



辽宁省干热岩资源赋存条件分析及靶区初选

于小磊¹, 张晓辉¹, 刘振伟¹, 蔡新明¹, 杨 慧¹, 孙 磊¹, 陈军典², 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. 辽宁省物测勘查院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110031

摘 要: 干热岩作为一种可再生的高温地热资源,在我国越来越受到重视。干热岩温度除深部钻探手段外无法直接测量,但是可以通过大地热流、居里面埋深、酸性岩体分布、壳内低速高导体及构造应力场等指标间接反映地下的热异常。辽宁省大地热流值高值点主要分布于辽阳-海城-盖州一带,其次为下辽河盆地西部凹陷。辽宁省居里面隆起区绕辽北拗陷区呈环状分布,隆起中心居里面埋深均在 18 km 以浅。高放射性花岗岩主要为早白垩世花岗岩,主要分布于辽东及辽南地区。海城东西两侧约 40 km 范围内存在壳内低速高导体,埋深 10~20 km。区内张性断裂以 NE—NEE 向为主,郯庐断裂带为贯穿辽宁省的 NE 向岩石圈断裂,大型 NE—NEE 深壳断裂主要分布于辽东地区。通过对辽宁省干热岩资源赋存指标的分析,结合中国干热岩资源的分类,初选出鞍山-海城一带作为高放射性干热岩资源靶区及下辽河盆地作为沉积盆地型干热岩资源靶区。

关键词: 干热岩;大地热流;居里面;酸性岩体;构造应力场;辽宁省

HOT DRY ROCKS IN LIAONING PROVINCE: Occurrence Conditions and Primary Selection of Target Areas

YU Xiao-lei¹, ZHANG Xiao-hui¹, LIU Zhen-wei¹, CAI Xin-ming¹, YANG Hui¹, SUN Lei¹,
CHEN Jun-dian², MU Jun-hao¹

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

2. Liaoning Geophysical Measuring Exploration Institute Co., Ltd., Shenyang 110031, China

Abstract: As a renewable high-temperature geothermal resource, dry hot rock has received increasing attention in China. The temperature of dry hot rock cannot be measured directly except by deep drilling methods. However, the underground thermal anomalies can be indirectly reflected by the indicators such as terrestrial heat flow, buried depth of Curie surface, distribution of acid rock mass, crust low-velocity and high-conduction zone, as well as tectonic stress field. The high value points of terrestrial heat flow in Liaoning Province are mainly distributed in Liaoyang-Haicheng-Gaizhou region, followed by the western sag of Lower Liaohe Basin. The Curie surface uplift area of the province is distributed around the north Liaoning depression area, with the buried depth of Curie surface at the uplift center above 18 km. The highly radioactive granites are mainly Early Cretaceous granites, distributed in eastern and southern Liaoning regions. There are crust low-velocity and high-conduction zones within about 40 km from the east and west sides of Haicheng area, with the buried depth of 10–20 km. The extensional faults in the area are mainly NE-NEE trending. The Tancheng-Lujiang fault zone is a NE-trending lithospheric fault going through Liaoning Province, and

收稿日期:2022-07-22;修回日期:2022-10-25. 编辑:张哲.

基金项目:辽宁省地质勘查专项基金项目“辽宁省干热岩资源调查与评价”(JH22-210000-15550).

作者简介:于小磊(1988—),男,硕士,工程师,主要从事地质矿产勘查工作,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区宁山中路 42 号, E-mail/353503770@qq.com

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

large NE-NEE deep crustal faults are mainly distributed in eastern Liaoning. Based on the analysis of occurrence indexes of hot dry rocks in Liaoning Province and classification of hot dry rock resources in China, the Anshan-Haicheng area is selected as the target of highly radioactive hot dry rock resources, and the Lower Liaohe Basin as the target area of sedimentary basin-type hot dry rock resources.

Key words: hot dry rock; terrestrial heat flow; Curie surface; acid rock body; tectonic stress field; Liaoning Province

0 引言

地球深部蕴藏着巨大的能量,地核温度可高达 4 000~6 800 °C。地球内部的热量主要来源于 3 个部分,分别为地球形成时的余热、地球与其他星体之间的潮汐摩擦加热及放射性元素的衰变产生的热量。地球通过火山、地震、地热等方式源源不断地释放着内部能量。干热岩是地球热量释放过程中产生的,是地热资源的一种。自 1973 年美国科学家提出干热岩概念以来,由于其具有温度高、稳定性好、能量大等特点,许多发达国家相继开展了干热岩的试验研究。2018 年,国家能源局将干热岩定义为不含或仅含少量流体,温度高于 180 °C,其热能当前技术经济条件下可以利用的岩体^[1]。

我国干热岩研究起步较晚,但在世界干热岩利用技术发展的带动下,呈现出快速发展的态势,并取得了许多重要的进展,为现阶段开展干热岩勘探开发奠定了良好的基础。我国从 1993 年开始开展干热岩的试验,但并未成功实施。直至 2010 年,原国土资源部启动了公益性科研项目“中国干热岩勘查关键技术研究”,主要开展干热岩高温钻探技术方面的研究。2012 年,我国启动了“863 计划”项目“干热岩靶区工程测试及人工压裂工艺技术研究”及“干热岩热能开发与综合利用关键技术研究”,开启了国内专门针对干热岩工程的研究,计算出中国大陆(3~10 km 深度)干热岩资源总量为 20.9×10^6 EJ,合 714.9×10^{12} t 标准煤,若按 2% 的可采资源量计算,相当于中国 2010 年能源消耗总量的 4 400 倍^[2]。2013 年,中国地质调查局承担项目“全国干热岩资源潜力评价与示范靶区研究”,系统研究了干热岩赋存特征和成因机制,评价了我国干热岩资源潜力,为我国实现干热岩开发利用提供科学依据,国内干热岩资源调查评价与开发研究进入实质性阶段^[3]。

此后,近 20 个省份相继开展了本省的干热岩勘查工作。其中,2014 年至今,青海地勘人员在青海共和盆

地成功施工 5 眼干热岩勘探孔,孔深在 3 000~3 705 m,井底温度达 180 °C 以上,5 眼勘探孔均钻获干热岩体。其中 GR1 干热岩勘探孔孔深 3 705 m,钻获了温度超过 200 °C 的高温岩体,实现我国干热岩资源勘探的重大突破^[4]。恒泰艾普(海南)清洁能源公司在李德威教授团队指导下,在海南琼北盆地成功钻获古近纪碎屑沉积岩干热岩储层,孔深 4 387 m,温度 185 °C^[5]。

2020 年,是中国“碳中和”元年,地热作为五大非碳基能源之一,得到了进一步的重视。2021 年,在中国科学院重大咨询项目“中国碳中和框架路线图研究”中,干热岩的开发为专题内容之一^[6]。辽宁省作为典型的能源输入省份,是以能源消耗为主的工业大省。在“碳达峰、碳中和”进程中,辽宁省仍处于高投入、高排放的阶段,因此有序开发干热岩资源是顺应时代发展的要求,也是解决自身能源结构的重要途径^[7]。本文对辽宁省大地热流值、居里面埋深、酸性岩体分布及构造应力特征等干热岩资源赋存指标进行分析,以期对干热岩进一步的勘查工作提供参考。

1 干热岩资源赋存指标分析

由于干热岩为深埋于地下 3 000 m 以深的岩石体,除钻探外无法直接通过现有的技术手段获取其温度,因此只能通过大地热流值、居里面埋深、酸性岩体分布、壳内低速高导体埋深及构造应力场等指标间接反映地下的热异常^[8-9]。

1.1 大地热流值特征

大地热流值为单位时间内地球内部的热能通过岩层传导和地热流体对流作用向地表的散失量。大地热流值是表征地壳浅部热状态的一个非常重要的综合性参数,也是深部温度计算的最重要参数,比其他地热参数更能反映某个地区地温场的特点^[10]。辽宁省已有的 89 个热流数据中,有 44 个集中分布于下辽河盆地,42 个分布于辽东地区,辽西地区数据较少,仅 3 个(图 1)。

热流值介于 $32.1 \sim 105 \text{ mW/m}^2$, 均值为 63.23 mW/m^2 , 平均地温梯度为 $35.1 \text{ }^\circ\text{C/km}$, 高于全国平均水平的大地热流值 (61.5 mW/m^2) 和地温梯度值 ($24.1 \text{ }^\circ\text{C/km}$)^[11], 显示出辽宁省具有较好的地热资源开发潜力。其中, 辽阳-海城-盖州一带热流值大于 (90 mW/m^2) 的点有 4 个, 呈条带状分布于郯庐断裂以东的辽东山地丘陵区与辽河平原区的过渡带, 最高值为 105 mW/m^2 ; 下辽河拗陷西部热流值介于 $70 \sim 90 \text{ mW/m}^2$ 之间的点有 11 个, 平均热流值为 77 mW/m^2 。

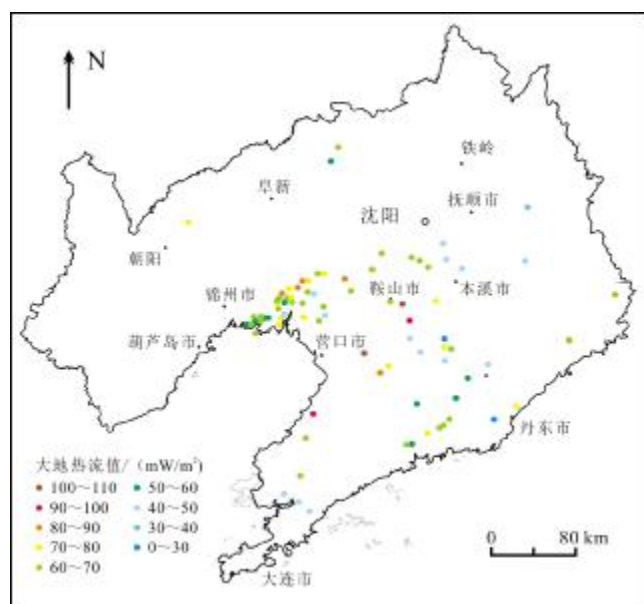


图 1 辽宁省大地热流值分布图

(据文献[11-14]修改)

Fig. 1 Distribution map of terrestrial heat flow values in Liaoning Province

(Modified from References [11-14])

1.2 居里面特征

居里温度是使位于地壳深部的侵入岩、火山岩及变质岩等各类地质体中铁磁性矿物失去磁性的温度, 纯铁磁矿的消磁温度约 $578 \text{ }^\circ\text{C}$ 。地壳深部各类地质体失去磁性的埋深面则为居里面。居里面是一个磁性界面, 可以利用航磁资料计算居里面的埋深, 当地质体的铁磁性矿物组成相似时, 居里面也可以近似看作是一个温度界面。居里面埋深较浅的地区, 地球内部热量向地表传输的距离较短, 有利于产生高温的干热岩孕育环境, 同时有利于干热岩的勘查开发^[5]。

从辽宁省居里面等深图(图 2)上可以看出, 辽宁省居里面总体上呈现拗隆相间的格局, 深度在 $16 \sim 40 \text{ km}$

之间变化, 平均深度约 28 km 。根据辽宁省居里面隆起和拗陷的特点, 可划分为辽东隆起区、辽南拗陷区、辽西隆起区和辽北拗陷区 4 个区域。其中在辽北拗陷区的铁岭市横道河子镇附近分布着一个较深的极值点, 深度约 40 km , 显示该区地壳具有“冷壳”的特点。5 个隆起中心分别位于阜新市、彰武县、盘锦市、凤城市及桓仁县, 绕辽北拗陷区呈环状分布, 隆起中心居里面埋深均在小于 18 km 。辽南拗陷区主要分布于岫岩-营口以南地区, 居里面等深线长轴呈近南北走向, 居里面深度从海上向陆地过渡具有明显变深的趋势, 居里面深度普遍大于 30 km 。位于辽西隆起区的朝阳以东、盘锦以西地区呈现隆中拗的特点, 居里面埋深超过 28 km 。

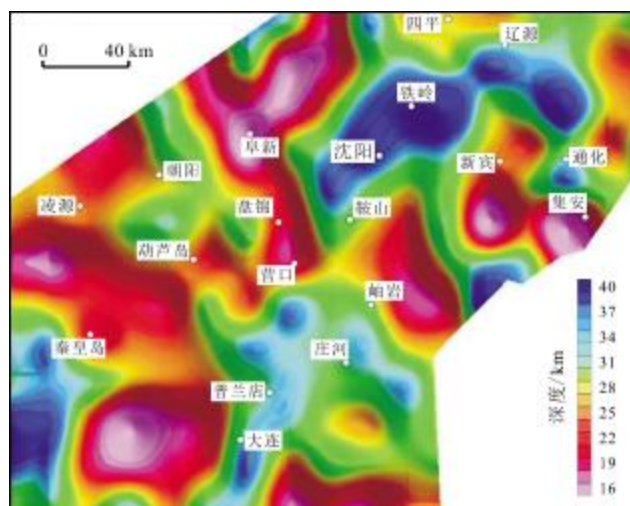


图 2 辽宁及其邻区居里面等深图

(据文献[15])

Fig. 2 Curie surface contour map of Liaoning and adjacent areas

(From Reference [15])

1.3 酸性岩体分布特征

地表观测到的热流值主要由两部分组成, 一是地核和地幔中的热量通过地壳散失于地表的热量, 二是地壳中的放射性元素 U、Th 和 K 通过衰变产生的热量。酸性岩体由于相对富含放射性生热元素 U、Th 和 K, 因此可作为干热岩资源赋存的重要指标条件^[16]。在各类酸性岩体中, 具有最高的平均单位体积生热率的岩体为燕山期花岗岩, 其平均单位体积生热率要显著高于印支期、华力西期及加里东期花岗岩^[17]。

花岗岩是辽宁省中生代酸性侵入岩中最主要的岩类, 总出露面积达 $16\,041.2 \text{ km}^2$, 主要分布于辽南庄河-盖州-普兰店及辽东风城-海城-桓仁一带(图 3)。

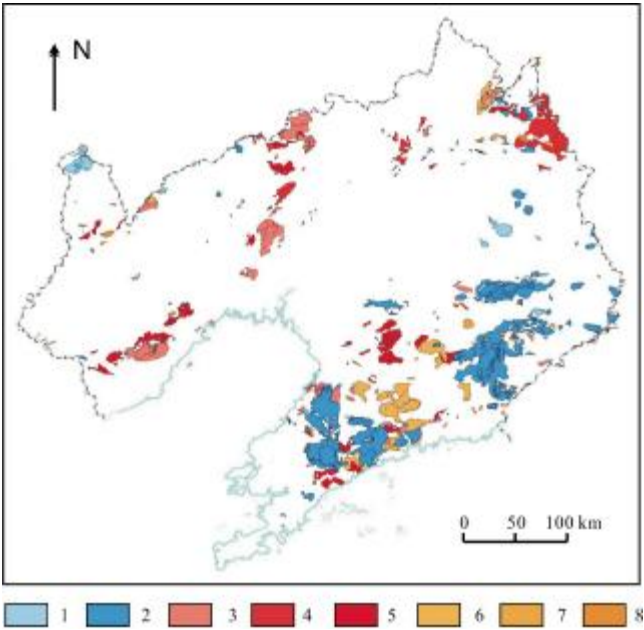


图 3 辽宁省中生代酸性岩分布图
(据文献[18]修改)

Fig. 3 Distribution map of Mesozoic acid rocks in
Liaoning Province
(Modified from Reference [18])

1—晚白垩世(Late Cretaceous); 2—早白垩世(Early Cretaceous); 3—晚侏罗世(Late Jurassic); 4—中侏罗世(Middle Jurassic); 5—早侏罗世(Early Jurassic); 6—晚三叠世(Late Triassic); 7—中三叠世(Middle Triassic); 8—早三叠世(Early Triassic)

其中,早—中三叠世花岗岩不发育,集中分布于辽北西丰地区及辽东宽甸地区,主要受 NE 向断裂控制,呈现 NE 向长条状或似圆状。晚三叠世侵入的花岗岩类均出露于古元古代及以前的隆起带上,受 E-W 向复式褶皱和 NE 向、E-W 向、近 S-N 向断裂控制。早侏罗世岩体以岩株为主,部分为岩基,多成 NE 向及近 E-W 向展布。中侏罗世岩体发育程度不及早侏罗世,岩体从小岩株到岩基均有产出。晚侏罗世岩体多呈椭圆状、长条状的岩株产出,多呈 E-W 向或 NE 向展布。早白垩世岩浆侵入活动十分强烈,岩体出露面积占燕山期侵入岩面积的 53.4%。晚白垩世岩浆侵入活动较早白垩世明显减弱^[18]。

辽东地区酸性侵入岩中 U、Th、K 的平均含量分别为 4.25×10^{-6} 、 27.84×10^{-6} 、 4.62×10^{-6} , 均高于全球平均值($U\approx3.5\times10^{-6}$, $Th\approx18.0\times10^{-6}$, $K\approx3.13\times10^{-6}$)^[19], 其中,三叠纪及侏罗纪花岗岩中放射性元素含量均远低于整体平均值。白垩纪花岗岩中放射性元素远高于整

体平均值, U、Th、K 的平均含量分别为 7.55×10^{-6} 、 49.97×10^{-6} 、 4.29×10^{-6} 。岩石中放射性元素含量波动区间较大, 例如老黑山—宽甸岩体中 U 含量介于 $2.35\times10^{-6}\sim10.89\times10^{-6}$ 之间, Th 含量介于 $6.82\times10^{-6}\sim67.28\times10^{-6}$ 之间, K 含量介于 $1.95\times10^{-6}\sim5.77\times10^{-6}$ 之间。鞍山汤岗子及千山温泉、丹东五龙背及东汤温泉、本溪汤池沟温泉、熊岳温泉均发育在早白垩世花岗岩之中^[20], 这几处温泉也是辽宁省内超过 70℃ 的主要温泉资源。各时代岩体放射性元素含量及生热率见表 1^[20]。

表 1 辽东地区中生代侵入岩放射性元素含量表
Table 1 Content of radioactive elements in Mesozoic
intrusive rocks in eastern Liaoning Province

年代及岩体	U/ 10^{-6}	Th/ 10^{-6}	K/ 10^{-6}	生热率/($\mu\text{W}/\text{m}^3$)
三叠纪新甸岩体	3.52	18.4	2.88	2.33
三叠纪双牙山岩体	2.99	8.95	2.20	1.53
侏罗纪帽盔山岩体	1.79	4.71	0.88	0.85
早白垩世关门山岩体	3.89	27.0	4.58	3.14
早白垩世老黑山-宽甸岩体	5.78	37.35	4.57	4.28
早白垩世五龙背-大堡岩体	5.07	34.0	4.17	3.87
早白垩世三股流岩体	11.8	78.5	4.12	8.64

1.4 壳内低速高导体埋深

低速高导层是位于地壳或地幔中的具有异常低的 S 波波速、较强的地震波衰减和较高的导电性的岩层。壳内低速高导层的成因机制比较复杂。韧性剪切带中的岩石在变形过程中,由于矿物的定向排列,可使岩石的波速、电性产生各向异性,从而导致低速高导体的产生;深部岩石中含水矿物的脱水作用可导致壳内低速高导层的形成;在一定的温度区间,地壳内的岩石达到熔融温度而发生相态的转变,也可导致低速高导层的产生;深部岩石在高温高压的作用下含水矿物发生脱水,可导致壳内岩石的物理性质发生改变,也会形成低速高导层^[21]。上地幔中低速高导层可能是水和熔体共同作用的结果^[22]。无论低速高导层的成因机制如何,低速高导层的出现多伴随着异常的高温,所以低速高导层的出现及埋深对于干热岩的寻找有一定的指示作用。

内蒙古东乌珠穆沁旗—辽宁东沟断面 (GGT-13) 是我国地质断面部署中的 11 条断面之一,在辽宁省内自西北向东南穿过北票、义县、盘山、古城子、海城、岫

岩等地直至黄海之滨的丹东市大孤山镇^[23]。从图 4 可以看出,位于下辽河拗陷的盘山、古城子一带出现明显的莫霍面及软流圈的上隆,下辽河拗陷新近纪以来幔源玄武岩喷发,就是在软流圈上隆的背景下出现地幔剪切和上地幔部分熔融的结果^[24]。位于郯庐断裂带以东的海城两侧深度在 10~20 km 范围内出现明显的壳内高导层,宽度约 40 km,其电阻率值为 4~6 Ωm ,与壳内低速层的位置大致相当。海城地区的地震震源集中分布于该低速高导层上界面,结合上述壳内低速高导层的成因,推测该层为高温高压下含水矿物的脱水所致。脱水作用导致壳内岩石物理性质发生改变,岩石相变成低强度的软弱体,使区域应力集中分布于上覆的脆性岩石中导致地震的孕育和发生。同时由于郯庐断裂带仅为古板块边界而非控热构造^[25],推测海城地区的高热流值可能与低速高导层存在一定的联系。

1.5 构造应力场特征

辽宁省处于总体走向呈 NE 向的华北断块北部,中部有巨型断裂构造带郯庐断裂带呈 NE 向贯穿全省,是中强地震较活跃的地区,地震的发生正是构造应力突然释放的后果。张先泽等^[26]利用宏观和微观地震资料及辽河油田的计算成果,详细分析了辽宁省构造应力场的特征,认为辽宁省构造应力场主张应力为 NW 向形成 NE 向断裂,主压应力为 NEE 向形成近 NW 向断裂。戴盈磊等^[27]通过 1971—2020 年辽宁及周边地区震源机制解资料,利用区域尺度应力场反演方法(SATSI)对辽宁省构造应力场进行了分析,认为

辽宁省内最大主应力方向以 NEE 向为主,最小主应力方向以 NNW 向为主,以走滑正断裂为主,整体上处于拉张的应力环境。从区域地质构造背景来看,西太平洋板块对辽宁省 NW 向的高速俯冲是辽宁省地震发生及一系列 NE—NNE 向隆起和拗陷形成的主要动力来源,并使地壳浅部形成一系列的 NE—NEE 向张性断裂^[28]。

张性的岩石圈断裂及深壳断裂可以更好地将地球深部热量传递到中、上地壳并为热量的循环提供通道。贯穿辽宁省的郯庐断裂带为岩石圈断裂,在延伸入下辽河盆地后,线性断裂带变为多条,主要有二界沟活动断裂带、威远堡—盘山活动断裂带及辽中—大洼活动断裂带等,呈帚状断裂束。NE—NEE 向深壳断裂主要有东风—沈旦堡断裂、长滩—东陵区断裂、李石—英额门断裂、虎庄—下肥地断裂、归州—丹东断裂、金州断裂、鸭绿江断裂等,在沈阳、鞍山、本溪地区深壳断裂分布较集中,且 NE 向与 NEE 向断裂互相交汇。

2 初选靶区讨论

前人在分析我国大陆地区大地热流值、居里面埋深、酸性岩体分布和控热构造的基础上,通过对国内外已发现的干热岩资源的成因模式进行研究,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^[3]。

2.1 高放射性产热型

辽宁省中生代酸性岩中白垩纪岩体具有最高的放

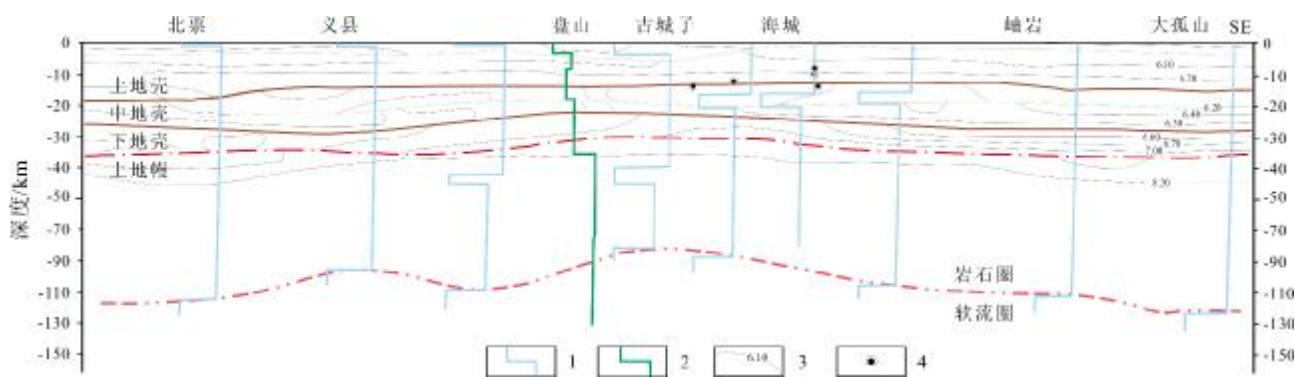


图 4 GGT-13 地球物理解译剖面
(据文献^[23])

Fig. 4 Geophysical interpretation profile of GGT-13
(From Reference ^[23])

1—电导率(conductivity); 2—S波波速(velocity of S-wave); 3—P波波速(velocity of P-wave); 4—震中位置(epicenter)

放射性元素含量和生热率,其生热率介于 $3.14\sim 8.64\ \mu\text{W}/\text{m}^3$ 之间,接近中国东南沿海地区的中生代酸性花岗岩的平均放射性生热率($4.2\ \mu\text{W}/\text{m}^3$)^[3]。同时早白垩世的花岗岩体数量多,面积大于 $100\ \text{km}^2$ 的岩基有 11 个,具备较好的生热条件。但是要寻找到高放射性产热型干热岩,不仅需要合适的干热岩体,为了防止大气降水入渗而使岩体冷却,在基底之上还需要具有一定厚度的导热性较差的盖层以保存基底热量。结合辽宁省干热岩资源赋存条件,初选出鞍山-海城一带、盖县-许屯一带、草河城镇-八河川镇一带及五龙背地区为高放射性产热型干热岩资源勘查靶区。然而,考虑到高放射性产热型干热岩开发工作至今还没有成功的案例,其温度仅靠岩体放射性很难达到要求,放射性花岗岩放热的效率并不高且温度衰减较快等原因,高放射性产热型干热岩靶区仅保留具备高大地热流值和壳内低速高导体的鞍山-海城一带。

2.2 沉积盆地型

下辽河盆地是辽宁省内最大的盆地,是一个在前古生代基底上发育起来的呈北东向展布的中、新生代拗陷盆地,属于渤海裂谷系的组成部分,东临辽东褶皱带,西接燕山沉降带,由东向西呈现出“三凹三凸”的构造格局。下辽河盆地具有高的地温梯度和大地热流值,居里面埋深浅,深部存在上地幔低速高导体,东西两侧为郯庐断裂带,基底之上巨厚的低热导率新生代沉积盖层提供了很好的保温效果。通过对以上干热岩资源赋存条件的分析,初选出下辽河盆地为辽宁省沉积盆地型干热岩资源勘查靶区。

2.3 近代火山型

近代火山型干热岩资源的主要热源为火山活动中未喷发出地表而残存于深部以岩浆囊形式存在的岩浆,深浅不一,通常可在较浅的位置获得较高的温度。我国近代火山主要分布在腾冲、雷琼、长白山、五大连池等地区^[29]。东北地区有 5 个火山和火山岩带,分别为下辽河-双辽、佳木斯-伊通、抚顺-密山、长白山和大兴安岭。其中下辽河-双辽火山带火山活动时间为 $63\sim 25\ \text{Ma}$,抚顺-密山火山带活动时间为 $44.9\ \text{Ma}$,而长白山天池火山晚期火山活动时间为 $1489\sim 704\ \text{a}$,五大连池火山群火山活动时间为 $0.563\ \text{Ma}$ —现代^[30]。一般认为,100 ka 以来的岩浆活动对温度场有很大的影响^[8],而辽宁省内岩浆活动发生在第四纪之前,长时间

的冷却已使岩浆热量散失殆尽,对区域地温场基本无影响。

2.4 强烈构造活动带型

深大活动断裂作为活动构造中最活跃的因素往往切割地壳较深而使深部酸性岩浆易于侵入,同时在岩浆侵入过程中会打破断裂原有的空间结构而加剧侵入岩体的上隆。中国活动地块可划分为青藏、西域、南华、滇缅、华北和东北亚等 6 个 I 级活动地块区,还可以进一步划分为 22 个 II 级活动地块^[31]。辽宁省处于东北亚活动地块区,相较于我国西藏、滇西、川西及台湾地区,本地块区是一个构造活动相对稳定的地区,构造活动不强烈,不具备形成强烈构造活动带型干热岩的构造条件和热背景。

3 结论

通过对辽宁省大地热流、居里面等指标进行分析,认为辽宁省可能存在的主要干热岩类型为沉积盆地型和高放射性产热型。其中,沉积盆地型干热岩靶区为下辽河盆地,应作为下一步辽宁省干热岩资源勘查开发的重点地区;高放射性产热型干热岩靶区为鞍山-海城一带,可作为辽宁省干热岩资源勘查开发的次重点地区。

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] 汪集隼, 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.
- [4] 中国地质调查局. 青海共和盆地钻获 $236\ ^\circ\text{C}$ 干热岩[J]. 地质装备, 2017, 18(6): 8.
China Geological Survey. $236\ ^\circ\text{C}$ dry hot rock drilled in Gonghe basin, Qinghai[J]. Geological Equipment, 2017, 18(6): 8. (in Chinese)
- [5] 刘德民, 张根袁, 关俊朋, 等. 苏北盆地干热岩地热资源前景分析

- [J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 48–54.
- Liu D M, Zhang G Y, Guan J P, et al. Analysis of geothermal resources potential for hot dry rock in the Subei Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 48–54.
- [6] 王贵玲, 陆川. 碳中和目标驱动下地热资源开采利用技术进展[J]. 地质与资源, 2022, 31(3): 412–425, 341.
- Wang G L, Lu C. Progress of geothermal resources exploitation and utilization technology driven by carbon neutralization target [J]. Geology and Resources, 2022, 31(3): 412–425, 341.
- [7] 毕德利. 辽宁省发展绿色经济的战略政策研究[J]. 社会科学辑刊, 2010(6): 148–152.
- Bi D L. Study on the strategic policy of developing green economy in Liaoning Province [J]. Social Science Journal, 2010(6): 148–152. (in Chinese)
- [8] 庞忠和, 罗霖, 程远志, 等. 中国深层地热能开采的地质条件评价[J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 134–151.
- Pang Z H, Luo J, Cheng Y Z, et al. Evaluation of geological conditions for the development of deep geothermal energy in China [J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 134–151.
- [9] 刘德民, 张昌生, 孙明行, 等. 干热岩勘查评价指标与形成条件[J]. 地质科技通报, 2021, 40(3): 1–11.
- Liu D M, Zhang C S, Sun M X, et al. Evaluation indexes and formation conditions of hot dry rock exploration [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(3): 1–11.
- [10] 郝春艳, 刘绍文, 王华玉, 等. 全球大地热流研究进展[J]. 地质科学, 2014, 49(3): 754–770.
- Hao C Y, Liu S W, Wang H Y, et al. Global heat flow: An overview over past 20 years [J]. Chinese Journal of Geology, 2014, 49(3): 754–770.
- [11] 姜光政, 高棚, 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.
- [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] 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, 366.
- 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, 366.
- [14] 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 J Y, Huang S P. Compilation of heat flow data for continental area of China [J]. Chinese Journal of Geology, 1988, 23(2): 196–204.
- [15] 高维, 舒晴, 郭志宏, 等. 辽宁及其邻区高精度航磁数据分析: 对区域性断裂带与岩石圈热结构约束[J]. 地球科学, 2022, 47(9): 3401–3416.
- Gao W, Shu Q, Guo Z H, et al. Analysis of high precision aeromagnetic data in Liaoning and its adjacent areas: Constraints on regional fault zones and lithospheric thermal structure [J]. Earth Science, 2021, 47(9): 3401–3416.
- [16] 蔺文静, 王凤元, 甘浩男, 等. 福建漳州干热岩资源选址与开发前景分析[J]. 科技导报, 2015, 33(19): 28–34.
- Lin W J, Wang F Y, Gan H N, et al. Site selection and development prospect of a hot dry rock resource project in Zhangzhou geothermal field, Fujian Province [J]. Science & Technology Review, 2015, 33(19): 28–34.
- [17] 赵平, 汪集旻, 汪辑安, 等. 中国东南地区岩石生热率分布特征[J]. 岩石学报, 1995, 11(3): 292–305.
- Zhao P, Wang J Y, Wang J A, et al. Characteristics of heat production distribution in SE China [J]. Acta Petrologica Sinica, 1995, 11(3): 292–305.
- [18] 辽宁省地质勘查院. 中国区域地质志·辽宁志[M]. 北京: 地质出版社, 2017.
- Liaoning Geological Exploration Institute. Regional geology of China: Liaoning [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017. (in Chinese)
- [19] 蔺文静, 甘浩男, 王贵玲, 等. 我国东南沿海干热岩赋存前景及与靶区选址研究[J]. 地质学报, 2016, 90(8): 2043–2058.
- Lin W J, Gan H N, Wang G L, et al. Occurrence prospect of HDR and target site selection study in southeastern of China [J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(8): 2043–2058.
- [20] 李文庆. 辽宁东部地区地热特征及岩石放射性生热对地热资源潜力的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- Li W Q. The influence of geothermal features and radioactive heat production of rocks to potential of geothermal resources in Eastern area of Liaoning Province [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [21] 高平. 中国华北地区壳内低速高导层(体)成因模式的探讨[J]. 中国地震, 1997, 13(3): 29–37.
- Gao P. Study on the origin of low velocity and high conductivity layer (body) in North China [J]. Earthquake Research in China, 1997, 13(3): 29–37.
- [22] 彭伟, 黄晓葛, 白武明. 上地幔低速高导层成因的探讨——水和熔体的作用[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(5): 1970–1980.
- Peng W, Huang X G, Bai W M. The role of water and melt on the low-velocity and high-conductivity zones in the upper mantle [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(5): 1970–1980.
- [23] 卢造勋, 夏怀宽. 内蒙古东乌珠穆沁旗—辽宁东沟地学断面[J]. 地球物理学报, 1993, 36(6): 765–772.

- Lu Z X, Xia H K. Geoscience transect from Dong Ujimqinqi, Nei Mongol, to Donggou, Liaoning, China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1993, 36(6): 765-772.
- [24] 朱光, 宋传中, 牛漫兰, 等. 郯庐断裂带的岩石圈结构及其成因分析[J]. 高校地质学报, 2002, 8(3): 248-256.
- Zhu G, Song C Z, Niu M L, et al. Lithospheric textures of the Tan-Lu fault zone and their genetic analysis [J]. Geological Journal of China Universities, 2002, 8(3): 248-256.
- [25] 王一波, 胡圣标, 聂栋刚, 等. 郯庐断裂带是热异常带吗: 来自断裂带南段热流的约束[J]. 地球物理学报, 2019, 62(8): 3078-3094.
- Wang Y B, Hu S B, Nie D G, et al. Is the Tan-Lu fault zone a thermal anomaly belt: Constraints from heat flow in its southern section [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(8): 3078-3094.
- [26] 张先泽, 欧阳杰, 王金明, 等. 辽宁地区现今构造应力场特征[J]. 辽宁地质, 1997(4): 37-42.
- Zhang X Z, Ouyang J, Wang J M, et al. The characteristic of the existing structure stress field in Liaoning region [J]. Liaoning Geology, 1997(4): 37-42.
- [27] 戴盈磊, 张文静, 王承伟, 等. 基于 MSATSI 的辽宁地区构造应力场特征[J]. 防灾减灾学报, 2021, 37(3): 1-8.
- Dai Y L, Zhang W J, Wang C W, et al. Characteristics of tectonic stress field in Liaoning based on MSATSI [J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 2021, 37(3): 1-8.
- [28] 姜德录, 白云, 卢造勋, 等. 中朝地台北缘及其邻区软流圈分布特征与构造运动的关系[J]. 中国地震, 2000, 16(1): 14-21.
- Jiang D L, Bai Y, Lu Z X, et al. The relations between the asthenosphere thickness distributed characteristics and tectogenesis of Sino-Korean platform and its neighboring area [J]. Earthquake Research in China, 2000, 16(1): 14-21.
- [29] 蔺文静, 王贵玲, 邵景力, 等. 我国干热岩资源分布及勘探: 进展与启示[J]. 地质学报, 2021, 95(5): 1366-1381.
- Lin W J, Wang G L, Shao J L, et al. Distribution and exploration of hot dry rock resources in China: Progress and inspiration [J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(5): 1366-1381.
- [30] 王锡魁, 裘善文, 宋长春, 等. 中国东北新生代火山活动与地热资源[J]. 地质论评, 1999, 45(S1): 190-195.
- Wang X K, Qiu S W, Song C C, et al. Cenozoic volcanism and geothermal resources in Northeast China [J]. Geological Review, 1999, 45(S1): 190-195.
- [31] 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2003, 33(S1): 12-20.
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, et al. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2003, 46(2): 13-24.

(上接第 554 页/Continued from Page 554)

- [15] 侯读杰, 冯子辉. 油气地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011: 201-242.
- Hou D J, Feng Z H. Petroleum geochemistry [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 201-242. (in Chinese)
- [16] Aquino Neot F R, Bjorøy M. Advances in Organic Geochemistry [C]. New York: Wiley, 1983: 659-667.
- [17] 张立平, 黄第藩, 廖志勤. 伽马蜡烷-水体分层的地球化学标志[J]. 沉积学报, 1999, 17(1): 136-140.
- Zhang L P, Huang D F, Liao Z Q. Gammacerane-geochemical indicator of water column stratification [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(1): 136-140.
- [18] Huang W Y, Meinschein W G. Sterols as ecological indicators [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1979, 43(5): 739-745.
- [19] 唐友军, 马忠梅, 蒋兴超. 内蒙古扎鲁特盆地陶海营子剖面林西组烃源岩生物标志化合物特征及意义[J]. 地质通报, 2013, 32(8): 1315-1321.
- Tang Y J, Ma Z M, Jiang X C. Characteristics and significance of biomarker compounds of Linxi Formation hydrocarbon source rocks along Taohaiyingzi section in Zhalute basin, Inner Mongolia [J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(8): 1315-1321.
- [20] 段云鹏, 包建平, 马安来, 等. 辽河双南油田油气地球化学特征[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(6): 496-501.
- Duan Y P, Bao J P, Ma A L, et al. Geochemical characteristics of oil and gas from Shuangnan oilfield, Liaohe basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(6): 496-501.