



为主,半固结。厚70~350 m。

(6)第四系:区内第四系较发育,黄河两岸及以北地带为黄河冲积层。地层由南而北渐厚,从南部山前地带几米到几十米至北部达290 m左右。

## 1.2 构造

济南北部地热田位于鲁西隆起的西北部,北临济阳拗陷,处于鲁西系的北翼,地层南老北新,总体为向N缓倾的单斜构造,褶皱构造不甚发育。济南以北的齐河—广饶隐伏大断裂控制了济南地区的构造格局。齐广断裂以南主要发育2组断裂,一组呈NNE向,一组呈NNW向,它们纵横交错,均归属于鲁西系外旋回层的伴生构造。

## 1.3 岩浆岩

济南地区岩浆活动较为强烈,主要发生在印支期。济南岩体分布于济南市区及近郊一带,绝大部分已被第四系覆盖。济南岩体的存在对济南地热的形成具有重要的作用:①阻挡了南部大量冷水向北径流,对北部地热水水温的保持起到了重要作用。②迫使南部一部分岩溶水向地下深处循环,起到增加水温的作用。③由于岩体向上侵入,使上部地层抬升,热储埋藏变浅,形成浅部地热异常,更适合开采。在岩体侵入后冷凝过程中产生一系列围岩裂隙,同时在压应力作用下使含水层裂隙发育,有利于热水的对流、传导和储存。④岩浆侵入体带来大量可溶性物质组分,使地热水获得特殊的微量元素,对形成医疗热矿水具有重要意义。

## 2 地热地质条件

纵观济南北部地热田自下而上的各含水层系,考虑成热条件、埋藏条件等因素,结合以往地热井热储层的揭露情况。区内奥陶系石灰岩含水岩层为最佳层状热储,这是因为:①济南北部地热田奥陶系石灰岩顶板埋深一般700~2500 m,埋藏深度较为适宜开采;②奥陶系热储上覆有较厚的第四系、新近系、石炭系、二叠系、侏罗系作保温盖层,有利于地热资源的温度保持;③据已有地热井显示,地热田地热水体水位埋深较浅、出水量大、温度高、水质较好;④奥陶系石灰岩热储分布范围广,厚度大。

### 2.1 热储层埋藏条件

奥陶系灰岩埋藏在区域N倾单斜构造的背景下,总体由南而北逐渐深埋。地热田受断裂控制,将

其分割成几十个小区块,但奥陶系灰岩顶板埋深在横向上差异不大。地热田西部有CK<sub>1-0</sub>、济北<sub>1</sub>、齐热<sub>1</sub>地热井NW向排列,相距约3 km,热储顶界埋深分别为194 m,763 m,1306 m;地热田中部奥陶系顶界埋深由南而北逐渐增加,由“灰岩条带”上200 m左右向北至济古<sub>1</sub>井为832 m,至齐广断裂达3000 m左右;地热田东部以近EW向断裂为主,该区现有地热井7眼,主要位于桃园—鸭旺口一带,热储顶界埋深大部分小于2000 m,但受断裂控制局部埋深差异较大,如坝子村DR<sub>2</sub>井与桃<sub>2</sub>井相距不足600 m,奥灰埋深分别为293 m和413 m,鸭旺口一带奥灰顶界埋深在500~700 m之间。

### 2.2 热储层物性特征

区内热储层岩性以厚层石灰岩为主,其间夹有泥岩、白云质灰岩等。石灰岩上部岩溶较为发育,向下发育程度逐渐变弱,甚至不发育。以东部鸭旺口YK<sub>2</sub>为例,奥陶系灰岩顶板埋深为537.20 m,上部岩性主要为灰色石灰岩,性脆,坚硬,局部夹薄层泥质灰岩,545~580 m段岩溶裂隙发育,下部岩性复杂,主要有灰白色泥质灰岩、灰色或灰绿色辉长岩、灰白色大理岩、灰色石灰岩,699.45~704.15 m,716.50~738.64 m这2段的大理岩见有溶孔,但发育较差,钻孔未揭穿奥陶系。西部焦斌一带,齐热<sub>1</sub>孔奥陶系灰岩顶板埋深1306.53 m,岩性主要为青灰色厚层质纯灰岩,致密,坚硬,性脆,其次为浅灰色白云质灰岩,局部夹有泥灰岩。在钻探过程中,1371~1380 m漏浆2 m<sup>3</sup>,奥陶纪马家沟组四段与五段之间的层间岩溶发育;1497~1503 m漏浆1.5 m<sup>3</sup>,四段层内岩溶发育,在钻至1503 m时进行了1次抽水试验,水量73 m<sup>3</sup>/d,水温53℃,水量较小,继续钻进至1601 m时,漏浆严重,无泥浆反至孔口,为断层破碎带。根据区内已有地热钻孔资料的统计,热储层的孔隙度一般在4%~7%。据抽水试验计算结果:东部地区热储层渗透系数0.745~4.75 m/d,导水系数73.47~640.16 m<sup>2</sup>/d;西部地区热储层渗透系数0.612~5.75 m/d,导水系数150~767.29 m<sup>2</sup>/d。

### 2.3 热储层电性特征与富水特征

#### 2.3.1 热储层电性特征

通过济南北部地热田进行的可控源音频大地电磁测深与大地电磁测深工作,归纳热储层的电性特

征为:①深大断裂在热储层之下有低阻反映属于控热构造;②在热储层面以下视电阻率低说明热储层的富水性和导水性好。

在济阳地热井进行的大地电磁测深试验点资料显示,水量很小或无水的地热井在 MT 剖面的低阻特征不明显。但是,MT 资料对断层的反应比较明显,说明断层不都是控热构造,只有在热储层以下表现为低阻时,断层才是控热构造;热储层以下无低阻反应说明地下热水量不大。

### 2.3.2 热储层的富水性特征

根据区内齐河地热井、鸭旺口地热井、济阳地热井及济古<sub>1</sub>孔的可控源音频大地电磁测深资料分析,一般测深曲线达到热储层深度时表现出低阻异常,极小值较低时,说明热储层富水性、导水性好。

## 2.4 地温场特征

### 2.4.1 地温场平面变化特征

济南北部地热田地温梯度变化与基底构造关系密切,总体随奥陶系石灰岩热储埋深的增加而减小;地热田内的地温梯度大致可以分为3个带:①地温梯度大于 $4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 带,该条带分布在济南岩体北侧灰岩条带上,大致呈近EW向带状展布;②地温梯度 $3.5\sim 4.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 带,大致分布在地热田中部奥陶系灰岩顶界埋深 $< 2000\text{m}$ 的区域;③地温梯度小于 $3.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 带,该地带奥陶系石灰岩顶界埋深一般 $> 2000\text{m}$ ,分布在地热田的北部、东北部。

### 2.4.2 地温场纵向变化特征

图2为北林<sub>1</sub>孔揭露热储后的测温曲线,该曲线在新近系和二叠系中较平滑,进入热储后温度突然增高 $3.0^{\circ}\text{C}$ ,该孔地温梯度为 $3.66^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。地温温度突变,表明盖层和热储层导热及储热功能有明显区别,热储内因导热能力强,地温梯度明显降低。

## 2.5 地热流体动态特征

利用西部CK<sub>1-10</sub>(热水井)-J<sub>40</sub>(岩溶冷水井)分析地热田地热水动态特征(图3)。CK<sub>1-10</sub>孔位于岩体北侧的油房赵,J<sub>40</sub>孔位于岩体南侧段店附近,两孔相距约14 km,从水位动态曲线分析,水位变化规律基本一致,只是地热水最高水位变幅小于冷水1~2 m,最低水位出现时间滞后冷水15 d左右,且热水曲线较冷水平滑。说明济南北部地热田地热流体的补给来源同样受南部山区大气降水影响,岩体以北地热水与济南市区岩溶冷水有相同的补给来源。

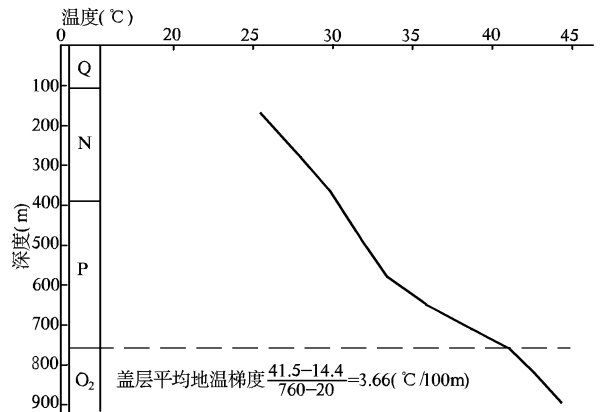


图2 济南北部地热田北林<sub>1</sub>地热井测温曲线图

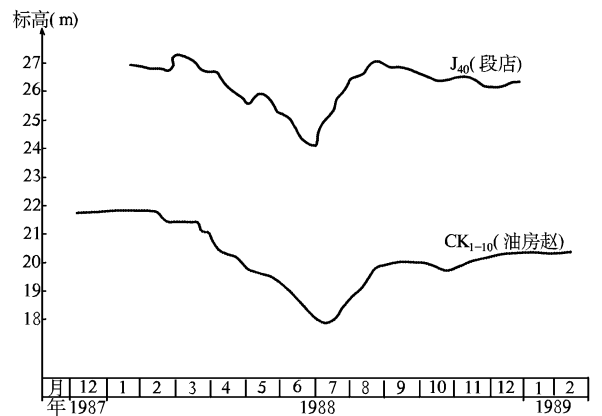


图3 济南辉长岩体南部岩溶水与北部热水水位动态对比曲线图

## 3 地热水水化学特征

根据地热田地热水多年水质资料,地下热水中阴离子、阳离子含量和矿化度、总硬度总体变化不大。其中 $\text{Cl}^-$ , $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ , $\text{Mg}^{2+}$ 等成分含量基本没有发生变化,而 $\text{Ca}^{2+}$ 含量总体呈递减趋势, $\text{HCO}_3^-$ 含量变化较大,但无递增或递减趋势。

### 3.1 水化学一般特征

地热田地下热水中矿化度由东向西呈现递减趋势,水化学类型由 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4 - \text{Na}\cdot\text{Ca}$ , $\text{SO}_4\cdot\text{Cl} - \text{Ca}\cdot\text{Na}$ , $\text{SO}_4 - \text{Ca}$ 型依次变化,表明东部受东侧白垩系阻挡地下水处于较封闭的环境中,热水与现代水循环交替条件较差,地热水溶解了大量围岩中的化学成分;西部地段地下热水与现代水循环交替条件较东部强烈,尤其是位于奥陶系灰岩条带上,各项常规离子含量处于一个较低的水平。

### 3.2 地热水微量元素特征

济南北部地热田地热水中含有多种对人体健康有益的微量元素和组分,氟、锶、偏硅酸、偏硼酸均有不同程度的富集。对照《医疗热矿水水质标准》,YK<sub>2</sub>、YK<sub>3</sub>、钢热<sub>1</sub>、桃<sub>1</sub>、桃<sub>2</sub>、齐热<sub>1</sub>、北林<sub>1</sub>7眼地热井中的氟、锶含量达到命名矿水浓度,分别命名为氟水和锶水,这些井的偏硅酸含量和鸭旺口YK<sub>2</sub>、YK<sub>3</sub>、钢热<sub>1</sub>地热井中的偏硼酸含量达到矿水浓度,桃<sub>1</sub>、桃<sub>2</sub>、齐热<sub>1</sub>、北林<sub>1</sub>地热井水偏硼酸含量达到有医疗价值浓度。CK<sub>1-0</sub>地热井中氟、锶、偏硼酸等含量达到医疗价值浓度,偏硅酸含量达到矿水浓度。

### 3.3 地热水放射性元素特征

地热田地下热水中放射性元素含量较大,且由东向西放射性含量基本呈现减小的趋势。地热田地热水中镭的含量为 $1.25 \times 10^{-12} \sim 4.30 \times 10^{-11}$  g/L,经换算,均属于弱放射性水。

### 3.4 地热水氢氧同位素特征

地下水的稳定同位素组成特征,通常用 $\delta D - \delta^{18}O$ 相关图来表示。图4中直线为北半球现代大气降水线,其表达式为: $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ ,它表明北半球现代大气降水的同位素组成点应大致沿这条直线分布。由图4可以看出,地热田的 $\delta^{18}O$ 为 $-9.2 \sim -10.1$ , $\delta D$ 为 $-6.3 \sim -7.6$ ,均分布在直线的附近,说明该地热水主要为大气降水成因,通过深循环在地温作用下加热而形成的<sup>[1]</sup>。

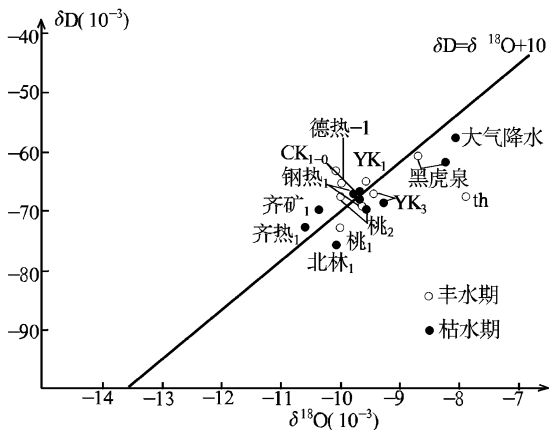


图4 济南北部地热田 $\delta D - \delta^{18}O$ 关系曲线图

为表示某水样同位素对现代大气降水的偏离程度,又引入 $d$ 的概念( $d = \delta D - \delta^{18}O$ )。当 $d < +10\%$ ,表明为正常大气降水;当 $d < -10\%$ 时,表明干热气

候条件下(蒸发浓缩)的降水;当 $d > +10\%$ 时,表明是与现今不同气候条件下的降水<sup>[2]</sup>。地热田地热水的 $d$ 值均小于 $10\%$ ,因此可以判定区内的地下热水为现代大气降水来源,说明现代大气降水为济南北部地热田地下热水的主要补给来源。

据法国J. ch. 丰特的经验估算法认为: $0 \sim 5$  TU(氚单位)为40年以前的“古水”成分占优势; $5 \sim 40$  TU表示新近的入渗水和“古水”之间的混合水; $>40$  TU表明新近入渗水占优势。地热水的 $T$ 值一般都 $>5$  TU  $< 15$  TU,这说明该区地下热水均为新近的入渗水和“古水”混合形成的混合水。这些 $T$ 值处于 $5 \sim 40$  TU区间,但偏向最小值5 TU,说明地下热水中40年前的“古水”占优势,新近入渗水的补给量较少。

## 4 可采地热资源评价

济南地区奥陶系分布面积广阔,济南北部地热田奥陶系热储只是其中的一部分,为深埋型层状热储,目前地热田热水水头高度一般高出地面近10 m,地热井的开采量只是消耗部分弹性储存量。根据区域水文地质条件,该地热田奥陶系热水的补给来源主要为南部岩溶裂隙水。热水开采资源量由2部分组成:一部分为消耗热储层自身的部分弹性储存量,另一部分为南部岩溶裂隙水的径流补给量。

参照区内已有地热井实际单井涌水量,设计单井开采量为 $2000 \text{ m}^3/\text{d}$ ,开采服务年限100年,最大允许降深50 m,各计算区降深50 m弹性储存量计算如下:

(1)南部径流补给量计算。采用断面法进行计算,初步确定2个过水断面,根据多年来地下水水温动态资料,东部过水断面的水力坡度为 $1.48/4000$ ;断面长度为14 km;西部过水断面的水力坡度为 $2.31/16500$ ;断面长度为34 km。过水断面厚度取200 m;渗透系数为 $2.63 \text{ m/d}$ 。当地热田开采至100年末水位降深达到50 m时,过水断面的水力坡度将发生变化。根据起始水力坡度与100年末水力坡度计算年平均补给量。由此计算平均补给量为 $76297.7 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

(2)可采资源量计算。各计算区可采资源量由弹性储存量和南部径流补给量两部分组成,最终计算可采热水资源量为 $79377 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

(3)可布井数。利用设计的单井开采量  $2\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$  进行平均布井。开采期限为 100 年,济南北部地热田地下热水可采资源量为  $79\ 377\ \text{m}^3/\text{d}$ ,可布井数 39 眼,合理井间距为  $5\ 000\ \text{m}$ 。

## 5 地热流体腐蚀性评价

2004 年 8 月 24 日,利用齐热<sub>1</sub> 地热井水进行了腐蚀性试验工作。在现场对水中部分易变成分进行了现场测试(水中易变的成分为溶解氧、硫化物、游离二氧化碳、侵蚀性二氧化碳等成分),对水中在现场不易测试的易变组分经过固定后带回实验室分析,得出如下结论:①该井水的腐蚀性不严重,一般属于轻度腐蚀。建议在地热水开采利用时,最好在

管道上设一个挂片口,以便能及时、真实地了解现场的腐蚀动态,进而为是否采取相应的防腐措施提供科学依据。②该水不会形成碳酸钙垢。③该水可产生少量硫酸钡垢。④当水的压力低于  $0.3\ \text{MPa}$ ,水温高于  $54\ ^\circ\text{C}$  左右时亦可有少量硫酸锶垢生成。⑤该水能形成  $\text{FeS}$  垢。

## 参考文献:

- [1] 郑永飞,陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京:科学出版社,2000,150-153.
- [2] 张人权. 同位素方法在水文地质学中的应用[M]. 北京:地质出版社,1978,8-13.

# Analysis on Geological Characteristics of Geothermal Field in North Part of Jinan City

LI Chang - suo<sup>1</sup>, YANG lei<sup>2</sup>, GAO Wei - xin<sup>1</sup>, WANG Shao - juan<sup>1</sup>

(1. Shandong Geo - engineering Exploration Institute, Shandong Jinan 250014, China; 2. Laizhou Bureau of Land and Resources, Shandong Laizhou 261400, China)

**Abstract:** Geothermal field in north of Jinan city belongs to layered fractured karst type, and heat conduction in north of Qihe - Guangrao fault is its heat source. Quaternary, early Tertiary, Carboniferous - Permian and the Jurassic period are its covering layers. Ordovician limestone thermal reservoir is valuable thermal reservoir. Its thickness gradually increases from south to north, and the top of thermal reservoir buried in  $700 \sim 2500\ \text{m}$  deep under the ground. Single well amount of water flow is  $2000\ \text{m}^3$ , and temperature of water in hole top is  $38 \sim 57\ ^\circ\text{C}$ . Mineralization degree of hot water in east of the geothermal field is about  $1.4 \sim 3.5\ \text{g/L}$ , while it is about  $5.1 \sim 7.2\ \text{g/L}$  in the west part. Hot water contains abundant microelements, such as F, Sr, silicic acid and so on with corrosion character and weak incrustation characteristics. It has good exploitation value. It is measured that single well workable reserve in Ordovician thermal reservoir is  $7.3 \times 10^5\ \text{m}^3/\text{y}$ , and reasonable distance between wells is  $5000\ \text{m}$ .

**Key word:** Geothermal; geological characteristics; Ordovician limestone; thermal reservoir; north of Jinan city