

河北汤泉地热流体水文地球化学特征及其成因

王卫星¹ 李攻科¹ 李 宏¹ 侯佳渝¹ 房万嶺¹ 杨峰田²

(1. 天津市地质调查研究院, 天津 300191; 2. 吉林大学环境与资源学院, 吉林 长春 130021)

摘要: 汤泉位于河北省遵化市西北部, 为山前丘陵地貌, 地热资源丰富。本文通过对该地区地热流体研究发现: Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 与 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 是该地区地下热水的主要成分, 水化学类型主要为 SO_4^{2-} - Na^+ 型, 属于未污染的天然弱碱性水; 流体中 F^- 含量平均为 9.36 mg/L, 远高于国家地下水质量标准 V 级; 可溶性 SiO_2 的含量可作为地热温标; 地热流体总矿化度平均为 782.33 mg/L, 属于淡水; 为中等腐蚀型水, 不结碳酸钙垢, 无 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 垢和 SiO_2 垢生成的可能; 地热流体属于含岩盐地层溶滤的陆相沉积水; 根据氢氧稳定同位素可知, 河北汤泉地热流体主要来源于大气降水。

关键词: 汤泉地区; 地热流体; 水文地球化学; 成因分析

中图分类号: P641.3; P314.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2013)06-1935-07

地热属于清洁的可再生能源, 中国是世界上地热资源储量较大的国家之一, 尤其是中低温地热资源, 开发利用潜力巨大^[1]。汤泉位于河北省遵化市西北部, 属于遵化市的一个满族自治乡。该地区为山前丘陵地貌, 座落在一个断面呈 U 字型的山角谷地, 地势北高南低, 三面环山, 北部及东西部为陡峭的山峰, 南部为冲积河谷^[2]。汤泉地热久负盛名, 其自然出露的温泉, 早在元、明、清朝就已作为治疗皮肤病浴用, 20 世纪 70 年代该地区就建立了温泉疗养院, 并利用温水养鱼^[3]。一般来说, 地表以下一定深度范围内 (一般为恒温带至 200 m 埋深), 温度低于 25℃, 在当前经济技术条件下具备开发利用价值的地热能, 称为浅层地热能^[4]。汤泉地区地热资源虽然埋深浅, 根据地形变化, 一般从几十米到两百米之间, 但是地热流体温度大都高于 25℃, 已达到中低温地热, 不属于浅层地热能范畴。

1 区域地质背景

该区出露的地层主要为中太古代水厂组片麻岩, 新太古代马兰峪组片麻岩, 以及新生代第四纪沉

积地层。地下热水出露区域主要地层为新生代第四纪沉积和太古宙迁西群马兰峪组^[5]。大地构造位置为华北地台燕山沉降带马兰峪复斜轴部偏南, 马兰峪山字型构造前弧的南缘部位。太古宇变质岩构成近南北向的基底构造, 中元古界长城系构成近东西向的褶皱群, 北东向和东西向的菱形断裂控制着该地区的构造格局, 地下热水分布与断裂构造密切相关。区域内出露的侵入岩体主要为中侏罗世六里坪单元, 分布于区域北部茅山一带, 岩性主要为粗粒二长花岗岩, 另外, 区域内还出露古元古代辉绿岩脉和中生代辉绿岩脉、花岗细晶岩脉、石英斑岩脉、石英岩脉等。

2 地温场分布特征

地壳浅部地温场的影响因素包括: 基岩的起伏、构造形态、岩浆活动、地下水活动等。华北地区基岩面的起伏和构造形态对地壳浅部地温场分布起着主导作用, 在山前平原、活动断裂带附近, 地下水活动影响较大, 而岩浆活动的影响局限于晚近期有岩浆活动的地段^[6]。

收稿日期: 2013-01-28; 改回日期: 2013-10-23

基金项目: 中国地质调查局项目(12120113002000)资助。

作者简介: 王卫星, 男, 1982 年生, 硕士, 工程师, 主要从事应用地球化学方向研究; E-mail: 66318420@qq.com。

汤泉地区地热井井深一般为 100~300 m，热水温度 30~60℃，最高可达 68℃，其特点是热水埋藏浅，异常区面积小，便于开发利用。

本次研究在汤泉地区共测量地热井 18 口，测温时间为三月中下旬，测温井基本情况见表 1，井位分布见图 1。采用了地表测温(温泉)和钻孔稳态测温法研究了区域地温场的分布特征。根据测温数据研究发现：在垂向上，C01、C08 井地温接近地表部分，主要受气温影响较大，深部曲线主要呈线性，表现出传导为主的传热过程；C02 井地温曲线主体上呈线性，表现出传导为主的传热过程；其余各井，地温曲线不同段位之间所呈现出的地温梯度相差悬殊，表现出明显的对流传热特征。在平面上，该地区地温异常中心位于汤泉福泉宫至汤泉养鱼池一带，呈北东-南西向条带状展布，异常区南端有向西至西北向延伸的趋势，地热异常中心 50 m 埋深水温为 51~

表 1 测温井基本情况一览

Table 1 Basic situation of thermometric well

井号	井位	井深/m	水位埋深/m	水温/℃
C01	汤泉村王八楼子地热井	86.50	1.12	33.0
C02	汤泉村赵丰年家热水井	149.30	2.00	41.0
C03	汤泉乡养鱼池新井	189.20	16.90	67.5
C04	汤泉乡袁栗庄北沟深井	135.00	5.20	28.0
C05	唐山总工会疗养院西井	79.40	24.96	48.9
C06	汤泉福泉宫 2 号井	124.70	13.93	22.0
C07	汤泉福泉宫 3 号井	149.80	19.51	65.0
C08	汤泉福泉宫废井	199.90	6.00	15.0
C09	果庄子北石树亮水井	114.70	3.10	26.0
C10	汤泉北茅山南坡王福井	82.00	2.00	22.0
C11	汤泉马场东侧土埋井	39.60	10.67	26.0
C12	汤泉黄海门前凉水井	106.40	5.87	35.0
C13	汤泉福泉宫 1 号井	108.90	9.20	67.0
C14	汤泉温泉度假村凉水井	159.20	7.50	30.0
C15	汤泉村北栗树园水井	39.70	2.21	12.5
C16	宗友沟汤泉村自来水井	32.70	17.41	15.4
Z10829	黄海地热井	180.00	20.81	67.0
Y01	汤泉鑫农家院浅井	4.00	1.20	12.5

54℃，100 m 埋深水温可达 60~67℃(关于地温场分布内容作者将另文发表)。

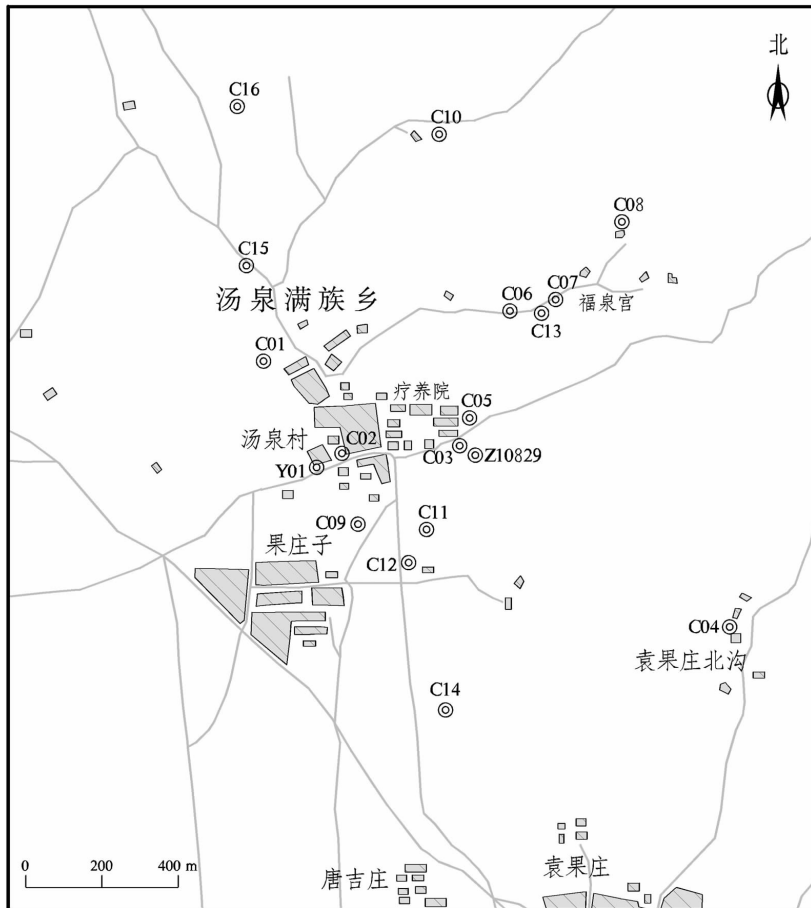


图 1 测温井分布简图

Fig.1 Distribution of thermometric wells

3 水文地球化学特征

3.1 主要离子特征

3.1.1 主要成分

从表 2 可知, 区内阳离子 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 与阴离子 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 是汤泉地区地下热水的主要成分。其中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 是地热流体中最主要的阳离子, 但是 K^+ 的含量远远小于 Na^+ , 这是因为

K^+ 在地壳中为营养元素, 容易被植物吸收, 另外 K^+ 为成矿元素, 尤其在较高的温压条件下大量参与并形成不溶于水的次生矿物, 如: 水云母、蒙脱石、绢云母等。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 碱土金属主要来源于碳酸盐的溶解与迁移, 在地下水中, 一般 Ca^{2+} 比 Mg^{2+} 含量要高, 因为 Mg^{2+} 容易参与次生矿物的形成, 汤泉地区地热流体中 Ca^{2+} 约是 Mg^{2+} 的 20~60 倍^[6]。一般认为 SO_4^{2-} 是地下水流经含石膏矿物的岩石时将岩石中的石膏等

表 2 汤泉地区地热流体水化学分析结果 (mg/l)

Table 2 Analytical results of chemical composition of the geothermal fluid in Tangquan area

分析项目		C01	C03	C05	C12	C13	C14	Z10829	平均值
阳离子	K^+	6.5	6.6	6.7	5.6	7.1	4.7	6.7	6.27
	Na^+	212.0	210.0	207.1	193.0	212.1	159.0	212.4	200.80
	Ca^{2+}	18.4	18.4	22.8	18.5	17.9	26.5	18.0	20.07
	Mg^{2+}	0.8	0.5	1.0	1.0	0.3	2.8	0.3	0.96
	NH_4^+	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.3	<0.05	
	Mn	0.02	0.06	0.01	<0.01	0.03	0.01	0.02	0.03
	TFe	<0.08	<0.08	<0.08	<0.08	<0.08	0.8	<0.08	
阴离子	Cl^-	42.5	53.2	56.7	49.6	44.3	46.1	53.2	49.37
	SO_4^{2-}	381.3	355.7	319.6	319.2	387.2	295.1	368.7	346.69
	HCO_3^-	91.5	91.5	100.7	100.7	88.5	85.4	85.4	91.96
	CO_3^{2-}	0	0	0	0	0	0	0	0.00
	NO_3^-	<0.05	0.30	2.48	0.99	0.26	1.98	0.07	1.01
	NO_2^-	<0.002	0.005	0.035	<0.002	<0.002	0.056	0.004	0.03
	F^-	8.88	10.3	9.25	9.25	9.24	7.91	10.71	9.36
	I ⁻	0.05	0.08	0.08	0.05	<0.05	0.10	0.08	0.07
	Br^-	<0.1	0.2	0.1	0.1	<0.1	0.1	0.1	0.12
	PO_4^{3-}	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.02	<0.02	0.10	
	S^{2-}	0.03	0.06	0.03	0.12	0.03	0.07	0.17	0.07
环境指标	Zn	<0.02	0.07	<0.02	0.02	<0.02	<0.02	<0.02	
	Cu	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	
	As	0.005	0.005	0.004	0.005	0.005	0.002	0.005	0.00
	Pb	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	
	Cd	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	
	COD_{Mn}	0.44	0.76	0.46	0.53	0.37	0.53	0.46	0.51
可溶性 SiO_2	62.5	75.0	64.5	61.5	78.0	50.0	72.0	66.21	
总矿化度	815.5	810.9	779.1	749.1	835.4	669.6	816.7	782.33	
总硬度	49.5	48.0	61.1	50.0	45.5	77.6	46.0	53.96	
总碱度	75.1	75.1	82.6	82.6	72.6	70.1	70.1	75.46	
总酸度	2.5	0.0	5.0	2.5	0.0	5.0	2.5	2.50	
pH	8.18	8.29	8.20	8.22	8.29	8.06	8.26	8.22	

注: 分析单位为国土资源部天津矿产资源监督检测中心。

硫酸盐溶滤形成的，另外硫化物矿床氧化带氧化产物的溶解也是地下水中 SO_4^{2-} 来源之一， SO_4^{2-} 也是地热温泉水中的主要阴离子^[7]。在地下水中，当 pH 值在 5~8 之间时，碳主要以 HCO_3^- 型式出现，汤泉地区地热流体 pH 值平均约为 8.20， HCO_3^- 主要来源于碳酸盐岩的溶解。Cl⁻ 主要来源于地下水流经含氯岩盐矿床或岩石中的岩盐 (NaCl、MgCl₂、CaCl₂ 等) 而聚集的，Cl⁻ 不容易被地层所吸附而大量存在于地下水溶液中，汤泉地区地热流体也显示了这一地下水特征。在汤泉温泉度假村一带 Na⁺、K⁺、 SO_4^{2-} 离子含量相对偏低，而 Ca²⁺、Mg²⁺ 离子含量相对偏高。

3.1.2 微量元素与环境指标

Mn 与 Fe 在内生条件下常共生在一起，在表生条件下由于风化时环境 pH 值不同，两者可能发生分离。Mn 与 Fe 的水文地球化学特征受 Eh 和 pH 控制。汤泉地区地热流体中的 Mn 含量在 0.01~0.06 mg/l，平均约为 0.03 mg/l。本次水质分析没有区分 Fe²⁺、Fe³⁺，给出的是总铁 (TFe) 的含量，除了 C14 测温井总铁 (TFe) 含量异常偏高之外，其他总铁 (TFe) 含量均在检测线 0.08 mg/l 以下。地下水中有 Mn、Fe 含量的统计结果表明，当 pH 值=8.3 时，Mn、Fe 含量分别为 0.04 mg/l、0.02 mg/l^[7]，水质分析结果显示汤泉地区地热流体中 Mn、Fe 含量与以往统计研究结果基本相近。

N、P 在地壳中属于营养元素，地下水中 NH₄⁺、NO₃⁻、NO₂⁻ 的形成与含蛋白质有机生物的分解有关，PO₄³⁻ 主要来源于磷酸盐的溶解。NH₄⁺、NO₃⁻、NO₂⁻ 可以作为地下水污染的指标，在未污染的天然水中 NO₃⁻ 一般都小于 30 mg/l，汤泉地区地热流体中 NH₄⁺、NO₃⁻、NO₂⁻、PO₄³⁻ 含量甚微，属于未污染的天然水。

随着微量元素在人体健康和生态学上研究的逐步深入，地下水中微量金属元素和微量非金属元素污染问题日益为人们所关注。汤泉地区地热流体中微量金属元素 Zn、Cu、Pb、Cd 和微量非金属元素 As (重金属元素) 含量甚微，接近或低于地下水天然背景值，未受到污染。

地下水中 F⁻ 属于微量非金属元素，在地壳各种岩石中均可能有含氟矿物，以火成岩中含氟矿物最多，含氟矿物主要有萤石、氟磷灰石、黑云母、金云母等。另外，氟还与人类活动有关，主要来源于钢铁工业的废物和磷矿开采的废物，一般来说，高氟水多为天然地下水，是地质历史的产物^[7]。浅层地下水中碱

性越强，氟离子的迁移能力越强，氟化物越不易沉淀，在还原环境中有利于氟离子的富集^[8]。汤泉地区地热流体中 F⁻ 含量偏高，在 7.91~10.71 mg/l，平均约为 9.36 mg/l，远高于国家地下水质量标准 V 级 (不宜饮用)。

3.2 地热流体综合指标分析

SiO₂ 广泛存在于地壳中的各种岩石和矿物里，在一般环境下 SiO₂ 的溶解十分缓慢，受温度和压力的影响比较大。Fournie 等^[10] 在 20 世纪 70—80 年代通过大量的实验模拟，研究了不同温度、压力条件下 SiO₂ 的溶解平衡问题，建立了一些十分有效的平衡方程式^[9]，同时也提出过利用井、泉水的 SiO₂ 含量来预测热储温度，在 0~250℃ 温度区间内不同矿物相 SiO₂ 的溶解度都随温度升高而增大。陈墨香等^[5] 在 1988 年利用华北地区和广东省大量地热水样分析资料统计计算结果表明，小于 100℃ 的低温水可以利用 SiO₂ 地热温标来预测热储温度。王卫星等^[11-12] 在 2010 年利用天津地区几十口深层地热井地热水中可溶性 SiO₂ 含量作图，显示出地热水中可溶性 SiO₂ 的含量与温度存在明显的正相关性，与矿化度没有明显的相关性。汤泉地区浅层地热流体中可溶性 SiO₂ 的含量在 50~78 mg/l，该地区地热流体中可溶性 SiO₂ 含量与温度也符合正相关性规律 (图 2)。因此，汤泉地区地热水中可溶性 SiO₂ 的含量可以作为一种化学温标来指示该地区地热水的温度。

汤泉地区地热流体总矿化度平均为 782.33 mg/l，按矿化度分类属于淡水 (矿化度 < 1000 mg/l)。总硬度是指水中所含 Ca²⁺、Mg²⁺ 的总量，一般情况下，地下水的硬度往往反映其所接触的地层岩性的性质，碳酸盐地层水的硬度一般较大，汤泉地区地热流体按硬度分类属于软水 ($\rho (CaCO_3) = 75 \sim 150 \text{ mg/l}$)，说明汤泉地区地热流体来源与碳酸盐地层关系不

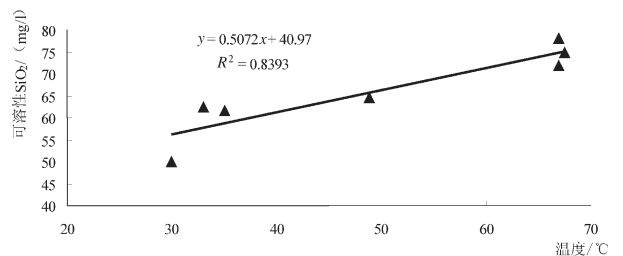


图 2 地热流体中可溶性 SiO₂ 含量与温度关系
Fig. 2 Relationship between content and temperature of SiO₂ of the geothermal fluid

大。汤泉地区地热流体的 pH 值均在 8.06~8.29,平均为 8.22,属于弱碱性水。

3.3 地热流体化学类型分类

地下水化学成分的特点可以反映它的不同形成条件,而不同的形成条件是由不同的自然环境所决定的,相似的自然条件下所形成的地下水化学成分相似,因此可以将相同成因和相同化学特点的水划分为一类^[6]。根据库尔洛夫分类和舒卡列夫分类方法,毫克当量百分数大于 25%的离子按递增排列表示,汤泉地区地热流体离子顺序为 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 Na^+ ^[9]。另外,根据 Piper 水化学类型三线图^[7]可知,汤泉地区地热井流体主要投点在 $SO_4^{2-}-Na^+$ 型水区域内(图 3)。因此,汤泉地区地热流体水化学类型主要为 $SO_4^{2-}-Na^+$ 型水。

3.4 地热流体腐蚀性与其结垢性

当地下水中含有 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子成分时,将地热水抽出地表,由于温度、压力条件的变化,尤其在有空气参与的情况下,热水的动态平衡就会受到破坏,使得热水中化学成分产生系列变化,引起腐蚀和结垢现象^[13]。水垢化学成分主要为碳酸钙、硫酸钙和硅酸盐三类。

对于 Cl^- 的毫克当量百分比>25%的地热水,可用拉伸指数(LI)判断其腐蚀性与碳酸钙垢: $LI=[\rho(Cl^-) + \rho(SO_4^{2-})]/ALK$,式中: ρ 为离子浓度,ALK为总硬度,三者均以等当量的 $CaCO_3$ 计(mg/l)表示^[13]。以拉伸指数评价腐蚀性程度的标准为:当 $LI<0.5$ 时,为

无腐蚀型水;当 $0.5<LI<3$ 时,为微腐蚀型水;当 $3<LI<10$ 时,为中等腐蚀型水; $LI>10$ 时,为强腐蚀型水。以拉伸指数评价结碳酸钙垢的标准为:当 $LI<0.5$ 时,结碳酸钙垢; $LI>0.5$ 时,不结碳酸钙垢。经过计算,汤泉地区地热流体的 LI 平均值约为 3.31,属于中等腐蚀型水,且不结碳酸钙垢。

地热流体温度小于 100℃时, $CaSO_4$ 垢主要是以二水硫酸钙($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)的形式沉淀。地热流体中硫酸钙垢的生成趋势可用 S_r 来定性判断,其表达式为:

$$S_r \text{石膏} = \lg[\rho(Ca^{2+})] + \lg[\rho(SO_4^{2-})] - \lg[\rho(K)]$$

式中: $S_r \text{石膏}$ 为石膏($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)相对饱和度, K 为与温度和总固形物有关的常数。此处温度参考汤泉地区地热流体平均温度 50℃来取常数 K 值,判定标准为:当 $S_r \text{石膏}<0$ 时,无 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 垢生成;当 $S_r \text{石膏}>0$ 时,可能有 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 垢生成。经过计算,汤泉地区地热流体的 $S_r \text{石膏}$ 平均值约-1.46,均无 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 垢生成的可能。

硅酸盐垢的结垢通常采用无定形 SiO_2 的相对饱和度 $S_r \text{硅酸盐}$ 来评价,其表达式为 $S_r \text{硅酸盐} = \rho(SiO_2) / (2.466 \times 10^4 \times e^{-15.53/T})$,式中: $S_r \text{硅酸盐}$ 为相对饱和度, $\rho(SiO_2)$ 为分子浓度, T 为绝对温度。此处温度参考汤泉地区地热流体平均温度 50℃来计算绝对温度 T 值,判定标准为:当 $S_r \text{硅酸盐}<1$ 时,无 SiO_2 垢生成;当 $S_r \text{硅酸盐}>1$ 时,可能有 SiO_2 垢生成。经过计算,汤泉地区地热流体的 $S_r \text{硅酸盐}$ 平均为 0.013,无 SiO_2 垢生成。

4 地热流体成因与来源

4.1 比例系数

在地下水中, $\omega(Cl)/\omega(Br)$ 大于 300 属于贫溴的含岩盐地层溶滤水,小于 300 属于残余海水,约为 300 一般属于大洋水^[7]。汤泉地区地热流体的 $\omega(Cl)/\omega(Br)$ 系数平均约为 411.43,大于 300,属于贫溴的含岩盐地层溶滤水。汤泉地区地热流体的 $\omega(Cl)/\omega(I)$ 系数平均约为 1.64,远低于正常海水的系数 1300,认为该水属于陆相沉积水。标准海水的 $r(Na)/r(Cl)$ 系数平均值为 0.85,海相沉积水的 $r(Na)/r(Cl)$ 系数小于 0.85,含岩盐地层溶滤水的 $r(Na)/r(Cl)$ 系数接近于 1。汤泉地区地热流体的 $r(Na)/r(Cl)$ 系数平均约为 4.07,大于 1,同样可以认为该水属于陆相沉积水。

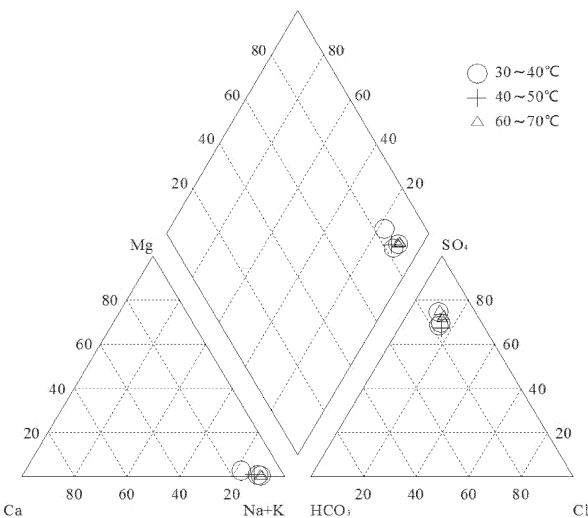


图 3 Piper 水化学类型三线图^[7]

Fig.3 Three line diagram of hydrochemical types^[7]

4.2 氢氧同位素特征

地下水主要起源于大气降水和各种地表水的渗入补给, 氢氧稳定同位素方法在确定地下水成因类型和地下热水的起源等方面具有重要的意义^[14]。汤泉地区地热流体氢氧同位素见表 3, 从图 4 中可以看出, 该地区地热流体氢氧稳定同位素组成数据均落在全球大气降水线 (Global Meteoric Water Line, GMWL) 附近, 显示研究区地下水主要来源于大气降水。

5 结 论

汤泉地区地热资源丰富, 热水埋藏浅, 热水温度适中, 便于开发利用。本次研究利用该地区地热流体水质分析结果, 通过水文地球化学方法研究发现: Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 与 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 是该地

区地下热水的大量元素, 在汤泉温泉度假村一带 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 离子含量相对偏低, 而 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子含量相对偏高; 地热流体水化学类型主要为 SO_4^{2-} - Na^+ 型, pH 值平均为 8.20, 为弱碱性水; NH_4^+ 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 PO_4^{3-} 和 Zn 、 Cu 、 Pb 、 Cd 、 As 含量甚微, 属于未污染的天然水; 地热流体中 F^- 含量偏高, 平均约为 9.36 mg/l, 远高于国家地下水质量标准 V 级; 地热水中可溶性 SiO_2 的含量可以作为一种化学温标来指示汤泉地区地热水的温度; 地热流体总矿化度平均为 782.33 mg/l, 属于淡水; 经腐蚀性和结构性分析, 地热流体属于中等腐蚀型水, 不结碳酸钙垢, 无 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 垢和 SiO_2 垢生成的可能。

根据 $\omega(\text{Cl})/\omega(\text{Br})$ 、 $\omega(\text{Cl})/\omega(\text{I})$ 、 $r(\text{Na})/r(\text{Cl})$ 系数可知, 汤泉地区地热流体属于含岩盐地层溶滤的陆相沉积水。根据氢氧稳定同位素可知, 该地区地热流体主要来源于大气降水。

表 3 汤泉地区地热流体氢氧同位素数据

Table 3 Hydrogen and oxygen stable isotope data of the geothermal fluid in Tangquan area

井号	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	σ	$\delta^2\text{H}/\text{‰}$	σ
C02	-10.13	0.07	-70.3	0.30
C03	-11.93	0.12	-88.7	0.27
C05	-10.78	0.06	-74.6	0.25
C09	-8.17	0.04	-61.9	0.18
C13	-13.01	0.04	-93.8	0.35
C14	-12.04	0.04	-89.1	0.24
C16	-11.68	0.04	-84.9	0.24
Y01	-8.16	0.07	-56.8	0.27

注: 分析单位为中国科学院地质与地球物理研究所水同位素与水岩反应实验室, 分析结果以 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 表示 ($\delta = (R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1) \times 1000$), 采样标准为维也纳标准平均海水 (Vienna Standard Mean Ocean Water, VSMOW), 分析精度 $\delta^{18}\text{O}$ 误差为 0.1%、 $\delta^2\text{H}$ 为 0.5%。

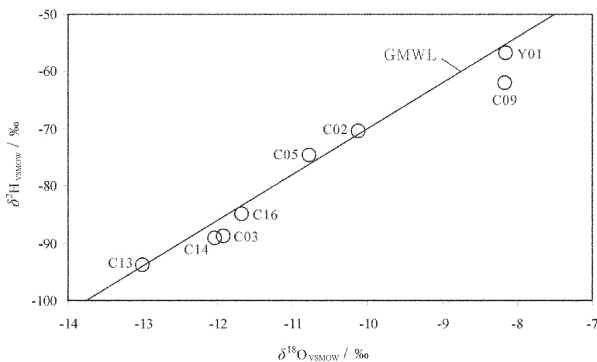


图 4 汤泉地区地热流体氢氧同位素特征

Fig.4 Hydrogen and oxygen stable isotope characteristics of the geothermal fluid in Tangquan area

参考文献(References):

[1] 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 等. 中国地热资源及其潜力评价 [J]. 中国地质, 2013, 40(1): 312-321.
Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli, et al. The assessment of geothermal resources potential of China [J]. Geology in China, 2013, 40(1): 312-321(in Chinese with English abstracts).

[2] 杨立顺. 河北省遵化市汤泉地下水赋存特征 [J]. 地下水, 2011, 33(4): 11-12.
Yang Lishun. The occurrence characteristics of underground hot water in Tangquan area of Zunhua City, Hebei Province [J]. Ground Water, 2011, 33 (4): 11-12 (in Chinese with English abstracts).

[3] 李海龙. 遵化市汤泉地热资源开发利用建议 [J]. 河北水利, 2009, 6-43.
Li Hailong. Suggestions on the development and utilization of geothermal resources in Tangquan of Zunhua city [J]. Hebei Water Conservancy, 2009, 6-43(in Chinese with English abstracts).

[4] 韩再生, 冉伟彦, 佟红兵, 等. 浅层地热能勘查评价 [J]. 中国地质, 2007, 34(6): 1115-1121.
Han Zaisheng, Ran Weiyang, Tong Hongbing, et al. Exploration and evaluation of shallow geothermal energy [J]. Geology in China, 2007, 34(6): 1115-1121(in Chinese with English abstracts).

[5] 陈墨香. 华北地热[M]. 北京: 科学出版社, 1988:103.
Chen Moxiang. North Geothermal [M]. Beijing: Science Press, 1988: 103(in Chinese with English abstracts).

[6] 任天培. 水文地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1986: 23.
Ren Tianpei. Hydrogeology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986: 23(in Chinese with English abstracts).

[7] 沈照理, 朱宛华, 钟佐燊. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版

- 社, 1993: 71(in Chinese with English abstracts).
- Shen Zhaoli, Zhu Yuanhua, Zhong Zuocan. Hydrogeochemistry Base[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 71(in Chinese with English abstracts).
- [8] 龚建师, 叶念军, 葛伟亚, 等. 淮河流域地氟病环境水文地质因素及防病方向的研究[J]. 中国地质, 2010, 37(3): 633-639.
- Gong Jianshi, Ye Nianjun, Ge Weiya, et al. The relationship between fluorine in geological environment and endemic fluorosis in Huaihe River basin[J]. *Geology in China*, 2010, 37(3): 633-639(in Chinese with English abstracts).
- [9] Fournier R O, Rowe J J. The solubility of amorphous silica in water at high temperatures and high pressures [J]. *American Mineralogist*, 1977, 62: 1052.
- [10] Fournier R O. Application of Water geochemistry to geothermal exploration and reservoir engineering [C]//Ryhack L, Muffer L J P (eds.). *Geothermal Systems: Principles and Case Histories*, 1981: 113.
- [11] 王卫星, 孙玉东, 杨永江, 等. 天津市东丽湖地热对井的地质与水文地球化学特征[J]. 物探与化探, 2010, 34(1): 44-48.
- Wang Weixing, Sun Yudong, Yang Yongjiang, et al. Geological and hydrogeochemical characteristics geothermal paired wells in Dongli lake area, Tianjin [J]. *Geophysical and Geochemical Explpration*, 2010, 34(1): 44-48(in Chinese with English abstracts).
- [12] 胡燕, 高宝珠, 靳宝珍, 等. 天津地热流体水化学分布特征及形成机理[J]. 地质调查与研究, 2007, 30(3): 213.
- Hu Yan, Gao Baozhu, Jin Baozhen, et al. Chemical distribution and forming mechanism of the geothermal water in Tianjin [J]. *Geological Survey and Research*, 2007, 30(3): 213(in Chinese with English abstracts).
- [13] 李之鑫. 天津地下热水的化学组成与结垢、腐蚀现象的观察及其机理的探讨 [C]//地热专辑 (第二辑). 北京: 地质出版社, 1989: 189.
- Li Zhixin. Discussion on chemical composition and scaling and corrosion phenomenon of underground hot Water in Tianjin [C]// *Geothermal Album (Second Series)*. Beijing: Geological Publishing House, 1989: 189(in Chinese with English abstracts).
- [14] 钱会, 马致远. 水文地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 124-133.
- Qian Hui, Ma Zhiyuan. *Hydrogeochemical* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005: 124-133 (in Chinese with English abstracts).

Hydrogeochemical characteristics and origin of the geothermal fluid in Tangquan area, Hebei Province

WANG Wei-xing¹, LI Gong-ke¹, LI Hong¹,
HOU Jia-yu¹, FANG Wan-ling¹, YANG Feng-tian²

(1. *Tianjin Institute of Geological Survey, Tianjin 300191, China*; 2. *College of Resources and Environment, Jilin University, Changchun 130021, Jilin, China*)

Abstract: Located in northwest Zhunhua City of Hebei Province, Tangquan has piedmont hilly landform with abundant geothermal resources. The authors analyzed the geothermal fluid of this area. According to the results obtained, Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- and NO_3^- are major elements of the geothermal fluid of this area; hydrochemical types are mainly $\text{SO}_4^{2-}-\text{Na}^+$; the geothermal fluid is unpolluted and natural weakly alkaline water; the average content of F^- of the geothermal fluid is 9.36 mg/l, which is much higher than the national standard of V grade groundwater quality; the content of soluble SiO_2 of the geothermal fluid in this area can be used as a geothermometer; the total salinity of the geothermal fluid is 782.33 mg/l on average, being of fresh water; the geothermal fluid belongs to medium corrosive water, which does not form CaCO_3 , $\text{CaSO}_4-2\text{H}_2\text{O}$ or SiO_2 scales; the geothermal fluid belongs to continental sedimentary water formed in the strata with dissolved salt brine. The hydrogen and oxygen stable isotopes show that the geothermal fluid of this area is mainly derived from meteoric water.

Key words: Tangquan area; geothermal fluid; hydrogeochemistry; genetic analysis

About the first author: WANG Wei-xing, male, born in 1982, master, engineer, engages in the study of the application of geochemical direction; E-mail: 66318420@qq.com.