

河北柏乡县王家庄一带干热岩资源 赋存分布特征及开发利用前景

潘苗苗, 齐晓飞, 上官拴通

(河北省煤田地质局第二地质队)

摘要:河北省柏乡县王家庄一带因受深部地壳结构和区域大地构造控制,其地温场分布呈现高温异常的特征,具备良好的干热岩赋存背景。本文通过对河北省柏乡县王家庄一带的大地热流值、莫霍面埋深、重力场特征、居里等温面深度等方面进行综合分析,总结了区内干热岩形成的地热地质特征。随后从热储、热源、盖层及地温梯度四个方面阐述区内干热岩地热资源的赋存地质特征:相比于背斜两翼,背斜轴部的地热活动要剧烈的多;背斜轴部相比背斜两翼区居里面埋深较浅,有利于深部热流传递。研究结果表明,柏乡县王家庄一带具备干热岩勘查开发的潜力,在背斜轴部开展工作能够有效降低开发风险。

关键词:干热岩;地热地质;赋存分布特征;柏乡县;河北省

0 引言

随着经济的快速发展,我国对能源的需求日益强烈,20世纪70年代石油危机的出现,人们对新型能源的需要更加迫切。20世纪后半叶,美国能源部建立了最早的EGS示范场地,随后法国、日本等发达国家相继成功建设利用干热岩发电的发电站,中国也已经开展了一定程度的干热岩勘查方面的研究,并取得了初步成效。在华北平原可以圈出多个干热岩资源潜力分布区,其中包括位于河北省邢台市柏乡县王家庄—白阳镇一带的柏乡背斜区。目前正处于对柏乡县王家庄一带干热岩地热资源调查评价阶段,上官拴通等人利用柏乡背斜区内水文地质勘查孔测温信息推测该区4km埋深处地温超过150℃,但是尚未对柏乡背斜区的干热岩地热资源的赋存分布情况进行分析。

本文首先通过分析柏乡县王家庄一带的大地构造背景、大地热流值、莫霍面特征及重力场特征,明确研究区地热地质及地球物理场特征,其后通过从研究区的储层特征、盖层条件及热源机制几个方面分析了区内干热岩成因机制,进而阐明柏乡县王家庄一带干热岩地热资源的赋存分布特征。本文旨在系统研究柏乡县王家庄一带的干热岩赋存分布特征的基础上,加快推进柏乡县干热岩地热资源的科学勘探开发和合理利用。

1 研究区地热地质特征

柏乡县位于华北断凹临清台陷北缘,宁晋断凸内,紧邻晋县断凹,区内断裂构造较为发育,断层展布方向以NW向、NNE和NE向为主,且均为正断层(图1)。

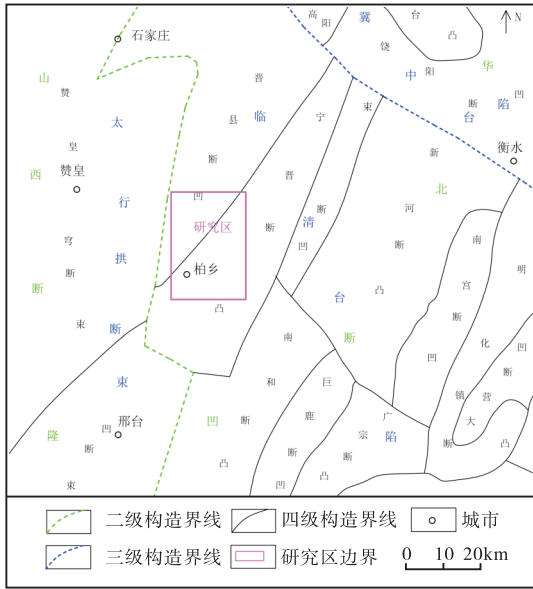


图1 研究区构造位置图

1.1 莫霍面变化特征

莫霍面即地壳和地幔的分界面,地幔是地热场热流的主要来源之一,因此莫霍面埋深越浅越有利于深部热源向浅部传导扩散,即莫霍面埋深

越浅,地温越高。河北平原区莫霍面埋深等值线图(图2)显示,其西部莫霍面埋深较深,向东部莫霍面埋深逐渐变浅。在研究区莫霍面埋深约35km,相比西北部张家口蔚县地区减少了5km。莫霍面埋深较浅,一方面反映了本区具有较好的热源条件,另一方面对于深部热流向浅部传导极为有利。

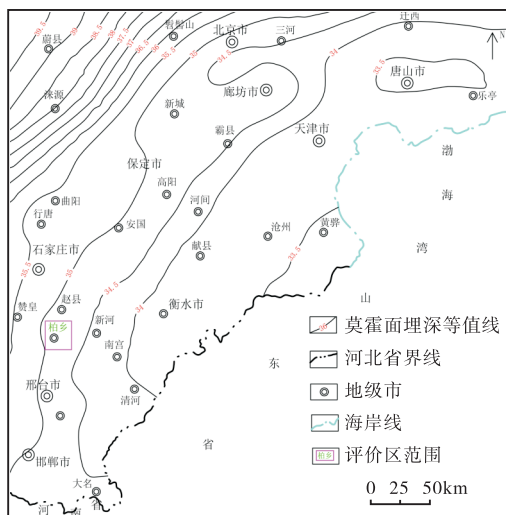


图2 河北平原区莫霍面埋深线图

1.2 重力场特征

重力场勘探方法在地热勘探中经常被使用,主要是根据重力布格异常来解译断裂的展布、基岩凹陷和隆起,根据这些地质构造分布来预测本区地热可能形成的有利区域。

从研究区布格重力异常图(图3)及布格重力异常上延20km图(图4)上可以看出,本区西北部高重力异常呈北东分布,东南部重力异常表现为北东分布的低值带为边界。依据重力布格异常,基岩隆起往往产生高重力异常,基岩凹陷则产生低异常,断裂构造的位置及走向往往显示为重力布格异常的梯度带。从图中可以推断本区具有较明显的NE向断裂,经综合研究认为该断裂为柏乡—晋县断层,以断裂为界西北部基岩凹陷,东南部基岩隆起。结合区域地层资料分析,认为研究区是一轴向北东、向北倾伏的背斜构造。

据本区布格重力异常图(图3)及布格重力异常上延20km(图4)图上分析,上延20km异常的总体形态与原始重力异常的形态相似,说明近地表地质体与深部地质体的分布具有同源性。由此柏乡背斜隆起区可能位于平原区内部次级慢凸之

上,具备高地温潜力。

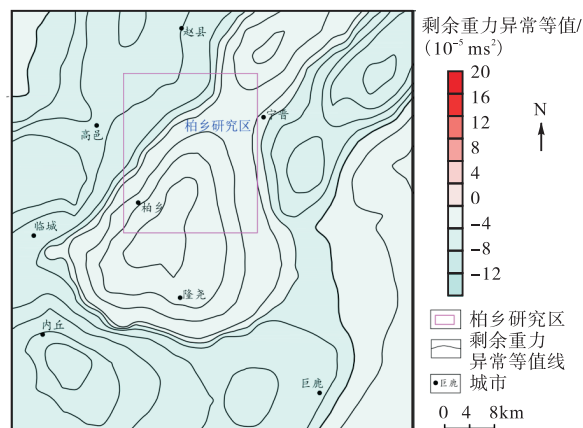


图3 研究区布格重力异常图

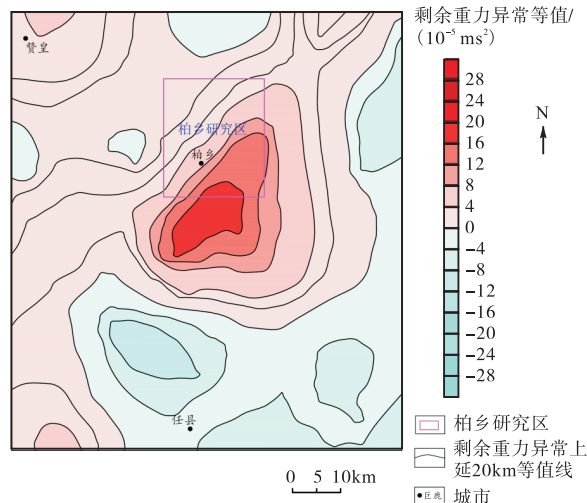


图4 研究区地面重力异常上延20km图

1.3 居里等温面特征

据相关研究表明,地热形成的地方,居里等温面埋深较浅,因此利用居里等温面研究地热资源赋存分布是很有效的。由本区化极 ΔT 航磁异常图分析的本区居里等温面深度范围在20~26km之间(据河北省1:50万区域物化探成果报告综合研究报告),除去航磁飞行高度,其深度范围在20~24km之间。区内已知深钻孔实测新生界的地温梯度为 $2.51^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,盖层厚度按2km计算;由赵31基岩测温段地温梯度为 $2.8^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,因此基岩地温梯度取 $2.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 计算,若居里等温面的温度约为 600°C ,则利用地温梯度计算居里等温面深度,其值为20~25km,两者大致相符合(图5)。居里温度面的起伏以北东走向为主,在背斜轴部,居里等温面深度较浅,约为20 km,而背斜两翼的

居里面则加深到24 km以下。

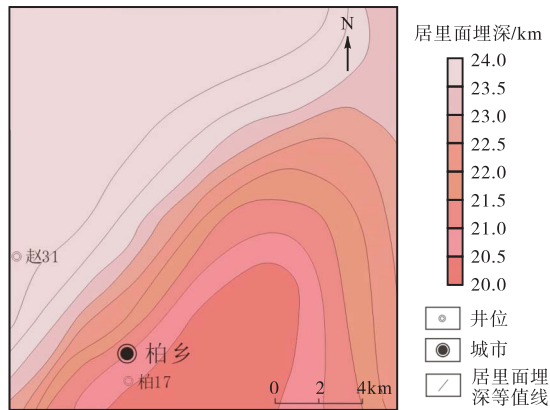


图5 研究区居里面埋深图

1.4 大地热流值

大地热流是发生在地幔内部的热力学与动力学过程的表征,它对地壳的活动性、地壳与上地幔的热结构问题的研究及对区域热状态的评定、地热资源潜力的评定等研究有重要意义。已有资料显示,位于柏乡背斜轴部的钻孔大地热流值分别为83.9mW/m²和79.9mW/m²,均值为81.9mW/m²,位于柏乡背斜两翼的赵36和赵61的大地热流值分别为59.4mW/m²和55.4mW/m²。从热流值的分布上来看,背斜轴部区地热条件优于背斜两翼,研究区位于柏乡背斜轴部,表明研究区具有良好的地热背景。

据以上分析可知,柏乡背斜轴部区为居里面隆起区。居里面的结构特征能够在一定程度上间接反映出岩石圈的热活动状态。在居里面隆起区,预示着地壳深部热传导、局部的放射性热效应和上地幔热辐射等岩石圈热活动强烈;居里面凹陷区,岩石圈热活动则相对较弱。据前人研究,居里面特征在很大程度上能反映新生代以来的构造活动及构造活动引起的热事件。地球深部高温干热岩地热资源的隐伏位置与居里等温面之间存在着某种联系:居里等温面隆起位置更有利于干热岩的形成。因此,柏乡背斜轴部隆起区具备干热岩开发利用潜力。

2 干热岩地热资源赋存分布特征

2.1 热储特征

优质干热岩热储,一般具有埋深较浅、温度较高、储层易改造、可较长时间持续开发等特点。该

区干热岩热储层为太古界五台群变质岩,岩性主要为片麻岩、黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩、斜长角闪岩、浅粒岩等深成变质岩,主要分布在本区背斜轴部北关、南郝村一带。区内太古界顶界埋深在1000~4000m,该套地层具有不含水或水蒸气、致密、无渗透性的特点,具备干热岩热储形成的前提条件。此外,太古界深成变质岩不但是良好的热储层,还具备一定的放热量,由表1可知,低变质角闪岩相放热量比花岗岩还要高些。

表1 各类岩石放热量

岩石类型		单位体积 的放热量/ (μW·m ⁻³)	岩石密度/ (kg·m ⁻³)	每 km 厚度 对大地热流 的贡献/ (μW·m ⁻²)
岩类	岩石名称			
火成岩	花岗岩/流纹岩	2.45	2670	2.5
	花岗闪长岩/英安岩	1.49	2720	1.5
	闪长岩、石英闪长岩/安山岩	1.08	2820	1.1
	辉长岩/玄武岩	0.31	2980	0.3
	超镁铁质橄榄岩	0.012	3230	0.01
	橄榄岩	0.019	3280	0.002
变质岩	绿片岩/低变质角闪岩相	3.15	2700	3.2
	高变质角闪岩相	1.17	2750	1.2
	低变质麻粒岩相	0.73	2750	0.7
	高变质麻粒岩相	0.45	2900	0.4
沉积岩	石灰岩	0.62	2600	0.6
	白云岩	0.36	2600	0.4
	石英砂岩	0.33		0.3
	长石砂岩	0.85		0.8
	杂砂岩	1.00	2400	1.0
	页岩	1.80		1.8
	深海沉积物	0.78	1300	0.8

2.2 盖层分布情况

本区普遍沉积有新生界地层,新生界厚度一般为0.2~1.2km,为主要的热储盖层。据区内柏17孔、赵36孔揭露,盖层岩性主要以亚黏土、粉砂层、黏土及粉砂质泥岩、泥岩、砂砾岩为主。泥岩、砂质泥岩和黏土厚度大且致密完整,隔水保温性能较好,为较好的热储盖层。

2.3 热源条件分析

本区太古界基岩赋存的热能主要来自于地球内部热能传导,另外也有部分地壳岩石放射性元素衰变产生的热能和太古界变质岩所含放射性元素衰变产生的热能。

2.3.1 上地幔传导热

本区最基本的热源为地核温度的传导。据前人研究成果表明：上地幔温度为 $1100^{\circ}\text{C} \sim 1300^{\circ}\text{C}$ ，而 25km 深度一般约为 600°C ，近地表恒温带温度 15.5°C ，地球内部温度差的存在，导致温度向趋于平衡的方向移动，而地温梯度则是温度变化的推动力，必将使得深部较高温度向地壳浅部进行热量的传递。该区莫霍面埋深相对较浅，说明上地幔顶抬升较高，所传递的热量较快，所提供的热流较大。

大地热流是反映地壳热状态非常重要的参数，是地球内部热能在地表最为直接的显示。本区大地热流在空间的展布规律：从背斜轴部向两翼呈现出逐渐减小的趋势，这与莫霍面的埋深空间分布规律正好相同；又由上文深部热结构分析，本区属于“冷壳热幔”型，地幔热流约占大地热流的 70%，体现出了地幔热对该区大地热流的贡献。

2.3.2 太古界片麻岩放射性元素衰变产热

该区太古界变质岩放热量为 $1.375\mu\text{W}/\text{m}^3$ ，根据以往资料对地下水放射性元素分析，a 较高放射性活度总量可表示多种放射性物质衰变的综合效益，因此总 a 与温度的关系指示放射性生热对于区内地热资源温度的升高具有一定的贡献，推测区内太古界片麻岩放射性产生的热能可作为本区地热资源的补充热源。

上地幔传热为该区干热岩地热资源的主要热源，地壳中放射性元素衰变产生的热能也是热源的组成部分，太古界片麻岩中放射性元素衰变产生的热能是热源的补充能源。

2.4 地温梯度

根据收集的区内水文地质钻孔测温数据(表 2)计算本区新生界地层地温梯度，并绘制了新生

界地温梯度等值线图(图 6)。从新生界盖层地温梯度等值线图可以看出，区内新生界地层地热异常区地温梯度为 $3^{\circ}\text{C} \sim 6.9^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ，地温梯度展布的主体方向大致反映了本区的构造轮廓，以柏乡背斜轴部为中心呈扁圆形分布，背斜轴部的柏 17 钻孔地温梯度为高达 $6.9^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ，向背斜两翼，地温梯度均呈逐渐降低变化趋势。

3 干热岩地热资源成因模式分析

从构造上分析，本区主要受燕山运动及新构造运动的影响，形成了柏乡背斜的同时，居里面在区内呈凸起状，上地幔高热流传热和较薄的岩石圈厚度及花岗岩、片麻岩放射性元素衰变产热，使得区内背斜轴部大地热流值呈高值异常特征。从热流转移方式分析，来自地壳深部热流在岩石中的传导方式主要有如下三种：即由高温处流向低温处、垂直地层方向和顺地层方向，遵循这一热流传导规律，来自地壳深部的热流不断流向背斜轴部。在温度梯度的推动下，地球内部热通过岩石圈热流向趋于热平衡的背斜隆起区传热，基岩太古界热储层被加热，温度升高。由于新生界沉积盖层热导率低，热阻高，热传导受阻，埋藏于新生界地层之下的太古界变质岩温度可以超过 150°C ，初步推测研究区干热岩资源属于沉积盆地型干热岩。

4 开发利用前景

近年来，京津冀地区遭遇了严重的雾霾，大气污染现象日益加剧，大力发展清洁能源、促进能源结构调整，是公认的治理雾霾问题的根本途径且迫在眉睫。干热岩作为可再生清洁能源，在其开发利用过程中具有绿色、高效、安全等优势。研究认为河北柏乡县王家庄一带干热岩潜力大，现对该区干热岩资源的开发利用提出以下建议：

1) 开展干热岩调查评价工作。在收集、整理该区水文地质、地热地质资料的基础上，部署地热地质调查、电法及地震等工作手段，分析深部高温岩体空间展布及热结构特征，优选干热岩找矿靶区。

2) 开展干热岩资源勘查及热开采模拟工作。在研究区选定温度高、热储埋藏相对较浅的部位进行钻探施工，查明干热岩储层物理、热物性及力学参数，进行干热岩热开采数值模拟，为干热岩开

表 2 研究区钻孔测温数据

测温钻孔	深度/m	温度/ $^{\circ}\text{C}$	资料来源
柏 17	243.2	30	河北省柏乡县 农田供水水文 地质勘查报告
柏 8	106.7	21.2	
水柏 16	101.5	18.2	
水柏 7	204.17	20	
柏 15	71.7	17.5	河北省邢台市工 作区煤炭普查报告
1-1	1000	39.5	
赵 36	2317	92.51	常健, 2016 ^[14]
赵 61	1912.0 ~ 1916.6	78	赵政权, 1999
赵 31	3054.71 ~ 3101.5	91	华北油田
	3222.3 ~ 3300	96	

发及干热岩资源利用整体规划提供理论依据。

3) 开发利用。基于热开采数值模拟和增强型

地热系统原理, 进行干热岩试验性发电, 为研究区干热岩总体开发利用奠定基础。

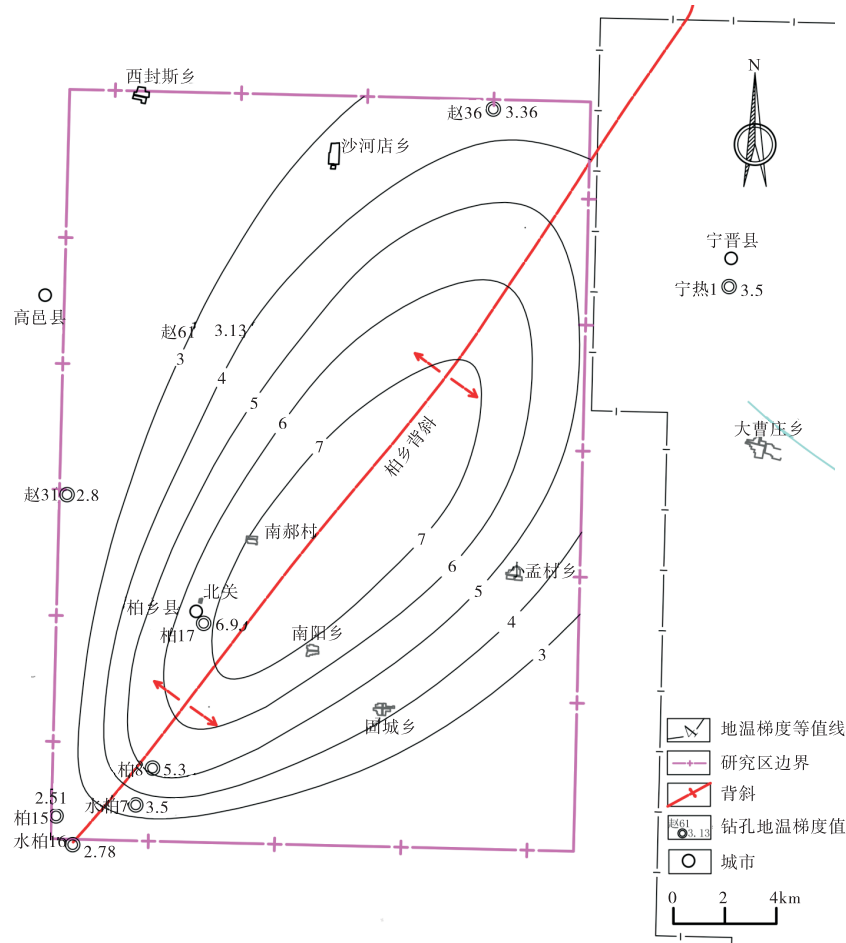


图6 研究区新生界地层地温梯度等值线图

5 结论与建议

1) 通过对研究区莫霍面深度、重力场特征、居里等温面特征的分析可知, 相对于背斜两翼, 背斜轴部莫霍面埋深较浅, 岩石圈厚度较薄, 居里面埋深较浅, 约 20km, 属于高地热异常区, 显示该区背斜轴部为干热岩开发利用的有利部位。

2) 该区干热岩地热资源热源主要为地球深部热能传导, 热储层为太古界五台群变质岩, 盖层主

要为新生界地层, 区内新生界地层地温梯度为 3℃ ~ 6.9℃/100m, 地温梯度从柏乡背斜轴部向背斜两翼呈逐渐降低变化趋势。

3) 该区干热岩成因模式属沉积盆地型干热岩, 建议尽快开展电法及地震等地球物理勘探方法对干热岩赋存地质条件予以验证, 为区内干热岩开发利用提供科学依据。

参考文献略

转自《矿产与地质》Vol.35 No.5

上接第 12 页

重点推进咸阳主城区、兴平市绿色开采试点示范项目实施, 促进形成试点引领与全面推进相结合的地热资源开发新格局。

《规划》要求, 禁止与开发利用方案不一致的地热资源开发利用, 全市禁止 1000 米以浅热储层地热资源开采。所有用于地热供暖的地热尾水

必须落实回灌。新建、改建、扩建地热资源开发项目, 应进行建设项目环境影响评价。按照水资源管理法, 严格落实取水许可准入制度, 地热开发应做好水资源论证, 申请取水许可证。加强动态监测, 不得超量开采和超标排放污染物。

转自 地热加