

李攻科, 王卫星, 李宏, 等. 河北汤泉地热田地温场分布及其控制因素研究[J]. 中国地质, 2014, 41(6): 2099–2109.

Li Gongke, Wang Weixing, Li Hong et al. Temperature distribution and controlling factors of the Tangquan geothermal field in Hebei Province[J]. Geology in China, 2014, 41(6): 2099–2109(in Chinese with English abstract).

# 河北汤泉地热田地温场分布及其控制因素研究

李攻科<sup>1</sup> 王卫星<sup>1</sup> 李宏<sup>1</sup> 杨峰田<sup>2</sup> 王林海<sup>1</sup> 房万岭<sup>1</sup>

(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。本文对汤泉地热田内分布的诸多基岩热井进行了钻孔测温, 利用测温结果对该地热田地温场分布特征及控制因素进行了研究。研究发现: 钻孔温度明显受地下水流的影响, 绝大部分测温井表现为对流传热特征, 个别表现为传导为主的传热特征; 地温异常区域位于汤泉福泉宫和疗养院一带, 异常中心呈两极分布, 地热异常中心 50 m 埋深水温为 51~54℃, 100 m 埋深水温可达 60~67℃; 该地热系统中地热水系地下水在深循环过程中, 在正常的大地热流背景下被围岩逐渐加热所致; 由花岗岩隔水底板构造形态所形成的隐伏盆地, 构成了福泉宫至疗养院一带的蓄水构造; 由于断裂构造切割花岗岩体, 造成深部的热流沿断裂上升, 混合并加热赋存于福泉宫至疗养院一带蓄水构造中的片麻岩裂隙水, 形成该地段的地热异常现象; 福泉宫地区和疗养院地区片麻岩含水层裂隙发育, 使得深部热量能够快速到达浅部地层, 并在浅部出现局部异常高温; 汤泉地热田片麻岩热储层地热流体属于含岩盐地层溶滤的陆相沉积水, 主要来源于大气降水。

**关键词:**河北汤泉; 地热田; 地温场分布; 控制因素

**中图分类号:** P641.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2014)06-2099-11

## 1 引言

地热资源是可再生能源中最现实和最具竞争力的资源之一, 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。实现地热资源的可持续开发利用, 是当今中国也是世界地热产业所面临的最为关键的问题。要解决这一问题, 首先要查明研究区的地温场分布特征<sup>[1-4]</sup>。汤泉满族自治乡位于素有“京畿第一城”之称的河北省遵化市西北部, 座落在一个三面环山, 断面呈 U 字型的山角谷地中, 北部及东西部为陡峭的山峰, 南部为冲积河谷, 属于山前丘陵地貌<sup>[5]</sup>。汤泉地热久负盛名, 其自然出露的温泉属于清东陵八景之一——汤泉浴日。早在元、明、清时代, 汤泉地热就已浴用治疗皮肤病, 20 世纪 70 年代

该地区建立了温泉疗养院, 并利用温水养鱼<sup>[6]</sup>。然而对于汤泉地热田的研究还处于初步阶段, 相关资料很少。本文对研究区内分布的诸多基岩热井进行了钻孔测温工作, 利用测温结果对该地热田的地温场分布特征进行研究, 并对其地温场控制因素进行初步探讨。

## 2 区域地质背景

汤泉位于华北地台燕山台褶带马兰峪复背斜两侧。太古界变质岩构成的基底构造, 其演化可划分为迁西旋回和遵化旋回, 前期形成近东西向的褶皱群, 中期—后期形成近南北向的韧性剪切带。汤泉所在的构造区域为角闪岩相区与麻粒岩相区的过渡地带, 区域上面理发育, 片麻理走向由南向北依次为 NNE→NE→NEE, 呈弧形展布。汤泉地区

收稿日期: 2013-11-26; 改回日期: 2014-06-16

作者简介: 李攻科, 男, 1982 年生, 工程师, 主要从事水文地质和应用地球化学方向研究; E-mail: 81586678@qq.com。

主要出露中太古界水厂组变粒岩,以及新生界第四系沉积物地层。区域内出露大面积的变质深成侵入体,可分为三屯营片麻岩、小关庄片麻岩、秋花峪片麻岩,其中三屯营片麻岩为迁西旋回产物,小关庄片麻岩、秋花峪片麻岩为遵化旋回产物。汤泉地区侵入的中酸性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<sup>[7-9]</sup>(图1~2)。

### 3 水文地质特征与基岩井分布

#### 3.1 水文地质特征

研究区第四系盖层很薄,一般小于4 m,主要为粘土、粉质粘土和粉砂。地热水主要赋存地层为太古宇变质岩类<sup>[5]</sup>。在茅山以南至果庄子地区,片麻岩厚度为0~1000 m(图2),且风化严重,裂隙发育,透水性较强,能够导水、储水和接受补给,是本区主要的含水层(或热储层)。由于片麻岩含水层之上并没有明显的隔水边界,因此赋存于片麻岩裂隙中的地下水为潜水。本区二长花岗岩结构致密,主要出露于汤泉村北部茅山一带,向南被越来越厚的片麻岩含水层覆盖。二长花岗岩属于相对隔水的岩体,构成了隔水边界,使上覆片麻岩裂隙中的地下水可以积蓄起来。袁果庄北沟至果庄子一带,存在着一条近东西向的断裂构造,以致果庄子以南地区二长花岗岩埋深陡增至1000 m以深(图2),使得片麻岩裂隙水沿断面向深部运移。

该地热田地热流体主要离子成分为 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ ,水化学类型主要为 $\text{SO}_4^{2-}-\text{Na}^+$ 型,属于未污染的天然弱碱性水,地热流体中F<sup>-</sup>含量平均值为9.36 mg/L,远高于国家地下水质量标准V级,地热流体总矿化度平均为782.33 mg/L,属于淡水<sup>[10]</sup>。

#### 3.2 基岩水井特征

研究区内分布有诸多基岩水井(包括热水井和冷水井),用以开发赋存于片麻岩裂隙中的地下水。基岩水井的主要用途为农村生活井、农业灌溉与养殖井、商业温泉洗浴井和冬春季地热采暖井,还有个别井荒废不用。基岩井基本情况见表1,分布情况见图2。

研究区内基岩井孔深在30~300 m,为片麻岩基岩地层裸眼成井。除C08井外,各井均未贯穿片麻岩含水层,属于潜水不完整井。C08井处,隔水底板二长花岗岩岩体埋深约为100 m,井深为200 m,故C08井为潜水完整井。2011年11月至2012年10月,研究区片麻岩裂隙水年总开采量约为630528 m<sup>3</sup>,其中40℃以上热水开采量约为506086 m<sup>3</sup>,约占总开采量的80%,主要用于温泉洗浴与冬春季地热采暖;25℃以下冷水的开采量约为25861 m<sup>3</sup>,约占总开采量的4%,主要为汤泉村的自来水和栗树园中的灌溉水。

### 4 地温场特征

#### 4.1 地温测量

地温的测量,可采取钻孔测温的方式来获得。钻孔测温,系借助于测量井液温度获得地下岩石的温度。钻孔温度经过恢复与井液(围岩)温度达到平衡之后,所进行的测温称为稳态测温。通过对稳态测温数据进行分析,能够得出实际的地温分布情况<sup>[11]</sup>。

本文亦采用稳态测温的原理,利用电阻法<sup>[12]</sup>,于2012年3月中下旬(地表平均气温在7℃左右),选择了15眼有条件的基岩水井开展了测温工作(钻孔平面分布见图1,基本情况见表2)。测温井深为40~200 m,井内温度测点间距为5 m。通过测温取得了研究区内15眼基岩热水井的温度—埋深曲线(图3),各井地温梯度统计见表2。

#### 4.2 测温结果分析

在无地下水活动干扰时,钻孔的温度与深度直线相关,此时温度曲线为传导型;在有地下水运动干扰时,温深曲线为上凸型(地下水向上运动)或下凹型(地下水向下运动),并有时出现地温梯度为0的井段,此时钻孔的温度曲线为对流型<sup>[13]</sup>。根据本次测温结果可知,工作区既存在传导型温度曲线,也存在对流型温度曲线。

C01和C08井的温度与深度呈直线相关,表现出传导为主的传热过程;C02井的温度与深度主体上呈直线相关,也表现出传导为主的传热过程,但曲线整体微呈上凸形,系地温场在地下水流作用下的变异。

C03、C05、C06、C07和C13井曲线斜率较大的部分表现出的地温梯度为40~98℃·hm<sup>-1</sup>,反映了这

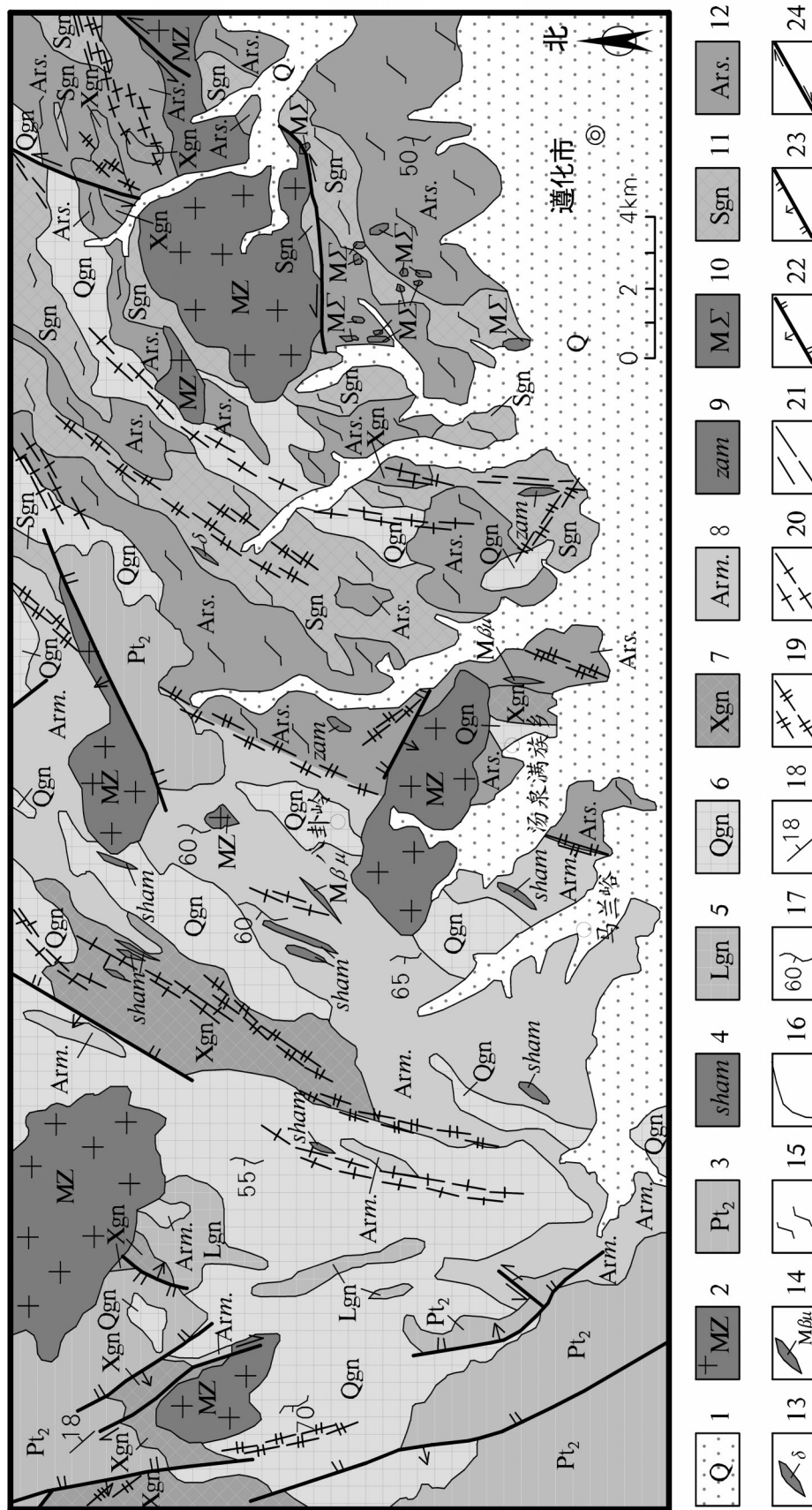


图1 河北汤泉地区区域地质构造纲要图<sup>[8-9]</sup>

1—第四系; 2—中生代侵入岩; 3—中元古界; 4—石门岩墙; 5—柳河峪片麻岩; 6—秋花峪片麻岩; 7—小关庄片麻岩; 8—马兰峪岩墙; 9—正北峪岩墙; 10—毛家厂超基性岩; 11—三屯营片麻岩; 12—水厂岩组; 13—闪长岩脉; 14—变质辉绿岩脉; 15—麻粒岩相岩石; 16—地质界线; 17—片麻理产状; 18—岩层产状; 19—绿片岩相韧性剪切带; 20—角闪岩相韧性剪切带; 21—麻粒岩相韧性剪切带; 22—逆断层; 23—正断层; 24—平移断层

Fig. 1 Regional geotectonic outline map<sup>[8-9]</sup>

1—Quaternary; 2—Mesozoic intrusive rocks; 3—Meso-Proterozoic; 4—Shimen dyke; 5—Liuhuyu hornblende plagiogneiss; 6—Qiuhuyu hornblende plagiogneiss; 7—Xiaoguanzhuang hornblende plagiogneiss; 8—Malanyu rock group; 9—Zhengbeiyou dyke; 10—Maojiachang ultrabasic rocks; 11—Santunying hornblende plagiogneiss; 12—Shuichang rock group; 13—Diorite veins; 14—Metamorphic diabase veins; 15—Granulite facies rocks; 16—Geological boundary; 17—Attitude of gneissosity; 18—Attitude of strata; 19—Greenschist facies ductile shear zone; 20—Amphibolites facies ductile shear zone; 21—Granulite facies ductile shear zone; 22—Reverse fault; 23—Normal fault; 24—Strike-slip fault

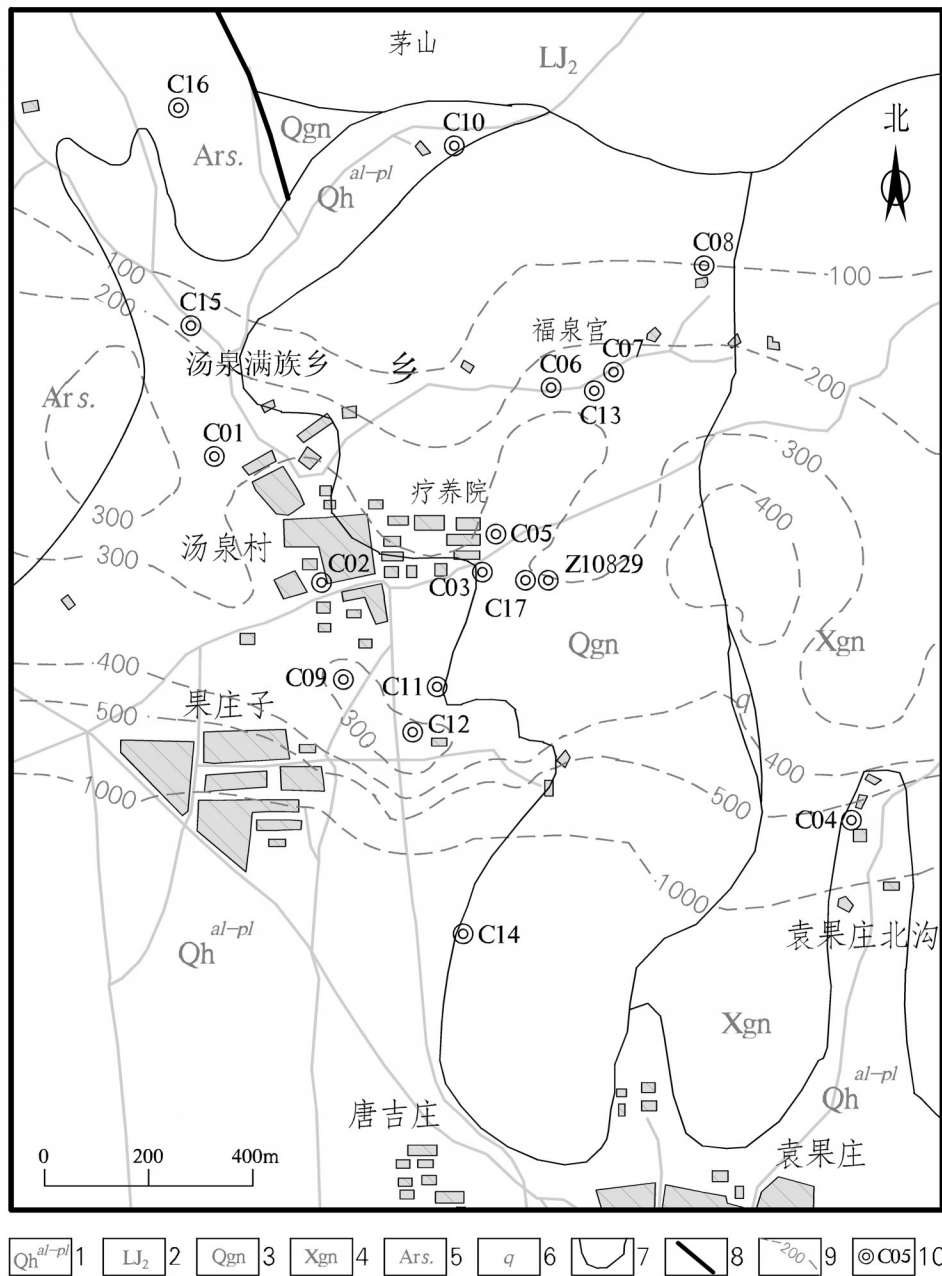


图2 汤泉地热田地质简图及测温基岩井分布图

1—第四系;2—二长花岗岩;3—秋花峪角闪斜长片麻岩;4—小关庄角闪斜长片麻岩;5—紫苏角闪(黑云)斜长变粒岩;6—石英脉;7—地质界线;8—断裂带;9—二长花岗岩埋深等值线(m);10—测温井及井号

Fig.2 Geological sketch map and temperature bedrock wells distribution map in the Tangquan geothermal field

1-Quaternary; 2-Monzonitic granite; 3-Qiuhuayu hornblende plagiogneiss; 4-Xiaoguanzhuang hornblende plagiogneiss; 5-Greenlandite (biotite) plagioclase granulite; 6- Quartz vein; 7-Geological boundary; 8- Fractured zone; 9-Depth contour lines of monzonitic granite (m); 10- Temperature-measuring well and its serial number

些井存在着明显的地热异常。而曲线斜率较小的部分,表现出来的地温梯度仅为 $0\sim 4^{\circ}\text{C}\cdot\text{hm}^{-1}$ (C06井为 $10.3^{\circ}\text{C}\cdot\text{hm}^{-1}$ ,但仅相当于其高地温梯度部分的1/8),

这是由于垂向对流的地下水活动使得深部热量快速到达浅部地层,使得地温呈均一化,并使浅部出现异常高温;另一方面,则反映了在这些段位,岩层

表1 汤泉地区基岩热水井(冷水井)分布概况

Table 1 Bedrock thermal water (water wells) distribution in the Tangquan geothermal field

井号	井位	水温 /°C	开采量/m <sup>3</sup>			说明
			冬春季 11~4月	夏秋季 5~10月	合计	
C01	汤泉村王八楼子地热井	33	0	17664	17664	原为温泉养整井, 现废弃。夏秋季自流
C02	汤泉村赵丰年家热水井	41	0	0	0	未使用
C03	汤泉乡养鱼池新井	67.5	108600	11040	119640	养鱼热水井
C04	汤泉乡袁果庄北沟深井	28	14	14	27	生活用凉水
C05	唐山总工会疗养院	48.9	78192	39744	117936	洗浴热水井
C06	汤泉福泉宫2号井	25	21720	8280	30000	洗浴用凉水
C07/C13	汤泉福泉宫热水井	67	103170	38640	141810	两眼井交替抽水, 洗浴用热水及地热采暖
C08	汤泉福泉宫废井	20	13	10	23	生活用凉水
C09	果庄子北石树亮凉水井	26	5068	5152	10220	洗浴用凉水
C10	汤泉北茅山南坡王福井	22	0	0	0	该井废弃
C11	汤泉马场东侧土埋井	26	0	0	0	该井废弃
C12	汤泉黄海门前凉水井	35	25340	5152	30492	洗浴用凉水
C14	汤泉温泉度假村凉水井	30	7602	2576	10178	洗浴用凉水
C15	汤泉村北栗树园水井	11	0	1200	1200	夏秋季开采浇栗园
C16	宗友沟汤泉村自来水井	15.4	12218	12420	24638	汤泉村自来水凉水井
C17	石树青热水井	67	63350	25340	88690	洗浴热水井
Z10829	黄海地热井	67	27150	10860	38010	洗浴热水井
合计			452436	178092	630528	

裂隙发育,透水性较好,对流较强,是井的主要出水段位。C06井地温梯度较小的段位主要出现在曲线的顶端,而下部的地温梯度则较大,这说明该井顶部的对流相对较强烈,主要出水段位在顶部地温较低的区域,虽然下部地温较高,但是下部并没有较好的出水段,因此该井的实际出水温度是较低的,这与该井的实际情况也是相符的。C14井7~19 m地温梯度很高,达 $110.0^{\circ}\text{C}\cdot\text{hm}^{-1}$ ,但至19 m,地温仅增至 $26.8^{\circ}\text{C}$ ,而其底部地温梯度均比较低,说明底部的对流相对较强烈,出水段位主要在下部,且下部垂向对流上来的地下水温度也不高,因此该井的出水温度实际并不高。C04、C09、C10和C12曲线斜率较大的部分表现出的地温梯度为 $11\sim 38^{\circ}\text{C}\cdot\text{hm}^{-1}$ ,反映出了这些井所在区域地热异常不明显。曲线斜率较小的部分,说明对流较强,反映了在这些段位,岩层裂隙发育,透水性较好,是井的主要出水段位。另外,C12井65~70 m段位和C14井109~140 m段位温度较上部呈下降趋势,出现负地温梯度现象,这种情况说明了在这些段位顶端可能存在裂隙或断裂,使水流入钻孔,沿钻孔向下流动,然后从下面的裂隙中流出。C11和C15井较浅,埋深均不足40 m,因此无法直接了解其深部温度场特征,但其浅部曲线已表现出对流型特征。

#### 4.3 地热异常区分布

根据钻孔测温数据,可绘制汤泉地区50 m和

100 m埋深的地温等值线图(图4)和汤泉地区地温地质剖面图(图5)。由此可知,研究区地温异常区域位于汤泉福泉宫和疗养院一带,异常中心呈两极分布,地热异常中心50 m埋深水温为 $51\sim 54^{\circ}\text{C}$ ,100 m埋深水温可达 $60\sim 67^{\circ}\text{C}$ 。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 $25^{\circ}\text{C}$ ,在当前经济技术条件下具备开发利用价值的热能,称为浅层热能<sup>[14-15]</sup>。汤泉地区地热资源虽然埋深浅,但地热流体温度大都高于 $25^{\circ}\text{C}$ ,已达到中低温地热,不属于浅层热能范畴。

## 5 地温场控制因素

### 5.1 热源分析

地热井热源分析与动力学研究,不仅可以了解地下热水开采过程中水位变化的基本特征及其影响因素,也有助于开展地下热水资源评价和指导地下热水资源的可持续利用<sup>[16]</sup>。区内新生代地层很薄或缺失,基岩大面积裸露,这一方面造成盖层的保温作用差,使得深部传导上来的热量快速散失;另一方面,在裸露区,基岩直接接受下行地下水补给,使地温偏低。对于放射性热源,假设地壳最上部10 km厚度内放射性元素均匀分布,中国华北地壳平均生热率估算值 $A$ 为 $0.76\sim 0.90\mu\text{W}/\text{m}^3$ <sup>[17]</sup>,根据计算公式 $\Delta q = A\Delta z$ ,由衰变产生热量 $\Delta q$ 为 $7.6\sim 9.0\text{mW}/\text{m}^2$ ,并不构成特殊热源。区内变质深成侵入体有三屯

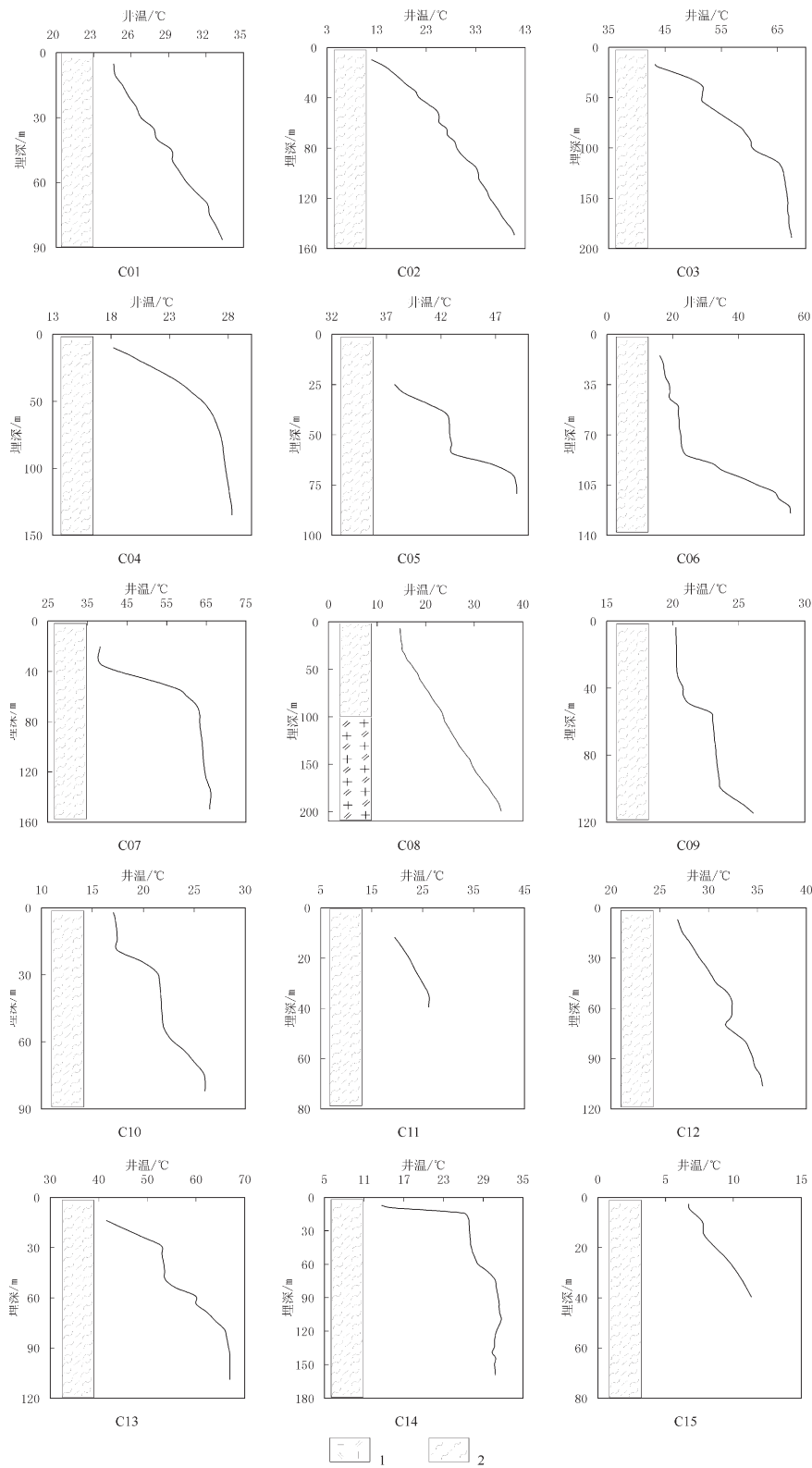


图3 测温井温度-埋深曲线  
 1—二长花岗岩;2—角闪片麻岩  
 Fig.3 Temperature - depth curve of the temperature-measuring wells  
 1-Monzonitic granite; 2-Hornblende gneiss

表2 地温梯度统计

Table 2 Statistics of geothermal gradient				
井号	孔深/m	静水位埋深/m	段位/m	地温梯度/°C·hm <sup>-1</sup>
C01	87	1.1	10~86	11.7
C02	150	2.0	10~150	19.6
C03	190	16.9	16~34	42.8
			39~54	0
			80~120	18
C04	135	5.2	120~190	2.6
			10~50	19
			73~135	1.8
C05	80	25.0	30~40	38
			40~59	3
			60~70	54
C06	125	13.9	70~80	4
			14~80	10.3
			80~120	81.3
C07	150	19.5	34~54	98.5
			70~150	3.6
C08	200	6.0	24~200	12.4
			3~34	1
C09	115	3.1	39~44	0
			44~54	21
			54~100	1.5
			100~115	16.7
C10	82	2.0	2~29	2.9
			19~29	38
			29~54	2.8
			54~74	19.5
C11	40	10.7	74~82	2.5
			11~34	29.1
			34~40	0
			7~55	11.5
C12	106	5.9	55~60	2
			70~80	20
			80~106	6.9
			14~29	74.7
C13	109	9.2	29~49	4
			49~59	63
			59~64	4
			64~79	38
C14	160	7.5	79~109	3.7
			7~19	110
			19~39	1
			44~60	6.3
C15	40	2.2	60~74	18.6
			74~109	2.6
			140~160	0.5
			5~10	18
			10~15	2
			15~40	14

营片麻岩、小关庄片麻岩、秋花峪片麻岩,而三屯营片麻岩为迁西旋回产物,小关庄片麻岩、秋花峪片麻岩为遵化旋回产物,皆为前第四纪侵入岩体,其余热早已散失,不构成特殊热源。岩浆活动对现今地温场的影响取决于岩浆活动年代和岩浆体规模等<sup>[3]</sup>。区内最新的岩浆岩为中侏罗世六里坪单元粗粒二长花岗岩,岩体埋藏较浅或直接露出地表,由于岩浆活动时间皆在全新世以前,且规模较小,其

余热已散失殆尽,对现今地温场无影响。实际上,区内汤泉福泉宫废井(C08孔)部分成孔于二长花岗岩岩体内,但孔内水温仅为20°C,钻孔测温也未见地温异常。故区内岩浆活动对于地温场无明显影响,不构成附加热源。故该地热系统中地热水系地下水在深循环过程中,在正常的大地热流背景下被围岩逐渐加热所致。

## 5.2 构造条件

### 5.2.1 蓄水构造

蓄水构造是地下水在不断交替过程中能积蓄地热水的地质构造,兼具汇集周边分散的水流和储存地热水的两种作用。蓄水构造相当于地下天然的蓄水容器,是由含水层(带)与隔水层构成的能够蓄积地下水的地质构造<sup>[18]</sup>。

汤泉地区片麻岩含水层透水性较强,主要接受大气降水补给、地表水补给、第四系孔隙水补给及地下水侧向径流补给。由汤泉地区地质简图(图1)可知,福泉宫至疗养院一带,花岗岩隔水底板的构造形态呈“簸箕”形,三面高,中部低,构成地下水径流汇集的条件,使得片麻岩含水层中分散的地下水流沿着隐伏地形向福泉宫至疗养院一带的隐伏洼地汇集。另外,在果庄子东北部一带存在一花岗岩上凸体,阻挡着来自疗养院一带的地下水径流,使得片麻岩裂隙水能够在福泉宫至疗养院一带赋存。

### 5.2.2 导热构造

地质构造运动使地层产生断裂、错动、上升、下陷等一系列地质运动,在岩层中形成了断裂带和破碎带,为热流从地下深处向上运移提供了通道<sup>[19]</sup>。由汤泉地区地质简图(图1)和汤泉地区地温地质剖面图(图5)可知,在福泉宫至疗养院一带,花岗岩基底存在起伏。而这些起伏的存在,可能是由断裂构造切割花岗岩体所造成。花岗岩体被切割,使得深部的热流能够沿断裂上升,混合并加热赋存于福泉宫至疗养院一带蓄水构造中的片麻岩裂隙水,形成该地段的地热异常现象。

根据前述钻孔测温结果分析可知,福泉宫(C07、C13孔)地区和疗养院(C03、C05孔)地区,片麻岩含水层裂隙发育,透水性较好,使得这些地段垂向的地下水对流较强,深部热量能够快速到达浅部地层,并在浅部出现局部异常高温。因此地热异常中心在福泉宫和疗养院呈两极分布。

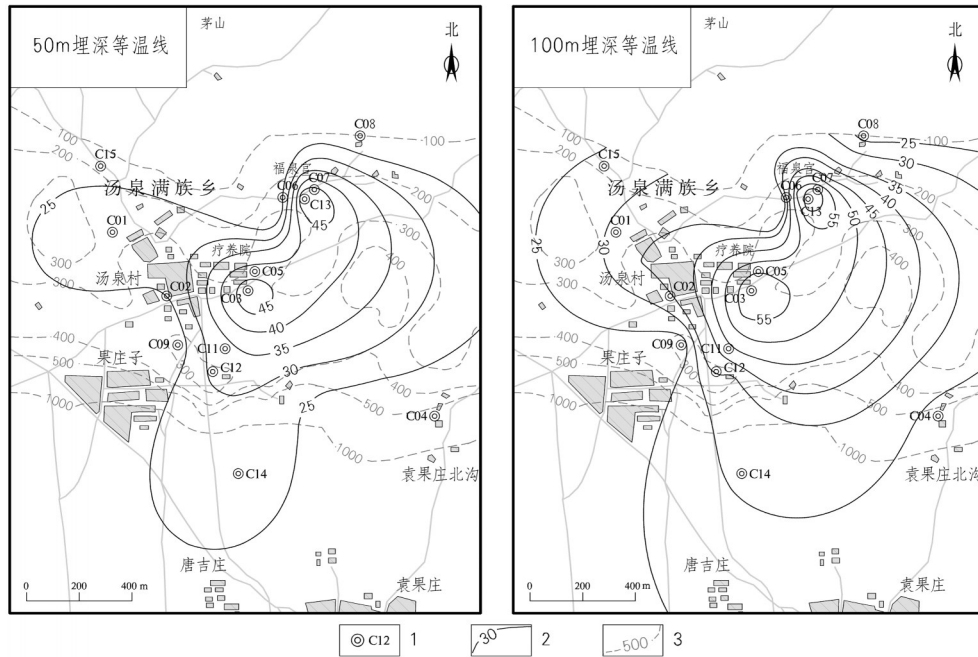


图4 地热田 50 m、100 m埋深等温线图

1—测温点及点号;2—等温线(°C);3—二长花岗岩埋深等值线(m)

Fig. 4 Diagram of buried depth isotherms at 50 m and 100 m of the study area

1-Measuring point and its serial number; 2-Isotherm (°C); 3- Depth contour line of monzonitic granite (m)

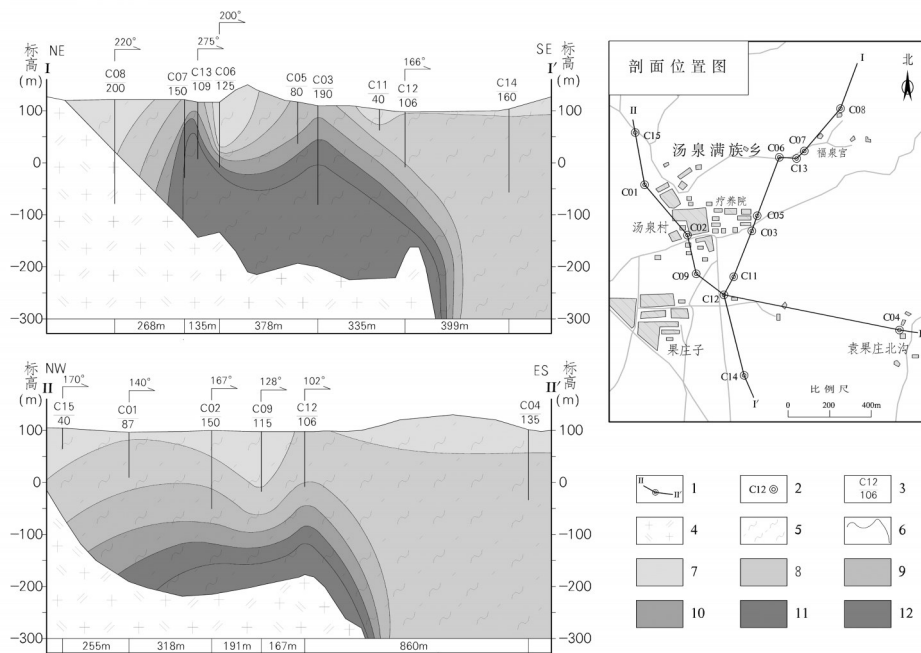


图5 汤泉地热田地温地质剖面图

1—剖面线;2—测温孔及编号;3—测温孔编号/孔深(m);4—二长花岗岩;5—角闪片麻岩;6—地温剖面等温线;7—地温<25°C;8—地温25~35°C;9—地温35~45°C;10—地温45~55°C;11—地温55~65°C;12—地温>65°C

Fig.5 Geological section of temperature of the Tangquan geothermal field

1-Section line;2-Measuring well and its serial number;3-serial number of measuring well / well depth (m);4-Monzonitic granite;5-Hornblende gneiss;6-Isotherm line of ground temperature section;7-Ground temperature <25°C;8-Ground temperature 25~35°C;9-Ground temperature 35~45°C;10-Ground temperature 45~55°C;11-Ground temperature 55~65°C;12-Ground temperature >65°C



表3 汤泉地热田地热流体氢氧同位素数据  
Table 3 Hydrogen and oxygen stable isotope data of geothermal fluid in the Tangquan geothermal field

井号	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\sigma$	$\delta^2\text{H}/\text{‰}$	$\sigma$
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%。

果庄子至袁果庄北沟以南地区,由于二长花岗岩侵入体顶面形成一高差近千米的陡坎。这一方面使浅部地热异常区片麻岩中的热流沿陡坎向深部运移,另一方面由于高差太大,深部的热流很难上升至浅部,因此果庄子以南地区,浅部地热异常现象不明显。

### 5.3 地热流体成因分析

#### 5.3.1 比例系数

在地下水中, $\omega(\text{Cl})/\omega(\text{Br})$ 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<sup>[20]</sup>。汤泉地热田片麻岩热储层地热流体的 $\omega(\text{Cl})/\omega(\text{Br})$ 系数平均约为411.43,大于300,属于贫溴的含岩盐地层溶滤水。从 $\omega(\text{Cl})/\omega(\text{I})$ 系数来看,本区该系数平均约为1.64,远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 $r(\text{Na})/r(\text{Cl})$ 系数平均值为0.85,系数大于0.85为陆相沉积水。汤泉地热田片麻岩热储层地热流体的 $r(\text{Na})/r(\text{Cl})$ 系数平均约为4.07,大于0.85,同样证实了该水属于陆相沉积水。

#### 5.3.2 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<sup>[21]</sup>。汤泉地热田片麻岩热储层地热流体氢氧同位素测试数据及特征见表3和图6。从图6中可以看出,该地热田片麻岩热储层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(the Global Meteoric Water Line, GMWL)附近,显示地热田片麻岩热储层地下水主要来源于大气降水。

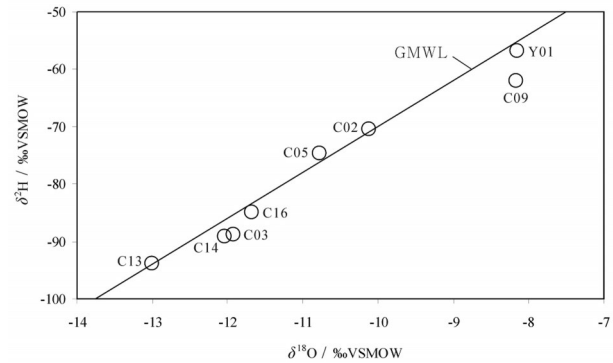


图6 汤泉地热田地热流体氢氧同位素特征  
Fig.6 Hydrogen and oxygen stable isotope characteristics of geothermal fluid in the Tangquan geothermal field

## 6 结论

本文对汤泉地热田内分布的诸多基岩热水井进行了钻孔测温,利用测温结果对该地热田地温场分布特征进行了研究。研究发现,钻孔温度明显受地下水流的影响,绝大部分测温井表现为对流传热特征,个别表现为传导为主的传热特征;研究区地温异常区域位于汤泉福泉宫和疗养院一带,异常中心呈两极分布,地热异常中心50 m埋深水温为51~54℃,100 m埋深水温可达60~67℃。

通过对汤泉地热田的热源、构造、成因分析,探讨了地热田地温场的控制因素。研究发现该地热系统中地热水系地下水在深循环过程中,在正常的大地热流背景下被围岩逐渐加热所致;由花岗岩隔水底板构造形态所形成的隐伏盆地,构成了福泉宫至疗养院一带的蓄水构造;由于断裂构造切割花岗岩体,造成深部的热流沿断裂上升,混合并加热赋存于福泉宫至疗养院一带蓄水构造中的片麻岩裂隙水,形成该地段的地热异常现象;福泉宫地区和疗养院地区片麻岩含水层裂隙发育,使得深部热量能够快速到达浅部地层,并在浅部出现局部异常高温;根据 $\omega(\text{Cl})/\omega(\text{Br})$ 、 $\omega(\text{Cl})/\omega(\text{I})$ 、 $r(\text{Na})/r(\text{Cl})$ 系数可知,汤泉地热田片麻岩热储层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,本区片麻岩热储层地热流体主要来源于大气降水。

**致谢:**研究工作得到唐山清东陵保护区管理委员会的资助;工作过程中得到苏广钧、李秀生、石树亮、石树青、王锁林、赵丰年、王学军等在资料收集与野外工作条件等方面给予的帮助,谨表谢意。

## 参考文献(References):

- [1] 汪集旻, 龚宇烈, 马伟斌, 等. 我国发展地热能面临问题的分析及建议[C]//首届“中国工程院 / 国家能源局能源论坛论文集”. 北京: 化学工业出版社, 2010: 627-630.  
Wang Jiyang, Gong Yulie, Ma Weibin, et al. Analysis and suggestion on the main Problems of geothermal energy developed in China [C]// proceedings: The 1st Energy Forum of Chinese Academy of Engineering & National Energy Administration. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 627-630 (in Chinese with English abstract).
- [2] Mongillo M A. Preface to geothermics special issue on sustainable geothermal utilization [J]. *Geothermics*, 2010, 39: 279-282.
- [3] 杨峰田, 庞忠和, 王彩会, 等. 苏北盆地老子山地热田成因模式[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(2): 468-475.  
Yang Fengtian, Pang Zhonghe, Wang Caihui, et al. Genesis model of Laozishan geothermal field, Subei Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2012, 42(2): 468-475 (in Chinese with English abstract).
- [4] 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 abstract).
- [5] 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]. *Groundwater*, 2011, 33(4): 11-12 (in Chinese).
- [6] 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 Recourses*, 2009: 6-43 (in Chinese).
- [7] 河北省地质矿产局. 河北省北京市天津市区地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 322-586.  
Bureau of Geology and Mineral Resources of Hebei Province. *Regional geology of Hebei Province, Beijing and Tianjin* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989:322-586 (in Chinese).
- [8] 郝国杰, 吴永祥, 等. 中华人民共和国地质图说明书—马兰峪幅(1:50000)[R]. 石家庄: 河北省地矿局, 1996:1-41.  
Hao Guojie, Wu Yongxiang, et al. Instructions of Geologic Maps of P. R. China: Map of Malanyu (1:50000) [R]. Shijiazhuang: Bureau of Geology and Mineral Resources of Hebei Province, 1996: 1-41.
- [9] 郝国杰, 吴永祥, 等. 中华人民共和国地质图说明书—遵化县幅(1:50000)[R]. 石家庄: 河北省地矿局, 1996: 1-36.  
Hao Guojie, Wu Yongxiang, et al. Instructions of Geologic Mps of P. R. China: Map of Zunhua County (1:50000) [R]. Shijiazhuang: Bureau of Geology and Mineral Resources of Hebei Province, 1996:1-36.
- [10] 王卫星, 李攻科, 李宏, 等. 河北汤泉地热流体水文地球化学特征及其成因[J]. *中国地质*, 2013, 40(6): 1935-1941.  
Wang Weixing, Li Gongke, Li Hong, et al. Hydrogeochemical characteristics and origin of the geothermal fluid in Tangquan area, Hebei Province [J]. *Geology in China*, 2013, 40(6): 1935-1941 (in Chinese with English abstract).
- [11] 杨峰田. 深层地热资源成因与潜力评价: 以苏北盆地为例[D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2011: 61-78.  
Yang Fengtian. Genesis Analysis and Assessment of Deep Geothermal Resources: A Case Study of the Subei Basin, China [D]. Dissertation, CAS, 2011: 61-78 (in Chinese with English abstract).
- [12] 余恒昌, 邓孝, 陈碧婉, 等. 矿山地热与热害治理[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1991: 46-93.  
Yu Hengchang, Deng Xiao, Chen Biwan, et al. Mining Geothermics and Control of Heat-harm [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1991: 46-93(in Chinese).
- [13] 汪集旻, 熊亮萍, 庞忠和. 中低温对流型地热系统[M]. 北京: 科学出版社, 1993:117-132.  
Wang Jiyang, Xiong Liangping, Pang Zhonghe. Low- medium Temperature Geothermal System of Convective Type [M]. Beijing: Science Press, 1993:117-132(in Chinese).
- [14] 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 Weiyan, Tong Hongbing, et al. Exploration and evaluation of shallow geothermal energy [J]. *Geology in China*, 2007, 34(6): 1115-1121(in Chinese with English abstract).
- [15] 田光辉, 林黎, 程万庆, 等. 天津市浅层地热能开发利用动态监测网建设[J]. *中国地质*, 2011, 38(6): 1660-1666.  
Tian Guanghui, Lin Li, Cheng Wanqing, et al. The construction of dynamic monitoring network for the development and utilization of shallow geothermal energy in Tianjin[J]. *Geology in China*, 2011, 38(6): 1660-1666(in Chinese with English abstract).
- [16] 赵敬波, 周训, 方斌, 等. 天津地区深层地下水热水井水力特征[J]. *现代地质*, 2011, 25(2): 363-392.  
Zhao Jingbo, Zhou Xun, Fang Bin, et al. Dynamic features in deep geothermal wells in Tianjin area [J]. *Geoscience*, 2011, 25 (2): 363-392 (in Chinese with English abstract).
- [17] 汪洋, 汪集旻, 邓普福, 等. 中国大陆地壳和岩石圈铀、钍、钾丰度的大地热流约束[J]. *地球物理学进展*, 2001, 16(3): 47-56.  
Wang Yang, Wang Jiyang, Deng Pufu, et al. Heat flow constraint on the abundance of uranium, thorium and potassium in crust and lithosphere of the continental area of China [J]. *Progress in Geophysics*, 2001, 16(3): 47-56(in Chinese with English abstract).
- [18] 刘光亚. 基岩地下水[M]. 北京: 地质出版社, 1979: 52-58.  
Liu Guangya. *Groundwater in Bedrock* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1979: 52-58(in Chinese).

- [19] 赵璐, 鄢立, 罗湘赣. 贵阳市乌当区地热田成因及水质特征分析[J]. 中国地质, 2011, 38(3): 724–730.  
Zhao Lu, Wu Li, Luo Xianggan. An analysis of the genesis and water quality characteristics of the geothermal field in Wudang District, Guiyang[J]. Geology in China, 2011, 38(3): 724–730(in Chinese with English abstract).
- [20] 沈照理, 朱宛华, 钟佐燦. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 71.  
Shen Zhaoli, Zhu Yuanhua, Zhong Zuocan. Hydrogeochemistry Base[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 71(in Chinese).
- [21] 钱会, 马致远. 水文地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 124–133.  
Qianhui, Ma Zhiyuan. Hydrogeochemical [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005: 124–133(in Chinese).

## Temperature distribution and controlling factors of the Tangquan geothermal field in Hebei Province

LI Gong-ke<sup>1</sup>, WANG Wei-xing<sup>1</sup>, LI Hong<sup>1</sup>,  
YANG Feng-tian<sup>2</sup>, WANG Lin-hai<sup>1</sup>, FANG Wan-ling<sup>1</sup>

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

**Abstract:** Located in the northwest of Zunhua City of Hebei Province, Tangquan is characterized by hilly landscape and rich geothermal resources. In this paper, the authors studied the borehole data of many bedrock thermal wells (water wells) in the study area, and investigated the distribution characteristics and controlling factors of the geothermal field. The results show that borehole temperature is significantly affected by groundwater flow, and the vast majority of temperature wells are characterized by convective heat transfer, with a few temperature wells characterized dominantly by heat transfer conduction. The geothermal anomaly center of the study area is located in the area from Tangquan Fuquan Palace to the sanatorium, and the anomaly center exhibits bipolar distribution; the temperature of water at the depth of 50m in the geothermal anomaly center is about 51~54°C, and that at the depth of 100m is up to 60~67°C. The geothermal water of the geothermal system is caused by gradual heating action of surrounding rocks under the normal heat flow background in the process of deep circulation of groundwater. The water storage structure from Fuquan Palace to the sanitarium is formed by a buried basin with granite confining floor. Because faults cut through monolithic granite body, and cause the upward migration of the heat flux of the deep rock along the fault, whereas the heat flux is mixed with fissure water of the gneisses and is concentrated in the area from Fuquan Palace to the sanatorium. Because the gneiss fractures the aquifer in Fuquan Palace area and sanitarium area, the deep heat can quickly reach the shallow strata and give rise to local abnormal high temperature in the shallow part. The geothermal fluid belongs to continental sedimentary water that is formed in the strata with dissolved salt brine, and is mainly derived from meteoric water.

**Key words:** Tangquan of Hebei Province; geothermal field; distribution of geothermal field; controlling factors

**About the first author:** LI Gong-ke, male, born in 1982, engineer, engages in the study of the application of hydrogeology and applied geochemistry; E-mail: 81586678@qq.com.