

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2022.06.11

引用格式: 牛兆轩, 牛雪, 张成龙, 等. 唐山市滨海地区地下热水水化学特征及循环深度[J]. 中国地质调查, 2022, 9(6): 84-92. (Niu Z X, Niu X, Zhang C L, et al. Hydrochemical characteristics and circulation depth of geothermal water in coastal area of Tangshan City[J]. Geological Survey of China, 2022, 9(6): 84-92.)

唐山市滨海地区地下热水水化学特征及循环深度

牛兆轩, 牛雪, 张成龙, 陈东方, 邓志辉

(中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北保定 071051)

摘要:唐山市南部滨海地区地热资源丰富、种类齐全,但开发利用效率较低,通常以冬季海产品养殖等途径为主,项目单一、资源浪费严重。以唐山市南部滨海地区地热系统为研究对象,通过分析其地下水的水化学特征,估算研究区的热储温度与循环深度。结果表明:①唐山市滨海地区地下热水出露温度为26~86℃,属中低温地下水,热水溶解性固体总量(total dissolved solids, TDS)为482~1 644 mg/L, pH值为8.25~9.15,为高矿化度弱碱性热水,水化学类型为HCO₃-Na型;②研究区热储温度可分为60~70℃和90~100℃两个区间,分别代表不同的地热水循环系统,计算得到循环深度为1 500~1 800 m和2 400 m~2 700 m。唐山市滨海地区地热田属于中低温传导型地热系统,形成以馆陶组为主要热储层,深部燕山期高温花岗岩(干热岩)提供持续热源的地热系统;③研究区水热型地热系统具有持续稳定的高温热源,但其具有循环深度大、远离补给区等特点,水交替循环缓慢,当地应建立完善的地热能开采管理体系,在高效开采清洁地热资源的同时,避免地热尾水影响环境、资源枯竭、地面沉降等生态环境问题。研究加深了对唐山市南部滨海地区水热型地热系统的认识,为区域地热资源的开发利用提供了一定的科学依据。

关键词:唐山市; 水文地球化学; 热储温度; 循环深度; 成因模式

中图分类号: P64 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8706(2022)06-0084-09

0 引言

地热指来自地球深部的可再生资源,全球地热资源的总量约 14.5×10^{25} J,到21世纪末地热能的利用量可能会占世界能源总量的30%~80%^[1-3]。地热能具有供能持续稳定、循环利用高效、可再生等特点,可减少温室气体排放,有助于实现碳中和目标^[4-7]。因地制宜地开发利用地热能,可以为能源替代和实现碳中和目标提供新方法、新思路^[8-9]。因此,开展区域性地热资源成因模式的研究具有一定的理论意义和实践意义。

唐山地区位于环渤海湾经济圈,经济与交通发

达,但环境污染问题日益严重,迫切需要开发清洁型的新能源。多年来的勘查工作发现唐山市南部沿海地区地热资源丰富^[10-12],地下热水的开发利用得到了初步发展,但利用形式单一,多为冬季养虾等用途,且利用率不高。前人对渤海湾盆地南堡凹陷高尚堡—柳赞—马头营地热田的研究初步探明馆陶组蕴含的地热资源量为 13.79×10^{18} J,且在深部赋存了丰富的干热岩资源;马头营地区干热岩资源总计 5.00×10^{19} J,形成了深浅搭配,以养殖、供暖为主,试验性发电为辅的综合地热开发模式^[13-17],但针对地下热水的水化学特征及成因模式的研究相对较少。本文通过分析唐山市滨海地区地下热水的水文地球化学特征,使用化学温度计

收稿日期: 2022-02-18; 修订日期: 2022-10-27。

基金项目: 中国地质调查局青年科学基金项目“青海共和盆地贵德—达连海地区干热岩资源调查评价(编号: DD20211336)”和“结构面影响下干热岩水力裂缝扩展行为特征及能量释放机制研究(编号: 42102353)”联合资助。

第一作者简介: 牛兆轩(1992—),男,工程师,主要从事区域地下水化学演化及深部地热(干热岩)相关研究工作。Email: niuzhaoxuan@mail.cgs.gov.cn。

通信作者简介: 张成龙(1988—),男,工程师,主要从事深部地下空间碳封存与储气储能及非常规油气资源评价研究工作。Email: zhangchenglong@mail.cgs.gov.cn。

方法估算其热储温度和循环深度,初步探讨了研究区地热系统的成因模式,以期为未来该区地热资源的开发利用提供依据。

1 研究区概况

研究区位于河北省东北部,属于环渤海经济圈中心地带,是东北与华北两大经济区的结合部。属暖温带湿润一半湿润大陆季风性气候区,年平均气温 12.5℃,年降水量 500~750 mm,蒸发量 1 500~1 800 mm^[18](图 1)。

太古宇与震旦系主要出露于唐山地区的北部山区;寒武系与奥陶系分布于山区边缘;石炭系与二叠系在山区边缘有少量出露,多数隐伏于南部平原

区;侏罗系后城组少量分布于研究区北部;新近系主要下伏于平原区的第四系,为内陆河湖相碎屑岩类,各类砂岩与泥岩互层,最厚处约 2 000 m;第四系广泛分布,为南部平原区的主体,最厚处约 600 m,新近系和第四系厚度均呈现由北向南逐渐增加的趋势(图 2)。

唐山市地热资源丰富,地下热水可开采资源量大,主要的热储层为新近系明化镇组与馆陶组,新近系广泛分布于窝洛沽—滦县断裂以南,属于河流相沉积,岩性从下至上表现出岩石粒度由粗(馆陶组)变细(明化镇组下段)再变粗(明化镇组上段)的规律。该热储层特点为水量大、水温较高、面积大,地下热水资源具有极为广阔的开发利用前景^[10]。

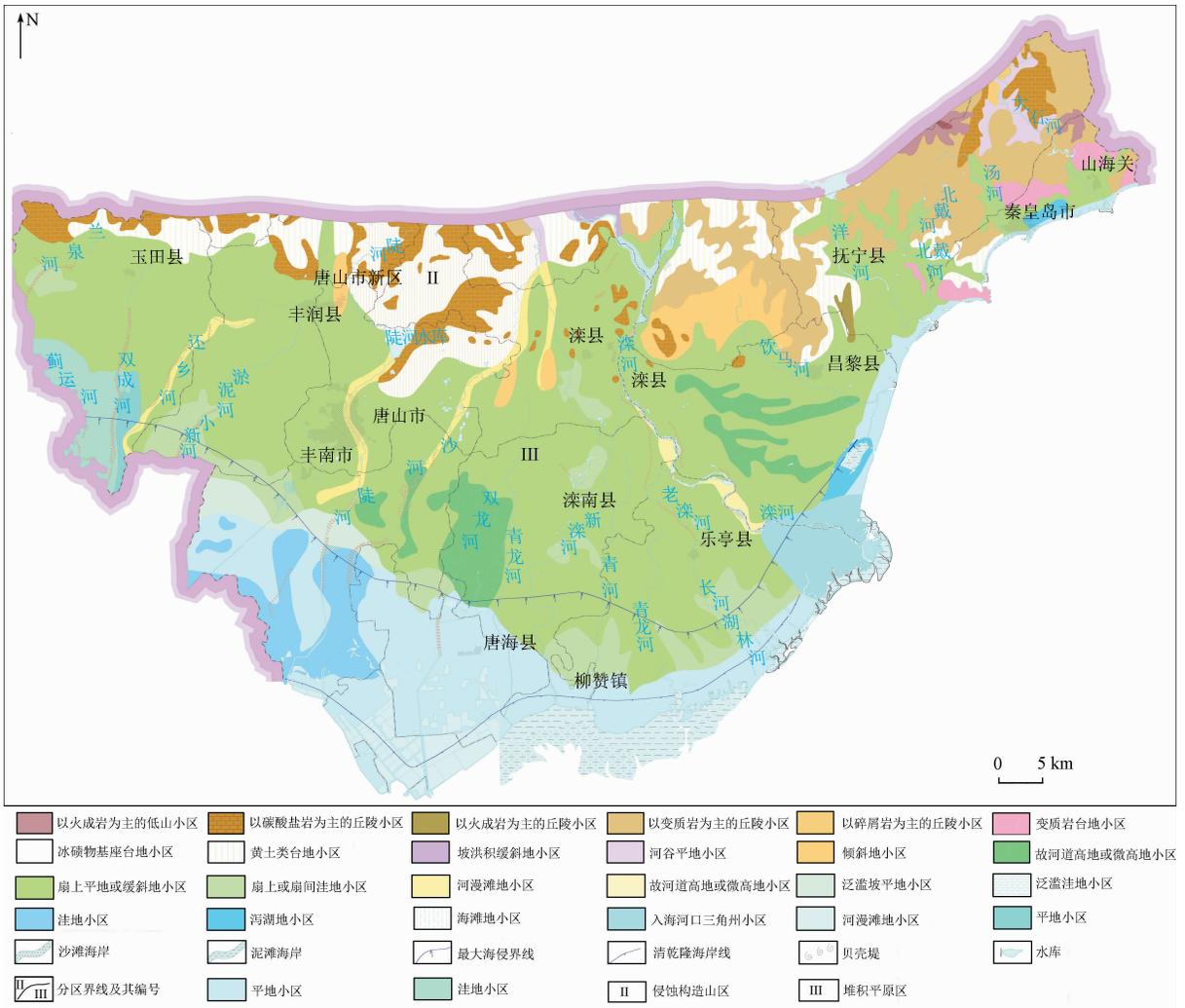


图 1 唐山市平原区地质地貌

Fig. 1 Geological and geomorphological of the plain area in Tangshan City

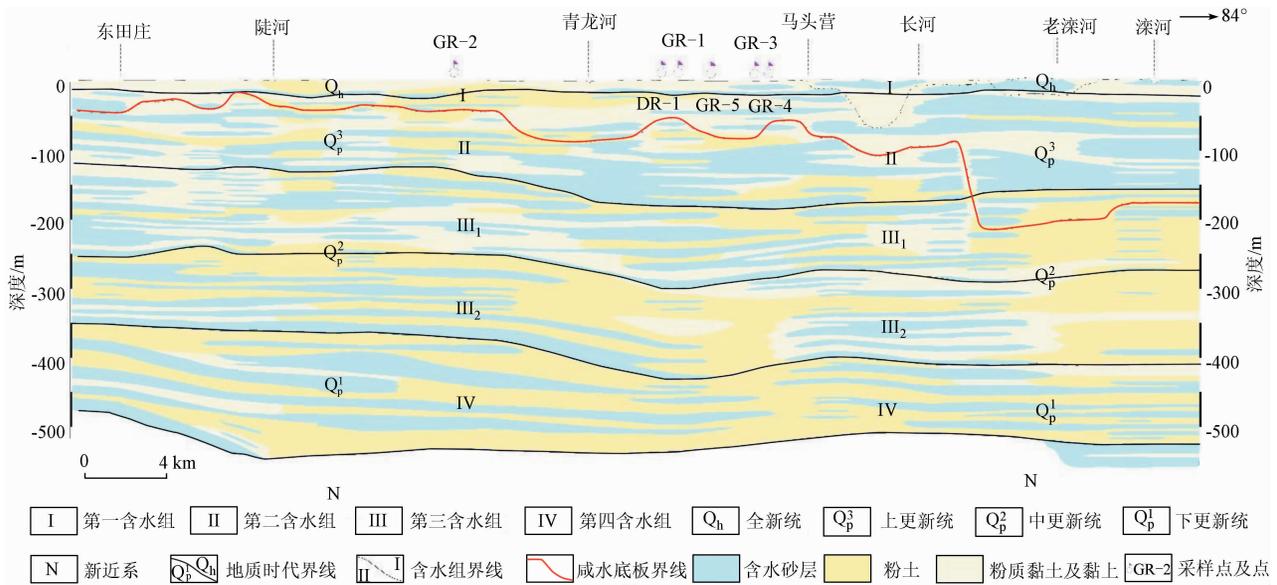


图2 研究区水文地质剖面
 Fig. 2 Hydrogeological profile of the study area

2 样品采集与测试

为了解研究区地下热水的水化学特征,本研究选取 5 个唐山市沿海养殖自打地热深井水样品,选取 1 个曹妃甸区柳赞镇附近地温异常区的浅层地热井水样品(图 3)。在取样前,取样瓶均用预取水样清洗 3 次以上,现场使用 0.22 μm 的过滤头对 H、O 同位素样品进行过滤处理后,采集并密封保存。

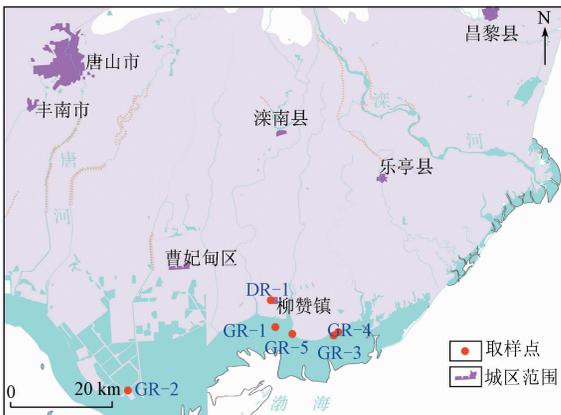


图3 取样点位置
 Fig. 3 Location of sampling points

本研究测试项目包括 Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻、CO₃²⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、Li⁻、SiO₂ 含量及 H、O 同位素等。现场测试水温、pH 值和电导率,用酸碱滴

定法测试 HCO₃⁻ 和 CO₃²⁻; 阳离子水样现场过滤加酸,Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 测试使用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-MS); Cl⁻、SO₄²⁻ 测试使用离子色谱法(ICS-900); SiO₂ 测试使用硅钼蓝法,在 T6-UV 分光光度计上测得含量。

3 测试结果

3.1 水文地球化学特征

地球化学测试结果如表 1 所示。5 个沿海地热井水样的水温为 45 ~ 86 °C,属于中低温地下热水; pH 值为 8.77 ~ 9.15; 电导率为 1 547 ~ 5 022 μS/cm,溶解性固体总量(total dissolved solids, TDS)值为 960.37 ~ 1 643.79 mg/L,属于高矿化度弱碱性硬水,水温异常的水样 DR-1 由柳赞镇附近取得。

Piper 图解可用于分析区域地下热水的水化学演变规律^[19],本研究使用 AqQa 软件绘制了 6 组水样的 Piper 图解如图 4 所示。根据 6 组水样的水化学类型分析,研究区地热水水化学类型均为 HCO₃-Na 型; 优势阳离子均为 Na⁺,其中 5 个沿海地热井水样中 Na⁺ 占比超过 95%; 优势阴离子为 HCO₃⁻,Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 均不超过 30%,与研究区浅层地下水各阴离子相对含量较一致^[20]。

表 1 研究区地下热水水化学参数

Tab. 1 Hydrochemical parameters of geothermal water in the study area

点号	井深/ m	水温/ ℃	含量/(mg · L ⁻¹)									δ ¹⁸ O/‰	δD/‰
			Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Li	SiO ₂		
DR-1	250	26	100.13	0.53	29.60	4.61	42.81	282.89	16.82	0.007	14.70	-11.88	-80.34
GR-1	1 700	75	316.67	2.29	5.85	0.34	139.77	396.87	135.21	0.021	38.11	-9.74	-74.85
GR-2	2 000	80	278.99	2.20	4.91	0.26	44.21	433.14	159.17	0.024	40.59	-9.95	-74.11
GR-3	700	45	297.10	1.35	3.92	1.07	100.57	379.46	129.18	0.013	24.37	-9.98	-74.84
GR-4	1 600	86	486.96	5.11	3.32	0.66	206.48	909.01	0.00	0.069	43.71	-9.47	-73.84
GR-5	1 700	70	300.72	2.54	4.23	0.78	130.92	512.16	44.37	0.019	35.95	-9.76	-74.52

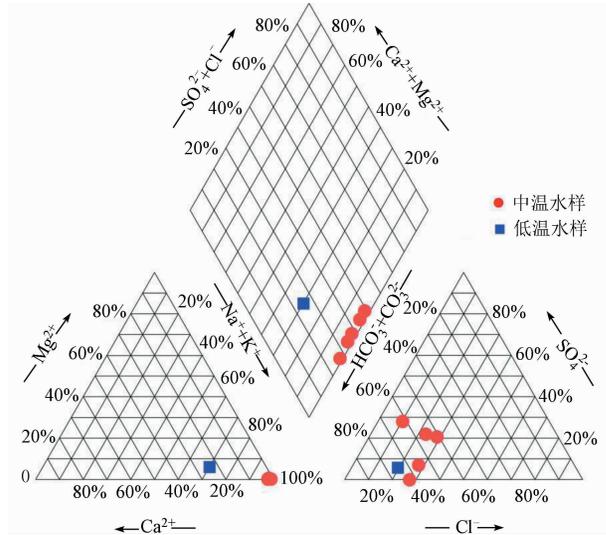


图 4 研究区样品 Piper 图解

Fig. 4 Piper diagram of samples in the study area

3.2 δD-δ¹⁸O 关系

δD-δ¹⁸O 关系的特征可以用来识别地下热水的补给来源和补给特征^[21]。唐山市南部平原区第四系地下水的 δD-δ¹⁸O 关系如图 5 所示^[20],除深度较浅、温度较低的 DR-1 外,样品均发生显著的 δ¹⁸O 正偏,但总体依然落在当地大气降水线附近,表明研究区地下热水来自所在区域大气降水补给。

大气降水中的 δD 和 δ¹⁸O 值与区域多年平均温度呈线性关系的现象称为温度效应^[19]。我国东部地区大气降水的 δD 和 δ¹⁸O 值与当地年平均气温 T(℃)之间关系的公式为

$$\delta D = 2.8T - 94, \quad (1)$$

$$\delta^{18}O = 0.35T - 13. \quad (2)$$

地下水 H、O 同位素的特征包含多种补给特征信息,可以通过各类水体信息推测研究区的补给温度,并结合区域地质环境演化规律,大体确定各类水体的补给时间段。依据样品的 δD 和 δ¹⁸O 值,结合式(1)和式(2)得出水体的补给温度,结果如表 2 所示。

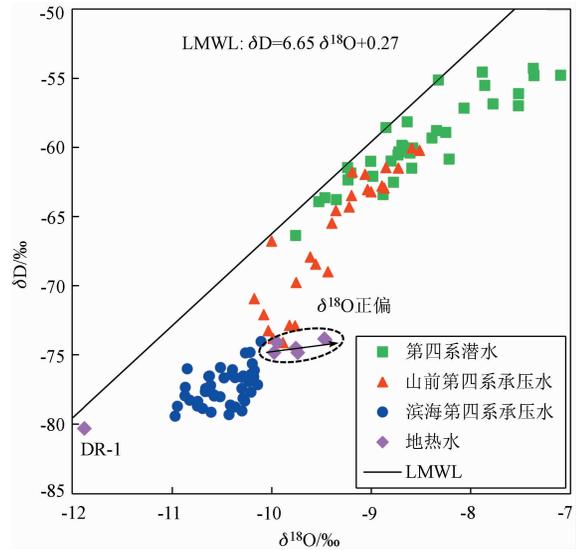


图 5 研究区地下水的 δD-δ¹⁸O 关系

Fig. 5 δD-δ¹⁸O relationship diagram of geothermal water in the study area

表 2 研究区地下热水的补给温度

Tab. 2 Recharge temperature of geothermal water in the study area

样品编号	T ₀₁₈ /℃	T _D /℃
DR-1	3.188	4.880
GR-1	9.320	6.839
GR-2	8.720	7.105
GR-3	8.639	6.842
GR-4	10.087	7.199
GR-5	9.263	6.958

样品 δ¹⁸O 正偏的现象说明地下热水的 O 同位素与围岩发生了同位素交换,而地下热水的 δD 与浅层低温地下水相当,表明地下热水主要来源于大气降水^[16],因此选取更为稳定的氢同位素计算出的补给温度,即沿海地下热水补给温度约 7℃。

3.3 水-岩平衡状态判别

Na - K - Mg 三角图有助于确定水体是否与周围岩石达到均衡,并证明是否存在混合作用^[22]。将地热水分成完全平衡水、部分平衡水或混合水、成熟水,为确定水-岩平衡状态提供了便利工具。

将样品的 Na^+ 、 K^+ 和 Mg^{2+} 含量投影到 Na - K - Mg 三角图中(图 6)。所有样品均落于部分平衡水或混合水区域,且沿海地热井水样接近完全平衡水区域,说明研究区地热的水岩相互作用较活跃,地热水经历了长期的水岩相互作用,并与热储围岩达到了水岩平衡状态,但地热水在向地表排泄的过程中受到少量浅层地下水的混合作用,其中混合作用最强的为柳赞镇附近的异常地热井水样品。

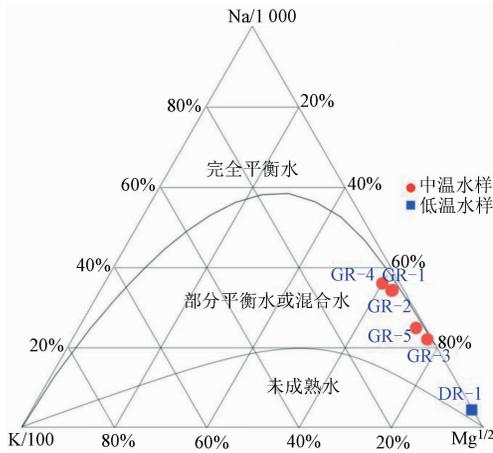


图 6 研究区样品 Na - K - Mg 三角图

Fig. 6 Na - K - Mg triangle diagram of samples in the study area

3.4 热储温度

地热温标是在地热流体矿物质化学平衡的状态下,依据热水化学性质与热储温度的相关性确定热储温度,测试地热水中 Na^+ 、 K^+ 及 SiO_2 等的浓度,利用 SiO_2 温标与阳离子温标等手段综合评价地热系统的热储温度(表 3)^[23-24]。

SiO_2 地热温标是依据地热流体中的 SiO_2 含量与热储温度及压力的关系进行计算。 SiO_2 一般不受其它离子及挥发物质散失的影响,且不随热流因传导损失冷却而迅速沉淀,因此地热流体中的 SiO_2 含量是地下热储在地表显示的重要证据。 SiO_2 地热温标适宜的热水温度范围为 0 ~ 250 °C,不适用于已经受稀释的热水或 pH 值小于 7 的酸性水。

常用阳离子地热温标包括 Na - K、K - Mg 和 Na - K - Ca 温标。此外,根据水化学组分和地质条

表 3 常用温度计公式

温标	公式	使用条件
石英 ^[25]	$T = 1309 / [5.19 - \lg(\rho_{SiO_2})] - 273.15$	热流运移过程中没有蒸气损失,仅热传导冷却
	$T = 1522 / [5.75 - \lg(\rho_{SiO_2})] - 273.15$	热流运移中,在某一温度下有最大的蒸气损失
玉髓 ^[25-26]	$T = 1112 / [4.91 - \lg(\rho_{SiO_2})] - 273.15$	当热水到达地面时没有发生蒸气损失
	$T = 1264 / [5.31 - \lg(\rho_{SiO_2})] - 273.15$	当热水到达地面时已发生蒸气损失
Na - K ^[27]	$T = 1390 / [1.750 + \lg(\rho_{Na} / \rho_K)] - 273.15$	水岩反应达到完全平衡状态或水循环时间短,适用的最高温度约 200 °C
K - Mg ^[27]	$T = 4410 / [14 - \lg(\rho_K^2 / \rho_{Mg})] - 273.15$	水岩反应达到完全平衡状态,适用于低温系统
Na - K - Ca ^[28]	$T = 1647 / [\lg(\rho_{Na} / \rho_K) + \beta(\lg(\rho_{Ca}^{0.5} / \rho_{Na}) + 2.06) + 2.47] - 273.15$	适用于低 $\beta(Ca^{2+})$, 且含钙矿物未发生沉淀作用
Na - Li ^[29]	$T = 1590 / [0.779 + \lg(\rho_{Na} / \rho_{Li})] - 273.15$	浅层黏土矿物体积分数较少的情况下使用

注: T 为热储温度, °C; ρ_{Na} 、 ρ_{Ca} 、 ρ_{Mg} 、 ρ_{Na} 、 ρ_K 、 ρ_{Li} 及 ρ_{SiO_2} 分别为各离子的浓度, mg/L; β 为校正系数,若 $t < 100$ °C 或 $\lg(\rho_{Ca}^{0.5} / \rho_{Na}) > 0$, β 取 4/3, 若 $t > 100$ °C 或 $\lg(\rho_{Ca}^{0.5} / \rho_{Na}) < 0$, β 取 1/3。

件可选用 Na - Li 温度计、Na - Ca 温度计和 K - Ca 温度计等。阳离子温度计均需要在矿物与地热水达到化学平衡的条件下使用,因此运用这些温标之前,首先要假定作为温标的某种溶质在深部热储中达到了平衡状态。研究区除个别水样为平衡水外,主要为部分平衡水,但均靠近平衡水范围,表明水样中浅层冷水混入量较少,可以使用阳离子地热温标法,但需对不同阳离子温标进行分析,选取受冷水混入影响较小的温标。研究区水样热储温度见表 4。

表 4 地热温标计算结果

Tab. 4 Geothermal temperature scale calculation results

样品编号	温度/°C							
	石英	玉髓	Na - K	K - Mg	Na - K - Ca	Na - Li		
DR - 1	52	59	24	32	72	17	56	48
GR - 1	90	92	61	66	84	71	86	47
GR - 2	92	94	64	68	88	73	88	55
GR - 3	71	76	42	49	67	47	72	36
GR - 4	96	97	67	71	100	82	108	71
GR - 5	87	90	58	64	90	64	92	47

综合分析上述各地热温标计算得到的热储温度,玉髓温标所计算的热储温度普遍低于石英温标,个别水样点使用玉髓温标所计算的热储温度甚至低于井口出水温度,表明玉髓温标失效,该地热系统中石英的平衡控制着 SiO_2 的浓度。

由于多数水样存在少量浅层冷水混合作用,因此 Na - K 温标和 K - Mg 温标计算的温度会偏低,而 Na - K 温标受冷水混合作用后再平衡影响的时间较长,可以最大程度地保留受冷水混合时的离子信息,因此该温标估算的温度可以代表地热流体和冷水混合时的瞬间温度,但 K - Mg 温标受到的影响较为严重,计算出的热储温度偏低(表 4),不适用于该地热系统。

Na - K - Ca 温标是对 Na - K 温标估算的热储温度进行修正后建立的方法,适用于中低温地热系统^[30],一般认为若地热水中 $\rho(\text{Mg}^{2+}) > 1 \text{ mg/L}$,则此温标存在误差^[31]。除水样 DR - 1 的 $\rho(\text{Mg}^{2+}) = 4.61 \text{ mg/L}$,可以认为该温标计算得到其他样品的热储温度较为可靠。

黏土矿物对 Li^+ 的吸附或解吸影响会改变地热流体中的 Li^+ 含量,且 Na - Li 温标主要用于碳酸盐岩地区地热系统中热储温度的计算,因此该温标不适用于研究区。

综上所述,本文选取石英温标、Na - K 温标和 Na - K - Ca 温标部分可靠的计算结果进行综合分析,计算其算术平均值作为本次所选地热水的热储温度(表 5)。

表 5 研究区地热水热储温度

Tab. 5 Thermal storage temperature of geothermal water in the study area

样品编号	井深/m	热储温度/℃
DR - 1	250	60
GR - 1	1 700	88
GR - 2	2 000	91
GR - 3	700	71
GR - 4	1 600	100
GR - 5	1 700	90

3.5 循环深度及热储成因模式

地下热水温度与地下水的循环深度之间呈线性关系,通常情况下地下热水循环深度越深,地下热水的温度越高,地下水的循环深度的计算公式为

$$H = (t - t_0) / \Delta t + h. \quad (3)$$

式中: H 为循环深度, m; t 为计算热储温度, $^{\circ}\text{C}$; t_0 为研究区恒温带温度,取当地平均气温加 2°C ,即 14.5°C ; Δt 为地温梯度, $^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$,根据已有钻井实测数据,研究区平均地温梯度为 $3.27^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$ ^[12,31-32]; h 为恒温带深度,取 20 m 。

综上所述,研究区热储温度可分为 $60 \sim 70^{\circ}\text{C}$ 和 $90 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 两个区间,分别代表不同的地热热水循环系统,计算得到循环深度为 $1\,500 \sim 1\,800 \text{ m}$ 和 $2\,400 \sim 2\,700 \text{ m}$ 。

研究区基岩埋深约 $1\,700 \sim 2\,000 \text{ m}$,因此,研究区热储系统可分为以新近系为热储层的低温地热系统和以基岩为热储层的中温地热系统,唐山市滨海地区地热田属中低温传导型地热系统,形成以馆陶组为主要热储层,深部燕山期高温花岗岩(干热岩)提供持续热源的地热系统(图 7)。此地热系统因存在深部高温稳定热源,地热能稳定,但因地下水循环深度较深,且远离山前补给区,水交替循环缓慢。根据其水化学类型从山前 $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$ 型经过水化学演化逐渐演变为 $\text{HCO}_3 - \text{Na}$ 型、TDS 含量较高的特点,可判断如果长期大量开采且不进行回灌补给,可能导致该地热田的资源枯竭,且大量开采深层承压含水层地下水会导致地面沉降。

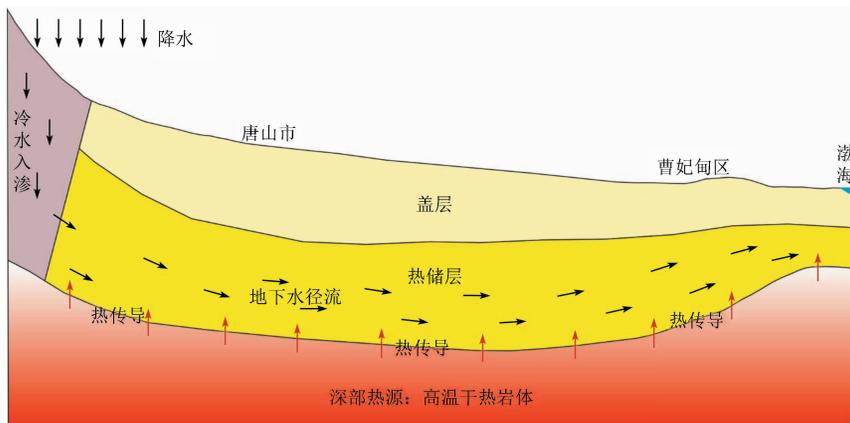


图 7 研究区水热型地热成因模式

Fig. 7 Hydrothermal geothermal genetic model in the study area

4 结论与建议

(1) 唐山市滨海地区地下热水出露温度为 26 ~ 86 °C, 属中低温地下热水。热水 TDS 为 482 ~ 1 644 mg/L, pH 值为 8.25 ~ 9.15, 为高矿化度弱碱性热水, 水化学类型为 $\text{HCO}_3 - \text{Na}$ 型。

(2) 研究区热储温度可分为 60 ~ 70 °C 和 90 ~ 100 °C 两个区间, 分别代表不同的地热水循环系统, 计算得到的循环深度为 1 500 ~ 1 800 m 和 2 400 ~ 2 700 m。唐山市滨海地区地热田属中低温传导型地热系统, 形成以馆陶组为主要热储层, 深部燕山期高温花岗岩(干热岩)提供持续热源的地热系统。

(3) 研究区水热型地热系统具有持续稳定的高温热源, 但其具有循环深度大、远离补给区等特点, 水交替循环缓慢, 因此当地应建立完善的地热能开采管理体系, 在高效开采清洁地热资源的同时避免造成地热尾水影响环境、资源枯竭及地面沉降等生态环境的问题。

参考文献 (References):

- [1] 徐世光, 郭远生. 地热学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 1-5.
Xu S G, Guo Y S. Fundamentals of Geothermal[M]. Beijing: Science Press, 2009: 1-5.
- [2] 窦斌, 田红, 郑君. 地热工程学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2020: 2.
Dou B, Tian H, Zheng J. Geothermal Engineering[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2020: 2.
- [3] 汪集旸, 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: 3-8.
Wang J Y, Xiong L P, Pang Z H. Low - Medium Temperature Geothermal System of Convective Type[M]. Beijing: Science Press, 1993: 3-8.
- [4] 张承斌. 基于层次分析法-模糊综合评价模型的浅层地热能适宜性评价——以山东省昌乐县为例[J]. 中国地质调查, 2022, 9(2): 91-99.
Zhang C B. Suitability evaluation of shallow geothermal energy based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation: A case study of Changle County in Shandong Province[J]. Geol Surv China, 2022, 9(2): 91-99.
- [5] 樊新庆, 尚亚军, 张淞. 重庆市温塘峡背斜地热资源特征[J]. 中国地质调查, 2021, 8(5): 18-24.
Fan X Q, Shang Y J, Zhang S. Characteristics of geothermal resources in Wentang Gorge anticline of Chongqing[J]. Geol Surv China, 2021, 8(5): 18-24.
- [6] 朱义坤, 赵景怀, 洪文二, 等. 隐伏对流型地热资源勘查方法研究——以花亭湖风景区为例[J]. 中国地质调查, 2022, 9(1): 16-22.
Zhu Y K, Zhao J H, Hong W E, et al. Research on exploration methods of concealed convective geothermal resources: A case study of Huating Lake scenic spot[J]. Geol Surv China, 2022, 9(1): 16-22.
- [7] 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 Z Q, Peng M Z, Dong Y, et al. Hydrogeochemical characteristics and genesis analysis of geothermal water in Pingyin of Shandong Province[J]. Geol Surv China, 2022, 9(1): 104-114.
- [8] 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 等. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地质前缘, 2020, 27(1): 1-9.
Wang G L, Liu Y G, Zhu X, et al. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. Earth Sci Front, 2020, 27(1): 1-9.
- [9] 自然资源部中国地质调查局, 国家能源局新能源和可再生能源司, 中国科学院科技战略咨询研究院, 等. 中国地热能发展报告(2018)[M]. 北京: 中国石化出版社, 2018.
China Geological Survey, Ministry of Natural Resources, Department of New and Renewable Energy of National Energy Administration, Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, et al. China Geothermal Energy Development Report[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2018.
- [10] 杨立顺. 唐山沿海地区地热资源开发利用及前景[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2011, 21(1): 23-25.
Yang L S. The exploitation and prospect of geothermal resources in Tangshan coastland[J]. J EMCC, 2011, 21(1): 23-25.
- [11] 上官控通. 马头营区干热岩地热资源赋存分布特征及开发利用前景[J]. 能源与环保, 2017, 39(5): 155-159, 165.
Shangguan S T. Occurrence conditions of hot - dry - rock geothermal resources and development prospects in Matouying area[J]. China Energy Environ Prot, 2017, 39(5): 155-159, 165.
- [12] 董月霞, 黄红祥, 任路, 等. 渤海湾盆地北部新近系馆陶组地热田特征及开发实践——以河北省唐山市曹妃甸地热供暖项目为例[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 666-676.
Dong Y X, Huang H X, Ren L, et al. Geology and development of geothermal field in Neogene Guantao Formation in northern Bohai Bay Basin: A case of the Caofeidian geothermal heating project in Tangshan, China[J]. Pet Explor Dev, 2021, 48(3): 666-676.
- [13] 张汝惠, 解政文, 武冀新, 等. 唐山及其邻区热流值的分布[J]. 地震地质, 1982, 4(4): 57-67.
Zhang R H, Xie Z W, Wu J X, et al. The distribution of heat flow values in Tangshan and its surroundings[J]. Seismol Geol, 1982, 4(4): 57-67.
- [14] 周颖. 唐山市浅层地地质条件分析[J]. 建筑工程技术与设计, 2019(4): 3976.

- Zhou Y. Analysis of shallow geothermal geological conditions in Tangshan City[J]. *Archit Eng Technol Des*, 2019(4): 3976.
- [15] 于孝民, 杨春光, 董国明, 等. 唐山市第一眼蓟县系地热井钻探及成井技术[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2014, 41(2): 41-44.
- Yu X M, Yang C G, Dong G M, et al. Drilling and completion technology in the first geothermal well construction in Jixian system in Tangshan[J]. *Explor Eng (Rock Soil Drill Tunneling)*, 2014, 41(2): 41-44.
- [16] 齐晓飞, 上官拴通, 张国斌, 等. 河北省乐亭县马头营区干热岩资源孔位选址及开发前景分析[J]. *地学前缘*, 2020, 27(1): 94-102.
- Qi X F, Shanguan S T, Zhang G B, et al. Site selection and developmental prospect of a hot dry rock resource project in the Matouying Uplift, Hebei Province [J]. *Earth Sci Front*, 2020, 27(1): 94-102.
- [17] 李斌, 解瑞, 纪燕祥. 唐山市地热资源开发利用的可行性[J]. *工程技术*, 2016, 3(28): 131.
- Li B, Xie R, Ji Y X. The feasibility of development and utilization of geothermal resources in Tangshan City[J]. *Eng Technol*, 2016, 3(28): 131.
- [18] 牛兆轩, 蒋小伟, 胡云壮. 滦河三角洲地区深层地下水水化学演化规律及成因分析[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(1): 27-34.
- Niu Z X, Jiang X W, Hu Y Z. Characteristics and causes of hydrochemical evolution of deep groundwater in the Luanhe Delta[J]. *Hydrogeol Eng Geol*, 2019, 46(1): 27-34.
- [19] 钱会, 马致远, 李培月. 水文地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2012: 133-144.
- Qian H, Ma Z Y, Li P Y. *Hydrogeochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012: 133-144.
- [20] 牛兆轩. 滦河三角洲地区地下水循环及演化规律研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- Niu Z X. Study on Groundwater Circulation and Evolution Law in Weihe River Delta Area[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [21] 秦大军, 孙杰, 郭艺, 等. 永定河对北京西山岩溶水和玉泉山泉的影响[J]. *工程地质学报*, 2019, 27(1): 162-169.
- Qin D J, Sun J, Guo Y, et al. Impacts of Yongding River on the Xishan karst aquifer and Yuquan spring in Beijing, China[J]. *J Eng Geol*, 2019, 27(1): 162-169.
- [22] Giggenbach W F. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1988, 52(12): 2749-2765.
- [23] Henley R W. Geothermal fluids: chemistry and exploration techniques: K. Nicholson. Springer Verlag, Berlin, New York, 1993, 263 pp., DM 138.00 [J]. *J Geochem Explor*, 1995, 52(3): 382-383.
- [24] 单玄龙, 蔡壮, 郝国丽, 等. 地球化学温标估算长白山地热系统热储温度[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2019, 49(3): 662-672.
- Shan X L, Cai Z, Hao G L, et al. Estimation of thermal storage temperature of geothermal system in Changbai mountain by Geothermometers[J]. *J Jilin Univ (Earth Sci Ed)*, 2019, 49(3): 662-672.
- [25] Fournier R O. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems[J]. *Geothermics*, 1977, 5(1-4): 41-50.
- [26] Giggenbach W F. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1988, 52(12): 2749-2765.
- [27] D'Amore F, Fancelli R, Caboi R. Observations on the application of chemical geothermometers to some hydrothermal systems in Sardinia[J]. *Geothermics*, 1987, 16(3): 271-282.
- [28] Kharaka Y K, Lico M S, Law L M. Chemical geothermometers applied to formation waters, gulf of Mexico and California Basins: Abstract[J]. *AAPG Bull*, 1982, 66(5): 588-589.
- [29] Fournier R O, Potter II R W. Magnesium correction to the Na-K-Ca chemical geothermometer[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1979, 43(9): 1543-1550.
- [30] 戴蔓. 青海贵德地区地热水水文地球化学特征及形成演化规律[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- Dai M. The Hydrogeochemical Characteristics and the Evolution of Geothermal Water in Guide Area, Qinghai[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [31] 陈墨香, 黄歌山, 汪缉安, 等. 渤海地温场特点的初步研究[J]. *地质科学*, 1984, 19(4): 392-401.
- Chen M X, Huang G S, Wang J A. A preliminary research on the geothermal characteristics in the Bohai Sea [J]. *Chin J Geol*, 1984, 19(4): 392-401.
- [32] 张汝惠, 武冀新, 张晚霞. 辽宁南部的大地热流及岩石圈热结构[J]. *中国地震*, 1991, 7(3): 11-24.
- Zhang R H, Wu J X, Zhang W X. Terrestrial heat flow and thermal structure of the lithosphere in South Liaoning [J]. *Earthq Res China*, 1991, 7(3): 11-24.

Hydrochemical characteristics and circulation depth of geothermal water in coastal area of Tangshan City

NIU Zhaoxuan, NIU Xue, ZHANG Chenglong, CHEN Dongfang, DENG Zhihui

(Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Hebei Baoding 071051, China)

Abstract: The southern coastal area of Tangshan City has abundant and complete geothermal resources, but the

development and utilization efficiency of geothermal resources is low. The conventional application of geothermal resources is winter seafood breeding, which is too single and has caused serious resource waste. The geothermal system in the southern coastal area of Tangshan City was set as the research goal, and the water samples were selected to analyze the hydrochemical characteristics of geothermal water and estimate the thermal storage temperature and circulation depth in the study area. The results show that ①The exposed temperature of geothermal water in Binhai area of Tangshan City is 26 ~ 86 °C, belonging to the medium and low temperature. The total dissolved solid (TDS) of the geothermal water is between 482 and 1 644 mg/L, with pH of 8.25 ~ 9.15, belonging to the high - salinity and weak - alkaline thermal water, and the chemical type is $\text{HCO}_3 - \text{Na}$. ② The thermal storage temperature in the study area can be divided into two ranges, about 60 ~ 70 °C and about 90 ~ 100 °C, respectively, representing two geothermal water circulation systems. The calculated circulation depths are about 1 500 ~ 1 800 m and 2 400 ~ 2 700 m. The geothermal field in the Binhai area of Tangshan City is geothermal system of medium - low temperature conduction, forming a geothermal system with the Guantao Formation as the main thermal reservoir. And the deep Yanshanian high - temperature granite (HDR) provides a continuous heat source. ③ The hydrothermal geothermal system in the study area has a continuous and stable high temperature heat source, however, it still has characteristics of large circulation depth, far away from the recharge area, making the water alternately circulates slowly. It is suggested that complete specification of geothermal exploration should be established to avoid effects of geothermal tail water on the environment, resource depletion and land subsidence during exploiting clean geothermal resources. This research would deepen the understanding of the thermal geothermal system in the southern coastal area of Tangshan City, and provide certain scientific basis for the development and utilization of regional geothermal resources.

Keywords: Tangshan City; hydrogeochemistry; thermal storage temperature; circulation depth; genetic model

(责任编辑: 魏昊明)