

doi: 10.12097/gbc.2022.03.022

山东威海市呼雷汤地热水化学、成因与开发潜力

袁星芳¹, 杨明爽^{1*}, 王晓翠², 柳禄湧¹, 钟振楠¹, 李方舟¹

YUAN Xingfang¹, YANG Mingshuang^{1*}, WANG Xiaocui², LIU Luyong¹, ZHONG Zhennan¹,
LI Fangzhou¹

1. 山东省第六地质矿产勘查院, 山东 威海 264209;

2. 青岛大学, 山东 青岛 266071

1. No.6 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Weihai 264209, Shandong, China;

2. Qingdao University, Qingdao 266071, Shandong, China

摘要: 山东省储藏丰富的中低温地热资源, 呼雷汤是省内唯一可自流的温泉, 其成因模式不明一定程度上影响了地热资源的有效利用。为查明呼雷汤成因模式, 综合运用地面调查、物探、样品分析测试等方法进行分析研究。结果表明, 呼雷汤的形成在区域上受荣成断裂控制, 局部受青龙河断裂和汤西断裂控制, 其补给水源为大气降水, 热源为地热增温, 估算补给高程为 436~559 m, 热储温度为 109~118°C, 循环深度为 2159~2368 m。综上所述, 呼雷汤的成因模式为: 在伟德山山区获得大气降水补给后, 沿荣成断裂下渗参与到地下水循环系统中, 在径流过程中通过吸收围岩中的热量发生溶滤作用和水-岩相互作用, 在地下 2 km 左右形成温度约 110°C 的 SO₄-Cl-Na 型水; 由于温度和压力的升高, 地下水沿构造裂隙向地表流动, 在上涌过程中混入部分地下水, 温度降低, 最后在青龙河断裂和汤西断裂的交会处、静水压力最小的部位出露成泉。通过地热水开发利用潜力评价分析可知, 地热水可用于理疗、洗浴和供暖, 每年可供 1840 个床位理疗、46 万人洗浴、908×10⁴ m² 面积供暖。

关键词: 呼雷汤; 水化学特征; 成因模式; 开发潜力; 山东

中图分类号: P314 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)01-0143-10

Yuan X F, Yang M S, Wang X C, Liu L Y, Zhong Z N, Li F Z. Study on the hydrochemistry, genesis and development potential of Huleitang geothermal water in Weihai City, Shandong Province. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(1): 143-152

Abstract: Abundant medium and low temperature geothermal resources are stored in Shandong Province. Huleitang spring, located in Weihai of Shandong province, is a unique artesian spring in this area. Due to some unidentified genesis of Huleitang spring, the effective utilization of the geothermal resources cannot implement to a certain extent. In order to find out the genetic model of the Huleitang spring, this study comprehensively uses ground investigation, geophysical prospecting and sample analysis to analyze and study. The results show that the formation of the Huleitang spring is controlled by Rongcheng fault in the region, and by Qinglonghe fault and Tangxi fault in the local area. Its source recharges from atmospheric precipitation, and its heat source is geothermal heating. The estimated recharge elevation is 436~559 m, the calculated geothermal reservoir temperature is 109~118°C, and the calculated circulation depth is 2159~2368 m. In summary, the genetic model of the Huleitang spring is as follows: recharges from precipitation of Weide mountain area, infiltrates down along the Rongcheng fault and participates in the groundwater circulation system. In the process of runoff, the water type of SO₄-Cl-Na was formed with the temperature of 110°C about 2 km underground by absorbing the heat of surrounding rock, dissolving and filtering, and water-rock interaction. Due to the increase of temperature and pressure, the hot water flows to the surface along the structural fractures. In the upwelling process, it mixes with some cold water, and the temperature

收稿日期: 2022-03-15; 修订日期: 2022-06-22

资助项目: 山东省科技厅项目《胶东地区典型地热田流体地球化学特征及成因研究》(编号: 2019GSF109053)和威海市地勘基金项目《威海市地热资源可行性勘查及开发利用规划编制》(编号: 威自然资字 [2019]64 号)

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

* 通信作者: 杨明爽(1978-), 男, 正高级工程师, 从事水工环地质工作。E-mail: 1396590274@qq.com

decreases. However, it emerges as a free-flow spring at the intersection of Qinglonghe fault and Tangxi fault where is distributed with the minimum hydrostatic pressure. According to the evaluation and analysis of geothermal water development and utilization potential, geothermal water of Hulaitang spring area can be used for physiotherapy, bathing and heating, which can provide 1840 beds for physiotherapy, 460,000 people for bathing and 9.08 million m² for heating each year.

Key words: Huleitang; hydrochemical characteristics; genetic model; development potential; Shandong

“双碳”目标的实现,对能源结构的调整提出了新要求。地热作为一种清洁能源,具有功能多、用途广、易开采等特点,对其研究和关注逐渐升温(王贵玲等,2017a, b; 王婉丽等,2017; 张彧齐等,2018; 谢娜等,2020; 袁星芳等,2020)。中国地热资源较丰富,高温地热带和中低温地热资源均有分布(王洁清等,2017; 余鸣潇,2019),山东省已发现水温高于49℃的天然温泉14处,出水口温度介于49~88℃之间,属中低温地热资源(金秉福等,2000; 赵辉等,2019)。前人对山东省温泉的形成条件、水化学特征、热水年龄、成因机理等做了诸多研究,取得了丰硕的成果。李学伦等(1997a)总结了山东半岛温泉的形成机理,为深循环-地热增温,并根据经验公式推算,其最小循环深度介于1503~3084 m之间;金秉福等(1999)认为,胶东半岛大部分温泉出露在背斜核部与多组断裂交会处,大地热流为其主要热源,地表水为其主要补给水源;栾光忠等(2002)认为,山东半岛温泉为中低温地热系统,属于深循环“断控型”;杜桂林等(2012)采用地球化学方法推断宝泉汤的形成受海水和大气降水双重因素影响;高宗军等(2019)利用同位素结果推断,鲁东和鲁中南地区地热水的补给来源主要为大气降水,鲁西北地区地热水的补给来源为大气降水、古沉积水和古封存水的混合来源;江海洋等(2018)利用地球化学方法分析了沂沭断裂带临沂段地热资源的水化学特征及环境同位素特征,结果表明,区内地热水的主要补给来源为大气降水,少数可能存在古沉积水,并且估算了地热流体的平均年龄在3500 a左右;史猛等(2019)认为,胶东半岛地热资源主要赋存在北东向断裂上盘与北西向断裂上盘相交的“V”形区域。

呼雷汤位于山东省威海市境内,是省内唯一可自流的温泉,目前针对呼雷汤尚未开展过系统的研究工作,温泉的成因及开采潜力有待进一步核实。因此,本文综合运用地面调查、物探、样品分析测试等方法总结了其成因模式,采用热储法评价了其开采潜力,以期今后地热资源的合理利用、有效保护和科学管理提供技术支撑。

1 地质背景条件

1.1 地理位置

呼雷汤出露于山东省威海市文登区高村镇汤西村附近青龙河西岸的一级阶地上,标高为+15.48 m,水温约66℃,出水量为504.21 m³/d,地处丘陵区地势东北高西南低,伟德山为其主要山脉,最高点海拔高程为+553 m。属北温带季风型大陆性气候,雨量充沛,温度宜人。多年平均气温为15℃,雨季和旱季界限较明显,雨季多出现在6—10月,旱季多出现在11月至翌年5月(威海市统计局,2020)。青龙河为文登区的第二大河流,长度31 km,控制面积235 km²,常年有水。

1.2 地质条件

在大地构造单元划分上,呼雷汤位于秦岭-大别-苏鲁造山带、胶南-威海隆起区、威海隆起区(贾东,1993; 李曙光等,2001; 程裕淇,2004)。区内地层明显受地形地貌控制,主要出露在河床和一级阶地上,厚2~10 m,岩性以砂土和粘土为主;区内深大断裂为荣成断裂,次级断裂为青龙河断裂,近东西向为汤西断裂;岩浆岩分布广泛,岩性以二长花岗岩或花岗质片麻岩为主。

呼雷汤发育在新元古代南华纪二长花岗质片麻岩岩体内,热储为花岗质片麻岩的构造破碎带或裂隙带。呼雷汤区域上受荣成断裂控制,局部受青龙河断裂和汤西断裂控制。荣成断裂南起五莲,北东至荣成入海,走向50°~60°,倾向南东,倾角60°~70°,宽度几米至几十米;青龙河断裂走向约40°,倾向东,倾角约65°,宽度约25 m;汤西断裂走向约90°,倾向北,倾角约60°,宽度约20 m(山东省地质矿产局,1995; 余卓伟,2016)(图1)。

1.3 水文地质条件

依据区内地层岩性、地质构造及地下水赋存条件等因素,将区内地下水类型划分为松散岩类孔隙水和基岩裂隙水。松散岩类孔隙水主要赋存在第四系松散沉积物中,含水层岩性为中细砂及细砂,靠近



图 1 呼雷汤地热地质图

Fig. 1 Geothermal geological map of Huleitang

1—第四系松散沉积物; 2—白垩纪二长花岗岩; 3—白垩纪石英二长岩; 4—三叠纪正长花岗岩; 5—南华纪二长花岗质片麻岩;
6—断裂构造; 7—地下水流向; 8—地表水流向; 9—呼雷汤

河床富水性中等, 单井涌水量 500~1000 m³/d, 远离河床富水性减弱, 单井涌水量小于 500 m³/d。地下水年变幅小于 1.0 m, 最高水位出现在 7—10 月, 最低水位出现在 3—5 月, 其主要补给来源为大气降水, 径流方向与地形变化基本一致, 人工开采为主要排泄途径。

区内基岩裂隙水按照含水层岩性、地质构造、地下水赋存条件等因素, 可划分为层状岩类裂隙水和块状岩类裂隙水, 其主要补给来源为大气降水, 径流方向与地形趋势基本一致, 人工开采为主要排泄途径。层状岩类裂隙水主要赋存在花岗质片麻岩裂隙中, 富水性差, 单井涌水量一般小于 100 m³/d, 地下水年变幅一般小于 3 m。块状岩类裂隙水主要赋存在花岗岩、二长岩裂隙中, 富水性差, 单井涌水量一般小于 100 m³/d, 地下水年变幅一般小于 4 m。

2 水化学特征分析

野外样品采集时, 对地热井的坐标和水温进行了现场测定(图 2)。坐标采用手持 GPS 测定, 精度为 5 m; 水温采用 TED-1310 数字点温仪测定, 精度为 0.01℃。

取样前, 首先进行了约 30 min 的抽水以便彻底清洗井口和井管, 然后清洗采样瓶 3~5 次。全分析

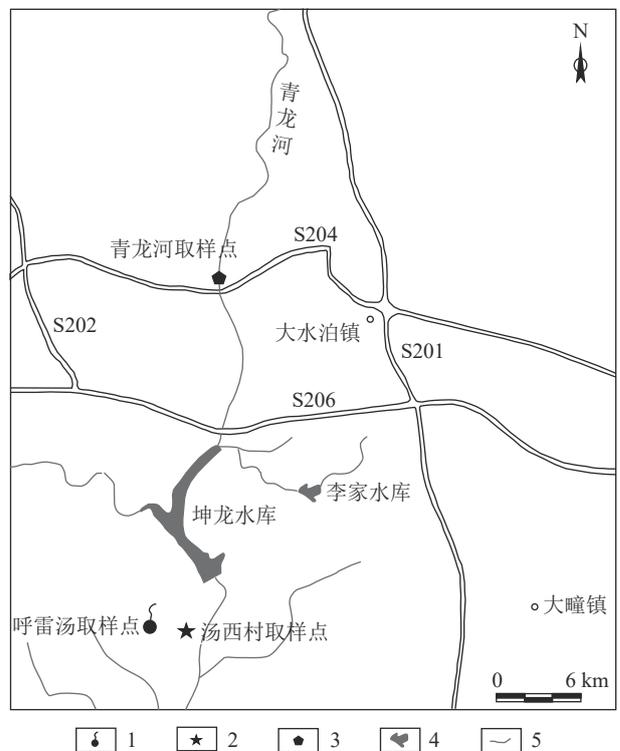


图 2 采样点位置分布图

Fig. 2 Location distribution diagram of sampling points

1—地热水取样点; 2—地下水取样点; 3—地表水取样点;
4—水库; 5—河流

采集样品 5 L, 放置在聚乙烯塑料瓶中, 原样保存; 氢氧同位素采集样品 0.5 L, 放置在聚乙烯塑料瓶中, 原样保存; 氡放射性同位素放置在玻璃瓶中, 密封保存, 采样时间精确至秒。取样后, 立即送往原国土资源部地下水矿泉水及环境监测中心进行化验分析。全分析参照 GB 8538—2016、DZ/T 0064—1993、HJ 826—2017 等规范进行测定(中华人民共和国地质矿产部, 1993; 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会等, 2016; 环境保护部, 2017), 仪器为电感耦合等离子体发射光谱仪, 型号为 Icap6300; 氢氧同位素参照 JCZX-BZ-002—2015(中华人民共和国工业和信息化部, 2015) 等规范进行测定, 仪器为水同位素分析仪, 型号为 L2130i; 放射性同位素参照 GB 8538—2016 等规范进行测定, 仪器为氡钍分析仪, 型号为 FH463B。

为保证化验数据的可靠性, 本文采用计算阴阳离子毫克当量总数的方法对所有化验数据进行了复核。一般而言, 可靠的化验结果中阴阳离子毫克当量总数相等或误差(δ)小于 5%。 δ 计算公式:

$$\delta \leq \frac{(\sum K - \sum A)}{\sum K + \sum A} \times 100\% \leq 5\% \quad (1)$$

式中: δ 为误差; $\sum K$ 为阴离子毫克当量总数; $\sum A$ 为阳离子毫克当量总数。

本次采集的 8 个水样误差 δ 范围为 0.07%~

3.17%, 小于分析误差允许值 5%, 说明化验结果可靠。

2.1 综合指标

呼雷汤地热水的矿化度为 948.97~1077.48 mg/L, 变化范围不大, 为淡水—微咸水, 说明多年开采未对地热水化学成分产生明显的影响。pH 值的高低一般由水中 H^+ 含量的多少决定, 反映水环境的酸碱程度, 影响水中化学物质的电离程度、化学元素的存在状态及水-岩相互作用(周训, 2010; 许鹏等, 2018; 刘春雷, 2023), 多年测试结果显示(表 1), 呼雷汤地热水中的 pH 值为 8.0~8.4, 偏碱性, 分析与 Na^+ 、 Ca^{2+} 含量高离子水解有关。

2.2 水化学成分

2.2.1 水化学类型

根据舒卡列夫分类法(Piper, 1944), 呼雷汤地热水中 Na^+ 的毫克当量约 83%, SO_4^{2-} 毫克当量约 55%, Cl^- 毫克当量约 33%, 含量大于 25% 毫克当量的阴阳离子可进行组合定名。因此确定地热水化学类型为 $SO_4 \cdot Cl-Na$ 型, 测试数据均落在 Piper 三线图菱形分区的 7 区, 呈碱性, 说明其水化学成分多年来未发生明显变化(图 3)。

2.2.2 主要组分

呼雷汤地热水中的 Na^+ 含量最多, 为 254.5~290.0 mg/L(表 1; 图 4), 与周边地下水、地表水相比

表 1 呼雷汤水化学测试数据

Table 1 Chemical analyses of Huleitang hot spring

mg/L

分析项目	2002年地热水	2005年地热水	2009年地热水	2015年地热水	2018年地热水	2020年地热水	2020年地下水	2020年地表水
pH	8.2	8.0	8.4	8.04	8.36	8.16	7.31	7.33
K^+	15.09	14.61	13.25	12.93	13.56	11.6	2.42	3.13
Na^+	285.4	254.5	290.0	255.90	262.10	281.4	36.62	31.81
Ca^{2+}	38.8	32.03	38.16	34.31	34.33	38.01	66.86	67.17
Mg^{2+}	0.98	0.49	<0.30	0.57	0.53	0.68	25.61	22.97
HCO_3^-	79.33	78.23	76.57	63.86	58.05	76.8	115.8	176.2
Cl^-	169.7	154.56	167.72	163.2	172.78	163.9	58.12	70.03
SO_4^{2-}	350	350	371.18	351.3	357.67	352	70.52	72.16
F^-	/	/	10.00	7.38	5.89	8.72	0.33	0.29
可溶 SiO_2	100	98	110	113.4	108.53	100	30.33	18.51
偏硅酸	130	127.40	143	147.42	141.09	130	39.43	24.06
Li	/	/	0.31	0.29	0.3	0.434	<0.005	<0.005
Sr	/	/	2.62	2.22	2.2	2.458	0.548	0.606
TDS	1065.94	948.97	1077.48	982.91	985.25	1039	528.6	503.1

注: 2020年为实测数据, 测试单位为原国土资源部地下水矿泉水及环境监测中心, 其余为收集数据

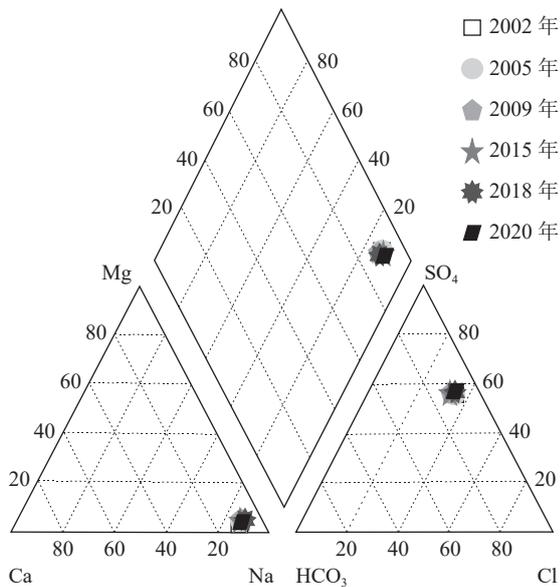


图 3 呼雷汤 Piper 三线图(据 Piper, 1944 修改)

Fig. 3 Piper diagram of Huleitang hot spring

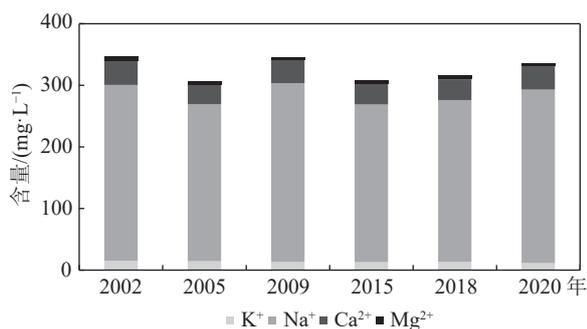


图 4 阳离子分布柱状图

Fig. 4 Histogram of cation distribution

含量明显偏高。一方面是与 Na^+ 的溶解度和迁移能力强有关, 另一方面是 Na^+ 与周边围岩发生了水-岩相互作用。而地热水中的 Mg^{2+} 含量与周边地下水、地热水相比含量明显偏低, 一方面是水温越高, Mg^{2+} 溶解度越低; 另一方面是 Mg^{2+} 与周边围岩发生了阳离子交换作用。

呼雷汤地热水中的 SO_4^{2-} 含量最多, 为 350~371.18 mg/L(表 1; 图 5), 与周边地下水、地表水相比含量明显偏高, 是因为地热水在长时间、远距离、深循环的径流过程中溶解了周边围岩的硫酸盐矿物质。

2.2.3 次要组分

呼雷汤地热水中的次要组分以偏硅酸为主, 含量为 127.40~147.42 mg/L(表 1), 属于硅水, 与周边地下水、地表水相比含量明显偏高。一方面是因为

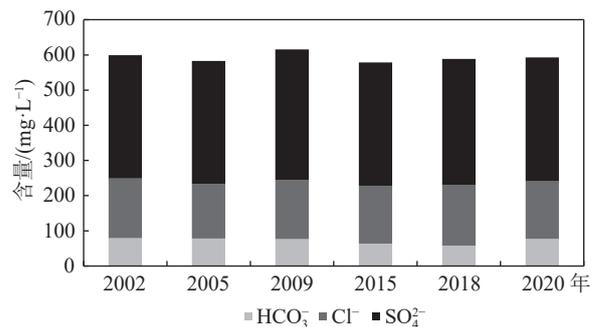


图 5 阴离子分布柱状图

Fig. 5 Histogram of anion distribution

区内大面积出露花岗质片麻岩, 岩石中含有大量的 SiO_2 , 在经历长时间、远距离、深循环径流过程中发生了水-岩相互作用; 另一方面是因为温度越高, 硅酸盐的溶解度越大(周训, 2010; 王晓翠, 2022)。

2.2.4 微量组分

地热水中的微量元素 Li、Sr、F 含量较周围地下水、地表水明显偏高, 是因为地热水在长时间、远距离、深循环径流过程中溶解了围岩中的含 F、含 Li、含 Sr 等矿物质。一般来说, 温度越高, 含 Li、含 Sr 矿物质的溶解度越大。另外, 通常地下水中 F 的含量很低, 而地热水中 F 含量高的原因是 pH 值的影响了 Ca^{2+} 的活度, pH 值越高, Ca^{2+} 活度越低, 越利于 F 富集。

2.3 同位素特征

中低温地热资源中的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 含量较稳定, 可以作为地下水运移的示踪剂; 另外也可以用来研究地热水的补给来源(Craig, 1961a, b; 周训, 2010; 龙汭等, 2014), 公式:

$$\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10 \quad (2)$$

$$\delta\text{D} = 7.46\delta^{18}\text{O} + 0.9 \quad (3)$$

呼雷汤地热水及其周边地下水、地表水中的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 均落在全球大气降水线和中国东部大气降水线之间(表 2; 图 6), 说明补给来源均为大气降水。

一般而言, 大气降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值的高低与高程值的大小息息相关, 因此根据高程效应可以推算补给区的高程值, 进而对比周边地形地貌大致确定补给区(王恒纯, 1991; 汪集旻等, 1993):

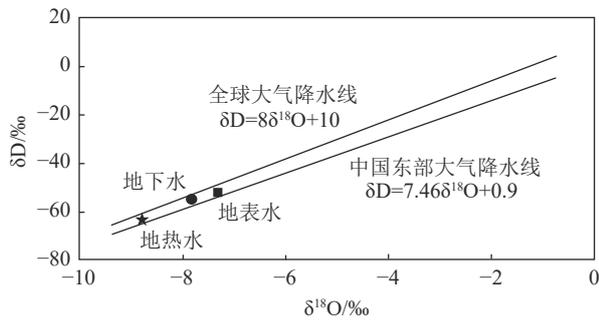
$$H = \frac{\delta G - \delta P}{K} + h \quad (4)$$

式中: H 为补给区的高程, 单位 m; h 为温泉出露点的高程, 单位 m; δG 为温泉出露点的 δD 或

表2 水样 δD 和 $\delta^{18}O$ 测试数据Table 2 Data of δD and $\delta^{18}O$ in water samples

样品类型	$\delta D/\text{‰}$	$\delta^{18}O/\text{‰}$
呼雷汤(地热水)	-64	-8.8
汤西村(地下水)	-54	-7.8
青龙河(地表水)	-52	-7.3

注: 取样时间为2020年, 测试单位为原国土资源部地下水矿泉水及环境监测中心

图6 水样 δD - $\delta^{18}O$ 关系图Fig. 6 Plot of δD and $\delta^{18}O$ in water samples

$\delta^{18}O$ 值; δP 为温泉出露点周边大气降水 δD 或 $\delta^{18}O$ 值, 威海市大气降水的 δD 为 -47.7‰ , $\delta^{18}O$ 为 -6.36‰ (王聿军等, 2011); K 为温泉出露点周边大气降水 δD 或 $\delta^{18}O$ 的高程梯度, $\delta^{18}O$ 取 $-0.58\text{‰}/100\text{ m}$, δD 取 $-3.0\text{‰}/100\text{ m}$ (拓明明等, 2018; 袁星芳等, 2023)。根据公式(4)求得呼雷汤地热水的补给高程为 $+436\sim+559\text{ m}$ (表3)。

3 地热成因模式分析

3.1 补径排条件

3.1.1 补给条件

(1) 水源

对比分析温泉出露点周边的地形地貌, 伟德山的高程值为 $+553\text{ m}$, 在估算高程 $+436\sim+559\text{ m}$ 范围内, 由此推测呼雷汤东北部的伟德山为其补给区。

表3 呼雷汤补给高程

Table 3 Estimated recharge altitude of Huleitang

温泉名称	取样点高程/m	$\delta D/\text{‰}$	$\delta^{18}O/\text{‰}$	补给高程/m	
				公式(4)(δD)	公式(4)($\delta^{18}O$)
呼雷汤	15.48	-64	-8.8	436	559

(2) 热源

目前, 已知的热源包括岩浆活动残余热、地热增温、放射性元素衰变热等(拓明明等, 2018)。区内岩浆活动时间多介于 $105\sim 225\text{ Ma}$ 之间(张田等, 2007), 而地热水的形成时间多为 $5\sim 10\text{ a}$, 少数为 $30\sim 40\text{ a}$ (张涛, 2011)。因此, 从热水形成年龄和岩浆活动时间看, 热源为岩浆活动残余热的可能性不大。另外, 通过分析测试发现, 区内地热水中普遍含有 Ra、Rn、U 等放射性元素, 说明温泉的形成与放射性元素有关联, 依据相关公式, 放射性元素衰变热与参数取值有关, 即便参数取值非常大, 求得的热量也很小, 不足以支撑温泉的形成, 因此, 放射性衰变热的可能性也不大(汪集旻等, 1993; 栾光忠等, 2002)。因此, 结合区内地热水形成的地质条件, 认为呼雷汤形成的主要热源是地热增温, 即深部向上传输的正常偏高的区域热背景, 通常用热储温度来表示。

热储温度一般采用阳离子温标法和 SiO_2 温标法来估算。阳离子温标法的原理是根据矿物质的平衡状态来推断热储温度, 因此计算前应判断溶液-矿物的平衡状态(Rybach et al., 1986; 王莹等, 2007)。呼雷汤落在部分平衡水区域, 为未成熟水(图7), 说明地热水未达到平衡状态。因此, 不适宜用阳离子温标法计算。

SiO_2 温标法的原理是 SiO_2 矿物质在地热水中的溶解-沉淀平衡理论(汪集旻等, 1993), 一般来说, 温度越高 SiO_2 越容易溶解, 温度越低 SiO_2 越容易沉

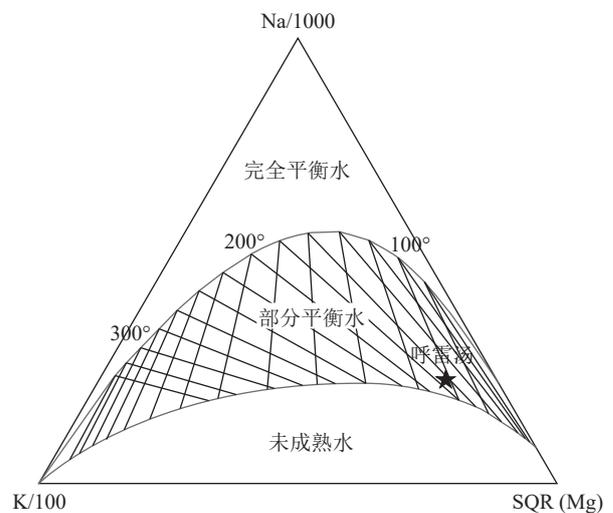


图7 Na-K-Mg 三角图

Fig. 7 Na-K-Mg diagram

淀。当地热水温度小于 300℃ 时, 压力、盐度等因素对 SiO₂ 的溶解度影响很小。因此, SiO₂ 温标法能够用来估算热储温度。依据化验结果绘制 SiO₂ 溶解度曲线可以看出, 呼雷汤落在玉髓溶解曲线附近(图 8), 说明 SiO₂ 矿物质在热水中的平衡状态主要受玉髓影响。因此, 宜采用玉髓溶解曲线估算热储温度, 公式:

$$T = \frac{1032}{4.69 - \log \text{SiO}_2} - 273.15 \quad (5)$$

式中: SiO₂ 为 SiO₂ 浓度, 单位 mg/L; T 为热储温度, 单位 °C。估算呼雷汤热储温度为 109~118℃, 即地热水循环下界深度的温度为 109~118℃。

3.1.2 径流过程

通过热储温度可进一步估算循环深度, 它反映了地热水系统的更新速度, 是研究地热水补径排条件的重要参考依据。一般来说, 地热水温度的增加与深度的加深呈正比关系, 即符合正常的地温梯度, 因此可以根据威海市地温梯度估算地热水的循环深度(李学伦等, 1997b; 郭忠杰等, 2015), 公式:

$$Z = G (t_z - t_0) + Z_0 \quad (6)$$

式中: G 为地温梯度, 单位 °C/m, 取 4.4°C/100 m(杜桂林等, 2012); t_z 为热储温度, 单位 °C; t₀ 为威海市多年平均气温, 单位 °C, 取 15°C; Z₀ 为常温带深度, 单位 m, 取 20 m(杜桂林等, 2012)。计算循环深度 2159~2368 m(表 4), 与李学伦等(1997a)所得结论相符。可见, 呼雷汤温泉是经历长时间、远距离、

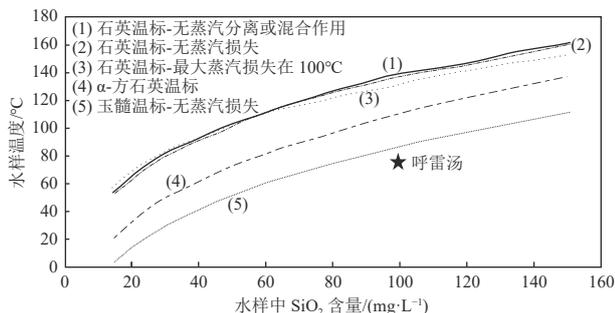


图 8 SiO₂ 溶解度曲线图

Fig. 8 Solubility curve of SiO₂

表 4 呼雷汤的循环深度

Table 4 Estimated circulation depth of Huleitang

温泉名称	G/m/°C	t _z /°C	t ₀ /°C	Z ₀ /m	Z/m
呼雷汤	22.7	109~118	15	20	2159~2368

深循环而形成的。

3.1.3 排泄特征

大气降水降落后首先形成地表水, 在重力作用下通过断裂构造参与到地下水循环系统中, 在径流过程中, 通过不断吸收周边围岩中的热量进而形成地下热水。呼雷汤在区域上受荣成断裂控制, 深大断裂为地表水入渗、地下水径流提供了良好的运移通道; 深大断裂的次级断裂青龙河断裂和近东西向的汤西断裂则是控制地热水排泄的重要因素。因此, 呼雷汤的形成区域上受深大断裂及其次级断裂控制, 以及受与次级断裂相交的其他断裂共同影响。

3.2 成因模式

在伟德山山区获得大气降水补给后, 形成地表水, 在重力作用下, 沿着荣成断裂下渗参与到地下水循环系统中, 在径流过程中不断吸收高热导率围岩中的热量, 温度持续升高, 径流至地下 2 km 左右, 水温升至最高约 110°C; 同时与周边围岩发生溶滤作用和水-岩相互作用, 地热水化学成分发生变化, 形成 SO₄·Cl-Na 型水; 由于温度和压力的升高, 地下热水沿构造裂隙向地表流动, 在上涌过程中混入部分地下水, 温度降低, 最后在青龙河断裂和汤西断裂的交会处、静水压力最小的部位出露成泉(图 9)。

4 地热水开发利用潜力评价

4.1 地热资源量计算

地热井的热功率一般采用以下公式计算:

$$W_t = 4.1868Q (t - t_0) \quad (7)$$

式中: W_t 为热功率, 单位 kW; Q 为地热井的可开采量, 单位 L/s; t 为地热井的出水口温度, 单位 °C; t₀ 为威海市多年平均气温, 单位 °C; 4.1868 为单位换算系数。

计算参数确定: Q=504.21m³/d=5.84 L/s, t=66°C, t₀ 取 15°C, 则每天产能 W_t=1246.99 kW。

4.2 地热水不同用途评价

4.2.1 医疗热矿水水质评价

地热水温度的高低是评价医疗价值的重要指标。依据相关规范及标准, 有医疗价值的水温需高于 34°C, 呼雷汤地热水水温为 66°C, 可用于医疗保健, 并且地热水中富含氟、偏硅酸、锶、锂等对医疗保健有益的微量元素, 其中氟含量超过 2 mg/L 可命名为氟水, 偏硅酸含量超过 50 mg/L 可命名为硅水

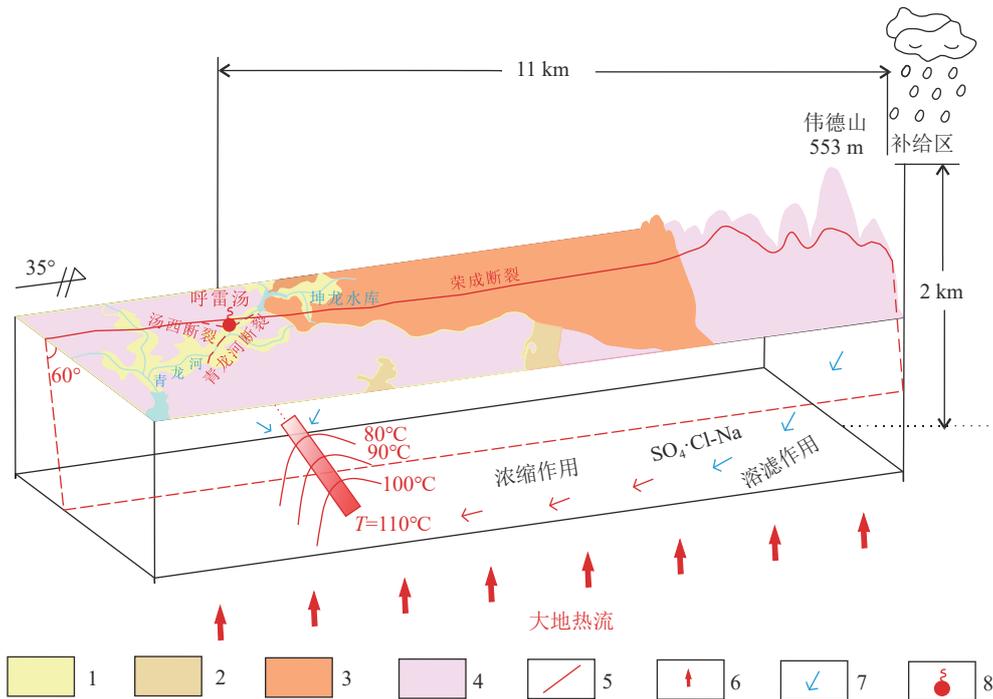


图 9 呼雷汤成因模式图

Fig. 9 Genetic model diagram of Huleilantang

1—第四系松散沉积物; 2—白垩纪二长花岗岩; 3—白垩纪石英二长岩; 4—南华纪二长花岗质片麻岩; 5—断裂构造; 6—大地热流; 7—地下水流向; 8—呼雷汤

表 5 地热水化学成分特征值对比

Table 5 Comparison of characteristic values of geothermal water chemical composition

成分	国家标准(GB11615—2010)特征值			地热水中含量/(mg·L ⁻¹)	评价结果
	有医疗价值浓度	矿水浓度	命名矿水浓度		
氟	1	2	2	5.89~10.00	氟水
锶	10	10	10	2.2~2.62	小于
锂	1	1	5	0.29~0.434	小于
偏硅酸	25	25	50	98~113.4	硅水
氡/(Bq·L ⁻¹)	37	47.14	129.5	2.45	小于
温度/°C	≥34	—	—	66	有医疗价值
矿化度	<1000	—	—	948.97~1077.48	淡水—微咸水

(表 5)。

4.2.2 其他水质评价

依据相关规范及标准,地热水中硫酸根、矿化度、总硬度、氟的含量均超过设定的标准限值,不宜作为饮用天然矿泉水、生活饮用水、农业用水及渔业养殖用水。

4.3 开发利用价值评价

呼雷汤地热水水温为 66°C,出水量为 504.21 m³/d,每天产能为 1246.99 kW,属经济型热水,可用于理

疗、洗浴和供暖。若理疗用水量为 100 m³/(床位·年)(据建筑给水排水设计标准(GB 50015—2019),中华人民共和国住房和城乡建设部,2019),每年可满足 1840 个床位进行理疗;若洗浴用水量为 0.4 m³/(人·次)(据城市居民生活用水量标准(GB/T 50331—2002),中华人民共和国住房和城乡建设部,2002),则每天可满足 1260 人洗浴,一年按 365 d 计算,每年可满足 46 万人洗浴;若供暖耗热量为 50 W/m²(据公共建筑节能设计标准(GB 50189—2015),中华

人民共和国住房和城乡建设部, 2015), 则每天可供暖面积为 $2.49 \times 10^4 \text{ m}^2$, 一年按 365 d 计算, 每年可供暖面积为 $908 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。

5 结 论

(1) 呼雷汤水化学类型为 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}-\text{Na}$, 地热水中 F、 H_2SiO_3 、Li、Sr 含量较周边地下水和地表水明显偏高; 补给水源为大气降水, 补给高程 +436~+559 m, 热源为地热增温, 热储温度 109~118℃, 循环深度 2159~2368 m。

(2) 呼雷汤成因模式: 在伟德山山区获得大气降水补给后, 沿荣成断裂下渗参与地下水循环系统中, 在径流过程中通过不断吸收围岩的热量, 并与其发生溶滤作用和水-岩相互作用, 温度和水化学成分发生相应变化, 随着温度的升高和压力的增大, 地下水沿构造裂隙向地表流动, 在上涌过程中混入部分地下水, 最后在青龙河断裂和汤西断裂的交汇处、静水压力最小的部位出露成泉。

(3) 呼雷汤地热水水温为 66℃, 属经济型热水, 可用于理疗、洗浴和供暖, 每年可供 1840 个床位理疗、 46×10^4 人洗浴、 $908 \times 10^4 \text{ m}^2$ 面积供暖。

致谢: 野外工作得到了山东省第六地质矿产勘查院王昕翌、王恒的帮助, 测试工作得益于原国土资源部地下水矿泉水及环境监测中心的支持, 论文修改阶段得到审稿专家的耐心指导, 笔者受益良多, 在此一并表示感谢。

参考文献

Craig H. 1961a. Isotopic Variation in Meteoric Waters[J]. *Science*, 133(3465): 1702-1703.

Craig H. 1961b. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural water[J]. *Science*, 133: 1833-1834.

Piper A M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses[J]. *Transaction, American Geophysical Union*, 25: 914-923.

Rybach L, Muffler L J P. 1986. Geothermal systems principles and case histories[M]. 北京大学地质学系地热研究室译. 地热系统原理和典型地热系统分析. 北京: 地质出版社: 1-277.

程裕淇. 2004. 大别—苏鲁造山带地质图[M]. 北京: 地质出版社: 1-76.

杜桂林, 曹文海, 翟滨. 2012. 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*, 32(5): 67-71.

郭忠杰, 王锦国, 陈舟, 等. 2015. 云南省鹤庆西山温水龙潭温泉成因机

制探讨[J]. *工程勘察*, (5): 43-48.

高宗军, 孙智杰, 杨永红, 等. 2019. 山东省地热水水化学研究及赋存特征[J]. *科学技术与工程*, 19(20): 85-90.

贾东. 1993. 山东地体构造及其拼贴运动学研究[M]. 南京: 南京大学出版社: 1-100.

金秉福, 张云吉, 栾光忠. 1999. 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)*, 15(4): 297-301.

金秉福, 张云吉, 栾光忠. 2000. 胶东半岛温泉的地热特征[J]. *水文地质工程地质*, 27(5): 31-37.

刘春雷, 李亚松, 洪炳义, 等. 2023. 福建盐田海水补给型地热系统地球化学特征及其成因[J]. *水文地质工程地质*, 50(1): 158-167.

栾光忠, 刘红军, 刘冬雁, 等. 2002. 山东半岛温泉的地热属性及其特征[J]. *地球学报*, 23(1): 79-84.

龙汨, 周训, 李婷, 等. 2014. 北京延庆县松山温泉的特征与成因[J]. *现代地质*, 28(5): 1053-1060.

李曙光, 黄方, 李晖. 2001. 大别—苏鲁造山带碰撞后的岩石圈拆离[J]. *科学通报*, 46(17): 1487-1491.

李学伦, 孙效功, 王永红. 1997a. 山东半岛温泉的分布规律与成因[J]. *青岛海洋大学学报*, 27(3): 389-396.

李学伦, 刘保华, 孙效功, 等. 1997b. 山东半岛硅热流值与区域地质条件的关系[J]. *青岛海洋大学学报*, 27(1): 75-83.

山东省地质矿产局. 1995. 中华人民共和国区域地质调查报告(威海、羊亭等九幅, 1:5万)[M]. 北京: 地质出版社: 1-564.

史猛, 康凤新, 张杰, 等. 2019. 胶东半岛中低温对流型地热资源赋存机理及找矿模型[J]. *地质论评*, 65(5): 1276-1287.

拓明明, 周训, 郭娟, 等. 2018. 重庆温泉及地下热水的分布及成因[J]. *水文地质与工程地质*, 45(1): 165-172.

汪集旸, 熊亮萍, 庞忠和. 1993. 中低温对流型地热系统[M]. 北京: 科学出版社: 55-56.

江海洋, 王树星, 刘连, 等. 2018. 沂沭断裂带临沂段地热资源水化学及环境同位素特征[J]. *上海国土资源*, 39(4): 90-94.

王贵玲, 张薇, 梁继运, 等. 2017a. 中国地热资源潜力评价[J]. *地球学报*, 38(4): 449-459.

王贵玲, 张薇, 蒯文静, 等. 2017b. 京津冀地区地热资源成藏模式与潜力研究[J]. *中国地质*, 44(6): 1074-1085.

王婉丽, 王贵玲, 朱喜, 等. 2017. 中国省会城市浅层地热能开发利用条件及潜力评价[J]. *中国地质*, 44(6): 1062-1073.

王恒纯. 1991. 同位素水文地质概论[M]. 北京: 地质出版社: 37-57.

王洁清, 周训, 李晓露, 等. 2017. 云南兰坪盆地羊吃蜜泉水化学特征与成因分析[J]. *现代地质*, 31(4): 822-831.

王晓翠, 孙海龙, 袁星芳. 2022. 胶东典型花岗岩热储地下水水化学特征及热储研究[J]. *水文地质工程地质*, 49(5): 186-194.

王莹, 周训, 于媛, 等. 2007. 应用地热温标估算地下热储温度[J]. *现代地质*, 21(4): 605-612.

王聿军, 马祥县, 单伟. 2011. 威海市洪水岚汤温泉地热地质特征及成因机制探讨[J]. *山东国土资源*, 27(2): 16-19.

威海市统计局. 2020. 国家统计局威海调查队. 威海市统计年鉴[M].

- 北京:地质出版社:1-512.
- 许鹏,谭红兵,张燕飞,等.2018.特提斯喜马拉雅带地热水化学特征与物源机制[J].中国地质,45(6):1142-1154.
- 谢娜,喻生波,丁宏伟,等.2020.甘肃省地热资源赋存特征及潜力评价[J].中国地质,47(6):1804-1812.
- 余卓伟.2016.胶东东部地区早白垩世构造-岩浆时空演化、控金性及大地构造意义[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文.
- 余鸣潇.2019.云南省临沧地区部分温泉水化学同位素特征及成因研究[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文.
- 袁星芳,王敬,霍光,等.2020.胶东半岛洪水岗汤泉水化学特征与成因分析[J].地质与勘探,56(2):427-437.
- 袁星芳,邢立亭,贾群龙,等.2023.威海市七里汤地热田特征及其成因机制[J].西北地质,56(6):209-218.
- 张涛.2011.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,27(12):11-16.
- 张田,张岳桥.2007.胶东半岛中生代侵入岩岩浆活动序列及其构造制约[J].高校地质学报,13(2):323-336.
- 张彧齐,周训,刘海生,等.2018.云南兰坪-思茅盆地红层中温泉和盐泉的水文地质特征[J].水文地质工程地质,45(3):40-48.
- 赵辉,殷涛,史猛,等.2019.胶东地热田地热流体的补径排特征——以招远东汤地热田为例[J].山东国土资源,35(1):62-70.
- 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局.2016.GB 8538—2016.食品安全国家标准饮用天然矿泉水检验方法[S].
- 中华人民共和国地质矿产部.1993.DZ/T 0064—1993.地下水水质检验方法[S].
- 中华人民共和国工业和信息化部.2015.JCZX-BZ-002—2015.水中氢氧同位素光谱法测定[S].
- 环境保护部.2017.HJ 826—2017.水质 阴离子表面活性剂的测定 流动注射——亚甲基蓝分光光度法[S].
- 中华人民共和国住房和城乡建设部.2019.GB 50015—2019.建筑给水排水设计标准[S].
- 中华人民共和国住房和城乡建设部.2002.GB/T 50331—2002.城市居民生活用水量标准[S].
- 中华人民共和国住房和城乡建设部.2015.GB 50189—2015.公共建筑节能设计标准[S].
- 周训.2010.地下水科学专论[M].北京:地质出版社:32-74.