

山东高青县沉积盆地型地热流体 地球化学特征及成因探讨

谭肖波^{1,2)}, 薄本玉¹⁾, 姜佃卿¹⁾, 张辉泉³⁾, 郭峰¹⁾, 吕明荟^{1,2)}

1) 山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队, 济南, 250014;

2) 山东省地下水资源与环境工程研究中心, 济南, 250014; 3) 高青县自然资源局, 淄博, 256300

内容提要:高青县地热资源类型为沉积盆地型, 主要热储层为古近系东营组孔隙-裂隙型砂岩热储, 井口出水温度在 53~76.8℃, 水化学类型为 Na-Cl 型。地温场受构造控制影响, 为传导型地热系统。根据水化学主要离子组分特征及相关关系、氢氧同位素特征研究, 证实高青热田地热水水源为晚更新世大气降水补给, 其成因类型为积水, 且滞留时间较长, 水岩作用强烈。

关键词:高青县, 沉积盆地型, 水化学特征, 氢氧同位素特征

1 地热地质背景

高青县位于山东省淄博市北部, 因地热资源丰富, 于 2016 年 5 月被中国矿业联合会命名为“中国温泉之城”。高青北依黄河, 地处黄泛冲积平原区, 位于济阳拗陷中。据地热井揭露, 地层自上而下发育第四系、新近系明化镇组、新近系馆陶组、古近系东营组(部分地段缺失)、古近系沙河街组(图 1)。高青断裂是惠民潜断陷和博兴潜断陷的分界断层, 西侧凸起区, 新近系馆陶组直接覆盖在中生界之上, 在青城北部斜坡带, 古近系由南向北层层遭受剥蚀, 使得高青断裂以西东营组发育不完整, 且尚未有地热井勘探, 目前高青县勘探的地热井均分布在高青断裂以东, 高青断裂以东区域也是高青县地热资源主要赋集区。

高青县为沉积盆地型地热资源区(Tan Xiaobo et al., 2019), 热储呈层状, 分布面广, 岩性、厚度稳定, 构造条件比较简单, 地热系统以传导型为主。目前开发利用的地热井热储层均以东营组孔隙-裂隙型热储为主。因此, 东营组是高青县开发利用的主要热储层。东营组顶板埋深 900~1430 m, 底板埋

深一般在 1600~2000 m, 揭露的地层厚度 350~550 m, 热储含水层厚度累计 100~190 m 左右, 单层厚 1.10~40 m, 含水层岩性以中细砂岩为主, 细砂岩次之, 地热水井口温度为 53~76.8℃, 地热流体单井产量 780~2246 m³/d, 地热流体化学类型为 Cl-Na 型, 矿化度 6~15g/L 左右。

高青县地热资源属于新兴资源, 发现、认识、研究和开发利用的历史较短, 以地热钻探主动开发地热流体始于 2008 年, 开发利用条件较好, 成井深度在 2000 m 以浅, 以地热供暖和温泉洗浴为主, 主要分布在城区附近。

2 水质数据收集与分析情况

本文研究收集了 7 处地热水的分析数据, 并在 2019 年采集了 R6 地热井水样进行了常规分析、微量元素分析、氢氧同位素分析。收集的 7 个地热水的水质分析测试由青岛地矿工程勘察院完成。R6 地热井常规分析和微量元素分析由青岛地矿工程勘察院完成, 氢氧同位素由美国 Beta 实验室(Beta Analytic Inc.)测试完成。本次研究所采用的 8 眼地热井的分布见图 1, 地热水化学特征见表 1。

注: 本文为山东省地质矿产勘查开发局 2018 年度水工环地质勘查项目(编号鲁地字[2018]13 号)资助的成果。

收稿日期: 2019-08-09; 改回日期: 2019-09-09; 责任编辑: 李曼。

作者简介: 谭肖波, 男, 1980 年生。高级工程师, 主要从事水文地质、地热地质、环境地质勘查与研究, Email: 13953181851@163.com。

通讯作者: 薄本玉, 女, 1978 年生。工程师, 山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队, Email: bbytxb@126.com。

引用本文:谭肖波, 薄本玉, 姜佃卿, 张辉泉, 郭峰, 吕明荟. 2019. 山东高青县沉积盆地型地热流体地球化学特征及成因探讨. 地质学报, 93(s1): 168~177, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019224.

Tan Xiaobo, Bo Benyu, Jiang Dianqing, Zhang Huiquan, Guo Feng, Lü Minghui. 2019. Geochemical characteristics and genesis of sedimentary basin-type geothermal fluids in Gaoqing County, Shandong Province. Acta Geologica Sinica, 93(s1): 168~177.

表 1 地热水水化学特征一览表(mg/L)

Table 1 Chemical characteristics of geothermal water (mg/L)

序号	编号	pH 值	井口水温 (°C)	TDS	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	水化学类型
1	R1	7.61	76.8	19521	79.07	6831	891.3	68.91	11309.79	22.97	378.8	Cl-Na
2	R2	7.3	64	11926	29.32	4179	440.4	68.24	6990	<1.00	127.4	Cl-Na
3	R3	7.8	53	8118	29.2	2806	271.1	69.1	4607	87.11	180.7	Cl-Na
4	R4	8	66	11110	20.25	3700	528.11	8.18	6737.79	<3	54.89	Cl-Na
5	R5	7.65	74	14724	37.13	4931	659.5	6	8862	44.14	58.05	Cl-Na
6	R6	7.7	67	10281	26.37	3303	676.15	5.31	6109.97	47.55	56.47	Cl-Na
7	R7	7.09	70	9496	20.95	3290	392.6	9.66	5602	39.86	57.94	Cl-Na
8	R8	8.08	60	6188	9.55	2195.5	233.55	0.86	3732.39	2.44	60.19	Cl-Na

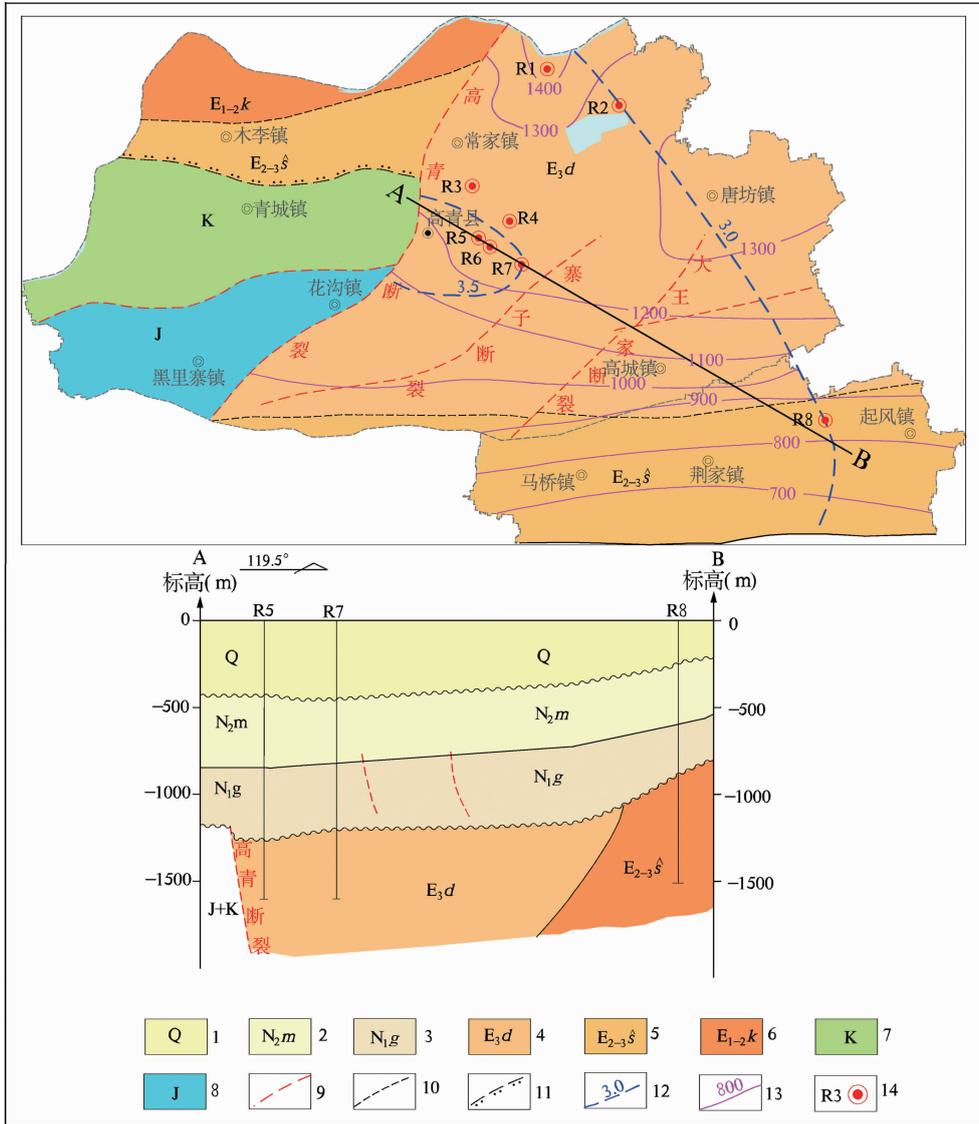


图 1 前新近纪基岩地热地质图

Fig. 1 Geothermal geological map of Pre-Neogene basement

1—第四系;2—新近系明化镇组;3—新近系馆陶组;4—古近系东营组;5—古近系沙河街组;6—古近系孔店组;7—白垩系;8—侏罗系;9—断裂;10—推测地质界线;11—推测角度不整合地质界线;12—地温梯度等值线(C/100m);13—馆陶组底板埋深等值线(m);14—地热井及取样点

1—Quaternary system; 2—Neogene Minghuazhen Formation; 3—Neogene Guantao Formation; 4—Paleogene Dongying Formation; 5—Paleogene Shahejie Formation; 6—Paleogene Kongdian Formation; 7—Cretaceous; 8—Jurassic system; 9—fracture; 10—speculate geological boundary; 11—angular unconformity geological boundary; 12—geothermal gradient isoline(C/100m); 13—isoline of buried depth of floor of Guantao Formation; 14—geothermal wells and sampling points

3 地温场特征

3.1 水平方向变化特征

根据地热井测温资料绘制出盖层地温梯度等值线图(图2),可知高青热田地温梯度一般在3.0~3.4℃/100m,整体趋势由东南向北西逐渐升高,在城区附近高青断裂与高青凸起交汇处呈现较高值。高青地热井揭露的平均地温梯度为3.3℃/100m,大于全球平均值3.0℃/100m(Chen Moxiang,1988),接近渤海盆地地温梯度3.3℃/100m(Wang Liangshu et al.,2002),低于高青所处的济阳凹陷的平均地温梯度3.7℃/100m,从地温梯度来看,其相对为一个低温盆地。

由高青热田1000 m、1500 m深度地温等值线图(图3、图4)可知,1000 m深度的温度范围为45~48.5℃,1500 m深度的温度范围为47.5~65.0℃。不同深度地温线的展布特征不尽相同,在较浅的区域,其地温的分布受盖层的厚度变化趋势影响较大,而在较深的区域,地温场则受构造因素影响较大。如1500 m深度地温等值线展布规律与高青断裂构造轮廓基本一致,这与济阳拗陷区地温场的分布由构造演化决定的特征基本一致(Gong Yuling et

al.,2003)。1500 m为热储层的深度,因此可以认为本区地温场的分布主要是受构造控制影响。

3.2 垂直方向变化特征

区内5眼地热井的测温曲线见图5,测温曲线反映垂向上地温随深度增加而增高规律,主体呈线性展布,表现为传导为主的传热过程。

4 地热流体地球化学特征

4.1 地热水化学特征

4.1.1 基本特征

由表1可知地热水样品pH范围为7.09~8.08,平均值为7.7,均属于弱碱性范围。地热水井口温度为53~76.8℃,为低温水热型地热资源。

4.1.2 主要离子分布特征

高青地热水七大离子 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 中, K^+ 浓度范围为9.55~79.07 mg/L, Na^+ 浓度范围为2195.5~6831 mg/L, Ca^{2+} 浓度范围为233.55~891.3 mg/L, Mg^{2+} 浓度范围为0.86~69.1 mg/L, Cl^- 浓度范围为3732.39~11309.79 mg/L, SO_4^{2-} 浓度范围为<1.00~87.11 mg/L, HCO_3^- 浓度范围为54.89~378.8 mg/L。主要阳离子为 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ ,以

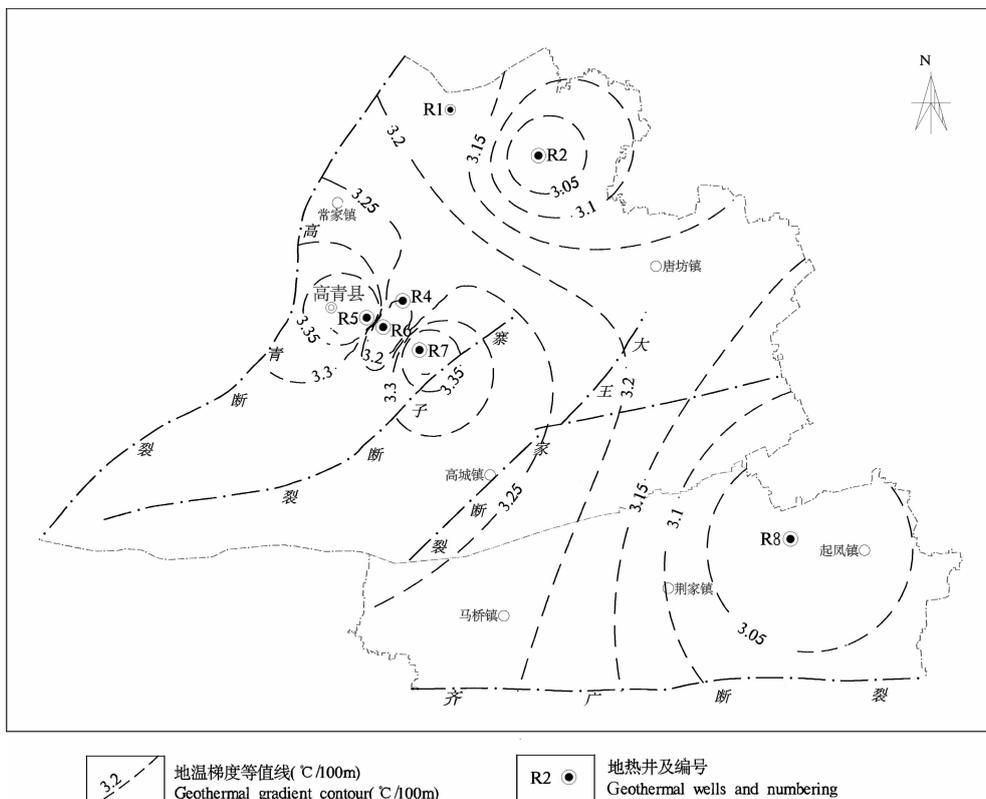


图2 盖层地温梯度等值线图
Fig.2 Geothermal gradient contour of caprock

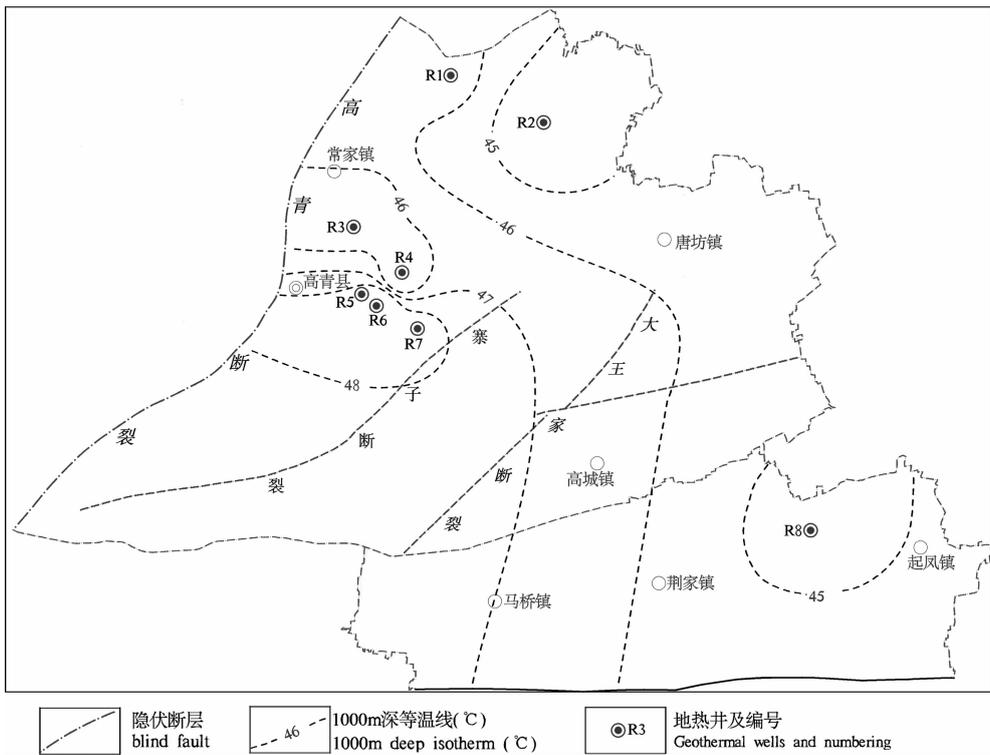


图 3 1000m 深地温图

Fig. 3 1000m deep ground temperature map

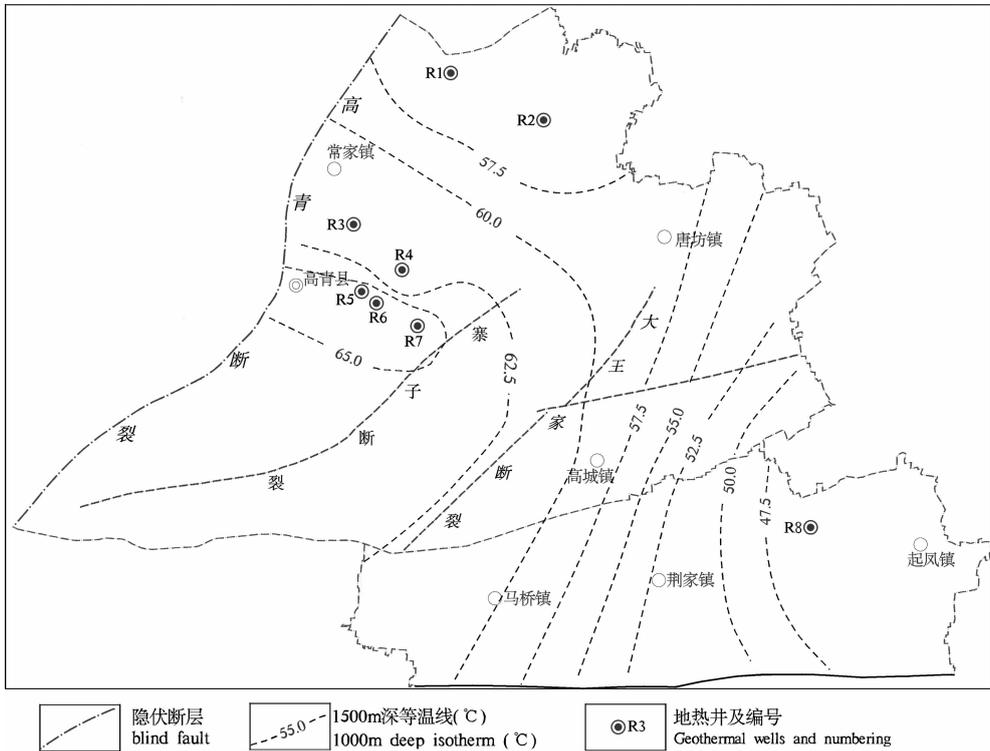


图 4 1500m 深地温图

Fig. 4 1500m deep ground temperature map

Na⁺ 为主, 占当量百分数 80% 以上, 主要阴离子有 Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻, 且以 Cl⁻ 居多, 阳离子含量大

小顺序为 Na⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺ > K⁺, 阴离子含量大小顺序为 Cl⁻ > SO₄²⁻ > HCO₃⁻. TDS 含量为

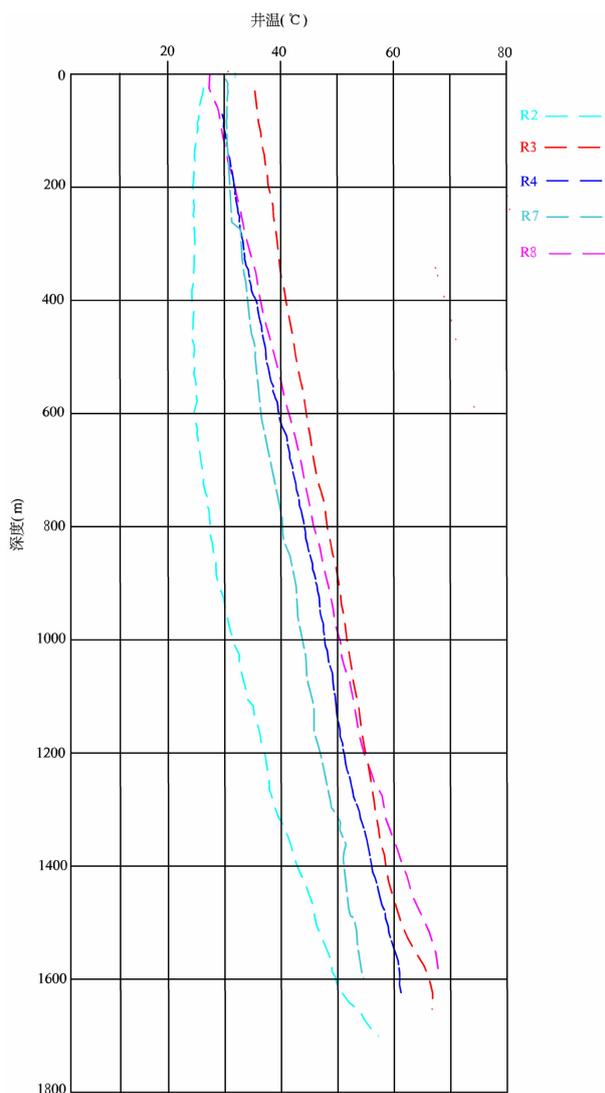


图5 地热井测温曲线图

Fig. 5 Temperature measurement curve of geothermal well

R2~R8 代表地热井的测温曲线

R2~R8 represents the temperature curve of geothermal wells

8118~19521mg/L。

4.1.3 水化学类型特征

高青县东营组地热水水化学类型均为 Cl-Na 型,且 Cl^- 和 Na^+ 含量均较高。地热流体所处水文地球化学环境越封闭,溶解的氯离子和钠离子就越多(Li Changsuo et al., 2018),因此可以认为高青东营组热水所处水文地质环境相对封闭。地下水中 Cl^- 的来源主要有:①沉积岩中所含岩盐或其他氯化物的溶解;②岩浆岩中含氯矿物(氯磷灰石 $Ca_5(PO_4)Cl$ 、方钠石 $NaAlSiO_4 \cdot NaCl$)的风化和溶解;③海水;④火山喷发物的溶滤;⑤人为污染(Wang Dachun et al., 1995)。图 6 反映了地热水 Na^+ 与 Cl^- 的当量比。海水的 Na^+/Cl^- 摩尔浓度约为

0.85 ($\gamma Na/\gamma Cl=0.85$);含岩盐地层溶滤或者岩浆挥发组分的地下水的 Na/Cl 摩尔浓度约为 1.0;而海相淤泥沉积水其 Na^+/Cl^- 摩尔浓度小于 0.85 ($\gamma Na/\gamma Cl<0.85$) (Wang Dachun et al., 1995),从图 6、表 2 可以看出,高青热田地热水 Na/Cl 摩尔浓度绝大部分落在 0.85 附近,介于 0.83~0.94 之间。因此可以判定高青地热田地热水主要为含岩盐地层溶滤的沉积水,是沉积盆地的沉积物在沉积过程中或沉积之后进入其中的古地下水,被埋藏于比较封闭的构造中。但成因较为复杂,同时具备海水、含岩盐地层溶滤作用及海相淤泥沉积水多重特点。这些水的含盐量之所以高,或是因为矿物岩石的溶解,或者是因为页岩的溶滤作用。

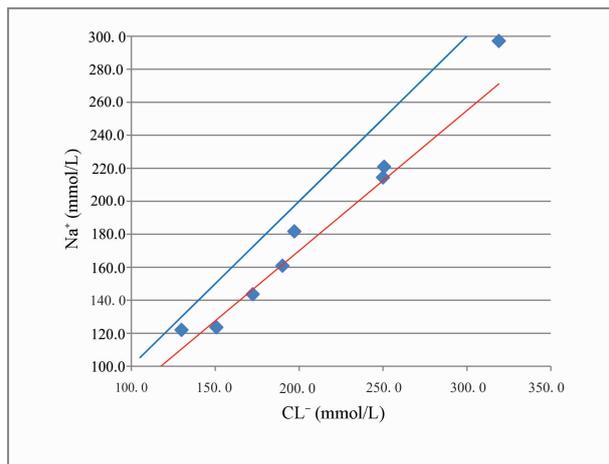


图6 地热水 Na^+ 与 Cl^- 的当量比关系图

Fig. 6 Equivalent ratio between geothermal water Na^+ and Cl^-

表 2 地热水离子比例计算值一览表

Table 2 Calculated values of ion proportion in geothermal water

序号	编号	$\gamma(Na^+)/\gamma(Cl^-)$	$\gamma(Cl^-)/\gamma(Ca^{2+})$	$\gamma(Cl^-)/[\gamma(HCO_3^-)+\gamma(CO_3^{2-})]$
1	R1	0.93	7.17	51.38
2	R2	0.92	8.97	94.43
3	R3	0.94	2.53	9.44
4	R4	0.85	7.21	211.26
5	R5	0.86	7.60	262.74
6	R6	0.83	5.11	186.21
7	R7	0.91	8.07	166.40
8	R8	0.91	9.03	97.65

4.1.4 地热水宏量组分特征

4.1.4.1 各组间的相关关系

根据地热水中七大主要离子 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 与温度(T)和 TDS 的水化学指标相关系数矩阵表(表 3),可知地下热

水中的 TDS、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 与温度呈较强的相关性,表明这些物质有共同或相似的物质来源。由于 Cl^- 主要来自于溶滤作用,所以 TDS、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 也来自于溶滤作用,而且水温的增加有利于大部分矿物水-岩作用的进行。

除 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 外,其他主要离子均与 TDS 呈正相关,表明 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Cl^- 是影响热水中的 TDS 的主要因素,TDS 与 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 的正相关性显著,表明这三种离子的含量对地下热水 TDS 浓度的变化影响较大,而 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 则基本不影响或对 TDS 的影响较小。

热水中 Na^+ 和 Cl^- 、 K^+ 和 Na^+ 具有显著的正相关关系,特别是 Na^+ 和 Cl^- 的相关性极为明显,表明地热水中上述离子具有共同或者相似的物质来源。

SO_4^{2-} 与其他离子基本不相关,体现了 SO_4^{2-} 的不同的物质来源或补给来源,对热水中温度和 TDS 变化基本不影响。

4.1.4.2 与温度的关系

由地下热水中七大离子和 TDS 与井口温度的相关关系(图 7)看出,除 HCO_3^- 、 SO_4^{2+} 、 Mg^{2+} 含量随热水温度的增加略有下降外,其余如 TDS、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 含量均随热水温度的升高而升高,说

明高青地热水随水温的增高,大部分矿物的水-岩相互作用加剧。

4.1.4.3 与 TDS 关系

Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 与 TDS 有极好的相关性,与 Na^+ 相关系数 $r=0.996$,与 Cl^- 的相关系数 $r=0.998$ 。这表明热水中的 TDS 与 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 来源相似;与 Mg^{2+} 相关性较差,与 SO_4^{2-} 呈负相关,体现了不同的物质来源或水-岩作用过程。

4.1.4.4 与 Cl^- 的关系

在自然的水岩系统中,因氯不形成矿物盐也不被吸附到矿物表面,即使是在高温环境下,水-岩相互作用也极难影响到氯的存在状态,因此氯常用于示踪地下热水及系统中与其有较好相关性的其他物质的来源(Sun Hongli et al., 2015)。

(1) Na^+ 与 Cl^- 有极好的正相关性,高浓度的 Na^+ 与 Cl^- 反映了热水在地下有较长的停留时间,地下热水径流时间更长,循环更深,水-岩相互作用强烈。这与高青热田在博兴潜断陷河流三角洲沉积相高矿化度、 Cl-Na 型地下热咸水的特征基本一致。

(2)随着 Cl^- 的增加,水中的 TDS 组分含量也呈增加趋势,说明高青热田地下水矿化度的积累主要是通过溶解地层中的 NaCl 盐类,经过蒸发浓缩

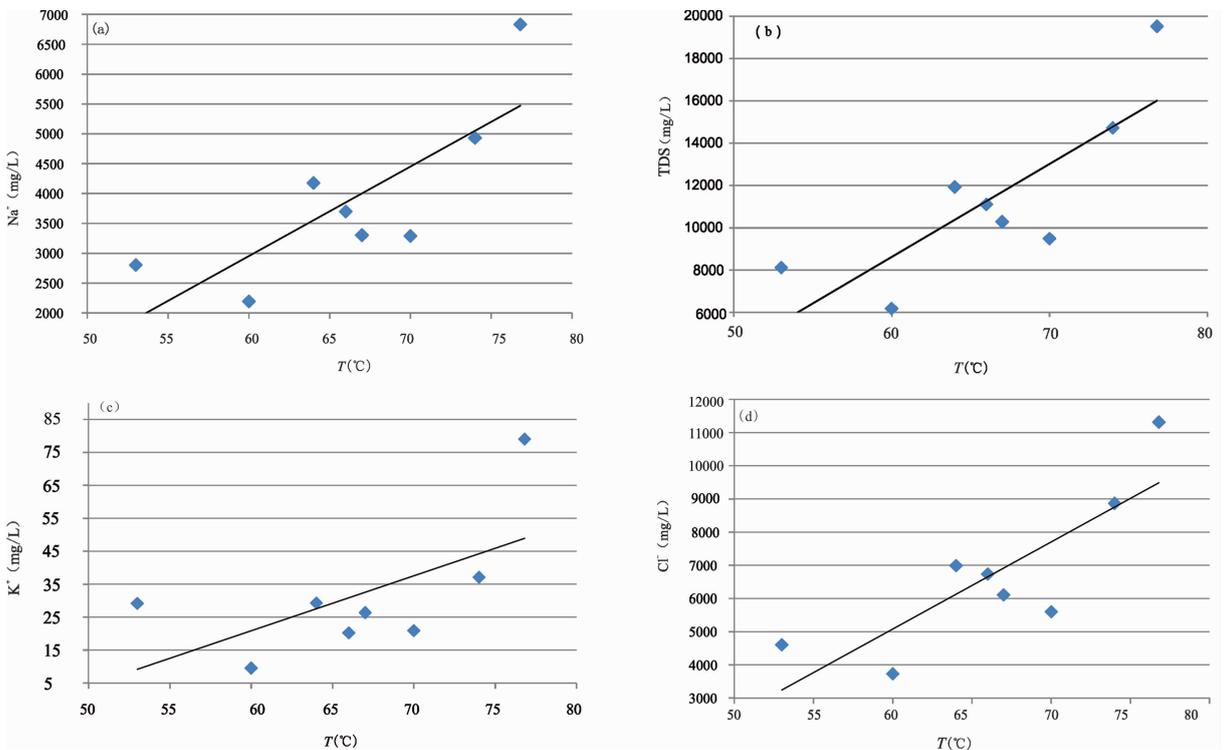


图 7 部分元素与温度相关关系图

Fig. 7 Relation graphs of partial element and temperature

(a)— Na^+ ; (b)—TDS; (c)— K^+ ; (d)— Cl^-

表3 地热水水化学指标相关系数矩阵

Table 3 Correlation coefficient matrix of chemical indexes of geothermal water

	T	TDS	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
T	1								
TDS	0.809	1							
K ⁺	0.595	0.924	1						
Na ⁺	0.775	0.996	0.923	1					
Ca ²⁺	0.775	0.892	0.828	0.859	1				
Mg ²⁺	-0.140	0.418	0.632	0.454	0.261	1			
Cl ⁻	0.807	0.998	0.897	0.992	0.891	0.382	1		
SO ₄ ²⁻	-0.475	-0.354	-0.233	-0.370	-0.281	0.174	-0.386	1	
HCO ₃ ⁻	0.184	0.577	0.830	0.603	0.508	0.775	0.540	-0.021	1

作用形成。Na⁺和Cl⁻离子同矿化度的线性关系表明地下水处于相对封闭的地质环境。

(3)HCO₃⁻与Cl⁻相关性较差,且HCO₃⁻/Cl⁻值较低。较低的HCO₃⁻/Cl⁻值体现了较长的径流途径和较慢的水循环(Han et al., 2010),本次研究8组地热水的平均HCO₃⁻/Cl⁻值为0.018,说明高青地热田地热水的地下径流时间长、循环深、交替周期长。

(4)SO₄²⁻与Cl⁻相关性较差,且SO₄²⁻/Cl⁻值非常低,本次研究8组地热水的平均SO₄²⁻/Cl⁻值为0.005;与HCO₃⁻/Cl⁻值含义相似,SO₄/Cl的高低也反映了地下水的径流快慢及更替强弱,表明东营组地热水径流缓慢、更替周期长。

4.1.4.5 离子比值相关关系研究

地下水中一些离子之间物质的量浓度比例可以帮助分析地下水的各种状态与地质作用,进而用于分析热水的运移聚集和赋存环境(Mondal et al., 2010),本次计算了 $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$ 、 $\gamma\text{Cl}^-/\gamma\text{Ca}^{2+}$ 和 $\gamma\text{Cl}^-/(\gamma\text{HCO}_3^- + \gamma\text{CO}_3^{2-})$ (表2)。

(1) $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$ 值表征地下水变质系数,可以反应地层封闭性,地层水变质程度和活性。其值越小,变质程度越大,反应出地下水所处环境封闭条件越好,其值越大,反映出地下水受渗入水影响越大(Yan Xiaoxue et al., 2019)。高青热田地热水 $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$ 值一般在0.83~0.94,说明其封闭性较好。

(2) $\gamma\text{Cl}^-/\gamma\text{Ca}^{2+}$ 值表征地下水动力特征,其值越大,反映出地下水流动条件越差,地下水流动越缓慢(Li Huidi et al., 2007)。高青地热水其值普遍较大,反应出热田储层流动性较差,流动缓慢。

(3)盐化系数 $\gamma\text{Cl}^-/(\gamma\text{HCO}_3^- + \gamma\text{CO}_3^{2-})$ 主要反应地层水的浓缩程度(Mondal et al., 2010),高青地热水其值较大,说明流动路径长,水循环缓慢。

以上分析认为高青热田地热水随着矿化度的增

加,水中主要离子成分的变化显著特点是Cl⁻和Na⁺含量成线性增加,地下矿化度的积累主要是溶解地层中的NaCl盐类,经蒸发浓缩而形成。综合反应出地热水处于相对封闭的水文地质环境中,地下水径流微弱、循环交替缓慢,地热水以沉积水为主。

4.1.5 微量元素特征

经分析测试,高青地热水典型微量元素为Sr。Sr浓度变化范围为18.98~157.25mg/L,本次采样的地热水均为锶型矿水,同样利用Cl⁻的稳定性,对其进行相关性分析。

分散元素Sr在岩石中极为常见,可用于示踪地下水的运动,盐分来源及水岩作用的强弱(Shand et al., 2009)。热水体系中Sr浓度的含量与Cl⁻的关系如图8所示,结果表明Sr浓度的含量与Cl⁻浓度呈正相关关系,相关系数 $r^2=0.86$,体现为地下热水盐分可能仍然来自于水-岩相互作用,只是不同的区域,水岩作用因时间、循环的方式不同而形成差异,并非来源于深部岩浆。

4.2 同位素特征

4.2.1 氢氧同位素

在不同的地质环境条件下,天然水体的同位素分布呈现不同的特征,可用于研究不同水体的起源、循环、混合等动态特征,并在水化学特征研究的基础上,揭示地下水的补、径、排关系,水岩作用强弱等,本次研究采集了一处地热水(R6)和3处大气降水(Y1、Y2、Y3)进行了同位素测试,并将测试结果投影到中国现代大气降水线(据郑淑慧, 1982) $\delta\text{D}=7.9\delta^{18}\text{O}+8.2$ 和Craig全球大气降水线 $\delta\text{D}=8.0\delta^{18}\text{O}+10$ 上(GMWL)(图9)以进行分析。

由图9分析可知,本次研究所采集的三处大气降水的其 $\delta\text{D}\sim\delta^{18}\text{O}$ 投影点落在GMWL及我国大气降水线附近,表明本区大气降水同位素样基本符合全国性规律。而高青地热水中R6地热水 δD 为

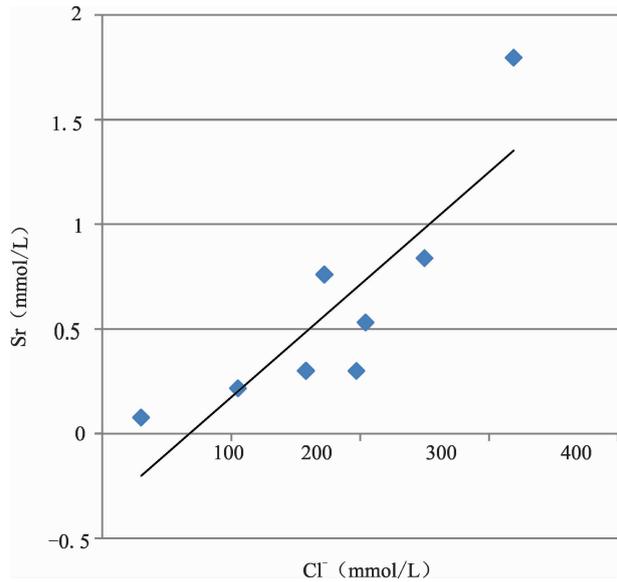


图 8 Sr 与 Cl⁻ 相关图

Fig. 8 Correlation graph between Sr and Cl⁻

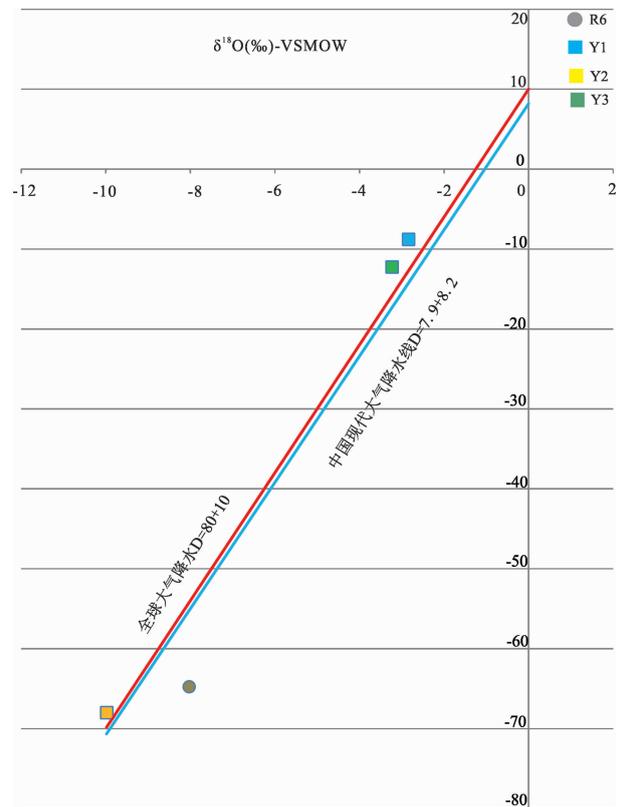


图 9 地热水、大气降水 $\delta D-\delta^{18}O$ 关系

Fig. 9 Relationship between δD and $\delta^{18}O$ in geothermal water and atmospheric precipitation

R6—地热水; Y1-Y3—三处大气降水

R6—Geothermal well; Y1-Y3—three atmospheric precipitations

-64.75‰, $\delta^{18}O$ 为 -8.03‰; 其 $\delta D \sim \delta^{18}O$ 投影点落在 GMWL 及我国大气降水线附近, 说明其东营组地热水起源于大气降水。中国地热水的主体属于

大气水起源的循环水 (Zhu Jialing et al., 2008), 其地热水的来源一般认为是大气降水, 华斌在 2015 年对高青地区地热水进行了氢氧同位素分析 (Hua Bin et al., 2015), 也认为高青地热水主要由大气降水补给形成。所以可认为高青县东营组地热水也是起源于大气降水。

但相对于大气降水, R6 又发生了一定的氧漂移, 分析认为其是在经历了相当长时期的雨水沉降的深循环过程后在地温及地热气作用下被加热形成的, 这也表明高青东营组地热水所处环境更加封闭, 其滞留时间较长, 在漫长的地质年代中, 与围岩发生水岩作用的时间更充分。

4.2.2 碳同位素

地热水的可更新能力与其年龄有关, 年龄越老, 更新能力越差, 现代水指最近数十年入渗补给的地下水, 现代水的存在意味着地下水交替十分活跃, 古地下水指 1000a 以前入渗补给的地下水, 说明地下水更新相对于人类生产活动来说非常缓慢。借助 ^{14}C 进行地下水定年, 据此判定在地下水在开发管理中, 是否具有更新能力, 并估算地下水的水循环速度, 对于合理开发地热水具有重要的意义 (Zhang Guanghui et al., 2006)。 ^{14}C 校正年龄越小, 循环条件越好, ^{14}C 校正年龄越大, 循环条件越差, 径流越缓慢 (Yang Lizhi et al., 2009)。

分别采用 Tamers 法 (封闭溶解系统化学稀释校正模型)、Pearson 法 (封闭溶解系统同位素混合)、Gonfiantinie 法 (开放溶解系统同位素混合—交换校正模型) 以及开放系统化学溶解—同位素交换校正模型 (Mook 法) (Wang Hengchun, 1991) 对本次检测的地下水 ^{14}C 年龄进行了校正, 并对校正结果进行加权平均, 得出 R6 地热井热水年龄为 25.86ka, 说明其热水是由晚更新世大气降水补给, 且滞留时间较长。这也与前面分析的 R6 地热井高浓度的 Na^+ 与 Cl^- 相关性反映的情况一致。

5 结论

(1) 高青县地热为沉积盆地型地热资源, 热储层以古近系东营组砂岩热储为主, 为高矿化度 Na-Cl 型弱碱性低温水热型地热资源, 地热水径流缓慢, 更替周期长。

(2) 根据地球化学特征中各离子组分特征及相互关系研究以及氢氧同位素研究, 高青地热水为晚更新世大气降水补给, 无现代大气降水补给, 交换更替能力较差, 赋存环境较封闭, 其水化学及同位素特

征证实其具有沉积水特征。

(3)高青地热水为沉积封闭性地下水,应积极研究相关回灌措施,实施可持续开采。

References

- Chen Moxiang. 1988. Geothermics of North China. Beijing: Science Press.
- Gan Haonan, Yue Gaofan. 2019. Hydrogeochemical characteristics and genesis of typical geothermal fields from Huangshadong to Conghua in Guangzhou. *Geological Review*, 65(3): 743~754 (in Chinese with English abstract).
- Gong Yuling, Wang Liangshu, Liu Shaowen, Guo Lingzhi, Cai Jingong. 2003. Distribution characteristics of geotemperature field in Jiyang depression, Shandong, North China. *Chinese Journal of Geophysics*, 46(5): 652~658 (in Chinese with English abstract).
- Han D M, Liang X, Jin M G, Currell M J, Song X F, Liu C M. 2009. Evaluation of groundwater hydrochemical characteristics and mixing behavior in the Daying and Qicun geothermal systems, Xinzhou Basin. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 189(1): 92~104.
- Hua Bin, Wang Wei, Li Xiaoyan. 2015. Geothermal resources and environmental benefit in Gaoqing area of Shandong Province. *Ground Water*, 37(2): 74~76 (in Chinese with English abstract).
- Li Changsuo, Wu Xianchang, Sun Bin, Sui Haibo, Geng Fuqiang, Qi Huan, Ma Xueying. 2018. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of geothermal water in northern Jinan. *Earth Science*, 43(sup 1): 313~325 (in Chinese with English abstract).
- Li Huidi, Zhang Senqi, Bai Jiaqi, Zhou Jinyuan, Shi Weidong, Zhao Yue. 2007. Hydrochemistry and origin of the Yaoshuitan geothermal field, Xining, Qinghai. *Acta Geologica Sinica*, 81(9): 1299~1304 (in Chinese with English abstract).
- Mondal N C, Singh V P. 2010. Determining the interaction between groundwater and saline water through groundwater major ions chemistry. *Journal of Hydrology*, 38(1): 100~111.
- Shand P, Darbyshire D P F, Love A J, et al. 2009. Sr isotopes in natural waters: application to source characterization and waterrock interaction in contrasting landscapes. *Applied Geochemistry*, 24(4): 574~586.
- Sun Hongli, Ma Feng, Lin Wenjing, Liu Zhao, Wang Guiling, Nan Dawa. 2015. Geochemical characteristics and geothermometer application in high temperature geothermal field in Tibet. *Geological Science and Technology Information*, 34(3): 171~177 (in Chinese with English abstract).
- Tan Xiaobo, Wei Shanming, Bo Benyu, Jiang Dianqing. 2019. Analysis of occurrence characteristics of geothermal resources and relation to control structures in Zibo City, China. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 7(1): 70~76.
- Wang Dachun, Zhang Renquan, Shi Yihong, Xu Shaozhuo, Yu Qingchun, Liang Xing. 1995. *Hydrogeological Basis*. Beijing: Geology Press (in Chinese with English abstract).
- Wang Hengchun. 1991. *An Introduction to Isotope Hydrogeology*. Beijing: Geology Press (in Chinese with English abstract).
- Wang Liangshu, Liu Shaowen, Xiao Weiyong, Li Cheng, Li Hua, Guo Suiping, Liu Bo et al. 2002. Distribution feature of terrestrial heat flow densities in the Bohai Basin, East China. *Chinese Science Bulletin*, 47(9): 857~862 (in Chinese with English abstract).
- Yang Lizhi, Zhang Guanghui, Liu Zhongye, Liu Chunhua. 2009. Isotope age of groundwater in Lubei Plain and an evaluation of its renewable capacity. *Acta Geoscientia Sinica*, 30(2): 235~242 (in Chinese with English abstract).
- Yan Xiaoxue, Gan Haonan, Yue Gaofan. 2019. Hydrogeochemical characteristics and genesis of typical geothermal fields from Huangshadong to Conghua in Guangdong. *Geological Review*, 65(3): 743~754.
- Zhang Guanghui, Hao Mingliang, Yang Lizhi, Nie Zhenlong. 2006. Origin and achievement of groundwater evolution research on continental scale in China. *Geological Review*, 52(6): 771~776 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Jialing, Wang Kun, Wang Dongsheng. 2008. Environment isotope application on evaluation origin and causing of geothermal resources. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 29(3): 263~266.

参 考 文 献

- 陈墨香. 1988. 华北地热. 北京: 科学出版社.
- 华斌, 王威, 李霄燕. 2015. 山东省高青地区地热资源环境效益研究. *地下水*, 37(2): 74~76.
- 龚育龄, 王良书, 刘绍文, 郭令智, 蔡进功. 2003. 济阳拗陷地温场分布特征. *地球物理学报*, 46(5): 652~658.
- 李常锁, 武显仓, 孙斌, 隋海波, 耿付强, 齐欢, 马雪莹. 2018. 济南北部地热水水化学特征及其形成机理. *地球科学*, 43(增刊 1): 313~325.
- 李惠娣, 张森琦, 白嘉启, 周金元, 石维栋, 赵越. 2007. 西宁药水滩地热水水化学特征及热水起源初探. *地质学报*, 81(9): 1299~1304.
- 孙红丽, 马峰, 蔺文静, 刘昭, 王贵玲, 男达瓦. 2015. 西藏高温地热水地球化学特征及地热温标应用. *地质科技情报*, 34(3): 171~177.
- 王大纯, 张人权, 史毅虹, 许绍倬, 于青春, 梁杏. 1995. *水文地质学基础*. 北京: 地质出版社.
- 王恒纯. 1991. *同位素水文地质概论*. 北京: 地质出版社.
- 王良书, 刘绍文, 肖卫勇, 李成, 李华, 郭随平, 刘波, 罗毓晖, 蔡东升. 2002. 渤海盆地大地热流分布特征. *科学通报*, 47(2): 151~155.
- 杨丽芝, 张光辉, 刘中业, 刘春华. 鲁北平原地下水同位素年龄及可更新能力评价. *地球学报*, 30(2): 235~242.
- 闫晓雪, 甘浩男, 岳高凡. 2019. 广东惠州一从化典型地热水文地球化学特征及成因分析. *地质论评*, 65(3): 743~754.
- 朱家岭, 王坤, 王东升. 2008. 环境同位素在研究地热资源形成过程中的应用. *太阳能学报*, 29(3): 263~266.
- 张光辉, 郝明亮, 杨丽芝, 聂振龙. 2006. 中国大尺度区域地下水演化研究起源与进展. *地质论评*, 52(6): 771~776.

Geochemical characteristics and genesis of sedimentary basin-type geothermal fluids in Gaoqing County, Shandong Province

TAN Xiaobo^{1,2)}, BO Benyu^{*1)}, JIANG Dianqing¹⁾, ZHANG Huiquan³⁾,
GUO Feng¹⁾, LÜ Minghui^{1,2)}

1) No. 801 Hydrogeological Engineering Geological Team of Shandong Bureau of Geological and Mineral Exploration and Development, Jinan 250014, China; 2) Groundwater Resources and Environment Innovation Team of Shandong Geological and Mineral Bureau, Jinan 250014, China; 3) Gaoqing Natural Resources Bureau, Zibo 256300, China

* Corresponding author: bbytxb@126.com

Abstract

The geothermal resources in Gaoqing County are of sedimentary basin type. The main thermal reservoirs are pore-fissure sandstone reservoirs of the Paleogene Dongying Formation. The outlet water temperature of the wellhead ranges from 53 °C to 76.8 °C, and the hydrochemical type is Na-Cl. The geothermal field is a conductive geothermal system affected by tectonic control. According to the characteristics of main ion components and their correlations, hydrogen and oxygen isotopes, it is confirmed that the source of geothermal water in Gaoqing hot field is recharged by late Pleistocene atmospheric precipitation, and its genetic type is sedimentary water, which has a long detention time and strong water-rock interaction.

Key words: Gaoqing County; sedimentary basin type; hydrochemical characteristics; characteristics of hydrogen and oxygen isotopes