

# 北京市平原区北部孙河断裂的地热地质特征

柯柏林<sup>1,2</sup>

(1. 北京市地质勘察技术院, 北京 102218; 2. 北京市华清地热开发有限责任公司, 北京 102218)

**摘要:** 依据北京孙河断裂区的重力、电阻率测深及可控源音频大地电磁测深(CSAMT)等勘查资料的推断解释, 结合多眼地热井钻探揭露的地热地质成果, 认为孙河断裂是一条宽3 km左右的断裂带。地热地质构造剖面揭示孙河断裂具有多期活动性, 晚侏罗世以来至少发生过两期先逆后张性质的构造活动。剖析了孙河断裂对后沙峪地热田侏罗系火山岩构造裂隙热储地热地质条件的控制作用, 进一步分析了孙河断裂带区域的地热地质条件, 认为后沙峪地热田西南部是构造凸起型热储构造, 北西向延伸的孙河断裂带区域是后沙峪地热田的地热资源富集区。

**关键词:** 孙河断裂; 侏罗系火山岩; 构造裂隙; 热储; 地热地质

**中图分类号:** P641.5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-8527(2009)01-0043-06

## Geothermal and Geological Features of Sunhe Fault in the Northern Part of Beijing Plain

KE Bai-lin<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Institute of Geo-Exploration and Technology, Beijing 102218, China;

2. Beijing Huaqing Geothermal Exploitation Company Ltd, Beijing 102218, China)

**Abstract:** This paper presents that Sunhe fault in Beijing plain is a buried active normal fault zone about 3 km wide based on the analysis of gravity, resistivity and CSAMT (controlled source audio-frequency magnetotelluric) data and some exploration data of geothermal wells. Geothermal and geological structure profiles reveal that Sunhe fault is of multi-phase activities and has twice tectonic activities at least since Late Jurassic. This paper also analyzes the control effect of fractures in Sunhe fault zone on the geothermal and geological condition of the Jurassic volcanic rocks; it points out that the southwest of the Houshayu geothermal field is located at a tectonic uplift, and Sunhe fault zone is the geothermal source of the geothermal field.

**Key words:** Sunhe fault; Jurassic volcanic rock; structural crack; geothermal reservoir; geothermal geology

## 0 引言

北京市分布有较为丰富的地热资源<sup>[1-3]</sup>, 在平原区基岩中地下热水的分布明显受断裂的控制。自物探、钻探资料及地质分析反映北京南口至孙河两地确定有一条北西向断裂以来, 由于该断裂大部分隐伏于平原区新生界地层之下, 一直到现在很多地质工作者及文献资料都将该断裂称为南

口—孙河断裂<sup>[4-5]</sup>。1983年田世义<sup>②</sup>根据电阻率测深资料认为南口—孙河断裂是一条不连续的断裂, 将南口—孙河断裂解体为南口断裂和孙河断裂。1986年杨松筠<sup>③</sup>根据重力勘探资料进一步确定了南口断裂和孙河断裂的展布位置。现在普遍认为南口断裂和孙河断裂共同构成南口—孙河断裂带。孙河断裂是首都圈平原区一条重要的隐伏活动断裂, 其地震活动性受到广泛关注。近年来,

收稿日期: 2008-04-08; 改回日期: 2008-11-20; 责任编辑: 潘令枝。

作者简介: 柯柏林, 男, 高级工程师, 1965年出生, 地质学专业, 主要从事水文地质及地热资源勘查和研究工作。

Email: kebailin@sina.com。

① 北京市地质局水文地质工程地质大队。北京平原区基岩地质构造图说明书。北京市地质局水文地质工程地质大队, 1979。

② 田世义。北京平原区电测深区域调查工作阶段报告(1:50 000沙河幅)。北京市地质矿产勘查开发局物探与化探队, 1983。

③ 杨松筠。北京平原区重力编图报告。北京市地质矿产勘查开发局物探与化探队, 1986。

伴随着地热资源的勘探，在孙河断裂区域进行了多项可控源音频大地电磁测深(CSAMT)和数眼地热钻井等勘查工作，进一步提高了对孙河断裂特征的认识。

### 1 孙河断裂的特征

#### 1.1 区域地质特征

孙河断裂区域上大致沿孙河镇至沙子营村一线展布，该断裂是后沙峪凹陷与来广营凸起两个构造单元的分界线。断裂走向NW—SE，倾向NE。断裂的北东盘第四纪以来表现为强烈断陷，第四系厚度1 000 m左右，断裂南西盘第四系厚度仅200~500 m。孙河断裂西端切断了黄庄—高丽营断裂，东端切断了顺义断裂(图1)。孙河断裂上、下盘第四系下伏地层为上侏罗统。

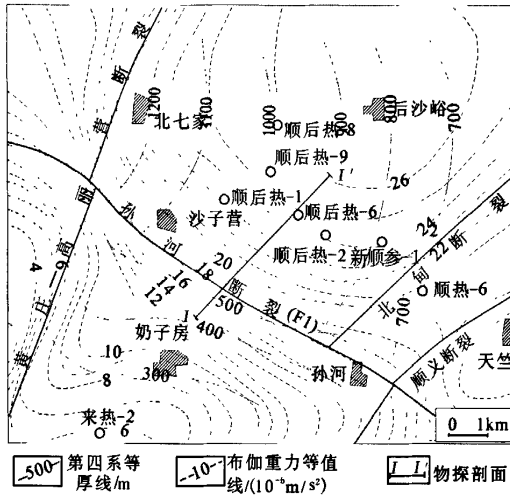


图1 孙河断裂区域布伽重力等值线及地质构造略图  
Fig.1 Contour map showing Buga gravity and geological structure of Sunhe fault zone

#### 1.2 地球物理特征

##### 1.2.1 重力特征

在研究区的布伽重力等值线平面图(图1)上，布伽重力值总体由西南向东北降低，后沙峪一带为重力低值区，最低值 $-26 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ，钻孔揭露表明，后沙峪区域为第四纪沉积凹陷，第四系厚度1 000 m左右。

沙子营—孙河一线为2~3 km宽的布伽重力等值线密集带(图1)，该密集带是孙河断裂的反映。从重力密集带影响范围分析，孙河断裂并非由一条断裂构成，应是由多条断裂组成的一条断裂构造带。

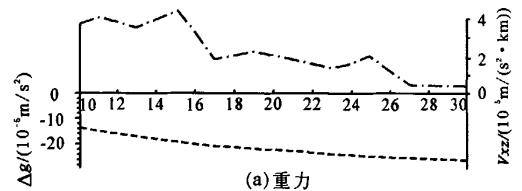
重力水平梯度曲线上10—26号点之间出现了较宽的重力梯度异常，其中10—16号点最高重力梯度值达 $4.5 \times 10^{-5} \text{ m/(s}^2 \cdot \text{km)}$ (图2(a))。从异常强度上分析，10—16号点区域为孙河断裂构造带西南端与来广营凸起分界的主干断裂(图2(b)中F1)。16—26号点区域的重力水平梯度也显示有次级断裂的存在。

##### 1.2.2 电阻率测深特征

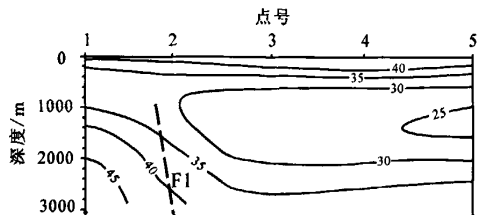
电阻率等值线断面图中1—2号点区域呈等值线密集带，该密集带的位置与重力水平梯度最高值点相对应。1—2号点区域为孙河断裂带西南端与来广营凸起分界主干断裂(F1)的显示(图2(b))。

##### 1.2.3 可控源音频大地电磁测深特征

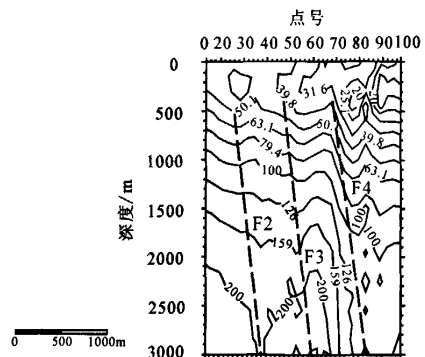
从可控源音频大地电磁测深剖面图(图2(c))上看，横向上视电阻率曲线有一定的起伏变化，剖面的20—30号、50—60号及70—80号点区域



(a)重力



(b)电阻率测深断面图



(c)CSAMT反演电阻率断面图

图2 孙河断裂综合物探剖面解释图(电阻率单位: Ω·m)  
Fig.2 Integrated geophysical profiles of Sunhe fault

均出现了视电阻率曲线的弯曲台阶，并且与重力水平梯度高值区比较吻合，因此推断解释为孙河断裂的次级断裂(F2、F3、F4)的反映(图 2(c))。

1.2.4 综合分析

从上述孙河断裂的重力、电阻率测深及可控源音频大地电磁测深综合特征来看，孙河断裂实际表现为一条断裂带，现有资料可初步识别出 4 条断裂(F1、F2、F3、F4)，断裂带宽度约 3 km 左右。F1 是后沙峪凹陷与来广营凸起构造单元的分界断裂，为主干断裂。F2、F3、F4 为次级断裂，分布于后沙峪凹陷内，呈阶梯状特征，对第四系的沉积厚度有控制作用。

1.3 孙河断裂的多期活动性

近几年，为了解深层地热资源，在孙河断裂带两侧钻探了数眼地热井，最深的来热-2 地热井 4 051 m，基本揭示了其深部的地质构造条件(图 3)。从图 3 中反映的地层接触关系可以看出，断裂上盘时代老的地层(C—P、O— $\epsilon$ 、Qn)盖在了下盘时代新的地层(J<sub>3</sub>、C—P、O)之上，说明孙河断裂晚侏罗世后的构造活动为逆掩性质，上盘上升强烈。断裂上、下盘地层厚度对比，晚侏罗世—第三纪时期上盘上侏罗统(J<sub>3</sub>)地层遭受强烈

剥蚀至少 2 000 m。第四纪时期孙河断裂又继承早期断面活动表现为张性，上盘累计下降幅度达千米左右。晚侏罗世以来，孙河断裂至少有两期大的性质相反的构造活动。

地热井揭示上盘石炭系—二叠系和奥陶系—寒武系地层层位明显不全，地层层位对比说明石炭系与奥陶系普遍呈断层接触关系，奥陶系与寒武系内或二者之间也有断层接触。综合分析孙河断裂上盘发育有数条次级断裂构造，造成地层岩石中的构造裂隙非常发育。

2 孙河断裂的地热地质特征

2.1 导热作用

南口—孙河断裂带在第四纪时期存在强烈的活动，对后沙峪第四纪凹陷具有重要的控制作用。该断裂带晚更新世(60 ka)以来表现为多期活动特征<sup>[6]</sup>。黄庄—高丽营断裂是一条深大断裂，1978 年国家地震局地质研究所研究认为该断裂断至上地幔的第一个界面，断深约 50 km。近期研究<sup>[7]</sup>认为，黄庄—高丽营断裂错断了全部第四系地层，断裂面直达地表，具有多期活动的特点，该断裂晚近期常发生小地震活动。黄庄—高丽营断裂沟

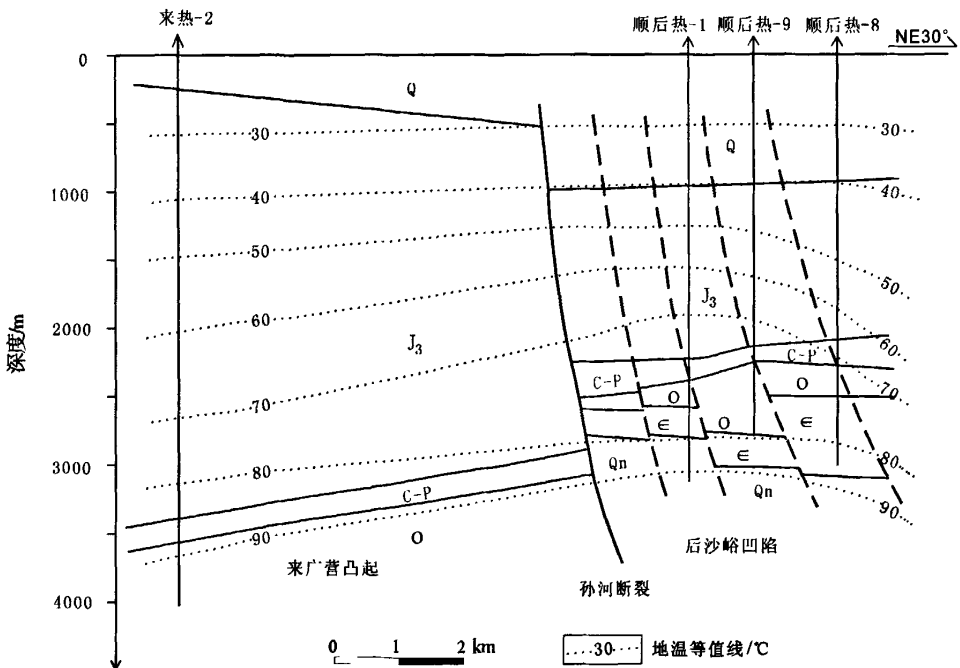


图 3 孙河断裂区域地热地质剖面图

Fig. 3 Geothermal geological profile of Sunhe fault zone

Q. 第四系; J<sub>3</sub>. 中生界上侏罗统; C—P. 石炭系—二叠系; O. 奥陶系;  $\epsilon$ . 寒武系; Qn. 上古界青白口系

通了上地幔热源,是北京平原区重要的导热构造。孙河断裂错断了黄庄—高丽营断裂,与其形成了良好的热流沟通,因此,孙河断裂也具有有良好的导热性能,成为后沙峪地热田的重要导热通道。经5眼地热井统计,本区各时代地层平均地温梯度第四系为2.54℃/hm、侏罗系2.59℃/hm、石炭系—二叠系1.62℃/hm、奥陶系—寒武系1.72℃/hm、青白口系4.70℃/hm,与北京平原区地层的平均地温梯度对比,该区侏罗系、奥陶系—寒武系、青白口系地温梯度明显偏高(表1)。

表1 孙河断裂区域地温梯度对比  
Table 1 Contrast of temperature gradients of Sunhe fault zone

区块	地温梯度/(℃/hm)				
	Q	J	C—P	O— $\epsilon$	Qn
后沙峪	2.54	2.59	1.62	1.72	4.70
北京平原	3.00	1.80	2.00	1.00	2.30

从图3中的地温特征可以看出,地温等值线在孙河断裂带部位呈向上增高凸起,向两侧地温逐渐降低,地温最高点在顺后热-1地热井部位。其原因是孙河断裂带高热导率的奥陶系、寒武系和青白口系碳酸盐岩较两侧相对呈构造凸起,深部热流在沿孙河断裂向浅部传导运移过程中,热流趋于向凸起部位聚集,凸起部位发育次级断裂构造更有利于热流的传导。这一特征在京津唐地区构造凸起地热田具有普遍的规律,地温场在凹中凸起部位高,凹陷部位相对低<sup>[8-11]</sup>。

## 2.2 对侏罗系火山岩裂隙热储的控制作用

孙河断裂区域第四系下伏地层为侏罗系,岩性主要为火山岩类。钻孔揭露侏罗系厚度1066~1830m,层底深度2115~2746m。从物探资料和钻孔资料反映,孙河断裂及其影响带宽度达3~4km,致使侏罗系火山岩地层断裂构造裂隙非常发育,地热井钻进过程中出现钻井液大量向裂隙发育地层中漏失(表2)。地热井的产能测试表明,该区侏罗系火山岩地层孔隙度高,储水和渗透条件好。顺后热-2地热井946~2327m井段地球物理测井解释富水层19层,厚度115m,声波孔隙度3.8%~19.5%,储集层系数8.3%。顺热-6地热井1701~2812m井段测井解释富水层38层,厚度238m,声波孔隙度2.9%~18.4%,储

集层系数20.9%。以上两个地热井的孔隙度和储集层系数表明了本区侏罗系火山岩构造裂隙发育,同时具有裂隙发育的不均一性。

表2 孙河断裂区域侏罗系火山岩钻井液漏失情况  
Table 2 Leakage of drilling fluids in Jurassic volcanic rocks of Sunhe fault zone

井号	裂隙发育段/层数(厚度)	漏失量/m <sup>3</sup>
顺后热-1	1860~1944 m/2层(15 m)	20
顺后热-2	2350~2591 m/7层(21 m)	70
顺后热-6	1940~2210 m/3层(50 m)	40
顺后热-8	1290~1914 m/22层(198 m)	213
顺后热-9	1164~1936 m/13层(155 m)	180
顺热-8	738~2193 m/23层(120 m)	185
新顺参-1	1870 m	强漏塌孔

## 2.3 后沙峪地热田的特征

### 2.3.1 地热地质特征

后沙峪地热田是北京10个地热田之一<sup>[11]</sup>,同时又是北京地区唯一发育侏罗系火山岩断裂构造裂隙热储的地热田<sup>④⑤⑥</sup>。地热田西南部处于孙河断裂带区域,地热井揭露的地层有新生界第四系(Q)、中生界上侏罗统(J<sub>3</sub>)、古生界石炭系—二叠系(C—P)、奥陶系(O)、寒武系( $\epsilon$ )及上元古界青白口系(Qn),地热井的地热地质特征见表3。第四系岩性为粘土、砂、砂砾,侏罗系岩性主要为安山岩、安山质角砾岩、凝灰质砂岩、粉砂岩,石炭系—二叠系岩性主要为石英砂岩、砂岩、粉砂岩、碳质泥(页)岩、煤岩,奥陶系岩性主要为灰岩、白云岩,寒武系岩性主要为泥质灰岩、鲕粒灰岩、页岩,青白口系岩性主要为泥灰岩、石英砂岩、页岩。

从表3地热井揭露的地层厚度可以看出,石炭系—二叠系、奥陶系—寒武系地层的厚度较正常沉积厚度明显变薄,并且岩石地层单位有缺失,而北京地区的沉积相比较稳定,可以确定孙河断裂构造带的构造运动是造成该区地热井缺失地层的原因,反映出次级张性断层构造发育。在孙河断裂带区域的地热井,侏罗系火山岩地层均发育断裂构造裂隙,钻井液出现大量漏失。顺后热-2和顺后热-6地热井完全以火山岩构造裂隙地层为含水层,涌水量达1840~1965m<sup>3</sup>/d,单位涌水量为18.2~58.8m<sup>3</sup>/(d·m)。顺后热-8和顺后热

④ 阮起和.北京市顺义区后沙峪顺后热-1地热井成井报告.北京市地质勘察技术院,1999.

⑤ 柯柏林,赵连海.北京市顺义区后沙峪顺后热-2地热井成井报告.北京市华清地热开发有限责任公司,2002.

⑥ 柯柏林,温泽涛.北京市顺义区后沙峪英才国际村(顺后热-6)地热勘查报告.北京市华清地热开发有限责任公司,2005.

表 3 孙河断裂区域地热井地热地质特征  
Table 3 Geothermal geological features of geothermal wells in Sunhe fault zone

井号	层底深度或孔深/m					热储深度/m	热储地层及岩性	地下水类型	涌水量/(m <sup>3</sup> /d)	水温/℃
	Q	J	C-P	O-E	Qn					
顺后热-1	1 000	2 246	2 380	2 780	3 121	1 859~1 944 2 375~2 780	J安山岩 O、E 碳酸盐岩	裂隙水 岩溶水	686	70
顺后热-2	916	2 746	2 919			2 319~2 746	J安山岩	裂隙水	1 965	75
顺后热-6	984	2 276	2 722			1 938~2 276	J安山岩	裂隙水	1 840	66
顺后热-8	949	2 115	2 316	3 002		2 413~2 905	O、E 碳酸盐岩	岩溶水	1 368	70
顺后热-9	1 001	2 149	2 247	2 804		2 278~2 804	O 碳酸盐岩	岩溶水	1 538	78
顺热-6	633	2 839				1 530~1 702	J安山岩	裂隙水	530	43
新顺参-1	740	1 870					J安山岩	裂隙水	未成井	

表 4 孙河断裂地热水特征化学成分含量表  
Table 4 Chemical compositions of thermal groundwater in Sunhe fault zone

井号	$\rho_B/(mg/l)$										pH 值	水化学类型	
	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> +CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	F <sup>-</sup>	偏硅酸	偏硼酸	矿化度			总硬度
顺后热-1	283	56	10.0	203	129	397	8	46	6	1 092	181	7.2	SO <sub>4</sub> -Na
顺后热-2	313	15	1.0	58	191	332	6	70	5	917	39	9.1	SO <sub>4</sub> ·Cl-Na
顺后热-6	319	31	0.4	61	200	401	5	50	2	1 020	78	8.4	SO <sub>4</sub> ·Cl-Na
顺热-6	277	26	1.0	85	135	357	5	37	3	886	69	8.4	SO <sub>4</sub> ·Cl-Na
顺后热-9	339	106	24.0	348	114	546	6	84	9	1 490	364	7.4	SO <sub>4</sub> ·HCO <sub>3</sub> -Na·Ca

注：总硬度以 CaCO<sub>3</sub> 计算。

-9 地热井以奥陶系、寒武系碳酸盐岩岩溶裂隙层为含水层，涌水量 1 368~1 538 m<sup>3</sup>/d，单位涌水量 13.5~21.1 m<sup>3</sup>/(d·m)。顺后热-1 和顺热-6 为下套管后射孔成井，受成井工艺的影响，涌水量相对较低，不能完全反映实际水文地质条件。从地热田目前地热井的产能状况看，火山岩构造裂隙含水层较碳酸盐岩岩溶裂隙含水层的富水性要强一些。

2.3.2 地热水地球化学特征

后沙峪地热田地热水的化学成分见表 4。与北京其他地热田的地热水比较，后沙峪地热田具有高矿化度、高硫酸盐和高氯化物特征，偏硼酸含量也较高。热矿水类型主要为氟、偏硅酸型(图 4)。侏罗系火山岩裂隙水为 SO<sub>4</sub>·Cl-Na 水型，为高 pH 值的碱性水；奥陶系、寒武系碳酸盐岩岩溶水为 SO<sub>4</sub>·HCO<sub>3</sub>-Na·Ca 水型，为弱碱性水；顺后热-1 地热井是火山岩与碳酸盐岩的混合取水井，为 SO<sub>4</sub>-Na 水型。地热水的水型差异表明，火山岩裂隙水富集氯离子(Cl<sup>-</sup>)，碳酸盐岩岩溶水富集重碳酸根离子(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)和钙离子(Ca<sup>2+</sup>)。说明后沙峪地热田的地热水有其独特的形成演化特征，

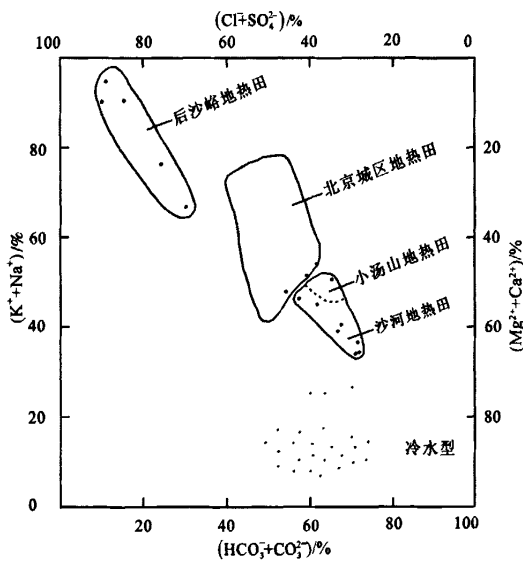


图 4 北京平原区地热田地热水兰格利尔-路德维奇图解

Fig. 4 Graph of Langelier-Ledwidge of geothermal reservoirs in Beijing plain

处于由基岩冷水补给到地热水径流演化的末端。

2.3.3 地热富集规律预测

图 3 中反映深部热流向孙河断裂上盘构造凸

起部位聚集的规律,是比较典型的构造凸起型储热构造。最高位处的顺后热-1地热井3 100 m的地温达到90.9℃,向东南来广营凸起构造单元来热-2地热井3 950 m处的地温仅为95.1℃,向东北后沙峪凹陷中心部位地温降低幅度较大。由于孙河断裂上盘断裂构造裂隙非常发育,浅部侏罗系火山岩形成地热富集的构造裂隙热储,深部还发育奥陶系、寒武系及蓟县系碳酸盐岩岩溶裂隙热储,发育3套温度高富水性好的热储地质结构在北京地区是独一无二的。根据上述地热地质条件的综合分析,可以推断孙河断裂上盘奥陶系、寒武系及蓟县系热储处于构造凸起部位,北西向延伸的孙河断裂带区域是后沙峪地热田的地热资源富集区。依据顺后热-1地热井资料并结合北京平原区的地热地质条件推断,3 700 m深可见到蓟县系雾迷山组白云岩热储层,推断地温可达101℃左右,钻探深度4 000 m的地热井出水温度可达到100℃。北京地区目前地热水的最高温度为88℃,孙河断裂带是北京最有望突破100℃地热水的高地温区。

### 3 结论

(1)通过重力、电阻率测深、可控源音频大地电磁测深多种物探资料的推断解释,结合地热钻井揭露的地热地质成果,初步说明孙河断裂是一条宽约3 km的断裂构造带,断裂上盘次级断裂构造裂隙非常发育。

(2)孙河断裂具有多期活动的特征,晚侏罗世以来至少有两期大的性质相反的构造活动。晚侏罗世后的构造活动表现为逆掩性质,第四纪时期断裂活动表现为张性。

(3)孙河断裂对后沙峪地热田西南部区域的地热地质条件具有控制作用,具有良好的导热和导水性能。后沙峪地热田西南部是构造凸起型储热构造,北西向延伸的孙河断裂带区域是后沙峪地热田的地热资源富集区。

(4)受孙河断裂的构造运动改造,侏罗系火山岩地层的构造裂隙非常发育,火山岩裂隙热储导水、储水条件优越。后沙峪地热田拥有侏罗系火山岩、奥陶系和寒武系及蓟县系碳酸盐岩3套热

储,地热资源储量丰富。

(5)后沙峪地热田地热水具有高矿化度、高硫酸盐和高氯化物的特征,主要为氟、偏硅酸型热矿水。侏罗系火山岩裂隙水为 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} - \text{Na}$ 水型,为高pH值碱性水;奥陶系、寒武系碳酸盐岩岩溶水为 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 水型,为弱碱性水。地热水的独特水型特征表明,后沙峪地热田处于由基岩冷水补给到地热水径流演化的末端。

致谢:周训老师对本文进行了审阅和修改,谨致谢忱。

### 参考文献:

- [1] 宾德志,刘久荣.北京地热资源[M]//刘久荣,郑克模,刘时彬,等.北京地热国际研讨会论文集.北京:地质出版社,2002.
- [2] 周训,周海燕,方斌,等.浅析开采条件下地下水资源的演变[J].地质通报,2006,25(4):482-486.
- [3] Zhou Xun, Li Juan, Zhou Haiyan, et al. Increase in thermal groundwater due to a flowing well near the Songshan hot spring in Beijing, China [J]. Environmental Geology, 2008, 53(7): 1405-1411.
- [4] 郑炳华,魏顺民,徐好民.燕山地区北西向断裂构造基本特征及其大地构造意义的探讨[M]//北京市地震地质会战办公室.北京市地震地质会战研究成果汇编——北京地区主要断裂(带)调查报告资料汇编.北京:北京市地震地质会战办公室,1979.
- [5] 北京市地质矿产局.北京市区域地质志[M].北京:地质出版社,1991.
- [6] 张世民,王丹丹,刘旭东,等.北京南口—孙河断裂带北段晚第四纪活动的层序地层学研究[J].地震地质,2007,29(4):729-743.
- [7] 贾二满,郭萌.从高丽营探槽分析黄庄—高丽营断裂与地裂缝的关系[J].城市地质,2007,2(4):24-28.
- [8] 柯柏林.北京城区地热田西北部地热地质特征[J].现代地质,2009,23(1):49-56.
- [9] 林黎,赵苏民,阮传侠,等.天津地区深部蓟县系雾迷山组热储岩溶非均一性特征研究[J].现代地质,2007,21(4):600-604.
- [10] 樊友丽,周训,林黎,等.天津地区深层地下水开采动态分析[J].现代地质,2006,20(3):486-493.
- [11] 阎敦实,于英太.京津冀油区地热资源评价与利用[M].武汉:中国地质大学出版社,2000.
- [12] 董福印.京津冀都市圈水资源及其开发利用问题研究[J].现代地质,2007,21(增刊):196-201.