https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.070



沧县隆起中部大地热流及岩石圈 热结构特征:以献县地热田为例

段和肖1,3,刘彦广1,2,3*,王贵玲2,3,边 凯3,牛小军4,牛 飞4,胡 静5

- 1. 河北工程大学地球科学与工程学院,河北邯郸 056000
- 2. 自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心,河北石家庄 050061
- 3. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所,河北石家庄 050061
- 4. 河北省煤田地质局水文地质队,河北邯郸 056000
- 5. 江苏科技大学土木工程与建筑学院,江苏镇江 212100

摘 要: 岩石圈热结构是了解大陆岩石圈构造变形及演化等大陆动力学问题的重要基础, 更是地热田热源机理研究的核心问题, 尤其对于深部地热资源开发具有重要的科学指导意义. 沧县隆起中部地热资源丰富, 地热地质条件较好, 但该地区岩石圈热结构尚不明确, 制约着区域地热资源勘查开发. 本文以沧县隆起中部献县地热田为研究区, 开展了4000 m深井测温、精细的岩土热物性测试, 查明了该区大地热流特征及热结构特征, 填补了大地热流测量空白区, 建立了研究区岩石圈热结构概念模型, 估算了其深部温度及岩石圈厚度. 结果表明, 献县地热田大地热流值为70.58 mW/m², 居里面埋深约为24 km, 莫霍面温度约为749℃, 热岩石圈厚度约为85~96 km.

关键词:沧县隆起;献县地热田;大地热流;岩石圈热结构;地热能.

中图分类号: P314 文章编号: 1000-2383(2023)03-988-14 收稿日期:2022-02-25

Characteristics of the Terrestrial Heat Flow and Lithospheric Thermal Structure in Central Cangxian Uplift: A Case Study of Xianxian Geothermal Field

Duan Hexiao^{1,3}, Liu Yanguang^{1,2,3*}, Wang Guiling^{2,3}, Bian Kai³, Niu Xiaojun⁴, Niu Fei⁴, Hu Jing⁵

- 1. School of Earth Sciences and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056000, China
- 2. Technology Innovation Center for Geothermal & Hot Dry Rock Exploration and Development, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang 050061, China
- 3. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China
- 4. Hydrogeological Team, Hebei Coalfield Geology Bureau, Handan 056000, China
- 5. School of Civil Engineering and Architecture, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China

Abstract: Understanding the lithospheric thermal structure is an important basis for understanding the continental dynamics (i.e., tectonic deformation and evolution) of the continental lithosphere. It is also the core of studies on the thermal source mechanisms of

基金项目:河北省重点研发计划项目(No. 20374201D);自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心开放基金项目(No. SK202104). 作者简介:段和肖(1996—),男,硕士研究生,主要从事地热地质研究. ORCID:0000-0002-9030-5355. E-mail:1415282112@qq.com * 通讯作者:刘彦广,E-mail:gaoyuanzhixing@163.com

引用格式:段和肖,刘彦广,王贵玲,边凯,牛小军,牛飞,胡静,2023.沧县隆起中部大地热流及岩石圈热结构特征:以献县地热田为例.地球科学,48(3):988-1001.

Citation: Duan Hexiao, Liu Yanguang, Wang Guiling, Bian Kai, Niu Xiaojun, Niu Fei, Hu Jing, 2023. Characteristics of the Terrestrial Heat Flow and Lithospheric Thermal Structure in Central Cangxian Uplift: A Case Study of Xianxian Geothermal Field. Earth Science, 48(3):988—1001.

geothermal fields. Most importantly, it can provide scientific guidance for the exploration and development of deep geothermal resources. The Cangxian uplift enjoys rich geothermal resources and favorable geothermal geological conditions. However, its lithospheric thermal structure is still unclear, which restricts the exploration and development of regional geothermal resources. Focusing on the Xianxian geothermal field in the middle part of the Cangxian uplift through the temperature measurement of a 4 000 m deep well and fine tests of geotechnical thermophysical properties, this study has ascertained the characteristics of the terrestrial heat flow and lithospheric thermal structure in the study area, thus filling the gap in terrestrial heat flow measurement. Moreover, this study has established a conceptual model of the lithospheric thermal structure of the study area and estimated the deep temperature and lithospheric thickness in the study area. The results show that the Xianxian geothermal field has a heat flow of 70.58 mW/m², a burial depth of the Curie surface of about 24 km, a Moho temperature of about 749 °C, and a lithospheric thickness of about 85–96 km.

Key words: Cangxian uplift; Xianxian geothermal field; terrestrial heat flow; lithospheric thermal structure; geothermal energy.

岩石圈的热流和热结构是研究区域构造-热背 景和地球动力学过程的重要基础(Furlong and Chapman, 2013; 黄方等, 2015), 也是影响地热资源 成因演化过程的重要条件(Lachenbruch, 1970; 饶松 等,2016).因此,岩石圈的热流和热结构研究一直是 地热学的重要课题.Schintgen et al.(2015)获取了岩 石的热导率、辐射产热率和密度等参数,运用数值 模拟手段,建立了大卢森堡地区雷诺海西带二维稳 态热模型和传导热模型,分析了其热流值与岩石圈 热结构,发现老艾菲尔地幔柱的热量尚未完全到达 地表.Njiteu Tchoukeu et al.(2021)通过分析中非次 区域地温梯度、大地热流及岩石圈热结构,发现刚 果克拉通的热流值与区域居里面深度和克拉通的 构造稳定性有直接关系,班吉磁异常的来源并不唯 一,并且与刚果克拉通的构造有关.Shi et al.(2021) 对 Olkaria 地热系统的温度测井资料进行分析, 计算 了该地热系统的热流值,讨论了热源和传热过程、 渗透结构和流动模式以及上升流和补给区的影响, 研究表明Olkaria系统的热流状态可能是地幔热异 常、岩浆活动和热液循环的综合结果,地下深处6~ 9 km 的壳内熔融体或岩浆储层为 Olkaria 地热系统 提供了主要的热源.刘峰等(2020)研究了燕山中部 地区的七家-茅荆坝地热田岩石圈热结构,并计算 了其深部地温分布,发现该区较高的热流主要受区 域花岗岩侵入基底与上地壳、中地壳岩石放射性产 热的影响. 饶松等(2016)等人通过对渭河盆地岩石 圈热结构的研究,分析得出,岩石圈表层的构造运 动引起软流圈被动上涌,其产生的相对高地幔热流 的热传导和深大断裂沟通的水体热对流相互叠加 作用,共同构成了渭河盆地中-低温地热田的热源 机理.Zhang et al.(2018)通过求解稳态热传导方程, 建立了共和盆地和贵德盆地的一维地壳热结构模 型,并用数值模拟的手段,成功反演了共和盆地钻

孔的垂直和水平温度变化;研究表明,共和盆地异常热主要受地壳增厚放射性生热和浅岩浆库冷却的共同作用.黄方等(2015)基于二维稳态热传导方程,利用有限元数值模拟方法,得到了华北克拉通西部的鄂尔多斯盆地下伏岩石圈热结构特征,从地热学角度印证了太平洋俯冲脱水作用对华北克拉通的影响.崔悦等(2020)通过实测数据构建冀中坳陷中部地壳分层模型,计算了冀中坳陷中部的Moho面温度以及热岩石圈厚度;研究表明,较薄的热岩石圈使得热流更易传导到地壳浅部,而热导率较低、巨厚的新近系沉积层为研究区提供隔热保温的作用,共同形成了该地区地热异常的成因背景.

沧县隆起地热资源丰富,专家学者针对开发利用较早的沧县隆起北段开展了一些大地热流和岩石圈热结构研究工作,形成了初步的理论认识.沧县隆起中部地区地热资源开发较晚,研究工作滞后,缺乏大地热流及岩石圈热结构等基础性研究,制约了地热资源成因机理研究和地热勘查开发.因此,本文以沧县隆起中部献县地热田为研究对象,开展了地热井测温、岩石热物性测试、区域地球物理勘查研究,分析了该地区大地热流值和区域地热背景,并结合现有深部科学地热流值和区域地热背景,并结合现有深部科学地热钻孔资料,揭示了沧县隆起带中部地区岩石圈热结构,对探索沧县隆起形成和演化的地球动力学过程具有重要意义,为地热资源形成理论的发展和地热资源的高质量开发奠定基础.

1 区域地质背景

沧县隆起位于华北克拉通的渤海湾盆地内,献县地热田位于沧县隆起中部,是该区域最主要的地热田之一,代表性较强.沧县隆起西部为冀中坳陷,东部为黄骅坳陷,南部为临清坳陷.区内发育有大

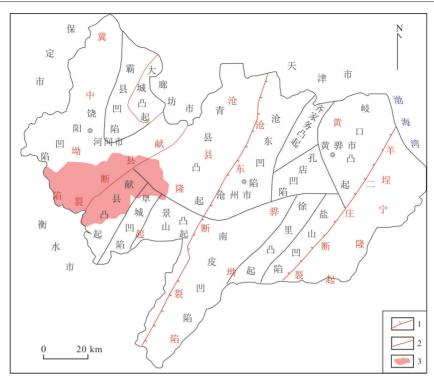


图1 沧州地区构造简图

Fig.1 Sketch showing structures in the Cangzhou area 1.Ⅲ级构造单元界线; 2.Ⅳ级构造单元界线; 3.献县

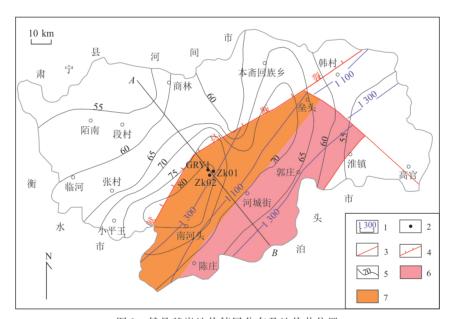


图 2 献县基岩地热储层分布及地热井位置

Fig.2 Map showing the distribution of bedrock geothermal reservoirs and the locations of geothermal wells in the Xianxian geothermal field

1. 基岩顶界深度等值线(m); 2. 钻孔; 3. 四级断裂; 4. 三级断裂; 5.1 500 m 埋深地温等值线(℃); 6. 寒武系-奥陶系基岩热储层; 7. 上元古界蓟县系基岩热储层

城凸起、青县凸起、献县凸起、阜城凹陷、景县凸起 等次一级的凹陷、凸起(图1).沧县隆起沉积盖层 主要为中、新元古界,受中生代燕山运动及新生代 喜山运动的影响,本区在中生代至古近纪处于隆起剥蚀环境,中生界及古近系大多缺失.新近纪以来,华北断坳整体下降,在沧县隆起之上开始接受

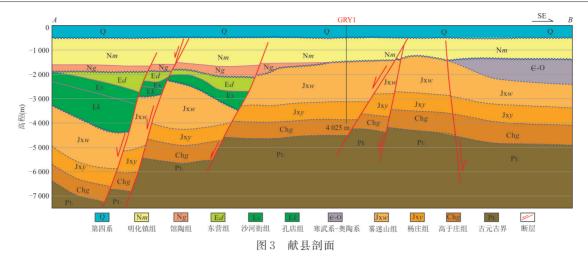


Fig.3 Cross sections of the Xianxian area 剖面位置见图 2

新生界沉积,其沉积厚度在1000~2000 m,个别地段小于1000 m.沧县隆起以北东及北北东向断裂构造为主,东部边界构造为沧州-大名深断裂,南部为无极-衡水大断裂,西部的次一级断裂构成了与冀中坳陷的分界线.中、新生代期间,由于太平洋板块西向俯冲,印度板块北向俯冲于欧亚板块之下以及中生代鄂霍茨克海消亡导致中亚造山带南向俯冲作用,导致沧县隆起形成.

献县地热田及其周边地区跨两个Ⅲ级构造单 元,即位于献县东部的沧县隆起和位于献县西部 的冀中坳陷,所处的Ⅳ级构造单元位置自西向东 分别为饶阳断凹的北部、献县断凸的北部、阜城断 凹的西北端以及青县断凸的西南端. 奥陶系、寒武 系基岩热储主要分布在献县断凸的东端,蓟县系 基岩热储主要分布在献县断凸的西端(图2).献县 地区剖面图显示(图3),第四系埋深在510 m左 右,近似水平;其下为新近系明化镇组,基本呈水 平状,并略有起伏,向南受基底抬升影响,明化镇 组逐渐变薄,中部临近献县县城偏南附近最薄,据 钻孔 GRY1 揭露, 明化镇组底界面深度 1 480 m, 该处明化镇组不整合覆盖于蓟县组灰岩之上,其 下为新近系馆陶组,基本呈水平状,并略有起伏, 向南受基底抬升影响,馆陶组逐渐变薄尖灭,中 部临近献县县城偏北附近最浅,深度约1500 m, 该处馆陶组不整合覆盖于古近系之上.

2 研究方法

2.1 钻孔测温

钻孔测温是进行地温场和岩石圈热结构研究

的基础.按照数据质量从高到低,钻孔测温数据大致可以分为3类,它们在地温场研究中的作用存在很大差异:(1)系统稳态测温,指钻孔达到热平衡以后的系统测温,代表了研究区真实的地温状况,这种测温资料最可靠、精度最高,是地温场研究最关键的资料;(2)准稳态测温数据,指完井后1~3天内所测的温度数据,准稳态测温数据接近钻孔达到热平衡时所测的数据,井内地温十分接近真实地层温度,但又有略微差别.(3)瞬态测温,指完井后不到1天所进行的测温,由于静井时间短,地温与井温尚未达到平衡,测得的井温曲线不能反映真实的地温状态,因而也无法用于地温场的研究.

本次测温工作使用的仪器是 JFSW-H(W)数字地热测井仪探管,测量范围:0~250℃,精度为±0.1℃,分辨率为0.01℃.钻探终孔后96 h开始测井,保证井温恢复达到稳态或准稳态状态.采用的测井方式为下测连续测量,绞车控制器匀速拉升,速度控制在10 m/min,为保证所测的数据一致,每200 m做一次检查点测量.

2.2 热导率测试

岩石热导率的大小主要受到岩石矿物成分、温度、压力、孔隙度等因素的影响,同一岩性的岩石,热导率值会因岩石内部结构的变化而产生较大的差异(Clauser and Villinger, 1990; Pribnow et al., 2013). 前人研究发现,温度升高,岩石热导率会降低,热导率测试在25℃环境下进行,与钻孔中实际地温下的结果可能相差较大.对于有实测原位温度的钻孔岩心,要根据其原位温度进行热导率的校正.前人通过实验得出了热导率与温度关系的经验公式

(Anand et al., 1973; Sass et al., 1992),该公式 对于中国大陆地区埋深几千米内的地层较为 适用(He et al., 2008; 龚育龄等, 2011), 因此 对于岩心实测热导率可采用如下两个公式进 行钻孔岩心热导率的校正:

$$K(0) = K(25) \{1.007 + 25 [0.0037 - 0.0074/K(25)]\},$$
 (1)

$$K(T) = K(0) / \{1.007 + T [0.0036 - 0.0072/K(0)]\},$$
 (2)

式中:T为钻孔岩心原位温度(\mathbb{C}),K(0)和K(25)分别为岩石在0℃和25℃时的热导率值 (W/m/K), K(T) 为校正后的热导率.

本次岩石热导率测试使用的仪器是德国生 产的 TCS (thermal conductivity scanning) 热导率 自动扫描仪,测量范围为0.2~25.0 W/m/K,测 量精度±3%.采样深度及测试结果见表1,表2.

2.3 大地热流值计算

根据傅里叶定律,在一维稳态条件下,热 流值等于垂向上地温梯度与岩石热导率的乘 积,可以由公式(3)计算得出:

$$Q = -K dT/dZ, \qquad (3)$$

式中,Q为大地热流(mW/m²);K为岩石热导率 (W/m/K); dT/dZ 为 地 温 梯 度 (\mathbb{C}/km), 负 号 代 表大地热流传导的方向与地温梯度方向相反.

每个钻孔可以根据地温梯度和岩石热导率 数据的分布情况选择一个或者多个热流计算段, 一般选取岩性较均一的层段作为热流计算段,并 且要多采集计算层段内的岩石样品进行岩石热 导率数据测试,使所测的热导率数据具有代表性 (王朱亭等,2019).本次钻井测温段的地层主要 为第四纪、新近纪及基岩地层.由于第四纪地层 中地温梯度容易受到季节性气温变化、地下水活 动等因素的影响,同时基岩热储段内部地下水的 对流作用使其不符合稳态热传导的条件,因此上 述两部分地层不适合热流值的计算.本文将选 取新近纪上新统段(500~1100 m)进行计算.

2.4 岩石放射性生热率测试

对于岩石生热率的计算,学者们提出了 很多方法,目前应用较多的方法是 Rybach (1976)提出的计算公式,如下:

$$A = 0.01 \times \rho \times (9.52 \times C_{\text{U}} + 2.56 \times C_{\text{Th}} + 3.48 \times C_{\text{K}}), \qquad (4)$$

式中,A为岩石放射性生热率(μ W/m³), C_U 、

 C_{Th} 、 C_{K} 分别为岩石中的U、Th含量(10⁻⁶)和 K含量(%), ρ 为岩石密度(kg/m³).

地壳浅部的岩石放射性生热率可以通过对采 集到的钻孔岩心进行测试,并经上述方法计算得到. 对于地壳深部岩层的放射性生热率,可利用地震纵 波速度求得, Rybach and Buntebarth (1984)研究了 地壳岩层中地震纵波速度 V。与岩石放射性生热率 A的关系,建立了 V_{s} -A相关方程(公式5),依据此 公式便可得到地壳深部各岩层的放射性生热率值.

$$\ln A = 16.5 - 2.74 V_{\rm p},$$
 (5)

式中,V,为地壳岩层中地震纵波速度(km/s), A 为岩石放射性生热率(μW/m³).

本次采集献县地热田 ZK01 钻孔和 GRY1 钻孔岩心,共测试了17块岩石样品,采样深度 及测试结果见表1、表2.由中国科学院地质与 地球物理研究所测定岩石放射性生热率.

2.5 岩石圏热结构计算

岩石圈热结构研究实质上就是以大地热流为 约束,结合岩石圈分层结构模型以及岩石热物性参 数(热导率和生热率),获取岩石圈内部各圈层温度 和热流信息.大地热流主要由两部分组成:一个是 地壳热流,其热量来自地壳浅部U、Th、K等放射性 元素的衰变;另一个是地幔热流,其热量来自深部 地幔.一个地区壳、幔两部分热量的配分及组成关 系决定了岩石圈热结构.因此,根据每一层的厚度 与该岩层岩石放射性生热率数据,可采用"剥层法" 自上而下逐层"剥去"各层段所提供的放射性生热 量,从而得到壳内各层段界面的热流,获得壳内各 层段的热流配分和地幔热流.其计算公式如下:

$$q_m = q_s - q_c = q_s - \Sigma A_i D_i$$
, (6)
式中: D_i 为结构层的厚度(km), A_i 为该层相应的生热率(μ W/m³), q_s 、 q_m 、 q_c 分别为地表、

应的生热率($\mu W/m^3$), $q_s \setminus q_m \setminus q_s$ 分别为地表、 地幔和地壳热流(mW/m²).

2.6 热岩石圈厚度及深部地温计算

热岩石圈是指以热传导方式进行热传递的岩 石圈层,其下为以热对流为主的软流圈(Morgan, 1984).利用一维稳态热传导方程(6)得到岩石圈温 度随深度的变化曲线,该曲线同干玄武岩固相线或 地幔绝热线交点处的深度即为热岩石圈的厚度,但 Rudnick et al.(1998)认为,地幔绝热线不是一条线, 而是一个特定的范围,两条绝热线分别为 T₁= 1200+0.5Z和 $T_2=1300+0.3Z$,其中, T为绝对温 度(℃),Z为深度(km).通过这两条绝热线就可以确

表1 GRY1孔岩心热导率及放射性生热率测试结果

Table 1 Testing results of thermal conductivity and radioactive heat production rate of cores of Borehole GRY1

| 深度(m) | 热导率(W/m/K) | $U(10^{-6})$ | Th(10 ⁻⁶) | K ₂ O(%) | 深度(m) | 热导率(W/m/K) | I I(10 ⁻⁶) | Th(10 ⁻⁶) | K ₂ O(%) |
|----------|------------|--------------|-----------------------|------------------------|----------|------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
| 1 401.60 | 8.573 | - | - | - K ₂ O(/0) | 2 632.45 | 4.173 | - | - | K ₂ O(/0) |
| 1 401.00 | 7.319 | _ | _ | _ | 2 633.03 | 5.840 | _ | _ | _ |
| 1 401.30 | 8.431 | | | _ | 2 634.07 | 4.761 | | | |
| 1 402.18 | 7.945 | | | | 2 631.02 | | 4.42 | 10.0 | 0.11 |
| | | 0.22 | 0.06 | - 0.02 | | 5.214 | 4.42 | 18.9 | 9.11 |
| 1 395.05 | 8.471 | 0.32 | 0.06 | 0.02 | 2 632.30 | 4.318 | _ | _ | _ |
| 1 395.65 | 8.324 | _ | _ | _ | 2 999.05 | 3.107 | _ | _ | _ |
| 2 048.64 | 4.484 | _ | _ | _ | 3 001.18 | 2.861 | _ | _ | _ |
| 2 048.76 | 4.247 | _ | _ | _ | 3 002.15 | 2.945 | _ | _ | _ |
| 2 054.10 | 4.827 | _ | _ | _ | 3 005.20 | 3.042 | _ | _ | _ |
| 2 055.53 | 4.652 | _ | _ | _ | 3 006.20 | 3.115 | 0.37 | 0.44 | 0.11 |
| 2 047.40 | 5.102 | 2.74 | 3.58 | 0.31 | 3 008.20 | 2.969 | _ | _ | _ |
| 2 047.45 | 5.223 | _ | _ | _ | 3 009.95 | 2.951 | _ | _ | - |
| 2 054.51 | 7.459 | _ | _ | _ | 3 011.15 | 2.809 | _ | _ | _ |
| 2 058.12 | 6.369 | _ | _ | _ | 3 012.22 | 3.098 | _ | _ | _ |
| 2 059.10 | 8.122 | _ | _ | _ | 3 013.15 | 2.983 | _ | _ | - |
| 2 059.70 | 6.982 | - | - | - | 3 014.00 | 3.102 | 4.75 | 4.91 | 1.01 |
| 2 054.95 | 7.356 | 0.19 | 0.15 | 0.01 | 3 015.00 | 2.796 | _ | _ | _ |
| 2 058.55 | 7.271 | _ | _ | _ | 3 016.40 | 3.342 | _ | _ | _ |
| 2 239.65 | 5.906 | _ | _ | _ | 3 017.61 | 3.032 | _ | _ | _ |
| 2 240.20 | 4.972 | _ | _ | _ | 3 019.46 | 3.521 | _ | _ | _ |
| 2 241.17 | 5.045 | _ | _ | _ | 3 020.12 | 3.368 | _ | _ | _ |
| 2 241.32 | 6.231 | _ | - | _ | 3 020.77 | 3.427 | 0.79 | 4.48 | 0.82 |
| 2 239.15 | 5.753 | 1.45 | 0.25 | 0.07 | 3 021.50 | 3.267 | _ | _ | _ |
| 2 239.30 | 5.365 | _ | _ | _ | 3 010.18 | 3.219 | _ | _ | _ |
| 2 243.07 | 5.116 | _ | _ | _ | 3 022.18 | 2.725 | _ | _ | _ |
| 2 243.84 | 4.933 | _ | _ | _ | 3 022.53 | 3.713 | _ | _ | _ |
| 2 247.45 | 5.343 | _ | _ | _ | 3 023.82 | 2.407 | _ | _ | _ |
| 2 249.05 | 5.218 | _ | _ | _ | 3 025.03 | 3.612 | _ | _ | _ |
| 2 243.27 | 4.981 | 0.74 | 1.45 | 0.72 | 3 024.97 | 2.561 | _ | _ | _ |
| 2 247.15 | 5.021 | _ | _ | _ | 3 026.73 | 2.871 | _ | _ | _ |
| 2 251.05 | 4.566 | _ | _ | _ | 3 028.15 | 3.015 | 0.55 | 2.63 | 0.73 |
| 2 251.85 | 4.055 | _ | _ | _ | 3 030.55 | 2.317 | _ | _ | _ |
| 2 252.02 | 4.981 | _ | _ | _ | 3 206.43 | 3.408 | _ | _ | _ |
| 2 252.76 | 4.681 | _ | _ | _ | 3 206.85 | 3.417 | _ | _ | _ |
| 2 250.80 | 4.259 | 1.75 | 4.51 | 0.99 | 3 207.51 | 2.762 | _ | _ | _ |
| 2 251.75 | 5.012 | _ | - | _ | 3 208.31 | 4.231 | _ | _ | _ |
| 2 254.30 | 3.629 | _ | _ | _ | 3 209.01 | 3.641 | _ | _ | _ |
| 2 255.55 | 4.125 | _ | _ | _ | 3 212.31 | 4.012 | 1.7 | 8.62 | 4.66 |
| 2 256.18 | 2.706 | _ | _ | _ | 3 213.82 | | | - | 4.00 |
| | | _ | _ | | | 4.112 | _ | _ | _ |
| 2 257.63 | 3.782 | 1 10 | 4.46 | 1 45 | 3 755.13 | 4.015 | _ | _ | _ |
| 2 255.70 | 4.034 | 1.19 | 4.46 | 1.45 | 4 013.10 | 3.782 | _ | _ | _ |
| 2 258.53 | 2.973 | _ | _ | _ | 4 019.57 | 3.401 | _ | _ | _ |
| 2 631.93 | 5.119 | _ | - | _ | | | | | |

注:"-"表示未进行U、Th、K含量测试.

表 2 ZK01 孔岩心热导率及放射性生热率测试结果

Table 2 Testing results of thermal conductivity and radioactive heat production rate of cores of Borehole ZK01

| 深度 | 热导率 | U | Th | K ₂ O |
|----------|----------------------|-------------|-------------|------------------|
| (m) | $\left(W/m/K\right)$ | (10^{-6}) | (10^{-6}) | (%) |
| 1 340.50 | 4.63 | 0.43 | 0.10 | 0.03 |
| 1 508.00 | 4.12 | 0.55 | 0.15 | 0.05 |
| 2 017.62 | 2.33 | 1.14 | 0.31 | 0.07 |

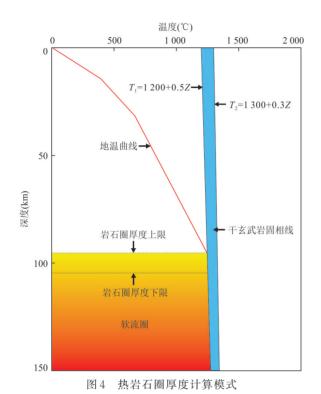


Fig.4 Calculation pattern of thermal lithospheric thickness

定热岩石圈厚度的上限和下限.该方法的模式如图 4所示,红色的实线为地温分布曲线,红色的虚线为 热岩石圈厚度的上下限,蓝色区域为地幔绝热范围.

在研究深部地温时,需要同时具备大地热流、浅部测温结果、岩石生热率和热导率等基本参数.通常假定地壳深部岩石的生热率和热导率分布不随时间发生变化,所以在稳态条件下的热传导方程如下:

$$T_{z} = T_{0} + \frac{qD}{k} - \frac{AD^{2}}{2k},\tag{7}$$

式中: T_z 、 T_o 分别为地下深度 Z处和计算段顶面的温度(\mathbb{C}),q为计算段顶面的热流(mW/m^2),D为计算段的厚度(km),k为计算段的岩石热导率(W/m/K),A为计算段的岩石生热率($\mu W/m^3$).

浅部地层热导率一般由样品实测得出并按照公式(1)、(2)进行温度校正.上地壳及

以下的地壳各结构层则一般采用 Cermak 所建立的公式进行校正 (Cermak and Rybach, 1982; Artemieva and Mooney, 2001).

$$k = k_0/(1+c/T)$$
 (8)

式中,c为实验确定的温度系数,k。为计算段顶面的热导率(W/m/K).前人研究中,上地壳c取 0.001,中地壳取 0,下地壳与地幔取 -0.000 25.上地壳k。取 3.0 W/m/K,中地壳取 2.3 W/m/K,下地壳与地幔取 2.5 W/m/K(Cermak and Rybach,1982;龚育龄等,2011).

3 结果与讨论

3.1 大地热流

3.1.1 地温场分布特征 图 5 为钻孔的温度-深度 剖面图,可以看出,三个钻孔的温度分布几乎一致. 在 500 m 以浅温度曲线具有一定的波动性,可能是 受到断裂处地下水对流等因素的影响.在 500~ 1 200 m 范围段,温度随着深度线性增加,表明热量

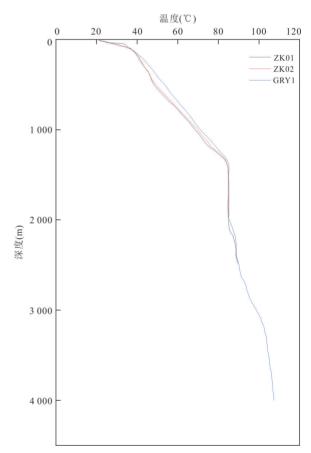


图 5 ZK01、ZK02和GRY1钻孔测温曲线

Fig. 5 Curves of measured temperature of boreholes ZK01, ZK02 and GRY1

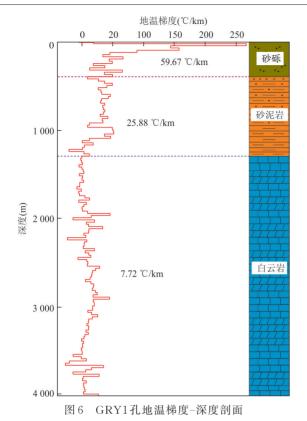


Fig.6 Section of geothermal gradient vs. depth of Borehole GRY1

传递在该层段内以热传导为主.在1300m以深,地层岩性发生了变化,由浅部的砂泥岩地层转变成白云岩地层,白云岩较高的导热性能以及良好的赋水性,使得岩层内部温度场分布较为均一,白云岩层段的温度变化相对于上部砂泥质沉积盖层要小的多.所以在热储盖层与热储层的接触带上,温度增幅明显变小.从图1和图2可以看出,献县地区高地温分布区,与献县断凸的分布范围相对应;东北部则与青县断凸分布范围相对应,说明献县地区地温场变化受到构造的影响.本次测温的3个钻孔相距较近,均位于地温较高的献县断凸,而且沧县隆起以沉积作用为主,自渐新世以来未经历任何构造运动,沉积层有着非常相似的性质(王定一等,1997),所以三口钻孔的测温曲线非常相似.

揭露地层最多的 GRY1 孔深度最深,可以反映献县地热田地温场特征,所以本文选择 GRY1 孔进行地温梯度分析.从图 6 可以看出,地温梯度随深度的变化主要取决于地层岩性的变化.整体来看地温梯度随深度的变化趋势可以划分为 2 段,上部砂泥质沉积盖层段与下部白云质热储层层段.GRY1 全

井 段 内 地 温 梯 度 值 的 波 动 范 围 为 -26.82~ 266.61 ℃/km. 上部第四系层段的地温梯度平均值 为 59.67 ℃/km, 深度范围为 0~500 m. 第三系层段 的地温梯度平均值为25.88 ℃/km深度范围为500~ 1 300 m. 下部热储层段的地温梯度平均值为 7.87 ℃/km,深度在1300 m以深.上部沉积盖层段 相对于深部热储层段具有较高的地温梯度值,主要 由于上部沉积盖层段的岩性主要为砂岩、砾岩、泥 岩等,岩石热导率相对于白云岩较小.同时由于沉 积盖层段内岩层受到断裂处地下水对流、地层岩性 成分及岩石类型变化的影响,地温梯度值波动较 大,某些深度处的地温梯度值甚至为负值,明显受 到局部地下水对流的影响,导致上部沉积盖层段 地温梯度值大旦波动大;下部热储层段的岩性主 要是白云岩,白云岩具有良好的赋水性及渗透性, 热储层段内部的热对流作用以其较高的传热效 率使得其内部的温度变化较小,地温梯度值小.

3.1.2 热导率变化特征 本次测试的样品包含了盖层和基岩地层段,岩性主要为新生界的砂岩、泥岩等和中元古界蓟县系及长城系的白云岩(含灰白云岩、泥晶白云岩等).图7为基岩地层段岩石热导率随深度的变化图,其热导率值的范围为2.32~7.46 W/m/K,平均值为4.21 W/m/K.基岩地层热导率变化较大是受到白云岩内部泥质含量的影响,较低热导率测试值所对应的岩性主要为泥晶白云岩及含灰白云岩等,热导率较高值所

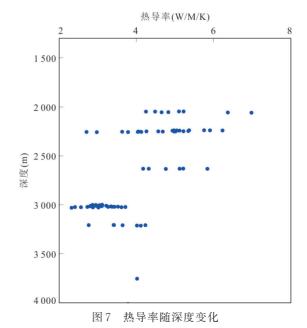


Fig.7 Variation of thermal conductivity with depth

表 3 沧县降起中部岩石圈热结构计算结果

Table 3 Calculation results of lithospheric thermal structure in central Cangxian uplift

| | 结构层 | | 底界埋深 (km) | $V_{ m p} \ ({ m km/s})$ | 计算段 (km) | A_i $(\mu { m W/m^3})$ | D_i (km) | $q_i = (\mathrm{mW/m^2})$ | 热流值 (mW/m² |
|-----|------------------|-------|--------------|--------------------------|----------------|--------------------------|------------|---------------------------|---------------|
| | 並 4. 田 | 第四系 | 0.50 | _ | 0~0.5 | 1.41 | 0.50 | 0.71 | 70.58 |
| | 新生界 | 第三系 | 1.30 | _ | $0.5 \sim 1.3$ | 0.53 | 0.80 | 0.42 | 69.88 |
| | 中元古界 | 蓟县系 | 3.70 | _ | $1.3 \sim 3.7$ | 0.81 | 2.40 | 1.94 | 69.45 |
| | 中儿百介 | 长城系 | 5.40 | 6.02 | $3.7 \sim 5.4$ | 1.01 | 1.70 | 1.71 | 67.51 |
| | | | 6.00 | 6.06 | $5.4 \sim 6.0$ | 0.90 | 0.60 | 0.54 | 65.80 |
| 上地壳 | 太古宇-古元古界变质岩系结晶基底 | | 7.00 | 6.10 | $6\sim7$ | 0.81 | 1.00 | 0.81 | 65.26 |
| | | | 8.00 | 6.10 | 7~8 | 0.81 | 1.00 | 0.81 | 64.45 |
| | | | 9.00 | 6.16 | 8~9 | 0.68 | 1.00 | 0.68 | 63.64 |
| | | | 10.00 | 6.16 | 9~10 | 0.68 | 1.00 | 0.68 | 62.96 |
| | | | 12.00 | 6.16 | 10~12 | 0.68 | 2.00 | 1.37 | 62.27 |
| | | 14.90 | 6.20 | 12.0~14.9 | 0.61 | 2.90 | 1.78 | 60.90 | |
| | | 16.00 | 6.26 | 14.9~16.0 | 0.52 | 1.10 | 0.57 | 59.12 | |
| 中地壳 | | | 18.00 | 6.26 | $16 \sim 18$ | 0.52 | 2.00 | 1.04 | 58.55 |
| | | | 20.00 | 6.45 | 18~20 | 0.31 | 2.00 | 0.62 | 57.51 |
| | | | 22.00 | 6.44 | 20~22 | 0.32 | 2.00 | 0.64 | 56.89 |
| | | | 24.00 | 6.44 | $22 \sim 24$ | 0.32 | 2.00 | 0.64 | 56.25 |
| | | | 26.00 | 6.50 | $24 \sim 26$ | 0.27 | 2.00 | 0.54 | 55.62 |
| | | | 28.00 | 6.54 | 26~28 | 0.24 | 2.00 | 0.48 | 55.08 |
| 下地壳 | | | 30.00 | 6.70 | 28~30 | 0.16 | 2.00 | 0.31 | 54.59 |
| | | | 32.00 | 7.29 | 30~32 | 0.03 | 2.00 | 0.06 | 54.28 |
| | | | 32.30 | 7.32 | 32.0~32.3 | 0.03 | 0.30 | 0.01 | 54.22 |

对应的岩性主要为灰色、灰白色、褐灰色白云岩,泥岩相对于白云岩具有较低的热导率值,从而使得含泥质较多的白云岩热导率较低.

3.1.3 地表热流值 对新近纪上新统段(500~ 1 100 m)的温度-深度曲线用最小二乘法进行线 性拟合,相关系数大于0.99,表明温度-深度线性 关系很好,地温梯度计算可靠.由于本次测试的新 近纪上新统段热导率测试数据仅有一个,缺乏代 表性,所以笔者通过搜集前人的测试成果(龚育龄 等,2011),并根据公式(1)、(2)进行了热导率校 正.根据公式(3)计算得出献县地热田大地热流值 为 70.58 mW/m². 该值高于冀中坳陷(崔悦等, 2020),这主要源于在坳陷区沉积了相对较厚的沉 积物,多以砂泥岩为主,这些岩石的热导率通常较 低,而隆起区基岩热导率相对较大,沉积盖层和基 岩热导率的差异产生了"热折射"效应和热流的再 分配,于是热流向隆起部位聚集(冯昌格等,2009; 饶松等,2013). 隆起区较高的热流值还与区域构 造演化背景有关,早期研究证实,古近纪时期渤海 湾盆地处于裂陷发育期(侯贵廷等,2001;丁增勇

等,2008; Xue et al.,2021),此时地幔上拱和岩浆活动频繁,不仅造成深部岩石圈减薄,而且导致沧县隆起地区地表热流增大.新近纪以来,岩石圈厚度增厚,火山活动减弱,渤海湾盆地一直处于热衰减状态,但由于冷却时间相对短,使得沧县隆起地区现今仍具有较高的大地热流值(王良书等,2002;邱楠生等,2009;龚育龄等,2011).

3.2 岩石圏热结构

在计算岩石圈热结构时,首先应建立符合实际的地壳结构模型.本文根据深部地球物理探测的结果(《华北地区地壳上地幔地震波速度结构模型v2.0》,http://www.craton.cn/data)和研究区终孔深度为4000 m的钻探资料,建立了沧县隆起中部的地壳结构模型.模型中,新生界及中元古界5.4 km以浅的地层分层是根据实际钻井数据以及研究区最新的二维地震资料统计分析得来,上、中、下地壳的分层是根据地震波速分布并结合前人的研究确定(嘉世旭和张先康,2005;段永红等,2015).以 V_p =6.2 km/s为上地壳底面, V_p =6.5 km/s为中地壳底面,以 V_p =7.32 km/s为莫霍面,上地壳深度为

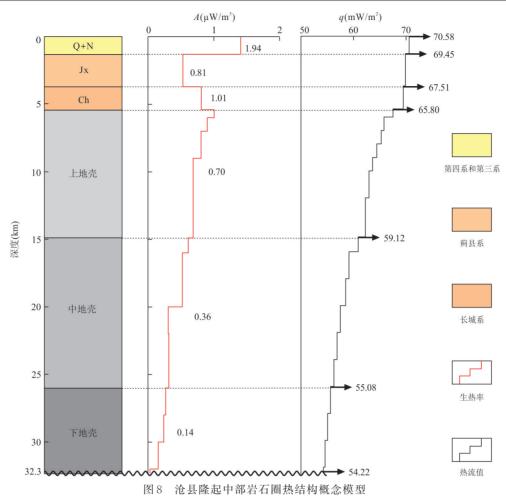


Fig.8 Conceptual model of lithospheric thermal structure in central Cangxian uplift

 $0\sim14.9~\rm km$,中地壳为 $14.9\sim26.0~\rm km$,下地壳为 $26.0\sim32.3~\rm km$. 研究区蓟县系热导率及岩石生热率特征为 GRY1 钻孔实测值,第三系及第四系放射性生热率参考前人对华北地台的研究取值(迟清华和焉明才,1998),中元古界长城系的热导率参考前人对于该地层的实测统计值(崔悦等,2020),中元古界长城系及以下至莫霍面各圈层的生热率利用 $V_{\rm p}$ -A关系式(5)计算得到,根据式(6)计算得到研究区岩石圈热结构,详见表 3.

由表 3 可知,沧县隆起中部地壳热流 q_c 为 16.36 mW/m²,地幔热流 q_m 为 54.22 mW/m², q_c / q_m =0.3,为"热幔冷壳"型,与前人对中国东部岩石圈热结构的分析一致(邱楠生等,2015).地幔热流占地表热流的比例达 69%以上,表明深部热源对本区的岩石圈热结构具有重要的控制作用.

在地壳结构划分和各层热流计算结果的基础上,建立研究区地壳生热率及岩石圈热结构概念模型,如图8所示,沧县隆起中部地壳生热率

总体上随着深度呈近指数衰减. 沧县隆起中部上、中、下地壳平均生热率分别为 $0.77~\mu W/m^3$ 、 $0.36~\mu W/m^3$ 、 $0.14~\mu W/m^3$. 沧县隆起中部上、中、下地壳放射性生热分别为 $11.46~m W/m^2$ 、 $4.05~m W/m^2$ 、 $0.87~m W/m^2$,占地壳热流比例分别为 70%、 25%、 5%,可以看出研究区地壳中的热流主要受上地壳及中地壳岩石放射性产热的影响.

根据已知地壳结构将莫霍面以上的岩层分为7层进行地温分布计算,对于钻孔达到的地层,即新生代和中元古代的部分地层,采用实际的钻井测温数据,确保数据的准确性,提高计算精度.对于钻孔未达到的地层,首先利用Cermak公式(公式7)对地层岩石的热导率进行校正,然后利用公式(6)计算地温.根据不同地层的热物性参数,经一维稳态热传导公式迭代计算出沧县隆起中部地下0~32km地温分布与地温梯度,其中,中元古界以下岩石放射性生热率为不同深度地震波速确定的生热率的加权平均值.在进行地温梯度计算时,地表温度取

表 4 沧县隆起中部地温分布计算结果

| Table 4 | Calculation | results of temi | perature dist | ribution in | central Cangxian uplift | |
|---------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------------------|--|

| | 结构层 | | 底界 埋深 (km) | 计算段 (km) | 各层 厚度 (km) | 校正后 热导率 (W/m/K) | 平均生 热率 (μW/m³) | 表面 热流 (mW/m²) | 各层面底 部地温 (℃) | 地温 梯度 (℃/km) |
|----------|------------------|-------|------------------|-----------------|------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| | 新生界 | 第四系 | 0.50 | 0~0.5 | 0.50 | - | 1.41 | 69.88 | 64.76 | 99.52 |
| | | 新近系 | 1.30 | $0.5 \sim 1.3$ | 0.80 | 2.04 | 0.53 | 69.45 | 87.45 | 28.36 |
| 上地壳 | 中元古界 | 蓟县系 | 3.70 | $1.3 \sim 3.7$ | 2.40 | 3.99 | 0.81 | 67.51 | 105.43 | 7.49 |
| _ | | 长城系 | 5.40 | $3.7 \sim 5.4$ | 1.70 | 3.84 | 1.01 | 65.80 | 134.94 | 17.36 |
| | 太古宇-古元古界变质岩系结晶基底 | | 14.90 | $5.4 \sim 14.9$ | 9.50 | 2.64 | 0.70 | 59.12 | 359.47 | 23.64 |
| 中地壳 | | 26.00 | $14.9 \sim 26.0$ | 11.10 | 2.30 | 0.36 | 55.08 | 635.15 | 24.84 | |
| 下地壳(莫霍面) | | | 32.20 | 26.0~32.2 | 6.20 | 2.97 | 0.14 | 54.22 | 749.15 | 18.39 |

研究区恒温带温度,恒温带深度为 25 m,恒温带温度为 15 °C. 计算结果见表 4. 总体来看,研究区 32 km 以浅地温梯度随深度增加逐渐降低,其中莫霍面温度约为 749 °C.将表 4 中计算的地温进行插值运算,可得研究区居里面深度约为 23.1~24.5 km. 澳大利亚地盾莫霍面温度为 420 °C,美国东部稳定区为660 °C,而美国西部盆地山脉省新生代构造活动区莫霍面温度可高达 1 000 °C以上(Hyndman et al., 1968; Lachenbruch, 1970; Lachenbruch and Sass, 1977),与研究区莫霍面温度进行对比,可以发现,沧县隆起中部介于构造稳定区和活动区之间.研究区较浅的居里面埋深,说明深部热流较大且更容易传导至地表,同时本区热流值较高,暗示着研究区深部可能存在干热岩孕热的良好环境.

在深部地温计算的基础上,估算了沧县隆起中 部的热岩石圈厚度范围,由图9可知,热岩石圈厚度 范围在85~96 km之间,研究区较薄的岩石圈使得 深部地幔的热量更加容易传导到地壳浅部,加上研 究区地壳表层沉积有热导率极低的巨厚的新近系 和第四系沉积层,使得研究区热储层受到一定程度 的隔热保温作用,从而使得研究区地热异常.位于 沧县隆起西侧的冀中坳陷的热岩石圈厚度在102~ 122 km 之间(崔悦等, 2020),位于沧县隆起东侧的 济阳坳陷的热岩石圈厚度为71~90 km(Qiu et al., 2014),综合前人研究成果发现,岩石圈厚度自西向 东逐渐变薄,进一步揭示了渤海湾盆地岩石圈厚度 的变化特征.研究区所在的沧县隆起位于渤海湾盆 地中西部,在中-新生代经历了一系列的构造活动 (李晨等,2021).200 Ma前,太平洋北部的库拉-太 平洋洋脊向亚洲东部边缘岛弧俯冲,使得中国东部 大陆应力场发生了巨大变化(张北航等,2021),从

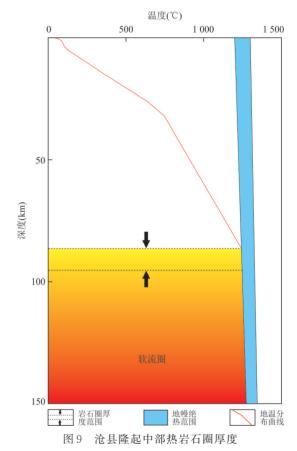


Fig.9 Thermal lithospheric thickness in central Cangxian uplift

而使得渤海湾盆地发育了一系列大型地堑构造.始新世到渐新世,受拉张作用的影响,岩石圈再次减薄.华北克拉通的破坏使岩石圈拉张减薄的程度存在差异,段永红等(2015)也根据地震资料认为华北克拉通东部中新生代岩石圈结构遭受了强烈改造和破坏,岩石圈厚度减薄至70~80 km.将上文计算的研究区热岩石圈厚度,与其东西侧区域进行对

比,结果充分表明了整个渤海湾盆地乃至华北克拉通的热岩石圈厚度呈现西厚东薄且自西向东逐渐减薄的特征.这种东西向的差异为华北克拉通破坏及岩石圈减薄的研究提供了新的地热学证据.

4 结论与建议

4.1 结论

本文以献县地热田为典型区,结合地温测井、岩石热物性测试分析等工作,研究了沧县隆起中部大地热流特征与岩石圈结构,计算了区域深部地温分布及热岩石圈厚度,得出结论如下:

- (1)献县地热田的地温分布受到构造的影响,凸起区地温梯度较高,凹陷区地温梯度较低;岩石热导率与深度没有明显的相关性,与地层岩性密切相关,浅部盖层热导率较小,基岩热导率较大;大地热流值为70.58 mW/m²,高于中国大陆地区平均热流值.
- (2)沧县隆起中部地壳热流 q_c 为 16.36 mW/m²,地幔热流 q_m 为 54.22 mW/m², q_c/q_m =0.3,为"热幔冷壳"型.研究区的热流主要来源于地幔热流,放射性元素衰变产热也具有一定贡献.根据深部地温的数值计算结果,得到沧县隆起中部居里面的深度约为 24 km,莫霍面温度约为 749 $^{\circ}$ C,热岩石圈厚度约为 85~96 km.

4.2 建议

- (1)通常区域尺度上将岩石圈基底简化为平缓的地层,对于开展区域上地热资源成因机理和地热资源普查研究具有一定的指导意义.往往大的区域上经历多期次复杂的构造运动,基底起伏不平,沧县隆起带内凸起和凹陷相间分布.在地热开发中,开展地热田尺度的热结构特征的精细研究十分必要,对于提高地热资源科学可持续开发也具有重要意义.比如开展凸起区和凹陷区地温场分布差异规律、研究区地层的不均一分布规律以及岩石热物性的空间分布特征等研究.
- (2)对于地层相对均匀分布的沉积地层,钻孔测温数据通常能够较好地反映区域地温场分布特征,但对于结构复杂的地质构造区,需要开展更多的钻孔测温等研究工作,全面准确地掌握地温场分布特征.随着国家大力发展地热清洁能源,更多的地热钻孔将为大地热流测量带来便利.加大大地热流值工作,不断丰富完善大地热流分布图,可为建立精准的区域热结构模型提供重要支撑.

Reference

- Anand, J., Somerton, W. H., Gomaa, E., 1973. Predicting Thermal Conductivities of Formations from other Known Properties. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 13(5): 267—273. https://doi.org/10.2118/4171-pa
- Artemieva, I. M., Mooney, W. D., 2001. Thermal Thickness and Evolution of Precambrian Lithosphere: A Global Study. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B8): 16387—16414. https://doi. org/10.1029/2000JB900439
- Cermak, V., Rybach, L., 1982. Thermal Conductivity and Specific Heat of Minerals and Rocks. In: Hellwege, K., Angenheister, G., ed., Physical Properties of Rocks. Springer, Berlin.
- 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).
- Clauser, C., Villinger, H., 1990. Analysis of Conductive and Convective Heat Transfer in a Sedimentary Basin, Demonstrated for the Rheingraben. *Geophysical Journal International*, 100(3): 393—414. https://doi. org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb00693.x
- Cui, Y., Zhu, C.Q., Qiu, N.S., et al., 2020. Geothermal Lithospheric Thickness in the Central Jizhong Depression and Its Geothermal Significance. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 1960—1969 (in Chinese with English abstract).
- Ding, Z. Y., Wang, L. S., Hu, W. X., et al., 2008. Reconstruction of Cenozoic Thermal History of Bohai Bay Basin with a Transient Heat Flow Model. *Acta Petrolei Sinica*, 29(5): 650-656 (in Chinese with English abstract).
- Duan, Y. H., Liu, B. J., Zhao, J. R., et al., 2015. 2-D P-Wave Velocity Structure of Lithosphere in the North China Tectonic Zone: Constraints from the Yancheng-Baotou Deep Seismic Profile. *Science in China* (*Series D*), 45(8): 1183—1197 (in Chinese).
- 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(1): 385—410. https://doi.org/10.1146/annurev.earth.031208.100051
- Gong, Y. L., Wang, L. S., Liu, S. W., 2011. The Thermal

- Structure and Thermal Evolution of Bohai Bay Basin in East China. Atomic Energy Press, Beijing (in Chinese).
- He, L. J., Hu, S. B., Huang, S. P., et al., 2008. Heat Flow Study at the Chinese Continental Scientific Drilling Site: Borehole Temperature, Thermal Conductivity, and Radiogenic Heat Production. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113(B2): B02404. https://doi. org/10.1029/2007jb004958
- Hou, G. T., Qian, X. L., Cai, D. S., 2001. The Tectonic Evolution of Bohai Basin in Mesozoic and Cenozoic Time. Acta Scicentiarum Naturalum Universitis Pekinesis, 37(6): 845-851 (in Chinese with English abstract).
- Huang, F., He, L. J., Wu, Q. J., 2015. Lithospheric Thermal Structure of the Ordos Basin and Its Implications to Destruction of the North China Craton. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(10): 3671-3686 (in Chinese with English abstract).
- Hyndman, R. D., Lambert, I. B., Heier, K. S., et al., 1968. Heat Flow and Surface Radioactivity Measurements in the Precambrian Shield of Western Australia. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1(2): 129— 135. https://doi.org/10.1016/0031-9201(68)90057-5
- Jia, S. X., Zhang, X. K., 2005. Crustal Structure and Comparison of Different Tectonic Blocks in North China. Chinese Journal of Geophysics, 48(3): 611-620 (in Chinese with English abstract).
- Lachenbruch, A. H., 1970. Crustal Temperature and Heat Production: Implications of the Linear Heat Flow Relation. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 75(17): 3291—3300. https://doi.org/10.1029/jb075i017p03291
- Lachenbruch, A. H., Sass, J. H., 1977. Heat Flow in the United States and the Thermal Regime of the Crust. In: Spilhaus, A. F., Managing, J., eds., The Earth's Crust, Its Nature and Physical Properties. *Geophysical Monograph*, 20: 332—359. https://doi.org/10.1029/ GM020p0626
- Li, C., Chen, S. Y., Lou, D., et al., 2021. Geochemical Characteristics and Signatures of Mesozoic Sandstones from Huanghua Depression. *Earth Science*, 46(8): 2903—2918 (in Chinese with English abstract).
- Liu, F., Wang, G. L., Zhang, W., et al., 2020. Terrestrial Heat Flow and Lithospheric Thermal Structure in the Middle Yanshan Region: A Case Study from the Qijia-Maojingba Geothermal Field in Chengde. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 1950—1959 (in Chinese with English abstract).
- Morgan, P., 1984. The Thermal Structure and Thermal Evo-

- lution of the Continental Lithosphere. *Physics and Chemistry of the Earth*, 15: 107—193. https://doi.org/10.1016/0079-1946(84)90006-5
- Njiteu Tchoukeu, C. D., Basseka, C. A., Djomani, Y. P., et al., 2021. Crustal Thickness, Depth to the Bottom of Magnetic Sources and Thermal Structure of the Crust from Cameroon to Central African Republic: Preliminary Results for a Better Understanding of the Origin of the Bangui Magnetic Anomaly. *Journal of African Earth Sciences*, 179: https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104206
- Pribnow, D., Williams, C. F., Sass, J. H., et al., 2013. Thermal Conductivity of Water-Saturated Rocks from the KTB Pilot Hole at Temperatures of 25 to 300 °C. Geophysical Research Letters, 23(4): 391—394. https://doi.org/10.1029/95GL00253
- Qiu, N. S., Wei, G., Li, C. C., et al., 2009. Distribution Features of Current Geothermal Field in the Bohai Sea Waters. *Oil & Gas Geology*, 30(4): 412-419 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, N. S., Zuo, Y. H., Chang, J., et al., 2014. Geothermal Evidence of Meso-Cenozoic Lithosphere Thinning in the Jiyang Sub-Basin, Bohai Bay Basin, Eastern North China Craton. *Gondwana Research*, 26(3—4): 1079—1092. https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.08.011
- 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., Hu, S. B., Zhu, C. Q., et al., 2013. The Characteristics of Heat Flow and Lithospheric Thermal Structure in Junggar Basin, Northwest China. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(8): 2760—2770 (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).
- Rudnick, R. L., McDonough, W. F., O'Connell, R. J., 1998. Thermal Structure, Thickness and Composition of Continental Lithosphere. *Chemical Geology*, 145(3—4): 395—411. https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00151-4
- Rybach, L., 1976. Radioactive Heat Production in Rocks and Its Relation to other Petrophysical Parameters. *Pure and Applied Geophysics*, 114(2): 309—317. https://doi.org/

10.1007/BF00878955

- Rybach, L., Buntebarth, G., 1984. The Variation of Heat Generation, Density and Seismic Velocity with Rock Type in the Continental Lithosphere. *Tectonophysics*, 103(1-4): 335-344.
- Sass, J. H., Lachenbruch, A. H., Moses, T. H. Jr, et al., 1992. Heat Flow from a Scientific Research Well at Cajon Pass, California. *Journal of Geophysical Re*search Atmospheres, 97(B4): 5017. https://doi.org/ 10.1029/91jb01504
- Schintgen, T., Förster, A., Förster, H. J., et al., 2015. Surface Heat Flow and Lithosphere Thermal Structure of the Rhenohercynian Zone in the Greater Luxembourg Region. *Geothermics*, 56: 93-109. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.03.007
- Shi, Y. Z., Rop, E., Wang, Z. C., et al., 2021. Characteristics and Formation Mechanism of the Olkaria Geothermal System, Kenya Revealed by Well Temperature Data. *Geothermics*, 97: 102243. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102243
- Wang, D. Y., Luo, Z. J., Liu, C. Y., 1997. Palaeozoic Hydrocaron Potential Evaluation for Cangxian Uplift. *Petroleum Exploration and Development*, 24(4): 8—11 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. S., Liu, S. W., Xiao, W. Y., et al., 2002. Distribution Feature of Terrestrial Heat Flow Densities in the Bohai Basin, East China. Chinese Science Bulletin, 47 (2): 151-155 (in Chinese).
- Wang, Z. T., Zhang, C., Jiang, G. Z., et al., 2019.
 Present-Day Geothermal Field of Xiongan New Area and Its Heat Source Mechanism. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(11): 4313-4322 (in Chinese with English abstract).
- Xue, Y. A., Zhao, M., Liu, X. J., 2021. Reservoir Characteristics and Controlling Factors of the Metamorphic Buried Hill of Bozhong Sag, Bohai Bay Basin. *Journal of Earth Science*, 32(4): 919-926. https://doi. org/10.1007/s12583-021-1415-1
- Zhang, B. H., Zhang, J., Qu, J. F., et al., 2021. Lüliang-shan: A Mesozoic Basement Involved Fold System in the Central North China Craton. *Earth Science*, 46(7): 2423-2448 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C., Jiang, G. Z., Shi, Y. Z., et al., 2018. Terrestrial Heat Flow and Crustal Thermal Structure of the Gonghe-Guide Area, Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Geothermics*, 72: 182—192. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.11.011

附中文参考文献

- 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.
- 崔悦,朱传庆,邱楠生,等,2020.冀中坳陷中部现今岩石圈 厚度及地热学意义探讨.地质学报,94(7):1960-1969.
- 丁增勇,王良书,胡文瑄,等,2008.利用岩石圈瞬态热流模型重建渤海湾盆地新生代热历史.石油学报,29(5):650-656
- 段永红,刘保金,赵金仁,等,2015.华北构造区岩石圈二维P波速度结构特征:来自盐城-包头深地震测深剖面的约束.中国科学(D辑),45(8):1183-1197.
- 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.
- 龚育龄,王良书,刘绍文,2011.中国东部渤海湾盆地热结构和热演化.北京:原子能出版社.
- 侯贵廷,钱祥麟,蔡东升,2001.渤海湾盆地中、新生代构造演 化研究.北京大学学报(自然科学版),37(6):845-851.
- 黄方,何丽娟,吴庆举,2015. 鄂尔多斯盆地深部热结构特征及其对华北克拉通破坏的启示. 地球物理学报,58 (10): 3671-3686.
- 嘉世旭,张先康,2005.华北不同构造块体地壳结构及其对比研究.地球物理学报,48(3):611-620.
- 李晨, 陈世悦, 楼达, 等, 2021. 黄骅坳陷中生界砂岩地球化学特征及意义. 地球科学, 46(8): 2903-2918.
- 刘峰,王贵玲,张薇,等,2020.燕山中部大地热流及岩石圈 热结构特征:以承德市七家-茅荆坝地热田为例.地质 学报,94(7):1950-1959.
- 邱楠生,魏刚,李翠翠,等,2009. 渤海海域现今地温场分布特征. 石油与天然气地质,30(4):412-419.
- 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, 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. 地球物理学报, 56(8): 2760-2770.
- 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.
- 王定一, 罗铸金, 刘池阳, 1997. 沧县隆起地区古生界油气远景评价. 石油勘探与开发, 24(4): 8-11.
- 王良书, 刘绍文, 肖卫勇, 等, 2002. 渤海盆地大地热流分布特征. 科学通报, 47(2): 151-155.
- 王朱亭, 张超, 姜光政, 等, 2019. 雄安新区现今地温场特征及成因机制. 地球物理学报, 62(11): 4313-4322.
- 张北航, 张进, 曲军峰, 等, 2021. 吕梁山——华北克拉通中部中生代基底卷入褶皱系统. 地球科学, 46(7): 2423-2448.