

# 山东德州凹陷地下热水地球化学特征及成因

颜世强<sup>1,2</sup> 潘 懋<sup>1</sup> 邹祖光<sup>3</sup> 刘桂义<sup>3</sup>

(1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100083;  
3. 山东省地质矿产局, 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。笔者通过对德州凹陷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。结果显示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, 其气体组分主要起源于大气、地壳和地幔的混合物, 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:** 地下热水; 水文地球化学; 成因分析; 德州

**中图分类号:** P592      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2007)01-0149-04

山东德州凹陷蕴藏着丰富的地下热水资源, 在华北平原具有典型性, 探讨其水文地球化学特征和地热成因机理, 对同类地区地热资源勘查评价和开发利用具有指导意义。

## 1 地下热水赋存环境及热储特征

### 1.1 地质构造特征

德州凹陷位于华北平原南部, 在大地构造单元上位于沧县、埕宁、鲁西 3 个隆起带的倾伏交汇处和黄骅、临清、济阳 3 个凹陷带的收敛部位, 为一隆起背景上的双向断陷盆地, 呈北东向展布, 因其受力广而复杂, 使盆地内又形成多个次级的正负向构造单元(图 1)。其内沉积了巨厚的新生代地层, 其中古近纪和新近纪地层发育完整, 是地下热水的赋存场所。凹陷内主要发育有沧东大断裂、边临镇—羊二庄断裂和芦家河—曹村断裂等多条断裂带, 是地下热水的热源和运移通道。区内有多期岩浆活动, 这些岩浆活动产物对地下热水的水化学特征也可能产生了一定的影响, 但多期岩浆活动发生的时代远大于地下热水的  $^{14}\text{C}$  年龄(1.526 万年)。因此, 本区的地下热水的热源不应该受多期岩浆活动的影响。

### 1.2 热储特征

德州凹陷地下热水的热储盖层为新近系明化镇组上段, 岩性由粘性土、砂性土夹松散砂层组成, 密度小, 导热性能差, 热阻大, 是良好的天然热储保温层。

德州凹陷主要热储为新近纪和古近纪地层, 岩性由中—

细砂岩、含砾砂岩、砂砾岩组成, 较疏松。孔隙裂隙发育, 孔隙度平均为 28.8%, 具备良好的储集空间, 构成孔隙—裂隙型层状热储。

德州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流; 二是来自沧东断裂等超壳断裂产生的摩擦热能和沟通上地幔岩浆热源产生增温热流; 三是凹陷内发生的多期(四期)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。

## 2 地下热水的水文地球化学特征

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>[1]</sup>。从德城凹陷地下热水化学特征(表 1)可以看出, 其地下热水化学组成具有以下特征:

(1) 地下热水总矿化度 4711.80~4857.5 mg/l, 为半咸水, 总硬度 317.75~400 mg/l, 属中等矿化水, pH 值为 7.8~8.1, 呈弱碱性。

(2) 地下热水的宏量组分中阳离子主要为  $\text{Na}^+$ , 其含量为 1525.20~1628.26 mg/l; 阴离子以  $\text{Cl}^-$  为主, 其含量为 2053.26~2213.34 mg/l, 属于  $\text{Cl}-\text{Na}$  型水。

(3) 地下热水中的  $\text{CO}_2$  主要以以水溶性  $\text{HCO}_3^-$  形式存在。

(4) 地下热水的微量组分主要为  $\text{HBO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{SiO}_3$ 、 $\text{Sr}$ 、 $\text{Li}$ 、 $\text{I}$ 、 $\text{Br}$ 、 $\text{F}$ 、 $\text{Mn}$ 、 $\text{Mo}$ 。

收稿日期: 2006-07-04; 改回日期: 2006-11-05

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目(1212010535702)资助。

作者简介: 颜世强, 男, 1973 年生, 博士, 高级工程师, 现从事地质矿产战略研究工作; E-mail: yshiqiang@mail.cgs.gov.cn。

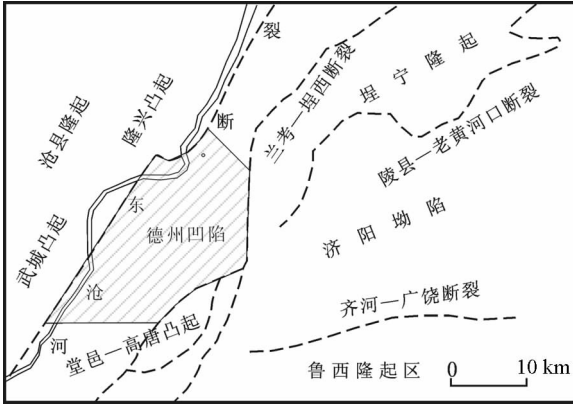


图1 德州凹陷地质构造图

Fig.1 Map showing the geological structure of the Dezhou hollow

### 3 地下热水的地球化学演化

#### 3.1 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<sup>[1]</sup>。德州凹陷地下热水系统含水介质为湖相碎屑沉积岩,以砂岩、砂砾岩为主,含石油、石膏。地下热水径流途径长,水循环缓慢,地下热水呈碱性。

#### 3.2 地下热水形成的化学过程

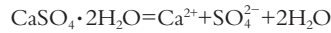
德州凹陷地下热水化学成分的形成与演化是含水介质的化学成分、水化学作用、沉积环境及水循环等多种因素共同作用的结果。

(1)易溶盐溶解:易溶盐溶解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岩盐等易溶盐类,在热储温度作用下,盐岩等易溶盐溶解度增大,形成 Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, F<sup>-</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>等离子。这是地下热水中 Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, F<sup>-</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>等离子含量较高的主要原因。

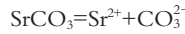
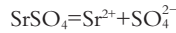


(2)溶滤作用:溶滤作用是地下热水系统化学成分形成的重要作用。地下热水与地表水及浅层淡水相比,其 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、HSiO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Sr<sup>2+</sup>等离子浓度较高是溶滤作用的结果。

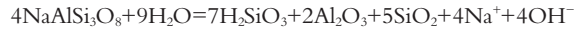
地下热水储层中膏盐含量较大,且有石膏夹层,在热储温度、压力和盐度的长期作用下,膏盐逐渐溶解,使地下热水中含有 Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>离子。



地下热水流动缓慢,在漫长的水岩相互作用过程中,热储含锶的碳酸盐和硫酸盐矿物充分溶解形成 Sr<sup>2+</sup>。另一方面, Sr<sup>2+</sup>的浓度与 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度呈正相关关系,热水中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度高, Sr<sup>2+</sup>的浓度也高。



HSiO<sub>3</sub><sup>-</sup>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,其他硅酸盐及可溶性 SiO<sub>2</sub>。在较高温度和弱碱性介质作用下形成较高浓度的 H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 地下热水。



(3)沉淀作用:地下热水中 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>含量极低,这与热储层

表1 德城凹陷地下热水化学特征

Table 1 Geochemical features of geothermal water in the Dezhou hollow

项目	单位	含量	项目	单位	含量
K <sup>+</sup>	mg/l	10.00~16.38	As	mg/l	<0.01
Na <sup>+</sup>	mg/l	1525.20~1637.50	Mn	mg/l	0.212~0.274
Ca <sup>2+</sup>	mg/l	98.20~108.22	Cr	mg/l	<0.006
Mg <sup>2+</sup>	mg/l	17.38~23.17	Ni	mg/l	<0.03
Fe <sup>3+</sup>	mg/l	1.15~2.893	Cd	mg/l	<0.005
Cl <sup>-</sup>	mg/l	2053.26~2213.34	Li	mg/l	0.20~0.39
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/l	572.28~761.28	Mo	mg/l	0.160~0.192
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	223.52~273.64	Co	mg/l	<0.03
I <sup>-</sup>	mg/l	0.50~0.68	H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	mg/l	36.13~42.41
F <sup>-</sup>	mg/l	1.08~1.40	PH		7.45~8.20
Br <sup>-</sup>	mg/l	1.74~2.40	总硬度(CaCO <sub>3</sub> )	mg/l	317.75~352.97
HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/l	<0.03	矿化度	mg/l	4711.80~4857.50
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/l	<0.004	游离 CO <sub>2</sub>	mg/l	1.94~8.44
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	0.4~1.93	耗氧量	mg/l	0.97~3.04
Sr	mg/l	4.15~5.42	氰化物	mg/l	<0.006
Zn	mg/l	<0.05	酚类	mg/l	<0.002
Cu	mg/l	<0.05	六六六	mg/l	<0.00003
Ag	mg/l	<0.001	滴滴滴	mg/l	<0.0002
Ba	mg/l	<0.05	总 α	β q/L	0.04~0.525±0.193
Pb	mg/l	<0.005	总 β	β q/L	0.545~1.26±0.16
Hg	mg/l	<0.0001	μ	β q/L	0.0894±0.0006
B(HBO <sub>2</sub> )	mg/l	6.00~6.30	<sup>226</sup> Ra	β q/L	0.0627~0.0797
Se	mg/l	<0.0015	Rn	β q/L	4.12~4.91±0.25
			Th	β q/L	0.0179±0.0042

Ca 盐含量低和地下热水系统产生的沉淀作用有关。含有  $\text{Ca}^{2+}$  及  $\text{CO}_3^{2-}$  的地下水,在径流过程中,使水溶液的其他离子浓度增大,因同离子效应及热储温度共同作用,产生  $\text{CaCO}_3$  沉淀,使  $\text{Ca}^{2+}$  浓度与  $\text{SO}_4^{2-}$  相差悬殊,也使  $\text{CO}_3^{2-}$  消耗殆尽。

3.3 地下热水的变质与演化

地下热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的变质程度。经计算德州凹陷地下热水的平均值为:  $K=9.70, I=0.09$ , 即  $4 \leq K < 60, 0.05 \leq I < 0.20$ , 根据 K 及 I 分类的水质变质程度分类方案<sup>[9]</sup>, 该地下热水为中度变质水, 表明地下热水的化学成分间发生了比较复杂的反应, 包括易溶盐的溶解、难溶盐  $\text{CaCO}_3$  的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阴离子成分由以  $\text{HCO}_3^-$  为主演化为以  $\text{Cl}^-$  为主, 而阳离子则由以  $\text{Ca}^{2+}$  为主演化为以  $\text{Na}^+$  为主; 按 Chebotarlev 水化学演化分带模式, 该地下热水水化学演化分带十分明显且完整, 充分证明了其流程长, 而且演化充分。

3.4 地球化学空间变异

受地下热储水动力条件影响, 在水平方向上的地下热水水化学组分变化很小, 这是地下热水长期循环径流作用的结果。在垂向上, 地下热水水化学类型变化较大, 矿化度显著升高, 具明显的垂直分带性, 如上覆明化镇组地层水质类型为  $\text{HCO}_3^- - \text{Na}$  型, 矿化度小于 1.5 g/l, 而地下热水的水质类型为  $\text{Cl}^- - \text{Na}$  型, 矿化度则达到 4.7 g/l 以上, 这与地温和水化学作用随深度增加而逐渐增强有关。

表 2 同位素测试结果

Table 2 Isotope analysis

项目	$\Delta D/\%$	$\delta O^{18}/\%$	Tu	$\delta C^{14}/\%$	$^{14}C/a$
T1	-75.05	-9.59	<0.50	-12.55	15260±38
T2	-80.94	-9.54			

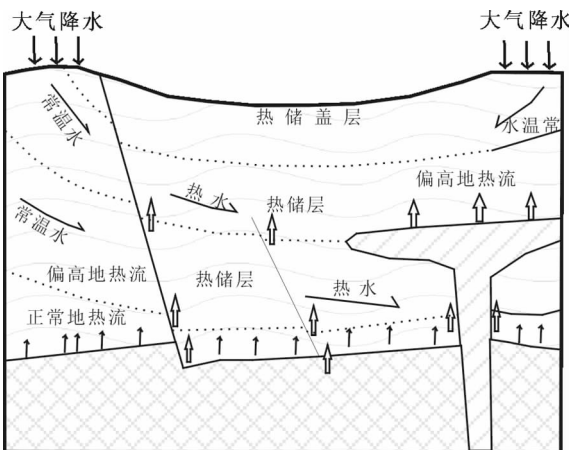


图 2 地下水的成因模式

Fig.2 Formation model of geothermal water

4 地下热水成因分析

德州凹陷地下热水的形成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。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

德州凹陷地下热水的平均化学特征系数如下:  $rNa/rCl=1.14$ , 大于海水系数 0.8;  $rSO_4/rCl=0.2, rCa/rMg=2.9, rCl/rBr=3111, r(HCO_3+SO_4)/rCl=0.26$ , 均大于海水系数, 反映了地下热水具有大陆溶滤水的特征。

微量元素的富集受围岩、地热水循环交替条件及水文地球化学环境条件的制约。德州凹陷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。

德州凹陷地下热水中放射性元素含量较高, 且与地埋深呈正相关, 表明地下热水随着深度增加, 温度增高, 其放射性元素的含量亦增大, 是大气降水在垂直渗透补给地下水向深部循环过程中, 逐步溶解围岩, 使围岩产生热水蚀变, 使放射性物质不断在热水中聚积的结果。

4.2 同位素因素分析

由地下热水同位素测试结果(表 2)可以看出, 同位素组成具以下特征:

(1)  $\delta D$  为  $-75.05\% \sim -80.94\%$ ,  $\delta O^{18}$  为  $-9.54\% \sim -9.59\%$ , 研究表明,  $\delta D$  与  $\delta O^{18}$  值在克雷格标准降水直线 ( $\delta D=-8, O^{18}=-10$ ) 附近, 说明地下热水由大气降水补给形成, 属大气成因。

(2) 地热水氡含量很低, 一般小于 0.50 Tu, 反映地下热水循环时间超过 50 年。

(3) 经  $^{14}C$  测定, 该区地下热水绝对年龄为 1.526 万年, 约是在晚更新世期间形成。说明地下热水的径流速度缓慢, 补给条件差, 资源再生能力弱, 为消耗型水源。

氢、氧同位素分析表明, 区内地下热水的水源除部分为盆地沉积物形成时保存下来的沉积水和封存水外, 绝大部分为沉积物形成后漫长的地质时期中, 由侧向径流补给。研究区地下热水  $\delta O^{18}$  的均值  $-9.57\%$ , 结合 1985—1993 年大气降水同位素监测数据, 估算其补给区高程大于 281.6 m。这个补给区可能是东南部的沂蒙山区或西部的太行山区。

4.3 地下热水的成因模式

德州凹陷地下热水埋藏于新生代沉积盆地, 赋存于新近系和古近系热储系统中, 为中低温热传导型地下热水<sup>[10]</sup>(图 2)。

大地测温和钻孔资料表明, 该区盖层平均地温梯度在  $2.7^\circ\text{C} \sim 3.8^\circ\text{C}/100\text{m}$ , 地温梯度在水平方向上总的规律是东西部高, 中间低, 地温梯度的低值区与德州凹陷轴向一致。地温梯度最高值为  $3.8^\circ\text{C}/100\text{m}$ , 区域构造上与沧东断裂带相吻合。这反映了区内地温在平面上的变化与区内基岩埋藏深

浅、凹凸基底构造轮廓、断裂活动的分布是一致的。反映在垂直方向上,地温变化值随井深的增加而递增。但曲线上也有波折,分析其曲线形态,主要同地层岩性变化有关。

该区地下热水是大气降水在东南部或西部山区汇集成地表径流后,在漫长地质年代中,在水头差位能的作用下,沿断裂带或岩层的孔隙向深处运移,被围岩加热而成,并与围岩发生水盐反应,溶解了大量的微量元素成分。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—裂隙中储存下来。

## 5 结 论

德州凹陷地热资源为低温地热资源,温热水—热水型<sup>[4]</sup>,地下水赋存于新近系和古近系碎屑沉积岩层中,属层状孔隙—裂隙型热储。区内深大断裂和基底构造对地热形成起着控制作用。地下水是起源于大气降水,补给区高程大于

281.6 m,绝对年龄为 1.526 万年,为入渗变质水,水质类型为 Cl-Na 型。地下水化学成分是在地下水长期径流及深循环中各种水化学作用的结果,以易溶盐溶解作用为主,其气体组分主要起源于大气、地壳和地幔的混合物。

### 参考文献 (References):

- [1] 浓照理. 水文地球化学基础[M]. 北京:地质出版社,1993:40-45.  
Shen Zhaoli. Introduction to Hydrogeochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House,1993:40-45 (in Chinese with English abstract).
- [2] 陈静生. 水环境化学[M].北京:高等教育出版社,1991:20-24.  
Chen Jinsheng. Aquatic Environmental Chemistry[M]. Beijing:High Education Press,1991:20-24(in Chinese with English abstract).
- [3] 陈墨香. 华北地热[M]. 北京:科学出版社, 1998:50-52.  
Chen Moxiang. Huabei Geothermal [M]. Beijing:Science Press, 1998:50-52(in Chinese with English abstract).

## Geochemical characteristics and origin of geothermal water in the Dezhou hollow

YAN Shi-qiang<sup>1,2</sup>, PAN Mao<sup>1</sup>, ZOU Zu-guang<sup>3</sup>, LIU Gui-yi<sup>3</sup>

(1. Peking University, Beijing 100871, China;

2. Development and Research Center of China Geological Survey, Beijing 100083, China;

3. Shandong Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 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 authors studied the formation and evolution of geothermal water in the Dezhou hollow 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 geothermal water is recharged by meteoric water, belonging to penetrating metamorphic water; the hydrochemical components consist predominantly of more soluble salts; and gas components are mainly marked by a mixture of components originating from the atmosphere, crust and mantle ultimate source is meteoric water—all these reflect the various hydrochemical processes in long-term run-off and deep circulation of groundwater.

**Key words:** geothermal water; hydrogeochemistry; origin analysis; Dezhou

**About the first author:** YAN Shi-qiang, male, born in 1973, PHD and senior engineer, presently engaged in the geological minerals strategic research work; E-mail: yshiqiang@mail.cgs.gov.cn.