

东莞市地热流体的地球化学成因模式研究

邱向荣

(广东省地质技术工程咨询公司,广东 广州 510080)

[摘要]水文地球化学成因模式是地热系统成因机制研究的重要内容之一,但系统的水文地球化学成因模式研究目前仍处于探索阶段。为分析地热流体的水文地球化学成因模式,本文作者根据东莞塘厦大钟岭地热田的水文地质条件,采集了地热流体和其他主要水体(泉水、水库水、鱼塘水、机井和民井水)的化学样品,在试验结果基础上,通过对比分析并利用 PHREEQC 进行反向模拟,得出地热流体沿控热断裂循环过程中,发生了溶滤、氧化还原和阳离子交替吸附作用,从而将入渗区低矿化度重碳酸钙、钙镁型水逐渐演变为矿化度较高的重碳酸钙钠、钠钙型水,循环过程有较充足的二氧化碳参与,反映地热流体循环深度不太大、且处于偏氧化的环境。地热流体在循环过程中受大地热流持续供热,最终形成具有开发利用价值的地热资源。研究结果对其他地热流体的水文地球化学成因研究有借鉴作用,有利于指导地热资源的勘探和开发。

[关键词]地热流体;水文地球化学;成因模式;东莞市

[中图分类号]P3314.1;P641.3 **[文献标识码]**A **[文章编号]**1000-5943(2021)04-0405-07

地热系统的成因机制研究包括地质成因模式和水文地球化学成因模式两方面,其中地质成因模式的研究已比较深入(汪集旻等,1993;叶建,2018;杨荣康等,2014;张红红等,2019;张磊,2020;曾一芳等,2021),但系统的水文地球化学成因模式研究目前仍处于探索阶段(季国松,2014;罗来钊,2019;杨元丽等,2014)。本文试图以东莞塘厦大钟岭地热田为研究对象,对地热田开展地球化学研究,以研究清楚地热田的地球化学成因模式。在分析地质条件的基础上,通过对比分析地热流体和不同水体(地表水、泉水和井水等)的水化学特征,查明水化学主要组分来源,并进一步确定水-岩反应中的反应相,之后利用反向模拟来获得地热流体形成过程所发生的地球化学作用和反应相的摩尔转移。

广东地处我国东南沿海地热带中,地热资源丰富,已发现的地热田有三百多处(程文汉,2013;王钧,1985;王双,2013;广东省地质局第四地质大队,2015;吴玉婷等,2019)。全省21个地级市

(计划单列市)唯独东莞没有温泉出露,而东莞市民却非常喜欢温泉休闲养生,因此自改革开放以来,在东莞辖区内投入不少经费开展隐地热勘查,希望能够找到可供开发利用的地热资源,但结果均不理想。直至2020年底,东莞塘厦大钟岭地热田的发现,才结束了东莞没有温泉的历史。东莞酒店业非常发达,地热资源开发利用对酒店业的转型升级以及旅游产业发展具有重要促进作用,因此深入研究大钟岭地热田的形成机制,对东莞乃至华南地区寻找隐伏地热资源有重要借鉴意义。

1 地热田概况

东莞塘厦大钟岭地热田位于塘厦镇三正半山酒店南侧,热田区地表没有热显示,是2017年3月至2020年12月期间经地热勘查发现的(广东省地质技术工程咨询公司,2020),为东莞市首处具有开发利用意义的地热资源。该地热田属隐伏

[收稿日期]2021-03-01 [修回日期]2021-06-09

[作者简介]邱向荣(1973—),男,高级工程师,从事地热与矿泉水资源勘查与应用研究。E-mail:qxr020@sina.com。

对流型地热资源,大钟岭断裂(编号“F1”,图1)是地热系统的控热、控水断裂。热储呈带状,沿F1断裂走向展布,总体上分布于F1上盘构造岩带中的碎裂岩系,热储主体位置埋深300~950 m。热储围岩主要为早侏罗世碎屑岩,底部为震旦纪混合岩(钻孔揭露其埋深573.10~735.40 m),盖层

为早侏罗世碎屑岩。该地热田是在略偏低的大地热流(背景地温梯度约2.15 °C/hm)供热条件下,大气降水通过F1断裂的新构造裂隙系统进行深循环而获得增温,并在构造强化作用比较集中的地段成储,因储层之上有较厚的盖层,故成隐伏型地热资源。

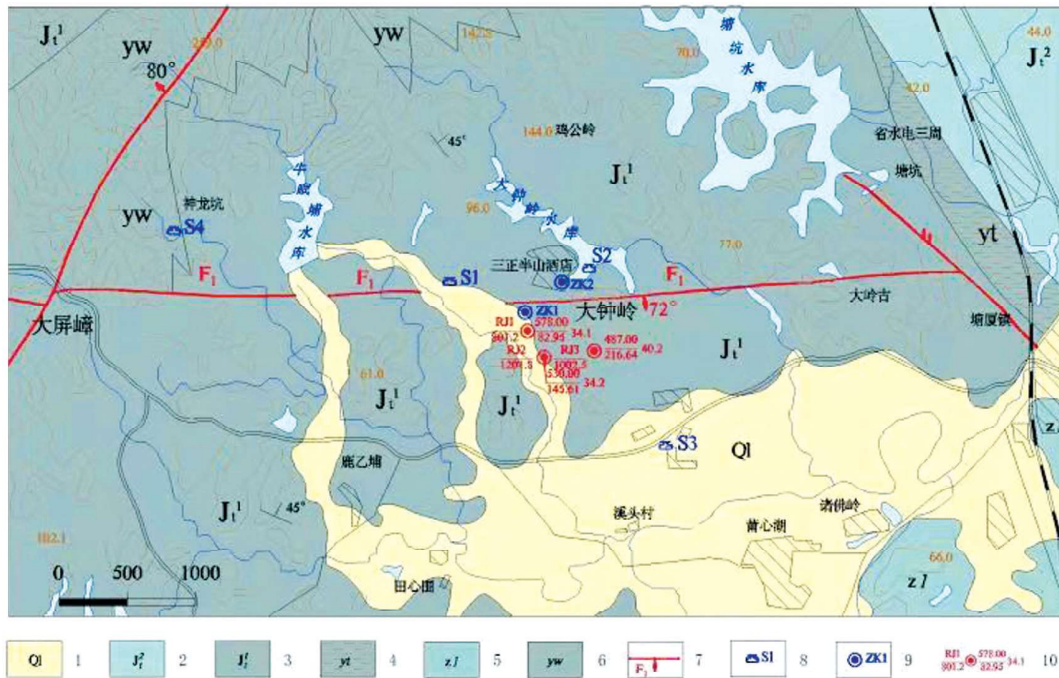


图1 地热田地质图

Fig. 1 Geological map of geothermal field

1—第四系陆丰组;2—中侏罗世塘厦组第二段;3—早侏罗世塘厦组第一段;4—早侏罗世塘厦组崖山岩舌;5—早侏罗世塘厦组诸佛岭透视镜体;6—早侏罗世塘厦组亚公山岩楔;7—实测断层编号及倾向;8—水样位置及编号;9—探孔及编号;10—开采井,左上为编号,左下为井深(m),右上为涌水量(m³/d),右下为降深(m),后为井口水温(°C)

该地热田共建成3个开采井,深度分别为801.2 m、1 002.5 m和1 201.5 m,经群井降压试验和一个水文年动态观测,单井地热流体可开采量为487~578 m³/d,地热田探明的可开采量为1 565 m³/d,井口流体最高温度为40.2°C(图1),3个开采井的流体加权平均温度为36.0°C。地热流体特征组分为氟、偏硅酸和氨,且含多种对人体有益微量组分,水质呈弱碱性反应。

2 地热流体水文地球化学过程分析

2.1 主要水化学组分的来源分析

同一地区不同水体化学成分的形成往往具有某些内在联系,故可将地热流体和其他水体的水化学特征进行对比分析,从而评估水化学组分的来

源,为进一步研究地热流体形成过程提供宏观判断依据。本研究选择4组地热流体(3个开采井和1个勘探孔,图1)枯水期全分析样品,另代表性选择研究区内主要水体(泉水、水库水、鱼塘水、机井和民井水)的化学样品作为对比样品。

由图2(a)可见,地热流体的样品在Na-Cl坐标中明显偏离了1:1比例线并集中在Na轴,提示地热流体中的钠除了来自岩盐外还有其他来源。通常地下水中非岩盐来源的Na⁺主要是来自硅酸盐矿物(如长石类)或离子交换的结果。除了地热流体以外的其他水体,样品点均落在1:1比例线上,表示这些水体中的Cl⁻和Na⁺主要是来自岩盐的溶解。

图2(b)显示了地热流体的[Ca²⁺+Mg²⁺]/[HCO₃⁻+SO₄²⁻]偏离1:1比例线并趋近于(HCO₃⁻+SO₄²⁻)轴,提示地热流体中除了存在碳酸盐、硫酸盐

矿物溶解外,阴离子还有其他来源。地热流体以外的水体样品点均落在1:1比例线上,表示这些水体的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 基本上都是来自碳酸盐和硫酸盐的溶解。

图2(c)显示了地热流体偏离1:1比例线并趋向于 HCO_3^- 轴,提示 HCO_3^- 除了来自碳酸盐的溶解外还有其他来源。其他水体的样品基本落在1:1比例线附近,表示方解石、文石是水中 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 的重要来源。

当水中的硫酸钙主要是来自石膏、硬石膏溶解时, SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 的当量浓度比也是1:1。图2(d)中主要水样点全部偏离1:1比例线并集中于Ca轴,说明石膏、硬石膏溶解的占比小,钙有更多来源。

图2(e)、(f)可用于进一步判断水中的 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 是否与白云石溶解密切相关,如果这些组分主要来自白云石溶解,则水中 HCO_3^- 和 Mg^{2+} 的当量浓度比接近2:1,而 HCO_3^- 和($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)的当量浓度比接近1:1。由图示可见,地热流体偏离了比例线并趋向于 HCO_3^- 轴,表示 HCO_3^- 有更多来源(和图2(c)具同样提示意义)。地热流体以外的水样则基本落在比例线上,即白云石的溶解是相关组分的重要来源。

综上,地热流体的主要组分有来自碳酸盐矿物(方解石或文石和白云石)的溶解,也有少部分来自岩盐和石膏(或硬石膏)的溶解。但是,岩盐的溶解不能平衡氯钠比,因此钠还来自其他矿物(如长石)的水解或离子交换;硫酸盐的溶解也不

能平衡钙和硫酸根之比,因此部分钙可能是前述碳酸盐矿物溶解形成。地热流体中的 $[\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}]/[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]$ 明显偏离比例线(图2(b))说明了主要组分并非全部来自碳酸盐和硫酸盐矿物的溶解,阴离子有更多来源。通过对比图2(c)~(f)可以看出, ($\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$)组合是富 HCO_3^- 而贫 SO_4^{2-} ,即地热流体中阴离子 HCO_3^- 除了来自碳酸盐矿物的溶解外,还有其他来源。由于地下水中的 HCO_3^- 通常来自碳酸盐矿物和二氧化碳气体,因此可以判定地热流体化学演化过程中有不少二氧化碳气体参与。至此,便基本厘定了地热流体宏量组分的化学来源。

2.2 水文地球化学过程的反向模拟

反向模拟中下游水样选择开采区的地热流体样(RJ3井枯水期样品)。上游水样的选取具有一些不确定性,因为客观上要获得与开采区完全同属一个循环路径的水样有困难。考虑到沿F1断层走向向西地形高处的泉点(图1中的S4水样点)出露基岩是早侏罗世塘厦组亚公山岩楔,其岩性并非F1断层经过的主体地层,代表性有所欠缺,故选取开采区北边的ZK2孔水样。虽然该孔地理位置并不适宜,但这个孔的岩性与F1断层通过地段岩性相同,同时该孔地下水来自于浅部基岩裂隙,可以代表沿断裂带走向广大地区浅部基岩裂隙水的化学特征,故从水化学角度考虑则符合上游水的要求。有关反向模拟所采用的上、下游水质见表1。

表1 反向模拟所采用的上下游水质特征

Table 1 Characteristics of upstream and downstream water quality used in reverse simulation 单位:mg/L

水样编号	水温(°C)	pH	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Fe^{2+}	HCO_3^-	CO_3^{2-}	Cl	SO_4^{2-}	F^-	H_2SiO_3	Sr^{2+}	Al^{3+}
ZK2	25.2	6.41	0.4	6.42	7.8	2.95	0.17	40.7	0.0	2.09	1.32	0.29	24.98	0.01	0.13
RJ3	40.2	7.9	1.6	42.7	29.8	3.97	0.00	184.0	0.0	2.44	7.04	3.93	24.50	1.92	0.00

根据前文有关水中主要组分来源的分析可知,地热流体在循环过程中溶解了碳酸盐、硫酸盐和岩盐等矿物,参与反应的矿物可能包括岩盐、硬石膏、方解石和白云石,这些矿物在本区碎屑岩中广泛存在。分析结果也表明地热流体化学组分形成过程有二氧化碳和氧气积极参与,因此反应可能包括二氧化碳和氧气。另外,分析认为钠的来源既可能是长石类矿物的水解、也可能是离子交换的结果,考虑到3个开采井下部均揭露到震

旦纪混合岩,斜长石和石英是其矿物成分,因此将斜长石、石英和阳离子吸附综合体也列为可能的反应相。

由于碎屑岩地区或多或少存在铁质胶结物,因此基岩裂隙水往往含铁(如ZK2孔的水样),但铁元素是以什么形态出现并不清楚。为了进一步确定水中未知的矿物成分,以便更合理确定反应相,故对ZK2水样进行矿物相分析,有关该水样的主要矿物的饱和指数见图3。图示表明铁元素呈

针铁矿的形式出现,同时也可以看出前文所列的反应矿物基本都处于不饱和状态,这种水具备溶解相关矿物的可能。根据以上相关信息,通过比

选最终确定反应相为:岩盐、硬石膏、方解石、萤石、天青石、针铁矿、白云石、 $\text{CO}_2(\text{g})$ 、 $\text{O}_2(\text{g})$ 、水铝矿、斜长石、石英和离子吸附综合体。

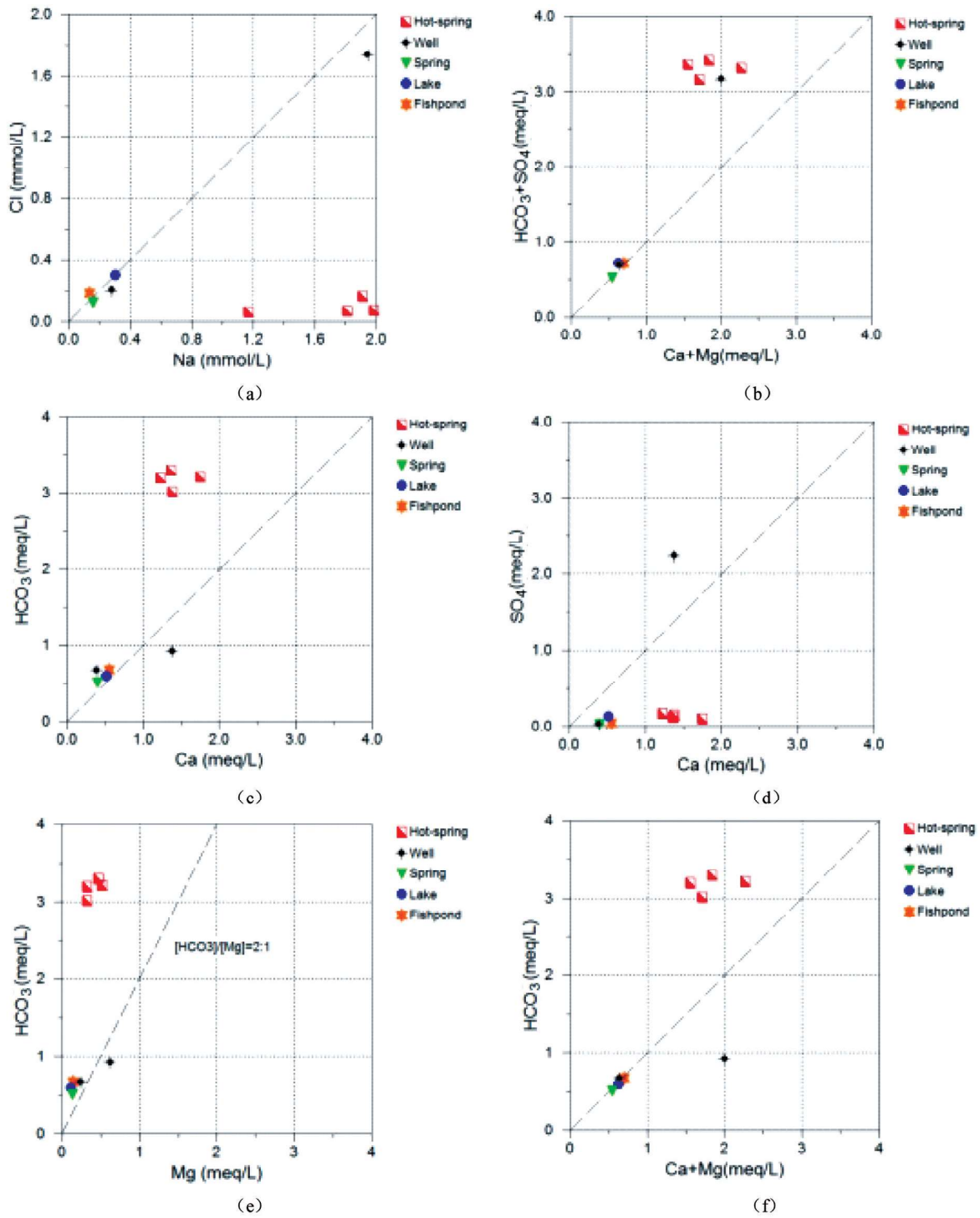


图2 主要水体化学组分关系图

Fig.2 Relation of chemical constituents in major water bodies

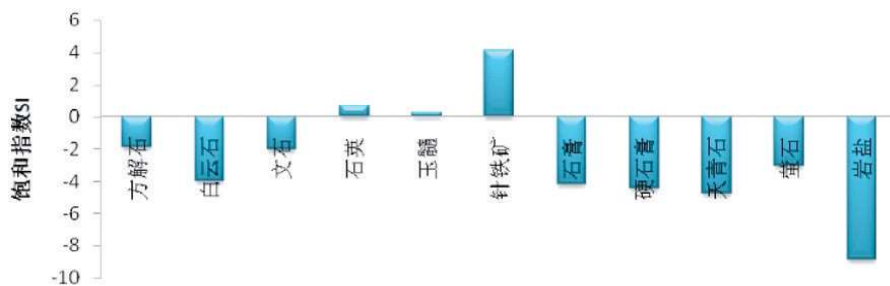


图 3 ZK2 水中部分矿物的饱和指数图

Fig.3 Saturation index of some mineral in ZK2 water

模拟采用 PHREEQC 软件, 计算过程中两种溶液及相关组分的不确定度均取 0.05 (pH 取 0.1), 并设置斜长石、石英为溶解, 水铝矿为沉淀, 其他反应相不做限制。通过求解获得唯一符合的反应模型, 有关反应相及其摩尔转移见表 2。根据模拟结果可见, 地热流体的化学演化主要包括以下水文地球化学作用:

(1) 溶滤作用: 发生溶滤(溶解)矿物有岩盐、硬石膏、方解石、萤石、天青石和白云石, 这个过程中有多量的 $\text{CO}_2(\text{g})$ 参与, 溶滤的结果出现了水铝石等粘土矿物的沉淀。值得注意的是斜长石和石英并没有参加反应。

(2) 阳离子交替吸附作用: 这个作用主要是钾、钠和钙离子的交换。被围岩所吸附的钾、钠离子与水中的钙离子发生了交换, 钾、钠离子出现解吸进入水中, 水中的钙离子被围岩所吸附。从摩尔转移量来看, 阳离子交替吸附作用发生得比较强烈。

(3) 氧化还原作用: 入渗水所携带的 $\text{O}_2(\text{g})$ 氧化了水中的亚铁离子, 并形成针铁矿沉淀。

以上述水文地球化学作用为基础可以做出进一步的推断: 由于碳酸盐、硫酸盐等盐类的溶解是地热流体化学组分的重要来源, 而这些反应需要 $\text{CO}_2(\text{g})$ 的参与, 表明地热流体的循环环境是相对开放的, 否则难以维持反应所需的 $\text{CO}_2(\text{g})$ 分压, 即流体是循环在深度偏浅、偏氧化的环境中。阳离子交替吸附作用往往出现在含有粘土的吸附综合体中, 地热流体在渗流过程中出现比较强烈的交替吸附作用, 提示导水的基岩裂隙系统中存在粘土矿物, 这种情况比较符合碎屑岩的裂隙特征, 这提示了地热流体主要是在碎屑岩盖层中循环。另外, 见于开采井深部的混合岩富含斜长石和石英, 但这些矿物并没有参与水-岩反应(或水-岩作用很弱), 这同样提示地热流体主要是在沉积盖层中循环。

表 2 反向模拟计算结果

Table 2 Calculated results of reverse simulation

单位: mmol/L

反应类型	溶滤								阳离子交替吸附				氧化还原				
反应物	岩盐	硬石膏	方解石	萤石	天青石	针铁矿	白云石	$\text{CO}_2(\text{g})$	$\text{O}_2(\text{g})$	水铝石	斜长石	石英	KX	NaX	CaX2	Fe^{3+}	$\text{O}_2(\text{g})$
摩尔转移	9.89E-3	3.78E-2	1.25	9.58E-2	2.18E-2	-3.04E-3	4.20E-2	7.08E-1	7.50E-4	-4.82E-3	0.00	0.00	3.07E-2	1.66	-8.46E-1	-3.00E-3	1.50E-3

注: 摩尔转移为正的表示溶解(或释放进水中), 负为沉淀(或从水中被吸附), 零为不反应。

3 地热流体的水文地球化学成因模式

根据水文地球化学分析的结果, 结合地热田的地质条件, 可建立地热流体的地球化学成因模式如图 4。

在控热断裂 F_1 所经过的丘陵地区, 大气降水进入浅部岩土层并形成低温、低矿化度的重碳酸钙、重碳酸钙镁型水, 在重力势的作用下向低水头区渗流, 其中部分水进入 F_1 断裂所形成的裂隙系统。在沿断裂裂隙带逐渐向下渗流的过程中, 因

水中携带有大量的二氧化碳气体和氧气, 故逐渐溶解围岩中的碳酸盐、硫酸盐和岩盐等矿物, 并引起水铝石的沉淀, 这些溶滤作用使水中的钠、钙、镁、重碳酸根和硫酸根离子浓度逐渐增加, 铝离子则减少; 水中的氧气则将亚铁离子氧化为针铁矿沉淀。同时, 被岩石裂隙面吸附综合体所吸附的钾、钠离子与水中的钙离子发生了交替吸附作用, 将钾、钠离子释放于水中并吸附水中的钙离子, 从而引起水中钾、钠离子浓度升高并抑制钙离子的增长。在这些地球化学作用的共同影响下, 地下水的矿化度逐渐提高, 氧化电位则有所减弱, 水化学类型演变为重碳酸钙型。随着地下水继续向低

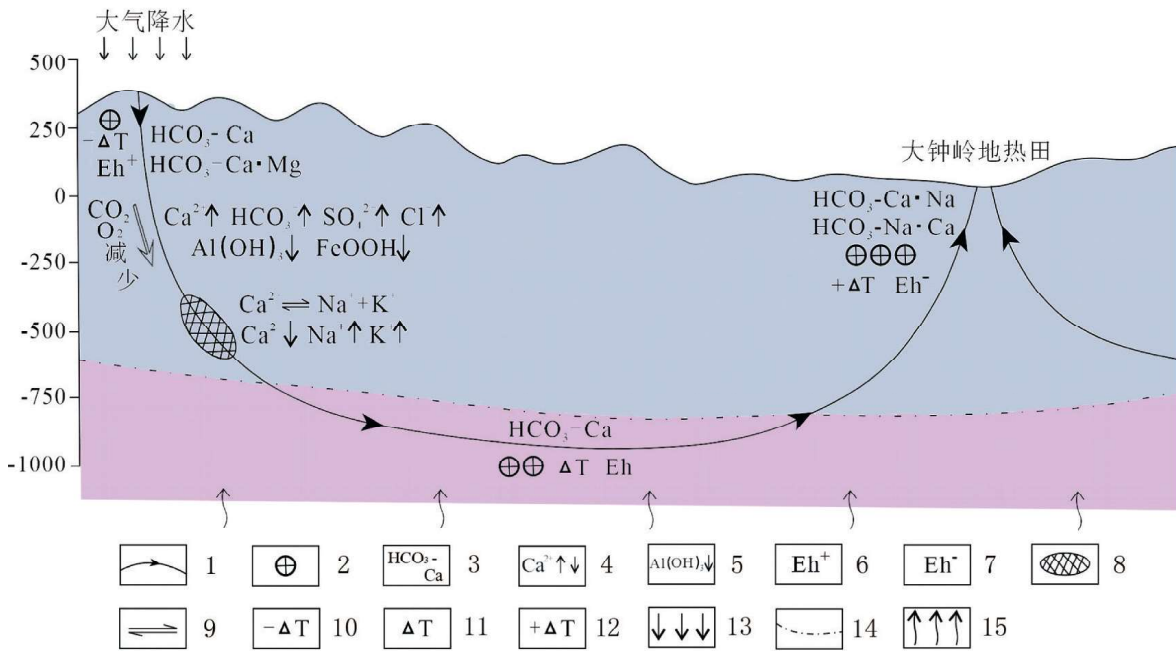


图4 地热流体地球化学成因模式图

Fig. 4 Geochemical genetic model of geothermal fluid

1—水流系统;2—数量表示 TDS 高低;3—水化学类型;4—离子浓度的增减;5—物质沉淀;6—氧化电位高;7—氧化电位低;8—离子吸附综合体;9—阳离子交替吸附;10—降温区;11—常温区;12—增温区;13—大气降水;14—地层界线(上为沉积岩,下为混合岩);15—大地热流

水头区渗流,上述溶滤、离子交替吸附和氧化还原等地球化学作用仍持续发生,因此地下水的矿化度不断升高,水化学类型演变为重碳酸钠钙或重碳酸钙钠型,氧化电位进一步降低,但仍处于相对偏氧化的环境中。由于渗流过程中受到大地热流的持续供热,因此地下水的温度也逐步升高,在经过最大循环深度近千米的缓慢渗流后,来自丘陵山区的大气降水最终形成了低温地热资源。

4 结论与讨论

东莞市大钟岭地热田的地热流体沿控热断裂渗流的过程中,出现了碳酸盐、硫酸盐等盐类的溶解,围岩所吸附的钾、钠离子与水中的钙离子出现交替吸附,同时水中的亚铁离子被氧化成为针铁矿沉淀,在这些地球化学作用共同控制下,入渗区低矿化度重碳酸钙、钙镁型水便逐渐演变为矿化度较高的重碳酸钙钠、钠钙型水。地热流体在演化过程中有较充足的二氧化碳和氧气参与,反映地热流体循环深度不太大、且处于偏氧化的环境。由于地热流体在循环过程中一直接受大地热流的持续供热,故最终形成具有开发利用价值的地热资源。

地球化学演化模式研究在地热勘查实践中应用得比较少,原因可能是认为这种研究主要用于后期分析,对勘查过程的指导作用较小。实际上地球化学演化模式研究除了可以掌握地热流体化学特征形成的内在机制外,对超前指导生产也有意义。比如本文在分析的过程中出现多个证据表明水循环的深度主要是发生在早侏罗世碎屑岩盖层,进入结晶基底的深度有限,这就可以超前指导勘查深度问题,对解决勘探深度这个勘查难点显然有良好指导意义。深部地热勘查并非越深越好,如果明显超过流体的循环深度,实际上就是无效工作。

[参考文献]

程文汉. 2013. 广东英德市碳酸盐岩地热田地温场特征和成因[J]. 热带地理, 33(05): 617-620.

季国松. 2014. 贵州册亨县百地金矿地球化学特征及成因探讨[J]. 贵州地质, 31(01): 21-26.

广东省地质局第四地质大队. 2015. 广东省地热资源现状调查评价与区划报告[R]. 271.

广东省地质技术工程咨询公司. 2020. 广东省东莞市塘厦大钟岭地热田地热资源勘查评价报告[R]. 20-73.

罗来钊. 2019. 广东新丰地热资源特征及成因[J]. 地质学刊, 43(02): 322-328.

- 王钧. 1985. 东南沿海地区地温场的形成及其分布规律[J]. 地震地质, 1:49-58.
- 王双. 2013. 广东阳江新洲地热田地热资源特征及其开发利用建议[J]. 地下水, 1:42-43.
- 汪集旻, 熊亮萍, 庞忠和, 等, 编著. 1993. 中低温对流型地热系统[M]. 北京: 科学出版社, 201-206.
- 吴玉婷, 叶洪恩, 郭志. 2019. 浅析广东地热资源分布特征及成因[J]. 地球, 4:99-101.
- 杨元丽, 孟凡涛, 杨荣康. 2014. 贵州省开阳县马岔河温泉水化学特征及成因[J]. 贵州地质, 31(03):229-233.
- 杨荣康, 杨丽君, 王乾. 2014. 贵州石阡地热田地热资源量计算[J]. 贵州地质, 31(02):154-157.
- 叶建. 2018. 基于地热井的洛阳万安山地区地热成因分析[J]. 山西科技, 33(02):95-97.
- 曾一芳, 谭夏南. 2021. 龙门县某地热田地质特征及成因模式分析[J]. 西部资源, 1:126-128.
- 张红红, 高焕毅, 李苹. 2019. 东营凹陷地热田特征及成因机理研究[J]. 地质学报, 93(S1):184-191.
- 张磊. 2020. 西藏自治区错那浅层低温热田成因分析[J]. 内蒙古煤炭经济, (14):5-7.

Geochemical Genetic Model of Geothermal Fluid in Dongguan City

QIU Xiang-rong

(Guangdong Geology Engineering Consulting Company, Guangzhou 510080, Guangdong, China)

[**Abstract**] The genetic model of hydrological geochemistry is important for understanding convection-type geothermal system, but it still need more work to do for deep understand the geochemical genetic model of geothermal system. In this paper, in order to understanding the hydrological geochemical genetic model of geothermal field clearly, based on the geological condition of geothermal field of Dazhongling in Tongsha of Dongguan, the chemical samples of 4 groups of geothermal fluid in dry season and the samples of the main water bodies (spring water, reservoir water, fish pond water, machine well and civilian well water) in the study area were collected for contrasting analysis. It's known that the chemical composition and environmental isotopes of geological fluid and other water. We present the geological fluid originates from the air infiltration water of Dapingzhang Forest Park, the west side of geothermal field, by utilizing the reverse-simulating of PHREEQC program. When underground water circulates along heat-control fracture, it suffers from the dissolve filter, redox and cationic alternating adsorption, to result in the low salinity calcium carbonates--calcium magnesium type water of infiltration area changing into high salinity calcium-sodium carbonates--sodium calcium type water. Because the participation of abundant carbon dioxide in circulate process, it means the circulating depth of geothermal field is not very deep, and locating in deoxidation environment. The circulating length of geothermal field is about 5~6km, depth about 1000m. Lasted ten thousand years seepage, heating constantly by geothermal currents, the geothermal resource with exploitation value forms eventually. The results are helpful for studying on the geochemical origin of geothermal systems in other similar areas, which is beneficial to the exploration and development of geothermal resources.

[**Key Words**] Geothermal fluid; Hydrological geochemistry; Genetic model; Dongguan City