



赵雪宇, 曾昭发, 吴真玮, 等. 2015. 利用地球物理方法圈定松辽盆地干热岩靶区. 地球物理学进展, 30(6): 2863-2869, doi:10. 6038/pg20150654.
ZHAO Xue-yu, ZENG Zhao-fa, WU Zhen-wei, *et al.* 2015. Delineating the area of HDR in Songliao basin using geophysical methods. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 30(6): 2863-2869, doi:10. 6038/pg20150654.

利用地球物理方法圈定松辽盆地干热岩靶区 Delineating the area of HDR in Songliao basin using geophysical methods

赵雪宇¹, 曾昭发¹, 吴真玮¹, 王坤¹, 李静¹, 许天福²

ZHAO Xue-yu¹, ZENG Zhao-fa¹, WU Zhen-wei¹, WANG Kun¹, LI Jing¹, XU Tian-fu²

1. 吉林大学 地球探测科学与技术学院, 长春 130026

2. 吉林大学 环境与资源学院, 长春 130026

1. College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

2. College of Environment and resources, Jilin University, Changchun 130026, China

摘要 干热岩作为一种新型的地热资源,其勘探与开发有重要意义. 本文将对干热岩国内外勘探与开发现状进行介绍,给出寻找干热岩的勘探思路. 结合已有的地质与地球物理资料对松辽盆地地热分布和地球物理特征进行分析. 松辽盆地在地质、地球物理和地球化学等方面已有大量的研究,通过对本地区的磁法和重力数据进行处理,进行莫霍面、居里面等界面的深度反演,计算不同深度的地热温度值及梯度值,总结分析区域的干热岩形成的条件,圈定可能的尚未开发研究的存在干热岩的区域,并给出了初步的评价结果.

关键词 松辽盆地; 干热岩; 重磁方法; 靶区圈定

中图分类号 P312, P631

文献标识码 A

doi:10. 6038/pg20150654

Abstract The prospecting and development of hot dry rock (HDR), a new type of geothermal resources, are getting more and more important. There are a lot of research achievements on basis geology, hydrogeology, geochemistry and geophysics of Songliao Basin. In this paper, the current situation of prospecting and developing the HDR will be introduced. The way of prospecting HDR will be given. Combined with geology and geophysics data, through the processing of the magnetic and gravity data, the Moho surface and Curie interface will be given. Then we calculate the geothermal change at different depths. Finally we summarize and analyze the characteristics of the gravity and magnetic data and conclude to delineate the areas that possibly have the hot dry rocks. The evaluations of these areas are also given.

Keywords Songliao Basin; hot dry rock; gravity and magnetic methods; the delineation

0 引言

干热岩,英文名称为 HDR(Hot Dry Rock),其所处的地热系统为增强型地热系统(EGS),指一般温度 150~650 °C 之间,埋深数千米,内部不存在流体或仅有少量地下流体的高温岩体. 常见的是一些变质岩或者结晶岩体,例如黑云母片麻岩、花岗岩、花岗闪长岩等. 干热岩本身有很高的温度,温度范围较广,呈干热状态. 由于目前钻探技术的成熟,且热能系统不要求岩石具有孔渗条件和含有流体,干热岩可以作为热能资源加以利用. 现阶段,干热岩地热资源是专指埋深较浅、温度较高、有开发经济价值的热岩体. 保守估计地壳中干热岩(3~10 km 深处)所蕴含的能量相当于全球所有石油、天然气和煤炭所蕴藏能量的 30 倍(许天福等,2012). 我

国干热岩储量丰富,分布比较广泛,蕴藏热能十分巨大,我国大陆地区干热岩地热储量为 21×10^6 EJ,而 2010 年我国总能耗为 95. 2 EJ,如果同样假定 2% 的开发利用率,干热岩地热资源可以满足我国 4400 年左右的能耗所需(郭剑等,2014). 对于判断某处是否有干热岩的利用潜力,最明显的标志有地温梯度是否有异常或者地下一定深度(例如 2000~5000 m 范围内)温度是否达到 150 °C 及以上.

增强型地热系统的开发与利用整个过程可大致分为资源勘查与选址、人工储层的建造、地热田的建立、地热田的开采和监测四个阶段(王晓星等,2012). 对于勘查阶段,需要用到地球物理方法. 干热岩作为一种地热资源,结合水热型地热开发的地球物理方法及干热岩自身特性,可归纳出以下几种针对于干热岩勘探的地球物理方法(Heiken *et al.*,

收稿日期 2015-02-28; 修回日期 2015-09-28.

投稿网址 <http://www.progeophys.cn>

基金项目 国家高技术研究发展计划(863)(2012AA052801)、国家自然科学基金项目(41174097)和 2013 年博士点基金项目(20130061110060 博导类)联合资助.

作者简介 赵雪宇,男,1991 年生,硕士研究生,主要从事工程地球物理的研究.(E-mail: zhaoxueyu035035@163.com)

1983;曾昭发等,2012):

(1)地热流动性方法. 该方法是最直接的方法. 研究地区常选在热梯度正常,深度大,相对绝缘的沉积岩地区或高产热量的地区(如花岗岩区域,上覆沉积盖层). 这种方法关键点在于确定高热流区域、确定基底温度、测量基底温度、测量岩石热导率和热产量的岩芯、对基底顶部的温度、基底产热量、基底表面的热流和表面热流进行研究等.

(2)地震方法. 地震方法是用于确定地壳结构以及与热相关但非直接的地热结论(如利用地震方法可以帮助确定地下地层分布,但地层分布并不能直接说明地热现象). 本方法适用于定位由热液或岩浆加热而表现出的干扰区. 地震采用如下方法描述可能的干热岩储层. 利用远震 P、S 波结构确定三维结构;P、S 波速度的确定,针对于泊松比及品质因子进行研究等.

(3)大地电磁方法. 由于岩石导电性受其含水量和温度影响较大,因而电磁法在地热勘探中具有重要的作用.

(4)重力和磁法. 由于可以进行大面积的重磁测量,且重磁数据温度、侵入体、大地构造格架有明显的相关关系,因而利用重磁数据进行大范围的干热岩靶区圈定有着独特的优势.

针对于国内外的干热岩勘探与开发进展. 在澳大利亚中部 Cooper 盆地地区,其沉积岩之下有着大量的高温的花岗岩体,利用三维重力反演以及三维图像上所出现的“裂缝”区解释了基底之下的低密度区域,最终在沉积岩之下的 3000m,寻找到了干热岩赋存区域. Meixner 等(2014)在 Hatchobaru 地区利用 59 个观测站进行微重监测,最终通过微小的重力值变化程度得出了干热岩区域开发时的储层物质流失情况储层物质的流失. 随着时间维度的引入,诸如意大利的 Mount Etna 地区的应用实例,可以监测到火山以及地下地热变化情况(Williams-Jones *et al.*, 2008). 美国新墨西哥州芬登山也是在满足地球物理条件、地质构造等基础上,干热岩的勘探与开发得到了进一步的发展(Sasada, 1989).

我国对干热岩的研究起步较晚,1993-1995年,在北京进行了与干热岩有关的试验工作. 2007年,中国能源研究会与澳大利亚 Petrathern 公司进行合作,采集一些干热岩试验样品,并对其进行了分析测试、模型研究等工作. 2010年,福建某公司开展晋江地域 EGS 工程及地震检测试验项目. 2012-2014年,在青海贵德、共和盆地开展了有关钻探与试验工作. 该地区进行了大量的地质与地球物理工作. 重力异常结果中,该盆地共和县城存在一个“凹陷”,存在一个椭圆形重力低区域. 所反演的基底深度为 3000~4000 m,但该结果不符合其他地球物理方法所得的结论,其原因在于重力反演基底深度时只考虑了盖层和基底之间的密度差,视为单一密度界面反演,忽略了基底内花岗岩有低密度影响的横向不均匀性,使得推断基底偏深. 将低缓磁异常反映出的隐伏磁性体与地质构造共同对应之后,寻找到了当地花岗岩带的分布(薛建球等 2013).

本文将以干热岩形成因素分析出发,给出重磁方法勘探干热岩的思路,以松辽盆地为研究区域,通过对所获得重力和磁法资料,进行处理反演,进行重磁异常特征解释,根据地

质界面深度及地质构造,结合已知区域地热梯度的变化规律,给出三个干热岩靶区,并给予初步评价.

1 干热岩形成因素的分析

结合地热形成的因素,可以得到影响干热岩形成及分布的因素(刘天佑,1993)有以下 6 种:

(1)上地幔的隆起和居里面深度较浅

对于地壳的热能而言,其往往是受到地球内热能和外热能的影响. 地球的外热能仅仅能影响到地球表面不太深的地方(通常小于 100 m),因而地球的内热能对于地温梯度有着重要的影响. 如果莫霍面深度小于平均莫霍面深度,上地幔处于隆起的状态,烘烤强,使其可以成为干热岩的热能主要来源. 此外,居里面深度如果较浅,也可间接反映出该地区地热为高值状态.

(2)大范围的花岗岩的分布

花岗岩作为干热岩的组成岩石之一,中放射性元素的存在,其产热率较高,可以提供热源.

(3)断裂的分布

大量断裂的存在,一方面在断层产生过程中机械摩擦可以产生部分热量,另一方面,断层也是地下热量向上传递的良好通道,故深大断层的存在也是影响局部地热异常产生的因素之一.

(4)褶皱

C. T 杜曼斯基于 1964 年指出了多林库司效应,即:构造是影响和控制地温的因素之一,背斜构造具有聚热效应,向斜构造具有散热效应. 因而在背斜构造区域存在干热岩的可能性也较大.

(5)岩性不同岩性的岩石其导热率不同

这也会使得获得的地热梯度有差异. 导热率低的岩石具有高的地温梯度,导热率高的岩石具有较低的地温梯度. 岩性在地热分布上有着一定的控制作用.

(6)地下水

地下水具有较高的热导率,因此地下水分布,也是影响干热岩分布的因素之一.

2 利用重磁方法圈定干热岩靶区方法

利用重磁方法进行干热岩前期勘探有着较大的优势,因而结合重磁勘探的应用及影响干热岩生成的因素,给出圈定干热岩靶区的思路:

(1)针对于重力数据,进行处理,反演莫霍面深度,圈定莫霍面深度较浅的区域,针对于磁异常数据,进行处理,反演出居里面深度,确定基底起伏的情况,圈画出莫霍面及居里面深度较浅的区域;

(2)利用反演出的居里面深度,利用已知的近地表地温梯度,勾画出地下深层的地温和地温梯度变化情况. 寻找出地温高温场所在的区域,进一步缩小干热岩靶区区域;

(3)对重磁数据进行常规处理及构造增强欧拉反褶积,进行重力场源分离,重磁对应分析等处理,结合地质资料,进一步圈定有利于地热汇集的褶皱、断裂及花岗岩区域,缩小范围,最终确定干热岩靶区.

3 区域地质概况

松辽盆地处于郯庐断裂带的西部,地跨东北三省及部分内蒙古自治区,面积约 $26 \times 10^4 \text{ km}^2$,孕育了世界上最大的陆相油田-大庆油田。在地质上,松辽盆地西部及北部是大兴安岭-内蒙海西褶皱带,东北部和东部为黑龙江、吉林海西褶皱,南部以东西向断层与内蒙地轴相隔,依兰-伊通断裂带从它的东边界通过(刘殿秘等,2007)松辽盆地从地貌上是嫩江、松花江、辽河水系流经的平原沼泽区,地面海拔为 120~300 m,属中、新生代形成的大型陆相近海湖成盆地,既是一个四周高起、中间低凹的地貌盆地,也是一个地质上的沉积盆地,属于非海相盆地。其基底是指侏罗系以下的地层岩体,主要为石炭二叠系浅变质岩系及不同时代的侵入岩体。

史若珩等(1977)根据地震资料和钻井资料解释而获得的基底岩性分布图(图 1)。针对于岩性,基底岩性以干枚岩、泥质板岩、结晶灰岩等浅变质岩为主,同时还有片麻岩、片岩及花岗岩和闪长岩类。从导热性来说,这些变质及侵入岩的导热率相对较高,下部热流向上覆盖层传导创造良好的条件。同时,花岗岩产热率在所有岩石中最高的,可起到局部热源的作用。(朱焕来,2011)从花岗岩的分布而言,较为广泛,主要分布在基底断裂及褶皱的周边地区以及盆地边界一带。另外,有关地质资料也表明本地区基底埋深在 0.8~7 km 范围的变化(刘殿秘,2008)。

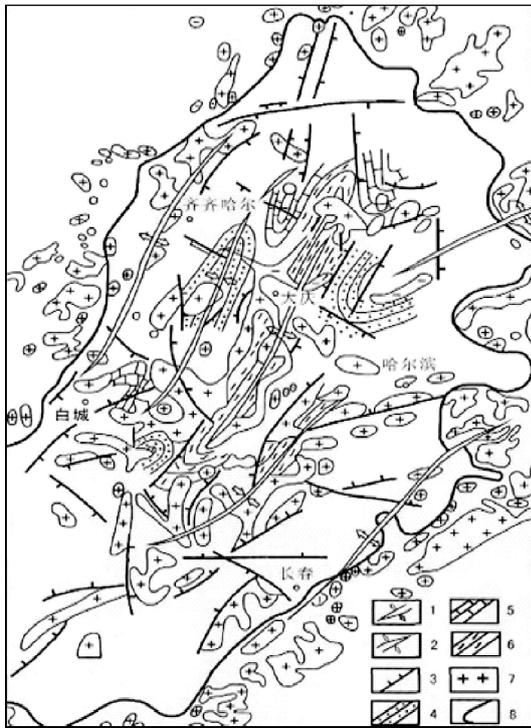


图 1 松辽盆地中北部构造基底纲要图

(据史若珩,1977)

- 1:复式背斜轴线;2:复式向斜轴线;3:基底断裂;4:板岩、干枚岩;
5:碳酸盐岩类;6:片麻岩、片岩;7:花岗岩类;8:盆地现今边界。

Fig. 1 The basement structural framework of Songliao Basin(Shi,1977)

对于基底岩石物性,酸性岩,包括花岗岩、流纹岩等总体表现为中低密、弱磁的特征。中性岩,包括闪长岩、辉长岩、安山岩、玄武岩、安山质凝灰岩等,总体为强磁高密,表现为强正磁异常,高重力正异常。动力变质岩(糜棱岩)和区域变质岩中的浅变质砂岩、粉砂岩、泥岩、干枚岩、板岩等的密度较高,所引起的地球物理异常为负磁异常,强重力正异常。

4 区域重磁异常数据分析与处理

对于松辽盆地布格重力异常而言,其变化平稳,多呈正异常值,异常梯度比较小,带内具有南、北分块的特点。小兴安岭地区异常多为负值,异常走向沿小兴安岭山脉呈北西向展布,没有明显走向。盆地区域异常比较平缓,异常总体走向北东,但具有北西的间断以及局部南北向异常走向。对于磁异常,其以松辽盆地为中心,盆地周围的异常值大小、走向与形态迥然不同。盆地内磁异常形态舒缓,异常值-200~300 nT;航磁异常方向主要有 NE-NNE 向、EW 向和 SN 向,其中 NE-NNE 向是研究区的主要磁异常方向。

针对所获的数据,进行了延拓,比对确定了向上延拓 9 km 后的场值作为本研究区的区域场。利用该区域场值,运用 Park 法,综合本地区部分地震剖面给出的莫霍面深度(杨宝俊等,2003),绘制出了图 4 的莫霍面深度图。根据磁区域场数据,及居里面平均深度 20 km(胡旭芝等 2006),求取了居里面深度图(图 5)。通过欧拉反褶积处理(图 6、图 7)、方向导数的求取,初步划明了断裂构造。利用重磁分析对应的原理(曾昭发,2006;吴真玮,2015),给出了研究区基底岩性分布图。(图 8)

5 研究区温度梯度分布情况

如图 9 所示,研究区地温梯度地热梯度变化范围大,从 26~57 °C/km,从盆地边缘向中心依次增大,大致呈马鞍状轴对称分布,轴向为北东—南西向。最大值在中央拗陷区。且以松原至哈尔滨一线为轴的北西南东 2 km 左右的范围内存在明显的高值区,达 48~57 °C/km。有关资料表明,地热异常面积达到 7.98 平方公里,为盆地总面积的 2/3 以上。从地热角度来说,其具有非常高的地热场及形成地热资源的良好热背景。红框所示的高地热梯度区为圈定干热岩靶区进一步缩小了范围。

另外,将地温梯度认为其随地下深度变化而变化(刘益中等,2012),最后计算出不同深度的地温梯度及地温(如图 10a~10f 所示)

图 10a~10f 表示出了通过所计算出的深度分别在 1 km,2 km,3 km 对应下的温度及地温梯度平面等值线图。这些图可以十分直观的表现出岩层温度及地温梯度的变化情况。同一深度,盆地中央温度高,边部温度低。且高地热带呈 V 字形分布。松辽盆地的高异常梯度,使得在 3 km 的深度时,部分地区地温就可以达到 150 °C。

6 松辽盆地干热岩形成特征及干热岩靶区

综合以上数据处理结果,可以发现松辽盆地有着存在干热岩的条件:

根据重力数据及航磁数据分别计算出的研究区的莫霍

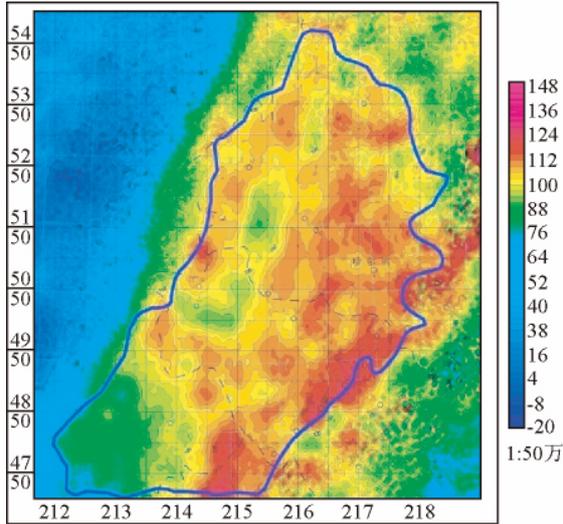


图2 研究区布格重力异常图
Fig. 2 Bouguer gravity abnormal map

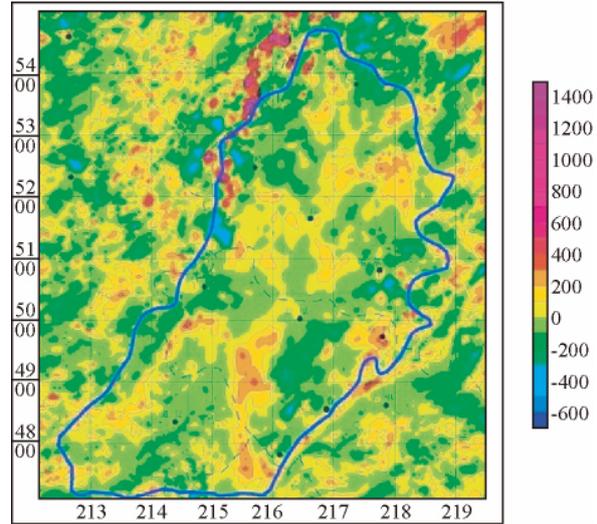


图3 研究区航磁异常图
Fig. 3 Areomagnetic abnormal map

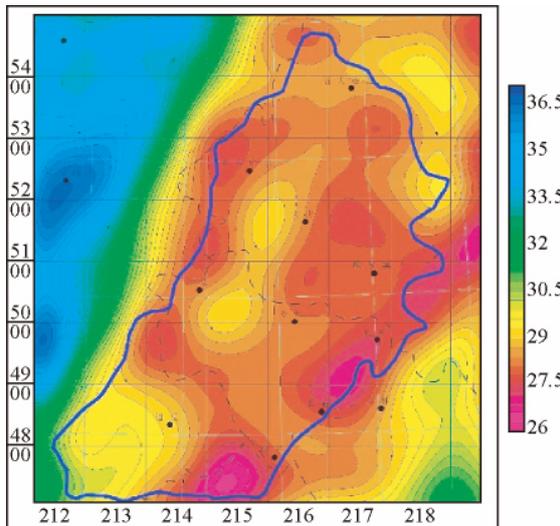


图4 研究区莫霍面平面等值线图
Fig. 4 Moho depth map in the study area

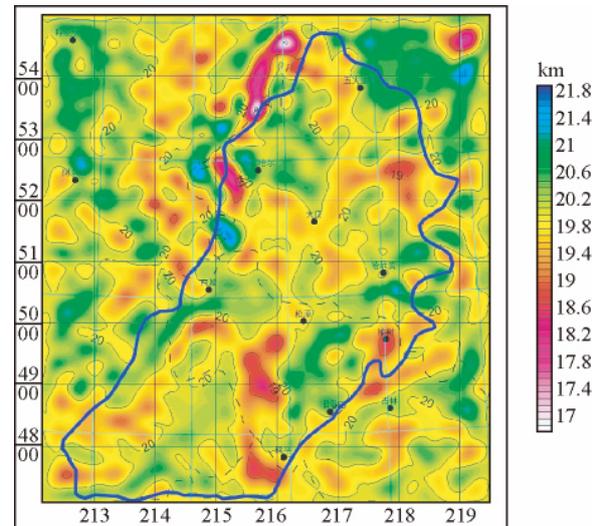


图5 研究区居里面深度图
Fig. 5 Curie depth map

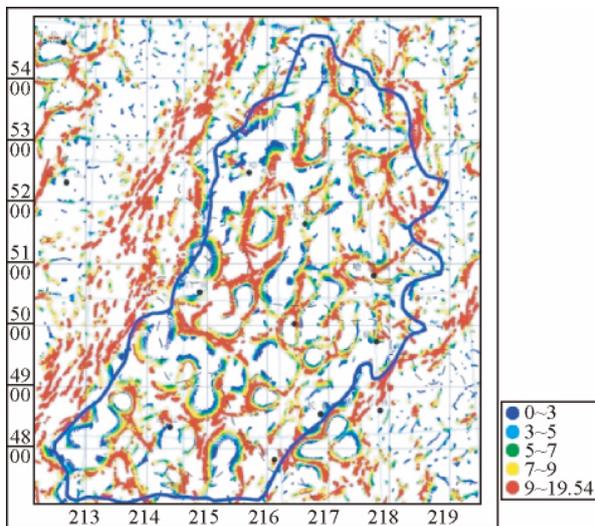


图6 重力欧拉反褶积计算结果图
Fig. 6 Gravity Euler deconvolution map

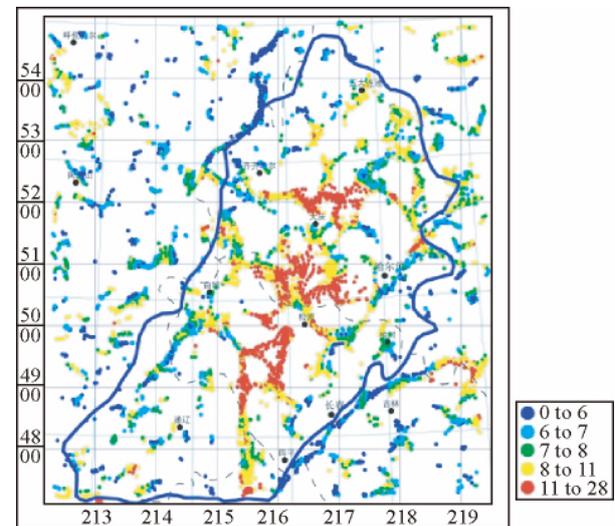


图7 磁数据欧拉反褶积计算结果图
Fig. 7 Magnetic Euler deconvolution map

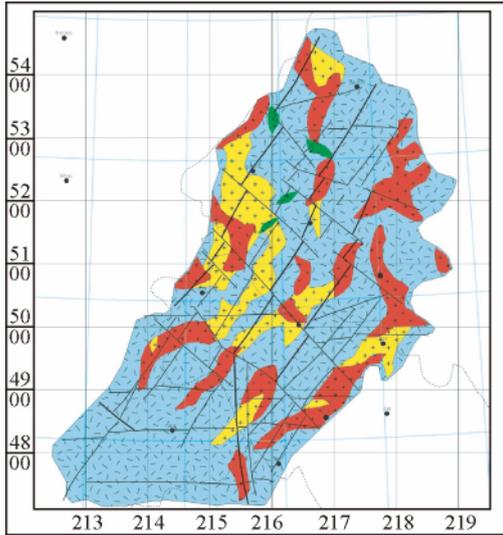


图 8 松辽盆地基底岩性分布
Fig. 8 Basement lithology distribution in Songliao Basin

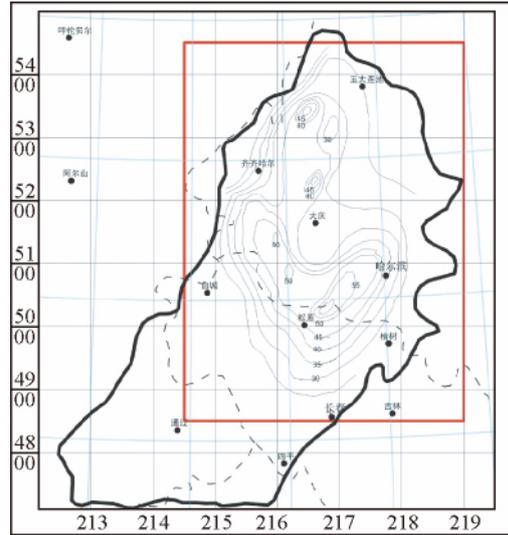


图 9 由钻井资料绘制的研究区地热梯度平面等值线图(据刘耀光,1982)
Fig. 9 Isothermal gradient map using theborehole data in the study area

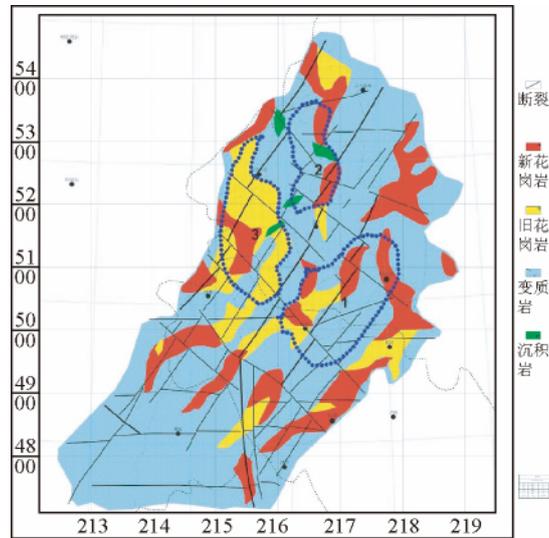


图 11 干热岩靶区位置示意图(底图为基底岩性及地温梯度等值线图)
3 个靶区为(图 11):1) 松原——哈尔滨连线一带;2)大庆北部区域;
3) 洮南——齐齐哈尔所在的背斜褶皱一带。

Fig. 11 The area of the HDR
(The base map is the lithology distribution and the geothermal gradient map)

面及居里面深度,在松辽盆地中部及北部深度表现均较浅,可视为干热岩的赋存主要热源之一。从基底纲要图及所获得的基底岩性图,松辽盆地赋存有大量花岗岩,有关地质资料表明,其深度可达 5~13 km。利用重磁常规处理结果结合地质资料也发现本地区赋存有大量基底断裂,为热量向上传递提供了良好的通道。结合地层温度分布情况,可以发现褶皱分布对地温分布也有着较大的影响。例如在两条向斜轴线附近区域,地球物理数据上表现为莫霍面、重力基底深度、磁性顶界面深度呈高值,即使有着大范围花岗岩的分布,同背斜轴线附近的区域相比,地热梯度值也较低。地质资料表明嫩江组的一段岩石,主要为黑色块状泥岩。泥岩热导率低,因

而嫩江组一段有较高的地温梯度,姚家组则主要为变质岩类,热导率高,所以该层地温梯度较低。水文资料表现出地下水对松辽盆地地热影响较小。

根据本文所给出的干热岩靶区圈定思路,首先勾画出松辽盆地莫霍面及居里面较浅的区域,即松辽盆地中部及北部的大范围区域。根据所求的不同地层的温度值,将范围缩小至高温区域。根据所获得的断裂、褶皱、花岗岩等地质信息,最终给出如图 11 所示的干热岩赋存区域。

针对于以上 3 个靶区的评价,从给出的形成机制而言,靶区 3 为 I 级,其所处的区域构造为背斜易于储热,且有大量花岗岩的分布,莫霍面和居里面深度均浅。靶区 1 尽管表

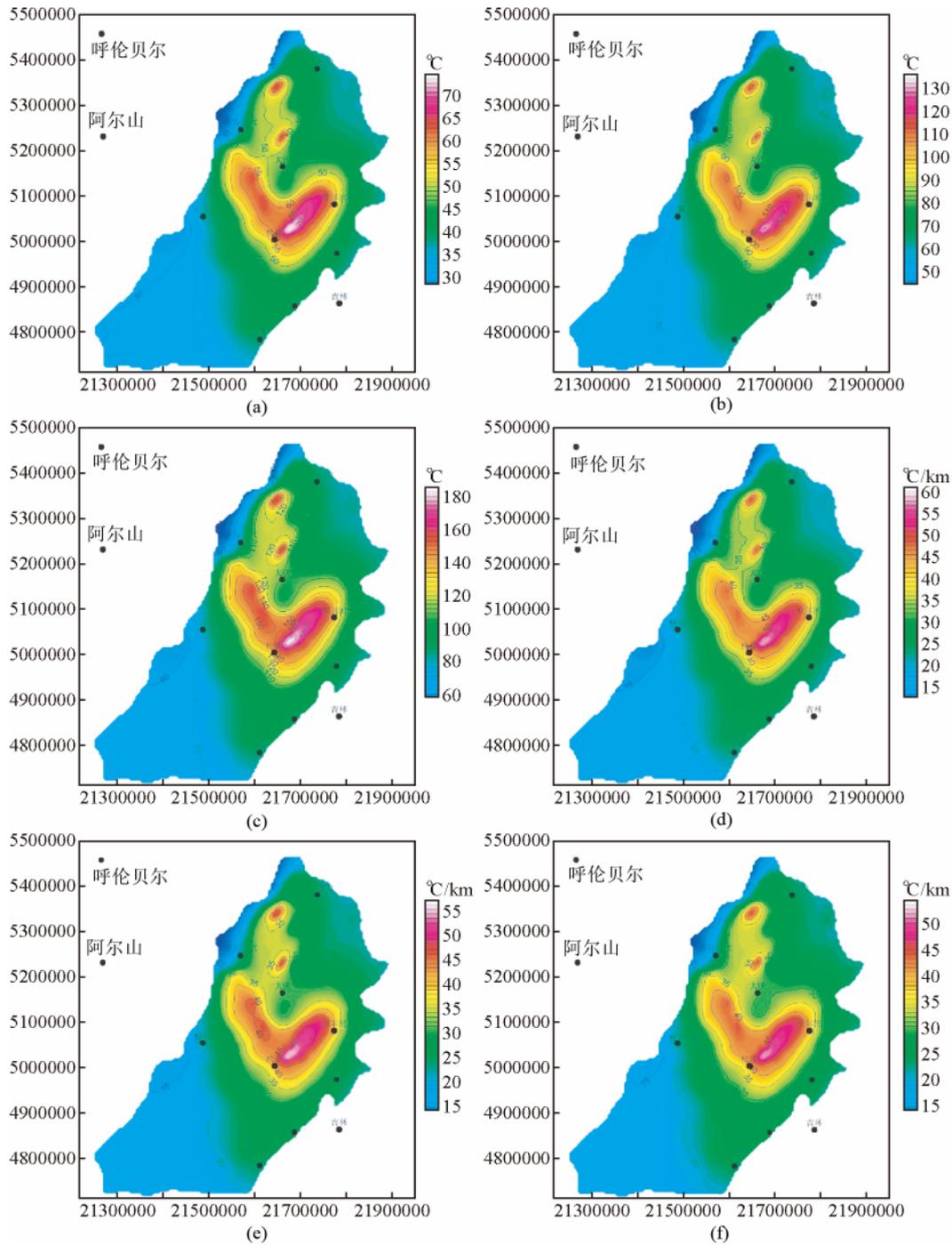


图 10 (a)深度为 1 km 的温度分布等值线图;(b)深度为 2 km 的温度分布等值线图;
 (c)深度为 3 km 的温度分布等值线图;(d)深度为 1 km 的地温梯度分布等值线图;
 (e)深度为 2 km 的地温梯度分布等值线图;(f)深度为 3 km 的地温梯度分布等值线图

Fig10 (a)The temperature contour map of 1 km depth;(b)The temperature contour map of 2 km depth;
 (c)The temperature contour map of 3 km depth;(d)The geothermal gradient map of 1 km depth;
 (e)The geothermal gradient map of 2 km depth;(f)The geothermal gradient map of 3 km depth

现的地温值高,但是所处区域为一向斜轴所处区域,且花岗岩分布一般,居里面深度较浅一些,所以定位Ⅱ级。对于靶区 2,其没有明显的褶皱构造,花岗岩分布一般,有片麻岩和其它一些沉积岩的分布,莫霍面和居里面深度较浅,也将其定位为Ⅱ级。因此在进一步勘探中建议优先在Ⅰ区域中寻找。

由于干热岩在我国仍是探索阶段,因此还有很多问题需

要解决,例如模型模拟,地球物理特征值计算等,这些均是下一步理论方面需要研究的内容。实际工作方面,对给出的三个区域进行重力和磁法精测,大地电磁测深等工作,缩小研究范围,圈定更大比例尺的干热岩可能存在的地区,进而结合有关项目进行钻探来勘探开发。这些工作均可使得地球物理方法研究干热岩得到进一步的发展。

致 谢 感谢审稿专家和编辑们的支持和帮助。

References

- Aydun I, Oksum E. 2012. MATLAB code for estimating magnetic basement depth using prisms[J]. *Computers & Geosciences*, 46: 183-188.
- Gómez-Ortiz D, Agarwal B N P. 2005. 3DINVER.M: a MATLAB program to invert the gravity anomaly over a 3D horizontal density interface by Parker – Oldenburg’s algorithm [J]. *Computers & Geosciences*, 31(4): 513-520.
- Guo J, Chen J L, Cao W J, *et al.* 2014. Research review on enhanced geothermal system[J]. *Electric Power Construction* (in Chinese), 35(4): 10-24.
- Heiken G H, Ander M E, Shankland T J. 1983. HDR geothermal exploration[J]. *EOS*, 64(26): 435-436.
- Hu X Z, Xu M J, Xie X A, *et al.* 2006. A characteristic analysis of aeromagnetic anomalies and Curie point isotherms in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 49(6): 1674-1681, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2006.06.014.
- Liu D M. 2008. Partial geophysical features of Songliao basin and its peripheral typical basins (in Chinese)[D]. Changchun: Jilin University.
- Liu D M, Han L G, Weng A H, *et al.* 2007. Partial geophysical features of the northwest boundary in Songliao basin [J]. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 22(6): 1722-1727, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2007.06.006.
- Liu T Y. 1993. The analysis of gravitational and magnetic field features in tectonic evolution of Songliao basin [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geoscience* (in Chinese), 18(4): 489-496.
- Liu Y Z, Li C L, Zhou X M, *et al.* 2012. Application of regional aeromagnetic data in predicting the northern regional geothermal field in Songliao Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 55(3): 1063-1069, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.03.037.
- Meixner A J, Kirkby A L, Horspool N. 2014. Using constrained gravity inversions to identify high-heat-producing granites beneath thick sedimentary cover in the Cooper Basin region of central Australia[J]. *Geothermics*, 51: 483-495.
- Nishijima J, Fujimitsu Y, Ehara S, *et al.* 2005. Micro-gravity monitoring and repeated GPS survey at hatchobaru geothermal field, Central Kyushu, Japan [C].// *Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey*.
- Sasada M. 1989. Fluid inclusion evidence for recent temperature increases at Fenton Hill hot dry rock test site west of the Valles Caldera, New Mexico, U. S. A. [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 36(4): 257-266.
- Shi S M, Sun X J, Yu Q H. 1998. Geotemperature field characteristics in lindian region of Songliao basin[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute* (in Chinese), 22(4): 77-79.
- Su Z, Wu N Y, Zeng Y C, *et al.* 2012. Research and development of enhanced geothermal system: a case of Fenton hill in New Mexico (USA)[J]. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 27(2): 771-779, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.02.045.
- Wang X X, Wu N Y, Su Z, *et al.* 2012. Progress of Enhanced Geothermal System (EGS) development technology [J]. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 27(1): 355-362, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.01.041.
- Williams-Jones G, Rymer H, Mauri G, *et al.* 2008. Toward continuous 4D microgravity monitoring of volcanoes [J]. *Geophysics*, 73(6): WA19-WA28.
- Wu Z W, Zeng Z F, Li J, *et al.* 2015. Distribution of basement lithology in the Songliao Basin derived from gravity and magnetic anomalies[J]. *Geology and exploration*, 51(5): 0939-0945.
- Xu T F, Zhang Y J, Zeng Z F, *et al.* 2012. Technology progress in

- an enhanced geothermal system (Hot Dry Rock)[J]. *Science & Technology Review* (in Chinese), 30(32): 42-45.
- Xue J Q, Gan B, Li B X, *et al.* 2013. Geological-geophysical characteristics of enhanced geothermal systems (HDR) in Gonghe-Guide basin [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration* (in Chinese), 37(1): 35-41.
- Yang B J, Li Q X, Tang J R, *et al.* 2003. The form and three-instantaneous information of the seismic reflection moho in Songliao basin and geological interpretation [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 46(3): 398-402, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2003.03.018.
- Zeng Z F, Chen X, Li J, *et al.* 2012. Advancement of geothermal geophysics exploration[J]. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 27(1): 168-178, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.01.019.
- Zhu H L. 2011. Research on the sedimentary geothermal resources in north Songliao basin (in Chinese)[D]. Daqing: Northeast Petroleum University.

附中文参考文献

- 郭剑, 陈继良, 曹文灵, 等. 2014. 增强型地热系统研究综述[J]. *电力建设*, 35(4): 10-24.
- 胡旭芝, 徐鸣洁, 谢晓安, 等. 2006. 中国东北地区航磁特征及居里面分析[J]. *地球物理学报*, 49(6): 1674-1681, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2006.06.014.
- 刘殿秘. 2008. 松辽盆地及其周围典型盆地部分地球物理特征 [D]. 长春: 吉林大学.
- 刘殿秘, 韩立国, 翁爱华, 等. 2007. 松辽盆地西北边界部分地球物理特征[J]. *地球物理学进展*, 22(6): 1722-1727, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2007.06.006.
- 刘天佑. 1993. 松辽盆地构造演化的重磁场特征分析[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 18(4): 489-496.
- 刘益中, 李成立, 周锡明, 等. 2012. 区域航磁资料在预测松辽盆地北部区域地温场中的应用[J]. *地球物理学报*, 55(3): 1063-1069, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.03.037.
- 施尚明, 孙小洁, 于清华. 1998. 松辽盆地林甸地区地温场特征[J]. *大庆石油学院学报*, 22(4): 77-79.
- 苏正, 吴能友, 曾玉超, 等. 2012. 增强型地热系统研究开发: 以美国新墨西哥州芬登山为例[J]. *地球物理学进展*, 27(2): 771-779, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.02.045.
- 王晓星, 吴能友, 苏正, 等. 2012. 增强型地热系统开发技术研究进展 [J]. *地球物理学进展*, 27(1): 355-362, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.01.041.
- 吴真玮, 曾昭发, 李静, 等. 2015. 基于重力场特征的松辽盆地基底岩性研究[J]. *地质与勘探*, 51(5): 0939-0945.
- 许天福, 张延军, 曾昭发, 等. 2012. 增强型地热系统(干热岩)开发技术进展[J]. *科技导报*, 30(32): 42-45.
- 薛建球, 甘斌, 李百祥, 等. 2013. 青海共和—贵德盆地增强型地热系统(干热岩)地质—地球物理特征[J]. *物探与化探*, 37(1): 35-41.
- 杨宝俊, 李勤学, 唐建人, 等. 2003. 松辽盆地反射地震莫霍面的形态、三瞬处理结果及其地质解释[J]. *地球物理学报*, 46(3): 398-402, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2003.03.018.
- 曾昭发, 陈雄, 李静, 等. 2012. 地热地球物理勘探新进展[J]. *地球物理学进展*, 27(1): 168-178, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.01.019.
- 朱焕来. 2011. 松辽盆地北部沉积盆地地型地热资源研究[D]. 大庆: 东北石油大学.