

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.05.012

河北四家地热异常特征及其成因

徐一鸣¹, 郝文辉¹, 方士琦², 程立群^{1*}, 杜立新¹, 谢吾¹, 聂晨光¹

XU Yiming¹, HAO Wenhui¹, FANG Shiqi², CHENG Liquan^{1*}, DU Lixin¹, XIE Wu¹, NIE Chenguang¹

1. 河北省地质矿产勘查开发局第八地质大队, 河北 秦皇岛 066000;

2. 中国人民解放军海军某实验训练区, 河北 秦皇岛 066000

1. The Eighth Geological Brigade of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, Qinhuangdao 066000, Hebei, China;

2. A Certain Experimental Training Area of the Chinese People's Liberation Army Navy, Qinhuangdao 066000, Hebei, China

摘要:河北四家地热异常区地势西北高、东南低,地热资源丰富。为了科学保护、合理利用该地热资源,以地热异常为研究对象,采用地温场测量、水化学及同位素测试、地球物理测量等方法手段,探讨了四家地热异常区地热资源形成机制、赋存环境及循环机理。研究表明,该地热异常区内地热井水位埋深介于-0.94~3.02 m之间,水位埋深浅;异常中心以垂直向上对流传热为主,异常外围以传导传热为主,深部热流沿异常中心的断裂交会处上升,并产生横向迁移、扩散,在一定范围内储存起来,形成了本区的地热异常。可控源音频大地电测深剖面解译成果表明,四家地区深部花岗岩体被切割,使深部的热流能够沿断裂上升,混合并加热赋存于四家地热异常区下部,形成该区域的地热异常。水质分析结果表明,四家地区地热流体水化学类型主要为 $\text{SO}_4^{2-}-\text{Na}^+$ 型, F^- 、 SiO_2 含量与水温呈良好的正相关关系,同时 F^- 、 SiO_2 质量浓度严格受地温场的控制。四家地区地下热水为大气降水补给,属大气成因,区内地下热水氡值较低,为0.6~0.8 T.U.,通过研究认为本区地下热水年龄大于30 a。研究成果为今后在冀东及类似山区开展地热资源勘查研究具有指导意义。

关键词:河北四家;地热异常;地温场;水文地球化学;成因

中图分类号:P314 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)05-0873-13

Xu Y M, Hao W H, Fang S Q, Cheng L Q, Du L X, Xie W, Nie C G. Characteristics and origin of the geothermal anomaly in Sijia, Hebei Province. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(5): 873-885

Abstract: Sijia geothermal anomaly with lot geothermal energy is located in the northwestern part of Qinglong of Hebei Province. In this paper, in order to protect and utilize the geothermal resources scientifically, the geothermal anomaly is studied by means of geothermal field measurement, hydrochemistry and isotope measurement, geophysics measurement, etc. The formation mechanism, occurrence environment and circulation mechanism of geothermal resources in four abnormal geothermal areas are discussed for the first time. According to the study of this area, it is found that the buried depth of geothermal wells in the four geothermal anomalies ranges from -0.94 m to 3.02 m, which is characterized by the shallow depth of the water level. The center of the anomaly in the area is dominated by vertical upward convective heat transfer, and the periphery of the anomaly is dominated by conductive heat transfer. The deep heat flow rises along the fault junction of the anomaly center and generates lateral migration and diffusion. It is stored within a certain range and formed geothermal anomalies in this area. The interpretation results of the CSAMT show that the deep granite body in this area is cut, so that the deep heat flow can rise along the fault, and mixed and heated to the bottom of the Sijia geothermal anomaly areas to form geothermal anomalies in the area. The results of water quality analysis indicated that the hydro-chemical type of the geothermal fluid in this area is mainly $\text{SO}_4^{2-}-\text{Na}^+$ type, F^- and SiO_2 content both have a good positive correlation with water

收稿日期:2020-03-17;修订日期:2020-05-09

资助项目:河北省地质矿产勘查开发局项目《河北省青龙满族自治县西部山区地热资源调查评价》(编号:454-0503-YBN-V0U2)

作者简介:徐一鸣(1991-),男,硕士,工程师,从事地热地质、水文地球化学研究。E-mail:xeamoon@163.com

*通信作者:程立群(1981-),男,在读硕士生,高级工程师,从事地热、矿床研究。E-mail:qhdchengliquan@163.com

temperature, and those mass concentration are strictly controlled by the ground temperature field. The underground hot water in this area is replenished by atmospheric precipitation, which is the cause of the atmosphere. The value of ^3H of the underground hot water in the area is low, ranging from 0.6 T.U to 0.8 T.U, which directive considers that the underground hot water in this area is older than 30 years. The achievement of these results will lead the geothermal resources exploration in eastern Hebei and similar mountainous areas.

Key words: Sijia area, Hebei; geothermal anomaly; geothermal field; hydro-geochemistry; origin

地热属于清洁的可再生能源,具有无污染、易于利用及经济等特点,且可利用时间较长。中国是世界上地热资源储量较大的国家之一,尤其是中低温地热资源,开发利用潜力巨大。实现地热资源的可持续开发利用,是当代地热产业所面临的关键问题^[1-3]。四家地热田位于河北省青龙满族自治县西北部,行政规划属青龙满族自治县娄杖子乡。该地区为山区地貌,地势西北高、东南低,西北部为陡峭的山峰,沙河的支流在地热异常区穿过。异常区北部7 km有边杖子温泉出露,南部30 km处有冷口温泉出露^[4],包括四家在内的3个地热异常区整体走向为北东向,呈串珠状分布^[1②]。

四家地热田是近年新发现的地热异常区,目前还未利用,以往工作甚少,仅在近年由河北省地矿局第八地质大队在此进行了调查评价工作。目前,该地热田存在工作程度低、地热成因模糊不清等诸多问题,本文旨在通过地球物理勘查、深井地温测量、水文地球化学分析等工作手段,系统分析四家地热田地热地质特征,探讨其地热成因机制,以期对该地热田今后的开发利用提供科学依据。

1 区域地质背景

研究区大地构造位置处于中朝准地台—燕山台褶带—马兰峪复式背斜内的遵化穹褶东北部。出露地层主要为太古宇变质深成岩、中元古界长城系沉积地层及新生界第四系全新统。地下热水出露区域主要为第四纪沉积和太古宇安子岭片麻岩套的八道河角闪斜长片麻岩。

研究区经历了长期、多次的构造演变,特别是燕山运动,基本奠定了本区复杂的构造格架。地热异常区内断裂构造发育,具有多次活动的特点。近东西向的深大断裂青龙—大屯右行走滑断裂系统从异常区北5.5 km处经过。异常区内及附近发育的北东向、北西向大小断层,形成时代均较新,为侏罗纪以后形成的。地下热水的分布与构造密切相关。

区内岩浆活动频繁,岩浆岩发育,以燕山期为主。都山花岗岩呈岩基状分布于研究区西北部,该岩体在早侏罗世—白垩纪发生多次活动,形成系列的粗粒正长花岗岩、粗粒二长花岗岩、花岗斑岩、花岗闪长岩及闪长岩、石英闪长岩。肖营子岩体呈岩床状大面积分布于中南部,为多次侵入的杂岩体。燕山中期第一次大面积侵入的蛇盘兔独立单元主要为粗中粒二长花岗岩,第二次侵入为中—粗—细粒钾长花岗岩,第三次侵入为中细粒斑状花岗闪长岩、二长花岗斑岩^{③④[5-6]}。

研究区位于遵化—青龙—抚宁幔坡带东部(图1),其东西向长约300 km,宽35 km。莫霍面深度自南

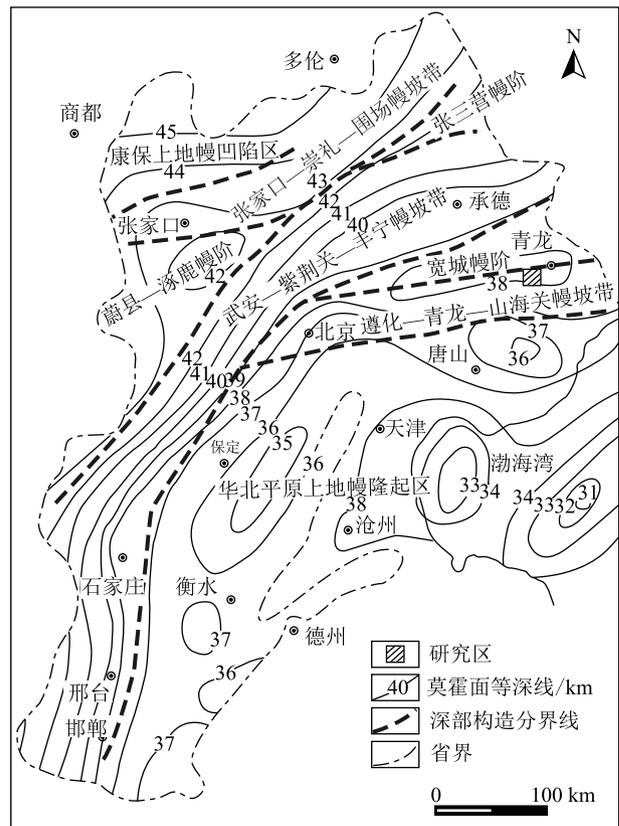


图1 河北省莫霍面等深线及深部构造分区

Fig. 1 Moho contour line and deep structural zoning map of Hebei Province

向北由 37 km 下降至 39 km,形成一个明显的幔坡,地势上为冀东山区^[7]。在青龙—兴隆一带有一个明显的东西向、带状上地幔凸起区,包括四家在内的青龙西部 3 个地热异常区及在遵化市马兰峪汤泉发现的地热异常区均分布于此,可见,在莫霍面急剧变化区域为地热异常发育地段。

2 工作方法 with 样品采集

为查明研究区地热资源赋存条件及分布特征,笔者在区域资料收集分析的基础上,主要开展了地球物理勘查、深井地温测量、水文地球化学分析等工作手段。

本次研究物探工作采用可控源音频大地电磁测深测量(CSAMT法),共测剖面 2 条,AB 距 2000 m,L01、L02 收发距分别为 9000 m 和 11000 m,由河北省地矿局秦皇岛资源环境勘察院完成,剖面布设位置见图 2。

本次研究地温测量采用电阻法进行测温^[8],井深小于 30 m 的机民井进行逐米测温,井深大于 30 m 的机民井每 5 m 一测温。研究区内地热井均未开采,测温结果属稳定态测温数据。

本次研究地热流体全分析所用水样取自于四家地热异常区内 RL01、RL08 地热井,严格按照取样标准进行取样并添加试剂,具体分析项目、试剂添加方法略,采样位置见图 2。水质单项分析所用水样取自于四家地热异常区内及其外围的机民井,采集的水样装于用蒸馏水及原水润洗 3 次的 2.5 L 聚乙烯桶内并作密封处理。

地热流体全分析及同位素分析在自然资源部地下水矿泉水及环境监测中心进行,分别采用等离子体发射光谱仪(iCAP6300)和同位素分析仪(L2130i)进行测试。水质单项分析在河北海洋环境实验室进行,检测仪器主要为 Aquion 离子色谱仪(仪器设备编号 JS025)及 TU-1901 双光束紫外可见分光光度计(仪器设备编号 JS045)。

3 地热资源赋存特征

3.1 地下热水水位特征

研究区地下热水按其储存状态为基岩裂隙型地下热水,由于研究区缺少深部钻孔资料,根据地表岩性、收集到的资料及本次物探成果推断,热储层为太古宙角闪斜长片麻岩。岩石断层、节理、裂

隙较发育。岩石裂隙主要发育段为:36.0~39.42 m、44.0~47.85 m、58.95~59.80 m、67.32~68.05 m、75.92~79.07 m、108.60~114.75 m、137.87~140.52 m,结合连续测温等资料,推断热水储集层顶板埋深为 36.0 m,揭露深度 160 m,厚度 20.80 m^①。

四家地热异常区内有地热井 9 眼,各地热井分布特征详见图 2,基本情况见表 1。研究区水位埋深 -0.94~3.02 m,主要受海拔高度及与断裂构造的位置关系影响。位于低洼地带及异常中心附近的位置关系影响。位于低洼地带及异常中心附近的 RL02、RL03、RL05、RL08、RL09 水位埋深较浅,小于 1.0 m,特别是 RL08、RL09 两个地热井,自 2018 年成井后一直自流,水位分别为 -0.40 m、-0.94 m。统计发现,这些地热井距离异常中心越近水位越高。而分布在异常边部的 RL01、RL04、RL06、RL07 水位埋深较深,均大于 1.0 m。该异常区内地热井井口水温 14.9~54.8℃,30 m 埋深水温 21.4~54.2℃,最高水温 29.1~55.2℃,其特点是水位埋深浅,地热异常区呈椭圆状分布,面积小,由异常中心向外围有温度下降趋势。

3.2 地温场特征

地壳浅部基岩的起伏、构造形态、岩浆活动、地下水活动等都是地温场的重要影响因素^[9-10]。华北

表 1 测温井基本情况

Table 1 Summary of basic information of temperature measuring well

编号	位置	井深 /m	水位埋 深(水头 高度) /m	井口 水温 /℃	30 m 埋 深水温 /℃	最高 水温 /℃
RL01	四家村东板栗加工厂	65.00	3.02	38.2	39.9	40.8
RL02	四家村东板栗加工厂 西侧路边	103.40	0.76	37.7	54.2	55.2
RL03	四家村南角村民家中	50.00	0.12	40.2	49.9	51.7
RL04	四家村西南角村民家中	54.28	2.28	26.7	36.3	37.0
RL05	四家村东北角村民家中	68.22	0.7	17.9	27.2	34.0
RL06	四家村中北部村民家中	67.32	2.11	14.9	21.4	29.1
RL07	四家村东侧民房	64.00	1.39	20.6	31.1	33.9
RL08	四家村南部河西	160.00	-0.40	43.1	47.3	48.0
RL09	四家村中河东岸	140.00	-0.94	54.8	井口封闭,仅能 测得井口水温	

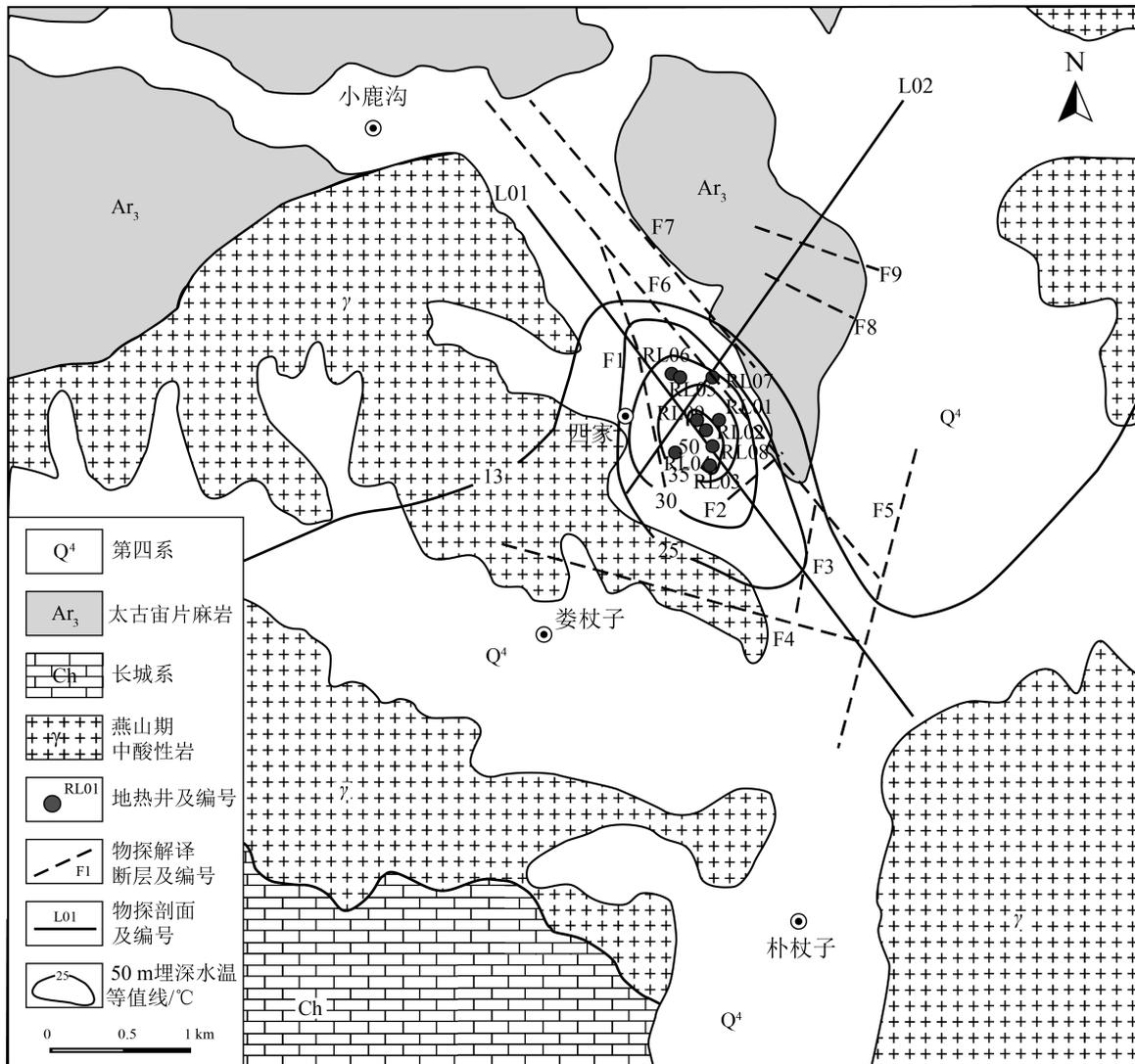


图2 四家地区地热地质简图

Fig. 2 Simplified map of geothermal geology in Sijia area

地区基岩面的起伏和构造形态对地壳浅部地温场分布起最主要作用^[11], 在山前平原、活动断裂带附近, 地下水活动影响较大, 而岩浆岩的影响局限于近期有岩浆活动的地段。

本次研究在四家地区共测量地热井 9 眼, 测温时间为 2019 年 6 月中旬, 测温基本情况见表 1, 井位分布、50m 埋深水温等值线见图 2。异常区大面积为基岩出露区, 第四系覆盖较薄, 仅在异常区内中部现代河流的河床附近及山间沟谷中分布, 厚度一般不超过 8 m, 且以河卵石、粗砂为主, 保温作用微乎其微。异常区平面上表现为椭圆状, 面积 0.62 km²。

受地层、构造、岩浆岩等因素的影响, 异常区内

的地温场在平面上为不均一地温场。水温大于 50℃ 的 4 个地热井呈细条带状分布于异常中心, 向外温度逐渐降低。异常区范围仅局限于四家村及附近的低洼地带。与地热井距离仅 300 m 的异常区附近, 揭露基岩含水层的机民井 (井深 150 m) 水温骤降至正常水温。由此可见, 区内地温分布严格受断裂构造的控制。

异常区内大部分地段基岩裸露, 第四系盖层最厚不超过 8 m。热储层均属于太古宇变质岩系, 尽管热储岩性相同, 但地热井温度相差较大, 地温垂向变化也十分复杂。

各地热井垂向测温曲线见图 3。RL05、RL07 温深曲线基本上为一条直线, 斜率较大, 说明这 3 个

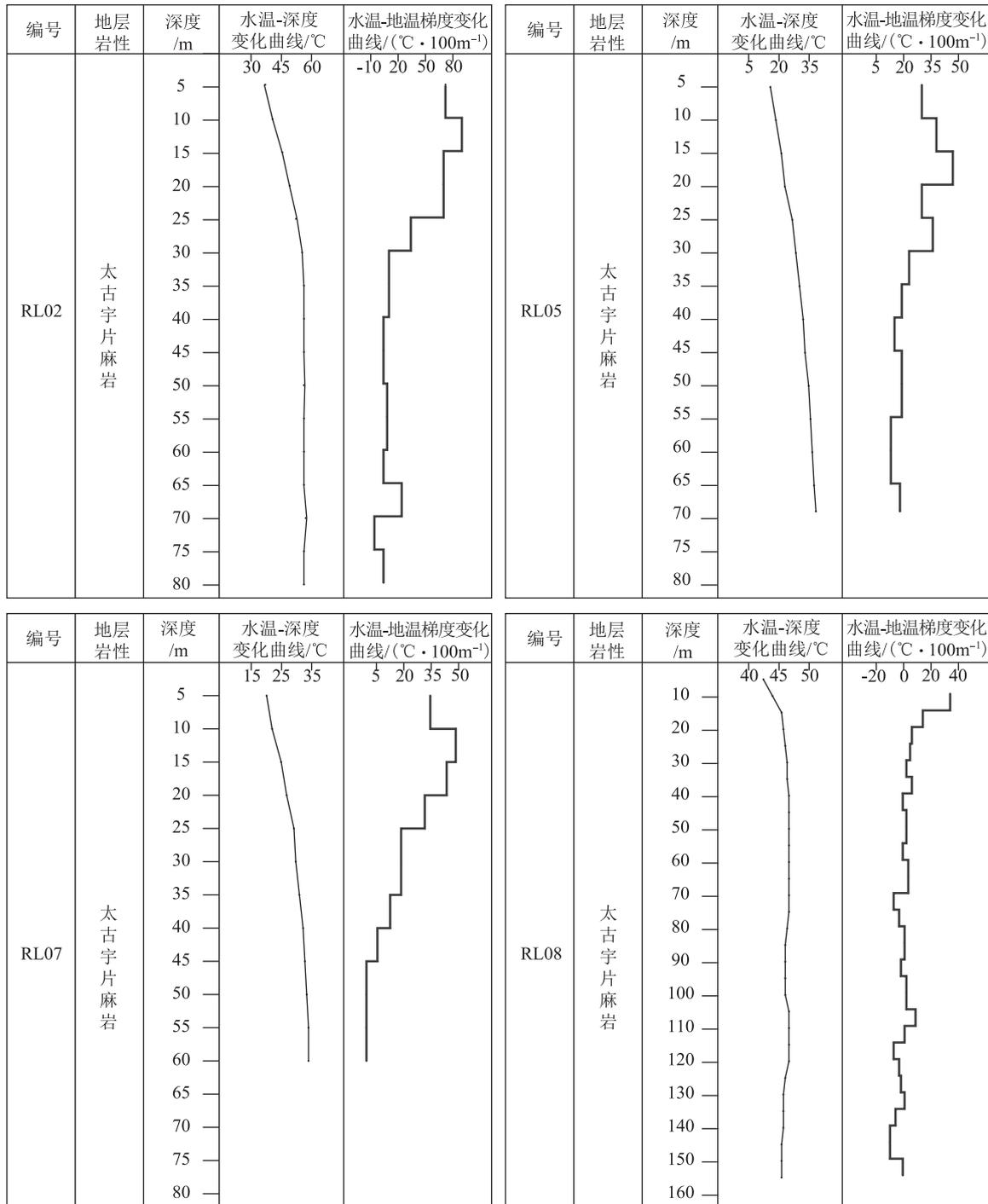


图 3 四家测温井温度、地温梯度与埋深关系图

Fig. 3 Relationship among temperature, geothermal gradient and buried depth of Sijia temperature logging wells

地热井传热过程以传导为主^[9-10,12]。同时 RL05、RL07 又略微上凸,说明这 2 个井还存在一定的对流传热,根据地温梯度上高、下低的特征,这 2 个地热井的地下水是由下向上运移的。RL02、RL08 两个地热井 30 m 以下温深曲线呈斜率几乎为 0 的直

线,说明这 2 个地热井传热过程以对流传热为主,且十分强烈,地温梯度虽然都不大,但总体上是上大下小,反映了水流垂直向上运移的特点。而 30 m 以上温深曲线斜率较大,地温梯度较大,水温随埋深深度变小,水温降低速度较快,说明这 2 个井的浅部有地

表凉水混入^[9-10, 12]。

综上, 四家异常区异常中心以垂直向上对流传热为主, 异常外围以传导传热为主。深部热流沿异常中心的断裂交会处上升, 并产生横向迁移、扩散, 在一定的范围内储存起来, 形成了研究区的地热异常。

3.3 地热水地球化学特征

3.3.1 地下热水主要组分

从表2可知, 区内地下热水主要阳离子为 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 K^+ , 主要阴离子为 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 和 NO_3^- 。其中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 是地热流体中最主要的阳离子, 但是 K^+ 的含量远小于 Na^+ , 这是因为 K^+ 在地壳中为营养元素, 容易被植物吸收, 另外 K^+ 为成矿元素, 在较高的温压条件下易大量参与并形成不溶于水的次生矿物, 如水云母、蒙脱石、绢云母等。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 碱土金属主要来源于碳酸盐的溶解与迁移, 在地下水中, 一般 Ca^{2+} 比 Mg^{2+} 含量高, 因为 Mg^{2+} 容易参与次生矿物的形成, 四家地区地下热水中 Ca^{2+} 是 Mg^{2+} 的 90~120 倍^[13]。一般认为, SO_4^{2-} 是地下水径流过程中流经含石膏矿物的岩石时, 将岩石中的石膏等硫酸盐溶滤形成的, 另外硫化物矿床氧化带氧化产物的溶解也是地下水中 SO_4^{2-} 的来源之一, SO_4^{2-} 是地热温泉水中的主要阴离子^[14]。在地下水中, 当 pH 值在 5~8 之间时, 碳主要以 HCO_3^- 的形式出现。四家地区地下热水 pH 值为 7.82~8.57, 平均 8.20, HCO_3^- 可能主要来源于碳酸盐岩的溶解。 Cl^- 以地下水流经含氯岩盐矿床或岩石中的岩盐 (NaCl 、 MgCl_2 、 CaCl_2 等) 的聚集为主要来源, Cl^- 不容易被吸附而大量存在于地下水中, 四家地区的地下热水也显示出这一特征。地下水化学成分的特点可以反映其形成条件, 而不同形成条件是由不同的自然环境决定的, 相似的自然条件下形成的地下水化学成分相似, 因此可以将相同成因和相同化学特点的水划分为一类。根据库尔洛夫分类和舒卡列夫分类方法, 毫克当量百分数大于 25% 的离子按递增排列表示, 四家地区地下热水离子顺序为 SO_4^{2-} 、 Na^+ ^[15]。另外, 根据 Piper 水化学类型三线图可知(图4), 四家地区地热井流体主要投点在 SO_4^{2-} - Na^+ 型区域。因此, 四家地区地热流体水化学类型主要为 SO_4^{2-} - Na^+ 型。

表2 四家地热流体水化学分析结果

Table 2 Results of hydrochemical analysis for geothermal fluids in Sijia area

编号	RL01	RL08
地点	四家板栗场	四家村中
取样时间	2019.7.21	2019.7.22
水温/℃	40.0	46.0
K^+ /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	5.28	5.88
Na^+ /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	204.50	210.90
Ca^{2+} /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	46.93	42.87
Mg^{2+} /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.51	0.35
Cl^- /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	44.82	44.47
SO_4^{2-} /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	442.70	460.00
HCO_3^- /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	60.96	39.62
CO_3^{2-} /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.00	3.00
NO_3^- /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	1.37	<0.20
F^- /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	8.93	9.26
SiO_2 /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	55.99	60.71
Br^- /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	<0.10	<0.10
Sr /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	2.128	2.059
Zn^{2+} /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.289	0.246
Li^+ /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.160	0.203
HBO_2 /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.93	0.90
pH	7.82	8.57
矿化度/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.8727	0.8777

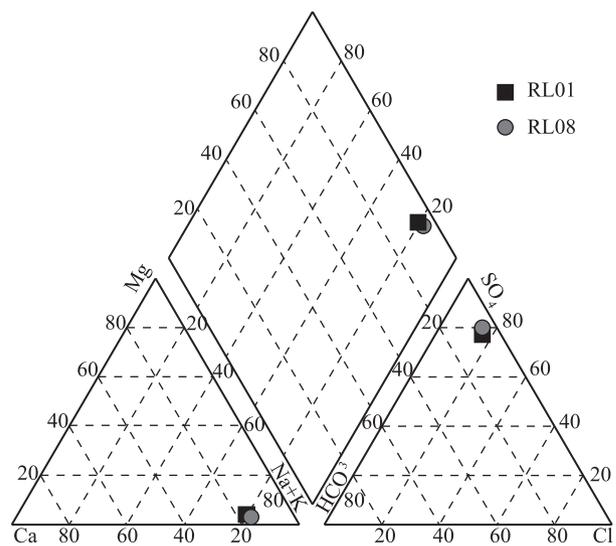


图4 Piper水化学类型三线图

Fig. 4 Three line diagram of hydrochemical type

3.3.2 地下水特征组分

大量资料表明, F^- 含量较高的地下水, 通常出现在结晶岩地区。青龙满族自治县西部山区分布有大面积的花岗岩、变质岩和混合岩, 为氟在水中富集提供了物质来源^[13]。再者, 氟本身具有较大的化学活动性。此外, 很重要的一点是, 地下水较高的温度和深远的循环提高了化学反应速度, 加剧了氟矿物的溶解, 造成了有利于氟的运移和富集的水文地球化学环境, 因此显示了随温度的增高, 地下水氟含量增高的正相关关系。

地下热水中 SiO_2 浓度主要取决于硅酸盐中二氧化硅矿物的溶解度和富集程度, 以及地下水温度、pH 值等。研究区侵入岩及变质岩岩石中 SiO_2 百分含量一般为 44.64%~73.35%, 多数断裂带硅化作用比较强烈。研究区地下热水中 SiO_2 含量较高, 与水的温度较高及多分布在侵入岩和变质岩区或接近这样的地区有直接的关系。硅质化合物在高温高压条件下与水相互作用时, 可大量进入地下水中, 地下水温度的升高, 加快了化学反应速度, 提高了水对岩石的溶滤和硅酸盐的富集程度^[13-17]。

本次在研究区采集了 2 件地热流体全分析样品及 28 件 F^- 、 SiO_2 单项分析样品。分析结果表明, 本区地下水 F^- 含量为 0.081~7.90 mg/L, SiO_2 含量为 0.081~7.90 mg/L, F^- 、 SiO_2 含量与水温呈良好的正相关关系(图 5), 且高 F^- 、高 SiO_2 点位与地热异常边界线(25℃)基本吻合。 F^- 、 SiO_2 含量由异常中心向外围呈现有规律地变化, 含量逐渐降低, 反映其

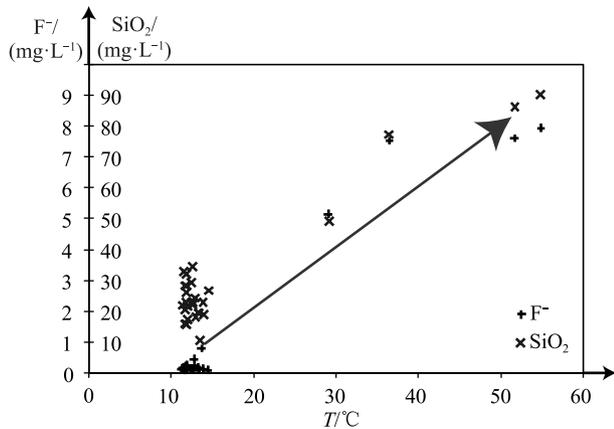


图 5 地下水 F^- 、 SiO_2 与温度关系图

Fig. 5 Relationship between content and temperature of SiO_2 and F^- in the underground water

质量浓度严格受地温场的控制, 也反映了富含 F^- 、 SiO_2 的地下水由地壳深部沿异常区内的构造向上运移到浅部, 再从异常区向外横向扩散、渗透的过程。

3.3.3 地热流体成因与来源

(1) 比例系数

在地下水中, Cl/Br 系数大于 300, 属于贫溴的含岩盐地层溶滤水, 小于 300 属于残余海水, 约为 300 一般属于大洋水^[17]。四家地区地热流体的 Cl/Br 系数平均约为 446.45, 大于 300, 属于贫溴的含岩盐地层溶滤水。

标准海水的 $\gamma Na/\gamma Cl$ 系数平均值为 0.85, 海相沉积水的 $\gamma Na/\gamma Cl$ 系数小于 0.85, 含岩盐地层溶滤水的 $\gamma Na/\gamma Cl$ 接近于 1。四家地区地热流体的 $\gamma Na/\gamma Cl$ 系数平均约为 4.65, 大于 1, 故认为该水属于陆相沉积水。

(2) 氢氧同位素特征

本次收集到秦皇岛地区雨水 δD 、 δO^{18} 数据 3 组, 测得研究区范围内 δD 、 3H 、 δO^{18} 数据 2 组(表 3)。

根据收集到的 δD 、 δO^{18} 数据绘制了大气降水、地下热水的 δD - δO^{18} 关系图(图 7)。从图 7 可以看出, 研究区大气降水 δD 与 δO^{18} 值分别为 -21.19‰~-52.35‰和 -4.7‰~-7.84‰, 其变化可能为采样季节、高程及气象影响所致。地下热水 δD 与 δO^{18} 值相差不大, δD 一般为 -75‰~-76‰, δO^{18} 一般为 -10.2‰~-10.3‰, 在 δD 和 δO^{18} 关系图(图 7)上, 热水样点大多落在克雷格降水线附近, 表明研究区地

表 3 同位素测试数据统计

Table 3 Statistical table of isotopic test data

水样类型	编号	取样地点	δD /‰	δO^{18} /‰	3H /T.U
雨水	Y01 *	秦皇岛市区	-21.19	-4.70	
	Y02 *	秦皇岛市区	-52.35	-7.84	25.8
	Y03 *	卢龙县	-36.96	-6.77	
地下热水	RL01	板栗场	-76.00	-10.20	0.8±0.5
	RL08	四家村	-75.00	-10.30	0.6±0.5

注: “*” 标为收集数据^{[10]②}

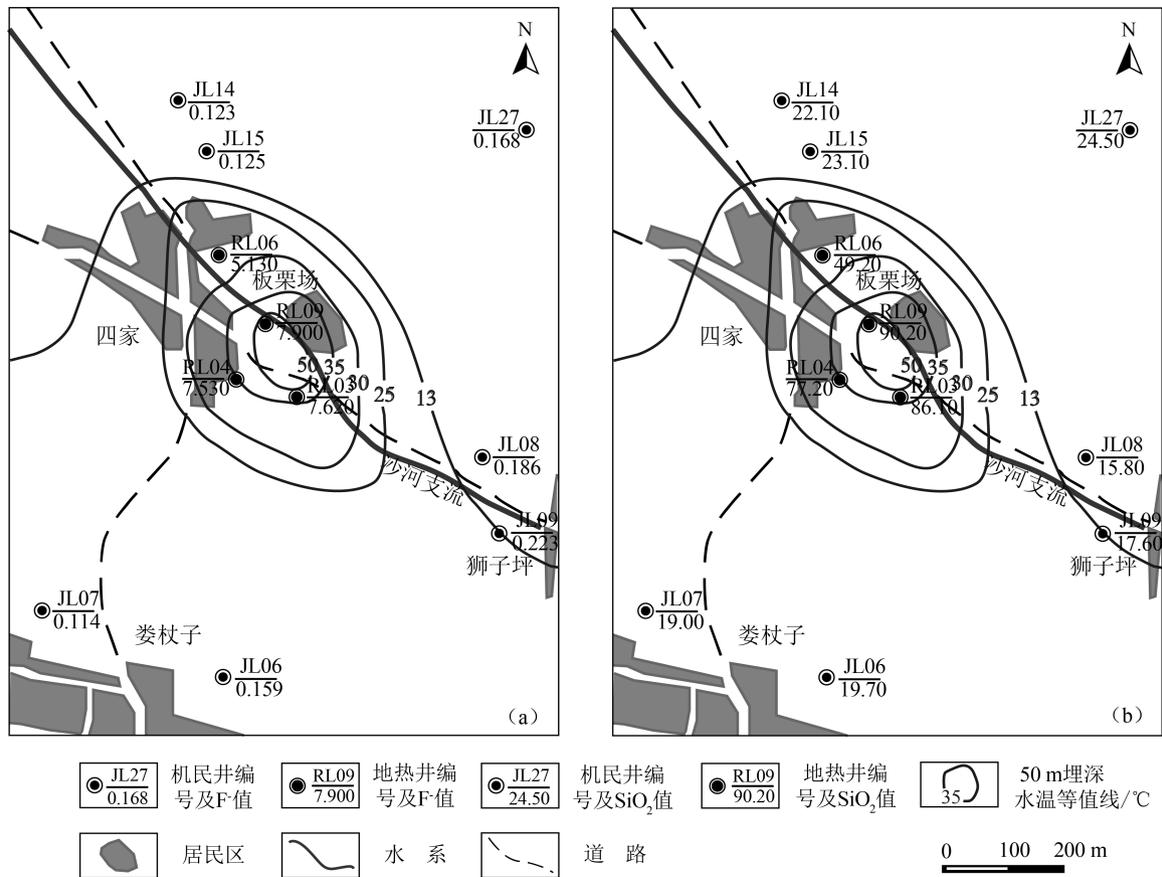


图6 四家地区 F^- 浓度与地温关系图(a)和 SiO_2 浓度与地温关系图(b)

Fig. 6 Relationship of F^- and concentration temperature(a), and relationship of SiO_2 and concentration temperature(b) in Sijia area

下热水为大气降水补给,属大气成因^[18-23]。

(3)放射性同位素(氡)特征

研究区地下热水氡值较低,为0.6~0.8 T.U,均在2 T.U以下。国际原子能机构认为,鉴别年龄大于30 a的地下水的实用法则是:北半球高纬度内陆地区氡值小于或等于4 T.U,低纬度和中纬度地区氡值小于或等于1 T.U。研究区处于中高纬度地区,因此认为,研究区地下热水年龄大于30 a。

3.4 热储温度及循环深度估算

根据四家一带地热形成的地质条件和地热水化学特征,结合各地热温标适用条件^[22-24],分别选择钾镁、二氧化硅地球化学温标对热异常区热储温度进行了估算。钾镁地热温标计算热储温度为87.96~95.72℃,二氧化硅地热温标计算热储温度为107.16~111.09℃。结合本区地下热水温度的实际情况综合考虑,并最终确定四家地热田地下热水的深部热储为中低温热储,推测深部热储温度在90~

110℃之间。

根据研究区地热井测温资料,四家地热异常区地热增温梯度为3.5~21.6℃/100m,取平均值后地

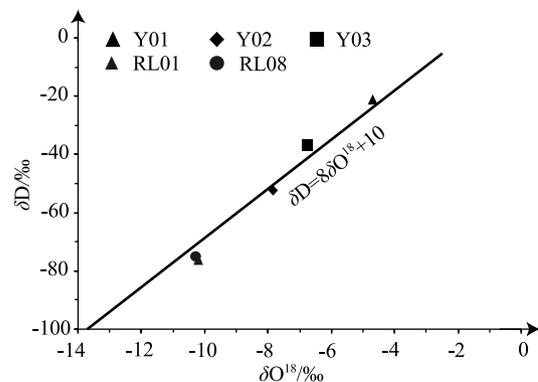


图7 四家地区大气降水、地下热水 δD 和 δO^{18} 关系图
Fig. 7 Hydrogen and oxygen stable isotope characteristics of the geothermal fluid in Sijia area

热增温梯度为 $12.9^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。根据本区实测的大量机民井不同深度地温数据,统计得出研究区恒温带平均深度为 20 m ,温度为 12.5°C 。

通过公式:

$$Z = \frac{T - T_0}{G} + Z_0$$

计算出该地热田热储埋深为 740 m 。式中, Z 为热储埋深; T 为热储温度; T_0 为恒温带温度; G 为地热增温梯度; Z_0 为恒温带平均深度。与物探解译控构造切割深度基本相符。

4 地热成因模式

4.1 热源分析

地热井热源分析与动力学研究,不仅可以了解地下水开采过程中水位变化的基本特征及其影响因素,也有助于开展地下水资源评价和指导地下水热水资源的可持续利用^[25]。

研究区新生代地层很薄甚至缺失,基岩大面积出露,一方面造成盖层的保温性差,使深部传导上来的热量快速散失;另一方面,在基岩出露区,基岩直接接受下行地下水补给,使地温偏低^[8]。研究区八道河角闪斜长片麻岩深成变质侵入体为新太古代早期汉儿庄片麻岩套的一部分,其时代较早,其余热已消散殆尽,不构成特殊热源。岩浆活动对现今地温场的影响取决于岩浆活动的年代、岩浆体规模等。研究区最新的岩浆岩为燕山运动早期的都山复式岩体的二长花岗岩,且其规模不大,其余热已散失,对现今地温场无影响。实际上,地热异常区外围多眼机民井及狮子坪铁矿 ZK01 钻孔均揭露了二长花岗岩,但其井(孔)温度均小于 15°C ,未见热异常。研究区岩浆活动对于地温场无明显影响,不构成附加热源。故该地热系统中地下热水的形成是在正常的大地热流背景下地下水在深循环过程中被围岩逐渐加热所致^[26]。

纵观青龙满族自治县西部山区区域,其温泉、地热井主要分布在冷口大断裂和青龙-大屯断裂系统附近及中生代侵入岩体边部。青龙-大屯右行走滑断裂系统西起河北省迁西县喜峰口,向东经青龙县王厂、八道河、青龙县城北部、马圈子一带,向东延出,全长约 130 km ,为密云-喜峰口断裂带的东延部分,呈近东西向横贯调查区中部。该断裂系统切割深度较大,影响范围较广,断裂附近还发育大量

北东向次级断裂。该断裂在航磁异常图上反映较明显,将北东向延伸的磁异常切断形成一个宽 $2\sim 3\text{ km}$ 的低值带^{③④[4-5]}。另一条与研究区地热资源有关的冷口断裂在研究区南部穿过,该断裂延伸长逾 100 km ,沿断裂有大面积岩浆岩侵入体,该断裂形成历史较早,控制了中元古代地层分布和中、新生代盆地。断裂力学性质属压扭—张扭性,是一条具有多期多种力学性质活动的断裂带。物探等资料表明,冷口断裂在新生代以来以 0.1 mm/a 的垂直形变速率继续活动着,为区内的Ⅲ级活动断裂^{③④[5-6]}。这些深大断裂带为大气降水深循序加热后迅速上升到地表浅部提供了良好通道。同时,根据华北地区各类岩石放射性产热率的测定资料,花岗岩放射性产热量比其他岩石高 3 倍以上^[27]。

综上,研究区地热属于非火山型地热资源,凸起的上地幔热量和花岗岩壳中的放射性元素蜕变产生的热量共同构成了本区地热异常的深部热源。

4.2 储热构造

储热构造是地下水在不断交替过程中能储存地热水的地质构造,均有汇聚外围一定范围内分散

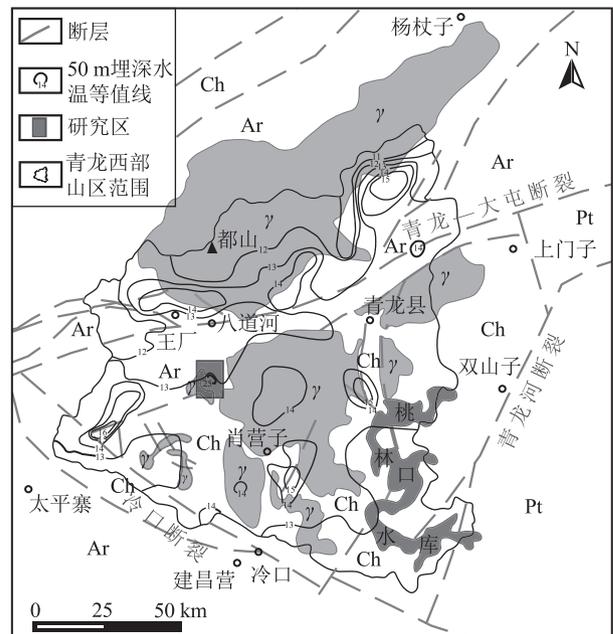


图 8 青龙西部山区地热地质简图

Fig. 8 Simplified map of geothermal geology in the western mountainous area of Qinglong

Ch—中元古界长城系;Pt—古元古界变质岩;Ar—太古宇变质岩;
γ—中生代花岗岩

水流和储存地热水的作用。储热构造相当于地下天然的蓄水容器,是由含水层(带)与隔水层构成的能够储存地下热水的地质构造^[28]。

四家地区片麻岩含水层透水性较强,主要接受大气降水补给、第四系孔隙水补给及微弱的地下水侧向径流补给。

由 L02 可控源音频大地电磁测深综合剖面图(图 9)及其解译成果可知,L02 剖面 1225~1825 m 处,断层 F2 切割浅部片麻岩及前部花岗岩体后又切割其下部的片麻岩,浅部花岗岩体为隔水顶板,深部花岗岩为隔水底板,中部片麻岩含水层呈“葫芦”形,其顶部与西北部片麻岩含水层联通,使片麻岩含水层中分散的地下水流沿西北部顶端向“葫芦”体片麻岩中聚集,故认为断层 F2 及其伴生的次级构

造为该区的主要储热构造。

4.3 导热构造

地质构造运动使地层产生断裂、错动、上升、下陷等一系列地质运动,在岩层中形成断裂带和破碎带,为热流从地下深处向上运移提供了通道^[19]。

由 L02(图 9)、L01(图 10)可控源音频大地电磁测深综合剖面图解译成果可知,四家地热异常区深部,花岗岩基底存在起伏,而这些起伏可能是由于断裂构造切割花岗岩体造成的。花岗岩体被切割,使深部的热流沿断裂上升,混合并加热赋存于四家地热异常区下部“葫芦”形储热构造 F2 中的片麻岩裂隙水,形成该地的地热异常。通过物探解译,认为该区北西向的 F6、F7 及 F2 切割深度较大,超过 1000 m,推测为研究区主要导热构造。

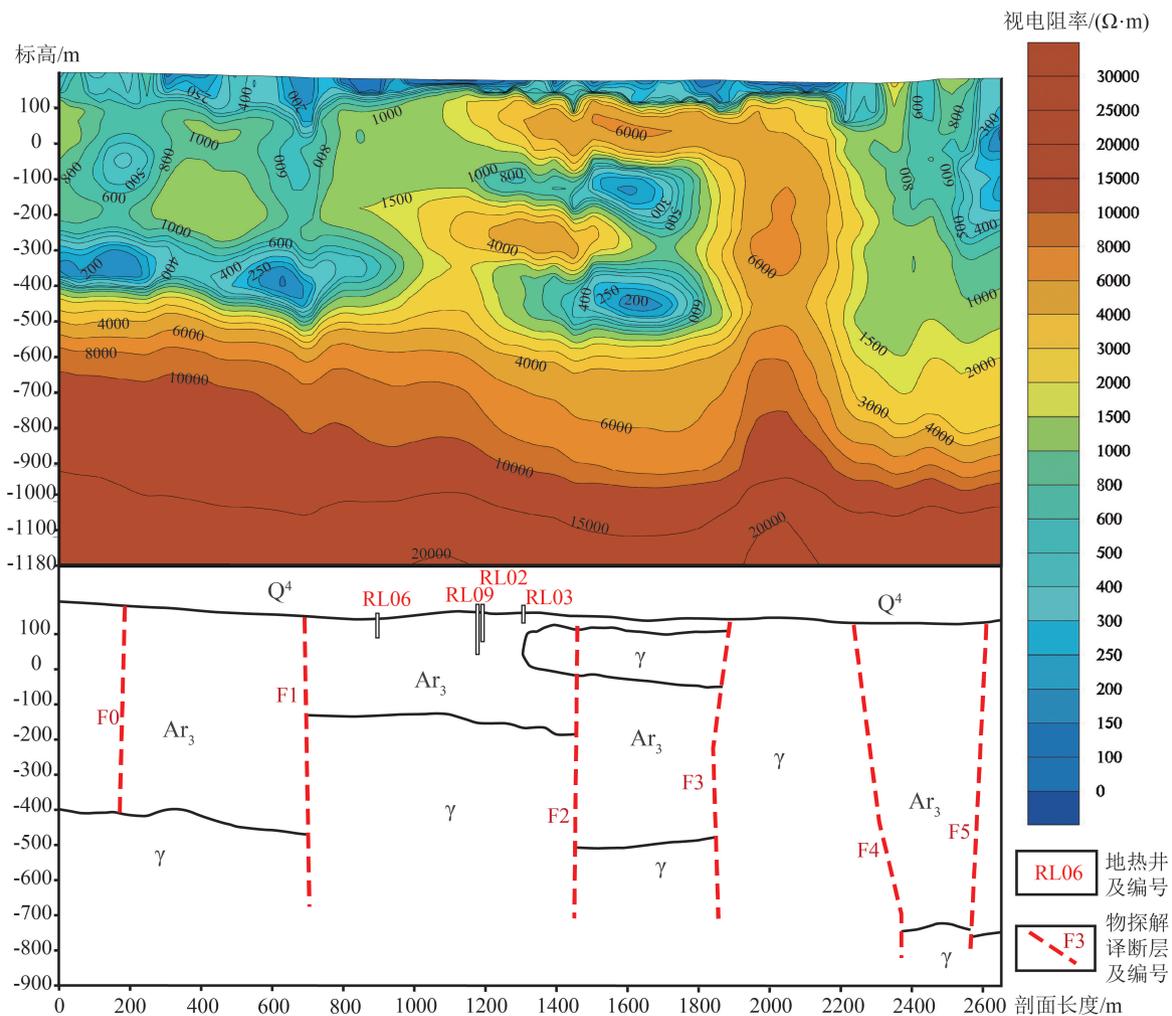


图 9 L02 可控源音频大地电磁测深综合剖面图

Fig. 9 L02 line CSAMT composite section

Q⁴—第四系;Ar₃—太古宙片麻岩;γ—燕山中酸性岩

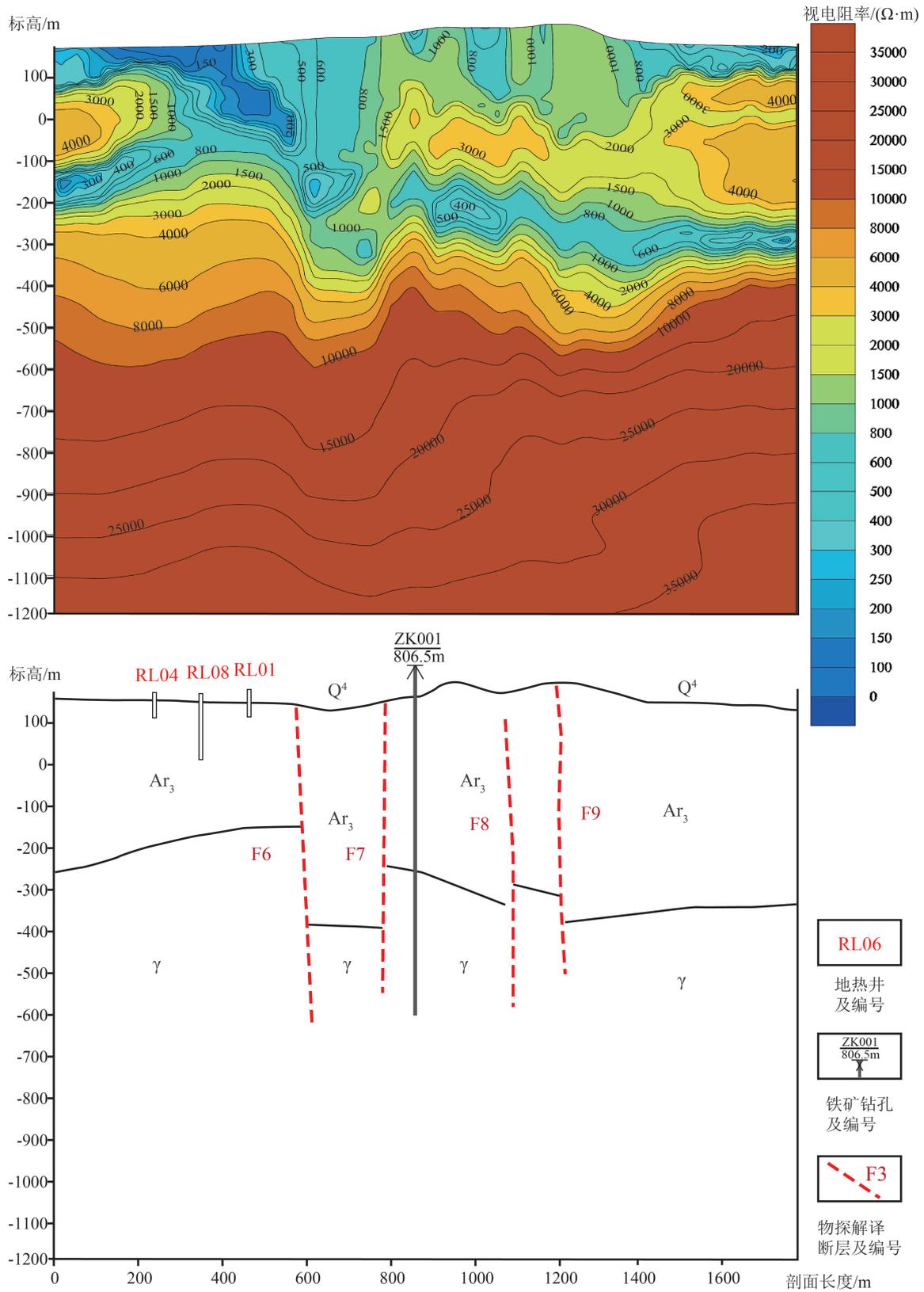


图 10 L01 可控源音频大地电磁测深综合剖面

Fig. 10 L01 line CSAMT composite section

Q^4 —第四系; Ar_3 —太古宙片麻岩; γ —燕山期中酸性岩

综上,F6、F7为研究区的主要导热构造,F2既为导热构造又为主要储热构造。

4.4 成因模式

研究区降水量丰沛,年降水量多年平均720 mm,根据对地热井RL01、RL08样品分析结果的计算发现,研究区地下热水补给来源为大气降水,地下热水年龄大于30 a,计算补给高程为1400~1700 m,这与异常区北西部山区海拔相吻合。这些山区第四系覆盖薄,大部分区域基岩裸露,节理、裂隙发育,为大气降水向下渗透提供了有利条件^[29]。

通过系统分析,将四家地热田成因模式总结为:大气降水、地表水沿岩石裂隙、断层渗透到地表深部。这些水源在深循环过程中受上地幔热量和花岗岩壳中的放射性元素蜕变产生的热量共同构成的热源加热,并与围岩发生水岩反应形成 F^- 、 SiO_2 等特征元素富集。最终,在压力差和密度差的作用下产生对流,地下热水以较快的速度上涌,来不及与围岩达到热平衡,从而将热量输送到地壳浅部,一部分通过井的形式被人工排泄到地表,一部分沿断裂构造、节理裂隙扩散到外围,形成了研究区的地热异常^[9,30-31]。

5 结论

(1)四家异常区异常中心以垂直向上对流传热为主,异常外围以传导传热为主。深部热流沿异常中心的断裂交会处上升,并产生横向迁移、扩散,在一定的范围内储存起来,形成了研究区的地热异常。

(2)四家地区地热流体水化学类型为 $SO_4^{2-}-Na^+$ 型, F^- 、 SiO_2 含量与水温呈良好的正相关关系,同时 F^- 、 SiO_2 质量浓度严格受地温场的控制,也反映出富含 F^- 、 SiO_2 的地下热水由地壳深部沿异常区内的构造向上运移到浅部,再从异常区向外横向扩散、渗透的过程;根据 $\omega(Cl)/\omega(Br)$ 、 $\gamma(Na)/\gamma(Cl)$ 系数可知,研究区地下水属含岩盐地层溶滤水的陆相沉积水。

(3)同位素研究表明,研究区地下热水为大气降水补给,属大气成因;区内地下热水氡值较低,为0.6~0.8 T.U,均在2 T.U以下,认为研究区地下热水年龄大于30 a。

(4)四家地热系统中地热水为地下水深循环过程中,在正常的大地热流值背景下被围岩逐渐加热所致;根据2条可控源音频大地点测深剖面解译

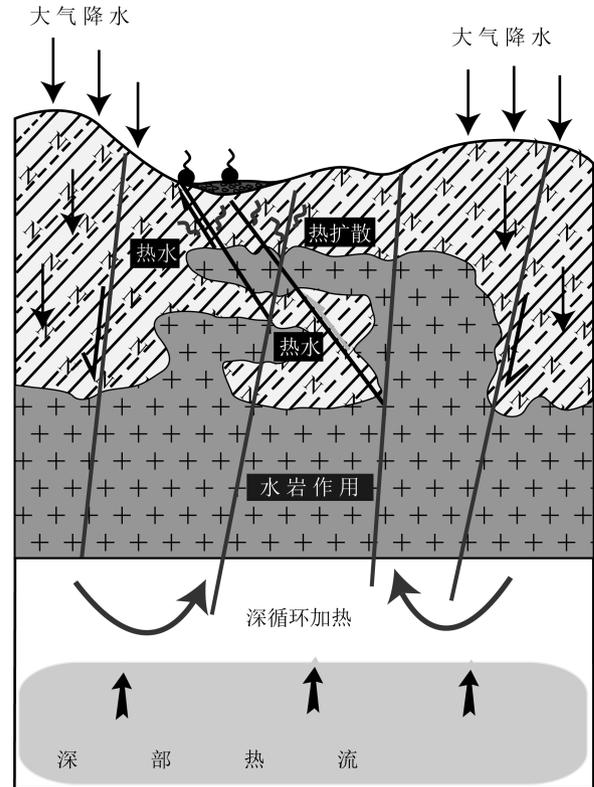


图 11 四家地热田成因模式图

Fig. 11 Genetic model of Sijia geothermal field

成果结合实际地质条件综合分析,研究区深部花岗岩基底存在起伏,花岗岩体被切割,使得深部的热流能够沿断裂上升,混合并加热赋存于四家地热异常区下部“葫芦”体中的片麻岩裂隙水,形成该区的地热异常。

致谢:感谢审稿专家对本文的审阅及提出的宝贵修改建议;论文编写过程中还得到河北省地质矿产勘查开发局第八地质大队邱若峰副队长、杨燕雄总工程师及中国地质大学(北京)董国臣教授的帮助,在此一并致谢。

参考文献

- [1] Mongillo M A. Preface to geothermics special issue on sustainable geothermal utilization[J]. Geothermics, 2010, 39: 279-282.
- [2] 汪集咏, 龚宇烈, 马伟斌, 等. 我国发展地热面临问题的分析及建议[C]// 首届“中国工程院/国家能源局能源论坛论文集”. 北京: 化学工业出版社, 2010: 62-630.
- [3] 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 等. 中国地热资源及其潜力评价[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 312-321.
- [4] 程立群, 徐一鸣, 杜立新, 等. 冀东燕山中段地热地质条件分析与资

- 源潜力评价[J].矿产勘查,2020,11(12):2637-2646.
- [5] 河北省区域地质矿产调查研究所,河北省北京市天津市区域地质志[M].北京:地质出版社,2005.
- [6] 河北省地质矿产局,河北省北京市天津市区域地质志[M].北京:地质出版社,1989:322-586.
- [7] 刘俊长,龚红蕾,刘军恒,河北省莫霍面和深部构造与矿集区的关系[J].物探与化探,2011,35(6):758-761.
- [8] 余恒昌,邓孝,陈碧婉,等.矿山地热与热害治理[M].北京:煤炭工业出版社,1991:46-93.
- [9] 河北省地矿局.河北地热[M].北京:地质出版社,2013.
- [10] 河北省地矿局.河北地下水[M].北京:地质出版社,2013.
- [11] 邱楠生,唐博宁,朱传庆.中国大陆地区温泉分布的深部热背景[J].地质学报,2022,96(1):195-207.
- [12] 汪集旻,熊亮萍,庞忠和.中低温对流型地热系统[M].北京:科学出版社,1993:117-132.
- [13] 陈墨香.华北地热[M].北京:科学出版社,1988.
- [14] 沈照理,朱宛华,钟佐臻.水文地球化学基础[M].北京:地质出版社,1993:71.
- [15] 任天培.水文地质学[M].北京:地质出版社,1986.
- [16] Fournier R O, Rowe J J. The solubility of amorphous silica in water at high temperature and high pressures[J]. American Mineralogist, 1977,62:1052.
- [17] Fournier R O. Application of Water geochemistry to geothermal exploration and reservoir engineering[C]//Ryhack L, Muffler L J P. Geothermal Systems: Principle and Case Histories, 1981:113.
- [18] Payne B R. Water balance of Lake Chala and its relation to groundwater from tritium an stable isotope data [J]. Journal of Hydrology, 1970,11(1):47-58.
- [19] Chen J S, Zhao X, Fan Z C, et al. Isotope method for confined groundwater recharge of the lower reaches of Heihe River, Inner Mongolia, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2007,81(4):668-673.
- [20] Jiang Y J, Yuan D X, Xie S Y, et al. Groundwater quality and land use in a typical karst agricultural region [J]. Journal of Geographical Sciences, 2006,16(4):405-414.
- [21] Montoroi J P, Grunberger O, Nasri S. Groundwater geochemistry of a small reservoir catchment in Central Tunisia[J]. Applied Geochemistry, 2002,17:1047-1060.
- [22] 张卫民.应用 SiO₂ 地热温度计估算地热储温度——以赣南横径地区若干温泉为例[J].地球学报,2001,22(2):185-188.
- [23] 王莹,周训,于湲,等.应用地热温标估算地下热储温度[J].现代地质,2007,21(4):605-612.
- [24] 刘明亮,何瞳,吴启帆,等.雄安新区地热水化学特征及其指示意义[J].地球科学,2020,45(6):2221-2231.
- [25] 赵敬波,周训,方斌,等.天津地区深层地下热水井水力特征[J].现代地质,2011,25(2):363-392.
- [26] 郭清海.岩浆热源地热系统释义[J].地质学报,2022,96(1):208-214.
- [27] 汪洋,汪集旻,邓普福,等.中国大陆地壳和岩石圈铀、钍、钾丰度的大地热流约束[J].地球物理学进展,2001,16(3):47-56.
- [28] 刘光亚.基岩地下水[M].北京:地质出版社,1979:52-58.
- [29] 王贵玲,蔺文静.我国主要水热型地热系统形成机制与成因模式[J].地质学报,2020,94(7):1923-1937.
- [30] Wang G L, Wang W L, Zhang W, et al. The status quo and prospect of geothermal resources exploration and development in Beijing - Tianjin - Hebei region in China[J]. China Geology, 2020,3:173-181.
- [31] Wang G L, Zhang W, Ma F, et al. Overview on hydrothermal and hot dry rock researches in China[J]. China Geology, 2018,1:273-285.
- ①徐一鸣,程立群,郝文辉,等.河北省青龙满族自治县西部山区地热资源调查评价报告.河北省地矿局第八地质大队,2019.
- ②贺鹏起,杨立顺,尚福平,等.河北省秦皇岛市地热资源调查评价.河北省地矿局第八地质大队,2003.
- ③张双增,吴连亨,梁国庆,等.青龙县幅 1:5 万地质图说明书.河北省地质调查院,1996.
- ④张双增,吴连亨,梁国庆,等.肖营子幅 1:5 万地质图说明书.河北省地质调查院,1996.