $27.4\pm 0.43 \text{ mW}/\text{m}^2$,地幔热流介于 $35.6\sim 36.7 \text{ mW}/\text{m}^2$,平均为 $36.1\pm 0.43 \text{ mW}/\text{m}^2$,壳幔热流比为 0.76 ± 0.02 ;中部隆起地壳热流介于 $31.1\sim 3.16 \text{ mW}/\text{m}^2$,平均值为 $31.3\pm 0.18 \text{ mW}/\text{m}^2$,地幔热流为介于 $35.1\sim 35.6 \text{ mW}/\text{m}^2$,平均值为 $35.4\pm 0.18 \text{ mW}/\text{m}^2$,壳幔热流比为 0.88 ± 0.01 ;南部

表4 南黄海盆地地壳结构及其热物性参数

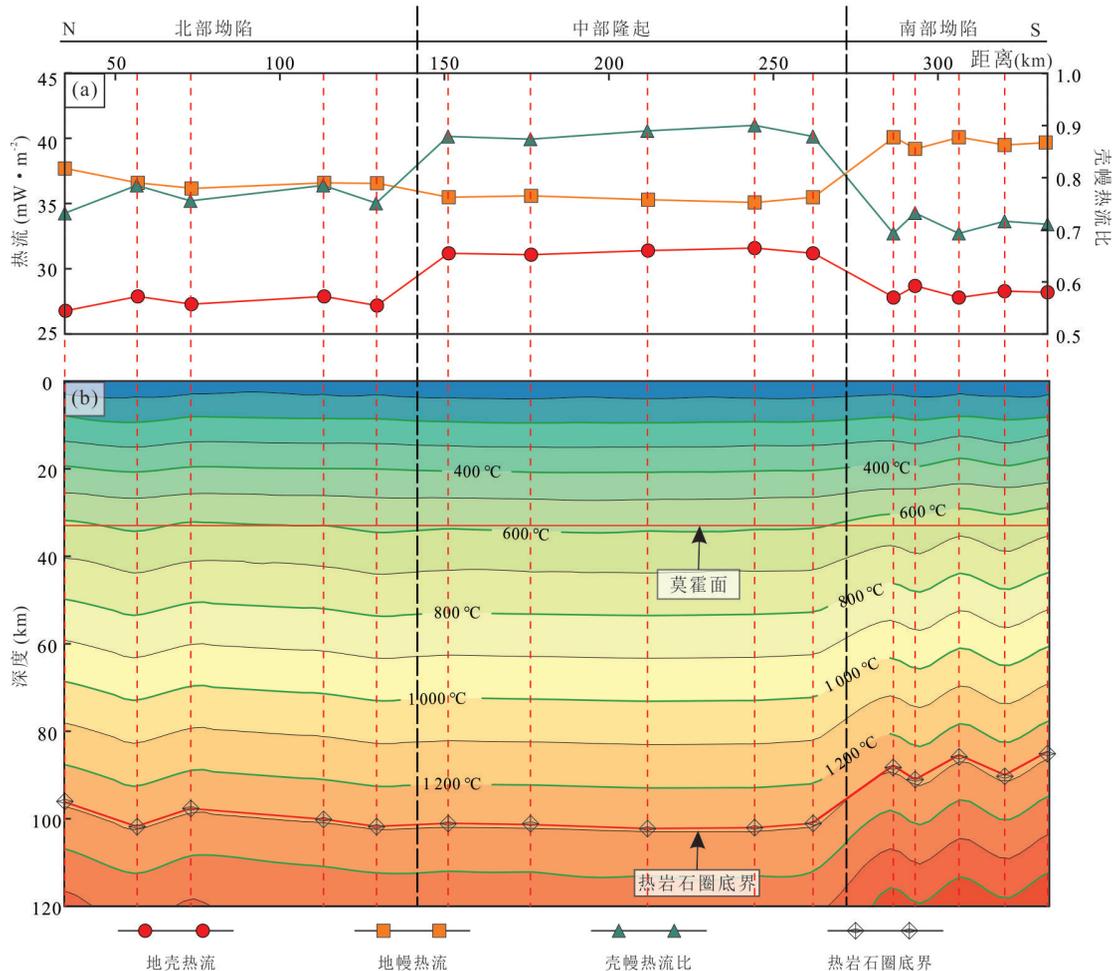
Table 4 Crustal structure and thermal properties of the South Yellow Sea basin

层位	生热率($\mu\text{W}/\text{m}^3$)	来源	热导率($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)	来源
Q+N	1.18	本文计算	1.77	郭兴伟等,2023
E	1.22	本文计算	2.18	陈沪生等,1999
J+K	1.05	本文计算	2.41	庞玉茂等,2017
T	1.22	本文计算	3.00	郭兴伟等,2023
D-P	1.32	本文计算	3.51	郭兴伟等,2023
€-S	0.83	陆区下扬子采样测试计算	3.44	郭兴伟等,2023
上地壳	1.43	据P波速度估算	3.00	Xia <i>et al.</i> ,2020
中地壳	0.95	据P波速度估算	2.60	Ray <i>et al.</i> , 2003
下地壳	0.47	据P波速度估算	2.50	Ray <i>et al.</i> , 2003
上地幔	0.02	据P波速度估算	3.40	邱楠生等,2015

表5 南黄海盆地岩石圈热结构

Table 5 Lithospheric thermal structure in the South Yellow Sea basin

位置	莫霍面温度($^{\circ}\text{C}$)	热岩石圈厚度(km)	地壳热流(mW/m^2)	地幔热流(mW/m^2)	壳幔热流比	
北部拗陷	北凹1	621.0	96.4	26.8	36.7	0.73
	北凸1	587.6	101.9	27.9	35.6	0.78
	北凹2	614.2	97.9	27.3	36.2	0.75
	北凸2	603.6	100.3	27.9	35.6	0.78
	北凹3	584.8	101.9	27.2	36.3	0.75
均值	602.2 ± 14.25	99.7 ± 2.20	27.4 ± 0.43	36.1 ± 0.43	0.76 ± 0.02	
中部隆起	中1	594.8	101.2	31.2	35.5	0.88
	中2	590.8	101.5	31.1	35.6	0.87
	中3	589.0	102.4	31.4	35.3	0.89
	中4	593.1	102.2	31.6	35.1	0.90
	中5	596.0	101.2	31.2	35.5	0.88
均值	592.7 ± 2.56	101.7 ± 0.51	31.3 ± 0.18	35.4 ± 0.18	0.88 ± 0.01	
南部拗陷	南凹1	647.3	88.2	27.8	40.1	0.69
	南凸1	626.3	91.5	28.7	39.2	0.73
	南凹2	673.8	85.8	27.8	40.1	0.69
	南凸2	631.7	90.4	28.3	39.5	0.72
	南凹3	674.1	85.1	28.2	39.7	0.71
均值	650.6 ± 20.24	88.2 ± 2.49	28.2 ± 0.34	39.7 ± 0.34	0.71 ± 0.01	

图7 南黄海盆地现今温度剖面(BB')Fig.7 Current temperature profile of the South Yellow Sea basin (BB')

拗陷地壳热流介于 $27.8 \sim 28.7 \text{ mW/m}^2$, 平均为 $28.2 \pm 0.34 \text{ mW/m}^2$, 地幔热流介于 $39.2 \sim 40.1 \text{ mW/m}^2$, 平均为 $39.7 \pm 0.34 \text{ mW/m}^2$, 壳幔热流比为 0.71 ± 0.01 (表 5、图 7)。总体上看, 南黄海盆地北部拗陷与南部拗陷地壳热流相差不多, 中部隆起高于二者; 南部拗陷地幔热流最高, 北部拗陷次之, 中部隆起最小; 3 个次级单元的壳幔热流比均小于 1, 揭示出南黄海盆地岩现今石圈热结构具有“冷壳热幔”的特征。

5.2 莫霍面温度及热岩石圈厚度

南黄海盆地北部拗陷莫霍面温度介于 $684.8 \sim 621.0 \text{ }^\circ\text{C}$, 平均温度为 $602.2 \pm 14.25 \text{ }^\circ\text{C}$; 中部隆起莫霍面温度介于 $589.0 \sim 596.0 \text{ }^\circ\text{C}$, 平均温度为 $592.7 \pm 2.56 \text{ }^\circ\text{C}$; 南部拗陷莫霍面温度介于 $626.3 \sim 674.1 \text{ }^\circ\text{C}$, 平均温度为 $650.6 \pm 20.24 \text{ }^\circ\text{C}$ (表 5、图 8)。

南黄海盆地北部拗陷热岩石圈的厚度介于 $96.4 \sim 101.97 \text{ km}$, 平均厚度为 $99.7 \pm 2.20 \text{ km}$; 中部

隆起热岩石圈厚度介于 $101.2 \sim 102.4 \text{ km}$, 平均厚度为 101.7 ± 0.51 ; 南部拗陷盆地热岩石圈厚度介于 $85.1 \sim 91.5 \text{ km}$, 平均厚度为 88.2 ± 2.49 (表 5、图 8)。

6 讨论

6.1 数据的可靠性

CSDP-2 井的实施, 为南黄海地区的地质研究工作提供了实物资料。系统性的稳态测温及密集性取芯测热导率是计算高精度大地热流的重要手段之一。对 CSDP-2 井温度的获取, 郭兴伟等 (2023) 采用了西安瑞达公司生产的钻井温度连续采集系统, 其采用的是铂电阻, 测量分辨率为 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$, 测量精度小于 5%, 测量间隔 0.05 m , 测量速度 $2.5 \sim 5.0 \text{ m/min}$ 。2016 年 4 月 8 日 22 点 40 分停钻后, 2016 年 4 月 9 日 9 点 7 分、17 点 28 分和 4 月 10 日 0 点 55 分, 分别开始对 $0 \sim 2067 \text{ m}$ (井斜校正后 2057 m) 井段进行了 3 次测温, 最高井温 $65.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。第 4 次和第 5 次测温

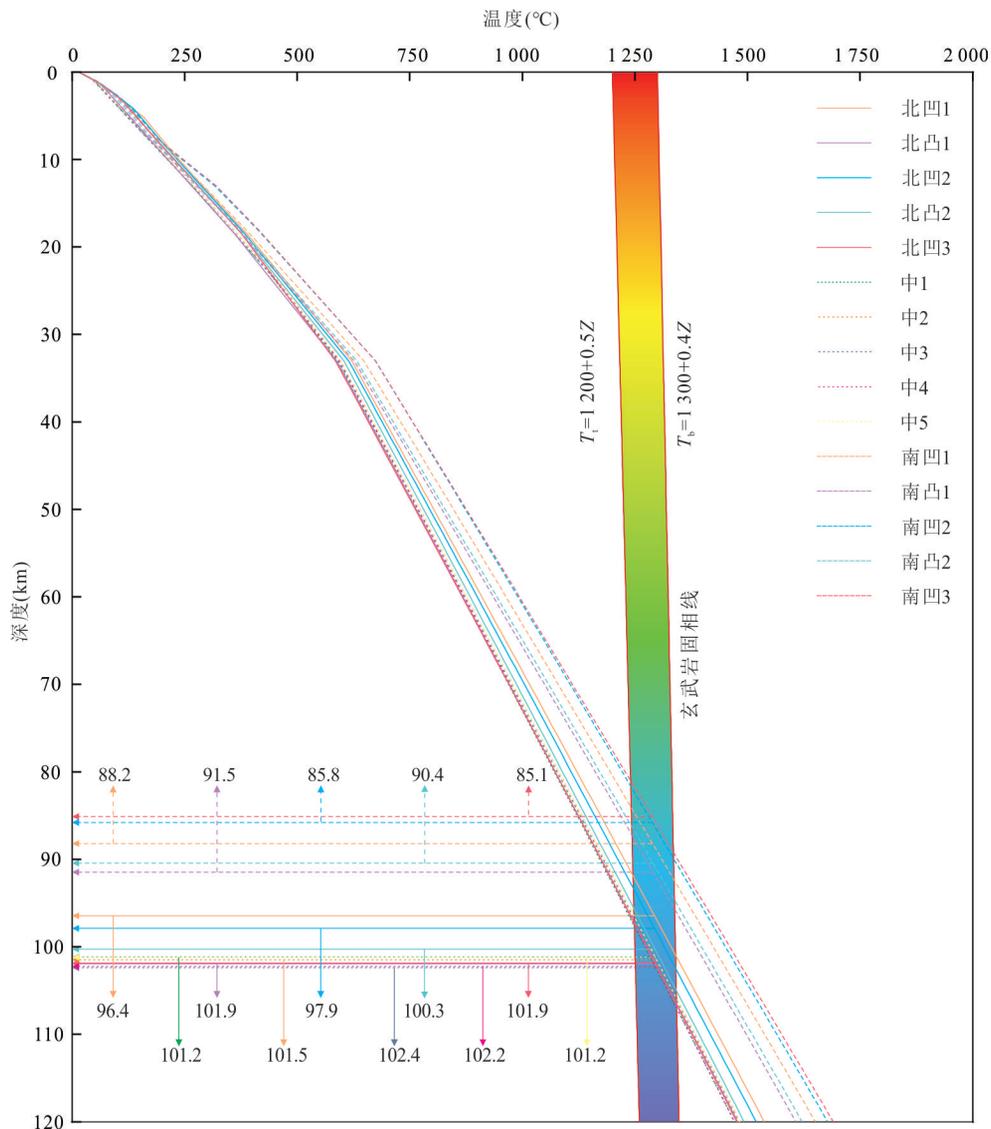


图 8 南黄海盆地北部拗陷、中部隆起及南部拗陷岩石圈温度-深度剖面

Fig.8 Lithospheric temperature depth-profiles of northern depression, central uplift and southern depression in the South Yellow Sea basin

之前的静井时间长达 36 天,两次测温的温度差异已经很小,可视为其非常接近温度平衡。

对于热导率的测试,由于 CSDP-2 井为固结的沉积物段(东台群和盐城组),郭兴伟等(2023)采用德国 TeKa 公司生产的 TK04 热导率仪,测量范围为 0.1~12.0 W/(m·K),测量精度 < 5%,选取沉积物柱状样 56 处,间隔 10 m,并对测量的结果进行温压校正。对于沉积物下面固结的柱状样,仪器采用的是德国 TCS 公司生产的岩石热导仪,测量范围为 0.2~25 W/(m·K),测量精度 < 3%,每隔 10 m 取样,采集岩心样品 239 块进行热导率测试,并对其结果进行温压校正。

自上而下,将 CSDP-2 井分层为 6 段进行大

地热流值的计算,考虑裂缝的影响,进行 2~6 段的大地热流计算,将结果进行平均处理,得出中部隆起 SCDP-2 井的大地热流为 66.7 mW/m²。

对于岩石生热率的测量及计算(CSDP-2 井的岩心样品以及下扬子陆域样品),在青岛海洋地质研究所地质实验检测中心进行主微量测试,仪器为 Thermo X Series 2 等离子体质谱仪,采用水浮法密度仪进行岩石/岩心密度测量,利用公式(1)计算出相应的岩石生热率。对 CSDP-2 井的岩心分别用公式(1)及公式(2)计算,计算结果表明二者密切相关,相关系数 $R^2=0.84$ 。

6.2 南黄海盆地现今热状态

大地热流是沉积盆地动力学和岩石圈结构热

演化的客观反映,不同时代与不同成因的沉积盆地在现今表现出不同的热状态.对于构造稳定的区块,例如中国西部的塔里木盆地热流值为 $26.2\sim 65.4\text{ mW/m}^2$,平均为 43.0 mW/m^2 (冯昌格等,2009)、印度地盾本德尔肯德地块(Bundelkhand massif)热流值为 $32.0\sim 41.0\text{ mW/m}^2$,平均为 37.0 mW/m^2 (Podugu *et al.*, 2017),表现出低的大地热流背景;而对于中生代构造活跃的地区,热流值表现出相对较高的特征,例如冲绳海槽大地热流值基本在 85 mW/m^2 之上,平均则大于 120 mW/m^2 (李乃胜,1995)、大陆边缘扩张盆地南海盆地中央海盆热流值为 $88.5\sim 94.5\text{ mW/m}^2$,平均 89.9 mW/m^2 (黄磊等,2013).从前人公布的南黄海盆地11口井的大地热流值来看(表2),整个南黄海盆地的大地热流介于 $61\sim 73.6\text{ mW/m}^2$,平均值为 67.2 mW/m^2 ,与同在东亚大陆边缘的渤海湾盆地 64.8 mW/m^2 (彭波和邹华耀,2013)和东海陆架 70 mW/m^2 (Yang *et al.*, 2004)的热流值相当.所以,南黄海盆地具有与全球新生代拉张构造区相似的较高热流,所在东亚大陆边缘处于构造活动区向构造稳定区转换的过渡阶段.

岩石圈热结构是研究大陆地壳演化和稳定性的重要制约因素,也更能反映地热最本质的特征.通常古老、构造稳定的克拉通地区莫霍面温度往往较低,例如印度地盾本德尔肯德地块莫霍面温度为 $292\sim 422\text{ }^\circ\text{C}$;而强烈构造运动的地区莫霍面的温度很高,例如美国西部盆地山脉莫霍面温度在 $860\sim 1115\text{ }^\circ\text{C}$ 之间(Lachenbruch and Sass, 1977),我国中生代的裂谷盆地二连盆地莫霍面温度达到 $829\sim 914\text{ }^\circ\text{C}$ (Xu *et al.*, 2019).莫霍面温度的差异性可能是由于地幔热流的不同而造成的(Xu *et al.*, 2019),例如中国西部的塔里木盆地,平均地幔热流为 18.4 mW/m^2 ,壳幔热流比为1.34,岩石圈热结构表现出“热壳冷幔”的特征(左银辉等,2015).南黄海盆地莫霍面温度在 $584.8\sim 674.1\text{ }^\circ\text{C}$ 之间,反映出南黄海盆地现今处于构造活动区至构造稳定区之间.盆地地壳热流介于 $26.8\sim 31.6\text{ mW/m}^2$,地幔热流介于 $35.1\sim 40.1\text{ mW/m}^2$,壳幔热流比在 $0.69\sim 0.90$ 之间(表5),岩石圈热结构表现出“冷壳热幔”的特征,反映出南黄海盆地当前热状态主要受深部热控机制的影响.

对盆地内部而言,热岩石圈结构表现出一定的差异性.虽然南黄海盆地3个次级单元均具有“冷壳

热幔”的特征,但是壳幔热流比存在着明显的差异,中部隆起壳幔热流比最大为 0.88 ± 0.01 ,北部拗陷为 0.76 ± 0.02 与南部拗陷的 0.71 ± 0.01 基本一致(表5),这与南黄海盆地的“三拗夹两隆”的地层格架有关(水平方向地层的热导率存在明显差异),热流从热导率低的拗陷区(北部拗陷与南部拗陷)向热导率高的隆起区(中部隆起)聚集,造成中部隆起地壳热流增高,显示出相对较高的壳幔热流比.

三个次级单元莫霍面温度的计算结果(表5、图7)表明南黄海盆地莫霍面的温度变化与盆地基底起伏具有负相关性,隆起或凸起的温度低,拗陷或凹陷的温度高.尽管三个次级单元表层大地热流相差不大,但莫霍面温度相差很大,南部拗陷的莫霍面温度($650.6\pm 20.24\text{ }^\circ\text{C}$)最高,中部隆起($614.9\pm 14.35\text{ }^\circ\text{C}$)次之,北部拗陷($592.7\pm 2.56\text{ }^\circ\text{C}$)最小,反映了南部拗陷最近深部地质构造活动相对较强的特征.

本文计算南黄海盆地的热岩石圈底界与约 $1280\text{ }^\circ\text{C}$ 的等温面重合(图7),三个次级单元的热岩石圈底部埋深与基底的起伏成镜像关系,隆起或凸起热岩石圈厚度厚,拗陷或凹陷的热岩石圈厚度薄.中部隆起热岩石圈厚度最厚达 $101.7\pm 0.51\text{ km}$,北部拗陷($99.7\pm 2.20\text{ km}$)次之,南部拗陷($88.2\pm 2.49\text{ km}$)最薄.三个次级单元热岩石圈厚度的差异,可能是由于印支期至早燕山期扬子块体向华北块体俯冲、挤压使得南黄海地区岩石圈挠曲加厚,靠近苏鲁造山带的北部地区表现得尤为明显.在北部拗陷发育的类前陆盆地,提供了巨大的沉积可容空间,侏罗纪北部拗陷沉积了厚层的前陆沉积物,厚度超过 4000 m (高顺莉和周祖翼,2014).晚白垩纪至古近纪,受环太平洋构造域的影响,南黄海盆地处于拉伸阶段,自北向南依次进入断陷盆地发育阶段(张训华等,2017).北部拗陷不仅继承了前陆盆地的厚冷岩石圈,而断陷的强度及沉积规模都弱于南部拗陷,受负载均衡效应的影响,北部拗陷现今表现出比南部更厚的岩石圈.

6.3 南黄海盆地区中生代的动力学机制

区域性的构造活动必然造成盆地表层大地热流的显著变化.在印支运动与早燕山运动作用下,扬子块体遭遇持续性挤压,一直持续到中晚侏罗世,南黄海盆地产生强烈的褶皱与断裂,形成NNE、NE走向的逆冲断裂系.燕山期整个中国东部广泛发生火山喷发、中酸性岩浆侵位,在地壳和岩石圈

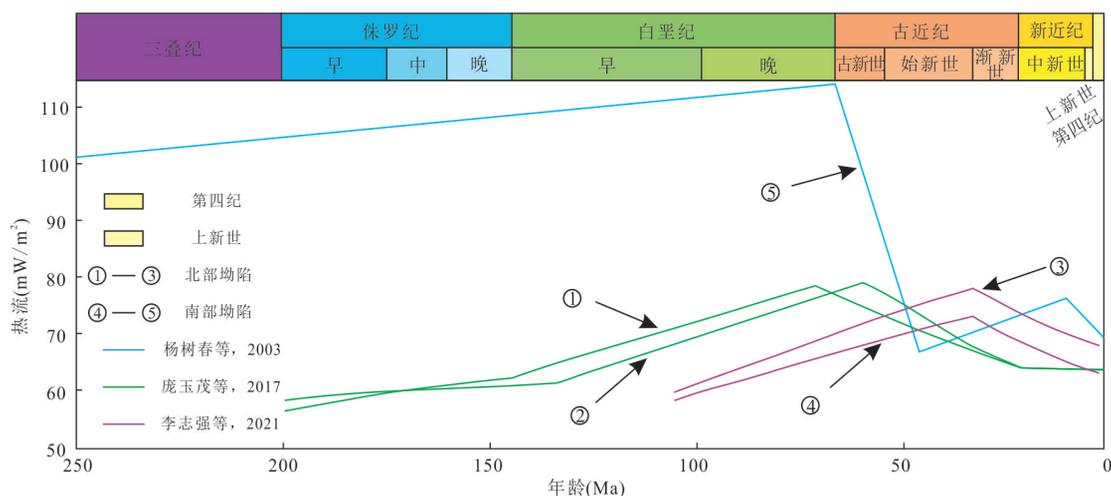


图9 南黄海盆地北部拗陷与南部拗陷热流演化史

Fig.9 Thermal evolution history of northern and southern depressions in the South Yellow Sea basin

据杨树春等(2003)、庞玉茂等(2017)、李志强等(2022)修改

底部发育的大量断层,为深部热物质上涌提供了良好的通道,这可能与超级地幔柱的活动有关(张旗等,2009).南黄海盆地的二维多道地震剖面揭示了大量侵入性和喷出性火成岩(Pang *et al.*, 2018),这也在Heama-1井和Inga-1井得到了验证(张训华等,2017),而重磁资料显示南黄海盆地燕山期发育的火成岩具有一定规模(Zhang *et al.*, 2007).此时南黄海盆地表现出较高的热背景,热流持续增高,岩石圈厚度大规模地减薄(吴福元和孙德有,1999).杨树春等(2003)利用古温标法对南部拗陷进行热史恢复,结果显示中生代热流逐渐增高,晚期热流最高达到约 106 mW/m^2 (图9).晚白垩世至古近纪,南黄海盆地受太平洋构造域的影响,区域构造应力背景转化为NW-SE的拉伸作用,盆地自北向南进入断陷发育阶段.断陷阶段,拉伸减薄的岩石圈和地壳受均衡效应的影响,深部热物质上涌,使得表层热流进一步增加.同时,断陷期形成的“三拗夹两隆”的基底起伏特征,造成了水平方向上岩石热导率存在明显差异,热流从低热导率的沉积盖层折射到高热导率的隆起区,对浅部地层的热流进行再分配.新近纪以来,受太平洋俯冲带后撤俯冲的影响,断裂活动减弱,整个南黄海盆地进入热沉降阶段,岩石圈进入冷却衰减阶段,从而逐渐下沉增厚,热流也逐步降低,直至现今(图9).并且,由于断陷期地壳拉张减薄,造成生热层的厚度减薄,热流可能要低于拉张前的热流.

7 结论

基于上述的计算结果,本文得出如下结论:

(1)在前人研究的基础上,利用收集到的GR测井数据、野外岩心样品、CSDP-2井岩心的测试结果、深部地壳P波速度信息,建立了南黄海盆地地壳尺度的生热率和热导率等岩石热物性模型.

(2)南黄海盆地地壳热流在 $26.8\sim 31.6 \text{ mW/m}^2$,地幔热流在 $35.1\sim 40.1 \text{ mW/m}^2$,壳幔热流比在 $0.69\sim 0.90$,莫霍面温度 $584.8\sim 674.1 \text{ }^\circ\text{C}$,热岩石圈厚度 $85.1\sim 102.4 \text{ km}$,岩石圈热结构表现出“冷壳热幔”的特征,反映出南黄海盆地当前热状态受深部热控机制的影响.

(3)南黄海盆地现今不仅有较高的热流背景,而且处于构造活动区向构造稳定区转换的过渡阶段;盆内次级单元现今不同的热结构可能与印支期至早燕山期华北块体和扬子块体的俯冲碰撞有关.

致谢:感谢两位审稿人及编辑部老师为本文提供全面、中肯的修改意见.

References

- Artemieva, I. M., Mooney, W. D., 2001. Thermal Thickness Structure and Evolution of Precambrian Lithosphere: A Global Study. *Journal of Geophysical Research*, 106(B8): 16387–16414. <https://doi.org/10.1029/2000JB900439>
- Bucker, C., Rybach, L., 1996. A Simple Method to Determine Heat Production from Gamma-Ray Logs. *Marine and Petroleum Geology*, 13(4): 373–375. [https://doi.org/10.1016/0264-3758\(96\)00043-9](https://doi.org/10.1016/0264-3758(96)00043-9)

- org/10.1016/0264-8172(95)00089-5
- Chen, H. S., Zhang, Y. H., Xu, S. W., et al., 1999. The Lithospheric Textural and Structure Features as well as Oil and Gas Evaluation in the Lower Yangtze Ares and Its Adjacent Region, China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Chen, Y., Zhang, J. F., Jiang, W. L., et al., 2017. Gravity Field and Characteristics of Crustal Structure in Subei Basin. *Progress in Geophysics*, 32(6): 2295–2303 (in Chinese with English abstract).
- Chi, Q. H., Yan, M. C., 1998. Radioactive Elements of Rocks in North China Platform and the Thermal Structure and Temperature Distribution of the Modern Continental Lithosphere. *Chinese Journal of Geophysics*, 41(1): 38–48 (in Chinese with English abstract).
- Feng, C. G., Liu, S. W., Wang, L. S., et al., 2009. Present-Day Geothermal Regime in Tarim Basin, Northwest China. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(11): 2752–2762 (in Chinese with English abstract).
- Furlong, K. P., Chapman, D. S., 2013. Heat Flow, Heat Generation, and the Thermal State of the Lithosphere. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 41: 385–410. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.031208.100051>
- Gao, S. L., Zhou, Z. Y., 2014. Discovery of the Jurassic Strata in the North-East Sag of South Yellow Sea. *Geological Journal of China Universities*, 20(2): 286–293 (in Chinese with English abstract).
- Gao, S., Luo, T. C., Zhang, B. R., et al., 1999. Structure and Composition of the Crust in Eastern China. *Science in China (Series D)*, 29(3): 204–213 (in Chinese).
- Guo, X. W., Sun, X. D., Yang, X. Q., et al., 2023. A New Heat Flow of the Central Uplift, the South Yellow Sea: From Measurement of CSDP-2 Borehole. *Chinese Journal of Geophysics*, 66(1): 332–343 (in Chinese with English abstract).
- Guo, X. W., Xu, H. H., Zhu, X. Q., et al., 2019. Discovery of Late Devonian Plants from the Southern Yellow Sea Borehole of China and Its Palaeogeographical Implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 531: 108444. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.08.039>
- Guo, X. W., Zhang, X. H., Wu, Z. Q., et al., 2019. Scientific Objectives and Preliminary Progresses of CSDP-2 Well in Continental Shelf Drilling Program! *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 49(1): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- He, L. J., Hu, S. B., Yang, W. C., et al., 2009. Radiogenic Heat Production in the Lithosphere of Sulu Ultrahigh-Pressure Metamorphic Belt. *Earth and Planetary Science Letters*, 277(3–4): 525–538. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.11.022>
- Hou, F. H., Guo, X. W., Wu, Z. Q., et al., 2019. Research Progress and Discussion on Formation and Tectonics of South Yellow Sea. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 49(1): 96–105 (in Chinese with English abstract).
- Hou, F. H., Zhang, Z. X., Zhang, X. H., et al., 2008. Geologic Evolution and Tectonic Styles in the South Yellow Sea Basin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 28(5): 61–68 (in Chinese with English abstract).
- Huang, L., Chen, H. J., Gao, H. F., et al., 2013. Characteristics and Genesis of Geotherm in the Central Basin of South China Sea. *Marine Geology Frontiers*, 29(11): 39–43 (in Chinese with English abstract).
- Huang, S., Hao, T. Y., Xu, Y., et al., 2010. Study on Macro Distribution of Residual Basin of South Yellow Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(6): 1344–1353 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Z. X., Xu, Y., Hao, T. Y., et al., 2009. Surface Wave Tomography of Lithospheric Structure in the Seas of East China. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(3): 653–662 (in Chinese with English abstract).
- Lachenbruch, A. H., Sass, J. H., 1977. Heat Flow in the United State and the Thermal Regime of the Crust. In: Heacock, J. G., Keller, G. V., Oliver, J. E., et al., eds., *The Earth's Crust*. American Geophysical Union, Washington D. C.. <https://doi.org/10.1029/GM020p0626>
- Li, N. S., 1995. Tectonic Evolution of Three Structural Basins in the Yellow Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 26(4): 355–362 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. H., Gao, M. T., Wu, Q. J., 2014. Crustal Thickness Map of the Chinese Mainland from Teleseismic Receiver Functions. *Tectonophysics*, 611: 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.11.019>
- Li, Z. Q., Yan, B., Han, Z. J., et al., 2022. Tectonic-Thermal Evolution of Meso-Cenozoic Rift Basin in South Yellow Sea, Offshore Eastern China: Implications for Basin-Forming Mechanism and Thermal Evolution of Source Rocks. *Earth Science*, 47(5): 1652–1668 (in Chinese with English abstract).
- Lim, J. U., Kim, H. C., 1997. Heat Flow in South Korea. *CCOP Technial Bulletin*, 26: 85–91.
- Ou, X. G., Jin, Z. M., Wang, L., et al., 2004. Thermal Conductivity and Its Anisotropy of Rocks from the

- Depth of 100—2 000 m Mainhole of Chinese Continental Scientific Drilling: Revelations to the Study on Thermal Structure of Subduction Zone. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 109—118 (in Chinese with English abstract).
- Pang, Y. M., Zhang, X. H., Guo, X. W., et al., 2017. Mesozoic and Cenozoic Tectono-Thermal Evolution Modeling in the Northern South Yellow Sea Basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(8): 3177—3190 (in Chinese with English abstract).
- Pang, Y. M., Zhang, X. H., Xiao, G. L., et al., 2018. The Mesozoic-Cenozoic Igneous Intrusions and Related Sediment-Dominated Hydrothermal Activities in the South Yellow Sea Basin, the Western Pacific Continental Margin. *Journal of Marine Systems*, 180: 152—161. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.11.011>
- Peng, B., Zou, H. Y., 2013. Present-Day Geothermal Structure of Lithosphere and the Cenozoic Tectono-Thermal Evolution of Bohai Basin. *Geoscience*, 27(6): 1399—1406 (in Chinese with English abstract).
- Podugu, N., Ray, L., Singh, S. P., et al., 2017. Heat Flow, Heat Production, and Crustal Temperatures in the Archaean Bundelkhand Craton, North-Central India: Implications for Thermal Regime beneath the Indian Shield. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(7): 5766—5788. <https://doi.org/10.1002/2017jb014041>
- Qiu, N. S., Zuo, Y. H., Chang, J., et al., 2015. Characteristics of Meso-Cenozoic Thermal Regimes in Typical Eastern and Western Sedimentary Basins of China. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 157—168 (in Chinese with English abstract).
- Rao, S., Jiang, G. Z., Gao, Y. J., et al., 2016. The Thermal Structure of the Lithosphere and Heat Source Mechanism of Geothermal Field in Weihe Basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(6): 2176—2190 (in Chinese with English abstract).
- Ray, L., Kumar, P. S., Reddy, G. K., et al., 2003. High Mantle Heat Flow in a Precambrian Granulite Province: Evidence from Southern India. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B2): 2084. <https://doi.org/10.1029/2001jb000688>
- Ren, Y., Zhao, H., Shao, Y. L., 2017. Tectonic Characteristics and Trap Styles in Northern Sag of Northern Depression in the South of Yellow Sea Basin. *Petroleum Geology and Engineering*, 31(6): 15—19, 125 (in Chinese with English abstract).
- Roy, R. F., Blackwell, D. D., Birch, F., 1968. Heat Generation of Plutonic Rocks and Continental Heat Flow Provinces. *Earth and Planetary Science Letters*, 5: 1—12. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(68\)80002-0](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(68)80002-0)
- Rybach, L., 1988. Determination of Heat Production Rate. In: Haenel, R., Rybach, L., Stegena, L., eds., Handbook of Terrestrial Heat Flow Density Determination. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 125—142.
- Rybach, L., Günter, B., 1984. The Variation of Heat Generation, Density and Seismic Velocity with Rock Type in the Continental Lithosphere. *Tectonophysics*, 103(1—4): 335—344. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(84\)90095-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(84)90095-7)
- Wang, L. S., Li, C., Shi, Y. S., 1995. Distributions of Geotemperature and Terrestrial Heat Flow Density in Lower Yangtze Area. *Chinese Journal of Geophysics*, 38(4): 469—476 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. B., Wang, L. J., Hu, D., et al., 2020. The Present-Day Geothermal Regime of the North Jiangsu Basin, East China. *Geothermics*, 88: 101829. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101829>
- Wei, W. B., Deng, M., Wen, Z. H., et al., 2009. Experimental Study of Marine Magnetotellurics in Southern Huanghai. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(3): 740—749 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Sun, Y. D., 1999. The Mesozoic Magmatism and Lithospheric Thinning in Eastern China. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 29(4): 313—318 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J. S., Wang, J. L., Chen, B., et al., 2014. Integrated Regional Geophysical Study on Lithospheric Structure in Eastern China Seas and Adjacent Regions. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(12): 3884—3895 (in Chinese with English abstract).
- Xia, B., 2018. Lithosphere Structure of the North China Block (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese).
- Xia, B., Thybo, H., Artemieva, I. M., 2020. Lithosphere Mantle Density of the North China Craton. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(9): e2020JB020296. <https://doi.org/10.1029/2020jb020296>
- Xing, T., Zhang, X. H., Zhang, X. Y., 2014. Magnetic Basement and Structure of the Southern Yellow Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 45(5): 946—953 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, Z., Jiang, Z. Q., Sun, P., et al., 2018. Characteristics and Tectonic Evolution of the Fault System in the North Sag of Northern Depression of South Yellow Sea Basin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 38(3): 75—84 (in Chinese with English abstract).
- Xu, W., Huang, S. P., Zhang, J., et al., 2019. Present-Day

- Geothermal Regime of the Uliastai Depression, Erlian Basin, North China. *Energy Exploration & Exploitation*, 37(2): 770–786. <https://doi.org/10.1177/0144598718785970>
- Yang, S. C., Hu, S. B., Cai, D. S., et al., 2004. Present-Day Heat Flow, Thermal History and tectonic Subsidence of the East China Sea Basin. *Marine and petroleum Geology*, 21(9): 1095–1105. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2004.05.007>
- Yang, S. C., Hu, S. B., Cai, D. S., et al., 2003. Characteristics of Geothermal Field and Thermal-Tectonic Evolution in the Southern Basin of the South Yellow Sea. *Chinese Science Bulletin*, 48(14): 1564–1569 (in Chinese).
- Zhang, M. H., Xu, D. S., Chen, J. W., 2007. Geological Structure of the Yellow Sea Area from Regional Gravity and Magnetic Interpretation. *Applied Geophysics*, 4(2): 75–83. <https://doi.org/10.1007/s11770-007-0011-1>
- Zhang, Q., Jin, W. J., Li, C. D., et al., 2009. Yanshanian Large-Scale Magmatism and Lithosphere Thinning in Eastern China: Relation to Large Igneous Province. *Earth Science Frontiers*, 16(2): 21–51 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, T., Zhu, W. L., Hu, S. Q., et al., 2021. Structural Characteristic and Its Genetic Mechanism of Central Uplift in South Yellow Sea Basin. *Earth Science*, 46(10): 3481–3495 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. H., Xiao, G. L., Wu, Z. Q., et al., 2017. Understanding and Discussion on Some Geological Problems of Oil-Gas Exploration in the South Yellow Sea Basin: New Progress and Challenges in the Exploration of Marine Oil-Gas in the Meso-Paleozoic in the South Yellow Sea. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, X. H., Zhang, Z. X., Lan, X. H., et al., 2013. Regional Geology of the South Yellow Sea. China Ocean Press, Beijing (in Chinese).
- Zhao, W.N., Wang, H.G., Shi, H.C., et al., 2019. Crustal Structure from Onshore-Offshore Wide-Angle Seismic Data: Application to Northern Sulu Orogen and Its Adjacent Area. *Tectonophysics*, 770: 228220. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.228220>
- Zheng, H. W., Li, T. D., Su, G., 2020. Tomography Images of Crustal and Upper Mantle Structure beneath Sulu Orogenic Belt. *Earth Science*, 45(7): 2485–2494 (in Chinese with English abstract).
- Zuo, Y. H., Li, J. W., Li, Z. W., et al., 2015. Mesozoic and Cenozoic “Thermal” Lithospheric Thickness Evolution in the Tarim Basin. *Progress in Geophysics*, 30(4): 1608–1615 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈沪生, 张永鸿, 徐师文, 等, 1999. 下扬子及邻区岩石圈结构构造特征与油气资源评价. 北京: 地质出版社.
- 陈艳, 张景发, 姜文亮, 等, 2017. 苏北盆地重力场及地壳结构特征. *地球物理学进展*, 32(6): 2295–2303.
- 迟清华, 鄢明才, 1998. 华北地台岩石放射性元素与现代大陆岩石圈热结构和温度分布. *地球物理学报*, 41(1): 38–48.
- 冯昌格, 刘绍文, 王良书, 等, 2009. 塔里木盆地现今地热特征. *地球物理学报*, 52(11): 2752–2762.
- 高顺莉, 周祖翼, 2014. 南黄海盆地东北凹侏罗纪地层的发现及其分布特征. *高校地质学报*, 20(2): 286–293.
- 高山, 骆庭川, 张本仁, 等, 1999. 中国东部地壳的结构和组成. *中国科学(D辑)*, 29(3): 204–213.
- 郭兴伟, 孙旭东, 杨小秋, 等, 2023. 南黄海中部隆起一个新的大地热流值: CSDP-2井热流测量结果. *地球物理学报*, 66(1): 332–343.
- 郭兴伟, 张训华, 吴志强, 等, 2019. 大陆架科学钻探CSDP-2井科学目标及初步成果! *吉林大学学报(地球科学版)*, 49(1): 1–12.
- 侯方辉, 郭兴伟, 吴志强, 等, 2019. 南黄海有关地层与构造的研究进展及问题讨论. *吉林大学学报(地球科学版)*, 49(1): 96–105.
- 侯方辉, 张志珣, 张训华, 等, 2008. 南黄海盆地地质演化及构造样式地震解释. *海洋地质与第四纪地质*, 28(5): 61–68.
- 黄磊, 陈泓君, 高红芳, 等, 2013. 南海中央海盆热流特征及成因. *海洋地质前沿*, 29(11): 39–43.
- 黄松, 郝天珧, 徐亚, 等, 2010. 南黄海残留盆地宏观分布特征研究. *地球物理学报*, 53(6): 1344–1353.
- 黄忠贤, 胥颐, 郝天珧, 等, 2009. 中国东部海域岩石圈结构面波层析成像. *地球物理学报*, 52(3): 653–662.
- 李乃胜, 1995. 黄海三大盆地的构造演化. *海洋与湖沼*, 26(4): 355–362.
- 李志强, 杨波, 韩自军, 等, 2022. 南黄海中-新生代裂谷盆地构造-热演化: 对成盆机制和烃源岩热演化的指示. *地球科学*, 47(5): 1652–1668.
- 欧新功, 金振民, 王璐, 等, 2004. 中国大陆科学钻探主孔100~2000 m岩石热导率及其各向异性: 对研究俯冲带热结构的启示. *岩石学报*, 20(1): 109–118.
- 庞玉茂, 张训华, 郭兴伟, 等, 2017. 南黄湖北部盆地中-新生代构造热演化史模拟研究. *地球物理学报*, 60(8): 3177–3190.
- 彭波, 邹华耀, 2013. 渤海盆地现今岩石圈热结构及新生代构造-热演化史. *现代地质*, 27(6): 1399–1406.
- 邱楠生, 左银辉, 常健, 等, 2015. 中国东西部典型盆地中-新生代热体制对比. *地学前缘*, 22(1): 157–168.
- 饶松, 姜光政, 高雅洁, 等, 2016. 渭河盆地岩石圈热结构与

- 地热田热源机理. 地球物理学报, 59(6): 2176—2190.
- 任艳, 赵洪, 邵宇蓝, 2017. 南黄海盆地北部坳陷北凹构造特征与圈闭类型. 石油地质与工程, 31(6): 15—19, 125.
- 王良书, 李成, 施央申, 等, 1995. 下扬子区地温场和大地热流密度分布. 地球物理学报, 38(4): 469—476.
- 魏文博, 邓明, 温珍河, 等, 2009. 南黄海海底大地电磁测深试验研究. 地球物理学报, 52(3): 740—749.
- 吴福元, 孙德有, 1999. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄. 长春科技大学学报, 29(4): 313—318.
- 吴健生, 王家林, 陈冰, 等, 2014. 中国东部海区岩石圈结构的区域综合地球物理研究. 地球物理学报, 57(12): 3884—3895.
- 夏冰, 2018. 华北地块岩石圈结构(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 邢涛, 张训华, 张向宇, 2014. 南黄海磁性基底特征分析和综合解释. 海洋与湖沼, 45(5): 946—953.
- 熊忠, 江志强, 孙鹏, 等, 2018. 南黄海盆地北部坳陷北凹断裂特征与构造演化. 海洋地质与第四纪地质, 38(3): 75—84.
- 杨树春, 胡圣标, 蔡东升, 等, 2003. 南黄海南部盆地地温场特征及热-构造演化. 科学通报, 48(14): 1564—1569.
- 张旗, 金惟俊, 李承东, 等, 2009. 中国东部燕山期大规模岩浆活动与岩石圈减薄: 与大火成岩省的关系. 地学前缘, 16(2): 21—51.
- 张田, 朱伟林, 胡森清, 等, 2021. 南黄海盆地中部隆起构造特征及其成因机制. 地球科学, 46(10): 3481—3495.
- 张训华, 肖国林, 吴志强, 等, 2017. 南黄海盆地油气勘探若干地质问题认识和探讨: 南黄海中-古生界海相油气勘探新进展与面临挑战. 北京: 科学出版社.
- 张训华, 张志珣, 蓝先洪, 等, 2013. 南黄海区域地质. 北京: 海洋出版社.
- 郑洪伟, 李廷栋, 苏刚, 2020. 苏鲁造山带地壳上地幔结构层析成像研究. 地球科学, 45(7): 2485—2494.
- 左银辉, 李佳薇, 李正文, 等, 2015. 塔里木盆地中、新生代“热”岩石圈厚度演化. 地球物理学进展, 30(4): 1608—1615.