

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.031>



复杂热传递作用下冀中坳陷深、浅部地热资源差异分布

江晓雪^{1,2}, 朱传庆^{1,2*}

1. 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249
2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

摘要: 渤海湾盆地冀中坳陷地热资源开发潜力巨大, 但目前仅对浅部中一低温地热资源的成因机制进行了大规模的研究, 深部高温地热资源成因机制尚不明确。以区域地质、地热地质、岩石热物性为基础, 分析了研究区深部温度场特征和控制因素, 探究了传导一对流复杂热传递作用下深部高温聚热机制。渤海湾盆地冀中坳陷地温梯度和大地热流较高, 地温梯度介于 27.4~39.7 °C/km, 平均约 34.8 °C/km, 大地热流主要分布在 50~70 mW/m² 之间。地温场受到岩石热导率、基底构造起伏以及地下水流动的影响, 平面和垂向分布均表现出复杂的差异性。通过实测数据计算研究区深部地温, 认为凸起区浅部温度高但深部温度低, 凹陷区浅部温度低深部温度高。因此形成了冀中坳陷 5 000 m 内高温地热资源主要分布在凹陷区深部的特征, 地层温度可达 190 °C, 可作为潜在干热岩勘探的有利目标。从地质构造、源、储、盖、流体等方面研究了冀中坳陷凸起区水热型地热资源和深部潜在干热岩型地热资源的特征, 建立了浅部凸起区水热型地热资源与深部凹陷区潜在干热岩地热资源聚集模式。研究加深了对冀中坳陷乃至渤海湾盆地深部高温地热成因机制和分布规律的认识, 对干热岩地热资源的开发利用具有参考价值。

关键词: 地温场; 地热资源; 热折射; 热对流; 干热岩; 渤海湾盆地; 地球物理学。

中图分类号: P314.2

文章编号: 1000-2383(2025)04-1485-14

收稿日期: 2023-06-01

Different Distribution of Deep and Shallow Geothermal Resources in Jizhong Depression under Complex Heat Transfer

Jiang Xiaoxue^{1,2}, Zhu Chuanqing^{1,2*}

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China
2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

Abstract: The Jizhong Depression, Bohai Bay Basin, has enormous potential for geothermal resource development, but currently only the genesis mechanism of shallow to mid-temperature geothermal resources has been extensively researched, and the genesis mechanism of deep and high-temperature geothermal resources remains unclear. Based on regional geology, geothermal geology, and rock thermal properties, in this study it analyzed the characteristics and controlling factors of the deep temperature field in the study area and explored the deep and high-temperature heat accumulation mechanism under complex heat transfer processes of conduction and convection. The temperature gradient and heatflow in Jizhong Depression of the Bohai Bay Basin are relatively high, with a temperature gradient ranging from 27.4 °C/km to 39.7 °C/km, with an average of about 34.8 °C/km, and a heatflow ranging from 50 mW/m² to 70 mW/m². The temperature field is affected by rock thermal conductivity, basement structures, and

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 42172334); 国家重点研发计划课题项目(No. 2021YFA0716003)。

作者简介: 江晓雪(1997—), 女, 在读博士生, 从事地热资源成因机制研究。ORCID: 0009-0007-1400-9646. E-mail: jiangxiao135@163.com
* **通讯作者:** 朱传庆(1981—), 男, 教授, 博士生导师, ORCID: 0000-0002-5951-6904. E-mail: zhucq@cup.edu.cn

引用格式: 江晓雪, 朱传庆, 2025. 复杂热传递作用下冀中坳陷深、浅部地热资源差异分布. 地球科学, 50(4): 1485—1498.

Citation: Jiang Xiaoxue, Zhu Chuanqing, 2025. Different Distribution of Deep and Shallow Geothermal Resources in Jizhong Depression under Complex Heat Transfer. *Earth Science*, 50(4): 1485—1498.

groundwater flow, and has complex differences in both plane and vertical distribution. Based on measured data, it was found that the shallow temperature is high but the deep temperature is low in the convex areas, and the shallow temperature is low but the deep temperature is high in the depressed areas, leading to the deep and high-temperature geothermal resources largely concentrated in the depressions within 5 000 m depth in Jizhong Depression, with the reservoir temperature reaching 190 °C, and which can serve as potential favorable targets for exploring hot dry rock resources. The characteristics of hydrothermal geothermal resources in the uplift area and deep potential hot dry rock geothermal resources in the Jizhong Depression are studied from the perspectives of geological structure, source, storage, cap, and fluid, and a model of the accumulation of shallow hydrothermal geothermal resources and deep potential hot dry rock geothermal resources in the studied area was established. This study deepened our understanding of the genesis mechanisms and distribution patterns of deep and high-temperature geothermal resources in Jizhong Depression and even the Bohai Bay Basin, and has significant reference value for the exploration and utilization of hot dry rock geothermal resources.

Key words: geothermal field; geothermal resources; thermal refraction; thermal convection; hot dry rock; Bohai Bay Basin; geophysics.

地热能具有分布范围广,绿色清洁、可循环再生等特点,目前已经成为各国新能源发展的焦点(蔺文静等,2013;许天福和张炜,2016;李根生等,2022;Sun *et al.*, 2023).相较于中低温地热资源,高温地热资源具有储量大、利用方式多样等优势(王贵玲等,2017).冀中坳陷是渤海湾盆地内部的次级构造单元,是一个发育在华北地台之上的中、新生代断裂—坳陷盆地(张以明等,2017).陈墨香(1988)根据钻孔实测温度研究了冀中坳陷地区现今地温梯度的分布特征,结果表明该地区现今地温梯度和大地热流普遍较高,具有良好的地热背景.常健等(2016)对冀中坳陷28口系统测温和89口试油温度的地温梯度进行计算,明确了该地区地温场特征,同时计算了岩石圈结构和热岩石圈厚度,为后续该地区地热资源的研究提供数据资料、理论基础.郭飒飒等(2020)、曹瑛倬等(2021)为冀中坳陷内部雄安新区水热型地热田建立了成因模式.赵子锐等(2023)针对冀中坳陷高阳地热田水文地球化学特征进行分析,明确了热储接受大气降水补给进入热储层的过程.目前,冀中坳陷水热型地热资源的开发利用已初具规模,如雄安新区、天津等地的地热供暖和梯级利用,但深部高温地热资源分布规律及聚热模式尚未取得明确认识,这制约了高温地热资源勘探开发.本文以深部高温地热资源为对象,以测温资料、热物性数据为基础,采用有限元数值模拟方法对研究区深部地层温度分布、聚热机制进行研究,指出了研究区深、浅部不同地热资源的差异分布特征,建立了研究区深部高温聚集模式.

1 地质概况

冀中坳陷位于渤海湾盆地西北部,是华北古地台基底上发育起来的中、新生代沉积坳陷,北起燕山褶皱带,南至邢衡潜伏隆起,西起太行山,东抵至沧县隆起,呈北东—南西走向,面积约为 $2.84 \times 10^4 \text{ km}^2$ (刘念等,2023).冀中坳陷在中生代强烈的挤压和新生代伸展作用下形成一系列正断层、反向正断层,将研究区分为多个次级箕状凹陷、古潜山构造单元等,如容城凸起、牛驼镇凸起、高阳凸起、霸县凹陷、徐水凹陷等(图1)(龚育龄等,2011).

冀中坳陷地层发育较全,基底由太古宇及下元古界的一套复杂变质岩系组成,上覆沉积了中上元古界长城系、蓟县系地层,岩性为碳酸盐岩和少量碎屑岩;下古生界寒武系、奥陶系地层以石灰岩、白云岩夹泥页岩为主;上古生界发育石炭系、二叠系地层岩性以泥岩、炭质泥岩及煤层为主;中生界、新生界主要以陆相碎屑岩沉积为主(阎敦实和于英太,2000).

冀中坳陷发育不同类型地热资源,目前已探明的地热资源主要为水热型地热资源,分布在研究区古潜山地区、凸起区(董月霞等,2021;朱喜等,2023).热储层主要为中元古界、下古生界寒武系和奥陶系碳酸盐岩,长期的构造抬升使得碳酸盐岩层接受风化淋滤、岩溶及白云岩化作用,形成了大量的溶孔、裂缝以及溶洞,这些孔、缝、洞在空间上相互连通,成为水热型地热资源的主要储集空间.研究区内部凹陷元古界碳酸盐岩溶蚀作用弱,成岩作用以压实、胶结作用为主,储层发育较差,岩层具有低孔隙度、低渗透率的特点,平均孔隙度为 1.9%,平均渗透率为 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于致密岩层.因此冀中

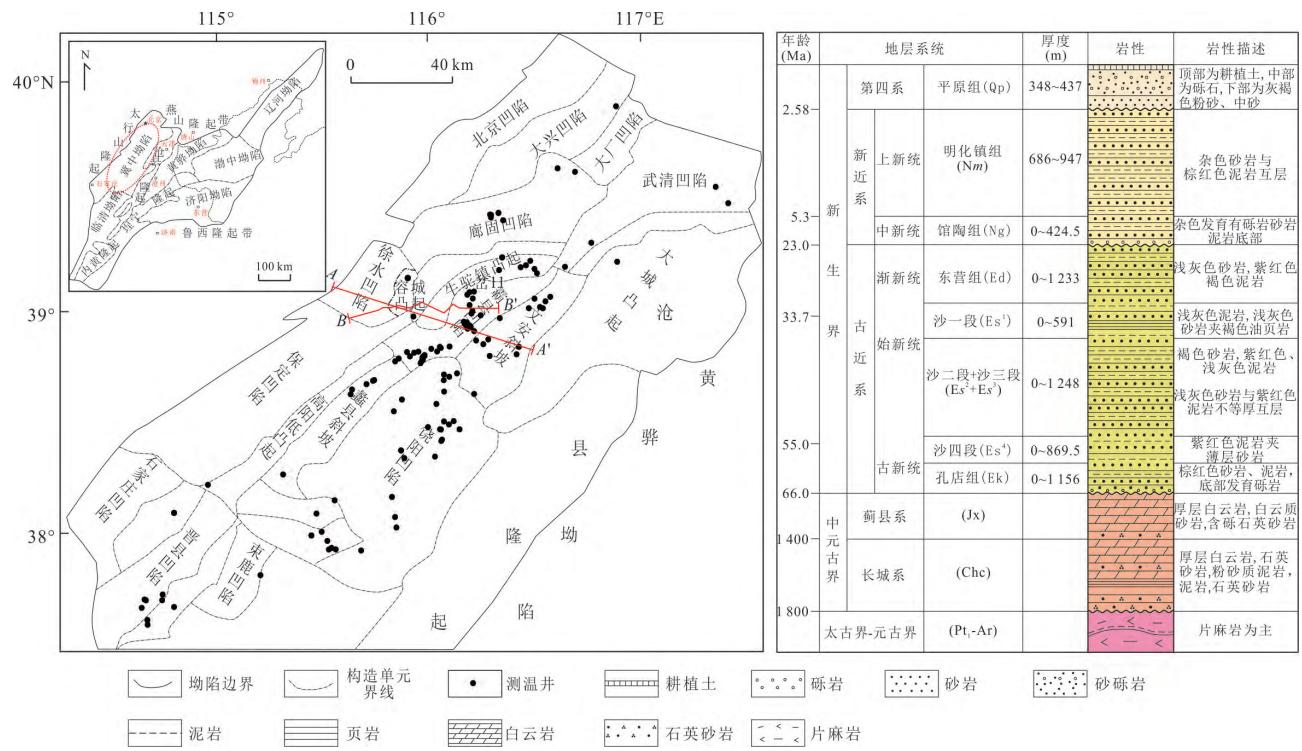


图1 冀中坳陷位置及构造单元图

Fig.1 Location and tectonic unit map of Jizhong Depression

改自常健等(2016)

坳陷潜山地区、凸起区适合发育水热型地热资源,而凹陷区由于深部地层属于致密地层,可作为干热岩地热资源聚集的有利区域(郭瑞婧等,2023)。

2 地温场特征及主控因素

2.1 井温资料

钻井测温是研究地温场特征的基础资料,可用于反映地下岩层的原始温度(毛官辉等,2023)。本文共收集了冀中坳陷20余口系统测温数据、100余口试油温度数据。如图2所示,试油温度与地层深部呈近似线性关系,表明研究区地层符合传导型地温场的一般规律,但存在一部分温度值的偏离。凸起区数据与凹陷区的对比显示,浅部地层中凸起区试油温度高而凹陷区试油温度低,随着地层深度增加,凸起区与凹陷区温度差异较小,甚至出现凹陷区温度略高于凸起区温度的情况。利用试油温度数据计算地温梯度,凸起区浅部和深部地温梯度差异显著,浅部层位地温梯度大,为41.8 °C/km,深部层位地温梯度较小,为30.7 °C/km。凹陷区地温梯度随深度无明显变化,总体在28.9 °C/km,与凸起区深部地温梯度差异较小。系统测温曲线的形态可反映地

热地质信息,如高渗透层的分布、导水断裂位置、地下水补给等等。根据研究区系统测温曲线图3可知,一部分钻井测温曲线总体表现为传导型;一部分井如D13井,约1 000 m以浅为传导型,1 000 m以深热能主要以对流方式进行传递。

2.2 岩石热物性

本次研究收集到前人发表的研究区相关实测热导率数据418个,层位涉及新生界、中生界、古生界以及基底,岩性主要有砾岩、细砂岩、粉砂岩、石灰岩、白云岩、变质岩,得到岩石热导率数据的分布范围如图4所示(阎敦实和于英太,2000;龚育龄等,2011;王朱亭等,2022;段和肖等,2023)。岩石热导率总体介于0.81~7.67 W/(m·K),其中砾岩的热导率主要在1.32~1.76 W/(m·K)之间,平均约1.47 W/(m·K);泥岩、中粗砂岩热导率相差较小,主要集中在1.00~3.00 W/(m·K),泥岩的平均热导率为1.81 W/(m·K)、中粗砂岩的平均热导率为1.73 W/(m·K);粉砂岩的热导率较高,介于1.00~4.00 W/(m·K)之间,平均约2.16 W/(m·K);石灰岩平均热导率值为2.71 W/(m·K);白云岩热导率值变化较大,介于2.13~7.37 W/(m·K)之间,平均热导率值明显较高,约5.11 W/(m·K);基底以花岗片麻岩等

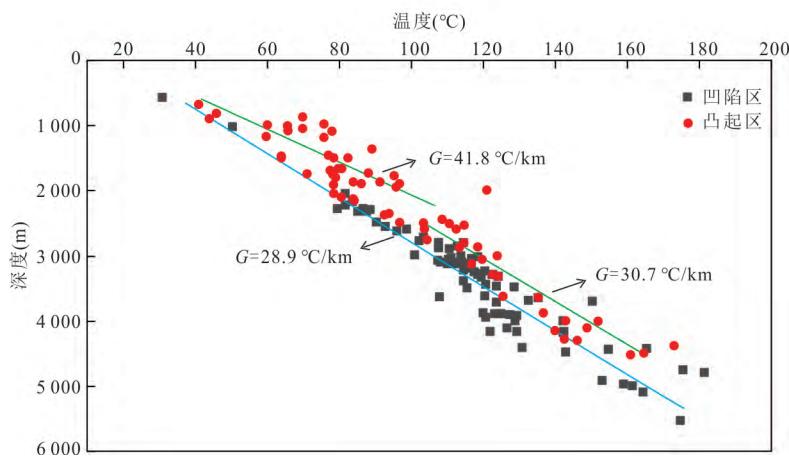


图 2 试油温度—地层深度变化
Fig. 2 Oil test temperature data diagram

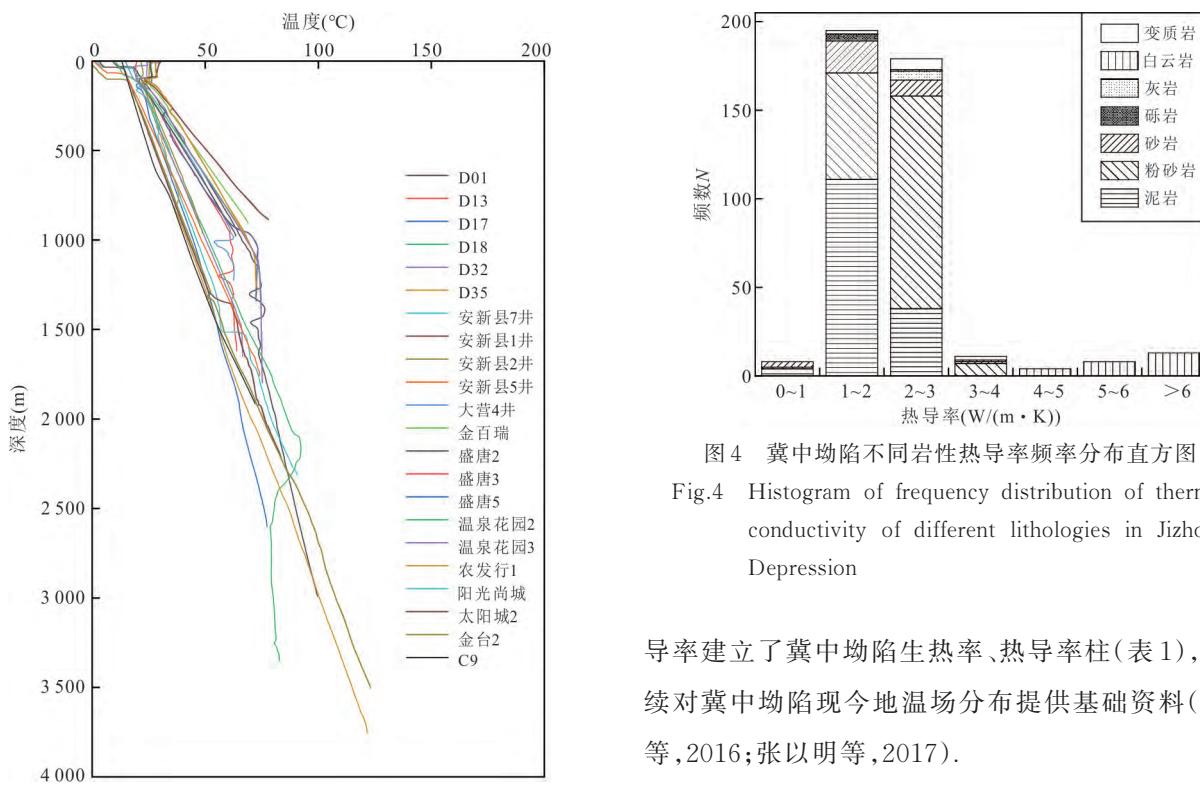


图 3 冀中坳陷系统测温曲线
Fig. 3 System temperature measurement curve of Jizhong Depression

变质为主,样品数据较少主要分布在 $2.00\sim3.00\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 之间,平均约 $2.82\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

岩石生热率是研究热流、岩石圈热结构、热源成因以及深部地层温度分布等的重要参数 (Cui *et al.*, 2022)。本研究收集了前人对研究区不同地层岩石生热率的实测数据并结合不同地层、岩性的热

导率建立了冀中坳陷生热率、热导率柱(表 1),为后续对冀中坳陷现今地温场分布提供基础资料(常健等,2016;张以明等,2017)。

2.3 地温梯度

地温梯度主要受到地层结构特征、岩石热物性差异以及地层水活动等因素的影响 (Zhu *et al.*, 2022)。冀中坳陷的部分系统测温曲线表明,除不同地层因热导率差异造成的地温梯度变化外,深部存在强烈的温度扰动,且扰动通常在中、新生代地层中显现,当进入元古界碳酸盐岩地层时,地温梯度显著减小甚至趋近于零或负值。碳酸盐岩层段内部温度均一,表明该地区除热传导外还存在热对流现

象(图5)。

根据龚育龄等(2011)和阎敦实和于英太(2000)的试油数据以及系统测温数据,对各井地温梯度进行计算,绘制出冀中坳陷地温梯度平面分布图(图6).为避免因测点数量有限且分布不均而导致的“丛聚效应”带来的计算偏差,本文采用崔悦(2020)的方法,以 $5' \times 5'$ 间距对冀中坳陷地温梯度数据进行了网格插值处理.结果显示,冀中坳陷地温梯度主要在 $27.4\sim39.7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 之间,平均值为

表1 冀中坳陷岩石生热率、热导率柱

Table 1 Rock heat generation rate and thermal conductivity column in Jizhong Depression

地层	岩性	A ($\mu\text{W}/\text{m}^3$)	K ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)
新生界(E+N)	砂岩		
	泥岩	1.16	2.18
	白云岩		
中生界(Mz)	砂岩		
	泥岩	1.26	1.77
	砂岩		
古生界(Pz)	泥岩	0.72	3.26
	灰岩、白云岩		
	白云岩	0.46	5.11
中元古界蓟县系 (Pt ₂)	砂岩		
	白云岩、灰岩	0.94	4.36
太古界(Ar)	变质岩(花岗片麻岩)	0.20	2.82

注:数据来源于:张以明等,2017;龚育龄等,2011;王朱亭等,2019;Cui *et al.*, 2022.

$34.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$.从图6可知,该区域地温梯度的分布受构造、断裂展布方向的影响,容城凸起、高阳凸起以及牛驼镇凸起等隆起区为地温梯度高值区域($36.0\sim42.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$),低值区位于研究区西部北京—石家庄凹陷一带,与基底凹凸相间的地貌格局呈良好的对应关系.

2.4 大地热流

选取第四系以下对流层以上地层作为计算段,即温度随深度线性增加的测温区间,用于求取热流值.本次研究共收集到75个冀中坳陷实测热流数据,并通过实测岩石热导率以及地层温度数据计算得到了92个热流数据(陈墨香,1988;阎敦实和于英太,2000;龚育龄等,2011;汪集旸等,2012;常健等,2016).

冀中坳陷热流值主要分布在 $50\sim70\text{ mW/m}^2$,平均热流值为 $(66\pm7.5)\text{ mW/m}^2$,高于华北地区平均热流值 62 mW/m^2 .部分地区热流值超过 100 mW/m^2 ,可能受到深部流体沿着断裂向上形成热对流的影响(陈墨香,1988).

根据冀中坳陷地表热流分布图(图7)可知,冀中坳陷具有西部地区热流值较低,东部地区热流值较高,凸起区热流值高、凹陷区热流值低的特点.如,容城凸起、牛驼镇凸起、大城凸起区以及沧县隆起区均存在热流值大于 85 mW/m^2 的测点;而廊固凹陷、霸县凹陷、饶阳凹陷等地区热流主要分布在 $48\sim57\text{ mW/m}^2$ 之间,与研究区地温梯度分布规律

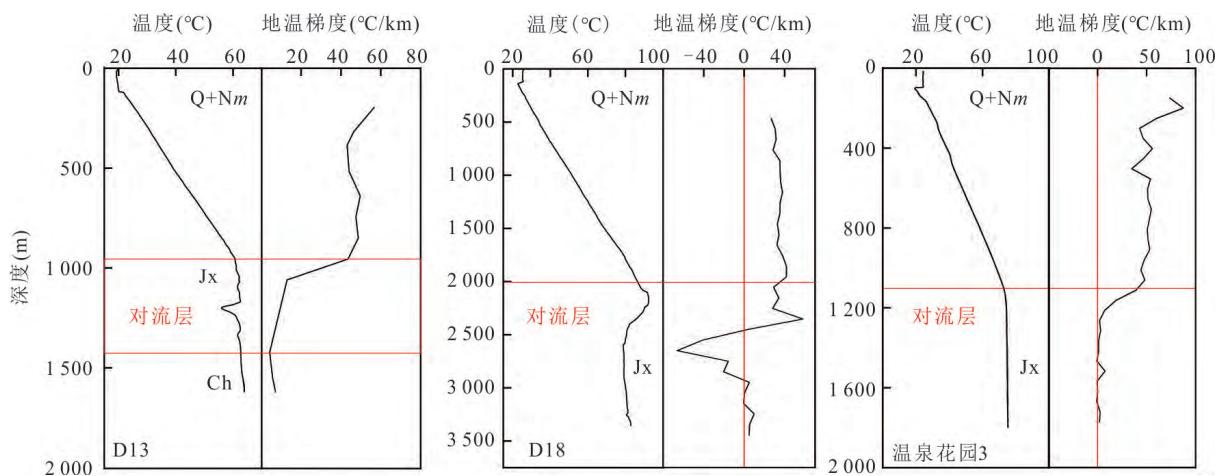


图5 冀中坳陷部分井地温梯度—深度图

Fig.5 Geothermal gradient-depth map of some wells in Jizhong Depression

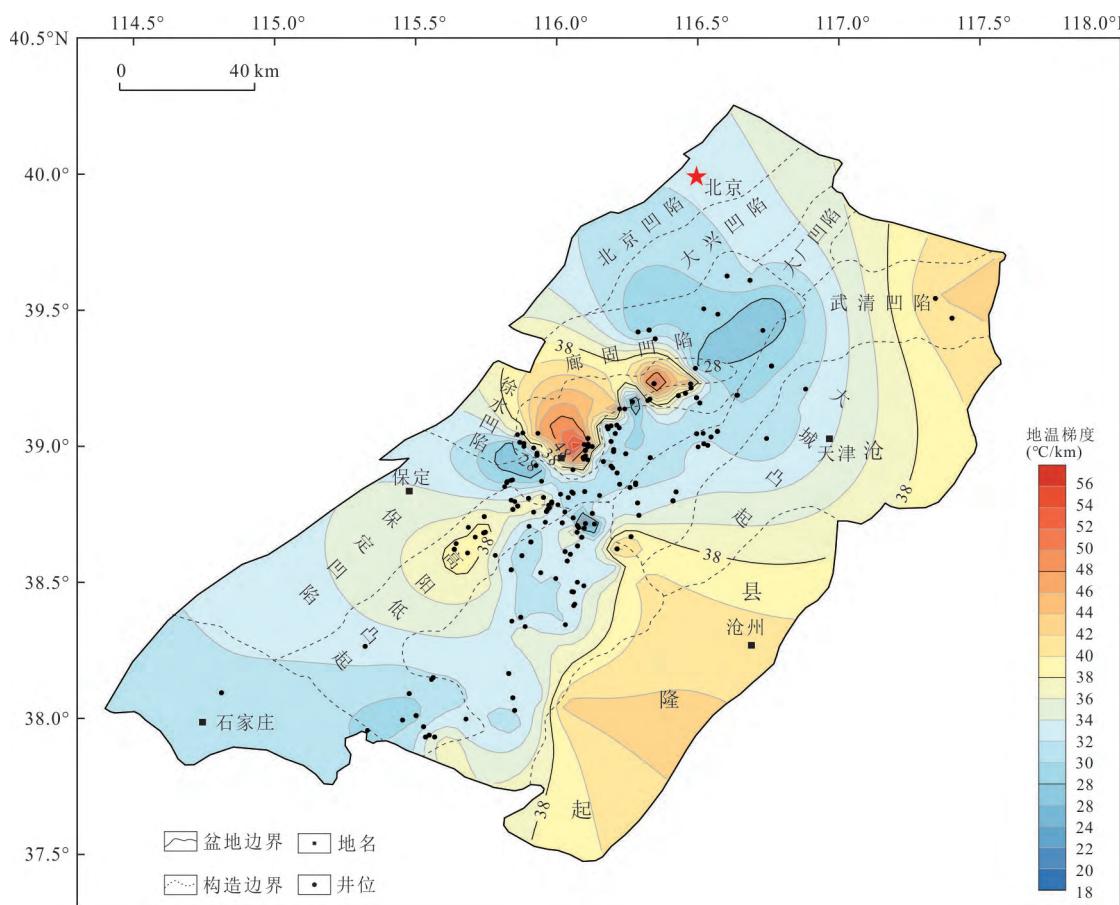


图6 冀中坳陷地温梯度平面分布

Fig.6 Plane distribution of geothermal gradient in Jizhong Depression

相一致,与该地区构造格局存在对应关系.

2.5 地温场控制因素

冀中坳陷浅部地层温度呈现出凸起区高、凹陷区低的特点,然而在深部,系统测温和试油温度显示了相反的情况,即出现了深部凹陷区地层温度高、凸起区地层温度较低的现象。郭飒飒(2020)认为隆起区和凹陷区的构造形态导致岩石热导率在水平与垂直方向上的差异,使得热流重新分配造成冀中坳陷地温场分布与基底起伏具有良好的对应关系;王朱亭等(2022)指出研究区内部地区的异常高热流值与地下水对流活动有一定影响。但对于深部温度分布的影响以及对流层对下伏地层温度的影响等尚不明确,制约了深部高温形成机制的认识。本次研究从岩石圈结构、热导率差异、地下水活动3个方面对地温场深、浅差异性分布进行定量研究,为后续地层温度计算提供依据。

2.5.1 岩石圈热结构 岩石圈热结构是影响地表热流最直接的因素,也是研究地热田热源机制的核心内容(汪集旸等,2012; Dai *et al.*, 2024). 冀中坳

陷在形成过程中,受到西太平洋板块的俯冲,软流圈熔融物质向两侧运动,导致华北克拉通东部地区受到明显破坏,岩石圈减薄、深部地幔物质上涌,莫霍面处于隆起状态。通过冀中坳陷人工地震、大地电磁测深资料,建立了冀中坳陷地壳分层结构模型,结合前人对研究区地表热流以及地幔热流的计算工作,绘制出冀中坳陷深部结构剖面—热流图(图8),其剖面位置如图1所示。霸县凹陷地幔热流值相对比凸起区较高,地幔热流约 38 mW/m^2 ,约占地表热流的 61%,主要是地幔供热。该地区灰岩、白云岩以及片麻岩等生热率均相对较低,因此放射性生热是研究区次要热源。

2.5.2 热折射 研究区浅部大地热流与地温梯度均呈现出“凸起区高、凹陷区低”的趋势,主要是受到构造起伏以及地下水活动的影响.由于基底构造形态差异,地区呈现出隆起与凹陷相间的分布格局,导致地层岩性分布相对不均、热导率差异大,进而引发热流向上传递过程中的“热折射”现象(朱传庆等,2022).通常,热流更趋向于向热导率高的地区

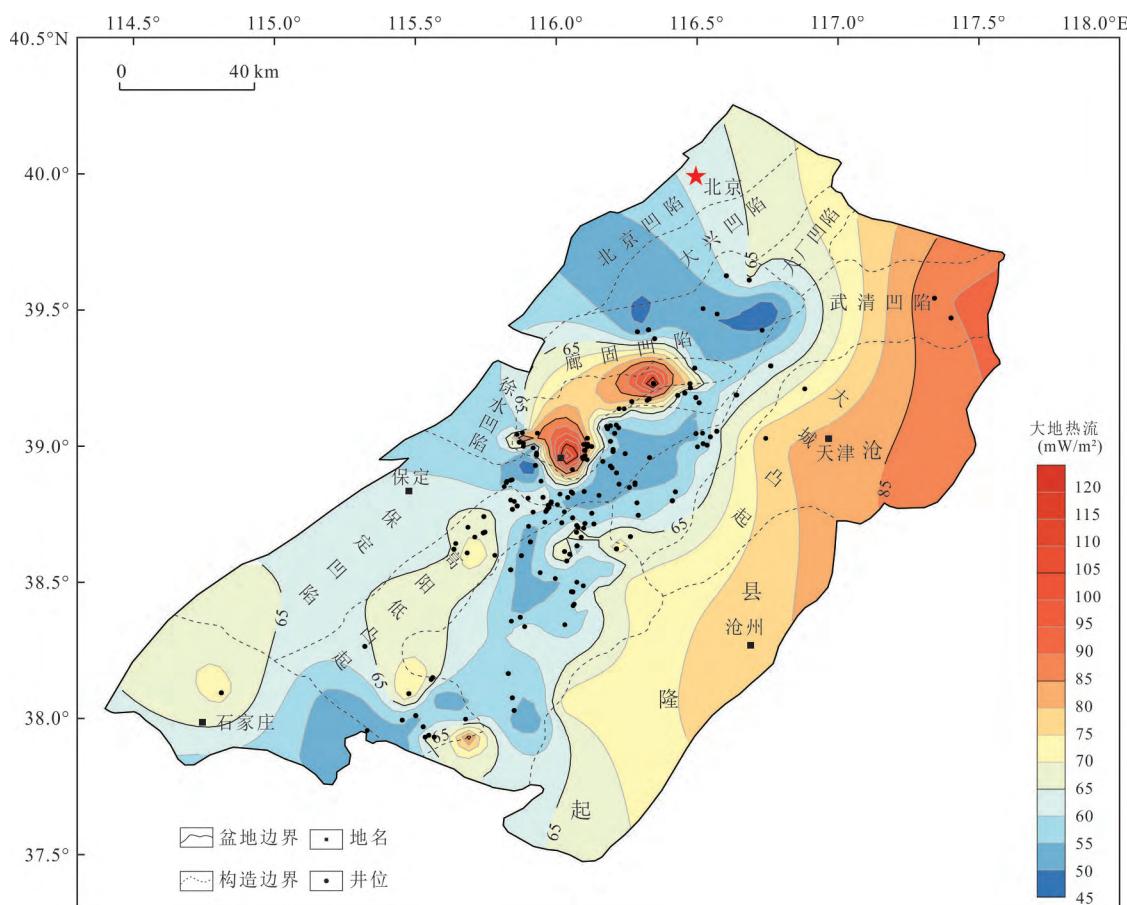


图7 冀中坳陷大地热流平面分布

Fig.7 Plane distribution of terrestrial heat flow in Jizhong Depression

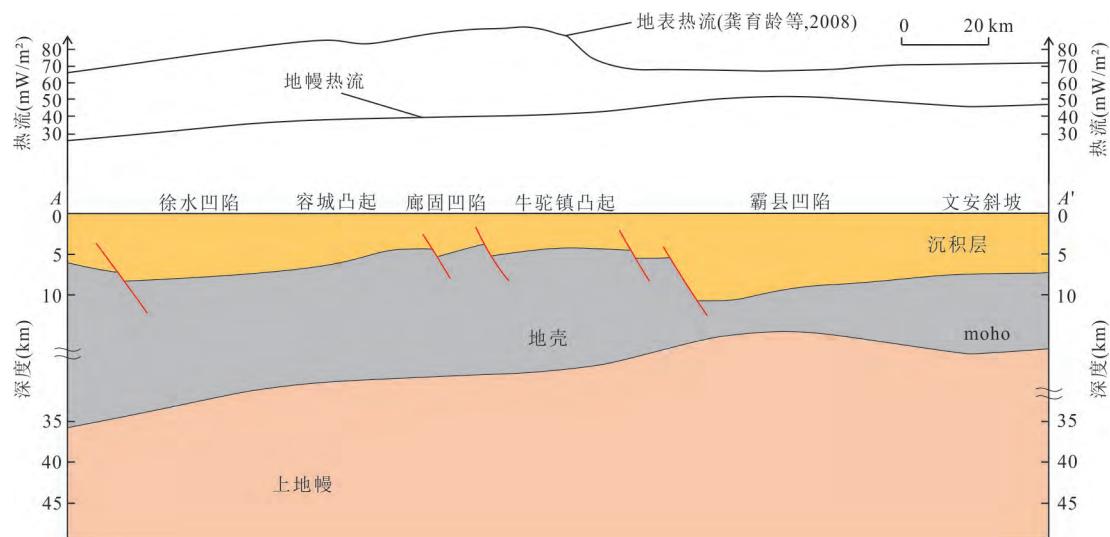


图8 冀中坳陷深部结构剖面—热流图

Fig.8 Deep structure profile-heat flow map of Jizhong Depression

改自 Cui et al. (2022)

偏折,导致局部地区热流汇聚和地层温度升高(熊亮平和张菊明,1984).由冀中坳陷典型地质剖面可

知(图9)可见(剖面位置图1所示),凸起区低热导率新生界盖层较薄,下伏高热导率雾迷山组白云岩层

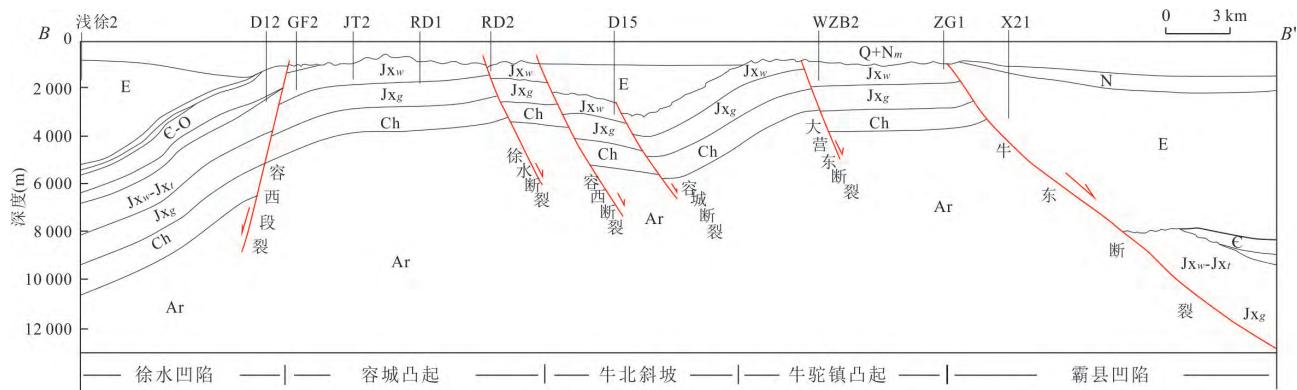


图 9 冀中坳陷区域构造及地层剖面图(改自戴明刚等,2020)

Fig.9 Regional structural and stratigraphic profile of Jizhong Depression (adapted from Dai et al., 2020)

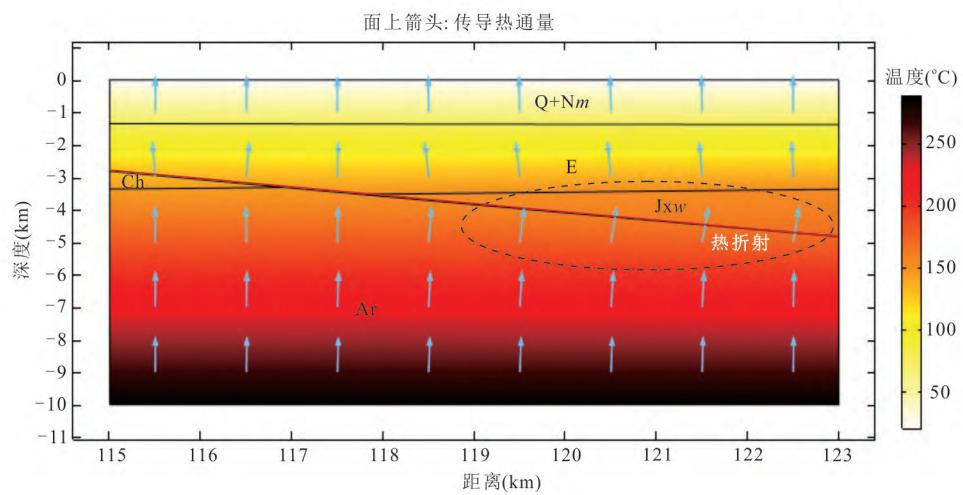


图 10 断层“热折射”数值模拟

Fig.10 Numerical simulation of fault 'thermal refraction'

蓝色箭头表示热流方向和大小

埋深浅,凹陷区低热导率新生界盖层较厚,下伏高热导率白云岩层埋深深,促使热流向凸起区浅部汇聚,使得其地层温度升高.然而,系统测温与试油温度数据表明,随着地层深度增大,地层温度逐渐呈现出与浅部温度相反的趋势,其特征为“凸起区温度低,凹陷区温度高”.本次研究根据地质剖面建立模型,进行地温场模拟,结果如图 10 所示.容城凸起、牛驼镇凸起地区 5 000 m 地层以基底变质岩为主,霸县凹陷受断层影响 5 000 m 埋深地层以碳酸盐岩为主.图中箭头代表热流流传导方向,底部热量相同,在向上传递的过程中,热流向高热导率的霸县系地层汇聚,传递方向发生偏折,造成凹陷区深部地层温度的升高.根据钻井资料显示,霸县凹陷碳酸盐岩储层上覆沉积了砂岩、泥岩、砂泥岩互层,热导率较低可作为良好的盖层,防止热量的散失,

为霸县凹陷深部形成地热资源提供有利条件.

2.5.3 地下水活动 研究区凸起、潜山区域浅部地层温度受到地下水对流作用的控制.研究区广泛发育深大断裂,这些断裂成为深部热量向浅部传导的通道,使得浅部地层温度显著增高.部分井在碳酸盐岩层内温度高度均一,这是由于该地区地壳抬升、剥蚀接受风化淋滤、岩溶及白云岩化作用,使得雾迷山组碳酸盐岩形成了大量的孔洞,促进地下水对流的发生(郭瑞婧等,2023).王朱亭等(2022)对研究区雄安地区热流异常值与对流层的关系进行分析并建立数值模型,得出高渗透层埋深越大其盖层地温梯度越小,沉积层热流值越小,对流层对地表热流的影响越小;当埋深一定时,地下水对流对地表热流值的影响会随着对流层厚度的增大而增大.本次研究在此基础上进行了定量分析,建立了水热

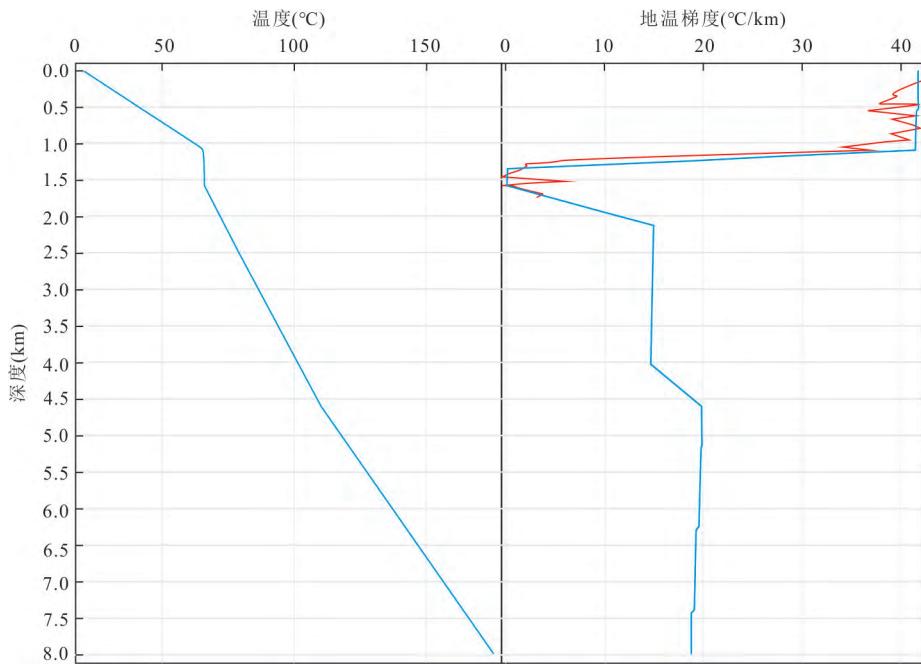


图11 模拟计算结果与实际测量数据对比
Fig.11 The simulation results compared with the measurement data

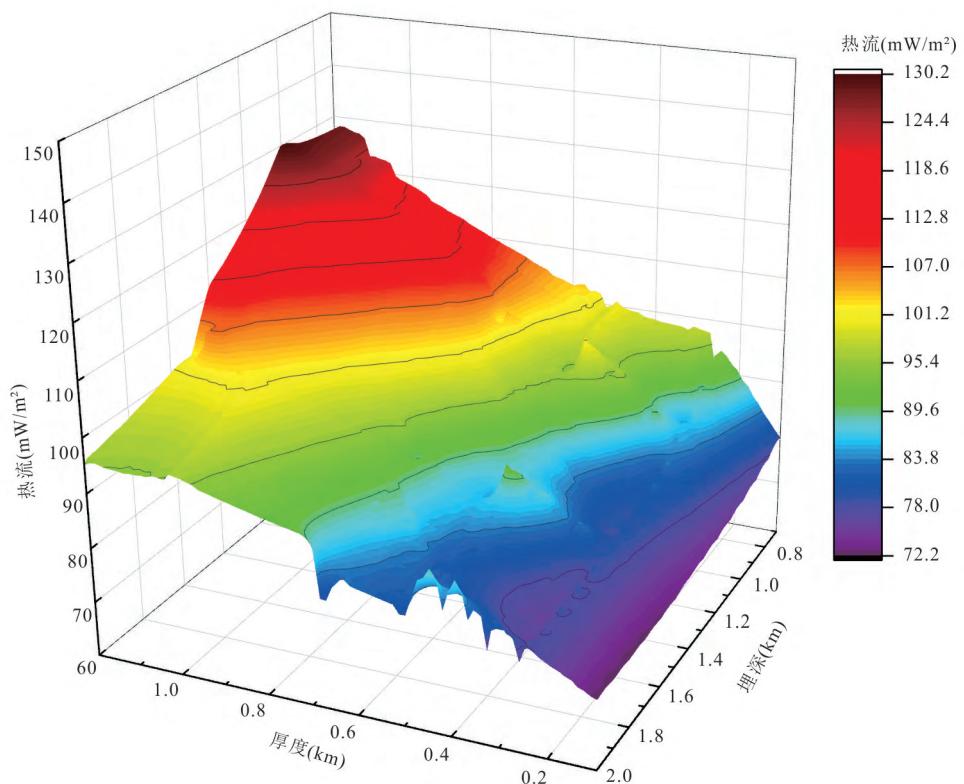


图12 COMSOL模拟对流层厚度、埋深与地表热流关系
Fig. 12 Relationship between thickness of the convective layer, burial depth, and surface heat flow as simulated by COMSOL

耦合的概念模型,研究了对流层厚度、对流层埋深与地表热流值之间的定量关系,由此反演出凸起区不同钻井的对流层厚度,为后续深部地温场的精确建立提供依据.利用 COMSOL 模拟软件模拟出定埋深时,对流层厚度从 0.1~1.0 km 的温度、地表热流变化以及对流层厚度一定时,其埋深范围从 0.7~1.2 km 的地表热流变化.将模拟结果与实际测温曲线温泉花园 3 进行对比,图 11 中蓝线代表本次模拟的结果,红色为实际地层的钻井测曲线,两者呈现出较好的拟合度.对流层内部温度一致,而其上覆与下伏地层温度随深度线性增大,表明本次模拟实验中,溶蚀性白云岩层内发生的热对流是影响地温场的因素之一.根据模拟结果绘制出不同对流层厚度和埋深与地表热流关系(图 12)并利用多元回归方法拟合出对流厚度与地表平均热流的数学关系公式(1),其 R^2 为 0.915 32,拟合关系式可靠.

$$Z = 87.375 + 40.485 8x - 12.500 4y, \quad (1)$$

式中: x 是对流层厚度, km; y 为对流层顶面埋深, km; Z 为地表热流, mW/m^2 .

3 地热资源分布特征及模式

3.1 高温地热资源分布特征

结合研究区地温场分布特征及主控因素分析,选择典型的凸起区与凹陷区,计算不同埋深(2 000~5 000 m)的地层温度,明确高温地热资源分布特征.

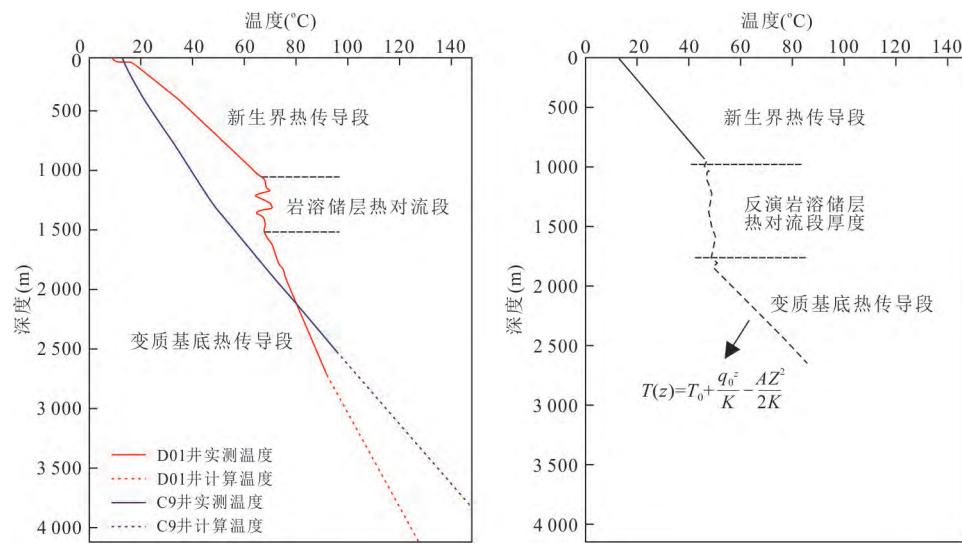


图 13 研究区不同构造单元代表性测温曲线及分层计算深部温度方法示意

Fig. 13 Typical temperature measurement curves and layered calculation method for deep temperature in different structural units of the research area

根据图 13 中不同构造单元的代表性测温曲线显示,由于热传递方式存在差异,随着地层深度的增大,凹陷区深部地层温度逐渐超过凸起区,这与该地区试油温度随时间变化的趋势相符.证明除“热折射”外,不同的热传递方式是影响该地区不同构造单元浅部与深部温度分布的重要因素之一.因此,需要针对不同构造单元和热传递方式进行地层温度的分层计算.计算方法如图 13 所示,对容城凸起、牛驼镇凸起等,在 0~5 000 m 范围内存在对流层,因此在地层温度计算时采用分层计算的方法.对流层上覆地层根据实际测温数据及地温梯度进行推算,对流层内部温度高度均一,将白云岩层顶面温度视为整体对流层温度.对流层厚度根据对流层厚度与地表平均热流的拟合数学关系式(1)进行反演.对流层下伏岩层以热传导为主,采用一维稳态热传导方程的解析法求解(邱楠生等,2019):

$$T(z) = T_0 + \frac{q_0 z}{K} - \frac{A z^2}{2K}, \quad (2)$$

式中: $T(z)$ 表示计算深度 $Z(\text{m})$ 处的温度, $^{\circ}\text{C}$; T_0 为地表温度, $^{\circ}\text{C}$; q_0 为计算点的地表热流值, mW/m^2 ; K 为 $0 \sim Z$ 段内的地层热导率加权平均值, $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$; A 为 $0 \sim Z$ 段内岩石放射性生热率平均值, $\mu\text{W/m}^3$.

霸县凹陷 $0 \sim 5 000 \text{ m}$ 深度热传递方式以传统热传导为主,其地层温度利用一维稳态传导方程进行估算.利用不同方式对容城凸起—牛驼镇凸起—霸县凹陷地区 $2 000 \sim 5 000 \text{ m}$ 埋深地层温度进行估算,得到不同埋深温度分布图(图 14).

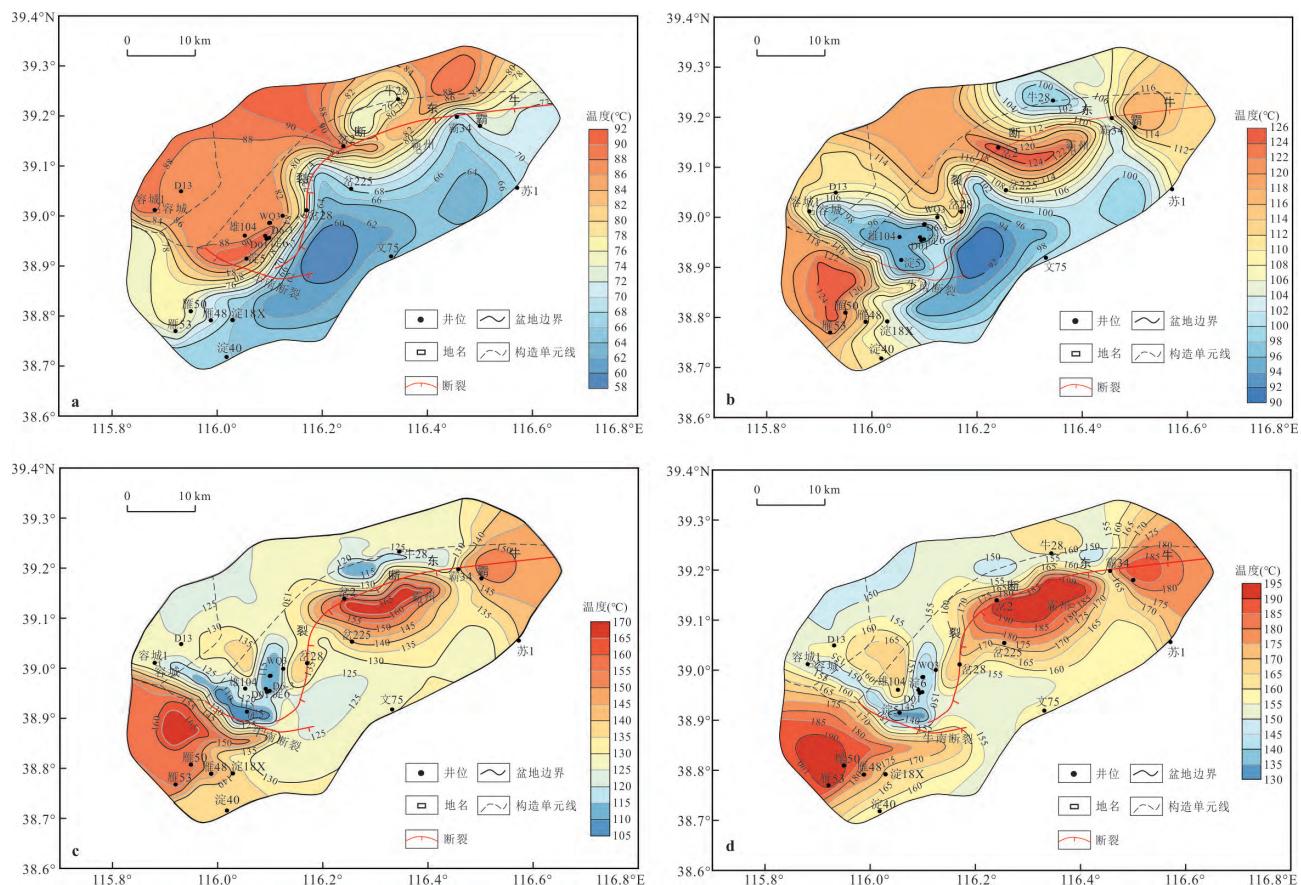


图 14 容城、牛驼镇凸起-霸县凹陷不同深度地层温度分布

Fig. 14 The temperature distribution in Rongcheng and Niutuozhen uplift-Baxian Depression at different depths

a. 深度为 2 000 m; b. 深度为 3 000 m; c. 深度为 4 000 m; d. 深度为 5 000 m

埋深为 2 000 m 时, 地层温度分布特征与其地温梯度以及地表热流分布特征相一致, 呈现出南高北低, 凸起区地层温度高、凹陷区较低的趋势。凸起区地层温度主要分布在 74~92 °C 之间, 平均约为 87 °C, 有利于中低温地热资源的形成; 凹陷区地层温度相对较低, 主要分布在 60~74 °C 之间, 平均为 68 °C。埋深为 3 000 m 时, 地层温度为 90~126 °C, 总体呈现出部分凸起区地层温度高于凹陷区地层温度的特征。埋深为 4 000 m 时, 地层温度为 105~170 °C, 总体呈现出南高北低, 凸起区温度稍低于凹陷区的趋势。埋深为 5 000 m 时, 地层温度为 130~190 °C, 总体呈现出凹陷区温度高于凸起区温度的特征。不同埋深的地层温度分布图显示, 深部地层高温区出现在研究区的东部和南部, 在构造上主要分布在凹陷区, 与地表高热流异常以及水热型中低温地热资源主要分布在凸起区的现象并不一致。但与试油温度随深度变化趋势相符, 证明本文温度计算的可靠性。

3.2 地热资源分布模式

研究区地热资源成因机制如图 15 所示, 凸起区下部热量向上传递时, 优先向高热导率的雾迷山组热储层传递。凸起区发育有深大断裂, 这些断裂成为深部热量向浅部传导的通道。浅部区域分布着高孔高渗的良好储层, 其内部的热对流促使储层底部热量迅速向上传递。同时, 上覆古近纪、新近纪砂泥岩盖层热导率低, 具有很好的保温隔热作用, 因此凸起区浅部可形成良好的水热型地热资源; 凹陷区热传递方式以热传导为主, 热源主要来自于上地幔, 基底热量向上传递时, 热量优先向凹陷区深部高热导率的蔚县系地层传递, 且上覆地层为低热导率砂-泥岩, 可作为良好盖层, 为深部形成高温地热资源提供有利条件。由于目前研究中对该地区深部地层中是否含水未知, 根据深部地层温度(大于 180 °C)且岩层为致密岩层的特点, 将其圈定为潜在干热岩有利勘探开发目标。

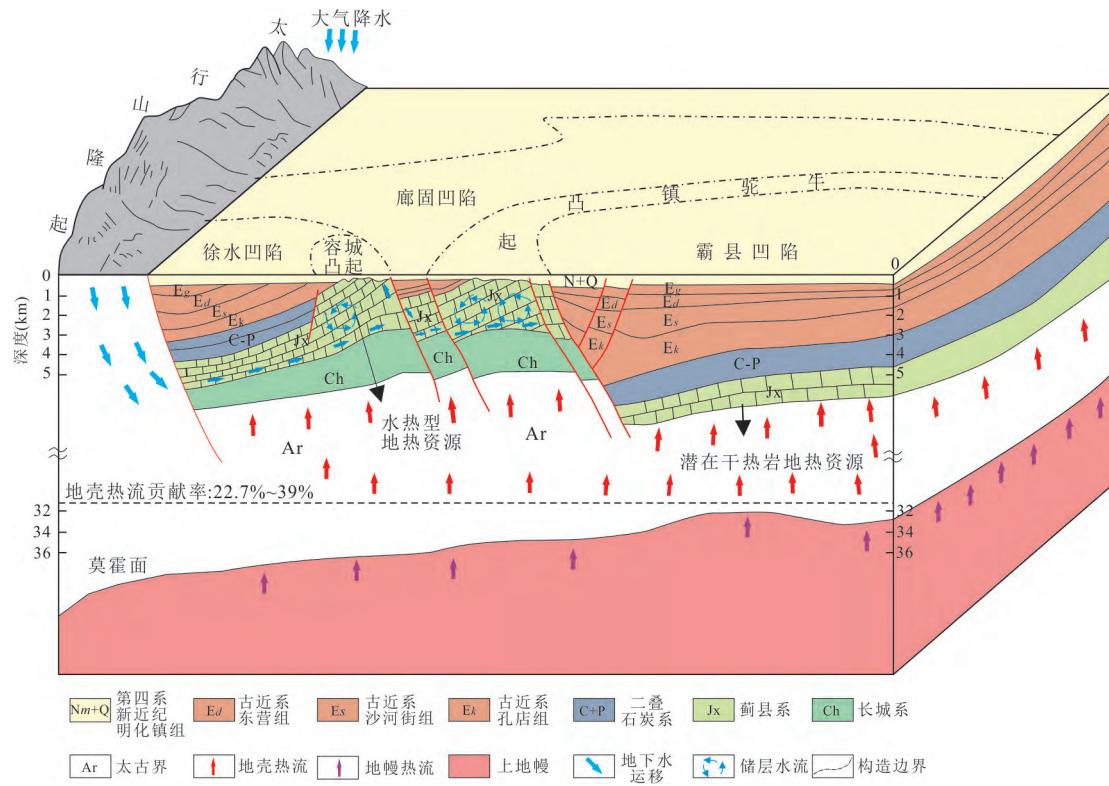


图 15 研究区地热资源聚集模式(改自郭飒飒, 2020)

Fig.15 Geothermal resource accumulation model in the study area(adapted from Guo, 2020)

4 结论

(1)冀中坳陷现今地温梯度介于 $27.4\sim39.7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 平均约 $34.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 现今大地热流主要分布在 $48.7\sim79.7\text{ mW/m}^2$ 之间, 其中凸起区地表热流值偏高, 凹陷区地表热流值较低, 其平面展布特征与构造地形的起伏具有一致性.

(2)冀中坳陷地温场分布模式为浅部凸起区温度高、凹陷区温度低;深部凸起区温度低,凹陷区温度高.埋深 $2\ 000\text{ m}$ 时,研究区地层温度分布在 $58\sim92\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,整体上呈现出凸起区温度较高,凹陷区温度较低的温度分布特征,凸起区富集中低温地热资源.随着埋深的增加,凸起区地层温度整体小于凹陷区温度.埋深 $5\ 000\text{ m}$ 时,凹陷区地层可达 $190\text{ }^{\circ}\text{C}$,可圈定为潜在干热岩资源有利勘探开发目标.

(3)在地质结构和热物性差异引起的热折射效应和地下水对流影响下,复杂的热传递过程可造成浅部与深部的地层温度分布格局存在较大差异.因此,在对深部地热资源进行评价和有利区圈定时,应充分考虑这些因素的影响,以确保评估的准确性.

References

- Cao, Y.Z., Bao, Z.D., Lu, K., et al., 2021. Genetic Model and Main Controlling Factors of the Xiongxin Geothermal Field. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(4): 863–872(in Chinese with English abstract).
- Chang, J., Qiu, N.S., Zhao, X.Z., et al., 2016. Present-Day Geothermal Regime of the Jizhong Depression in Bohai Bay Basin, East China. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(3): 1003–1016(in Chinese with English abstract).
- Chen, M.X., 1988. North China Geothermal. Science Press, Beijing(in Chinese).
- Cui, Y., 2020. Genetic Mechanism of Geothermal Resources and Heat Sources in Wumishan Formation, Xiong'an New Area (Dissertation). China University of Petroleum (Beijing), Beijing (in Chinese with English abstract).
- Cui, Y., Zhu, C. Q., Qiu, N. S., et al., 2022. The Heat Source Origin of Geothermal Resources in Xiong'an New Area, North China, in View of the Influence of Igneous Rocks. *Frontiers in Earth Science*, 10: 818129. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.818129>
- Dai, D. L., Zhao, R. S., Hu, J., et al., 2024. The Lithospheric Thermal Structure in the Songliao Basin Inferred from Thermal Parameter Analyses: Implications for the

- Background of Geothermal Resources. *Natural Resources Research*, 33(3): 1103—1129. <https://doi.org/10.1007/s11053-023-10303-3>
- Dai, M.G., Ma, P.P., Lei, H.F., et al., 2020. Distribution Characteristics and Favorable Targets of Karst Geothermal Reservoir of Wumishan Formation in Xiongan New Area. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 55(2): 487—505 (in Chinese with English abstract).
- Dong, Y.X., Huang, H.X., Ren, L., et al., 2021. Geology and Development of Geothermal Field in Neogene Guantao Formation in Northern Bohai Bay Basin: A Case of the Caofeidian Geothermal Heating Project in Tangshan, China. *Petroleum Exploration and Development*, 48(3): 666—676 (in Chinese with English abstract).
- Duan, H.X., Liu, Y.G., Wang, G.L., et al., 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 (in Chinese with English abstract).
- Gong, Y.L., Wang, L.S., Liu, S.W., et al., 2011. Thermal Structure and Thermal Evolution of Bohai Bay Basin in Eastern China. Atomic Energy Press, Beijing (in Chinese).
- Guo, R.J., Ji, Y.L., Ma, Z.T., et al., 2023. Mechanism and Development Model of Karst Reservoir in the Wumishan Formation in Xiongan New Area. *Journal of Palaeogeography*, 25(1): 180—197 (in Chinese with English abstract).
- Guo, S.S., 2020. Study on the Occurrence Law and Genetic Model of Deep Geothermal Resources in Xiongan New Area and Its Genetic Model (Dissertation). China University of Petroleum (Beijing), Beijing (in Chinese with English abstract).
- Guo, S.S., Zhu, C.Q., Qiu, N.S., et al., 2020. Formation Conditions and Favorable Areas for the Deep Geothermal Resources in Xiongan New Area. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 2026—2035 (in Chinese with English abstract).
- Li, G.S., Wu, X.G., Song, X.Z., et al., 2022. Status and Challenges of Hot Dry Rock Geothermal Resource Exploitation. *Petroleum Science Bulletin*, 7(3): 343—364 (in Chinese with English abstract).
- Lin, W.J., Liu, Z.M., Wang, W.L., et al., 2013. The Assessment of Geothermal Resources Potential of China. *Geology in China*, 40(1): 312—321 (in Chinese with English abstract).
- Liu, N., Qiu, N.S., Qin, M.K., et al., 2023. Main Control-
ling Factors and Models of Hydrocarbon Accumulation in the Shulu Buried-Hill Belt, Jizhong Depression, Bohai Bay Basin. *Acta Geologica Sinica*, 97(3): 897—910 (in Chinese with English abstract).
- Mao, G.H., Zhang, L.Y., Chen, J.B., et al., 2023. Terrestrial Heat Flow in Zhejiang Province and Its Significance of Geothermal Resources. *Earth Science*, 48(3): 1030—1039 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, N.S., Hu, S.B., He, L.J., 2019. Geothermics in Sedimentary Basins. China University of Petroleum Press, Qingdao (in Chinese).
- Wang, G.L., Zhang, W., Liang, J.Y., et al., 2017. Evaluation of Geothermal Resources Potential in China. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(4): 449—450, 134, 451—459 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J.Y., Hu, S.B., Pang, Z.H., et al., 2012. Estimate of Geothermal Resources Potential for Hot Dry Rock in the Continental Area of China. *Science & Technology Review*, 30(32): 25—31 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z.T., Hu, S.B., Wang, Y.B., et al., 2022. Influence of the Groundwater Convection within the High Permeability Formation on the Overlying Temperature Field in Niutuozhen Uplift. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(2): 726—736 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- Xiong, L.P., Zhang, J.M., 1984. Mathematical Simulation of Refract and Redistribution of Heat Flow. *Chinese Journal of Geology*, 19(4): 445—454 (in Chinese with English abstract).
- Xu, T. F., Zhang, W., 2016. Enhanced Geothermal Systems: International Developments and China's Prospects. *Petroleum Science Bulletin*, 1(1): 38—44 (in Chinese with English abstract).
- Yan, D.S., Yu, Y.T., 2000. Evaluation and Utilization of Geothermal Resources in Beijing-Tianjin-Hebei Oil Region. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Zhang, Y.M., Chang, J., Liu, N., et al., 2017. Present-Day Temperature-Pressure Field and Its Implications for the Geothermal Resources Development in the Baxian Area, Jizhong Depression of the Bohai Bay Basin. *Natural Gas Industry*, 37(10): 118—126 (in Chinese with English abstract).

- Zhang, Y. M., Chang, J., Liu, N., et al., 2018. Present-Day Temperature-Pressure Field and Its Implications for the Geothermal Resources Development in the Baxian Area, Jizhong Depression of the Bohai Bay Basin. *Natural Gas Industry B*, 5(3): 226–234. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2017.10.006>
- Zhao, Z.R., Zhang, W., Wang, G.L., et al., 2023. Hydrogeochemical Characteristics of Levin Geothermal Field in Jizhong Depression and Its Constraints on Geothermal Genesis. *Geology in China*, 52(1):246–263 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, C. Q., Chen, C., Jiang, X. X., 2022. Numerical Simulation of Internal Factors that Influence the Thermal Conductivity of Rock. *International Journal of Thermophysics*, 44(2): 24. <https://doi.org/10.1007/s10765-022-03132-8>
- 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. *Petroleum Science Bulletin*, 7(3): 321–333(in Chinese with English abstract).
- Zhu, X., Wang, G.L., Ma, F., et al., 2023. Evaluation of Geothermal Resources of the Xiongan New Area. *Earth Science*, 48(3): 1093–1106(in Chinese with English abstract).
- 郭瑞婧, 纪友亮, 马铮涛, 等, 2023. 雄安新区雾迷山组岩溶热储成储机制及发育模式. *古地理学报*, 25(1): 180–197.
- 郭飒飒, 2020. 雄安新区深部地热资源赋存规律和成因模式研究和成因模式研究(硕士学位论文). 北京: 中国石油大学(北京).
- 郭飒飒, 朱传庆, 邱楠生, 等, 2020. 雄安新区深部地热资源形成条件与有利区预测. *地质学报*, 94(7): 2026–2035.
- 李根生, 武晓光, 宋先知, 等, 2022. 干热岩地热资源开采技术现状与挑战. *石油科学通报*, 7(3): 343–364.
- 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 等, 2013. 中国地热资源及其潜力评估. *中国地质*, 40(1): 312–321.
- 刘念, 邱楠生, 秦明宽, 等, 2023. 冀中坳陷束鹿潜山带油气成藏主控因素与成藏模式. *地质学报*, 97(3): 897–910.
- 毛官辉, 张立勇, 陈俊兵, 等, 2023. 浙江省大地热流及其他地热资源意义. *地球科学*, 48(3): 1030–1039.
- 邱楠生, 胡圣标, 何丽娟, 2019. 沉积盆地地热学. 青岛: 中国石油大学出版社.
- 王贵玲, 张薇, 梁继运, 等, 2017. 中国地热资源潜力评价. *地球学报*, 38(4): 449–450, 134, 451–459.
- 汪集旸, 胡圣标, 庞忠和, 等, 2012. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估. *科技导报*, 30(32): 25–31.
- 王朱亭, 胡圣标, 王一波, 等, 2022. 雄安牛驼镇凸起区高渗性白云岩对上覆地层温度场的影响. *地球物理学报*, 65(2): 726–736.
- 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.
- 熊亮平, 张菊明, 1984. 热流的折射和再分配的数学模拟. *地质科学*, 19(4): 445–454.
- 许天福, 张炜, 2016. 增强型地热工程国际发展和我国前景展望. *石油科学通报*, 1(1): 38–44.
- 阎敦实, 于英太, 2000. 京津冀油区地热资源评价与利用. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 张以明, 常健, 刘念, 等, 2017. 冀中坳陷霸县地区现今温压场及其与地热资源的关系. *天然气工业*, 37(10): 118–126.
- 赵子锐, 张薇, 王贵玲, 等, 2023. 冀中坳陷高阳地热田水文地球化学特征及其对地热成因的约束. *中国地质*, 52(1):246–263.
- 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. *石油科学通报*, 7(3): 321–333.
- 朱喜, 王贵玲, 马峰, 等, 2023. 雄安新区地热资源潜力评价. *地球科学*, 48(3): 1093–1106.