

DOI:10.19948/j.12-1471/P.2024.03.10

苏永强,吕冬冬,宋倩,齐恭,赵琳如,赵素杰. 2024. 张家口市地热资源赋存特征及形成机理研究[J]. 华北地质, 47(3): 97-106.

Su Yongqiang, Lyu Dongdong, Song Qian, Qi Gong, Zhao Linru¹, Zhao Sujie. 2024. Research on the occurrence characteristics and formation mechanism of geothermal resources in Zhangjiakou City[J]. North China Geology, 47(3): 97-106.

张家口市地热资源赋存特征及形成机理研究

苏永强^{1,2}, 吕冬冬^{1*}, 宋倩^{1,2}, 齐恭^{1,2}, 赵琳如¹, 赵素杰¹(1. 河北省地质矿产勘查开发局第三水文工程地质大队(河北省地热资源开发研究所), 河北衡水 053000;
2. 河北省砂岩热储高效利用技术创新中心, 河北衡水 053000)

摘要:【研究目的】张家口市地热温泉资源丰富,目前地热资源勘查及研究工作主要集中于地热温泉出露地区,其余地区基本空白。本文通过分析研究深部地热赋存特征、水化学特征、形成机理及热储结构关系,研究总结不同地热资源类型及热储结构中地热资源富水性特征,指导山区空白区地热资源勘查开发利用及研究,助力“双碳”目标实现。【研究方法】以河北地矿局开展的张家口市地热温泉资源详细调查项目为基础,在充分分析张家口市地热资源的分布、热储埋藏条件和赋存特征基础上进行成因机理和地热水形成环境研究,并通过实例分析每种地热类型的赋存特征与优势。【研究结果】以典型区为代表,经大量数据分析研究发现:不同地热资源类型及热储结构中地热温泉(井)的水量、水温、水化学组分存在一定差异。【结论】将张家口地热资源分三种地热资源类型、七种热储结构模型,为河北省山区地热资源勘查开发提供科学理论支撑。

关键词:张家口;地热资源类型;热储结构模型;水化学特征;形成机理

创新点:针对张家口市地热资源,划分了三种地热资源类型,提出了七种热储结构模型。

中图分类号: P314.1

文献标识码: A

文章编号: 2097-0188(2023)03-0097-10

Research on the occurrence characteristics and formation mechanism of geothermal resources in Zhangjiakou City

SU Yongqiang^{1,2}, LYU Dongdong¹, SONG Qian^{1,2}, Qi Gong^{1,2}, ZHAO Linru¹, ZHAO Sujie¹

(1. The Third Hydrogeological Engineering Geological Brigade of the Geological and Mineral Exploration and Development Bureau of Hebei Province (Hebei Institute of Geothermal Resources Development), Hengshui Hebei 053000; 2. Hebei Province Sandstone Heat Storage and Efficient Utilization Technology Innovation Center, Hengshui Hebei 053000)

Abstract: This paper is the result of geothermal geology.

[Objective] Zhangjiakou City is rich in geothermal hot springs, but at present, geothermal resources exploration and research work is mainly concentrated in geothermal hot springs outcropping areas, and the rest of the area is basically blank. Analysis and research of deep geothermal features, hydrochemical characteristics, formation mechanism and thermal reservoir structure relationship, re-

收稿日期: 2024-04-19

基金项目: 河北省地矿局项目“张家口市地热温泉资源详细调查评价”(13000024P00329410252P)

作者简介: 苏永强(1979-),男,正高级工程师,主要从事深浅层地热资源调查评价、水文地质调查及生态环境地质调查工作, E-mail: 296359652@qq.com。

*通讯作者: 吕冬冬(1987-),男,硕士,高级工程师,主要从事地热资源勘查工作, E-mail: 704387029@qq.com。

search and summarize different types of geothermal resources and thermal reservoir structure of geothermal resources in the water-rich features, guide the blank area of geothermal resources exploration, development and utilization of mountainous areas and research, and help the 'double-carbon' goal to achieve. **[Methods]** Based on the detailed investigation project of geothermal hot spring resources in Zhangjiakou carried out by Hebei Geology and Mining Bureau, we fully analyze and study the distribution of geothermal resources in Zhangjiakou, the conditions of thermal reservoirs and reservoir characteristics, conduct research on the mechanism of genesis and analysis of the environment for the formation of geothermal water and analyze the characteristics and advantages of the storage of each geothermal type with examples. **[Results]** Taking the typical district as a representative, after a large amount of data analysis and research, it is found that there are certain differences in the water volume, water temperature and hydrochemical components of geothermal hot springs(wells) in different geothermal resource types and thermal reservoir structures. **[Conclusions]** The geothermal resources of Zhangjiakou are divided into three types and seven types of thermal reservoir structure models, providing scientific theoretical support for the exploration and development of geothermal resources in the mountainous areas of Hebei Province.

Key words: Zhangjiakou, types of geothermal resources, structural modeling of geothermal reservoirs, hydrochemical characteristics, formation mechanism

Highlights: Regarding the geothermal resources in Zhangjiakou City, three types of geothermal resources have been divided and seven thermal reservoir structure models have been proposed.

About the first author: Su Yongqiang (1979-), senior engineer, mainly engaged in deep and shallow geothermal resource investigation and evaluation, hydrogeological investigation, and ecological environment geological investigation work, E-mail: 296359652@qq.com.

About the corresponding author: Lyu Dongdong (1987-), senior engineer, mainly engaged in geothermal resources exploration, E-mail: 704387029@qq.com.

Fund support: Supported by the project of Hebei Institute of Geothermal Resources Development (No. 13000024P00329410252P)

地热是一种可再生能源,具有资源量大、能源利用效率高、节能减排效果好等诸多优点,在能源变革背景下具有独特优势(闫坪卉, 2023; 刘伟朋等 2023)。张家口市地热温泉资源丰富,开发历史悠久,主要分布于坝下山间盆地及中低山区,有著名的赤城汤泉、塘子庙温泉及三马坊温泉等,地热水温 25 ~ 80℃,水质较好,富含氟离子和偏硅酸等微量元素,泉最大流量可达 83.70 m³/h,地热井单井最大涌水量为 163.36 m³/h(河北省地矿局第三水文工程地质大队, 2023; 王国晨, 2019)。为合理开发利用张家口地热资源,自上个世纪 70 年开始不同部门开展了大量的地质勘查工作,自 2010 年以来,先后在崇礼、后郝窑、赤城等地开展了地热田预可行性勘查工作; 2021 年中国地质科学院开展张家口地热资源调查,初步查明了地热地质背景,圈定地下热水开发有利靶区,分析构造断裂与地热资源耦合机制(中国地质科学院, 2021; 李杨等, 2018); 2023 年河北省地矿局开展了张家口市地热温泉资源详细调查,进行了大

量的物探、水质分析及动态监测等工作,基本查明了地热温泉资源赋存特征(河北省地矿局第三水文工程地质大队, 2023)。

然而,关于全市地热资源分布及赋存特征整体的分类研究较少,针对不同热储、覆盖层及地热成因与地下水富水性及水化学特征的研究不足,尤其是热储上覆地层不同,地热水水量、水温、水质及水位等情况差异较大(刘伟, 2023; 孙晓林, 2023; 唐永香, 2024)。因此,开展全市地热资源成因类型及热储结构与富水性的耦合分析是实现全面系统科学开发利用张家口市地热资源的关键一步。

本文在前人工作的基础上总结了张家口市地热资源分布和赋存特征,将地热资源划分为三种类型,通过耦合分析已查明地热异常区地热水水质、水量、水温及水位等因素与热储地层结构的相关性,提出七种热储结构,并结合地面物探成果对地热资源的形成机理进行了初步分析,可为今后山区地热资源勘查和成因研究提供参考。

1 地热地质背景

1.1 地层

根据钻孔揭露,张家口市自老至新地层主要有太古界、元古界、古生界、中生界、新生界。太古界为一套中深-深区域变质作用形成的变质岩系,中上元古界分为长城系、蓟县系及青白口系,岩性主要为砂砾岩、石英岩、粉细砂岩、页岩、白云岩及灰岩,古生界寒武奥陶系岩性以灰岩、页岩为主,夹泥质白云岩,中生界侏罗系主要岩性为砂岩、砾岩、凝灰岩、安山岩,白垩系主要岩性为含煤及油页岩、陆源碎屑岩及中性火山岩,出露面积不大。新生界古近系、新近系为基性火山岩及河湖相沉积,第四系主要为松散堆积物。本区地热资源主要赋存于元古界长城-蓟县系的白云岩以及太古界的变质岩类地层(刘江涛等,2018;易大宝等,2020)。

1.2 构造断裂

张家口市南北跨越内蒙-大兴安岭褶皱系和中朝准地台两个 I 级构造单元(河北省地质矿产局,1989;河北省区域地质矿产调查研究所,2017)。张家口市地热资源分布于中朝准地台(I₂)的三个 II 级构造单元和六个 III 级构造单元中,即内蒙地轴(II₁),分布于尚义-赤城深断裂以北,包括张北台拱(III₁)、沽源陷断束(III₂)、围场拱断束(III₃)三个 III 级构造单元;燕山台褶带(II₂),分布于尚义-赤城深断裂以南,包括宣龙复式向斜(III₄)、军都山岩浆岩带(III₅)两个 III 级构造单元;山西断隆(II₃),分布于燕山台褶带西南部松枝口-马市口大断裂以西,包括五台台拱(III₆)一个 III 级构造单元。张家口市地热资源受北东方向的断裂构造控制,主要呈北东方向分布,在断裂交汇处,构造发育、岩石破碎,为地下热水上升和运移提供了通道和赋存空间,主要包括深断裂两条、大断裂七条(李泓泉等,2020)。其中尚义-赤城和大河南-赤城两条深断裂附近形成有赤城汤泉、塘子庙温泉以及

后郝窑地热田等,蔚县-延庆、松枝口-马市口、下花园等大断裂形成有蔚县地热田、三马坊地热田等(图1)。

1.3 岩浆岩

张家口市岩浆岩比较发育,分布面积大,岩石种类较齐全。岩浆岩共有九个旋回,华力西期的第三旋回,燕山期的第六、七、八旋回及喜山期的第九旋回比较发育,其中燕山旋回尤为显著。活动方式包括火山喷发、潜火山、浅-中层侵入。岩浆岩与围岩接触破碎带为地热流体提供了良好的通道和储存空间,受岩浆岩活动影响,其水温也相对较高(甄世民等,2021)。

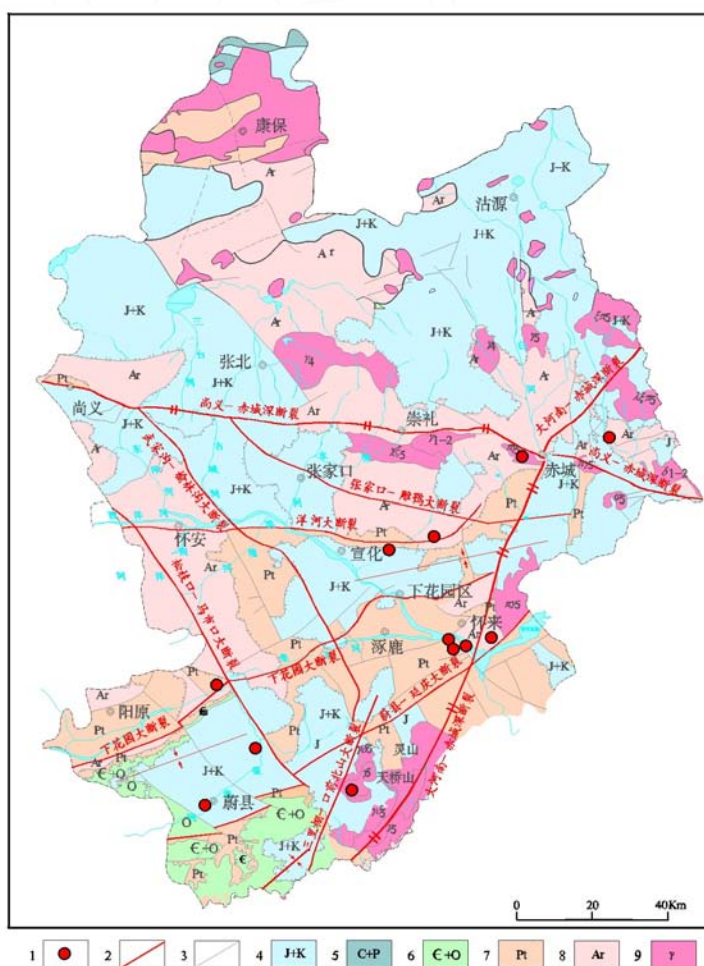


图1 张家口市断裂构造与地热温泉分布图

Fig.1 Distribution map of fault structures and geothermal hot springs in Zhangjiakou City

1. 地热温泉点位置; 2. 控热断裂; 3. 地质构造; 4. 侏罗-白垩系;
5. 石炭-二叠系; 6. 寒武-奥陶系; 7. 元古界; 8. 太古界; 9. 侵入岩

2 地热资源类型及赋存特征

张家口市地热资源是以地下水为载体的水热型地热资源(王贵玲,2020;国土资源部储量司,2010)。根据热储的埋藏条件和赋存特征,张家口市整体地热资源可以划分为三种类型:一是受断裂和构造控制,以对流传热为主,经导水构造裂隙一般呈带状出露于地表,本次研究称之为断裂开放型;二是以热传导为主,地热水主要赋存于岩性以白云岩为主的地层内,一般呈层状赋存于地下,具有一定厚度的盖层,本次研究称之为断陷盆地封闭型;三是同时存在对流传热和热传导两种,地热水一般赋存于地下,盖层较薄,本次研究称之为混合半封闭型。

2.1 断裂带开放型

断裂带开放型地热主要分布在基岩山区及沟谷地带,代表性温泉有赤城县汤泉、塘子庙温泉和涿鹿县汤应寺温泉。热储多为片麻岩、岩浆岩的断裂带及裂隙发育带,热储岩性主要为斑状花岗岩和太古界片麻岩、混合岩。断裂带或裂隙发育带既是地下热水的赋存空间,又是地下热水的导水通道,呈脉状

或带状分布,表层没有或少量第四系松散砾石层堆积。地热分布面积一般较小,地温异常范围呈条带状或点状分布,温泉水温35℃~60℃,单泉流量4.1~46 m³/h,水化学类型以SO₄-Na型为主,氟和偏硅酸含量较高,达到命名矿水浓度,具有温度较高、水量中等、水质优良的特点(表1)。

断裂带开放型地热系统由热源、热储和热流体通道组成,其形成机理为大气降水或地表水在补给区,通过各类构造裂隙和次级断裂向深大断裂汇集,并沿深大断裂向深部运移,地下水经深循环加热和水热对流,在遇到阻水断裂或岩体受阻后,沿导水通道上涌,出露于地表形成温泉(图2)。其热源主要来自火山活动及岩浆侵入活动后的残余热能和深部花岗岩体放射性元素衰变放热,地热水以井、泉形式呈单点或多点出露,条带状分布。热储结构为片麻岩、岩浆岩断裂带热储,无覆盖层,热储层直接出露。

如赤城县汤泉地热田,其构造复杂,断裂发育,热泉主要分布于沟谷北侧山腰及山脚下,出露岩性为第四系砂砾石与燕山期斑状花岗岩。尚义-平泉深断裂从热田北部通过,该深断裂由密集平行排列

表1 断裂带开放型地热赋存特征表
Table 1 Characteristics of open geothermal storage in fault zones

名称	面积(km ²)	主要控热断裂	地层岩性	温度(℃)	总流量(m ³ /h)
赤城塘子庙	0.072	尚义-平泉深大断裂	太古界混合岩	35.0~61.0	21.75
赤城汤泉	0.061	尚义-平泉深大断裂	燕山期花岗岩	37.8~60.0	60.20
汤应寺	单点	大河南-赤城深断裂	燕山期花岗岩	44.5	11.76

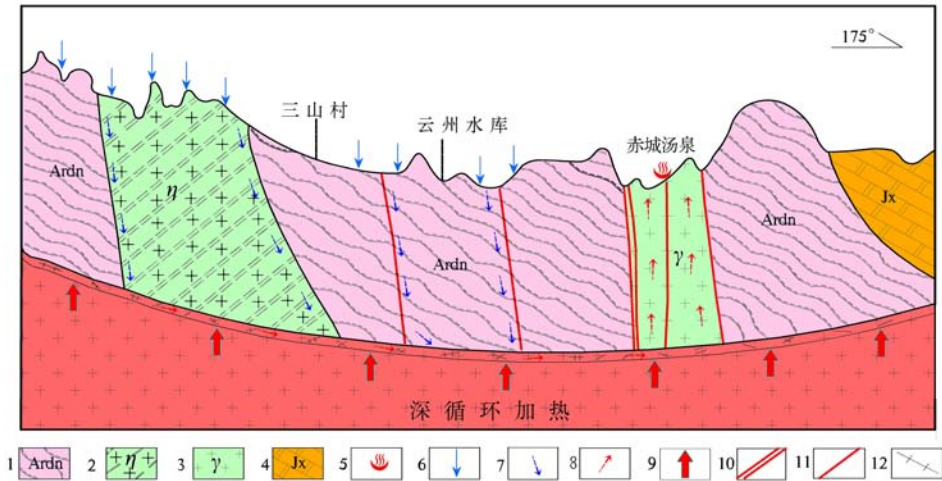


图2 断裂带开放型地热成因示意图

Fig.2 Schematic diagram of open geothermal genesis in fault zones

1. 太古界片麻岩;2. 二长花岗岩;3. 花岗岩;4. 蓟县系白云岩;5. 温泉;6. 降雨补给区;7. 冷水活动方向;
8. 热水活动方向;9. 热源;10. 尚义-平泉深断裂;11. 一般断裂;12. 破碎带

的高角度逆断层、旁侧逆掩断层、挤压破碎带组成宽 1~5 km 的断裂带,与北北东向的赤城-大河南大断裂垂直相交,形成了降水入渗的良好通道。MT 测深剖面也有明显反应,随着深度的增加,地层电阻率也迅速增大,电阻率值增至 2 000 $\Omega\cdot\text{m}$,在局部地层可达到 10 000 $\Omega\cdot\text{m}$ 以上,反映了地层从火成岩体到中太古界崇礼群岩系的电性变化(杨忠彦等,2024;范存章,2023;孟子龙,2022)。汤泉地热田内地热以泉水形式出露,受断裂控制明显,地热特征元素偏硅酸离子含量为 81.26~85.8 mg/L、氟离子含量为 7.53~9.47 mg/L,远超矿泉水命名浓度标准。

2.2 断陷盆地封闭型地热

断陷盆地封闭型地热主要分布在蔚县盆地、怀涿盆地、宣化盆地以及赤城样田断陷盆地、后城拗陷盆地等地区,代表性地热田有卜南堡地热田、麦子疃地热田、官厅水库南岸地热异常区、蔚县地热远景区等。热储层主要为元古界长城、蓟县系白云岩,分布面积较大,从 14~386 km² 不等,热储层埋深 800~1 700 m,水温 30~40℃,最高 54℃,单井涌水量 50~70 m³/h,最大 163.36 m³/h,水化学类型一般为 HCO₃-Ca·Mg 或 HCO₃·SO₄-Na 型,部分地区氟含量达到命名矿泉水浓度,偏硅酸含量达到医疗价值浓度。其中延矾盆地官厅水库南岸热储埋深 800~1 200 m,蔚县盆地热储埋深 900~1 100 m,阳原盆地热储埋深 500~1 700 m,宣化盆地热储埋深 500~1 300 m,怀涿盆地热储埋深 500~1 700 m,具有水量丰富,温度偏低、水质一般的特点(表 2)。

本类型地热系统由热源、热储、盖层和热流体通道组成。大气降水在盆地四周沿断裂带、破碎带向深部入渗,深循环过程受深部地层大地热流传导聚热,沿构造断裂带上升至元古界长城、蓟县系白云岩中形成热储层(尹政等,2023)。热源为上地幔传导热源或岩浆活动热源,深部热量以热传导为主,热对

流为辅向上传递,断裂的发育使热流重新分配聚集,凹凸相间的构造格局也有利于热流向凸起区聚集;热储分布于地质构造形成的盆地中,分布范围一般较大,呈层状产出,有一定厚度且比较稳定,热传导率高,渗透性高,裂隙率大,资源丰富;热储上部为第四系、新近系、中生界、古生界地层构成盖层,保温性能好,阻止热量向外部散逸,从而形成具有一定温度的地热资源,地温梯度在 1.5~3.0℃/100 m 之间,无明显热异常;热水沿热储层呈水平运动,地热水多以井的方式开发利用,单井涌水量大,部分地区自流,水温偏低(图 3)。热储结构可概括为第四系+中生界+古生界盖层-元古界蓟县系、长城系热储结构,第四系+新近系盖层-元古界蓟县系热储结构和中生界盖层-元古界蓟县系热储结构三种。

如蔚县卜南堡地热田,位于蔚县新生代断陷盆地,上覆新生界第四系、中生界侏罗系以及古生界寒武奥陶系地层厚度达千米,巨厚的盖层有效阻止了热量的散失,地温梯度自南向北随着盖层厚度增加由 2.5℃/100 m 增大到 3.0℃/100 m(周江,2019)。热储层为蓟县系雾迷山组白云岩、燧石条带白云岩,具有可溶性,孔、洞、缝相当发育,连通性好,是良好的储层,热储顶板埋深为 980~1 100 m,底板埋深为 1 400~1 565 m,厚度为 365~480 m,热储空隙度为 8.17%,热储平均温度为 38.0℃。地热井目前自流,流量 60 m³/h,水温 38℃,水化学类型为 HCO₃-Ca·Mg 型,pH 为 7.64,溶解性总固体为 506.7 mg/L,偏硅酸含量为 26.16 mg/L,达到矿泉水价值浓度,氟离子含量 0.61 mg/L,其水量丰富,但温度偏低、水质较好。

怀来东花园地热田,位于怀来县官厅水库南岸地热异常区,延矾盆地东部,上覆巨厚的新生界第四系、新近系地层,有效阻止了热量散失,是良好的盖层。热储为蓟县系白云岩,受断裂构造活动及其自身岩溶的特殊性质影响,裂隙发育、富水性较好。区

表 2 断陷盆地封闭型地热赋存特征表
Table 2 Characteristics of closed geothermal storage in fault basin

名称	面积(km ²)	地层组合	热储埋深(m)	热储温度(℃)	单井涌水量(m ³ /h)
怀来东花园	48.95	Q+N+Jx	800~1300	54.0	160
蔚县卜南堡	15.84	Q+J+ ϵ +O+Jx+Ch	980~1100	38.0	60(自流)
蔚县麦子疃	4.53	Q+J+ ϵ +O+Jx+Ch	1200~1700	26~41	55.8~72.5
蔚县暖泉	14.42	Q+J+ ϵ +O+Jx+Ch	1600~2700	37.5	35
赤城后城镇	128.33	J+K+Jx	1200~2500	35~45	30~50(推测)
涿鹿盆地中心	187.90	Q+N+Jx	800~1700	40~45	50~80(推测)

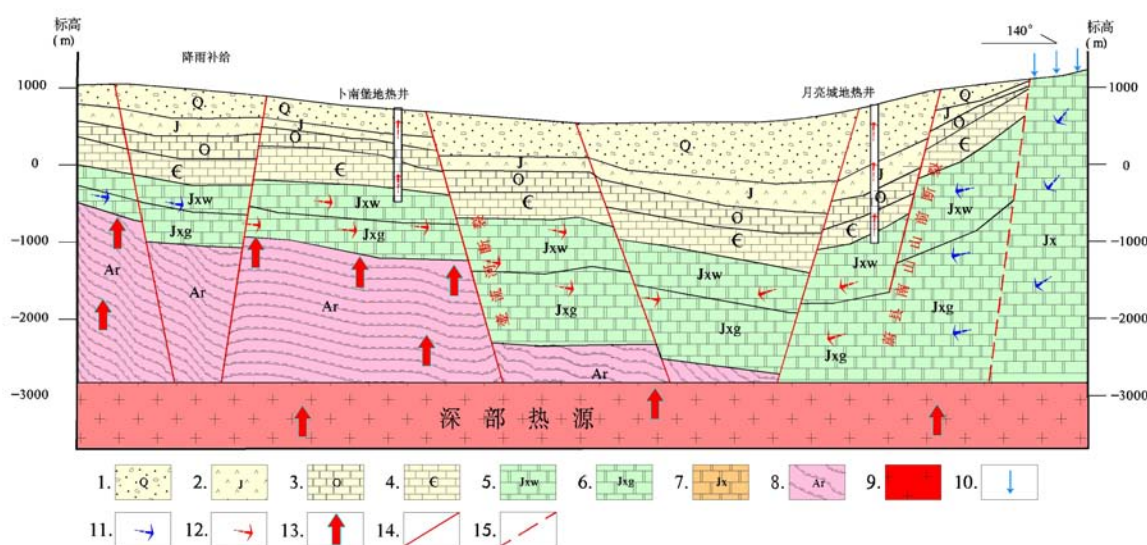


图3 断陷盆地封闭型地热成因示意图

Fig.3 Schematic diagram of closed geothermal genesis in fault basins

1.第四系;2.侏罗系;3.奥陶系;4.寒武系;5.蓟县系雾迷山组;6.蓟县系高于庄组;7.蓟县系;8.太古代;9.岩浆岩;
10.降雨补给;11.冷水活动方向;12.热水活动方向;13.深部热传导;14.断裂;15.推测断裂

内钻孔资料显示,盖层新近系地层深度1 077 m,温度从35.35℃上升至48.21℃,温度逐步上升,且快速增长。1 636 m左右揭露热储层蓟县系雾迷山组白云岩,热储层厚度458 m左右,温度53℃~57℃,趋于稳定。该钻孔成井深度3 006 m,利用深度为1 636.7~2 094 m,水温54℃。

赤城县样田断陷盆地和后城拗陷盆地,大部分地区基岩裸露,发育较厚的侏罗系、白垩系地层,岩性主要为凝灰岩、安山岩、角砾熔岩、砂岩、泥岩、页岩,地层总厚度达到1 250~4 800 m,地层热导率低,透水性较差,保温性能好,盆地内地温梯度在2.33~2.62℃/100 m之间,是良好的隔水层和隔温层,构成了良好的盖层;热储层为蓟县系白云岩,其断裂构造发育,热储层厚度和破碎带宽度较大,具有较大的储水空间。从SMT测深来看,视电阻率整体由浅至深电阻率逐步升高,元古界地层视电阻率总体表现为高阻特征。综上盆地内具备良好的盖层和储层条件以及深部热源、水源条件,具备形成断陷盆地封闭型地热资源的条件,推测热储温度35℃~45℃。

2.3 混合半封闭型

混合半封闭型热储主要分布在蔚阳盆地、怀涿盆地的边缘地带和盆地内古潜山凸起区,代表性地热田有后郝窑地热田、奚家堡地热田、三马坊地热

田、北洗冀地热田等。热储层包括蓟县系热储、太古代片麻岩热储和新生界第四系砂砾岩热储三种类型,分布面积一般不大,在2.7~37 km²之间。第四系热储直接覆盖于蓟县系白云岩或太古代片麻岩之上,厚度140~380 m,岩性为粘土、砂砾石层及粉细砂,热储温度28℃~68℃,太古代热储主要分布在后郝窑、奚家堡地热田,推测基岩热储温度超过70℃,蓟县系热储主要分布在蔚县阳原盆地边缘和古潜山地区,热储层顶板埋深140~500 m,该区地热井均为自流井,自流量为20~70 m³/h,水温27.8℃~40.6℃。水化学类型一般为SO₄-Na、HCO₃·SO₄-Ca·Mg或Cl·SO₄·HCO₃-Na型,氟含量基本达到命名矿水浓度,偏硅酸含量基本达到矿水浓度。具有温度中等、水量较大、水质较好的特点,部分为优质温泉(表3)。

本类型地热系统由热源、热储和热流体通道组成。大气降水沿断裂带、破碎带向深部入渗,在深循环过程中,接受深部地层大地热流传导聚热,再经导热断裂破碎带或岩体接触带径流赋存在断裂带及基岩裂隙发育带中形成基岩热储,部分热水上涌与浅部含水层连通,与冷水混合热量交换,形成浅部孔隙型热储。热源来自上幔或深部岩浆活动的加热,深部热量以热对流为主,热传导为辅向上传递,导热断裂或岩体接触带使地下水形成对流效应聚热,同时

表3 混合型半封闭型地热赋存特征表
Table 3 Characteristics of mixed semi enclosed geothermal

名称	面积(km ²)	地层组合	基岩热储埋深(m)	热储温度(℃)	单井涌水量(m ³ /h)
怀来后郝窑	5.67	Q+N+Ar	200~220	35~78	30~54
怀来奚家堡	8.47	Q+Ar	120~200	32~53	30~40
阳原三马坊	2.73	Q+Jx	150~330	32~40	20~82(自流)
阳原金家庄	2.69	Q+N+Ar	150~450	31~52	60~80
蔚县北洗冀	37.62	Q+J+ε+Jx	130~510	27~35	3.6~40(自流)
蔚县织锦幢	27.59	Q+Jx	500~600	40	40~50

在古潜山基岩凸起区,高热导率地层也产生热量聚集效应形成地热异常;基岩热储上部被一定厚度的第四系和新近系地层覆盖,构成基岩热储的盖层,对基岩热储起到积热和保温作用,同时地下水在强大的承压作用力下,又通过断裂、裂隙上升同第四系砂砾石层中冷水混合升温后形成第四系热储,地温梯度最高可达5.0℃/100 m以上。由于新生界盖层厚度较小,其保温隔热作用有限,两个热储层水力沟通比较密切,彼此之间循环较为强烈,因此称为混合半封闭型地热(图4)。太古界基岩热储为片麻岩断裂带及裂隙发育带,既是地下热水的赋存空间,又是地下热水的导水通道,呈脉状或带状分布,水温较高,蔚县系热储为白云岩古潜山隆起区,基岩破碎构造发育,热导率高,渗透性强,热水多沿裂隙呈垂直运动,大部分地区自流,单井涌水量大,水温偏低。热储结构可概括为第四系孔隙热储-中生界+古生界碎屑岩隔水层-元古界蔚县系热储结构、第四系孔隙热储-元古界蔚县系热储结构和第四系+新近系孔隙热储-太古界片麻岩热储结构三种。

如阳原三马坊地热田上部为第四系粘土、粉质

粘土、含砂、砾石粘土为主,透水性差,可看做上部盖层,第四系底部为卵砾石层,富水性强,构成上部热储层。其下部为蔚县系白云岩古潜山隆起,顶板埋深在150~330 m之间,基岩破碎构造发育,形成基岩热储,这两个热储层之间直接沟通。地热田受松枝口-马市口大断裂和阳原南山断裂控制,区内断裂构造沟通了深部的热源,为深部地下热水的运移提供了良好的导热通道。区内钻孔揭露热储层厚度92~114 m,水温32~40℃,自流量20~82 m³/h,水化学类型为Cl·SO₄·HCO₃-Na型水,矿化度1.12~1.34 g/L,氟离子含量1.34~1.63 mg/L,偏硅酸含量为30.9~32.7 mg/L,达到矿水浓度。

后郝窑地热田分为浅部孔隙型热储和深部裂隙型热储。浅部孔隙型热储分为上下两层,上层为第四系热储,主要由河湖相冲洪积中细砂、粗砂、砂砾石、粘砂等松散冲洪积物组成,总厚度60~100 m。下层为新近系热储,由河湖相粗砂砾石及角砾岩组成,胶结疏松,厚度多在40~80 m,赋水条件好。两层热储之间没有明显的隔水层,水力性关系密切,可统一视为松散孔隙型热储。其水温35℃~78℃,单井流

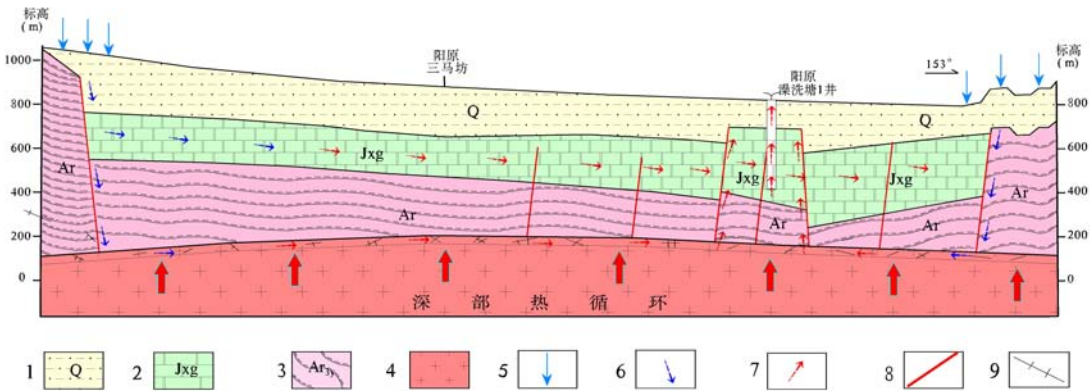


图4 混合半封闭型地热成因示意图

Fig.4 Schematic diagram of mixed semi enclosed geothermal genesis

1. 第四系;2. 蔚县系高于庄组;3. 太古界;4. 岩浆岩;5. 降雨补给区;6. 冷水活动方向;7. 热水活动方向;8. 断裂;9. 破碎带

量 30 ~ 54 m³/h, 水化学类型为 SO₄-Na 和 SO₄·HCO₃-Na 型水, 矿化度 0.96 ~ 1.24 g/L, 氟离子含量 9.04 ~ 19.80 mg/L, 偏硅酸含量为 56.30 ~ 116 mg/L, 达到命名矿水浓度。深部热储岩性主要是太古界片麻岩, 由多组不同方向的断裂相互交汇、错断, 在热田范围形成大面积的构造破碎带, CMT 剖面显示在 220 m 以下到 3 000 m 的深度范围内都可以找到低阻带, 且低阻带基本相连, 反映出热田深部基岩中断裂带比较破碎, 基岩裂隙发育, 并且相互连通, 深部热水具备赋存和上涌的条件, 勘探孔 ZK-50, 井深 296.24 m, 基岩埋深 161.93 m, 基岩热储厚度 134.31 m, 热储温度 83.5℃, 单位涌水量 6.3 m³/d.m, 渗透系数 0.49 m/d, 预计深部热储最高可达 100℃ 以上。

3 地热水水质特征

地热水的化学成分是地下水与环境长期相互作用的产物, 水质主要取决于地下水补给源、循环深度、封闭条件及赋存地层岩性(崔娅杰等, 2023)。

3.1 地热水化学类型

地热水化学类型表现为地下水中主要离子含量及溶解性总固体的不同, 张家口市地热水总体上可分为低 TDS 以重碳酸、硫酸根离子和钠、镁为主的地下水, TDS 较大以硫酸根离子和钠为主的地下水以及 TDS 变化范围大以氯离子、硫酸根离子、重碳酸根离子和钠、钙、镁为主的多种类型地下水(表 4)。

断陷盆地封闭型地热水主要为第一类, TDS 为 443.2 ~ 506.7 mg/L, HCO₃-Ca·Mg 或 HCO₃·SO₄-Na 型地下水。其中蔚县卜南堡地热井及麦子疃地热井 TDS 分别为 506.7 mg/L、443.2 mg/L, 水化学类型均为 HCO₃-Ca·Mg 型; 宣化顾家营地热田 TDS 为 491.3

mg/L, 水化学类型为 HCO₃·SO₄-Na 型。断裂带开放型地热水为第二类, TDS 为 619.8 ~ 884.4 mg/L, SO₄-Na 型地下水。其中 TDS 最大为赤城汤泉 884.4 mg/L、最低为宣化白庙地热井 619.8 mg/L; 宣化白庙地热田、赤城汤泉地热田及塘子庙地热田水化学类型均为 SO₄-Na 型。混合半封闭型地热水为第三类, TDS 为 426.40 ~ 1 121.90 mg/L, 包括 SO₄-Na、SO₄·HCO₃-Na、HCO₃-Na·Ca、HCO₃·SO₄-Ca·Mg 及 Cl·SO₄·HCO₃-Na 型地下水。其中怀来后郝窑地热井 TDS 为 993.44 mg/L, 水化学类型为 SO₄-Na 型; 蔚县北洗冀地热井 TDS 为 554.2 mg/L, 水化学类型为 HCO₃·SO₄-Ca·Mg 型; 阳原三马坊地热井 TDS 为 1 135 mg/L, 水化学类型为 Cl·SO₄·HCO₃-Na 型。地热水化学类型的不同反映了断裂开放型和混合半封闭型地热水相对断陷盆地封闭型地热水在深循环中与围岩发生溶解、交换、沉淀等作用强, 使得水中富含 Na⁺、SO₄²⁻等, 而 Ca²⁺、Mg²⁺ 离子含量减少(齐志龙等 2023; 王冰等 2023); 同时混合半封闭型地热水受上部潜水混合比例及水质的影响主要离子含量变化较大, 造成水化学类型多样性。

3.2 地热特征元素含量

张家口市地热水在不同的循环深度、温度、压力及含水层等水文地质条件影响下, 运移过程中氟和偏硅酸等微量元素含量产生明显的差别(张良, 2022), 个别地热井中锂及偏硼酸的含量也呈现偏高现象(表 5)。

断裂开放型地热水氟和偏硅酸等微量元素含量最高, 均达到命名矿水浓度, 如赤城塘子庙温泉氟含量 18.10 mg/L、偏硅酸含量 91 mg/L, 汤泉氟含量 9.47 mg/L、偏硅酸含量 85.8 mg/L; 断陷盆地封闭型

表 4 不同热储类型地热水化学特征表

Table 4 Chemical characteristics of geothermal water with different types of thermal storage

热储类型	地热田	TDS (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Ca ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	水化学类型
断陷盆地封闭型	蔚县卜南堡地热井	506.7	33.84	54.55	27.87	277.4	67.40	HCO ₃ -Ca·Mg
	蔚县麦子疃地热井	443.2	246.00	7.00	4.88	468.9	122.4	HCO ₃ -Ca·Mg
	宣化顾家营地热田	491.3	112.5	35.1	17.9	262.6	108.1	HCO ₃ ·SO ₄ -Na
断裂带开放型	宣化白庙地热田	619.8	182.3	12.7	1.6	110.7	248.6	SO ₄ -Na
	赤城汤泉地热田	884.4	210	32.7	0.74	96	373	SO ₄ -Na
	塘子庙地热田	732 ~ 813	230.56	14.42	0.03	40.12	313.7	SO ₄ -Na
混合半封闭型	怀来后郝窑地热井	993.44	243.3	28.9	4.9	72.5	356	SO ₄ -Na
	蔚县北洗冀地热井	554.2	39.31	69.30	24.55	264.4	93.64	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca·Mg
	阳原三马坊地热井	1135	326.80	59.00	14.3	279.8	339.8	Cl·SO ₄ ·HCO ₃ -Na

表5 不同热储类型地热水特征元素表
Table 5 Table of geothermal water characteristic elements for different types of thermal reservoirs

热储类型	地热田	氟 (mg/L)	偏硅酸 (mg/L)	偏硼酸 (mg/L)
断陷盆地 封闭型	宣化顾家营地热井	3.79	23.3	-
	蔚县麦子疃地热井	5.33	29.70	11.64
	蔚县卜南堡地热井	0.61	26.16	-
断裂带	塘子庙温泉	18.10	91	-
开放型	赤城汤泉	9.47	85.8	-
混合半	阳原三马坊地热井	1.53	31.53	3.855
封闭型	怀来后郝窑地热井	12.22	80.04	-

地热水氟和偏硅酸等微量元素含量较低,个别达到命名矿水浓度,如蔚县卜南堡地热井氟含量为0.61 mg/L、偏硅酸含量26.16 mg/L,麦子疃地热井氟含量5.33 mg/L、偏硅酸含量29.70 mg/L,宣化顾家营地热井氟含量3.79 mg/L、偏硅酸含量23.3 mg/L等;混合半封闭型地热水氟和偏硅酸等微量元素含量较高,个别达到命名矿水浓度,如蔚县三马坊地热井氟含量1.53 mg/L、偏硅酸含量31.53 mg/L,北洗冀地热井氟含量0.97 mg/L、偏硅酸含量23.81 mg/L,怀来后郝窑地热井氟含量12.22 mg/L、偏硅酸含量80.04 mg/L。另外阳原县三马坊地热井和蔚县织锦疃地热井偏硼酸含量达医疗价值浓度,蔚县麦子疃地热井偏硼酸含量达命名矿水浓度,阳原县金家庄地热井锂含量达到命名矿水浓度。

3.3 地热水年龄

地下水的年龄主要指水在含水层中停留的时间,在一定程度上反映了地下水的更新能力和长期补给能力(路畅,2019;张卓等,2023)。张家口地热水年龄受循环深度、埋藏深度以及补给来源不同,地热水年龄呈现一定的差异。

分析对比15眼地热温泉(井)同位素检测结果,其中赤城地热田地热温泉2眼、塘子庙地热田地热井2眼、宣化地热井4眼、蔚县地热井6眼、地热温泉1眼。经对比分析发现:断裂带开放型赤城汤泉地热水,稳定同位素组 $\delta D-\delta^{18}O$ 落在降水线的右侧, $\delta^{18}O$ 表现出正向漂移,说明地下热水来源为古降水;断陷盆地封闭型卜南堡地热井和混合半封闭型怀来后郝窑地热水,数据点位于大气降水线附近,说明地热水补给直接或间接来源于现代降水的就近入渗补给(岳冬冬等,2023)(图5)。另外,依据 ^{14}C 计算地热水年

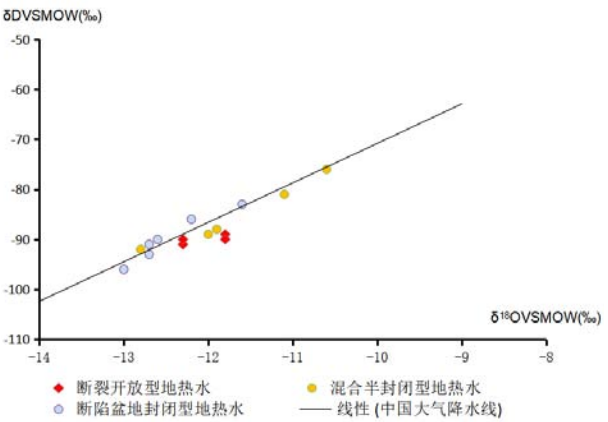


图5 各类型地热水 $\delta D-\delta^{18}O$ 同位素分布图
Fig.5 Various types of geothermal water $\delta D-\delta^{18}O$ isotope distribution

龄发现位于断裂带开放型和断陷盆地封闭型中地热水表观年龄远大于混合半封闭型地热水,其中赤城汤泉总泉表观年龄为 22.78 ± 0.67 ka,眼泉表观年龄为 18.78 ± 0.48 ka,卜南堡地热水表观年龄为 39.27 ± 3.24 ka,后郝窑地热水表观年龄为6.15~24.40 ka,反映了汤泉、眼泉及卜南堡地热水更新更慢。断裂带开放型地热水多为深循环、循环途径长和断陷盆地封闭型地热水埋深大、循环时间长的特征一致,也证明了混合半封闭型地热水中存在年龄较小的浅层地下水混合。

4 结论

根据地热资源分布、热储埋藏条件和赋存特征,张家口市地热资源可分为断裂带开放型、断陷盆地封闭型和混合半封闭型三种类型:

(1)断裂带开放型:主要分布在基岩山区,分布面积一般较小,地温异常范围呈条带状或点状分布,热储温度较高 $35^{\circ}C\sim60^{\circ}C$,水量中等,水质较好,水化学类型以 SO_4-Na 型为主,氟和偏硅酸含量较高,达到命名矿水浓度,为优质珍稀温泉。

(2)断陷盆地封闭型:主要分布在蔚县盆地、怀涿盆地等断陷盆地内,分布面积较大,热储层埋深较大在800~1700 m,温度偏低在 $30\sim40^{\circ}C$,水量丰富,部分地区自流,水质一般,水化学类型一般为 $HCO_3-Ca\cdot Mg$ 或 $HCO_3\cdot SO_4-Na$ 型,部分地区氟和偏硅酸含量达到命名矿水浓度,以优质温泉为主。

(3)混合半封闭型:主要分布在盆地的边缘地带

和古潜山凸起区,分布面积一般不大,温度在28~68℃,大部分自流,水量丰富,水质较好,部分为优质温泉,水化学类型一般为 $\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 或 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型,氟含量基本达到命名矿水浓度,偏硅酸含量基本达到矿水浓度,以优质温泉为主。

依据典型地热区地热温泉(井)空间赋存特征,在张家口三种地热资源类型的基础上将地热资源赋存空间划分为七种热储结构:

(1)断裂带开放型地热系统由热源、热储和热流体通道组成,热储结构可概括为片麻岩、岩浆岩断裂带热储,无覆盖层,热储层直接出露的一种热储结构类型。

(2)断陷盆地封闭型地热系统由热源、热储、盖层和热流体通道组成,热储层主要为元古界长城、蓟县系白云岩。热储结构可概括为第四系+中生界+古生界盖层-元古界蓟县系、长城系热储结构,第四系+新近系盖层-元古界蓟县系热储和中生界盖层-元古界蓟县系热储结构三种。

(3)混合半封闭型地热系统由热源、热储和热流体通道组成,热储层包括蓟县系白云岩热储、太古界片麻岩热储和新生界砂砾岩热储三种。热储结构可概括为第四系孔隙热储-中生界+古生界碎屑岩隔水层-元古界蓟县系热储结构,第四系孔隙热储-元古界蓟县系热储结构和第四系+新近系孔隙热储-太古界片麻岩热储结构三种。

中文参考文献

- 崔娅杰,王来宾,张银妹,等.2023.丰宁县喇嘛山泉水地热地质条件及成因研究[J].地下水,45(3):29-36.
- 范存章.2023.大地电磁测深法在地热勘探开发中的应用[J].价值工程,02:107-109.
- 河北省地质矿产局.1989.河北省北京市天津市区域地质志[M].北京:地质出版社.
- 河北省地矿局国土资源勘查中心.2015.张家口市地热资源分布规律与开发利用研究报告[R].
- 河北省区域地质矿产调查研究所.2017.中国区域地质志(河北志)[M].北京:地质出版社.
- 河北省地矿局第三水文工程地质大队.2023.张家口市地热温泉资源详细调查评价报告[R].
- 国土资源部储量司,中国矿业联合会地热开发管理专业委员会;北

- 京市地质工程勘察院.2010.地热资源地质勘查规范(GB/T 11615-2010).
- 李杨,黄树梅,林海苓.2018.张家口市地热资源与地震分布规律研究分析[J].西部资源,05:100-101.
- 刘伟朋,贾小丰,张子纯,等.2023.环首都山区温泉发育特征与开发利用前景[J].中国地质,DOI: 10.12029/gc20230708001
- 刘伟,李东亮,王学鹏,等.2023.埕宁隆起区高水温地热资源影响因素研究[J].华北地质,46(3): 67-75
- 刘江涛,李郡.2018.山区地热资源勘查分析-以大段地-碾儿沟为例[J].河北工业大学学报,05:116-120.
- 路畅.2019.首都圈地区流体地球化学特征及其成因[D].中国地震局地震预测研究所.
- 李泓泉,张树胜,谢明忠,等.2020.张家口地区的构造体系及其对地下热水的控制作用[J].中国煤炭地质,05:74-82.
- 孟子龙.2022.CSAMT在三马坊地热勘查中的应用[J].内蒙古煤炭经济,14:190-192.
- 齐志龙,陆建国,喜英,等.2023.温泉县北圣泉一带地热流体化学特征分析西部探矿工程[J].西部探矿工程,7:164-167.
- 孙晓林,杨宝美,王震凯.2023.天津地区奥陶系热储层上覆地层对其储层特征影响分析[J].华北地质,46(2): 31-37.
- 唐永香,林建旺,李嫒嫒,等.2024.天津滨海地热田北部深部地热资源赋存规律[J].华北地质,47(1): 77-84.
- 王贵玲,刘彦广,朱喜,等.2020.中国地热资源现状及发展趋势[J].地学前缘,27(1): 1-9.
- 王冰,宗振海,夏雨波,等.2023.天津地区地热流体主要离子组分特征及地热成因分析[J].华北地质,46(2):9-16.
- 王国晨.2019.张家口地热资源开发利用模式研究[J].地球,02:91.
- 易大宝,谷文杰,袁娇龙,等.2020.冀西北万全盆地砂岩型铀矿找矿前景分析[J].河北地质.
- 岳冬冬,贾小丰,张秋霞,等.2023.天津山岭子地热田蓟县系雾迷山组热储流体同位素特征及其指示意义[J].华北地质,46(2): 45-50
- 尹政,柳永刚,张旭儒,等.2023.张掖盆地地热资源赋存特征及成因分析[J].华北地质,50(1):168-178.
- 杨忠彦,朱怀亮,李向宝,等.2024.冀北崇礼-赤城地区逆冲推覆构造特征及地热勘探前景[J].华北地质,47(1): 85-93
- 闫坪卉.2023.我国地热产业持续高质量发展[N].中国石化报.
- 周江.2019.蔚县盆地地热成因分析[J].煤炭科技,05:6-10.
- 甄世民,王大钊,白海军,等.2021.华北克拉通北缘张家口-宣化地区古生代-中生代岩浆构造活动与成矿作用[J].岩石学报,06: 1619-1652.
- 中国地质科学院.2021.张家口地区地热资源调查评价成果报告[R].
- 张良.2022.雄安新区中深层热储水文地球化学特征及成因模式分析[D].东华理工大学.
- 张卓,柳富田,陈社明.2023.氢氧、锶钙和锂硼同位素在高氟地下水研究中的应用.[J]华北地质,46(3): 49-56.