

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2022.06.002

文章编号:1672-3767(2022)06-0015-09

# 日照市松柏地热井水化学特征及地热成因分析

郭本力<sup>1,2,3,4</sup>, 杨鹏<sup>1,2,3,4</sup>, 袁杰<sup>1,2,3,4</sup>

(1.山东省第八地质矿产勘查院,山东日照276826;

2.山东地矿局有色金属矿找矿与资源评价重点实验室,山东日照276826;

3.日照地质地理信息大数据研究院,山东日照276826;

4.日照市土地质量评价与污染修复重点实验室,山东日照276826)

**摘要:**松柏地热井是目前胶南隆起区水温最高、水量最大的地热单井。本研究基于松柏地热井地热地质条件,分析了该井地热水的水化学特征及微量元素特征,采用地热水元素比例系数法对地热水的主要组分来源进行了分析,并评价了该地热水的结垢趋势和腐蚀性。利用Na-K-Mg三角图解法确定地热水为部分平衡水,并在此基础上运用地球化学温标法、多矿物平衡图解法确定热储温度为124℃。通过地热流体 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 同位素与大气降水线的关系,确定地热水补给来源为大气降水,并利用 $\delta D$ 同位素的高程效应,计算地热水补给高程为407~467m,补给区范围为南部五莲山、九仙山一带,并得出热储循环深度为2349m。该区地热水属于断裂控制的低温地热资源。

**关键词:**水化学;热储温度;同位素;成因分析;地热资源;日照市

中图分类号:P314

文献标志码:A

## Hydrochemical characteristics and geothermal genesis of Songbai geothermal well in Rizhao City

GUO Benli<sup>1,2,3,4</sup>, YANG Peng<sup>1,2,3,4</sup>, YUAN Jie<sup>1,2,3,4</sup>

(1. No. 8 Institute of Geology and Mineral Resources Exploration of Shandong Province, Rizhao, Shandong 276826, China;

2. Key Laboratory of Nonferrous Metal Ore Exploration and Resource Evaluation of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Rizhao, Shandong 276826, China;

3. Rizhao Big Data Research Institute of Geology and Geographic Information, Rizhao, Shandong 276826, China;

4. Rizhao Key Laboratory of Land Quality Evaluation and Pollution Remediation, Rizhao, Shandong 276826, China)

**Abstract:** Songbai geothermal well is a single geothermal well with the highest water temperature and the largest water volume in Jiaonan uplift area. Based on the geothermal geological conditions of Songbai geothermal well, this paper analyzed the hydrochemical and trace element characteristics of the geothermal water in the well, investigated the main component sources of the geothermal water by using the geothermal water element proportion coefficient method, and evaluated the scaling trend and corrosivity of the geothermal water. The geothermal water was determined as partial equilibrium water by using Na-K-Mg triangular diagram method. On this basis, the thermal storage temperature was determined as 124 °C by using geochemical temperature scale method and multi-mineral equilibrium diagram method. Based on the relationship between  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  isotopes of geothermal fluid and atmospheric precipitation line, the recharge source of geothermal water was identified to be atmospheric precipitation. By using the elevation effect of  $\delta D$  isotope, the recharge elevation of geothermal water was calculated

收稿日期:2021-08-19

基金项目:五莲县东部地区地热资源调查项目(日勘字(2016)02号)

作者简介:郭本力(1983—),男,山东鄄城人,高级工程师,主要从事水文地质、地热地质、环境地质方面研究,

E-mail:286486736@qq.com

杨鹏(1986—),男,山东青州人,高级工程师,主要从事水文地质、环境地质方面研究,本文通信作者。

E-mail:9804179@qq.com

to be 407~467 m, and the recharge area was determined as Wulian mountain and Jiuxian mountain in the south. Moreover, the circulation depth of the thermal storage was calculated to be 2 349 m. Geothermal water in the area was fracture-controlled low-temperature geothermal resources.

**Key words:** hydrochemistry; geothermal reservoir temperature; isotope; genetic analysis; geothermal resources; Rizhao City

为了实现双碳目标,可再生能源的开发与利用势在必行。而地热是一种资源丰富、应用广泛、稳定可靠、清洁低碳的绿色可再生能源,现已广泛应用于发电、供暖、理疗和农业养殖,地热资源的开发对于节能减排和改善环境具有重要意义<sup>[1]</sup>。对地热水水化学的研究有助于识别地热水来源、研究地热系统中水岩相互作用及地热水运动特征等,可为地热资源开发、避免地热水污染提供依据<sup>[2]</sup>。

目前研究地热水水化学特征的方法包括 Piper 三线图法、Na-K-Mg 三角图解法、多矿物平衡图解法、饱和指数法和同位素分析法,这些方法可用来研究地热水的水化学类型、补给来源以及赋存机理<sup>[3]</sup>。松柏地热井位于胶南隆起区北部,五莲-荣成断裂的南段,该区地热资源丰富。但目前尚未对日照市胶南隆起区北部地热水进行过全面研究,对该区地热水水文地球化学特征及成因也缺乏系统认识。本研究以松柏地热井为例,运用 Piper 三线图法、Na-K-Mg 三角图解法、多矿物平衡图解法等手段,对该区的热储温度、补给来源、循环条件及水岩相互作用进行研究,为地热资源的合理开发利用提供依据。

## 1 地热地质条件

松柏地热井位于日照市五莲县松柏镇北部(图 1),成井时间为 2017 年 6 月,成井深度 1 570 m,井口温度 75 °C,单井涌水量 1 486.08 m<sup>3</sup>/d(降深 31.40 m)。区域上属胶南隆起区,区内地层不发育,仅局部沉积了白垩纪青山群、莱阳群,岩性以火山角砾岩、含砾粗砂岩、凝灰岩及细砂岩为主。区内侵入岩广泛分布,其中以燕山晚期侵入岩最多,约占出露面积的 60%,岩性为中粗粒-细粒二长花岗岩,其次为晋宁期二长花岗岩片麻岩。区内断裂构造发育,以北北东和北东向为主,北西向次之。

松柏-小王疃断裂(F1):NNE 向断裂,走向 15°~30°,倾向南东,倾角 70°~80°,断裂上下盘岩性均为中-中粗粒二长花岗岩,断层内挤压特征明显,岩石风化强烈,性质为压扭性,长度大于 24 km。区域测温资料表明,松柏-小王疃断裂影响带地温梯度远高于一般地区,为区域导热断裂。

松柏-叩官断裂(F2):NW 向断裂,走向 307°左右,倾向北东,倾角 80°左右,断裂两侧出露青山群八亩地组及燕山晚期石英斑岩并左行切割,东段大部分被第四系覆盖,经钻探揭露,为张性富水断裂。

香店-松柏断裂(F5):NE 向断裂,走向 50°,断层南段走向 35°左右,北段走向 75°左右,倾向北西,倾角在 80°左右,该断裂性质为张性导水断裂。

松柏-小王疃断裂(F1)为压扭性,主要起导热、阻水作用,松柏-叩官断裂(F2)、香店-松柏断裂(F5)为张性,主要起导水作用,这 3 条断裂的构造破碎带组成了区内地下水的补给、运移、富集及储存空间。

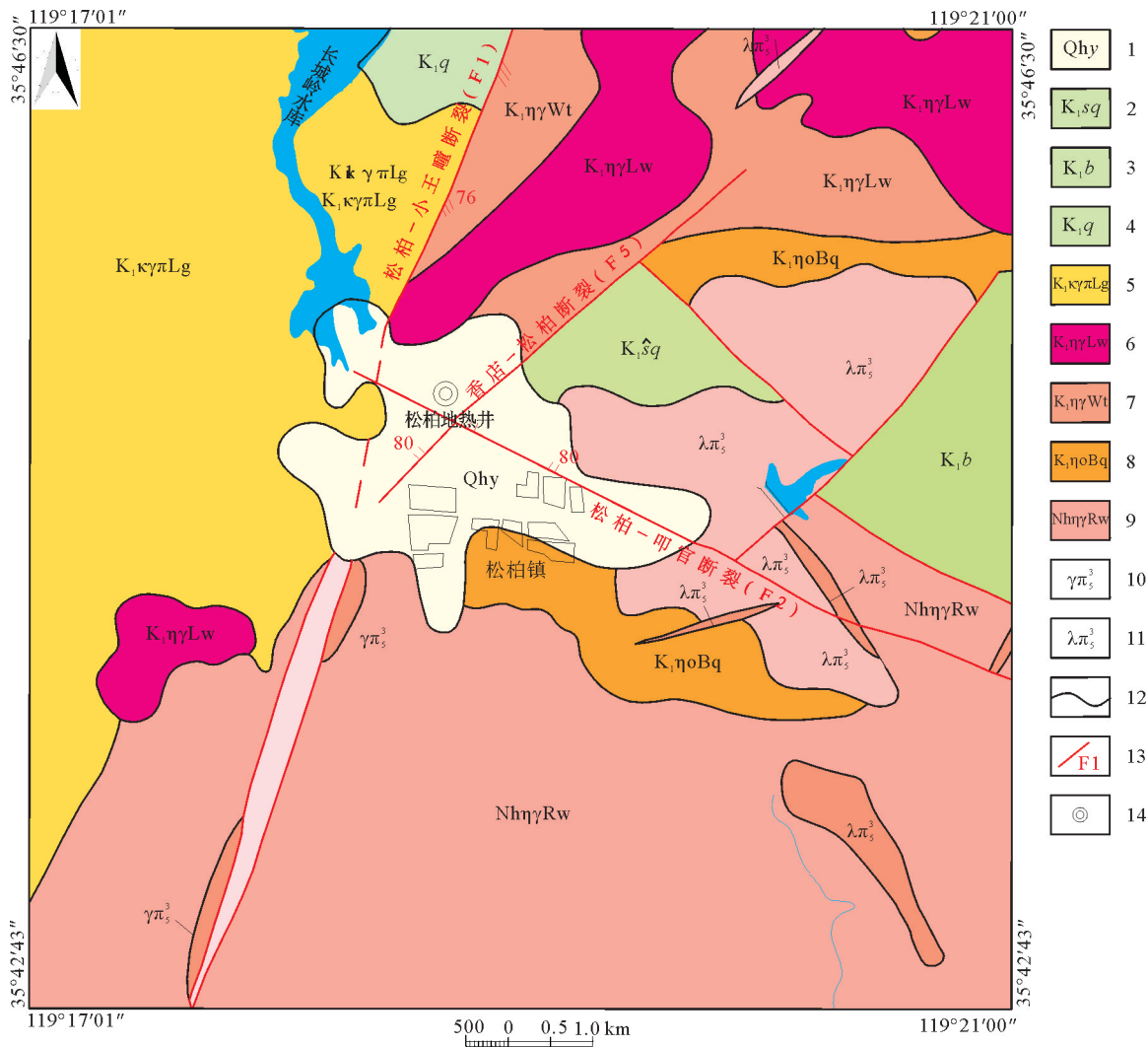
## 2 地热水采集及测试分析

采样工作于 2017 年 5 月开展,严格按照水样采集、保存和送检的要求进行,在地热井产能测试结束前采集,共采集全分析水样 1 件,同位素样品 1 件。样品测试工作委托国土资源部地下水矿泉水及环境监测中心完成,水质全分析依据 GB 8538—2016《饮用天然矿泉水标准检验方法》<sup>[4]</sup>检测。水样的稳定同位素  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值采用波长扫描-光腔衰荡光谱法检测。

## 3 地热水水化学特征

### 3.1 地热水水化学类型

根据采样测试结果(表 1),地热水矿化度为 1 521.5 mg/L,属微咸水;总硬度为 231.18 mg/L,属中硬水;pH 值为 8.7,显示碱性;阳离子以 Na<sup>+</sup> 为主、含量 369.90 mg/L,其次为 Ca<sup>2+</sup>、含量 92.58 mg/L;主要阴



1—第四纪沂河组;2—白垩纪石前庄组;3—白垩纪八亩地组;4—白垩纪曲格庄组;5—燕山晚期孤山单元;  
6—燕山晚期望海楼单元;7—燕山晚期通天岭单元;8—燕山晚期岐阳单元;9—晋宁期威海单元;  
10—花岗斑岩脉;11—流纹斑岩脉;12—地质界线;13—断裂及编号;14—地热井位置

图 1 松柏地区区域地质图

Fig. 1 Regional geological map of Songbai area

离子为  $\text{SO}_4^{2-}$ 、含量 655.25 mg/L, 其次为  $\text{Cl}^-$ 、含量 206.20 mg/L, 水化学类型属  $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}-\text{Na}$  水(图 2), 水温达 75 °C。根据 GB/T 1615—2010《地热资源地质勘查规范》<sup>[5]</sup>对地热资源温度的分级标准, 属热水型低温地热资源。

地热水同时富含多种对人体有益的微量元素, 地热水中  $\text{F}^-$  含量 7.5 mg/L,  $\text{H}_2\text{SiO}_3$  含量 145.73 mg/L,  $\text{Sr}^{2+}$  含量 4.26 mg/L,  $\text{Li}^+$  含量 0.386 mg/L, Br 含量 0.75 mg/L。根据 GB/T 1615—2010《地热资源地质勘查规范》<sup>[5]</sup>理疗热矿水水质标准,  $\text{F}^-$  和  $\text{H}_2\text{SiO}_3$  含量均达到有医疗价值浓度和命名矿水浓度, 具有理疗保健功效(阴阳离子平衡检查 E% 相对误差 0.268)。

### 3.2 地热水元素比例系数特征

地下水中各离子比例系数可以用来判断地下水的成因和地下水化学成分的来源或形成过程<sup>[6]</sup>。本研究选用  $\gamma(\text{Na})/\gamma(\text{Cl})$ 、 $\gamma(\text{SO}_4)/\gamma(\text{SO}_4 + \text{Cl})$ 、 $\gamma(\text{Ca} + \text{Mg})/\gamma(\text{CO}_3 + \text{HCO}_3 + \text{SO}_4)$ 、 $\gamma(\text{Ca})/\gamma(\text{Mg})$  系数分析地热水成因(表 2)。

表 1 松柏地热井地热水分析结果

Tab. 1 Analysis results of geothermal water in Songbai geothermal well

pH	水温/°C	矿化度	离子含量(mg/L)								阴阳离子
			K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	平衡检查/%
8.7	75	1 521.5	15.28	369.90	92.58	0.55	206.20	48.33	11.88	655.25	0.268

表 2 松柏地热井地热水各离子比例系数表

Tab. 2 Ratio coefficient of ions in geothermal water of Songbai geothermal well

$\gamma(\text{Na})/\gamma(\text{Cl})$	$\gamma(\text{SO}_4)/\gamma(\text{SO}_4+\text{Cl})$	$\gamma(\text{Ca}+\text{Mg})/\gamma(\text{CO}_3+\text{HCO}_3+\text{SO}_4)$	$\gamma(\text{Ca})/\gamma(\text{Mg})$	$\gamma(\text{Ca})/\gamma(\text{SO}_4)$
2.77	0.70	0.31	102.08	0.06

$\gamma(\text{Na})/\gamma(\text{Cl})$  又称变质系数,用来表示地层的封闭性特征,是判断地下水的变质程度和活性的重要指标。变质系数越小,表明地下水越浓缩,变质程度越深,含水层的封闭越好、反映为比较还原的水体环境;该系数越大,表明地下水受渗入补给的影响越强。标准海水的  $\gamma(\text{Na})/\gamma(\text{Cl})$  系数值为 0.85,受大气降水入渗溶滤影响的地下水  $\gamma(\text{Na})/\gamma(\text{Cl})$  系数值一般大于 0.85,经过强烈水岩作用和蒸发浓缩的陆相沉积水  $\gamma(\text{Na})/\gamma(\text{Cl})$  系数值一般小于 0.85,与岩盐层溶滤作用相关的地下水变质系数接近 1.0。经计算,本研究区地热水的  $\gamma(\text{Na})/\gamma(\text{Cl})$  系数值为 2.77,远高于 0.85,说明研究区地热水受到入渗补给影响,构造的开放性较好,热储环境开放。

$\gamma(\text{SO}_4)/\gamma(\text{SO}_4+\text{Cl})$  为脱硫系数,表示脱硫酸作用程度。一般脱硫系数越小,地层越封闭,还原作用越强;反之开放性较好。海水的脱硫系数一般为 0.09,若地层水脱硫系数大于 0.09,说明地下水储存环境较开放。本研究区  $\gamma(\text{SO}_4)/\gamma(\text{SO}_4+\text{Cl})$  系数为 0.7,说明地热水环境封闭性差,可更新能力强。

$\gamma(\text{Ca}+\text{Mg})/\gamma(\text{CO}_3+\text{HCO}_3+\text{SO}_4)$  系数可判断  $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  来源。若  $\gamma(\text{Ca}+\text{Mg})/\gamma(\text{CO}_3+\text{HCO}_3+\text{SO}_4)$  系数值为 1,说明地下水中  $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  全部来自石膏及碳酸盐矿物溶解作用。研究区地热水的  $\gamma(\text{Ca}+\text{Mg})/\gamma(\text{CO}_3+\text{HCO}_3+\text{SO}_4)$  系数为 0.31,说明硅酸盐、硫酸盐类矿物对地热水化学组分影响比较大。

研究区的  $\gamma(\text{Ca})/\gamma(\text{Mg})$  系数为 102.1,远大于 1,也说明地热水在径流过程中溶解的主要矿物为方解石和石膏等贫镁矿物。另外从表 2 可以看出,地热水  $\gamma(\text{Ca})/\gamma(\text{SO}_4)$  系数值为 0.06,  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度远大于  $\text{Ca}^{2+}$  浓度,表明样品中的  $\text{SO}_4^{2-}$  除石膏溶解外还有其他来源。

### 3.3 地热水腐蚀性 & 碳酸钙结垢趋势评价

地热水的矿化度一般较高,在传送运输过程中,由于温度和压力的降低,地热水中的矿物容易过饱和发生沉淀作用形成结垢,结垢层增厚造成井管的有效管径变小,系统阻力增加,输送地热水所需能耗也会加大,严重者甚至可造成换热设备及管道的堵塞。另外,地热水中也会含有多种腐蚀性化学组分,对地热设备造成严重的腐蚀破坏,因此,需要对地热水的腐蚀与结垢问题进行评价分析<sup>[7]</sup>。

#### 1) 地热水腐蚀性评价

地热水中的硫化氢、游离二氧化碳、硫酸根和氯离子等组分对金属有一定的腐蚀性,根据 GB/T 1615—

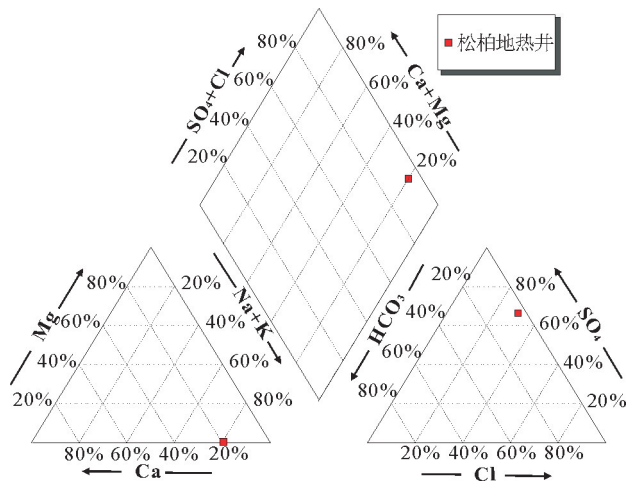


图 2 地热水 Piper 三线图

Fig. 2 Piper diagram of geothermal water

2010《地热资源地质勘查规范》<sup>[5]</sup>,参照工业上用腐蚀系数来衡量地热流体(水)的腐蚀性。

松柏地热井地热水的 pH 值为 8.7,为碱性水,选用公式  $Kk=1.008(r(\text{Mg}^{2+})-r(\text{HCO}_3^-))$  计算腐蚀性,式中  $r$  表示离子含量的每升毫克当量(毫摩尔)数。若腐蚀系数  $Kk>0$ ,称为腐蚀性水;腐蚀系数  $Kk<0$ ,并且  $Kk+0.050\ 3[\text{Ca}^{2+}]>0$ ,称为半腐蚀性水;腐蚀系数  $Kk<0$ ,并且  $Kk+0.050\ 3[\text{Ca}^{2+}]<0$ ,称为非腐蚀性水。经计算  $Kk=-0.753<0$ ,且  $Kk+0.050\ 3[\text{Ca}^{2+}]=3.904>0$ ,故此地热水为半腐蚀性水(表 3)。

## 2) 地热水碳酸钙结垢趋势评价

本地热井地热水的氯离子的摩尔当量为 27.61%,大于 25%,因此采用拉伸指数(LI)对碳酸钙的结垢趋势和腐蚀性程度进行评价。计算公式如下:

$$LI = \frac{\text{Cl} + \text{SO}_4}{\text{ALK}} \quad (1)$$

式中:Cl—氯化物或卤化物浓度,mg/L;SO<sub>4</sub>—硫酸盐浓度,mg/L;ALK—总碱度,mg/L;以上三项均以等当量的 CaCO<sub>3</sub> 表示。

当  $LI \leq 0.5$ ,可能结垢,没有腐蚀性; $0.5 < LI \leq 3$ ,不结垢,有轻腐蚀性; $3 < LI \leq 10$ ,有中腐蚀性; $LI > 10$ ,有强腐蚀性。经计算,松柏地热井地热水 LI 值为 16.37,此地热水碳酸钙不结垢,具有强腐蚀性(表 3)。

表 3 松柏地热井地热水腐蚀性及结垢评价

Tab. 3 Evaluation of corrosivity and scaling of geothermal water in Songbai geothermal well

地热水腐蚀性及结垢评价				松柏地热水计算	评价结果
评价项目及指标		评价类型			
结垢评价	碳酸钙结垢趋势评价	$LI \leq 0.5$	可能结垢,没有腐蚀性	$LI = 16.37$	有强腐蚀性
		$0.5 < LI \leq 3$	不结垢,有轻腐蚀性		
		$3 < LI \leq 10$	有中腐蚀性		
		$10 < LI$	有强腐蚀性		
腐蚀作用	腐蚀系数 $Kk$	$Kk > 0$	腐蚀性水	$Kk = -0.753 < 0,$ $Kk + 0.050\ 3[\text{Ca}^{2+}] = 3.904 > 0$	半腐蚀性水
		$Kk < 0, Kk + 0.050\ 3[\text{Ca}^{2+}] > 0$	半腐蚀性水		
		$Kk < 0, Kk + 0.050\ 3[\text{Ca}^{2+}] < 0$	非腐蚀性水		

## 3.4 热储温度估算

在地下水研究和开发利用中,热储温度是划分地热系统的成因类型和评价地热资源潜力的重要参数,但在通常情况下难以直接测量,地热温标方法是提供这一参数的经济有效手段<sup>[8]</sup>。地热温标法,是利用地热流体和矿物在一定温度下达到化学平衡,在随后地热流体温度降低时,仍保持这一平衡的特点来估算深部热储温度的方法<sup>[9]</sup>。目前,热储温度研究中比较常用的是阳离子温标和二氧化硅温标,阳离子温标包括 K-Mg 温标、Na-K 温标和 Na-K-Ca 温标等<sup>[10]</sup>,二氧化硅温标常用石英温标和玉髓温标。

使用地热温标方法的基本前提是作为地热温标的某种溶质或气体和热储中矿物达到平衡状态<sup>[11]</sup>,有时由于成井工艺原因,造成浅层未达到平衡的冷水与地热水混合或发生化学反应,可能导致作为地热温标的化学组分与热储中的矿物不平衡,会造成计算结果偏差。因此需要在检验地热水的水-岩平衡状态和地热温标可靠性分析的基础上,选用合适的地热温标估算热储温度。

### 1) 水-岩矿物平衡判断

Giggenbach(1988)<sup>[12]</sup>提出 Na-K-Mg 三角图解法用于判断水-岩的平衡状态以及是否有浅层水的混入,该方法将地热水划分为完全平衡、部分平衡和未成熟水三种类型<sup>[13-14]</sup>。当地热水处于完全平衡状态时,使用阳离子温标法得到的热储温度会更加可靠;当地热水处于未成熟水的区域,则不宜用阳离子温标计算热储温度<sup>[15]</sup>。

将研究区地热水的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  离子含量经转化后投影至 Na-K-Mg 三角平衡图解上(图 3)。从图 3 可以看出,地热水位于部分平衡区域,说明经深循环的热水沿断裂通道上升过程中,可能受到浅部冷水混合稀释变成了部分平衡水,但总体受到混合的冷水份额较少,接近水-岩平衡状态,因此,可以采用阳离子温标估算热储温度作为参考。

2) 多矿物平衡图解法

Reed 和 Spycher<sup>[16]</sup> 提出多矿物平衡图解法以判断地热系统中热液与矿物之间总体的化学平衡状态。其原理是将水中多种矿物的溶解状态作为温度的函数,若一组矿物在某一特定温度下同时接近平衡,则可判断热水与这组矿物达到了平衡,平衡时温度即为深部热储温度<sup>[17]</sup>。

根据地热水化学分析资料,利用 PHREEQC 软件计算了硬石膏、天青石、玉髓、石英和海泡石 5 种矿物在温度 0~200 °C 的饱和指数  $SI$ ,  $SI=0$  说明矿物处于溶解平衡状态,  $SI<0$  矿物处于未饱和状态,  $SI>0$  矿物处于过饱和状态<sup>[18]</sup>, 并以温度为横坐标, 饱和指数  $SI$  为纵坐标绘制了矿物-热液平衡状态的  $SI-T$  曲线图(图 4)。从图 4 可以看出,地热水中硬石膏、天青石、玉髓、石英和海泡石 5 种矿物显示较好的收敛性,收敛范围在 110~130 °C。其中硬石膏、天青石和海泡石 3 种矿物的趋势线在  $SI=0$  附近相交,交点处温度为 124 °C,同时在该温度下,玉髓、石英矿物也近似饱和,因此交点处温度 124 °C 可作为该样品的热交换平衡温度。

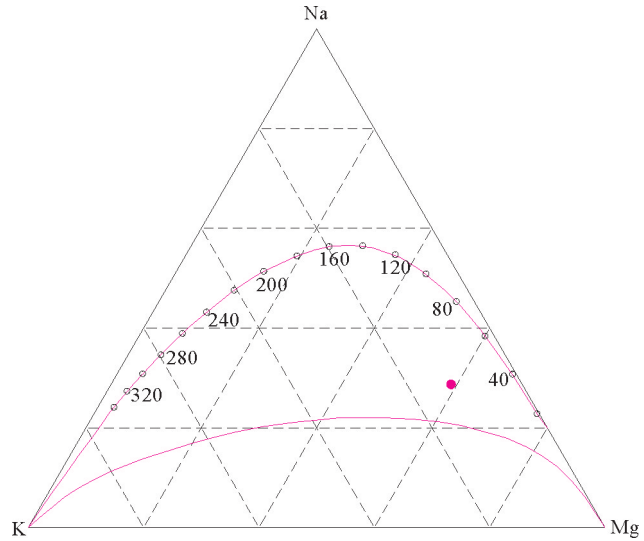


图 3 地热水 Na-K-Mg 三角平衡图解

Fig. 3 Diagram of Na-K-Mg triangular balance of geothermal water

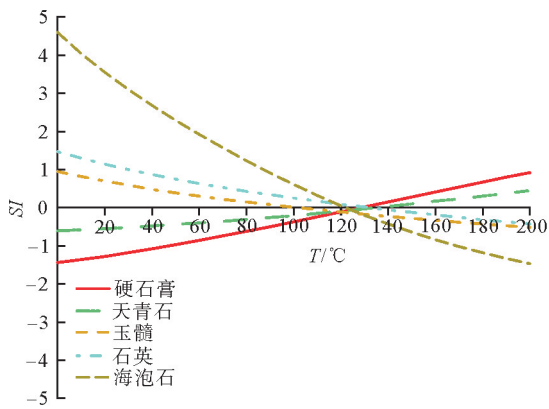


图 4 地热水 SI-T 曲线图

Fig. 4 Geothermal water SI-T curve

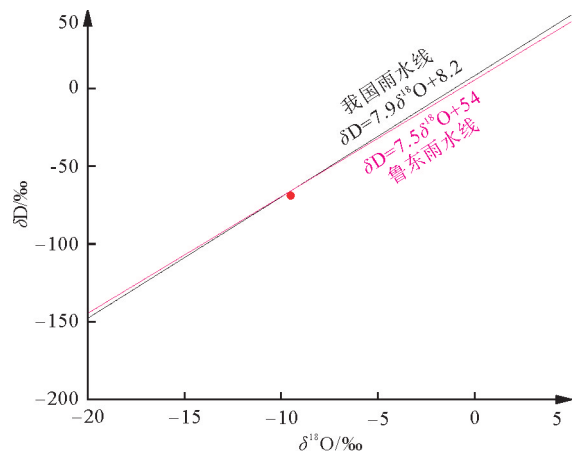


图 5 地热水  $\delta D-\delta^{18}O$  关系图

Fig. 5 Geothermal water  $\delta D-\delta^{18}O$  diagram

3) 地球化学温标法

根据地热水的水化学特征及地热地质条件,按照不同地热温标的适用条件,选取 Na-K 温标、K-Mg 温标、玉髓温标和无蒸汽损失的石英温标公式(表 4)分别计算地热井的热储温度,计算结果见表 5。

表 4 地球化学温标公式选取表

Tab. 4 Selection of formula for geochemical temperature scale

地热温标	公式	来源
Na-K	$T=1\ 390/(1.75-\lg(\text{Na}/\text{K}))-273.15$	Giggenbach, 1988 <sup>[12]</sup>
K-Mg	$T=4\ 410/(13.95-\lg(\text{K}^2/\text{Mg}))-273.15$	Giggenbach, 1988 <sup>[12]</sup>
玉髓	$T=1\ 032/(4.69-\lg\text{S}))-273.15$	Fournier, 1977 <sup>[8]</sup>
石英(无蒸汽损失)	$T=1\ 309/(5.19-\lg\text{S}))-273.15$	Fournier, 1977 <sup>[8]</sup>

注:温标计算公式中各组分的单位为 mg/L。

计算结果显示  $T_{\text{Na-K}} > T_{\text{石英}} > T_{\text{玉髓}} > T_{\text{K-Mg}}$ , 阳离子温标中 Na-K 温标比 K-Mg 温标计算的结果高很多, 这是因为 Na-K 温标对温度变化的反应相对缓慢, 一般适用于循环时间比较长, 且高于 180 °C 的高温地热系统, 在热水温度较低, 或热水受到浅层冷水混合时(部分平衡水或未成熟水), 计算结果偏差较大; 另外从图 4 矿物溶解曲线中, 也可以看出热储温度在 110~130 °C, 所以 Na-K 温标计算结果偏大。

K-Mg 温标相对于温度的变化响应迅速, 受到冷水混合后 K-Mg 平衡被打破可迅速发生再平衡, 因此使得计算结果偏向浅层热交换温度, 计算结果偏低, 所以  $T_{\text{K-Mg}}$  可作为本次热储温度的下限值。

SiO<sub>2</sub> 地热温标中  $T_{\text{石英}}$  大于  $T_{\text{玉髓}}$ 。研究表明, 当温度小于 110 °C 时, 溶液中的二氧化硅含量由玉髓控制; 温度为 110~180 °C 时, 溶液中的石英和玉髓都可以达到平衡; 当温度大于 180 °C 时, 溶液中的二氧化硅含量由石英控制<sup>[19]</sup>。根据上文所述, 热储温度应该大于  $T_{\text{K-Mg}}$  的 116.35 °C, 说明石英和玉髓都可以和溶液达到平衡, 但从图 4 来看, 玉髓饱和度趋势线相较于石英更接近平衡线, 说明玉髓比石英温标更可靠。

综合分析认为, 该区地热水为部分平衡水, 受到了浅部冷水混合的影响, 因此 K-Mg 温标和玉髓温标计算的热储温度值偏小; 多矿物平衡图解法中多种矿物在 124 °C 同时近似饱和, 该温度可靠性更高, 因此确定热储温度为 124 °C。

表 5 松柏地热井热储温度

Tab. 5 Thermal storage temperature of

Songbai geothermal well °C

水温	$T_{\text{玉髓}}$	$T_{\text{石英}}$	$T_{\text{K-Mg}}$	$T_{\text{Na-K}}$
75	117.70	143.68	116.35	170.38

## 4 同位素特征

### 4.1 地热水补给

地热水中稳定同位素  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  的组成通常用于确定地热水的成因<sup>[20]</sup>。根据鲁东地区的雨水线方程  $\delta\text{D}=7.5\delta^{18}\text{O}+5.4$ , 与全国的雨水线方程  $\delta\text{D}=7.8\delta^{18}\text{O}+8.2$ , 绘制了  $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$  关系图(图 5)。通过地热水中  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  测试数据( $\delta\text{D}=-69\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}=-9.5\text{‰}$ )可知, 测点位于全国降水线及鲁东地区雨水线附近, 氧同位素基本未发生漂移, 说明大气降水为地热水的补给来源, 即地热水主要由大气降水入渗地下后经深循环加热形成。

### 4.2 地热水补给范围

大气降水的氢、氧同位素具有高度效应, 即  $\delta^{18}\text{O}$  或  $\delta\text{D}$  值随着高程的增加而降低, 因此可以利用该效应计算地热水补给区的高程, 进而结合地热地质条件推断地热水大致的补给区范围, 见计算公式(2)。另外, 由于  $\delta\text{D}$  在水岩作用过程中比较稳定, 且对区域海拔高度变化的反应更为灵敏<sup>[20]</sup>, 因此选择  $\delta\text{D}$  值计算地下水的补给高程。

$$H = h + \frac{\delta\text{G} - \delta\text{P}}{K} \quad (2)$$

式中:  $H$ —同位素入渗高程(补给区高程), m;  $h$ —取样点高程, m;  $\delta\text{G}$ —水样中的  $\delta\text{D}$  值, ‰;  $\delta\text{P}$ —取样点附近大气降水的  $\delta\text{D}$  值, ‰;  $K$ —同位素高度梯度, ‰/100 m, 即相对高度每变化 100 m 时  $\delta\text{D}$  值的变化量。

地热水的  $\delta\text{D}$  值为  $-69\text{‰}$ , 取样点海拔标高为 167 m, 取研究区北部青岛市崂山区大气降水的  $\delta\text{D}=-63\text{‰}$  作为参考计算值,  $\delta\text{D}$  高度梯度每 100 m 为  $-2.5\text{‰} \sim 2.0\text{‰}$ <sup>[21]</sup>。

经计算,地热水的补给高程为 407~467 m,根据区域地形地貌及水文地质条件判断,补给区范围为南部五莲山、九仙山一带。

### 4.3 热储循环深度估算

根据同位素测试结果可知,该地热水补给来源为大气降水,大气降水沿裂隙或破碎带下渗进行深循环,在循环过程中受高温围岩加热使得温度升高,地热水的温度随入渗循环深度的增大而增加,因此利用式(3)计算地热水的循环深度。

$$H = \frac{T_1 - T_0}{t_g} + h_0 \tag{3}$$

式中: $H$ —地热水循环深度,m; $T_1$ —热储温度, $^{\circ}\text{C}$ ,取多矿物平衡图解法确定的温度  $124^{\circ}\text{C}$ ; $T_0$ —恒温带温度, $^{\circ}\text{C}$ ; $t_g$ —地温梯度, $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ; $h_0$ —恒温带深度,m。

根据井温测量结果(图 6),恒温带底板埋深 40.50 m,恒温带温度  $14.80^{\circ}\text{C}$ ,孔深 1 570 m 的温度为  $87.13^{\circ}\text{C}$ 。经计算,地温梯度为  $4.73^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。

将上述参数代入式(3),计算得出研究区地热水循环深度约为 2 349 m。

## 5 地热成因分析

该区地热水属断裂控制的中低温深循环对流系统,热储类型属花岗岩类带状热储。区域地下水总体由南向北径流,补给区为南部的五莲山、九仙山一带,地下水的补给来源为大气降水。大气降水通过岩石风化裂隙及构造破碎带构成的裂隙网络,沿地形坡度由南向北径流,在径流过程中不断有水流沿构造破碎带、裂隙垂直下渗向深部运移,形成区域流动系统。在深循环过程中,流体不断与高温围岩进行热交换,从而形成地热水,地热水径流至松柏一带,受松柏-小王疃断裂阻挡逐渐滞留、富集。尤其是在松柏-小王疃断裂、香店-松柏断裂和松柏-叩官断裂 3 条断裂交汇部位,次级断裂构造发育,岩石破碎强烈,形成了良好的导水通道及储水空间,更有利于地热水的富集,形成地热资源。另外,松柏-小王疃断裂为控热断裂,正常大地热流增温的地热水,在流至该断裂后,地下水与导热断裂发生水热对流,形成温度更高的地热水。

## 6 结论

- 1) 松柏地热井水温为  $75^{\circ}\text{C}$ ,为热水型低温地热资源,水化学类型属  $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}-\text{Na}$ ,微咸水,地热水富含多种对人体有益的微量元素,其中 F 和  $\text{H}_2\text{SiO}_3$  含量均达到命名矿水浓度,具有较高的理疗价值。
- 2) 根据拉伸指数判断,地热水碳酸钙不结垢,具有强腐蚀性;根据腐蚀系数  $Kk$  评价,地热水为半腐蚀性水。
- 3) 松柏地热井热储温度为  $124^{\circ}\text{C}$ ,热循环深度 2 349 m。通过同位素分析认为,松柏地热井地下水补给

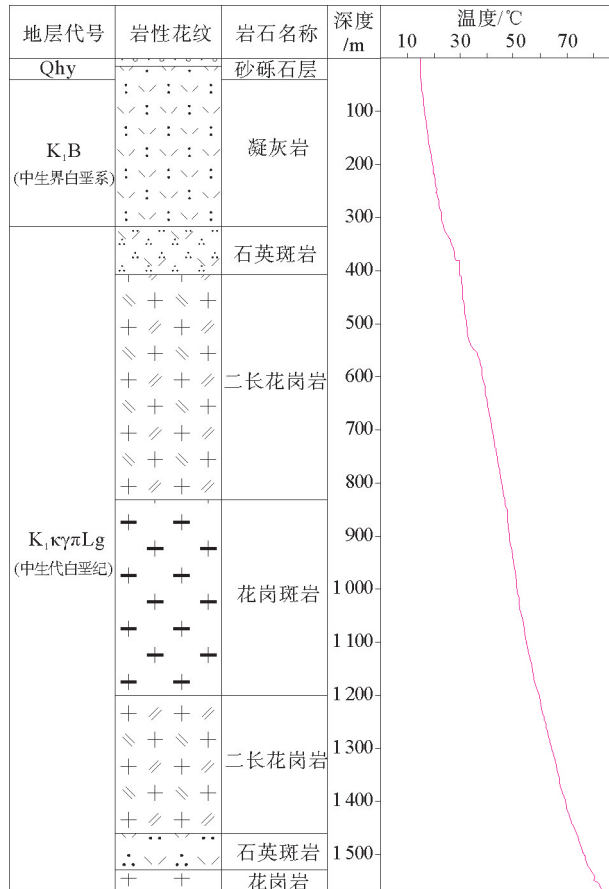


图 6 松柏地热井钻孔柱状图及测温曲线图

Fig. 6 Borehole histogram and temperature measurement curve of Songbai geothermal well



来源主要为大气降水,补给高程为 407~467 m,补给区范围为东南五莲山、九仙山一带。

4) 研究区地热水属断裂控制的中低温深循环对流系统,热储类型属花岗岩类带状热储。大气降水沿基岩裂隙和构造破碎带下渗形成深部地热水,径流至松柏地区在断裂交汇处富集,形成地热资源。

#### 参考文献:

- [1]李常锁,武显仓,孙斌,等.济南北部地热水水化学特征及其形成机理[J].地球科学,2018,43(增1):313-325.  
LI Changsuo,WU Xianchang,SUN Bin,et al.Hydrochemical characteristics and formation mechanism of geothermal water in Northern Ji'nan[J].Earth Science,2018,43(S1):313-325.
- [2]AKRAM W,CHEN W,HUANG C S,et al.Genesis of geothermal waters in Suichuan county,China:An integrated method constrained by the hydrochemical and isotopic characteristics[J/OL].Water,2022,14:1591.DOI:10.3390/w14101591.
- [3]YUAN J F,XU F,ZHENG T L.The genesis of saline geothermal groundwater in the coastal area of Guangdong Province:Insight from hydrochemical and isotopic analysis[J/OL].Journal of Hydrology,2022,605.DOI:10.1016/j.jhydrol.2021.127345.
- [4]中华人民共和国标准.GB/T 8538—2016,饮用天然矿泉水检验方法[S].
- [5]中华人民共和国国家标准.GB/T 11615—2010,地热资源地质勘查规范[S].
- [6]刘久潭,李颖智,高宗军,等.拉萨河流域中下游地区水化学及地表水-地下水转化关系研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(5):10-20.  
LIU Jiutan,LI Yingzhi,GAO Zongjun,et al.Hydrochemistry and relationship between groundwater and surface water in the middle and lower reaches of Lhasa river basin[J].Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science),2020,39(5):10-20.
- [7]宋绵,龚磊,王新峰,等.阜平县地热水水化学特征及结垢腐蚀性研究[J].地质论评,2020,66(增1):146-148.  
SONG Mian,GONG Lei,WANG Xinfeng,et al.Study on chemical characteristics and scale corrosion of geothermal water in Fuping county[J].Geological Review,2020,66(S1):146-148.
- [8]FOURNIER R O.Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems[J].Geothermics,1977,5:41-50.
- [9]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,2021,67(3):828-840.  
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,2021,67(3):828-840.
- [10]马宝强,张凌鹏,范斌,等.兰州市区地热水地球化学特征分析[J].干旱区资源与环境,2019,33(9):125-132.  
MA Baoqiang,ZHANG Lingpeng,FAN Bin,et al.Analysis of geochemical characteristics of geothermal water in Lanzhou city[J].Journal of Arid Land Resources and Environment,2019,33(9):125-132.
- [11]赵佳怡,张薇,张汉雄,等.四川巴塘地热田水文地球化学特征及成因[J].水文地质工程地质,2019,46(4):81-89.  
ZHAO Jiayi,ZHANG Wei,ZHANG Hanxiong,et al.Hydrogeochemical characteristics and genesis of the geothermal fields in Batang of Sichuan[J].Hydrogeology and Engineering Geology,2019,46(4):81-89.
- [12]GIGGENBACH W F.Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg Ca geothermometers[J].Geochimica et Cosmochimica Acta,1988,52:2749-2765.
- [13]王治祥,蒋晶,邹胜章,等.渝东南深部地热温度解析[J].中国岩溶,2019,38(5):663-669.  
WANG Zhixiang,JIANG Jing,ZOU Shengzhang,et al.Analysis of deep geothermal temperature in Southeast Chongqing [J].Carsologica Sinica,2019,38(5):663-669.
- [14]刘元晴,周乐,吕琳,等.山东鲁中山区地热地质特征及热水成因[J].地质通报,2020,39(12):1908-1918.  
LIU Yuanqing,ZHOU Le,LÜ Lin,et al.Geothermal geological characteristics and genesis of hot water in the central mountain area of Shandong Province[J].Geological Bulletin of China,2020,39(12):1908-1918.
- [15]卢丽,王喆,邹胜章,等.四川昭觉县地热温度解析及成因模式[J].地质通报,2021,40(2/3):434-441.  
LU Li,WANG Zhe,ZOU Shengzhang,et al.Analysis of geothermal temperature and genetic model in Zhaojue County of Sichuan Province[J].Geological Bulletin of China,2021,40(2/3):434-441.
- [16]REED M,SPYCHER N. Calculation of pH and mineral equilibria in hydrothermal waters with application to geothermometry and studies of boiling and dilution[J].Geochimica et Cosmochimica Acta,1984,48:1479-1492.

- (1):1-12.
- [12]王宁,张铜耀,明承栋,等.珠江口盆地东部珠一坳陷古近系不同类型烃源岩和原油热裂解生气特征[J].海洋地质前沿,2022,38(8):67-76.  
WANG Ning,ZHANG Tongyao,MING Chengdong,et al.Different types of Paleogene source rocks and characteristics of pyrolysis gas generation of crude oil in Zhuyi Depression,Pearl River Mouth Basin[J].Marine Geology Frontiers,2022,38(8):67-76.
- [13]田德瑞,牛成民,王德英,等.渤海海域辽西凹陷中央反转带原油成因类型及成藏特征[J].高校地质学报,2021,27(4):444-458.  
TIAN Derui,NIU Chengmin,WANG Deying,et al.Genetic types and accumulation of crude oil in the central inversion zone in the Liaoxi Depression,Bohai Sea[J].Geological Journal of China Universities,2021,27(4):444-458.
- [14]朱俊章,候读杰,黄宝家,等.文昌 13-1 油田部分混采油井产能分配计算[J].天然气地球科学,2004,15(2):187-190.  
ZHU Junzhang,HOU Dujie,HUANG Baojia,et al.The calculation of the output proportion of multi-oil zone co-recovery wells in Wenchang 13-1 oilfield[J].Natural Gas Geoscience,2004,15(2):187-190.
- [15]朱俊章,施和生,庞雄,等.白云深水区东部油气成因来源与成藏特征[J].中国油气勘探,2021,4(4):20-29.  
ZHU Junzhang,SHI Hesheng,PANG Xiong,et al.Origins and accumulation characteristics of hydrocarbons in eastern Baiyun deepwater area[J].Petroleum Geology,2021,4(4):20-29.
- [16]芮志锋,林畅松,杜家元,等.关键层序界面识别及其在岩性油气藏勘探中的意义:以惠州凹陷珠江组为例[J].岩性油气藏,2019,31(1):96-105.  
RUI Zhifeng,LIN Changsong,DU Jiayuan,et al.Key sequence surfaces identification and its significance in the exploration of lithologic reservoirs:A case of Zhujiang Formation in Huizhou Depression[J].Lithologic Reservoirs,2019,31(1):96-105.  
(责任编辑:高丽华)

### (上接第 23 页)

- [17]MAO X M,ZHU D B,NDIKUBWIMANA I,et al.The mechanism of high-salinity thermal groundwater in Xinzhou geothermal field,South China:Insight from water chemistry and stable isotopes[J/OL].Journal of Hydrology,2021,593.DOI:10.1016/j.jhydrol.2020.125889.
- [18]高宗军,刘久潭,李颖智,等.拉萨河谷地区孔隙地下水水化学特征及水文地球化学模拟[J].山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(1):1-10.  
GAO Zongjun,LIU Jiutan,LI Yingzhi,et al.Hydrochemical characteristics and hydrogeochemical simulation of pore groundwater in Lhasa valley area[J].Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science),2020,39(1):1-10.
- [19]卢兆群,彭明章,董妍,等.山东平阴地热水水文地球化学特征及成因分析[J].中国地质调查,2022,9(1):104-114.  
LU Zhaoqun,PENG Mingzhang,DONG Yan,et al.Hydrogeochemical characteristics and genesis analysis of geothermal water in Pingyin of Shandong Province[J].Geological Survey of China,2022,9(1):104-114.
- [20]QIU X L,WANG Y,WANG Z Z,et al.Determining the origin,circulation path and residence time of geothermal groundwater using multiple isotopic techniques in the Heyuan Fault Zone of Southern China[J].Journal of Hydrology,2018,567:339-350.
- [21]高宗军,孙智杰,杨永红,等.山东省地热水水化学研究及赋存特征[J].科学技术与工程,2019,19(20):85-90.  
GAO Zongjun,SUN Zhijie,YANG Yonghong,et al.Occurrence characteristics and hydrochemical characteristics of geothermal water in Shandong Province[J].Science Technology and Engineering,2019,19(20):85-90.  
(责任编辑:高丽华)