



下辽河盆地干热岩资源勘探靶区研究

刘振伟¹, 张晓辉¹, 于小磊², 蔡新明¹, 杨 慧¹, 孙 磊¹, 慕钧浩¹

1. 辽宁省矿产勘查院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110031;

2. 辽宁省第十地质大队有限责任公司, 辽宁 抚顺 113003

摘 要: 下辽河盆地特殊的构造位置使区内拥有高的大地热流值和较大的地温梯度, 具有巨大的地热资源潜力。通过对下辽河盆地地温场、热流密度及潜山分布的研究, 认为位于下辽河盆地西部凹陷斜坡带的高升-曙光-欢喜岭潜山带是寻找干热岩的有利靶区, 并分析了下辽河盆地干热岩资源成因模式。

关键词: 干热岩; 大地热流; 地温梯度; 深部地温; 潜山; 下辽河盆地

EXPLORATION TARGET AREA OF HOT DRY ROCK RESOURCES IN LOWER LIAOHE BASIN

LIU Zhen-wei¹, ZHANG Xiao-hui¹, YU Xiao-lei², CAI Xin-ming¹, YANG Hui¹, SUN Lei¹, MU Jun-hao¹

1. Liaoning Mineral Exploration Institute Co., Ltd., Shenyang 110031, China;

2. Liaoning No. 10 Geological Brigade Co., Ltd., Fushun 113003, Liaoning Province, China

Abstract: There is high terrestrial heat flow value and large geothermal gradient in Lower Liaohe Basin due to its unique tectonic location, with huge geothermal resources potential. Based on the study of geothermal field, heat flux and buried hill distribution in Lower Liaohe Basin, it is considered that the Gaosheng-Shuguang-Huanxiling buried hill belt located in the slope zone of western sag of Lower Liaohe Basin is a favorable target for hot dry rocks prospecting, and the genetic model of hot dry rock resources in the area is analyzed.

Key words: hot dry rock; terrestrial heat flow; geothermal gradient; deep ground temperature; buried hill; Lower Liaohe Basin

0 引言

干热岩是指不含或仅含少量流体, 温度高于 180 ℃, 其热能是当前技术经济条件下可以利用的岩体^[1]。我国具有丰富的干热岩资源, 3~10 km 干热岩资源总量约 20.9×10⁶ EJ, 合计 714.9×10¹² t 标准煤^[2]。甘浩南^[3]将中国干热岩资源划分为高放射性产热型、沉积盆地

型、近代火山型及强烈构造活动带型 4 种类型。通过对辽宁省干热岩资源赋存条件的分析, 认为可能存在的主要干热岩类型为沉积盆地型干热岩, 位于下辽河盆地, 而同属于渤海湾盆地的河北马头营及山东利津均已发现干热岩资源^[4-5]。

下辽河盆地为形成于中、新生代的断陷盆地, 是渤

收稿日期: 2023-07-03; 修回日期: 2023-08-04. 编辑: 李兰英.

基金项目: 辽宁省自然资源厅“辽宁省干热岩资源调查与评价”项目(JH22-210000-15550).

作者简介: 刘振伟(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事矿产勘查工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区宁山路 42 号, E-mail//174028794@qq.com

通信作者: 于小磊(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事矿产勘查工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区宁山路 42 号, E-mail//353503770@qq.com

海湾盆地的组成部分,位于渤海湾盆地的东北角。盆地断裂构造十分发育,为深部热源的传导提供了通道,为地下热能的再分配及在隆起区积聚创造了条件。沉积巨厚的新生代地层结构松散,孔隙度大,导热率低,具有隔热保温的作用,是很好的盖层。这些因素构成了下辽河盆地地热资源形成的必备条件。当盖、储、通、源条件组合较好时,可形成干热岩资源开发的有利地段。

1 地质概况

下辽河盆地位于辽宁省中南部,属于渤海裂谷系的组成部分,东临辽东褶皱带,西接燕山沉陷带,是一个在前古生代基底上发育起来的呈北东向展布的中、新生代断陷盆地。盆地陆地面积约 12 400 km²。根据其地质构造特点,可将盆地分为东部凹陷、西部凹陷、大民屯凹陷、东部凸起、中央凸起、西部凸起等次一级构造单元(图 1)。中生代以前的构造运动以地台型稳定的整体升降为主,中生代后期,构造运动比较活跃,老的格局开始解体,构造线方向由近东西向转为北东向,初步形成了凹凸相间的基本构造格局。新生代早期则经历了以箕状断陷为特征的断陷活动,晚期断陷活动趋于消失。

盆地基底之上自下而上沉积了古近系房身泡组、沙河街组、东营组,新近系馆陶组、明化镇组及第四系松散沉积层。

2 岩石热导率特征

汪集旻^[7]对辽河盆地采集的 97 块岩石样品进行了室内热导率测定,自上而下各层岩石热导率值如下:东营组(Ed)为 1.35 W/(m·K);沙河街组一、二段(Es₁₊₂), 1.42 W/(m·K);沙河街组三段(Es₃), 1.50 W/(m·K);沙河街组四段(Es₄), 1.68 W/(m·K);中生界, 2.09 W/(m·K);前中生界, 3.10 W/(m·K)。

王永新^[8]依据 12 口系统测温井数据和 47 块岩石样品热导率测试结果,计算出辽河盆地东部凹陷新生代沉积盖层岩石热导率变化于 0.819~2.914 W/(m·K)之间,平均为 1.667 W/(m·K)。

通过前人的研究结果可以看出,无论是泥岩还是砂岩,下辽河盆地岩石热导率多随岩石埋深增大而增大,与中国西北部盆地岩石热导率变化规律一致^[9]。当

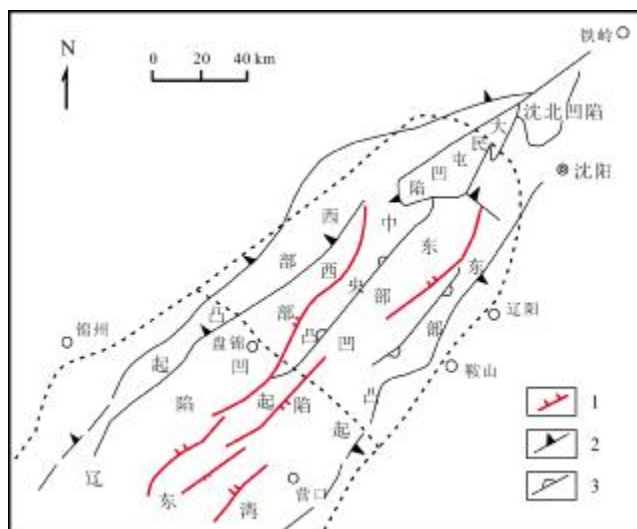


图 1 下辽河断拗盆地构造单元划分图

(据文献[6])

Fig. 1 Tectonic division of Lower Liaohe fault depression basin

(From Reference [6])

1—断层(fault); 2—新近系缺失线(Neogene missing line); 3—东营组超覆线(overlap line of Dongying fm.)

埋深超过 2 000 m 后,盖层岩石热导率基本介于 1.6~1.8 W/(m·K) 之间。辽河盆地新生界沉积盖层岩石热导率普遍低于 2.0 W/(m·K),而基底岩石热导率大于 2.0 W/(m·K)。基底岩石热导率大,有利于深部的热能通过储层底部快速传导至储层内及顶部,导致整个储层能获得较高的热能,而低热导率的泥岩盖层相当于热物质上部的被子,隔水性能较好,具有良好的保温效果,有效地阻止了热量的散发。

3 地温场特征

3.1 地温梯度分布特征

地温梯度是指深入地下每 100 m 所增加的地温值(°C/hm),计算公式为:

$$R = (T - t) \times 100 / (H - h)$$

式中, R 为地温梯度(°C/hm); T 为增温带中某一深度(H)的实测地温(°C); t 为常温带的温度(°C); H 为测温点的深度(m); h 为常温带的深度(m)。

根据大量的实测数据和周边地区恒温带温度、深度和年平均温度资料分析^[10],确定本区常温带的温度 $t=10.5$ °C; $h=30$ m。

从地温梯度等值线(图 2、3)可看出:辽河盆地整

体地温梯度的变化由西向东呈现西部高值→西部低值→中部高值→东部低值几个变化带,由北向南地温梯度由低变高,地温梯度的分布与幔隆带和幔凹带明显相关.古近系地温梯度明显高于新近系地温梯度.

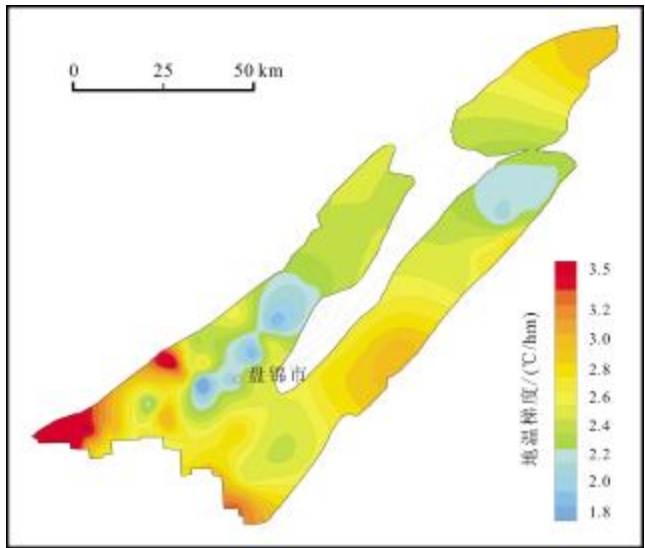


图 2 下辽河拗陷新近系地温梯度等值线图
Fig. 2 Contour map of Neogene geothermal gradient in Lower Liaohe Depression

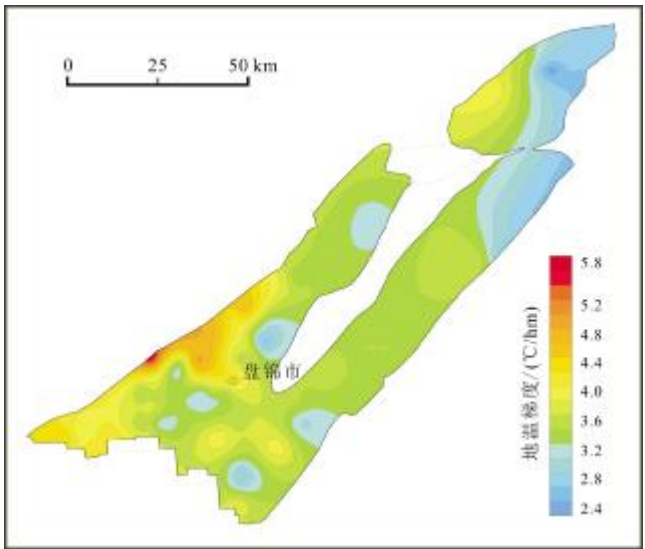


图 3 下辽河拗陷古近系地温梯度等值线图
Fig. 3 Contour map of Paleogene geothermal gradient in Lower Liaohe Depression

新近系:下辽河盆地平均地温梯度为 2.714 °C/hm,其中西部凹陷为 1.61~3.89 °C/hm,平均为 2.71 °C/hm;东部凹陷为 2.13~3.35 °C/hm,平均为 2.702 °C/hm;大民屯凹陷为 2.81~2.99 °C/hm,平均为 2.9 °C/hm.受构

造和深度的影响,地温梯度变化幅度比较大,但分布具有一定规律,总体呈南高北低、西高东低的趋势.西部凹陷西南部西八千-杜家台地区可达 2.8~3.6 °C/hm;东部凹陷南部大洼-海外河一带亦达 2.8~3.3 °C/hm.

古近系:下辽河盆地平均地温梯度为 3.8 °C/hm,其中西部凹陷为 3.02~5.14 °C/hm,平均为 3.958 °C/hm;东部凹陷为 2.2~4.24 °C/hm,平均为 3.34 °C/hm;大民屯凹陷为 2.35~4.12 °C/hm,平均为 3.18 °C/hm.总体亦呈南高北低、西高东低的趋势.西部凹陷西斜坡、曙光、双台子一带为 4.0~5.0 °C/hm 的高值区,其中杜古 78 井高达 5.14 °C/hm;东部凹陷南部桃园地区也是一个高值区(3.8~4.0 °C/hm);大民屯凹陷西南部小范围内亦存在 3.8~4.0 °C/hm 的高值区.

3.2 深部地温分布特征

在收集前人的研究资料及辽河油田探井试油资料的基础上,利用 MapGIS 软件绘制了辽河油田 1 000 m、2 000 m 及 3 000 m 深地温等值线图(图 4—6).

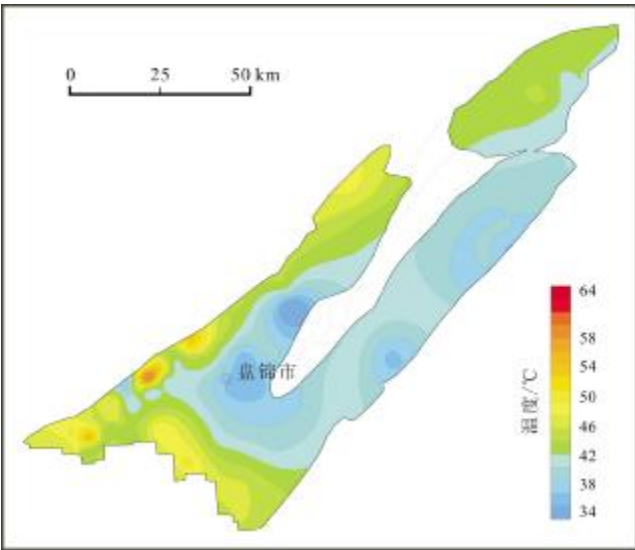


图 4 下辽河盆地 1 000 m 深地温等值线图
Fig. 4 Geothermal contour map at the depth of 1 000 m in Lower Liaohe Basin

(1)在 1 000 m 深处(图 4),由于埋藏较浅,受到地下水强烈干扰,表现出其他同类盆地少见的低温异常.整体上呈现西高东低、南高北低的趋势.位于西部凹陷斜坡带的高升镇-胡家镇-石新镇-闫家镇一带地温值普遍在 40 °C 以上,并于曙光、杜家台及欢喜岭地区形成 3 个高值中心.西部凹陷变化趋势的总特点

是,凹陷内深洼陷区地温值低,凹陷边部较高。其次于盆地南部的双台子-田庄台镇一带及东部凹陷的黄沙坨镇形成两处高值中心,但整体地温明显低于西部凹陷斜坡带。

(2)在2 000 m深处(图5),地下水活动的影响已基本消失,基岩埋深已成地温高低的主要控制因素。此深度的洼陷区内基本反映的是东营组层段内的地温,在凹陷边部、潜山隆起区和大民屯凹陷基本反映沙一段或沙三段层内的地温。从图5可见,整体上2 000 m深处地温由西到东呈现出高→低→高→低的特点,尤其是西部凹陷曙光-西八千地区地温值在80~85℃之间;洼陷处地温值相对较低,多在66~75℃之间。与1 000 m地温分布不同的是盘锦市-大洼一带出现一个高值中心,地温在80℃以上。

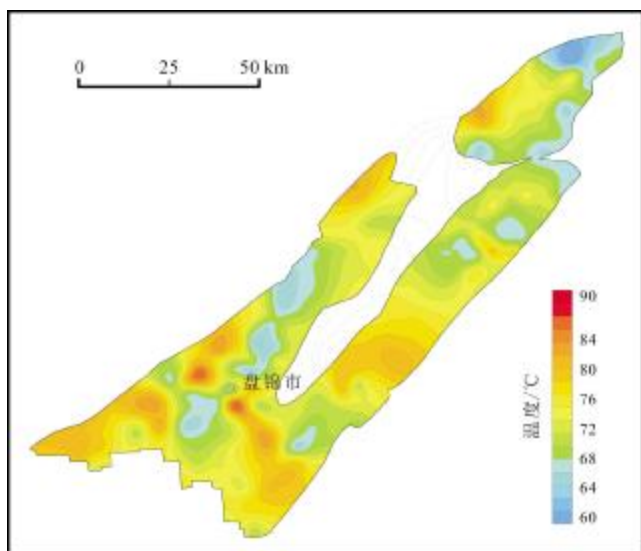


图5 下辽河盆地2 000 m深地温等值线图

Fig. 5 Geothermal contour map at the depth of 2 000 m in Lower Liaohe Basin

(3)在3 000 m深处(图6),地温高值区明显分布于东、西部凹陷的斜坡部位,尤其是西部凹陷斜坡带。辽河盆地3 000 m处地温跨度较大,最低90℃,最高达128℃(曙光地区)。位于盆地中部偏北地区的高升镇-黄沙坨镇一带出现一个地温高值区,地温普遍介于110~125℃之间;盘锦市区北部-沙岭镇一带出现一个低温中心,最低地温不到100℃,该位置为西部凹陷古近系生烃洼陷的核心区域;地温高于120℃的地区主要分布于盆地西部的高升镇、曙光、杜家台、田家

镇等地区,分布面积约550 km²,其次位于盆地东部凹陷的田庄台镇也出现一处高于120℃的高温中心,分布面积约130 km²。

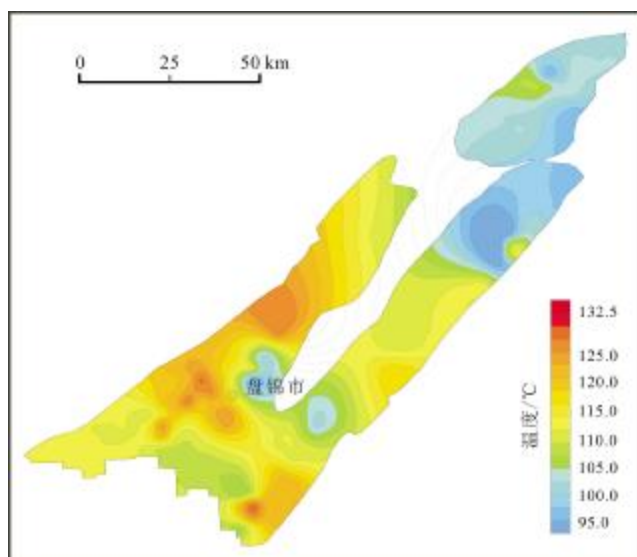


图6 辽河盆地3 000 m深地温分布等值线图

Fig. 6 Geothermal contour map at the depth of 3 000 m in Lower Liaohe Basin

3.3 热流密度分布特征

热流密度是单位时间通过地球表面单位面积流出的热量,它是地温梯度与相应层段岩石热导率的乘积。热流密度是区域地热资源最直接的、最可信的信息,是反映地球内部热状态的基本物理量^[11]。同一个钻孔不同层位的热流密度值应该是相同的。高的热流密度区是干热岩资源开发的有利地段(高于全球热流平均值1.5 HFU的地段,1 HFU=41.86 mW/m²)。根据汪集旻等^[7]的研究,下辽河拗陷区热流密度分区见图7。

从图7可看出,热流密度与地温梯度的分布规律相一致。中央凸起和西部凹陷斜坡带热流密度值较高,多在67 mW/m² (1.60 HFU)以上,明显高于全球平均值。东、西部凹陷区热流密度多在67 mW/m²以下,接近全球平均值^[12-15]。

4 古潜山分布特征

汪集旻^[7]等通过对下辽河盆地的热流值进行统计分析,得出下辽河盆地热流分布图基本反映了其前新生代基底构造形态。基底埋藏较深的凹陷中心部位热流值低,而斜坡带或古潜山基底高凸处热流值高。

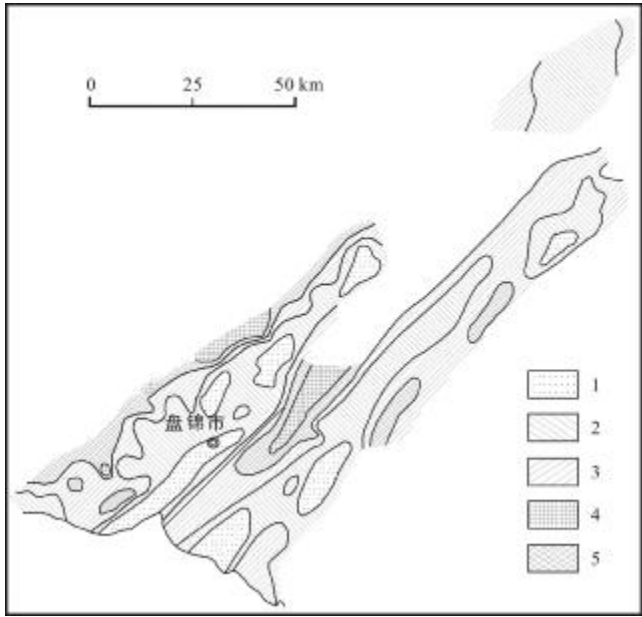


图 7 下辽河拗陷区域热流密度分区图
(据文献[7]修改)

Fig. 7 Regional heat flux zoning map of Lower Liaohe Depression
(Modified from Reference [7])

1— 1.0~1.2 HFU; 2— 1.2~1.4 HFU; 3— 1.4~1.6 HFU; 4— 1.6~1.8 HFU;
5— >1.8 HFU

张英等^[16]通过对渤海湾盆地中南部深钻井测温数据进行研究得出,拗陷区的凹中和凹边凸起区,顶面埋深 3 000~5 000 m 的前中生界潜山是干热岩勘探开发的有利区。

下辽河盆地是中生代以来在拉伸应力场作用下形成的裂陷盆地,自中生代以来经历了多期强烈的构造运动,发育北北东至北东向和北西至近东西向两组基底断裂系统。这些断裂不仅控制了盆地的构造形态,同时控制了盆地的构造演化和沉积充填历史,将盆地基岩切割成多个垒堑相间的断块。盆地的构造演化为基底隆起形成古潜山创造了良好的地质条件,形成了多种类型、广泛发育的基底潜山,主要包括太古宙及古元古代变质岩潜山、中-新元古代和早古生代碳酸盐岩潜山,以及中生代火山岩潜山。

从图 8 中可以看出,下辽河盆地古潜山分布与断裂形态一致,潜山带呈北东走向,次级断裂控制了单个潜山的形成和展布。下辽河盆地基底构造格局主要受中生代以来燕山期—喜马拉雅期断达基底的 3 级断层活动的控制。其中一级断层主要为北东向延伸长期活动的深层断裂,断距达 3 400 m,如台安-大洼、营口-

佟二堡断层等成为边界断层,这些边界断层控制了大民屯凹陷、西部凹陷和东部凹陷的形成及演化;二级断层主要呈北东向延伸,控制了潜山带的分布,如西部凹陷内兴隆台-欢喜岭、曙光-欢喜岭断层控制了曙光-杜家台潜山带、齐家-欢喜岭潜山带的分布,东部凹陷茨东、茨西大断层控制了茨榆坨潜山的分布;三级断层为北东及东西向,控制了部分潜山带及单个潜山的形成与展布,如西部凹陷内西斜坡北西向的大凌河、齐-欢、绕阳河、曙-杜等三级断层把曙杜、齐欢潜山带分割成块状,形成单个的欢喜岭、齐家、杜家台、曙光潜山^[17]。

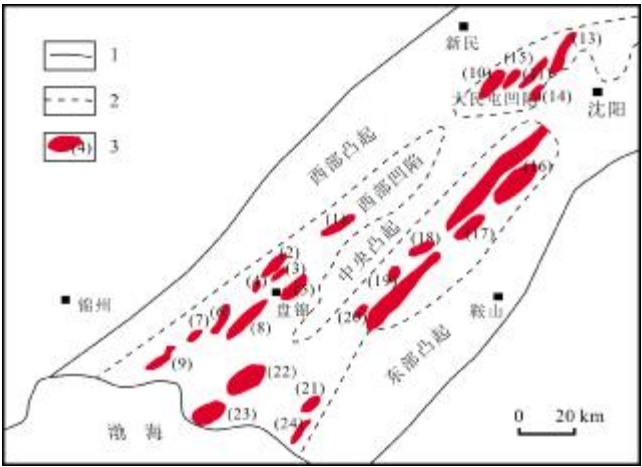


图 8 下辽河盆地古潜山分布
(据文献[17]修改)

Fig. 8 Distribution of buried hills in Lower Liaohe Basin
(Modified from Reference [17])

1—盆地边界(basin boundary); 2—构造单元边界(boundary of tectonic unit); 3—古潜山及编号(buried hill and number): (1)高升, (2)曙光, (3)盘山, (4)杜家台, (5)兴隆台, (6)齐家, (7)欢喜岭, (8)曙光低潜山, (9)西八千, (10)大民屯, (11)东胜堡, (12)静安堡, (13)曹台, (14)法哈牛, (15)东胜堡西, (16)茨榆坨, (17)青龙台, (18)三界泡, (19)欧力驼子, (20)热合台, (21)油燕沟, (22)海外河, (23)海南, (24)燕南

5 靶区分析结果

通过对下辽河盆地地温梯度、深部地温及岩石热导率的分析得出,下辽河盆地西部凹陷斜坡带具有高的地温梯度、高地温梯度及高的深部地温,这是由于西部凹陷斜坡带位置基底整体自东南向西北抬升,来自深部较为均一的热流,在地壳浅部受基底构造形态的影响而向隆起或凸起处集中,从而出现该处的高地

温、高地温梯度;在拗陷或凹陷部位由于热量“发散”,因而造成这些负向构造部位上的低地温和低地温梯度。结合潜山的分布特点,最终确定位于下辽河盆地西部凹陷的高升-曙光-欢喜岭潜山带为下辽河盆地干热岩勘探靶区。

6 下辽河盆地干热岩成因模式

受中生代以来强烈的构造活动控制,下辽河地区形成了新生代断陷盆地,造就了辽河盆地良好的地热地质背景环境。燕山期以后的构造运动更重要,使该区形成凸凹相间的构造格局,对地下热能的分配起到重要的控制作用。同时,古近纪以来的河、湖相沉积又起到了热阻层的作用^[18-20]。

汪集旻等^[7]通过计算得出辽河盆地地幔热流值为 41 mW/m^2 , 占整个地表热流总量的 63%。可见辽河盆地大部分热量来自地幔,地壳部分只占 37%。深部热量主要通过热传导的方式,借助于隐伏深大断裂的热对流,传递到盆地基底后受制于上覆及两侧低热导率的沉积覆盖层的阻隔,于盆地基底隆起处形成良好的热储层。下辽河盆地干热岩成因模式如图 9。

7 结论

地热能作为一种清洁低碳、稳定连续的非碳基能

源,可为实现碳中和、碳达峰目标提供重要保障^[21]。本研究通过对下辽河盆地地温梯度、深部地温、岩石热导率、热流密度及潜山分布的研究得出,下辽河盆地西部凹陷斜坡带具有高的地温梯度、高的深部地温及高的热流密度,密集分布的次级断裂将古潜山切割成多个单个潜山,加之沉积盖层热导率明显低于基底岩石热导率,为基底热能向潜山凸起处聚集提供了有利条件。位于西部凹陷斜坡带的高升-曙光-欢喜岭潜山带应为下辽河盆地干热岩资源勘探的靶区。

参考文献(References):

- [1] 国家能源局. NB/T 10097—2018 地热术语[S]. 北京: 中国石化出版社, 2018.
National Energy Administration. NB/T 10097—2018 Terminology of geothermal energy[S]. Beijing: China Petrochemical Press, 2018.
- [2] 汪集旻, 胡圣标, 庞忠和, 等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 25-31.
Wang J Y, Hu S B, Pang Z H, et al. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China [J]. Science & Technology Review, 2012, 30(32): 25-31.
- [3] 甘浩男, 王贵玲, 蔺文静, 等. 中国干热岩资源主要赋存类型与成因模式[J]. 科技导报, 2015, 33(19): 22-27.
Gan H N, Wang G L, Lin W J, et al. Research on the occurrence types and genetic models of hot dry rock resources in China [J]. Science & Technology Review, 2015, 33(19): 22-27.

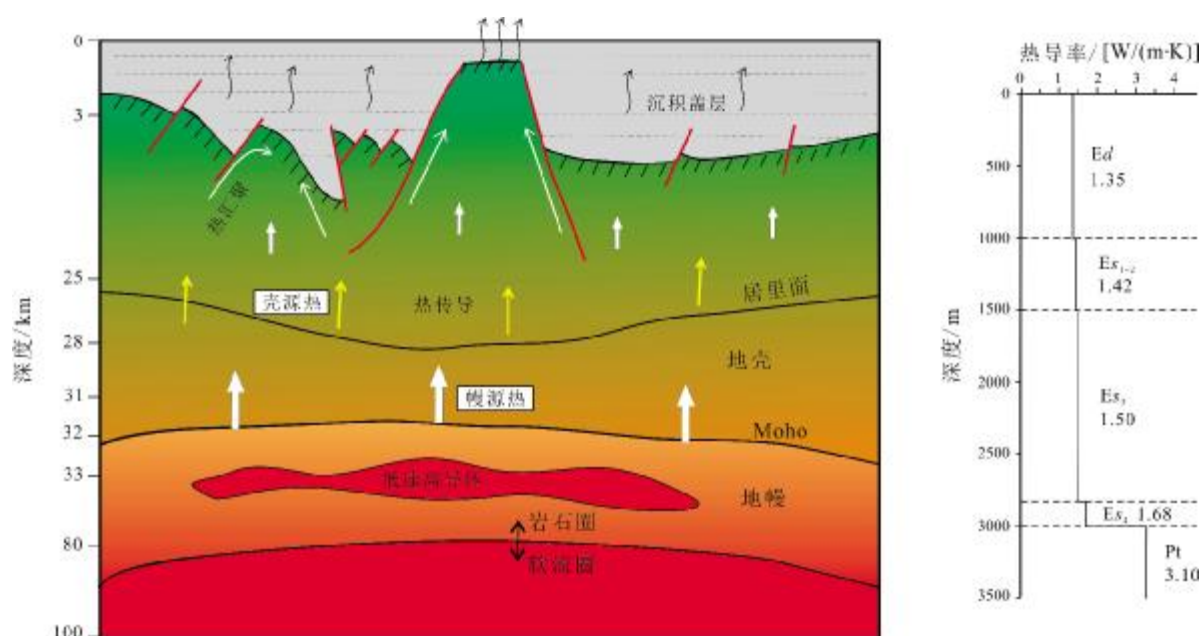


图9 下辽河盆地干热岩成因模式图

Fig. 9 Genetic model for hot dry rocks in Lower Liaohe Basin

- [4]张保健,李燕燕,高俊,等.河北省马头营干热岩的成因机制及其示范意义[J].地质学报,2020,94(7):2036-2051.
Zhang B Y, Li Y Y, Gao J, et al. Genesis and indicative significance of hot dry rock in Matouying, Hebei Province[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7): 2036-2051.
- [5]谭现锋,刘肖,王贵玲,等.利津干热岩型地热资源调查评价关键技术研究[J].地质学报,2020,94(7):2166-2176.
Tan X F, Liu X, Wang G L, et al. Research on the key technology for the investigation and evaluation of the hot dry rock geothermal resources in Lijin[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7): 2166-2176.
- [6]辽河油田石油地质志编辑委员会.中国石油地质志(三)-辽河油田[M].北京:石油工业出版社,1993.
Editorial Committee of Petroleum Geology of Liaohe Oil Field. Liaohe oil field, Petroleum Geology of China (III)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993. (in Chinese)
- [7]汪集旻,汪集旻,王永玲,等.下辽河盆地大地热流[J].地质科学,1986,21(1):16-29.
Wang J Y, Wang J A, Wang Y L, et al. Terrestrial heat flow in Lower Liaohe Basin, North China[J]. Chinese Journal of Geology, 1986, 21(1): 16-29.
- [8]王永新,胡圣标,汪集旻,等.辽河盆地东部凹陷大地热流[J].中国科学院研究生院学报,2000,17(2):62-67.
Wang Y X, Hu S B, Wang J Y, et al. Heat flow in the eastern subdepression of Liaohe Basin [J]. Journal of Graduate School, Academia Sinica, 2000, 17(2): 62-67.
- [9]邱楠生.中国西北部盆地岩石热导率和生热率特征[J].地质科学,2002,37(2):196-206.
Qiu N S. Characters of thermal conductivity and radiogenic heat production rate in basins of Northwest China[J]. Chinese Journal of Geology, 2002, 37(2): 196-206.
- [10]赵国瑞.辽河盆地西部凹陷地热资源潜力研究[D].大庆:东北石油大学,2011.
Zhao G R. Geothermal resources potential research on western sag of Liaohe Basin[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2011.
- [11]王良书,李成,施央申,等.下扬子区地温和大地热流密度分布[J].地球物理学报,1995,38(4):469-476.
Wang L S, Li C, Shi Y S, et al. Distributions of geotemperature and terrestrial heat flow density in lower Yangtze area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1995, 38(4): 469-476.
- [12]胡圣标,何丽娟,汪集旻.中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版)[J].地球物理学报,2001,44(5):611-626.
Hu S B, He L J, Wang J Y. Compilation of heat flow data in the China continental area (3rd edition)[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2001, 44(5): 611-626.
- [13]姜光政,高珊,饶松,等.中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J].地球物理学报,2016,59(8):2892-2910.
Jiang G Z, Gao P, Rao S, et al. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4th edition) [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(8): 2892-2910.
- [14]汪集旻,黄少鹏.中国大陆地区大地热流数据汇编(第二版)[J].地震地质,1990,12(4):351-363.
Wang J Y, Huang S P. Compilation of heat flow data in the China continental area (2nd edition)[J]. Seismology and Geology, 1990, 12(4): 351-363.
- [15]汪集旻,黄少鹏.中国大陆地区大地热流数据汇编[J].地质科学,1988,23(2):196-204.
Wang K Y, Huang S P. Compilation of heat flow data for continental area of China[J]. Chinese Journal of Geology, 1988, 23(2): 196-204.
- [16]张英,冯建赟,罗军,等.渤海湾盆地中南部干热岩选区方向[J].地质前缘,2020,27(1):35-47.
Zhang Y, Feng J Y, Luo J, et al. Screening of hot dry rock in the south-central part of the Bohai Bay Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 35-47.
- [17]单俊峰.辽河坳陷变质岩潜山内幕成藏条件研究[D].北京:中国地质大学,2007.
Shan J F. The research of inner structure hydrocarbon accumulation conditions of metamorphic rock buried hill in Liaohe depression[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2007.
- [18]殷秀兰,武红岭,马寅生,等.辽河盆地东部凹陷古地温演化研究[J].地质力学学报,2003,9(2):106-112.
Yin X L, Wu H L, Ma Y S, et al. Research on the evolution of the paleotemperature of the eastern sag in Liaohe Basin[J]. Journal of Geomechanics, 2003, 9(2): 106-112.
- [19]王永新,汪集旻,胡圣标.辽河盆地东部凹陷热历史及构造-热演化特征[J].地质科学,2003,38(2):214-220.
Wang Y X, Wang J Y, Hu S B. Thermal history and tectono-thermal evolution of eastern depression, the Liaohe Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2003, 38(2): 214-220.
- [20]于小磊,张晓辉,刘振伟,等.辽宁省干热岩资源赋存条件分析及靶区初选[J].地质与资源,2023,32(5):608-615.
Yu X L, Zhang X H, Liu Z W, et al. Hot dry rocks in Liaoning Province: Occurrence conditions and primary selection of target areas. Geology and Resources, 2023, 32(5): 608-615.
- [21]王贵玲,陆川.碳中和目标驱动下干热岩和增强型地热系统增产技术发展[J].地质与资源,2023,32(1):85-95,126.
Wang G L, Lu C. Stimulation technology development of hot dry rock and enhanced geothermal system driven by carbon neutrality target [J]. Geology and Resources, 2023, 32(1): 85-95, 126.