

胶东半岛中低温对流型地热资源水化学特征分析

史猛¹⁾, 张杰¹⁾, 殷焘¹⁾, 杨宁¹⁾, 江海洋²⁾

1) 山东省第三地质矿产勘查院, 山东烟台, 264000; 2) 山东省第一地质矿产勘查院, 济南, 250013

内容提要:胶东半岛是中国东部沿海地区中低温对流型地热资源赋存最丰富的地区之一, 通过地热流体水化学特征分析可以了解其水化学及补径排特征、热储温度、地热流体循环深度及可更新能力等。本文通过胶东地区 15 处天然温泉地热流体及其附近基岩水体、第四系水体的常规水质分析、氡氧同位素、地热流体 $\gamma\text{Na}/\gamma\text{Cl}$ 、 $\gamma\text{SO}_4/\gamma\text{Cl}$ 比值及管道模型和断层带模型计算流体循环深度等方法, 得知胶东地区地热流体水化学类型主要以 $\text{Cl}-\text{Na}$ 、 $\text{Cl}-\text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型水、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4-\text{Na}$ 、 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3-\text{Na}$ 型水为主, 矿化度 0.45~7.68g/L, pH 7.3~8.63。地热流体主要来源于大气降雨入渗补给, 且与地热田周边的浅部地下水体无水力联系, 均为深循环径流补给的地热流体, 循环深度主要分布在 1.5~10km 之间, 属中深循环地热流体。研究区地热流体均未达到水岩平衡状态, 对于地热流体 $\gamma\text{Na}/\gamma\text{Cl}$ 、 $\gamma\text{SO}_4/\gamma\text{Cl}$ 比值普遍较大的地热田, 其对应的地热流体循环深度相对较浅, 表明地热流体水动力环境封闭性差, 可更新能力强, 地热流体处于不断的补给-径流-排泄的过程, 部分地热田 $\gamma\text{Na}/\gamma\text{Cl}$ 、 $\gamma\text{SO}_4/\gamma\text{Cl}$ 比值接近海水, 是由于地热流体循环深度深、时间长, 地热流体进行了大量的脱碳酸作用。本文对胶东地区中低温对流型地热流体的水化学特征分析将有助于增强人们对该类型地热资源形成机理的认识。

关键词:胶东半岛; 地热流体; 水化学; 水岩平衡

胶东半岛地处华北平原东北部沿海地区, 山东省东部, 北临渤海、黄海与辽东半岛相对, 土地总面积达 3 万 km^2 。受太平洋板块与欧亚板块碰撞的影响, 特别是中生代以来环太平洋板块构造活动的影响, 研究区内广泛发育有 NNE、NE、NW 向的断裂构造, 这些不同时代、不同期次且性质差异的构造行迹组合为胶东地区中低温对流型地热资源的形成提供了前提条件(Jin Bingfu et al., 2000; Zhang Tao, 2011)。通过地热流体水化学特征分析是初步认识地热资源最简单有效的方式, 早在 1982 年, Zheng Shuhui et al. (1982) 等就利用氢氧同位素分析了西藏地区地热流体可能的流动方向及补给来源等; Li Huiti et al. (2007) 利用地热流体水化学和同位素分析结果来探讨地热田的水文地球化学特征和热水的起源及年龄; Yang Xunchang et al. (2019) 利用鲁北平原馆陶组地热流体水化学特征分析地热流体的运移方向; Liu Zhao et al. (2017) 利用水化学特征分析

了西藏措美县古堆地热田的热储特征, 地热流体水化学分析手段被广泛应用于地热地质调查之中。胶东地区以往也开展了大量地热流体水化学研究工作, 但更多的是集中在对基础水化学特征的分析或单个地热田的水化学特征分析(Zhao Hui et al., 2018), 仍缺乏系统而深入的研究。

胶东地区以往已施工的人工地热深井有 20 余处, 然而由于对其地热流体的赋存机理研究不透彻, 在已施工的地热井中出现了大量失败的地热勘探井, 给人们造成了巨大的经济损失。随着国家能源结构优化改革政策的实施, 地热能在未来能源结构中的地位越来越重要, 胶东半岛又是山东省新旧动能转换的试点区域, 未来胶东地区的地热资源勘探工作会进一步扩大, 本文对胶东地区中低温对流型地热流体的水化学特征分析将有助于增强人们对该类型地热资源形成机理的认识。

注: 本文为山东省地质矿产勘查开发局资助项目(编号鲁地字[2014]85 号、鲁地字[2017]23 号)资助成果。

收稿日期: 2019-07-23; 改回日期: 2019-09-12; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 史猛, 男, 1988 年生, 工程师, 从事地热地质方向研究工作, Email: 495746716@qq.com。通讯作者: 殷焘, 男, 1985 年生, 工程师, 从事水文地质及地热地质工作, Email: 397921601@qq.com。

引用本文: 史猛, 张杰, 殷焘, 杨宁, 江海洋. 2019. 胶东半岛中低温对流型地热资源水化学特征分析. 地质学报, 93(s1): 138~148, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019221.
Shi Meng, Zhang Jie, Yin Tao, Yang Ning, Jiang Haiyang. 2019. Hydrochemistry characteristic analysis of low-medium temperature convective geothermal resources in Jiaodong Peninsula. Acta Geologica Sinica, 93(s1): 138~148.

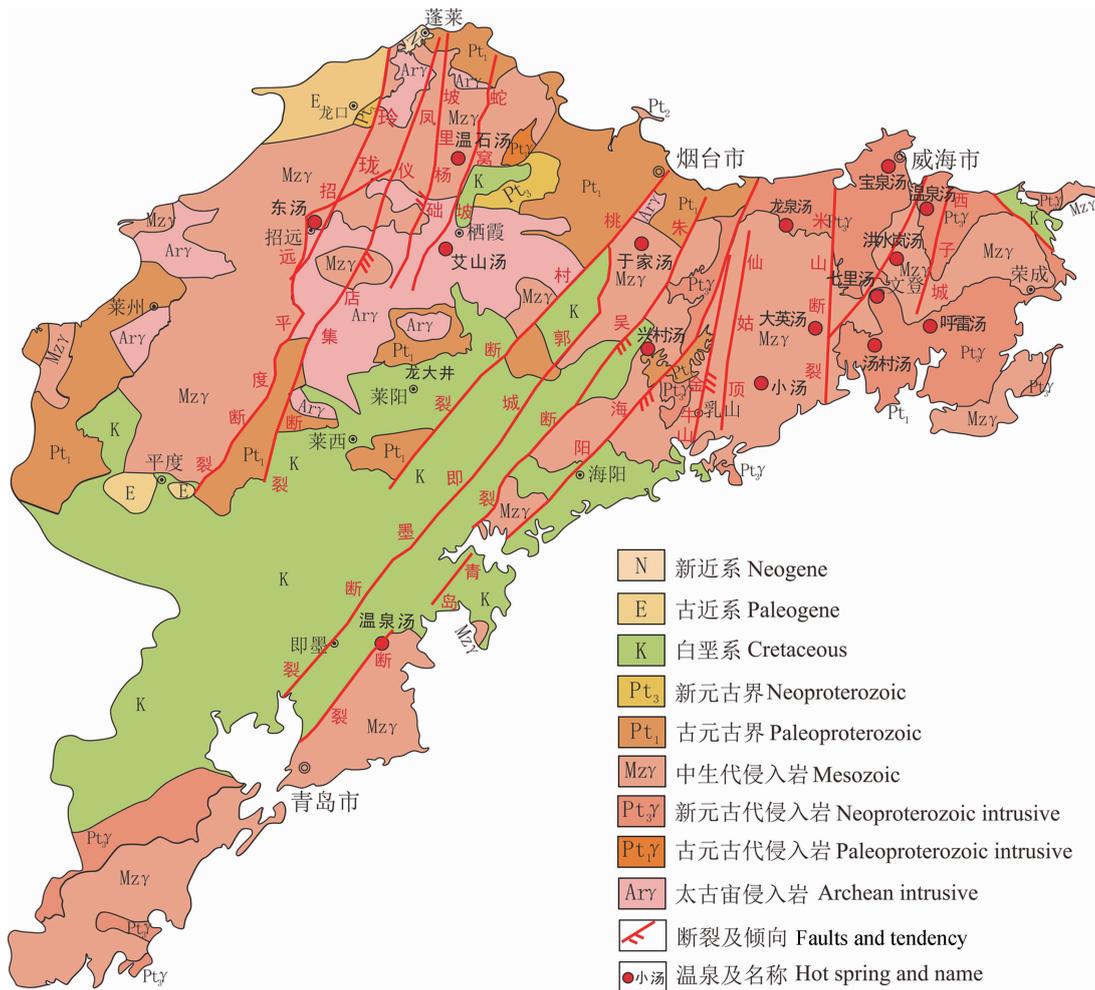


图 2 胶东地区基岩地质与构造、温泉分布图

Fig. 2 The map showing geology and tectonic of bedrock and distribution of hot spring in Jiaodong Peninsula

热流体同时也接受部分海水补给的缘故；pH 值变化在 7.3~8.63 之间，整体显碱性；常量组分中阳离子 Na⁺ 含量最高，其次为 Ca²⁺，主要阴离子为 Cl⁻，其次为 HCO₃⁻ 与 SO₄²⁻，其水化学类型主要为 Cl-Na、Cl-Na·Ca 型水、HCO₃·SO₄-Na、SO₄·HCO₃-Na 型水(图 3)。

胶东地热流体同时含有丰富的对人体有益的微量元素和组分，其中 F⁻ 含量 1.52~10.95 mg/L，偏硅酸含量 71~141 mg/L，Ba²⁺ 含量 0.05~0.41 mg/L，Li⁺ 含量 0.04~1.82 mg/L，Sr²⁺ 含量 0.4~32.5mg/L，微量元素含量较高是胶东温泉地热流体的主要特征之一。

3 地热流体来源及形成

由于不同来源的水分由不同的氢氧同位素组成，因此可利用地下热水中氢氧同位素的组成来研究地热流体的来源。根据天然温泉水样品 δD 和

δ¹⁸O 数据点在 δD-δ¹⁸O 关系图上的位置，可以判断地下热水的来源(Zhang Hongping et al., 1991)。如果地热流体 δD 和 δ¹⁸O 数据点多落在大气降水线的附近，则说明地下热水起源于大气降水，但是存在一些地下水起源于大气降水但发生 δD 和 δ¹⁸O 数据点偏离大气降水线的情况，这可能是因为发生了同位素交换作用或其他原因(陈宗宇等，2010)。

本次研究工作取样及收集的地热流体氧同位素分析结果见表 2。

由图 4 可以看出，研究区温泉地热流体的 δD 和 δ¹⁸O 数据点都落在全国大气降雨线及中国东部地区大气降雨线附近，未出现明显的氧漂移，这说明地热流体的地热水来源主要来自于大气降雨，而非地球内部的内生水或者古封存水等水体。

此外，根据表 1 分析数据结果绘制天然温泉与其周围基岩深井、第四系浅井的 piper 三线图(图 5)。由图 5 可见，地热流体中水化学类型明显不同

表 1 胶东天然温泉、基岩井及第四系水井水质分析一览表(mg/L)

Table 1 Groundwater temperature, pH, and concentrations of major ions, H₂SiO₃, Sr, and TDS in Jiaodong Peninsula(mg/L)

取样点	取样井类型	温度(℃)	pH	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	F ⁻	H ₂ SiO ₃	Ba	Li	Sr	TDS
宝泉汤	温泉井	67	7.63	1553.00	439.20	41.46	2906.25	355.15	208.99	2.39	88.00	0.13	1.47	20.40	5555.74
宝泉汤	第四系井	14	7.16	77.07	122.10	40.84	146.88	98.23	336.70	0.33	41.30	0	0.02	0.54	805.32
宝泉汤	基岩井	14	7.32	67.74	134.20	42.80	126.25	108.31	351.21	0.22	45.80	0	0.03	0.52	776.62
温泉汤	温泉井	58	7.48	314.00	50.48	4.65	386.07	138.53	214.79	3.80	111.20	0.07	0.97	2.00	1113.86
温泉汤	第四系井	16	7.23	23.06	36.61	12.06	41.77	45.34	69.96	0.28	22.10	0	<0.02	0.24	240.14
温泉汤	基岩井	14	7.49	29.71	42.34	13.07	37.34	20.15	133.52	0.28	28.50	0	<0.02	0.23	274.67
洪水岚汤	温泉井	74	7.30	184.00	25.46	2.35	56.96	141.05	296.06	5.23	136.50	0.09	0.59	1.50	681.79
洪水岚汤	第四系井	15	6.78	27.74	100.70	27.74	37.34	110.83	153.84	0.41	35.00	0	0.02	0.58	554.14
洪水岚汤	基岩井	14	6.97	29.79	55.51	10.53	39.87	25.19	119.01	0.39	33.80	0	0.03	0.90	319.74
七里汤	温泉井	66	8.46	170.80	22.43	1.35	46.20	178.83	197.38	8.92	136.50	0.06	0.31	1.6	641.95
七里汤	第四系井	16	7.50	206.50	17.19	3.66	52.53	105.79	354.12	7.61	44.40	0	0.16	0.62	609.42
七里汤	基岩井	15	8.94	68.53	72.35	18.96	126.58	65.49	130.62	0.44	31.20	0	0.02	0.71	513.58
呼雷汤	温泉井	60	8.36	262.10	34.33	0.53	172.78	357.67	58.05	5.89	141.10	<0.05	0.30	2.20	985.25
呼雷汤	第四系井	15	6.76	73.31	64.20	26.81	109.49	78.08	150.93	0.54	30.20	0	<0.02	0.53	556.31
呼雷汤	基岩井	14	6.70	36.13	55.57	13.19	56.96	40.30	75.47	0.21	39.40	0	<0.02	0.41	369.68
汤村汤	温泉井	51	7.58	1355.00	695.90	2.83	3227.79	299.73	34.83	1.52	71.30	0.12	1.53	32.5	5724.11
汤村汤	第四系井	16	7.06	29.51	31.81	21.00	35.44	68.01	127.71	0.39	18.60	0	0.02	0.37	315.65
汤村汤	基岩井	14	7.66	30.34	62.21	15.93	60.76	52.89	136.42	0.44	34.10	0	0.02	0.59	349.85
大英汤	温泉井	62	7.97	393.40	197.50	0.35	810.11	241.80	40.64	2.51	76.40	0.09	0.47	11.3	1739.74
大英汤	第四系井	14	7.49	229.80	144.50	4.09	468.35	181.35	78.37	1.96	44.90	0	0.30	7.91	1114.37
大英汤	基岩井	14	7.16	24.06	21.61	4.53	21.61	20.15	49.34	0.30	43.70	0	<0.02	0.14	186.65
乳山小汤	温泉井	56	7.57	633.50	244.30	2.74	1291.12	198.98	52.25	1.90	78.80	0.11	1.53	21	2483.06
乳山小汤	第四系井	15	7.28	73.04	102.00	20.28	259.49	45.34	87.08	0.21	48.90	0	0.04	1.57	595.28
乳山小汤	基岩井	14	6.66	20.28	29.92	12.12	22.78	40.30	29.03	0.19	27.90	0	<0.02	0.37	242.49
龙泉汤	温泉井	59	8.63	131.50	11.60	1.21	44.50	86.66	194.47	8.91	76.70	0.12	0.08	1.70	444.41
龙泉汤	第四系井	15	6.52	24.80	61.90	23.90	31.00	110.08	78.37	0.22	38.50	0	0.02	0.45	447.42
龙泉汤	基岩井	14	6.72	26.00	29.50	12.72	29.60	49.18	72.56	0.20	29.70	0	0.01	0.23	260.24
于家汤	温泉井	57	8.54	106.70	10.80	1.16	41.10	65.58	130.62	8.55	90.40	0.01	0.28	0.4	379.48
于家汤	第四系井	14	8.04	28.20	13.30	10.34	26.30	25.76	81.27	0.20	1.50	0	0	0.14	149.02
于家汤	基岩井	14	7.03	31.40	46.90	16.85	34.40	67.97	133.52	0.46	20.40	0	0.01	0.34	308.32
乳山兴村汤	温泉井	28	8.63	163.10	5.80	0.26	78.20	163.94	66.67	10.95	82.90	0.01	0.04	1.20	523.38
乳山兴村汤	第四系井	14	7.96	162.50	7.60	1.04	76.10	168.63	89.98	11.40	82.70	0	0.04	1.10	540.19
乳山兴村汤	基岩井	14	7.98	134.60	10.40	2.51	64.70	124.13	104.49	9.68	45.60	0	0.03	1.58	434.66
即墨东温汤	温泉井	62	7.70	1943.00	790.70	6.37	4413.70	269.33	52.25	2.91	107.10	0.41	1.82	32.00	7660.23
即墨东温汤	第四系井	16	7.48	544.80	470.00	24.01	1314.00	620.64	55.15	3.84	13.10	0	0.68	9.88	3056.78
即墨东温汤	基岩井	14	7.19	53.30	86.80	21.30	77.50	98.37	89.98	0.42	23.60	0	0.02	0.52	547.70
艾山汤	温泉井	52	7.99	204.40	11.50	0.81	70.10	124.13	298.97	9.29	92.00	0.05	0.18	0.90	646.65
艾山汤	第四系井	15	6.83	58.20	175.00	43.71	52.60	224.83	217.69	0.37	27.00	0	0.04	0.70	1006.05
艾山汤	基岩井	14	7.08	41.20	99.10	28.13	51.90	107.73	179.96	0.23	24.00	0	0.02	0.58	577.97
温石汤	温泉井	54	7.39	342.30	40.40	3.77	92.30	266.99	571.81	5.85	128.30	0.04	0.52	3.20	1149.56
温石汤	第四系井	14	6.89	64.20	121.60	30.12	80.20	107.73	101.59	0.40	30.10	0	0.03	1.00	791.73
温石汤	基岩井	14	7.23	51.60	103.80	20.97	80.20	72.60	116.10	0.31	41.20	0	0.03	0.76	640.29
招远东汤	温泉井	81	7.75	1052.00	109.30	7.70	1701.50	131.15	136.42	4.14	116.50	0.29	1.41	19.30	3243.99
招远东汤	第四系井	14	7.00	53.10	134.60	33.65	96.40	131.15	206.08	0.17	23.20	0	0.03	0.70	760.07
招远东汤	基岩井	14	7.41	68.20	113.90	38.29	132.10	112.42	354.12	0.70	22.50	0	0.03	4.50	684.96

注:测试单位:国土资源部济南矿产资源监督检测中心。

于地热田周边的第四系水体与基岩水体的水化学类型,且地热流体阳离子以 Na⁺ 为主,而其周边的第四系与基岩水体则以 Ca²⁺、Mg²⁺ 离子为主;地热流体中的阴离子中 Cl⁻ 离子含量明显较高与其周边的水体。同时从表 1 可以看出,地热流体中的 Ba、Li、Sr、偏硅酸等离子的含量也明显高于温泉附

近第四系浅井与基岩深井中相同离子的含量,并且地热热水的矿化度明显高于第四系浅井与基岩深井的矿化度。以上特征综合表明地热流体的补给来源并不是温泉附近的第四系水或者基岩裂隙水的直接补给,天然温泉地热流体与温泉附近的区域地下水没有水力联系或者是水力联系很微弱(Lu Xurong

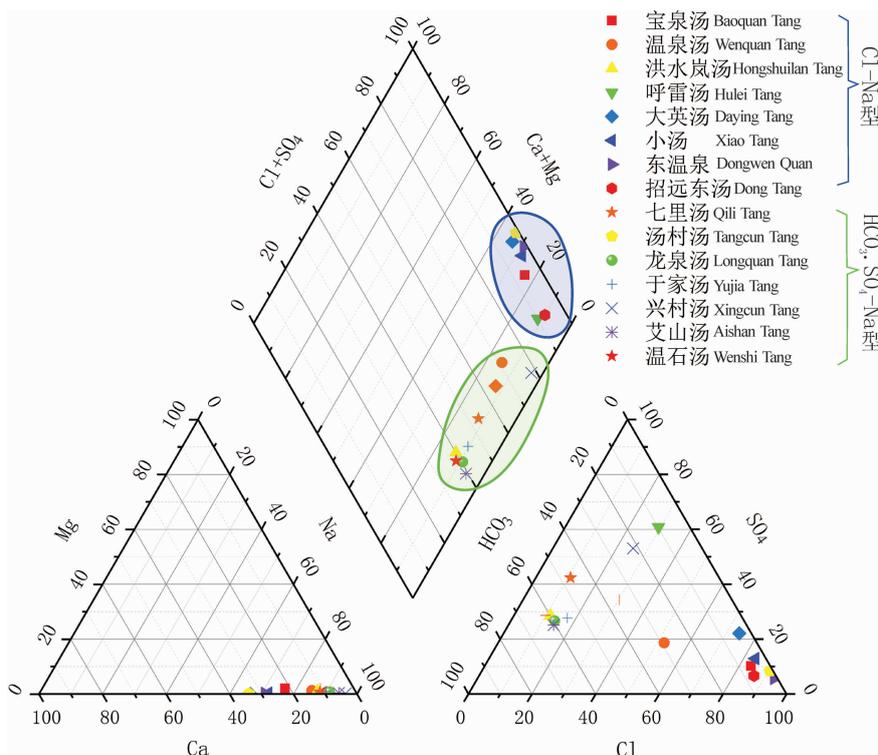


图3 胶东天然温泉水化学类型 Piper 图

Fig. 3 Piper diagram of hot springs hydrochemical types in Jiaodong

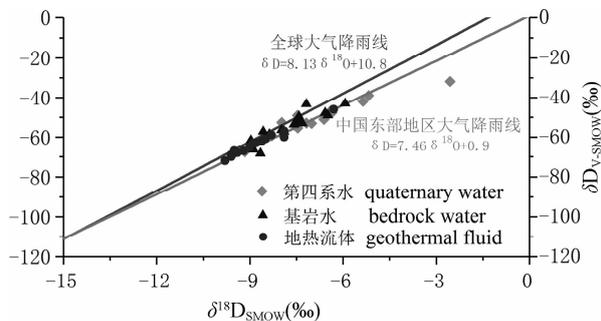


图4 胶东地热田地热水中 $\delta D-\delta^{18}O$ 关系图

Fig. 4 $\delta D-\delta^{18}O$ distribution of geothermal water in Jiaodong geothermal field

et al., 2010), 其补给是大气降雨通过地表裂隙入渗进入地表后, 地下水沿着构造裂隙运移至地球深部, 在地壳深部合适的位置发生水热对流, 加热后的地热流体沿着构造薄弱的位置沿着热储通道上升而形成温泉。

4 循环深度

地下水循环深度是指地表到最深地下水的隔水层底板的垂直深度, 地下水循环研究的重要内容之一, 它反映了地下水系统资源更新速度, 是探究地下水系统的补径排特征的重要参考依据。胶东地区

地热流体主要受断裂构造控制作用的影响, 其循环深度很大程度上受控于可导水断裂切割的深度。

当前常用的计算地热流体循环深度的方法有地热温标法(戴振宇, 2017)、同位素法(Luo Lu et al., 2014)等。由于本次研究过程收集到了1965年山东省地矿局八〇一水文地质队的监测的地热田天然状态下的自流量值(相当于背景流量值), 因此本次计算方法采用 Wang Jiyang et al. (1990)提出的管道模型和断层带模型来计算地下水循环深度。

如图6, 其中 T_r 为热储温度, T_s 为地表出露热水温度, T_0 为当地平均气温, M' 为温泉天然状态下自流量值。其中 T_s 、 M' 、 T_0 为实测数据, T_r 则需要结合水质资料进行计算。

其中热储温度 T_r 计算方法如下:

胶东地区濒临渤海、黄海, 部分天然温泉中的地热流体高矿化度是由于海水的混入, 海水的混入不仅带来了大量的 Cl^- , 还带来了大量的 Na^+ 、 K^+ , 热水中的 Na^+ 、 K^+ 等成分不易与围岩达到平衡, 因此研究认为阳离子温标方法不适用于胶东地区地热系统。为了排除海水对温标计算的影响, 本次研究认为 SiO_2 更适宜胶东中低温对流型地热系统。

其中, 根据 SiO_2 温标计算热储温度 $T(^\circ C)$ 的计算公式如下:

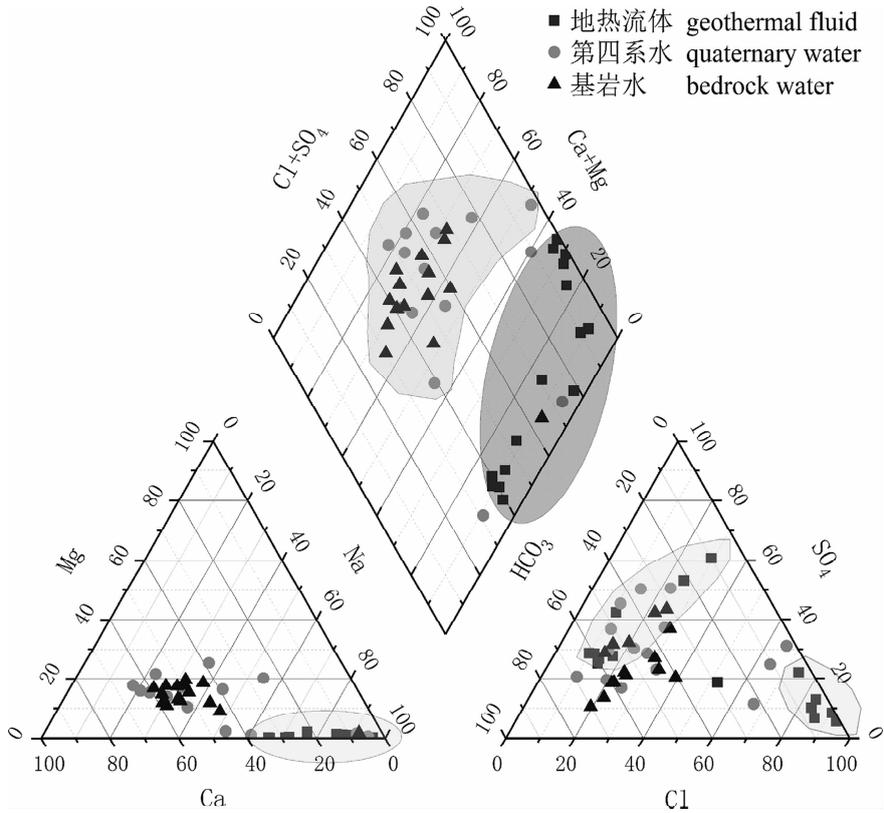


图 5 胶东天然温泉与周围基岩深井、第四系浅井 piper 图

Fig. 5 Piper diagram of hot springs and bedrock deep wells, Quaternary shallow wells in Jiaodong Peninsula

表 2 胶东地区地热流体及地表水中同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 分析结果

Table 2 Results of isotope $\delta^{18}\text{O}$ and δD in geothermal fluids and groundwater waters in Jiaodong Peninsula

取样地点	水样类型	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	水样类型	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	水样类型	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)
威海宝泉汤	地表 第四系水	-9.17	-67.4	基岩 地下水	-6.58	-47.97	地热 流体	-7.9	-60
威海温泉汤		-7.98	-52.63		-8.89	-66.37		-8.3	-59
文登洪水岚汤		-6.36	-47.7		-8.57	-57.3		-8.8	-63
文登七里汤		-5.18	-38.9		-5.93	-43.1		-8.6	-62
文登呼雷汤		-6.47	-48.3		-7.31	-53.2		-6.3	-46
文登大英汤		-6.62	-51.2		-7.49	-52.8		-8.5	-61
文登汤村汤		-5.36	-42		-8.37	-58.7		-7.9	-57
乳山小汤		-7.47	-49.2		-7.4	-52.2		-9.2	-67
乳山兴村汤		-6.39	-46.7		-7.42	-49.8		-9.8	-72
牟平龙泉汤		-7.55	-54.3		-7.58	-53.7		-9.6	-70
牟平于家汤		-7.18	-53		-7.98	-56.6		-9.6	-69
蓬莱温石汤		-7.01	-53.1		-7.9	-57.3		-9.5	-67
栖霞艾山汤		-7.46	-55.4		-8.97	-61.8		-7.9	-58
招远汤东泉		-2.56	-31.9		-6.49	-49.2		-8.9	-63
即墨东温泉		-7.5	-53.4		-7.18	-43.5		-9	-65

注:其中宝泉汤、龙泉汤、即墨东温泉、招远东汤的地热流体、地下水的氧同位素为实测数据,其他数据为收集的以往研究报告数据。(数据测试单位:中国地质科学院水文地质环境地质研究所)。

$$T(K) = \frac{1522}{5.75 - \lg S}$$

式中:S—水中 SiO_2 的浓度,单位为 mg/L。

按 SiO_2 温标计算法,天然温泉热储温度范围在 106.32~136.60℃ 之间(见表 3)。

根据胶东气温年变化值,取 t_0 值为 13,结合我

们实测井水温度 t_s (表 4) 及 SiO_2 温标算得各温泉热储温度值 t_r (表 3),代入图 6 可以看出,胶东地区地热水的循环深度多在 1.5~10km 之间,部分温泉循环深度大于 10km,胶东天然温泉普遍循环深度深,属于中深循环地热流体。

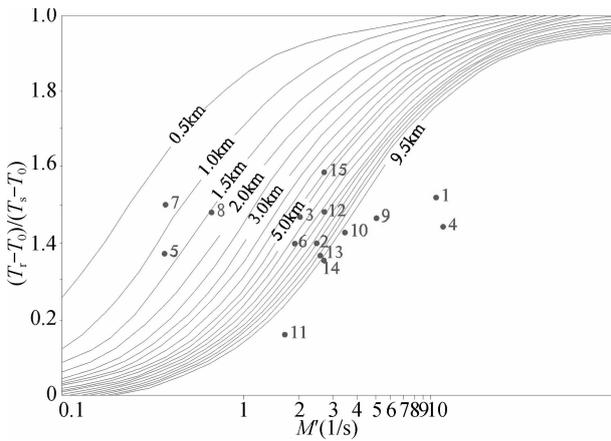


图6 地下热水循环深度图解

Fig. 6 Graph showing the depth of geothermal fluid circulation

1—威海宝泉汤; 2—威海温泉汤; 3—文登洪水岚汤; 4—文登七里汤; 5—文登呼雷汤; 6—文登汤村汤; 7—文登大英汤; 8—乳山小汤; 9—烟台龙泉汤; 10—烟台于家汤; 11—乳山兴村汤; 12—即墨东温泉; 13—栖霞艾山汤; 14—蓬莱温石汤; 15—招远东汤
 1—Baoquan Tang; 2—Wenquan Tang; 3—Hongshuilan Tang; 4—Qili Tang; 5—Hulei Tang; 6—Tangcun Tang; 7—Daying Tang; 8—Xiao Tang; 9—Longquan Tang; 10—Yujia Tang; 11—Xingcun Tang; 12—Dongwen Quan; 13—Aishan Tang; 14—Wenshi Tang; 15—Dong Tang

表3 胶东天然温泉热储温度一览表

Table 3 Reservoir temperature of hot springs in Jiaodong Peninsula

温泉名称	SiO ₂ (mg/L)	热储温度 (°C)	温泉名称	SiO ₂ (mg/L)	热储温度 (°C)
威海宝泉汤	67.69	115.16	牟平龙泉汤	59.00	109.34
威海温泉汤	85.54	125.50	牟平于家汤	69.54	116.33
文登洪水岚汤	105.00	135.02	乳山兴村汤	63.77	112.61
文登七里汤	105.00	135.02	即墨东温泉	82.38	123.80
文登呼雷汤	108.54	136.60	栖霞艾山汤	70.77	117.09
文登汤村汤	54.85	106.32	蓬莱温石汤	98.69	132.09
文登大英汤	58.77	109.18	招远东汤	89.62	127.63
乳山小汤	60.62	110.47			

5 化学组分分析

5.1 水岩作用

Na-K-Mg 三角图是用于区分地热水为完全平衡水、部分平衡水和未成熟水的一种图解方法,它能够区分地热水水样类型,评价热水-围岩之间的平衡状态和预算混合趋势(Wang Hao et al., 2009; Juliarka et al., 2016.)。本次研究运用该方法来评价胶东地热水的平衡状态。

其主要依据两个化学反应:



$KAlSi_3O_8 + 1.6H_2O + Mg^{2+} = 0.8$ 云母 + 0.2 绿泥石 + 5.4SiO₂ + 2K⁺。当①和②反应达到完全平衡时,Na⁺和K⁺保持稳定;当地热水升流至地表时,温度降低,平衡状态被打破,Na⁺和K⁺处于非平衡状态;在达到新的平衡时,Na⁺和K⁺处于部分平衡状态。

将研究区地热水的 Na、K、Mg 含量经线性转化后投影到 Na—K—Mg 三线图中。

从图7可以看出,胶东地区地热水样大多位于“局部平衡”与“非平衡区”区,均未达到水岩平衡。对比胶东地区地热水样在 Na—K—Mg 三线图中的位置发现,Cl-Na(Ca)型水分布比较分散,大部分位于局部平衡区,个别位于非平衡区;HCO₃·SO₄-Na型水或 SO₄·HCO₃-Na型水基本位于局部平衡与非平衡区分界线附近,偏向于非平衡区的较多。由此可见,胶东地区地热水与围岩矿物均未达到完全化学平衡,水岩相互作用程度低,这主要是由于胶东地区的地热田均属于开放式对流型地热田,地热水一直处于不断的补给-径流-排泄的过程中,水岩作用难以达到平衡,并且从图中可以看出水岩相互作用程度与地热水的水化学类型相关性不强。

5.2 离子比例系数分析

地热流体中各离子比例系数可以间接说明地热流体的成因类型。本次评价选择常规离子系数 γ_{Na}/γ_{Cl} 、 $\gamma_{SO_4}/\gamma_{Cl}$ 以及通过比较地热水与海水离子系数的差异,对地热热水的成因进行分析(Wu Yanjun et al., 2018; Xing Liting et al., 2015),各地热田地热流体中 γ_{Na}/γ_{Cl} 、 $\gamma_{SO_4}/\gamma_{Cl}$ 离子比例系数见表5。

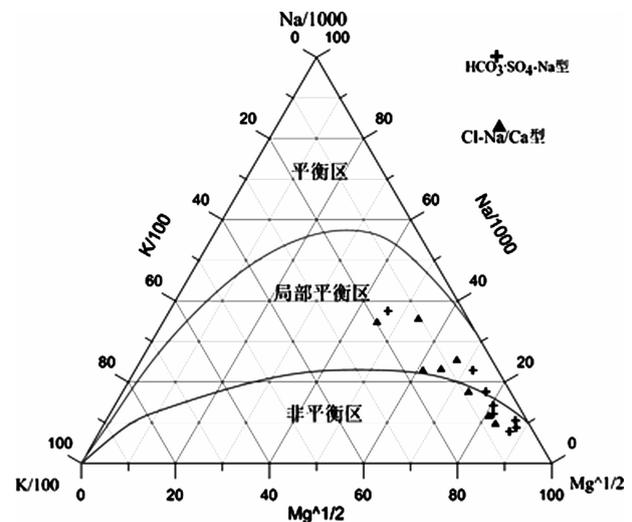


图7 胶东地热田地热流体 Na-K-Mg 平衡图

Fig. 7 Na-K-Mg equilibrium diagram of geothermal fluid in Jiaodong geothermal field

表 4 胶东天然温泉自流量 M' 与出露热水温度 t_s 一览表

Table 4 Flow rates M' and geothermal fluid wellhead temperature t_s of hot spring in Jiaodong Peninsula

温泉名称	天然自流量值		出露温度	温泉名称	天然自流量值		出露温度
	M' (L/s)	M' (m ³ /d)	t_s (°C)		M' (L/s)	M' (m ³ /d)	t_s (°C)
即墨东温泉	2.8	241.92	62.0	文登七里汤	11.5	993.60	65.0
招远东汤	2.78	240.20	81.0	文登呼雷汤	0.56	48.38	60.1
栖霞艾山汤	2.6	224.64	52.0	威海温泉汤	2.5	216.00	46.5
蓬莱温石汤	2.7	233.28	54.0	威海宝泉汤	11.0	950.40	49.0
牟平于家汤	3.4	293.76	59.3	文登洪水岚汤	2.0	172.80	73.0
牟平龙泉汤	5.04	435.46	59.0	乳山小汤	0.68	24.19	56.0
文登汤村汤	6.83	590.11	51	乳山兴村汤	6.50	561.60	30
文登大英汤	1.79	154.66	62				

表 5 胶东各地热田地热水中 γ_{Na}/γ_{Cl} 、 $\gamma_{SO_4}/\gamma_{Cl}$ 离子比例系数表

Table 5 Scale ratio of γ_{Na}/γ_{Cl} and $\gamma_{SO_4}/\gamma_{Cl}$ in geothermal fluid in Jiaodong Peninsula

水样	γ_{Na}/γ_{Cl}	$\gamma_{SO_4}/\gamma_{Cl}$	矿化度 (mg/L)	水化学类型
威海宝泉汤	0.824	0.090	2837.79	Cl-Na
威海温泉汤	1.254	0.265	1363.86	Cl-Na
洪水岚汤	4.981	1.828	689.15	HCO ₃ · SO ₄ -Na
文登七里汤	5.701	2.857	425.24	SO ₄ · HCO ₃ -Na
文登呼雷汤	2.339	1.528	481.96	SO ₄ · Cl-Na
文登汤村汤	0.647	0.068	684.32	Cl-Na · Ca
文登大英汤	0.749	0.220	6373.86	Cl-Na · Ca
乳山小汤	0.757	0.114	639.83	Cl-Na · Ca
牟平龙泉汤	4.669	1.473	862.03	HCO ₃ · SO ₄ -Na
牟平于家汤	4.004	1.178	1795.66	HCO ₃ · SO ₄ -Na
乳山兴村汤	3.501	1.547	2551.25	SO ₄ · Cl-Na
即墨东温泉	0.679	0.045	562.41	Cl-Na · Ca
栖霞艾山汤	4.497	1.307	10047.74	HCO ₃ · SO ₄ -Na
蓬莱温石汤	5.720	2.136	939.26	HCO ₃ · SO ₄ -Na
招远东汤温泉	0.953	0.057	5450.01	Cl-Na
旧地地热田	2.192	0.833	691.13	Cl · SO ₄ · HCO ₃ -Na
海水	0.85	0.10	34800.00	Cl-Na

5.2.1 γ_{Na}/γ_{Cl}

变质系数(γ_{Na}/γ_{Cl})可以反映地下水浓缩变质程度和热储层水文地球化学环境,通常认为变质系数(γ_{Na}/γ_{Cl})越小,地下水封闭越好、越浓缩,变质越深,反映为比较还原的水体环境。如变质系数(γ_{Na}/γ_{Cl})小于 0.85,则其地下水一般为沉积水,反映地下水处于比较停滞状态,而变质系数(γ_{Na}/γ_{Cl})越大,表明地下水活动越强烈。

从图 8 可以看出,水化学类型为 Cl-Na、Cl-Na · Ca 型的地热水的 γ_{Na}/γ_{Cl} 值普遍接近或者小于海水的 γ_{Na}/γ_{Cl} 值 0.85,反映为地热水处于比较停滞状态,其主要原因推测是因为海水的混合作用引起的;其他地热田的 γ_{Na}/γ_{Cl} 值普遍大于 2,远远大于海水的 γ_{Na}/γ_{Cl} 值 0.85,反映为地热水对流型强,地热水活动强烈,可更新能力更强。

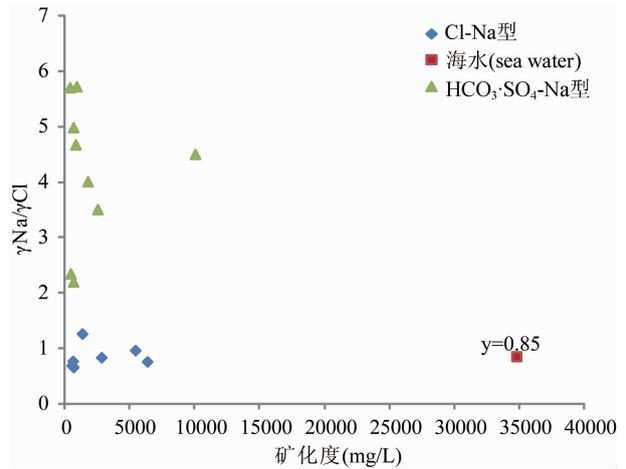


图 8 胶东温泉地热流体水化学类型与 γ_{Na}/γ_{Cl} -矿化度关系图

Fig. 8 Relationship between geochemistry type and γ_{Na}/γ_{Cl} -TDS of hot springs in Jiaodong Peninsula

5.2.2 $\gamma_{SO_4}/\gamma_{Cl}$

脱硫系数($\gamma_{SO_4}/\gamma_{Cl}$)指示地下水的氧化还原环境,通常认为脱硫系数($\gamma_{SO_4}/\gamma_{Cl}$)越小,反映地下水的封闭性越好,反之封闭性越差。

通过脱硫系数 $\gamma_{SO_4}/\gamma_{Cl}$ 可以发现(图 9),水化学类型为 Cl-Na、Cl-Na · Ca 型的地热水的 $\gamma_{SO_4}/\gamma_{Cl}$ 值普遍接近海水的 $\gamma_{SO_4}/\gamma_{Cl}$ 值 0.10,反映为地热水封闭性较好,推断其主要原因是因为地热水与海水的混合作用引起的;其他地热田的 $\gamma_{SO_4}/\gamma_{Cl}$ 值普遍大于 1.00,远远大于海水的 γ_{Na}/γ_{Cl} 值 0.10,反映为地热水水动力环境封闭性差,可更新能力更强。

通过变质系数(γ_{Na}/γ_{Cl})、脱硫系数($\gamma_{SO_4}/\gamma_{Cl}$)可以发现,Cl-Na、Cl-Na · Ca 型地热水水动力环境封闭性好,地下水处于比较停滞状态,且其矿化度普遍较高;HCO₃ · SO₄-Na、SO₄ · HCO₃-Na 型地热水的水动力环境封闭性差,地下水活动强烈,其矿化度相对较低。

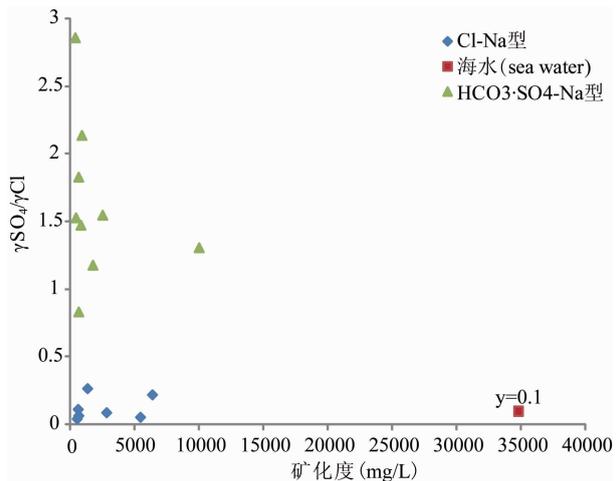


图9 胶东温泉地热流体水化学类型与 $\gamma\text{SO}_4/\gamma\text{Cl}$ -矿化度关系图

Fig. 9 Relationship between geochemistry type and $\gamma\text{SO}_4/\gamma\text{Cl}$ -TDS of hot springs in Jiaodong Peninsula

通过离子比例系数与地热流体循环深度对比发现, $\gamma\text{Na}/\gamma\text{Cl}$ 、 $\gamma\text{SO}_4/\gamma\text{Cl}$ 比值越大表明地热流体活动越强烈、可更新能力越强, 同时 $\gamma\text{Na}/\gamma\text{Cl}$ 、 $\gamma\text{SO}_4/\gamma\text{Cl}$ 比值越大的地热田的循环深度相对于 $\gamma\text{Na}/\gamma\text{Cl}$ 、 $\gamma\text{SO}_4/\gamma\text{Cl}$ 比值小的地热田其循环深度较浅, 侧面说明循环深度越深, 地热流体可更新能力越弱, 反之则更强。

6 讨论

通过水化学特征分析发现, 胶东地热流体与其周边的地表水体无水力联系, 主要来源于大气降雨的入渗补给, 对于距离海域较近地热田, 同时存在浅部海水补给; 管道模型和断层带模型计算的地热流

体的循环深度主要在 1.5~10km 之间, 同时通过地热流体的 $\gamma\text{Na}/\gamma\text{Cl}$ 、 $\gamma\text{SO}_4/\gamma\text{Cl}$ 比值发现, $\gamma\text{Na}/\gamma\text{Cl}$ 、 $\gamma\text{SO}_4/\gamma\text{Cl}$ 比值普遍较大的地热田其对应的循环深度相对较浅, 多分布在 6km 以下, 其水化学类型以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ -Na、 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3$ -Na 型为主, 而 $\gamma\text{Na}/\gamma\text{Cl}$ 、 $\gamma\text{SO}_4/\gamma\text{Cl}$ 比值与海水近似的地热田其循环深度多大于 6km, 甚至大于 10km, 其水化学类型以 Cl-Na、Cl-Na·Ca 型为主。胶东地区的地热流体均为达到水岩平衡的状态, 主要是由于胶东地热流体属于断裂构造控制类型的开放式对流型地热田, 处于不断的补给-径流-排泄的过程中, 地热流体不断的与围岩产生水岩反应但不易达到水岩平衡, 在补给区地热流体以溶滤作用为主, 水交替迅速, 地热流体矿化度较低, 随着地热流体不断地向地壳深部运移, 地热流体不断地与围岩发生脱碳酸、阳离子交替吸附等作用, 流体矿化度进一步的增高, 水化学类型以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ -Na、 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3$ -Na 型为主; 若此时地热流体进一步的向地壳深部运移进行更深的循环, 则地热流体的组分进一步的脱碳酸作用, 矿化度增高, 水化学类型转化为以 Cl-Na、Cl-Na·Ca 型为主(图 10)。

7 结论

(1) 胶东地热流体均为断裂构造控制类型的中低温对流型地热资源, 地热资源主要出露在胶北隆起区及胶南-威海隆起区, 其水化学类型主要以 Cl-Na、Cl-Na·Ca 型水、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ -Na、 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3$ -Na 型水为主; 氧同位素分析结果显示地热流体来源于大气降雨, 且地热流体与其周边的基岩

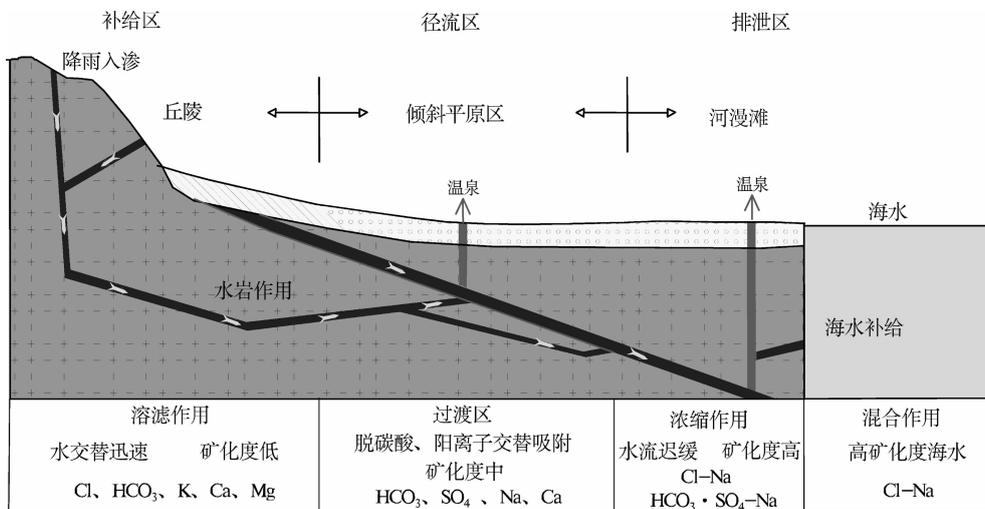


图10 胶东地热流体补径排及深循环过程示意图

Fig. 10 Schematic map of geothermal fluid replenishment row and deep cycle process in Jiaodong Peninsula

水体、第四系水体等均无水力联系,说明大气降雨入渗进入地表后沿地表裂隙进入地壳深部进行深循环径流,在合适的位置经水热对流加热后上涌而形成温泉。

(2)通过管道模型和断层带模型计算的胶东地热流体循环深度主要分布在 1.5~10km 之间,属于中深循环的地热流体。

(3)胶东地热流体均未达到水岩平衡的状态,地热流体处于不断的补给-径流-排泄的过程中;地热流体 $\gamma\text{Na}/\gamma\text{Cl}$ 、 $\gamma\text{SO}_4/\gamma\text{Cl}$ 比值普遍较大的地热田其对应的循环深度相对较浅,说明该类地热田地热流体水动力环境封闭性差,地下水活动强烈,可更新能力强;部分地热田的 $\gamma\text{Na}/\gamma\text{Cl}$ 、 $\gamma\text{SO}_4/\gamma\text{Cl}$ 比值与海水接近,主要由于地热流体循环深度深、时间长,地下水活动相对较弱,地热流体进行了大量的脱碳酸作用,对于距离海域较近地热田,同时存在浅部海水补给的原因。

References

- Gong Chenglin, Lei Huaiyan, Wng Yingmin, Liu Zhenhu, Guan Baocong, Hu Xiaoqiang, Lu Jinbo. 2009. Hydrocarbon geologic characters and structural evolution in the eastern depression of North Yellow Sea Basin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, (1):79~86 (in Chinese with English abstract).
- Jin Bingfu, Zhang Yunji, Luan Guangzhong. 1999. Characteristics of geothermal resources in Jiaodong Peninsula. *Ludong University Journal (Natural Science Edition)*, (4):297~301 (in Chinese with English abstract).
- Jin Bingfu, Zhang Yunji, Luan Guangzhong. 2000. Geothermal characteristics of warm springs in Jiaodong Peninsula. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 31(05):31~37 (in Chinese with English abstract).
- Juliarka B R, Niasari S W. 2016. Geothermal exploration using geochemical data; study case: Parang Wedang geothermal field, Indonesia. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, 1755(1): 100003.
- Li Xuelun, LiuBaohua, Sun Xiaogong, Wang Yonghong. 1997. Relationship between the silica heat flow and regional geological conditions in Shandong Peninsula. *Journal of Ocean University of Qingdao*, (1):75~83 (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).
- Liu Zhao, Chen Kang, Nan Dawa. 2017. Hydrochemical characteristics of geothermal water in Gudui, Xizang(Tibet). *Geological Review*, 63(supp.):353~354 (in Chinese with English abstract).
- Lu Xurong, Zhou Aiguo, Wang Maoting, Yang Lei, Lu Hua. 2010. Characteristic analysis of phreatic water equality evolution by Piper diagram in Huaihe River drainage area, Jiangsu Province. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 38(2)42~47 (in Chinese with English abstract).
- Luo Lu, Pang Zhonghe, Luo Ji, Li Yiman, Kong Yanlong, Pang Jumei, Wang Yingchun. 2014. Noble gas isotopes to determine the depth of the geothermal fluid circulation.

Chinese Journal of Geology, (3):888~898 (in Chinese with English abstract).

- Wang Hao, Chai Rui. 2009. Application of geothermometers in the geothermal system. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, (3):54~58 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yanjun, Fang Guozhi, Zhang Shengsheng, Tian Chengcheng, Xu Yongjie, Li Cong. 2018. The chemical characteristics and genesis of underground hot water from a geothermal field in Zhangqizhai Village, Ping'an District, Haidong. *Journal of Qinghai University*, 36(05):69~75 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Liangping, Zhang Juming. 1984. Mathematical simulation of refract and redistribution of heat flow. *Chinese Journal of Geology*, (4):445~454 (in Chinese with English abstract).
- Xing Liting, Zhang Fengjuan, Li Changsuo, Yang Lizhi, Wang Liyan. 2015. Hydro-chemical characteristics of shallow groundwater in the North Shandong Plain. *Journal of Irrigation and Drainage*, (6):90~94 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xunchang, Kang Fengxin, Wang Xuepeng, Fu Qingjie, Liu Zhitao. 2019. Hydrochemical features of geothermal reservoir geotemperature field in sandstone porosity and enrichment mechanism of geothermal water; a case study of geothermal reservoir of Guantao Formation in the Lubei. *Acta Geologica Sinica*, 93(3):738~750 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Shuhui, Zhang Zhifei, Ni Baolin, Hou Fagao, Shen Minzi. 1982. Hydrogen and oxygen isotopic studies of thermal waters in Xizang. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, (1):102~109 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongping, Liu Enkai, Wang Dongsheng, Jia Yankun, Sun Jizhao. 1991. Composition of stable isotopes of precipitation and controlling factors in China. *Institute of Hydrogeology and Engineering Geology CAGS*, (7) (in Chinese with English abstract).
- Zhang Tao. 2011. Study on hydrochemistry and isotopic characteristics of geothermal water in Jiaodong area. *Land and Resources in Shandong Province*, 27(12):11~16 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Hui, Yin Tao, Shi Meng, Jiang Haiyang. 2019. Recharge runoff and discharge characteristics of geothermal fluid of Jiaodong geothermal fields. *Shandong Land and Resources*, 35(01):65~73 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 陈宗宇,齐继祥,张兆吉. 2010. 北方典型盆地同位素水文地质学方法应用. 北京:科学技术出版社,46~51.
- 戴振宇. 2017. 地热温标法在循环深度计算的应用. *内蒙古煤炭经济*, (5):142~143.
- 龚承林,雷怀彦,王英民,刘振潮,官宝聪,胡小强,陆金波. 2009. 北黄海盆地东部坳陷构造演化与油气地质特征. *海洋地质与第四纪地质*, (1):79~86.
- 金秉福,张云吉,栾光忠. 1999. 胶东半岛地热资源的特征. *鲁东大学学报(自然科学版)*, (4):297~301.
- 金秉福,张云吉,栾光忠. 2000. 胶东半岛温泉的地热特征. *水文地质工程地质*, 22(5):31~33.
- 李学伦,刘保华,孙校功,王永红. 1997. 山东半岛硅热流值与区域地质条件的关系. *青岛海洋大学学报*, (1):75~83.
- 李惠娣,张森琦,白嘉启,周金元,石维栋,赵越. 2007. 西宁药水滩地热田水化学特征及热水起源初探. *地质学报*, 81(9):1299~1304.
- 刘昭,陈康,男达瓦. 2017. 西藏古堆地热田地下水水化学特征. *地质论评*, 63(supp.):353~354.
- 陆徐荣,周爱国,王茂亭,杨磊,陆华. 2010. Piper 图解淮河流域江苏地区浅层地下水水质演化特征. *工程勘察*, 38(2)42~47.
- 罗璐,庞忠和,罗霏,李义曼,孔彦龙,庞菊梅,王迎春. 2014. 惰性气体同位素确定地热流体循环深度. *地质科学*, (3):888~898.

汪集旻,熊亮萍,庞忠和. 1990. 利用地热资料确定地下水热循环深度. 科学通报, 35(5):378~378.

王皓,柴蕊. 2009. 地热温标在地热系统中的应用研究. 河北工程大学学报(自然科学版), (3):54~58.

吴艳军,方郭志,张盛生,田成成,徐永杰,李聪. 2018. 海东市平安区张其寨地热田水化学特征及其成因分析. 青海大学学报, 36(05):69~75.

熊亮平,张菊明. 1984. 热流的折射和再分配的数学模拟. 地质科学, (4):445~454.

邢立亭,张凤娟,李常锁,杨丽芝,王立艳. 2015. 鲁北平原浅层地下水水化学特征. 灌溉排水学报, (6):90~94.

杨询昌,康凤新,王学鹏,付庆杰,刘志涛. 2019. 砂岩孔隙热储地温

场水化学场特征及地热水富集机理—鲁北馆陶组热储典型案例. 地质学报, 93(3):738~750.

郑淑蕙,张知非,倪葆龄,侯发高,沈敏子. 1982. 西藏地热水的氢氧稳定同位素研究. 北京大学学报自然科学版, (1):102~109.

张洪平,刘恩凯,王东升,贾艳琨,孙继朝. 1991. 中国大气降水稳定同位素组成及影响因素. 中国地质科学院水文地质工程地质研究所刊, (7).

张涛. 2011. 胶东温泉地热水水化学及同位素特征研究. 山东国土资源, 27(12):11~16.

赵辉,殷涛,史猛,江海洋. 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. 山东国土资源, 35(01):65~73.

Hydrochemistry characteristic analysis of low-medium temperature convective geothermal resources in Jiaodong Peninsula

SHI Meng¹⁾, ZHANG Jie¹⁾, YIN Tao^{*1)}, YANG Ning¹⁾, JIANG Haiyang²⁾

1) Shandong No. 3 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Yantai, Shandong, 264000;

2) Shandong No. 1 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Jinan, 250013

* Corresponding author: 397921601@qq.com

Abstract

Jiaodong Peninsula is one of the regions with the most abundant low-medium temperature convective geothermal resources in the eastern coastal areas of China. This paper discussed hydrochemical and recharge characteristic, heat reservoir temperature, geothermal circulation depth and renewable capacity using hydrochemistry analysis of geothermal fluids in Jiaodong Peninsula. Geothermal fluid samples from 15 natural hot spring and nearby bedrocks, as well as Quaternary water systems were analyzed using routine water quality and deuterium-oxygen isotope analysis. $\gamma\text{Na}/\gamma\text{Cl}$ and $\gamma\text{SO}_4/\gamma\text{Cl}$ ratios of geothermal fluid, along with pipeline model and fault zone model, indicate that geochemical types of geothermal fluids in Jiaodong Peninsula are dominated by Cl-Na or Cl-Na · Ca type and $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}$, $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3\text{-Na}$ type, with salinity of 0.45~7.68g/L and pH 7.3.~8.63. The geothermal fluid is mainly derived from atmospheric rainfall, and no connection with the shallow groundwater around the geothermal field. The circulation depth ranges from 1.5 km to 10 km, suggesting that geothermal fluid belongs to deep-circulating geothermal fluid. The geothermal fluids in the study area have not reached the water-rock equilibrium. For geothermal fields with geothermal fluids with high ratios of $\gamma\text{Na}/\gamma\text{Cl}$ and $\gamma\text{SO}_4/\gamma\text{Cl}$, their corresponding geothermal circulation depth is relatively shallow, indicating that the geothermal fluid hydrodynamic environment has poor sealing performance and strong renewability and geothermal fluid is in the continuous recharge-runoff-discharge process. Some geothermal fields with ratios of $\gamma\text{Na}/\gamma\text{Cl}$ and $\gamma\text{SO}_4/\gamma\text{Cl}$ close to seawater result from the deep and long circulation of geothermal fluids and the decarbonation of geothermal fluids. The analysis of hydrochemistry characteristics of low-medium temperature convective geothermal fluids in the Jiaodong area will help to enhance people's understanding of the formation mechanism of this type of geothermal resources.

Key words: Jiaodong Peninsula; geothermal fluid; hydrochemistry; water-rock equilibrium