

DOI: 10.12401/j.nwg.2023050

威海市七里汤地热田特征及其成因机制

袁星芳¹, 邢立亭^{2,*}, 贾群龙², 韩忠¹, 李方舟¹

(1. 山东省第六地质矿产勘查院, 山东 威海 264209; 2. 济南大学, 山东省地下水数值模拟与污染控制工程技术研究中心, 山东 济南 250022)

摘要: 为保护威海市七里汤地热温泉, 笔者通过地热地质调查、地球物理勘查、地球化学勘查等方法探讨了七里汤地热田的水源、热源、地温场、聚热模式、水热运移通道等要素, 建立了地热田成因概念模型, 揭示了其成因机制。结果表明: ①地热水水化学类型以 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型水为主, 水质动态较为稳定。②热水主要补给来源是大气降水, 大气降水入渗后沿着横口-杨格庄深大断裂深循环到地下约为 2276 m, 水温加热至 114.39℃ 左右, 在断裂交汇处再沿着破碎带上涌溢出地表成泉。③入渗地下水沿着断裂构造带往深部运移过程中不断吸取围岩中的热量, 地热田温泉成因类型为深循环-对流型。④七里汤等胶东温泉地热田均受断裂控制, 地热异常区的面积不大, 地热田规模小, 虽然胶东温泉地热具有良好的开发市场前景, 但必须控制开采, 以免过量开采造成资源枯竭、热水温度下降。研究成果对威海地区地热资源开发利用有一定指导意义。

关键词: 对流型; 成因机制; 地热温泉; 断裂; 七里汤

中图分类号: P641.11; P314.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)06-0209-10

Characteristics and Genetic Mechanism of Qilitang Geothermal Field in Weihai

YUAN Xingfang¹, XING Liting^{2,*}, JIA Qunlong², HAN Zhong¹, LI Fangzhou¹

(1. NO.6 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Weihai 264209, Shandong, China; 2. Shandong Engineering Research Center of Groundwater Numerical Simulation and Pollution Control, Jinan University, Jinan 250022, Shandong, China)

Abstract: In order to protect the Qilitang geothermal hot spring in Weihai City, this paper discusses the elements of the Qilitang geothermal field, such as water source, heat source, geothermal field, heat accumulation model, and water and heat migration channel, through the methods of geothermal geological survey, geophysical exploration and geochemical exploration, and establishes the genetic conceptual model of the geothermal field and reveals its genetic mechanism. The research shows that: ① The chemical types of geothermal water are mainly $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ and $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ type water, and the water quality dynamics are relatively stable. ② The main source of hot water recharge is meteoric water, which circulates to about 2276 m underground along the Hengkou-Yanggezhuang deep fracture and is heated to about 114.39 °C. At the intersection of the

收稿日期: 2022-02-09; 修回日期: 2022-10-08; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 国家自然科学基金项目“多级次地下水流系统对北方岩溶大泉动态的影响机制”(42272288), 威海市地质勘查项目“威海市七里汤、大英汤地热田资源可行性勘查”(SDGP371000201901000140-A)联合资助。

作者简介: 袁星芳(1990-), 女, 高级工程师, 主要从事水工环地质工作。E-mail: lywhyxf@163.com。

* 通讯作者: 邢立亭(1966-), 男, 教授, 主要从事水文地质教学与研究工作。E-mail: stu_jnedu@126.com。

faults, springs emerge along the fracture zone. ③ The infiltrated groundwater continuously absorbs heat from surrounding rocks during its deep migration along the fault tectonic belt. The genetic type of hot spring in geothermal field is deep circulation-convection type. ④ Jiaodong hot spring geothermal fields such as Qilitang are controlled by faults. The area of geothermal anomaly is small and the scale of geothermal field is small. Although Jiaodong hot spring geothermal has good market prospects for development, exploitation must be controlled to avoid resource exhaustion and temperature drop of hot water caused by excessive exploitation. The research results have certain guiding significance for the development and utilization of geothermal resources in Weihai area.

Keywords: convective type; genetic mechanism; geothermal hot spring; fault; Qilitang

地热资源作为一种可再生的清洁能源,以储量大、分布广、开发利用简便的优点成为具有竞争力的新能源(周国富等, 2014; 杨学明等, 2020; 陈海雯等, 2023)。开发利用地热资源,对于地方新旧动能转换、缓减空气污染、促进经济社会发展等方面具有重要作用(王贵玲等, 2017; 黄建军等, 2021)。在“双碳”目标提出后,地热资源作为五大非碳基能源之一,成为建设绿色油气田的重要增量选项(敬民, 2021; 杨合群等, 2022)。

胶东半岛地下热源蓄量丰富,有广阔的发展前景,许多学者从地热田的特征和成因机制、地热资源的勘查和开发利用等方面对其进行研究。金秉福等(1999)分析胶东半岛地热资源的特征,认为胶东半岛地热系统均为中低温深循环对流型地热系统,其主要热源为深大断裂的对流热,多数温泉出露在多组断裂的交汇部位,热水化学成分差异很大。崔煜烽等(2018)在结合鲁东地区地热勘查的基础上,对比不同方法的勘查效果,提出地热勘查定井宜选位置 and 不同深度地层勘查适宜方法。王秀芹等(2015)对胶东半岛各地热田的资源量进行了计算,并提出了针对性开发建议和保护对策。史猛等(2021)针对胶东半岛各地热田的地温场特征及影响因素,提出了胶东半岛隆起-凹陷分流聚热模式。钟振楠等(2021)通过分析岩层热导率、生热率及地温分布特征,计算招远地热田的地热通量并估算热储温度及热循环深度,以此建立招远地热田成因概念模型。王昕昀(2018)对胶东半岛部分温泉的成因模式进行了分析,认为大气降水入渗经深循环加热后上升,上升过程中混入部分地下水,最后在断裂交汇部位出露成泉。前人对于胶东地热温泉的研究大多侧重于定性分析与推断,地热田的成因机制定量研究相对不足。此外,虽然威海市内地热资源丰富,但其开发利用程度较低。因此,笔者在七里汤地

热田地质背景分析的基础上,通过水化学特征分析与研究,基本查明了地热田形成的水源、热源、热储、盖层和地热流体通道,构建了七里汤地热田的概念模型,对促进威海地区地热资源开发与综合利用具有积极的指导意义。

1 研究区概况

七里汤地热田位于秦岭-大别-苏鲁造山带威海隆起区,具备形成地热田的地质背景。胶东半岛地区出露地层有中太古界、新太古界、古元古界、新元古界震旦系和中生界白垩系及新生界古近系、新近系、第四系等。而七里汤地热田附近岩浆岩未出露,发育于新生代第四纪地层之下,顶板为淤泥质黏土、粉质黏土和风化的花岗岩,底板为块状构造花岗岩。地热水主要赋存于地热田内破碎结构、裂隙较发育的构造裂隙破碎带内。地热田内主要有两条断裂:北东向东母猪河断裂,呈压扭性;与之相交的为近东西向的抱龙河断裂,呈张扭性(图1)。

七里汤已有上千年历史,始建于齐,“二泉并发,一热一凉,味皆甘洁”,元代易名为“如意泉”。早期泉眼到处喷涌,每天涌水量为 $1\ 065.6\ \text{m}^3$,正常水温为 $65.8\ ^\circ\text{C}$,最高达 $80\ ^\circ\text{C}$,富含多种对人体有益的元素。解放前,主要用于洗衣、洗菜和洗澡。新中国成立后,早在1955年七里汤建设的丝绸厂、染织厂产品远销欧美等地;1958年利用温泉水种植蔬菜成功;1985年利用温泉水养殖罗非鱼苗成功。改革开放以来,七里汤大规模开发利用,规划区面积为 $0.092\ \text{km}^2$,热储埋藏浅,便于开发利用,地热水温度为 $62.5\ ^\circ\text{C}$,允许开采量为 $15.44\ \text{万}\ \text{m}^3/\text{a}$ 。七里汤地热田采矿权有效期内企业开采量为 $3.5\ \text{万}\ \text{m}^3/\text{a}$;七里汤虽然现在有证开采量较小,但水位下降趋势明显,总开采量不可超过

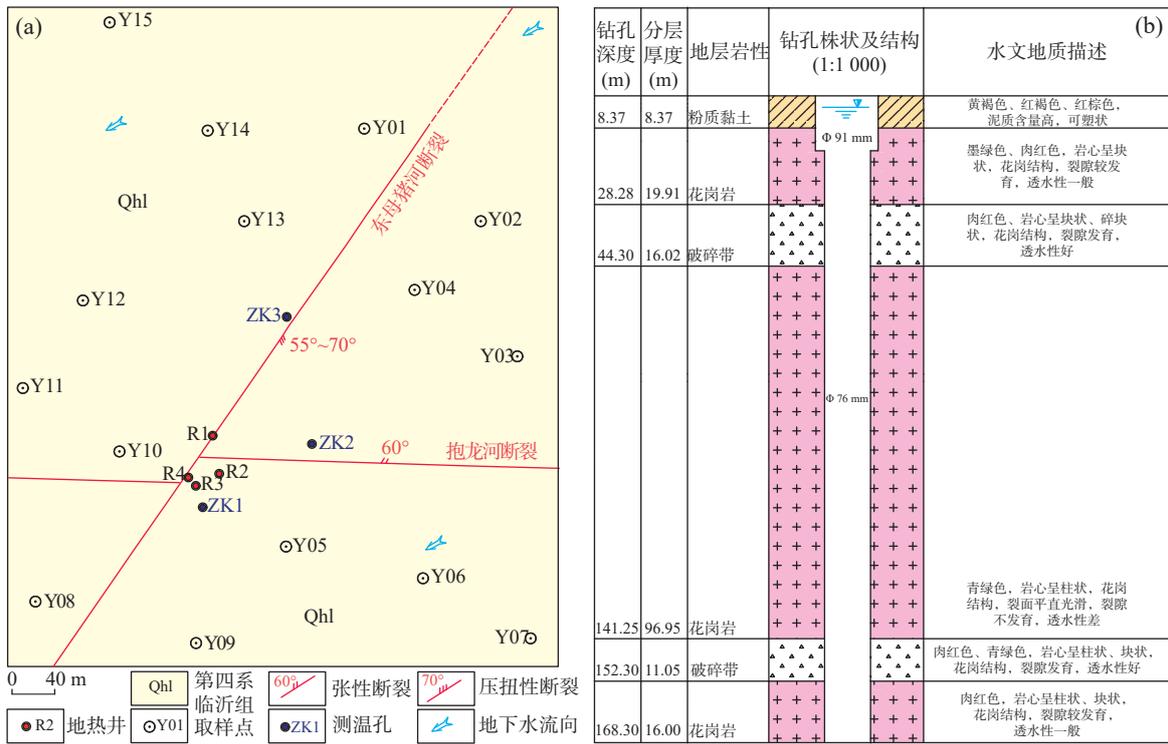


图 1 七里汤采样点分布图(a)及典型钻孔地层结构图(b)

Fig. 1 (a) Qilitang sampling point distribution and (b) typical borehole formation structure

15.44 万 m³/a。

2 研究方法

2.1 水样采集及孔内测温

依照《生活饮用水标准检验法》(GB5750—2023)采集地下水水样, 其中 Y01~Y15 水样进行水质全分析测试, ZK1~ZK3 孔内水样进行水质全分析以及同位素分析测试(图 1), 现场测试 pH 值、水温。样品采集后 72 小时之内进行处理和测试, 测试过程严格按照有关规程、规范进行, 保证测试质量。同位素样品密封后 72 小时之内送至中国地质科学院水文地质环境地质研究所检测, 保证测试质量。使用 SH-610S 深井测温仪对 ZK1、ZK2、ZK3 进行孔内测温, 每隔 5 m 测一次温度。

2.2 基础温度计算方法

热储温度一般采用阳离子温标法和 SiO₂ 温标法来估算。SiO₂ 温标法的原理是 SiO₂ 矿物质在热水中的溶解-沉淀平衡理论: SiO₂ 溶解度随温度升高而增加, 根据对 ZK1、ZK2、ZK3 孔内水样的水质分析结果分析选取公式。

$$T = \frac{1032}{4.69 - \log \text{SiO}_2} - 273.15 \quad (1)$$

式中: SiO₂ 为 SiO₂ 浓度, 单位 mg/L; T 为热储温度, 单位 °C。

2.3 遥感解译

选用搭载于美国陆地资源卫星的 Landsat 8 OL, 根据不同光谱波段的特性, 利用热红外波段, 开展七里汤地热田地热信息分析及信息提取工作。遥感解译范围北起九里水头村南至文登碧桂园, 西起马家沟后村东至苏家河村, 采用辐射传输方程法进行地表温度反演, 利用 ENVI 软件经过定标、参数波段运算、裁剪后得出七里汤地热田地表温度反演结果。对反演结果进行密度分割并将温度划分区间, 得出最终的地表温度反演图。

3 水化学特征与地温场特征

3.1 水化学特征及动态

3.1.1 水化学特征

根据检测数据得知, 常温地下水中主要阳离子含量情况相近, 最高的为 Ca²⁺, 一般接近 100 mg/L 左右; 其次为 Na⁺+K⁺, 一般为 40~100 mg/L; 含量最低的为

Mg²⁺, 普遍低于 50 mg/L。常温地下水中主要阴离子含量情况差异较大, Cl⁻含量为 23.87~413.57 mg/L; SO₄²⁻含量为 27.21~300.54 mg/L; HCO₃⁻含量为 31.05~298.05 mg/L; NO₃⁻含量为 19.48~479.43 mg/L。

地热水主要阳离子中 Na⁺+K⁺浓度最高, 在 200 mg/L 左右, 显著高于常温地下水中 Na⁺+K⁺含量; 其次为 Ca²⁺, 含量低于 100 mg/L, 与常温地下水接近; 最低的为 Mg²⁺, 离子浓度多低于 30 mg/L, 含量低于常温地下水中 Mg²⁺含量。地热水主要阴离子中 HCO₃⁻浓度最高, 含量为 218.6~502.9 mg/L, 显著高于常温地下水中 HCO₃⁻含量; 其次为 SO₄²⁻, 含量为 122.3~170.6 mg/L; Cl⁻含量为 47.16~96.77 mg/L; 含量最低的为 NO₃⁻, 仅个别检出, 普遍低于常温地下水的含量(图 2)。地热水中溶解性固体总量相对较低, 水化学类型较常温地下水相比较为稳定(表 1)。地热水中部分离子含量基本与常温地下水相近, 这说明地热水与周围常温地下水存在一定的联系。

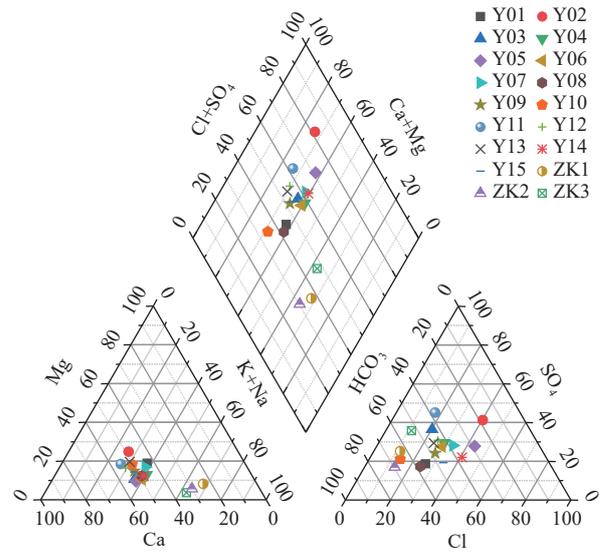


图 2 七里汤地热水样点水化学 Piper 图

Fig. 2 Water chemical Piper diagram of water sample in Qilitang hot field

表 1 七里汤田水化学类型表

Tab. 1 Chemical types of Qilitang water

采样编号	水化学类型	采样编号	水化学类型	采样编号	水化学类型
Y01	HCO ₃ -Cl-Ca·Mg·Na	Y02	Cl-SO ₄ -Ca·Mg	Y03	SO ₄ -HCO ₃ -Ca·Na
Y04	Cl-HCO ₃ -Ca·Na	Y05	NO ₃ -Cl-Ca·Na	Y06	NO ₃ -Ca·Na
Y07	Cl-HCO ₃ -Ca·Na·Mg	Y08	HCO ₃ -Cl-Ca·Na	Y09	NO ₃ -Ca·Na
Y10	HCO ₃ -Ca·Mg	Y11	SO ₄ -Ca·Mg	Y12	SO ₄ -Ca·Mg
Y13	NO ₃ -HCO ₃ -Ca·Mg	Y14	Cl-Ca·Na	Y15	Cl-HCO ₃ -Ca·Na
ZK1	HCO ₃ -SO ₄ -Na·Ca	ZK2	HCO ₃ -Na·Ca	ZK3	SO ₄ -HCO ₃ -Ca·Na

对比胶东其他温泉的水化学类型发现, 七里汤地热水中主要阳离子含量与胶东地区温泉水含量接近, 但主要阴离子含量却有所不同, 七里汤地热水中以 HCO₃⁻和 SO₄²⁻为主, 而胶东地区温泉水以 Cl⁻为主。胶东地区温泉水水化学类型主要以 Cl-Na、Cl-Na·Ca、HCO₃-SO₄-Na、SO₄-HCO₃-Na 型水为主(史猛等, 2019a), 而七里汤地热水水化学类型以 SO₄-HCO₃-Ca·Na 和 HCO₃-Na·Ca 型水为主, 说明地热水在上升过程中混入浅层地下水, 导致水化学类型与周围常温地下水相似。

除主要阴阳离子外, 地热水中明显高于常温地下水的还有: 氟化物、偏硅酸等微量元素, 且氟化物和偏硅酸含量均较高, 其中, 氟化物含量为 3.24~12.20 mg/L, 是生活饮用水水质标准的 3.24~12.20 倍, 是常温地下水平均含量的 5~24 倍; 偏硅酸含量为 41.38~

130.9 mg/L, 是常温地下水平均含量的 1.3~4 倍。

地热水中的微量元素 F 含量偏高, 是因为地热水在深循环径流过程中溶解了围岩中的含氟矿物质。偏硅酸含量偏高是因为区内花岗岩在深循环径流过程中发生了水-岩相互作用, 而且温度越高, 硅酸盐的溶解度越大。此外, 地热水中还含有 Rn、Ra 等放射性元素, 这既是地下水深循环的特征, 也是构造活动的标志。

3.1.2 水化学动态

对地热水 ZK1 内地热水历年的化学组分进行分析, 发现总体趋势较为稳定(图 3)。主要化学组分中的 K⁺+Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、pH 值、总溶解固体含量比较稳定, HCO₃⁻呈缓慢上升趋势, SO₄²⁻呈下降趋势; 特殊组分中氟化物含量相对稳定, SiO₂ 和偏硅酸变化幅度稍大, 原因主要是地下热水的持续开采, 导致水

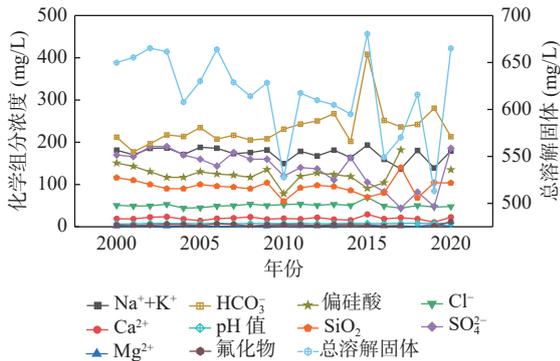


图 3 七里汤地热水化学组分历年含量曲线图

Fig. 3 Content curve of chemical components in Qilitang geothermal water over the years

位下降, 混入了一定的浅层地下水, 地下热水循环加快, 地下热水对花岗岩的溶滤作用增强, 使水中偏硅酸含量变幅较大。

3.1.3 地下热水水位与水温动态

随着七里汤地热田开发利用程度的不断提高, 水位呈下降趋势(图 4), 特别是自 20 世纪 90 年代以来, 随着人工开采量的大幅增加, 水位下降明显。从调查结果可以看出, 七里汤地热田 2006 年开采量为 17.60 万 m³/a, 2020 年增至 22.89 万 m³/a, 增加幅度为 0.35 万 m³/a; ZK1 水位埋深由 2006 年的 22.4 m, 降低至 2020 年的 25.2 m, 降低幅度为 0.18 m/a。



图 4 水位与水温动态历年变化图

Fig. 4 Dynamics of water level and temperature

七里汤温泉水的水温也存在着变化, 从 1980 年的 71 °C 到 2006 年的 68 °C, 再到如今的 66 °C, 水温共减小 5 °C; 胶东半岛的一些温泉, 如附近的大英汤水温从 1980 年的 63 °C 到现在的 62 °C, 呼雷汤水温从 1980 年的 69 °C 到现在的 60 °C, 温泉汤水温从 1980 年的 73 °C 到现在的 59 °C, 招远温泉水温从 1980 年的 98 °C 到现在的 81 °C, 即墨东温泉水温从 1980 年的 89 °C 到现在的 62 °C(史猛等, 2021), 发现胶东半岛地区温泉水的水温逐年降低, 可能是地热水的大量开采, 加剧了地下水径流交替循环强度, 进而造成泉水温度的下降。

3.2 地温场特征及地热异常区圈定

3.2.1 地温场特征

根据测温结果绘制地温等值线(图 5), 可以看出该地热田中心部位地温变化比较明显, 呈串珠状向南北两端延伸, 在东侧也有多个高值带, 但温度较中心部位明显偏低。总体来说, 各高值带分布呈现一定规律性, 即北东向的高值带与东母猪河断裂走向大致相同, 推测其为地热田的控热构造。

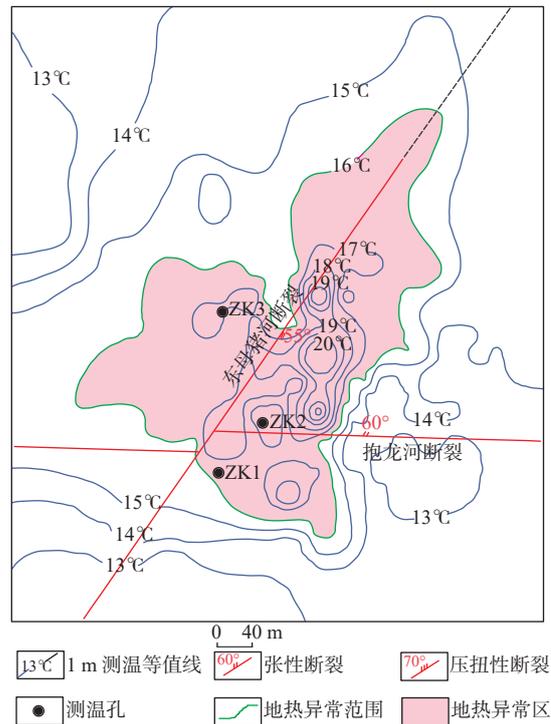


图 5 七里汤地温等值线图

Fig. 5 Ground temperature contour map of Qilitang

对研究区内 3 处钻孔进行垂向测温得知水温均呈递增趋势(图 6), 其中 ZK1 的水温起始温度为 33.5 °C,

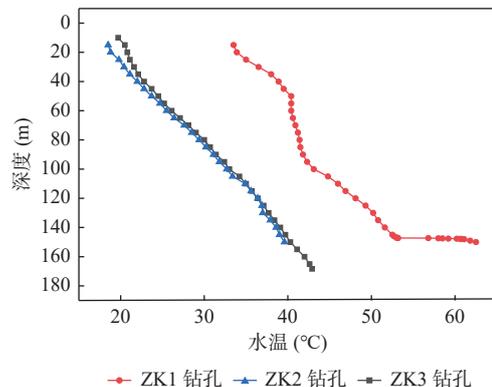


图 6 钻孔垂向测温图

Fig. 6 Vertical temperature measurement of borehole

至孔深 147 m 处增温至 53 °C, 在 147~148 m 段水温快速上升, 至终孔 150 m 处水温达到 62.5 °C, 平均地温梯度为 21.48 °C/100 m; ZK2 的水温起始温度为 18.5 °C, 终孔温度为 39.6 °C, 地温梯度为 15.48 °C/100 m; ZK3 的水温起始温度为 19.7 °C, 终孔温度为 42.9 °C, 地温梯度为 14.66 °C/100 m。ZK2 和 ZK3 垂向测温曲线基本一致, 说明两处热储形态相近, 受北东向的东母猪河断裂和东西向抱龙河断裂影响相近; ZK1 的水温在同深度均比其余两处钻孔水温高, 并且深部温度上升加快, 说明在 150 m 左右进入热储热源构造带, 推测该断裂深部仍有温度增加的潜力。

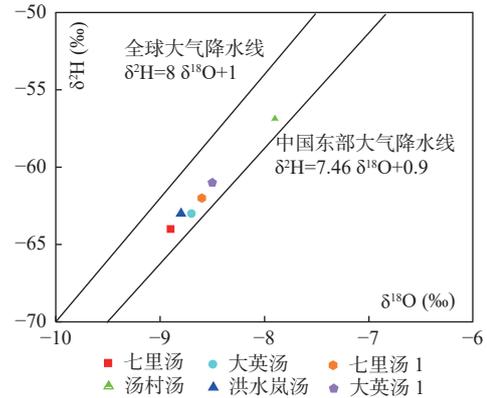
3.2.2 异常区圈定

本地区地热平均增温率约为 3 °C/100 m, 将超过平均增温率的部分作为地热异常区。根据遥感解译中地表温度反演结果, 发现七里汤附近地热异常区反映为暗红色异常特征, 地热异常区成中心扩散型, 呈不规则块状展布。地热异常主要分布在断裂构造带周围, 附近城市开发利用程度高, 城市热岛效应明显, 城市开发建设将一些重要地质背景及地热信息掩盖。在遥感解译的基础上, 综合分析研究区地热地质条件, 结合地温测量以及钻孔测温, 划定七里汤地热异常区, 确定地热异常区的面积约 0.092 km²(图 5)。并且对比胶东地区其他地热田面积得知, 大英汤地热田为 0.14 km², 宝泉汤地热田面积为 0.14 km², 洪水岚汤地热田面积为 0.2 km², 由此可以看出在胶东地区, 地热田的面积都较小且相差不大(田粟, 2012)。

4 地热田成因机制

4.1 地热水补给来源

中低温地热资源中的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 含量相对比较稳定, 可以用来研究地热水的补给来源。经检测七里汤地热田地热水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 测定结果分别为 -64‰、-8.9‰, 附近大英汤地热田地热水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 测定结果分别为 -63‰、-8.7‰, 同时搜集研究区附近其余地热水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 测定结果, 发现研究区及附近地热水体的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 数据点都落在全球大气降雨线 ($\delta^2\text{H}=8\delta^{18}\text{O}+10$) 及中国东部地区大气降雨线 ($\delta^2\text{H}=7.46\delta^{18}\text{O}+0.9$) 附近(图 7), 未出现明显的氧同位素偏移。此外, 张涛(2011)通过对胶东半岛 14 处温泉进行研究, 发现威海宝泉汤、牟平于家汤、招远东汤温泉形成年龄大于 40a, 其余温泉年龄小于 40a, 以现代水补



七里汤、大英汤的地热水的氢氧同位素为实测数据, 其他数据来自王昕昀(2018)

图 7 水样 $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 关系图

Fig. 7 Relationship between $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in water samples

给为主。因此, 七里汤地热田及附近的地热水来源主要来自于大气降水, 而非地球内部的内生水或者古封存水等水体。

4.2 热源分析

胶东半岛位于环太平洋地热带, 为华北板块与扬子板块的碰撞结合带, 早期处于地温上升阶段, 近期地温上升虽有所衰退, 但仍具有较高的地热背景(陈墨香, 1988)。前人研究表明胶东半岛具有较高的大地热流背景值(图 8)(史猛等, 2021), 而且高热流值与深大断裂走向基本一致, 说明深大断裂是其导热通道。

胶东半岛岩浆活动十分频繁, 从太古代到新生代均有发育, 以中生代岩浆活动最为强烈, 而胶东半岛地热水的形成时间多在 5~10a, 少部分地热水年龄为 30~40a(张涛, 2011), 从热水形成年龄和岩浆活动时间来看, 热源为岩浆残余热的可能性不大。另外, 通过地热水放射性元素分析, 虽普遍含有 Ra、Rn、U 等, 但是依据相关公式计算其热量很小, 不足以支撑地热资源的形成(史猛等, 2019b; 钟振楠等, 2021)。综上所述, 地热增温为其主要热源。

从 ZK2 和 ZK3 测温曲线可以看出, 两孔测温曲线均为直线增温型, 无明显温度异常, 热源为深大断裂的热传热, 而位于导热断裂带 ZK1 孔测温曲线为上凸型, 说明该孔为水热对流增温型地热井(李攻科等, 2014)。

综合胶东地区热源分析以及钻孔测温曲线可以看出, 七里汤的聚热模式为导热断裂带中的水热对流聚热, 深大断裂沟通了地壳深部热源, 断裂带破碎构

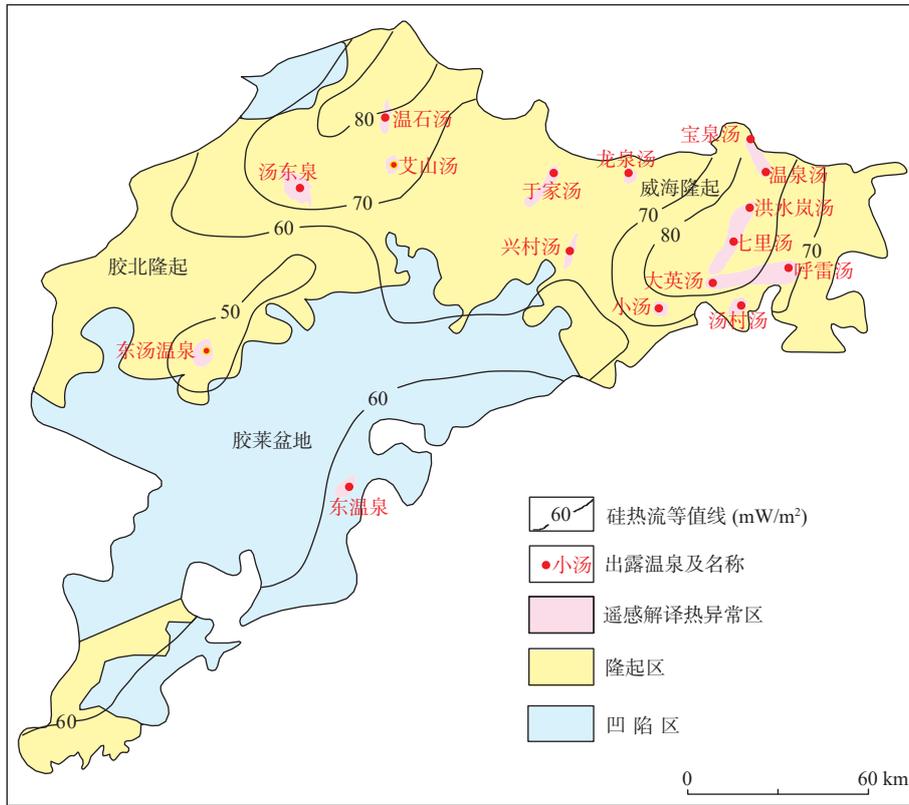


图 8 胶东半岛硅热流等值线图(据史猛等, 2021 修改)

Fig. 8 Isolines map of silicon heat flow in Jiaodong Peninsula

成强富水条带、导水通道和优势导热通道, 深部热流沿该通道以热对流方式携带到达地壳浅部, 形成带状对流聚热。

4.3 热储温度与循环深度

采用 SiO₂ 温标法, 依据温泉水水质分析结果绘制 SiO₂ 溶解度曲线(图 9)。可以看出七里汤温泉落在玉髓溶解曲线附近, 说明玉髓是控制温泉水中 SiO₂ 平衡的主要矿物, 因此采用玉髓溶解曲线计算热储温度。

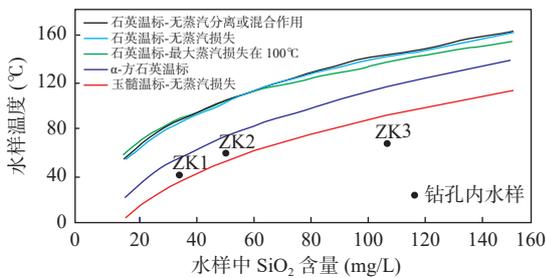


图 9 SiO₂ 浓度曲线图

Fig. 9 SiO₂ concentration curve

计算结果表明: 当七里汤温泉水 SiO₂ 的浓度为 106.42 mg/L、水温为 67 °C 的时候, 计算的热储温度

为 114.39 °C。经分析可知七里汤主要补给水源为大气降水, 沿着北东向横口-杨格庄断裂入渗, 在深循环径流过程中被加热后上升, 在上升过程中混入部分地下水, 导致温度下降, 最后在断裂交汇部位出露成泉。假设地下热量随深度的增加遵循正常的地温梯度, 可根据当地的地温梯度来估算地热水的循环深度:

$$Z = G(t_z - t_0) + Z_0 \tag{2}$$

式中: G 为增温梯度, 单位 $m/°C$; t_z 为热储温度, 单位 $°C$; t_0 为威海地区多年平均气温, 单位 $°C$; Z_0 为常温带深度, 单位 m 。

根据资料可知, 七里汤地热水的增温梯度为 $22.7 m/°C$, 威海地区多年平均气温为 $15 °C$, 常温带的深度为 $20 m$, 经计算得七里汤地热田地热水的循环深度为 $2\ 276.07 m$ 。在胶东地区, 所有温泉水的热储温度均为 $106\sim 135 °C$, 相互之间温度差距不大, 都属于中低温型地热田, 并且可能所有温泉水的热源相同。胶东半岛地区温泉中除于家汤温泉循环深度较浅以外, 威海地区温泉循环深度普遍较深(表 2), 其中宝泉汤、温泉汤、呼雷汤、乳山小汤、招远东汤温泉的循环深度为 $1.3\sim 3.6 km$, 其他等地的温泉循环深度深为

表 2 胶东部分温泉热储温度及所处构造表

Tab. 2 Temperature and structure of some hot spring heat storage in Jiaodong

温泉	热储温度(℃)	循环深度(m)	构造部位	备注
威海宝泉汤	115.16	2 022.14	NW神道口断裂; NE金线顶断裂	○
威海温泉汤	125.5	1 743	NW温泉汤断裂; NE西字城—鲍家山断裂	※
文登洪水岚汤	135.02	5 532.74	NE横口—东柳林断裂	☆
文登呼雷汤	136.6	1 352.69	NE青龙河断裂; NW汤西断裂	☆
文登汤村汤	106.32	7 302.85	NE昌阳河断裂; NW汤村断裂	☆
文登大英汤	109.18	1 808.79	NE米山断裂; NE甸里院断裂	☆
乳山小汤	110.47	1 503.2	NE仙姑顶断裂	☆
牟平龙泉汤	109.34	9 653.24	NE汤西—龙泉断裂	☆
牟平于家汤	116.33	620.15	NE桃村断裂、郭城—即墨断裂; NW于家汤断裂	☆
乳山兴村汤	112.61	9 784.65	NE朱吴断裂	☆
即墨东温泉	123.8	7 803.84	NE青岛断裂、NE郭城—即墨断裂	☆
栖霞艾山汤	117.09	8 568.32	NE寨里—杨础断裂	☆
蓬莱温石汤	132.09	8 921.29	NE村里集断裂; NW温石汤断裂	☆
招远东汤温泉	127.63	3 634.7	NE玲珑断裂; NW招平断裂(招远段)	☆

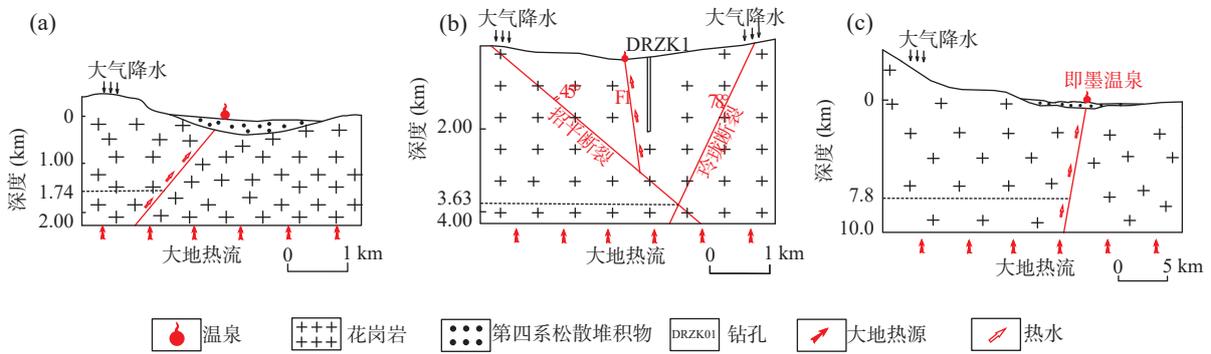
注: ○表示资料来自于杜桂林等(2012); ※表示资料来自于隋来伦等(2020); ☆表示资料来自于史猛等(2019a)。

5.5~9.7 km, 由上可知七里汤温泉也属于中深循环地热流体。

4.4 断裂对温泉控制作用

从地质构造上看, 胶东温泉附近均存在区域性的深大断裂, 主要以北东向导热断裂为主, 部分地热田出露点附近也存在相对次一级的北东向断裂与北西向断裂(表 2), 如温泉汤温泉受北西向温泉汤断裂和北东向西字城—鲍家山断裂控制, 招远温泉受北东向

玲珑断裂和北西向招平断裂控制, 即墨东温泉受北东向青岛断裂和北东向郭城—即墨断裂控制(图 10)。因此, 区域上的深大断裂是地热水运移的主要通道, 而局部的断裂交汇部位则是控制温泉出露的决定性因素(史猛等, 2019b)。综合上文的分析可以看出: 北东向的东母猪河断裂为七里汤地热田的控热构造, 北东向的东母猪河断裂和东西向抱龙河断裂控制了温泉出露位置。



a. 温泉汤温泉成因示意图(据隋来伦, 2020 修改); b. 招远温泉成因示意图(钟振楠等, 2021); c. 即墨温泉成因示意图(据王昕昀等, 2018 修改)

图 10 胶东地区部分温泉成因示意图

Fig. 10 Schematic diagram of some hot springs in Jiaodong area

4.5 七里汤地热田概念模型

在借鉴胶东温泉成因机制的基础上, 结合七里汤

地热田特定的地质构造、地热水的补给来源和循环演化特征等方面, 研究七里汤地热田的成因机制。七里

汤地热田内的热储盖层主要有2种,即第四系松散层和侏罗纪二长花岗岩。第四系松散岩层,厚度一般小于8 m,保温效果不甚明显;二长花岗岩分布于第四系松散岩层下部,厚度为15~20 m,该岩石既是构成热储的主要岩层,又是热储的主要盖层。

地热田热储为北东向东母猪河断裂与近东西向抱龙河断裂控制的断裂裂隙型热储,热储中心在老母猪河断裂与抱龙河断裂的交汇复合部位。断裂带两侧构造裂隙发育既是热能储存场所,也是热能传输、运移的主要通道,同时为大气降水入渗补给和深部热流上升提供了理想通道。地热田内地热水为裂隙水,主要接受大气降水补给,其次在低处受松散层孔隙水的补给。大气降水和常温地下水通过东母猪河断裂与抱龙河断裂交汇部位的断裂破碎带入渗,经过深部循环热源加热后,以对流的方式上升至地表浅部,以泉的形式进行排泄(图11)。

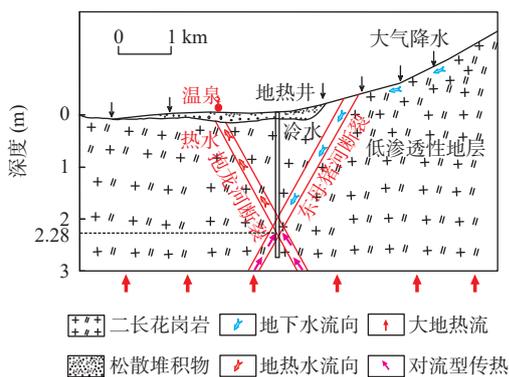


图11 七里汤地热田成因机制

Fig. 11 Genetic mechanism of hot field in Qilitang field

综上所述,七里汤为深循环-对流型,即在山区接受大气降水入渗补给,沿着横口-杨格庄深大断裂径流,在深循环径流过程中温度不断升高,循环至地下2 276.07 m处温度升至114.39 °C,由于温度升高水压降低,地热水开始向上运移,在上升过程中混入部分地下水,导致温度下降,最后在断裂交汇处、第四系静水压力最小的部位出露成泉,泉水温度约67 °C。

从七里汤地热泉可以看出,热水沿着高渗透性的破碎带上涌至地表形成地热田,所以胶东半岛热异常显示范围相对较小,地热资源均属于受断裂控制的中低温对流型地热资源。

5 结论

(1)七里汤地热田地热水的水化学类型主要为

$\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 和 $\text{HCO}_3 - \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型水,地热水中 F 、 H_2SiO_3 含量较周边地下水和地表水明显偏高。七里汤地热田及附近的地热水来源主要来自于大气降水,而非地球内部的内生水或者古封存水等水体,地热增温是其主要热源,热储温度为114.39 °C,循环深度为2 276.07 m。

(2)七里汤地热田成因机制为深循环-对流型,即在山区接受大气降水入渗补给,沿着横口-杨格庄深大断裂径流,在深循环径流过程中温度不断升高,循环至地下2 276.07 m处温度升至114.39 °C,由于温度升高水压降低,地热水开始向上运移,在上升过程中混入部分地下水,导致温度下降,最后在断裂交汇处、第四系静水压力最小的部位出露成泉,泉水温度约为67 °C。

(3)近年来,随着开采量的增加和开采时间的延续,七里汤地热田的水位呈下降趋势。因此,在未来开发利用过程中,地热田总开采量不可超过15.44 万 m^3/a 。

参考文献(References):

- 陈墨香. 华北地热[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- 陈海雯, 宋荣彩, 张超, 等. 基于因子分析法的干热岩地热资源热储评价[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2023, 50(3): 333-350.
- CHENG Haiwen, SONG Rongcai, ZHANG Chao, et al. Geothermal storage evaluation of geothermal resources in hot dry rock based on factor analysis method [J], Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2023, 50(3): 333-350.
- 崔煜烽, 张杰, 殷焘, 等. 鲁东地区地热资源分布规律及勘查定井方法探讨[J]. 中国地质调查, 2018, 5(2): 86-92.
- CUI Yufeng, ZHANG Jie, YIN Tao, et al. Discussion on distribution of geothermal resources and locating wells methods of geothermal exploration in Eastern Shandong Province [J]. Geological Survey of China, 2018, 5(2): 86-92.
- 杜桂林, 曹文海, 翟滨. 威海市宝泉汤温泉成因及其对断裂和地震活动性的影响[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(5): 67-71.
- DU Guilin, CAO Wenhai, ZHAI Bin. Genesis of Baoquantang hot spring in Weihai and its influence on faulting and seismic activities [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2012, 32(5): 67-71.
- 黄建军, 周阳, 滕宏泉, 等. 关中盆地西安凹陷地热水赋存特征及其资源量估算[J]. 西北地质, 2021, 54(1): 196-203.

- HUANG Jianjun, ZHOU Yang, TENG Hongquan, et al. On the Occurrence Characteristics and the Estimation of Geothermal Water in Xi'an Sag, Guanzhong Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(1): 196-203.
- 金秉福, 张云吉, 栾光忠. 胶东半岛地热资源的特征[J]. *烟台师范学院学报(自然科学版)*, 1999, 15(4): 297-301.
- JIN Bingfu, ZHANG Yunji, LUAN Guangzhong. Characteristics of geothermal resources in Jiaodong Peninsula[J]. *Yantai Teachers University Journal(Natural Science)*, 1999, 15(4): 297-301.
- 敬民. 地热能能否烧开“双碳”目标[J]. *中国石油石化*, 2021, (19): 40-41.
- JING Min. Can geothermal heat boil "double carbon" target[J]. *China Petroleum & Petrochemical Corporation*, 2021, (19): 40-41.
- 李攻科, 王卫星, 李宏, 等. 河北汤泉地热田地温场分布及其控制因素研究[J]. *中国地质*, 2014, 41(6): 2099-2109.
- LI Gongke, WANG Weixing, LI Hong, et al. Temperature distribution and controlling factors of the Tangquan geothermal field in Hebei Province[J]. *Geology in China*, 2014, 41(6): 2099-2109.
- 史猛, 张杰, 殷焘, 等. 胶东半岛中低温对流型地热资源水化学特征分析[J]. *地质学报*, 2019a, 93(S1): 138-148.
- SHI Meng, ZHANG Jie, YIN Tao, et al. Hydrochemistry characteristic analysis of low-medium temperature convective geothermal resources in Jiaodong Peninsula[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019a, 93(S1): 138-148.
- 史猛, 康凤新, 张杰, 等. 胶东半岛中低温对流型地热资源赋存机理及找热模型[J]. *地质论评*, 2019b, 65(5): 1276-1287.
- SHI Meng, KANG Fengxin, ZHANG Jie, et al. Occurrence mechanism and geothermal exploration model of low-medium temperature geothermal systems of convective type in Jiaodong Peninsula[J]. *Geological Review*, 2019b, 65(5): 1276-1287.
- 史猛, 康凤新, 张杰, 等. 胶东半岛不同构造单元深部热流分流聚热模式[J]. *地质学报*, 2021, 95(05): 1594-1605.
- SHI Meng, KANG Fengxin, ZHANG Jie, et al. Discussion on the deep heat flow diversion-acculturation between uplift and depression in different tectonic units in the Jiaodong Peninsula[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(05): 1594-1605.
- 隋来伦, 杜桂林, 陈其峰. 威海市温泉汤温泉形成模式[J]. *山东国土资源*, 2020, 36(10): 40-45.
- SUI Lailun, DU Guilin, CHEN Qifeng. Formation Mode of Wenquantang Hot Spring in Weihai City[J]. *Shandong Land and Resources*, 2020, 36(10): 40-45.
- 田粟. 威海地区构造型地热田成因机制研究[D]. 济南: 济南大学, 2012. 1-72.
- TIAN Li. Study on the genetic mechanism of tectonic geothermal fields in Weihai area[D]. Jinan: University of Jinan, 2012: 1-72.
- 王贵玲, 张薇, 蔺文静, 等. 京津冀地区地热资源成藏模式与潜力研究[J]. *中国地质*, 2017, 44(6): 1074-1085.
- WANG Guilin, ZHANG Wei, LIN Wenjing, et al. Research on formation mode and development potential of geothermal resources in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Geology in China*, 2017, 44(6): 1074-1085.
- 王昕昀. 山东半岛西部温泉水化学特征及成因研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- WANG Xinyun. Study on chemical characteristics and genesis of spring water in western Shandong peninsula[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018.
- 王秀芹, 张平平, 杨亚宾. 山东半岛蓝色经济区地热资源与开发利用区划[J]. *山东国土资源*, 2015, 31(07): 40-44.
- WANG Xiuqin, ZHANG Pingping, YANG Yabin. Geothermal Resources and Development and Utilization of Regionalization of Shandong Peninsula Blue Economic Zone[J]. *Shandong Land and Resources*, 2015, 31(07): 40-44.
- 杨合群, 赵国斌, 姜寒冰, 等. 西秦岭成矿带矿床成矿系列概论[J]. *西北地质*, 2022, 55(1): 114-128.
- YANG Hequn, ZHAO Guobin, JIANG Hanbing, et al. Discussion on the Metallogenic Series of Mineral Deposits in the Metallogenic Belt of West Qinling, China[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(1): 114-128.
- 杨学明, 雷清, 聂冀强, 等. 太行拱断束地热资源调查评价-基于大地电磁测深结果的分析[J]. *西北地质*, 2020, 53(4): 235-245.
- YANG Xueming, LEI Qing, NIE Jiqiang, et al. Investigation and Evaluation of Geothermal Resources of Taihang Arch Fault Cluster Based on the Magnetotelluric Exploration[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(4): 235-245.
- 张涛. 胶东温泉地热水水化学及同位素特征研究[J]. *山东国土资源*, 2011, 27(12): 11-16.
- ZHANG Tao. Study on hydrochemistry and isotopic characteristics of geothermal water in Jiaodong area[J]. *Shandong Land and Resources*, 2011, 27(12): 11-16.
- 钟振楠, 康凤新, 宋明忠, 等. 鲁东招远地热田地热通量及地热成因研究[J]. *地质论评*, 2021, 95(05): 1594-1605.
- ZHONG Zhennan, KANG Fengxin, SONG Mingzhong, et al. Study on geothermal flux and geothermal genesis of Zhaoyuan geothermal field in Eastern Shandong geothermal area[J]. *Geological Review*, 2021, 95(05): 1594-1605.
- 周国富, 宫丽丽. 京津冀能源消耗的碳足迹及其影响因素分析[J]. *经济问题*, 2014, (08): 27-31.
- ZHOU Guofu, GONG Lili. Factor Analysis of Carbon Footprint of Beijing Tianjin Hebei Province Energy Consumption and Influence[J]. *Economic Problems*, 2014, (08): 27-31.