

# 山东莘县凹陷(聊城段)地下热水化学特征及成因

王奎峰

(山东省地质科学实验研究院, 山东济南 250013)

**【摘要】** 典型地区地下水成因和演化机制的研究不仅对于热水资源的合理利用与开发具有重要的指导意义,而且可以为日后的地热资源勘查评价提供重要信息。通过对莘县凹陷聊城段的地下热水的化学成分、同位素及其水文地质特征的分析,进而对这一地区的地下热水的成岩和演化过程进行了研究。地下热水的形成受区内深大断裂和基底构造对地热形成的控制,地下热水补给是来自大气降水,为入渗变质水,水化学成分以易溶盐溶解作用为主,反映了地下水长期径流及深循环中各种水化学作用。

**【关键词】** 莘县凹陷;水文地球化学;成因分析;热储层;

**【中图分类号】** P 592

## Chemical Characteristics and Origin of Geothermal Water in Shandong Shenxian Hollow(Liaocheng Segment)

Wang Kuifeng

(Shandong Institute and Laboratory of Geological Sciences, Jinan 250013, Shandong, China)

**【Abstract】** Studies of the origin and evolution mechanism of groundwater in a type area not only have great significance for guiding the rational utilization and development of geothermal water resources but also provide important information for future geothermal resource exploration and evaluation. The formation and evolution of geothermal water in the Shenxian Hollow (Liaocheng segment) is studied based on an analysis of the chemical composition, isotopes and hydrogeological characteristics of geothermal water in the area. The study shows that the formation of the geothermal water is controlled by deep faults and basement structure in the area, the hydrochemical components consist predominantly of more soluble salts, and gas components are mainly marked by a mixture of components originating from the atmosphere, all these reflect the various hydrochemical processes in long-term run-off and deep circulation of groundwater.

**【Key words】** Shenxian Hollow; hydrochemistry; origin analysis; hot reservoir

### 0 引言

聊考断裂以西山东莘县凹陷聊城区域部分蕴藏着丰富的地下热水资源,分布面积较广且易于开采,在华北平原具有典型性。探讨该地区地热流体的地球化学特征及成因对同类地区地热资源勘查评价和开发利用具有重要的指导意义<sup>[1]</sup>。

### 1 地下热水的赋存环境及热储特征

#### 1.1 地层

本区被第四系覆盖,地层由老至新有:新太古代泰山岩群、寒武系—奥陶系、石炭系—二叠系、侏罗系—白垩系、古近系、新近系和第四系。本区 Q+N 厚度 1 200 m 左右,就是馆陶组底部埋深在 1 200 m

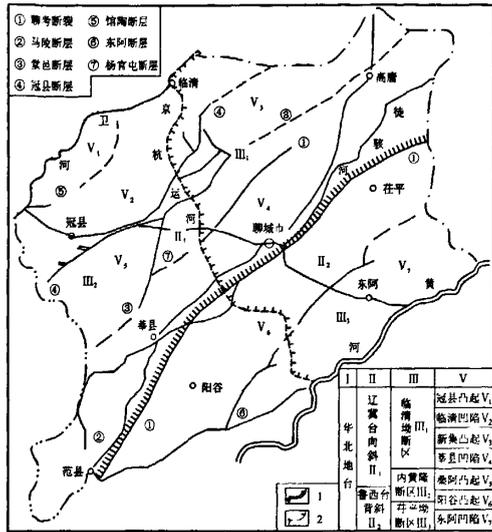
左右,其中与地热资源有关的地层主要为古近系、新近系和第四系<sup>[2]</sup>。

#### 1.2 地质构造特征

该区域所处的莘县凹陷,为中、新生代断陷,面积约 2 400 km<sup>2</sup>,呈 NNE 向展布,其西侧为堂邑凸起,东侧为阳谷凸起。凹陷内中、新生代地层最大残留厚度:新近系+第四系为 1 600 m,古近系为 3 500 m,中生界为 4 000 m。

本区已发现、查明对中、新生代沉积,起着比较明显控制作用且与地热有密切关系的大型断裂有 2 条。①聊考断裂:北起在平、南至河南兰考,是临濮块陷和鲁西块隆两个构造单元的分界,为正断层,走

向 NNE,倾向 NW,长度约 260 km,断层两侧下古生界侵蚀面相对落差可达 7 000 m。②堂邑断裂:为正断层,走向 NE,倾向 SE,长度约 50 km,断层两侧下古生界侵蚀面相对落差可达 4 000 m。区内较大的深断裂中,绝大多数都为控热断裂,为张性-压扭性断裂,这些断裂及其次级断裂长期活动,有的已达第四系或新近系盖层,沟通了热储层与热源的联系,是良好的导热传水通道<sup>[3]</sup>。构造分布见图 1。



1. 二级构造单元分区界线;2. 三级构造单元分区界线

图 1 莘县凹陷地质构造图

1.3 热储特征

莘县凹陷地下热水的热源主要来自 3 个方面:一是来自地壳深部及上地幔的传导热;二是来自聊

考断裂等断裂产生的摩擦热能和沟通上地幔岩浆热源产生的增温热流;三是凹陷内发生的多期岩浆入侵活动,使部分挥发物质包括蒸汽进入热储层产生的热流。

莘县凹陷聊城段的热储盖层为第四系和新近纪明化镇组上段,岩性主要为浅黄色、浅红棕色粘土、粉砂质粘土,夹褐黄色粉砂-粗砂层。粘土或泥岩、粉砂岩单层厚度大,导热性能差,热阻大,是天然的良好热储保温层。

莘县凹陷聊城段的热储层主要为新近纪明化镇组下段浅黄色粉细砂岩与浅棕黄色、浅灰色、泥岩及砂质泥岩,馆陶组的泥岩、细砂岩、中粗砂岩及古近纪东营组褐色、暗紫色粉砂岩、泥岩夹浅棕红色、灰白色中细砂岩层。该区热储层属砂岩孔隙型,具备良好的储水空间,孔隙度大约为 14.6%~34.0%,含水丰富,矿化度及温度较高<sup>[4]</sup>。

2 地下热水的水化学特征

地下热水的化学因素不只是地热环境性状与功能的表征,而且是制约地下热水中元素浓度、固-液相分配、形态和迁移转化的直接因素。从影响地下热水中元素发生和形成、形态和转化的因素看,地下热水的水温和溶解氧、主要离子组成和浓度、水的化学类型等因素是地热研究的基础。

地热田为一个特定温度条件下形成的化学系统,其水文地球化学特征是该系统的热水-岩石达到平衡状态的反映<sup>[5]</sup>。从莘县凹陷代表性地热井 ZK2 和 ZK4 地下水化学特征(见表 1)可以看出,其地下水化学组成具有以下特征:

表 1 莘县凹陷聊城 ZK2 和 ZK4 地热井地热水化学成分表

			mg/L						
离子	ZK2	ZK4	项目	ZK2	ZK4	项目	ZK2	ZK4	
阳离子	K <sup>+</sup>	20.09	TDS	7484.2	9124.33	银	<0.001	<0.001	
	Na <sup>+</sup>	2230	偏硅酸	36.27	36.60	钡	0.066	0.069	
	Ca <sup>2+</sup>	362.2	游离二氧化碳	13.07	8.71	铬	<0.004	<0.004	
	Mg <sup>2+</sup>	69.35	锂	0.11	0.195	铁	0.767	0.281	
	Al <sup>3+</sup>	<0.02	锶	17.32	19.98	铅	0.008	0.002	
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	1.50	溴化物	4.47	7.00	钴	<0.030	<0.030	
总计	2683	3352	碘化物	2.75	3.50	钼	0.066	0.015	
阴离子	HCO <sup>-</sup>	171.5	锌	<0.010	<0.010	铈	0.025	0.041	
	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.00	硒	<0.0001	<0.0001	锰	0.377	0.402	
	Cl <sup>-</sup>	3172	铜	<0.020	<0.020	镍	<0.030	<0.030	
	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	1416	偏硼酸	<0.02	<0.02	挥发性酚	<0.0015	<0.0015	
	F <sup>-</sup>	0.96	汞	<0.0001	<0.0001	氰化物	<0.001	<0.001	
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1.78	镉	<0.005	<0.005	亚硝酸盐	<0.002	<0.002	
	总计	4769	5739	偏硼酸	3.80	6.00	耗氧量	2.46	2.46
	偏磷酸	<0.02	<0.02	含砂量	3.50	3.00	pH 值	7.58	7.45
	总硬度	1189.95	1539.80	总碱度	140.62	134.84	总酸度	14.86	9.91

续表

项目	ZK2	ZK4	项目	ZK2	ZK4
肉眼可见度	无	无	$^{226}\text{Ra}$	$5.06 \times 10^{-2} \text{Bq/L}$	$2.72 \times 10^{-2} \text{Bq/L}$
色度	20度	<5度	总 $\beta$	0.733Bq/L	7.959Bq/L
浑浊度	3.9度	<2度	总 $\alpha$	<0.020Bq/L	0.5698Bq/L
嗅和味	微咸	微咸	Rn	$8.62 \times 10^{-1} \text{Bq/L}$	$4.331 \times 10^{-1} \text{Bq/L}$

测试单位:国土资源部正定水文地质环境地质专业测试中心

1) 地下热水总矿化度(TDS) 7 484.2 ~ 9 3124.33 mg/L, 为咸水, 总硬度(以  $\text{CaCO}_3$  计) 1 189.95 ~ 1 539.80 mg/L, 属极硬水, pH 值为 7.45 ~ 7.58, 呈弱碱性。

2) 地下热水中主要阳离子为  $\text{Na}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$ , 其含量大致为 2 230 ~ 2 772 mg/L 和 362.2 ~ 462.3 mg/L; 阴离子主要为  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$ , 其含量大致为 3 172 ~ 4 128 mg/L 和 1 416 ~ 1 432 mg/L, 按水化学类型定名原则, 该区地下热水普遍属于氯化物-钠( $\text{Cl-Na}$ )型水。

3) 地热水水化学成分较为复杂, 含有丰富的微量元素及放射性元素。地热井 ZK2 地热水中碘化物、偏硅酸含量达到了矿水浓度; 铯含量达到了命名矿水浓度; 偏硼酸含量达到了有医疗价值浓度。地热井 ZK4 地热水中碘化物、偏硅酸、偏硼酸含量达到了矿水浓度; 铯含量达到了命名矿水浓度, 并且含有铁、锰、锂等有益元素和放射性元素, 具有较高的医疗保健价值<sup>①</sup>。

### 3 地下热水的化学演化

#### 3.1 地下热水的水文地球化学环境

地下热水水文地球化学特征反映了地下热水系统的水文地球化学环境。水文地球化学环境包括含水介质岩性、水动力条件、氧化-还原环境及酸碱度等基本内容。莘县凹陷地下热水系统含水介质为湖相沉积的碎屑沉积岩, 以砂岩、砂砾岩为主。地下热水径流途径长, 水循环缓慢, 地下热水呈弱碱性; 地下热水  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{CO}_2$  的存在形式及宏量组分的组合关系反映了地下热水系统为弱还原环境<sup>[6]</sup>。

#### 3.2 地下热水形成的化学过程

莘县凹陷地下热水化学成分的形成和演化是含水介质的化学成分、水化学作用、沉积环境及水循环等诸多因素共同作用的结果。

1) 易溶盐溶解作用: 是地下热水化学成分形成的主要水化学作用。湖相沉积地层中含有盐岩等易

溶盐类。在热储温度作用下, 盐岩等易溶盐溶解度增大, 形成  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Br}^-$ 、 $\text{I}^-$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  等离子。



2) 溶滤作用: 溶滤作用是地下热水系统化学成分形成的重要作用。地下热水与地表水及浅层淡水相比, 其  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_3$  等浓度增高主要是溶滤作用的结果。

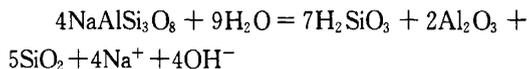
热储中膏盐含量较大, 且有石膏夹层, 在热储温度、压力和盐度的长期作用下, 膏盐逐渐溶解, 导致地热热水中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  浓度增大。



地下热水流动缓慢, 在漫长的水岩相互作用过程中, 热储含铯的碳酸盐和硫酸盐矿物充分溶解形成  $\text{Sr}^{2+}$ 。另一方面,  $\text{Sr}^{2+}$  的浓度与  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度呈正相关关系, 热水溶液  $\text{SO}_4^{2-}$  高,  $\text{Sr}^{2+}$  的浓度也高。



$\text{H}_2\text{SO}_3$  的溶解度与温度、pH 值呈正相关关系。深循环的地下热水长期溶滤热储岩层, 使正长石分解成为高岭土、其它碳酸盐及可溶性  $\text{SiO}_2$ , 在较高温度和弱碱性介质作用下形成较高浓度的  $\text{H}_2\text{SO}_3$  地下热水。



3) 沉淀作用: 地下热水中  $\text{CO}_3^{2-}$  含量极低, 这与热储层 Ca 盐含量低和地下热水系统产生的沉淀作用有关。含有  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{CO}_3^{2-}$  的地下水, 在径流过程中, 使水溶液的其他离子浓度增大, 因同离子效应和热储温度的共同作用产生  $\text{CaCO}_3$  沉淀, 使  $\text{Ca}^{2+}$  浓度与  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度相差悬殊, 亦使  $\text{CO}_3^{2-}$  消耗殆尽。

#### 3.3 地下热水的变质与演化

地下水的变质是指水化学成分之间相互反应引起离子组合比例变化的过程。强酸根与弱酸根的比例系数(K)和溶液的离子强度(I)定量表征了水化学成分变质程度:

① 山东省地质科学实验研究院. 山东省聊城市东昌府区谷庄地区地热普查报告[R]. 2006.

$$K = \frac{SO_4^{2-} + Cl^-}{HCO_3^- + HSiO_3^-} \quad (1)$$

$$I = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n C_i Z_i^2 \quad (2)$$

式中:  $C_i$  为离子体积摩尔浓度;  $Z_i$  为离子的电价。

由式(1)和式(2)计算得莘县凹陷地下水:  $K=22.08 \sim 27.66$ ,  $I=0.15 \sim 0.20$ , 即  $4.0 < K \leq 60.0$ ,  $0.05 < I < 0.20$ , 据别利亚柯夫提出的水质变质程度分类方案( $K \leq 0.5$ ,  $I < 0.006$ , 为未变质水;  $0.5 < K \leq 4.0$ ,  $0.01 < I < 0.04$ , 为初期变质水;  $4.0 < K \leq 60.0$ ,  $0.05 < I < 0.20$ , 为中度变质水;  $K \geq 60.0$ ,  $I > 0.20$ , 为高度变质水)<sup>[7]</sup>, 该地下水应属中度变质水。表明地下热水中化学成分之间发生了比较复杂的反应, 包括易溶盐的溶解、难溶盐  $CaCO_3$  沉淀以及水中离子与含水介质离子的交换反应等。反应的结果使地下热水中的阴离子成分逐渐由以  $HCO_3^-$  为主演化为  $SO_4^{2-}$  及  $Cl^-$  为主, 而阳离子以  $Ca^{2+}$  为主演化为以  $Na^+$  为主。

#### 4 地下热水的成因分析

莘县凹陷地下热水是在漫长的地质历史发展过程中各种自然因素综合作用的结果, 其中水文地质条件对地下热水的形成起主要作用。

##### 4.1 地下热水化学成分及水文地球化学分析

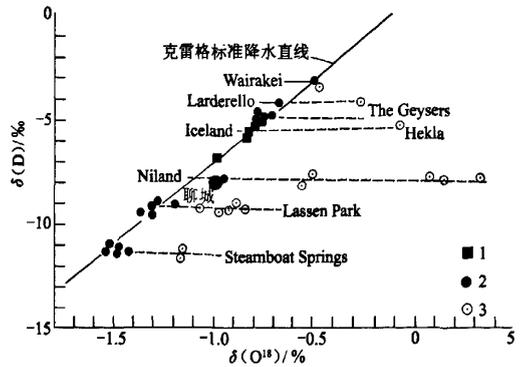
莘县凹陷聊城段地下热水化学特征系数  $\gamma(Na)/\gamma(Cl) = 1.03 \sim 1.08$ ,  $\gamma(Ca)/\gamma(Mg) = 3.16 \sim 3.19$ ,  $Cl/Br = 590 \sim 710$ , 地下热水的成因系数均大于海水的成因系数, 说明该区地下热水主要为溶滤水。莘县凹陷聊城段地下热水中含有丰富的微量元素, 表明地层中有丰富的微量元素, 也表明地下热水是经过漫长而复杂的地下水溶滤作用和不断的循环径流交替形成的。

##### 4.2 地下热水的同位素分析

1) 该区地热水中的  $\delta(D)$  为  $-9.067\%$  左右,  $\delta(O^{18})$  为  $-0.916\%$  左右, 从图2可看出,  $\delta(D)$  与  $\delta(O^{18})$  在克雷格标准降水直线附近, 氧同位素有漂移, 说明地下热水与围岩发生过交换作用, 由大气降水补给形成, 其主要为大气降水成因, 通过深循环在地温及地热气作用下被加热而形成的<sup>[8]</sup>。

2) 据法国 J. ch. 丰特经验公式估算认为: “0~5 氡单位(TU)说明 40 年前的古水成分占优势, 5~40 氡单位表示新近的人渗水和古水之间有混合作用, 大于 40 氡单位表示新近入渗水占优势。”另据华北地区不同区域的雨水采样分析, 大气降水中的氡含量一般为 40 TU, 莘县凹陷聊城段地热水中的氡含量为 6.64

TU 左右, 偏向最小值 5 TU, 推测该区地热水为新近的人渗水与古水的混合水, 其中地热热水中 40 年前的古水占优势, 新近入渗水的补给量较小。



1—局部大气降水或稍微加热的近地表水; 2—热泉地热水; 3—高温高压地热汽

图2 莘县凹陷聊城段  $\delta(D)$ - $\delta(O^{18})$  关系曲线图

#### 4.3 地下热水的成因模式

莘县凹陷地下热水埋藏于中、新生代沉积盆地, 赋存于新近系和古近系热储系统中, 为中低温层控型孔隙型地下热水, 大致以堂邑断裂为西边界, 以聊考断裂为其东边界, 宽约 22.5 km, 长约 150 km, 呈北东向延伸。

该区地下热水是大气降水在西北方向汇集呈径流后, 在漫长的地质年代中, 在水头差位能的作用下, 沿断裂带或岩层的孔隙向深部运移。受热的地下水由于密度差异引起的自然对流, 加上补给区水头差的驱动, 使地下水得以缓慢地进行循环交替运动, 将地热水在孔隙中储存下来。其成因模式图见图3。

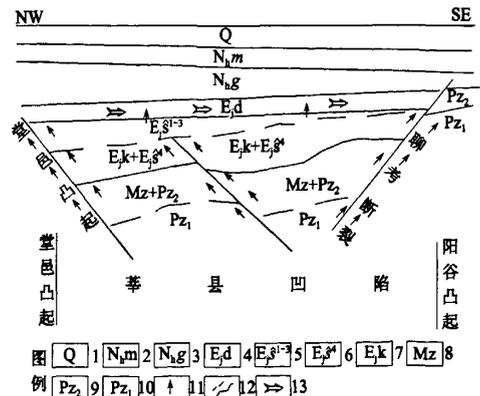


图 Q 1 N₄m 2 N₄g 3 E₄d 4 E₃k+E₃s 5 E₂k+E₂s 6 E₃k 7 Mz 8 Pz₂ 9 Pz₁ 10 11 12 13

- 1—第四系; 2—新近系明化镇组; 3—新近系馆陶组;
- 4—古近系东营组; 5—古近系沙河街组第一至第三段;
- 6—古近系沙河街组第四段; 7—古近系孔店组;
- 8—中生界; 9—上古生界; 10—下古生界; 11—地热流向方向;
- 12—地层整合与不整合界线; 13—地下水移动方向

图3 地下热水的成因模式图

5 结论

1)莘县凹陷聊城段地下水为受聊考深大断裂构造控制的低温地热资源,地下水赋存于新近系和古近系碎屑沉积岩层中,属层控低温孔隙型的地热水。

2)地下水的水质类型为 Cl-Na 型水,地下水形成于弱还原环境。

3)地下水形成的化学过程以溶滤作用为主,地下水化学成分是在地下水长期径流及深循环过程中各种水化学作用的结果。

4)地下水主要来源为大气降水,通过深循环在地温及地热气作用下被加热而形成的,属于入渗中度变质水。

参 考 文 献

[ 1 ] 颜世强,潘 懋,邹祖光,等. 山东德州凹陷地下水地球化学特征及成因[J]. 中国地质,2007,34(1):

150-151.

[ 2 ] 王奎峰. 聊城西部地热田地热资源赋存特征研究[J]. 地质灾害与环境保护,2008,19(1):52-56.

[ 3 ] 王奎峰,母国妍,赵 群. 临清市区地热资源特征及开发探讨[J]. 地质调查与研究,2007,30(3):224-229.

[ 4 ] 石维栋,张森琦,周金元,等. 西宁盆地北西缘地下水分布特征[J]. 中国地质,2006,33(5):1131-1136.

[ 5 ] 沈照理,朱宛华,等. 水文地球化学基础[M]. 北京:地质出版社,1999:113-114.

[ 6 ] 王奎峰. 山东省聊城市东部地热田地热资源特征[J]. 中国地质,2009,36(1):194-202.

[ 7 ] 陈静生. 水环境化学[M]. 北京:高等教育出版社,1991:20-24.

[ 8 ] 郑永飞,陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京:科学出版社,2000:152-153.

收稿日期:2008-11-25

(上接第 89 页)

[ 4 ] Huong Quynh Dinh. A Sampling of Surface Reconstruction Techniques[EB/OL]. 2001. /smartech. gatech. edu; 8282/ dspace/bitstream/1853/3460/1/00-28. pdf.

[ 5 ] Petko Faber, Bob Fisher. A Buyer's Guide to Euclidean Elliptical Cylindrical and Conical Surface Fitting [EB/OL]. 2001;521-530. www. bmva. ac. uk/bmvc/2001/papers/21/accepted\_21. pdf .

[ 6 ] David Eberly. Fitting 3D Data with a Helix[EB/OL]. [1999-03-02]www. geometrictools. com/Documentation/HelixFitting. pdf.

[ 7 ] David Arnold. Fitting a Logistic Curve to Data[EB/

OL]. [2002-02-24] library. wolfram. com/infocenter/Articles/3198/.

[ 8 ] H Y Chen, I K Lee, et al. On Surface Approximation using Developable Surfaces[EB/OL]. [2004-03-26]www. geometrie. tuwien. ac. at/geom/ig/papers/pot096. pdf.

[ 9 ] 赵然杭,刘 健,王若菊. 螺旋面及其 CAD[J]. 山东建筑工程学院学报,2001,16(1):87-90.

[10] 陈俊平,王解先. 工程测量中的曲线拟合[J]. 工程勘察,2003(5):59-61.

收稿日期:2009-01-05

《岩土工程技术》勘误表

封 面	误	正
2008 年第一期封二	《岩土工程技术》第七届编委会	《岩土工程技术》第六届编委会
2008 年第二期封二	《岩土工程技术》第七届编委会	《岩土工程技术》第六届编委会
2008 年第三期封二	《岩土工程技术》第七届编委会	《岩土工程技术》第六届编委会
2008 年第四期封二	《岩土工程技术》第七届编委会	《岩土工程技术》第六届编委会
2008 年第五期封二	《岩土工程技术》第七届编委会	《岩土工程技术》第六届编委会
2008 年第六期封二	《岩土工程技术》第七届编委会	《岩土工程技术》第六届编委会
2009 年第一期封一	(漏印“英文刊名”) (漏印“主办单位”)	GEOTECHNICAL ENGINEERING TECHNIQUE 国防机械工业工程勘察科技情报网

以上差错,现予更正,并向作者、读者致歉。

《岩土工程技术》编辑部