

聊城市东部岩溶地热田地下热水 水化学特征及成因分析

张保健¹, 沈照理¹, 乔增宝², 开麟³

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 山东省第一地质矿产勘查院, 山东 济南 250014;

3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

摘要:通过对聊城市东部岩溶地热田的地下热水的化学成分、同位素及其水文地质特征的分析,对这一地区的地下热水的形成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的控制。本区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。 δD 和 $\delta^{18}O$ 的关系及氟(T)值和水化学特征系数说明为近代大气降水入渗起源的中度或高度变质水,以40年前的古水占优势,新近入渗水的补给量较小。水化学成分的形成以溶滤、溶解作用为主,微量元素成分丰富,反映了地下水经过了漫长和复杂的径流及深循环过程。

关键词:地下热水特征;成因分析;岩溶地热田;聊城市

中图分类号:P314.1

文献标识码:A

聊城市东部岩溶地热田的勘查和开发是胜利油田在20世纪70年代施工聊古1号石油地质勘探孔时发现地热异常而开始的。目前开发利用的地热井有3眼,其中聊古1号井主要用于地震水化站的地震观测,其余2眼用于房地产开发供暖和洗浴。该岩溶地热田地热资源丰富,在华北平原“古潜山”地热田中具有典型性,探讨其水文地球化学特征和地热成因机理,对同类地区岩溶地热资源勘查评价和开发利用具有指导意义。

1 地下热水的赋存环境

1.1 地质构造

聊城市东部岩溶地热田在地质构造部位上处于鲁中块隆与临清拗陷相接地带的鲁中块隆一侧,以聊(城)—(兰)考断裂为界,东、西分别为五级构造单元阳谷凸起(古潜山)和莘县凹陷,研究区即处在聊考断

裂东侧(下盘)的阳谷凸起内(图1)。

研究区地层以聊考断裂为界,东西部差异较大。据邻近钻孔揭露,莘县凹陷地层由老至新有新太古代变质岩系、寒武系、奥陶系、三叠系、侏罗—白垩系、古近系、新近系和第四系,其中新生界厚度可达数千米;阳谷凸起则由老至新发育有新太古代变质岩系、寒武—奥陶系、石炭—二叠系、新近系和第四系,其中新生界厚度一般不足千米,且缺失中生界和古近系。

控制本研究区地热田的断裂主要为聊考断裂和在平断裂,分别为地热田的西、东边界。其中聊考断裂是一条规模宏大的深大断裂,断裂两侧地壳块体断距达4~6 km。断裂自中生代强烈活动以来,对西侧拗陷和东侧隆起的发育起控制作用,古近纪活动强烈,在聊城一带断距达3 000~4 000 m;新近纪继续活动,断距达600~1 200 m;第四纪仍有活动显示^[1];聊考断裂带附近是地震多发区,在1502—1948年间,仅5级以上地震就发生过6次,表明该断裂是现代仍在活动的

第一作者简介:张保健(1973—),男,博士研究生,从事水工环地质勘查及研究工作。E-mail:baojianzh@sohu.com。

收稿日期:2009-04-03

慢,地下热水呈弱中性及碱性(pH 为 6.80~7.80);地下热水的 TDS 为 5.3 g/L,变质系数 r_{Na}/r_{Cl} 为 0.78~0.80,苏林水型为 $MgCl_2$ 型,舒卡列夫分类为 $Cl \cdot SO_4-Na \cdot Ca$ 水,这既不同于氧化环境水交替较强区的低 TDS(一般小于 3 g/L),低变质(r_{Na}/r_{Cl} 一般大于 2),苏林水型为 $NaHCO_3$ 型,又不同于还原环境水交替滞缓区的高 TDS(一般大于 10 g/L),高变质(r_{Na}/r_{Cl} 一般小于 1),苏林水型为 $CaCl_2$ 型,反映了研究区地下热水系统为较封闭的弱氧化—还原环境水交替滞缓区。

3.2 地下热水水化学成分的形成

研究区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。

3.2.1 溶滤作用

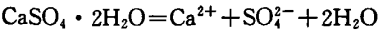
溶滤作用是地下热水系统化学成分形成的主要水化学作用。地下热水中 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 $HSiO_3^-$ 、 Sr^{2+} 等离子浓度增高主要是溶滤作用的结果。

奥陶系热储石灰岩、白云岩地层中膏盐含量较大,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,导致地下热水中 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度增大。

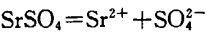
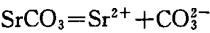
表 1 聊城东部岩溶地热田地下水水化学特征

Tab.1 Hydrochemical characteristics of hot spring in karst geothermal field, east Liaocheng

离子	含量/mg/L	项目	含量/mg/L	项目	含量/mg/L	
阳 离 子	K ⁺	57.50~57.68	TDS	5 292.7~5 321.79	银	<0.001
	Na ⁺	834.7~837.5	偏硅酸	37.7~41.57	钼	—
	Ca ²⁺	701.1~707.78	游离二氧化碳	6.46~41.38	铬	<0.004
	Mg ²⁺	148.45~154.0	锂	0.942~1.43	铁	0.046
	Al ³⁺	<0.2	铈	15.14~16.0	铅	0.003
	NH ₄ ⁺	0.50~0.80	溴化物	2.08~2.22	钴	<0.030
	总计	1 748.0~1 752.25	碘化物	<0.10	钒	<0.010
	HCO ₃ ⁻	160.4~171.95	铍	<0.010	钨	<0.001
阴 离 子	CO ₃ ²⁻	0.00	硒	<0.000 1	锰	0.037
	Cl ⁻	1 617.17~1 657.4	铜	<0.020	镍	<0.030
	SO ₄ ²⁻	1 680.2~1 745.2	偏硼酸	<0.02	挥发性酚	<0.001 5
	F ⁻	3.90~4.0	汞	<0.000 1	氰化物	<0.001
	NO ₃ ⁻	<0.4~0.66	镉	<0.005	亚硝酸盐	<0.002
	总计	3 504.8~3 540.54	偏硼酸	8.00	耗氧量	1.22
	肉眼可见度: 无色度:<5 度 浑浊度:<2 度 臭和味:无	总硬度 mg/L(以 CaCO ₃ 计):2 384.8 总碱度 mg/L(以 CaCO ₃ 计):131.56 总酸度 mg/L(以 CaCO ₃ 计):47.06	226Ra:3.35×10 ⁻¹ Bq/L 总β:2.27 Bq/L 总α:0.845 Bq/L Rn:8.16×10 ⁻¹ Bq/L 偏磷酸 pH 值 <0.02 6.8~7.8			

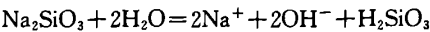
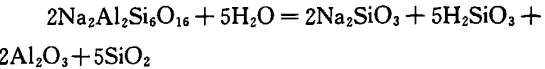


地下热水流动缓慢,在漫长的水—岩相互作用过程中,热储含铈的石灰岩中碳酸盐和硫酸盐矿物充分溶解形成 Sr^{2+} 。另一方面, Sr^{2+} 的浓度与 SO_4^{2-} 浓度呈正相关关系,热水溶液 SO_4^{2-} 浓度高, Sr^{2+} 的浓度也高^[3]。



H_2SiO_3 的溶解度与温度、pH 呈正相关关系。研究区寒武—奥陶系热储底部为新太古代花岗岩片麻岩,深循环的地下热水长期溶滤热储底部富含正长石的

花岗岩片麻岩,使正长石分解为高岭土、其它硅酸盐及可溶性 SiO_2 。在较高温度和弱碱性介质作用下形成较高浓度的 H_2SiO_3 地下热水。



3.2.2 易溶盐溶解

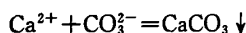
易溶盐溶解是地下热水化学成分形成的重要作用。本区海相沉积的寒武—奥陶系石灰岩、白云岩热储含有石膏等易溶盐类。在热储温度作用下,易溶盐溶解度增大,使地下热水中 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 Br^- 、 I^- 、

K^+ 、 Na^+ 等离子浓度增大。

根据陶维屏等人的研究,华北板块北东向和东西向基底断裂控制了中奥陶世的石膏沉积,这些深大断裂有可能是地下热卤水上溢的通道^[4]。因此,本区地下热水中 Cl^- 、 Br^- 、 I^- 、 K^+ 、 Na^+ 等离子含量较高及石膏的形成还可能与聊考深大断裂导通深部热卤水有关。

3.2.3 沉淀作用

补给区含有 Ca^{2+} 及 CO_3^{2-} 的地下水,在径流过程中,遇到含石膏的热储,结果使石膏溶解,增大了 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度。同时,因同离子效应及热储温度的共同作用产生 $CaCO_3$ 沉淀。



长期沉淀作用的结果使 Ca^{2+} 浓度与 SO_4^{2-} 相差悬殊。研究区地下热水pH值 < 8.3 ,决定了 CO_3^{2-} 含量甚微或无。

一般说来,当地下热水的含水层岩性为碳酸盐岩时,由于热水中溶滤的 Ca^{2+} 较多,导致水中 F^- 浓度较低。而本区地下热水中 F^- 含量却相对较高,这可能有三个原因:一是因为在本区寒武—奥陶系的下部为太古界黑云母角闪花岗岩及片麻岩,而黑云母和角闪石中的氟含量较高,深循环的地下热水长期溶滤热储下部的黑云母角闪花岗岩及片麻岩,使其中的氟盐和氟硅酸盐矿物发生溶解和水解,聊古1井揭露黑云母角闪花岗岩及片麻岩30.72 m,这可能是该孔 F^- 含量较高的主要原因;二是因为聊考断裂沟通了深部热源,地下热水经过深循环,不断被加热,在此过程中使含氟矿物的溶解度增大;三是因为由于奥陶纪石灰岩和白云岩中膏盐含量较大,且有石膏夹层,由于石膏的溶解,导致水中钙离子的增大,致使 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 沉淀生成碳酸钙,而促使萤石的溶解。

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和溶液的离子强度(μ)定量表征了水化学成分变质程度。经计算本区地下热水的计算值为:强酸根与弱酸根的比例系数为15.75~16.04, μ 值为0.21。根据强酸根与弱酸根的比例系数和 μ 值分类的水质变质程度分类方案^[5],该区地下热水应属中度或高度变质水。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 $CaCO_3$ 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,而阳离子逐渐由以 Ca^{2+} 为主演化为以 Na^+ 为主。

4 地下热水的成因分析

本区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 地下热水古水文地质条件分析

根据柳忠泉等人的研究^[6],阳谷凸起主要形成于印支期。早寒武世至中奥陶世,本区为海侵盆地,聊古1井揭示石膏岩层5层共5.5 m,说明本区该时期曾出现过蒸发台地环境,地下水高度盐化。中奥陶世末期发生的加里东运动使本区整体抬升,缺失上奥陶统一石炭统,遭受了长达13 Ma的风化剥蚀和淋滤,地下水系统由盐化水被大气降水入渗混合和交替成为淡水。中石炭世开始,本区整体下降,海水时进时退,地下水向盐化方向转化。早、中三叠世,本区发育了河湖相为主的陆源碎屑岩系,盐化水开始淡化。晚三叠世,随着聊考断裂的产生,阳谷凸起开始形成。印支期本区进入以抬升为主的构造发展阶段,陆台上升,中下三叠统剥蚀殆尽,且其高部位上古生界也遭受一定程度的剥蚀,构成开启型水文地质构造系统,盐化的地下水为入渗水所置换替代,成为岩溶—裂隙型淡水。燕山期聊考断裂继续活动,阳谷凸起基本定型,并产生大量次级断层,使岩层内岩溶裂隙系统发育,形成大气降水入渗水。古近纪聊考断裂表现为强烈的差异升降运动,相对上升的上升盘地层继续遭受剥蚀,靠近聊考断裂部位剥蚀严重,其中聊古1井附近石炭—二叠系已剥蚀殆尽。新近纪至今,阳谷凸起接受沉积,被新近系和第四系覆盖,形成埋藏封闭系统,但地下热水补给区含水岩系裸露地表,接受大气降水补给,形成近代大气降水入渗起源的变质水。

4.2 地下热水化学成分特征系数及水文地球化学分析

化学成分特征系数是指能够表征地下水成因类型和地下水化学成分形成和演化过程中各种化学和生物化学变化特征的化学组分之间的比例系数^[7]。利用化学特征系数结合具体水文地质条件(表2),可判断阳谷凸起地下热水的成因和化学成分的来源。阳谷凸起地下热水含水岩系由海相沉积的石灰岩、白云岩组成,赋存其间的原始水体源于海水。因此地下热水应反映海水的化学成分特征或者保留古海水的某些

成分的痕迹。从表2看出,本区地下热水中 r_{Na}/r_{Cl} 值略低于海水,说明本区地下热水所处环境比较封闭;而 Cl/Br 、 r_{Ca}/r_{Cl} 、 $(r_{SO_4} \times 10^2)/r_{Cl}$ 值明显大于海水,说明大气降水逐渐淋滤沉积水,演化形成渗入起源的溶滤水。本区地下热水 $(r_{SO_4} \times 10^2)/r_{Cl}$ 值偏高,这可能与本区石膏岩层的溶解有关。

表2 聊城东部岩溶地热田地下水化学特征系数及同位素组分

Tab.2 Chemical characteristic coefficient of and isotope composition of the hot spring in karst geothermal field, east Liaocheng

特征系数	名称	海水	本区地下热水
	r_{Na}/r_{Cl}	0.85	0.78~0.80
	Cl/Br	297	728.45~796.83
	Ca/Sr	53	44.24~46.31
	r_{Mg}/r_{Ca}	5.2	0.35~0.36
	r_{Ca}/r_{Cl}	0.004	0.75~0.77
	r_{Mg}/r_{Cl}	0.29	0.27
同位素	$(r_{SO_4} \times 10^2)/r_{Cl}$	10.2	74.98~80
	δD		-72.8~-80.67
	$\delta^{18}O$		-9.2~-9.46
	T(TU)		6.15

微量元素的富集受围岩、地下热水循环交替条件及水文地球化学环境条件的制约,本区地下热水中含有丰富的微量元素,表明本区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。

4.3 地下热水的同位素分析

从图3看出,本区地下热水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 均分布在克雷格大气降水线附近,表明地下热水由大气降水补给。氧同位素有漂移,说明地下热水与围岩发生了交换反应。根据法国J. Ch. 丰特的经验估算结果:氟(T)=0~5TU表明40年以前的“古水”占优势;T=5~40TU表明新近入渗水和古水之间有混合作用;T>40TU表明新近入渗水占优势。本区地热水T含量为6.15TU,推测本区地下热水为新近入渗水与古水的混合水,其中40年前的古水占优势,新近入渗水的补给量较小。

4.4 地下热水的成因模式分析

阳谷凸起地下热水埋藏于中、新生代沉积盆地,赋存于寒武—奥陶系岩溶—裂隙热储,为传导对流型地下热水。

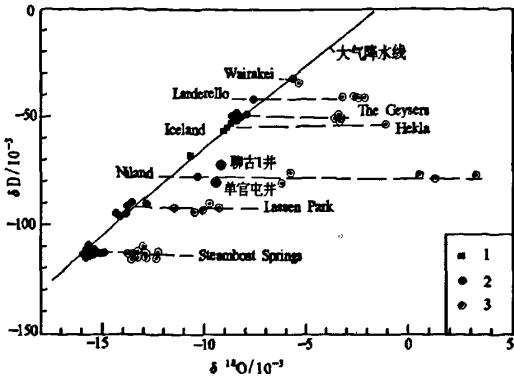


图3 聊城东部岩溶地热田 $\delta D-\delta^{18}O$ 关系图

Fig.3 The relationship between δD and $\delta^{18}O$ of karst geothermal field in east Liaocheng

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

地热田在阳谷凸起及其中的断裂构造呈层状兼带状分布,受聊考断裂等凸起边缘断裂构造控制。深部热源沿聊考断裂等凸起边界深大断裂传导,东部鲁中山区的大气降水经过长途径流,在聊考断裂带通过深循环被对流加热,沿途和在聊考断裂带与围岩发生水—岩反应,溶解了大量元素成分,形成地下热水(图4)。

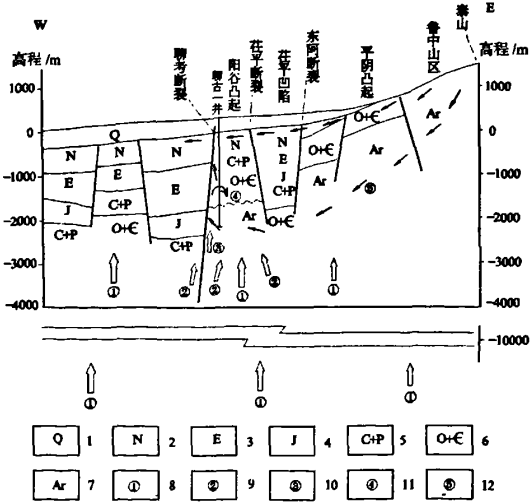


图4 聊城东部岩溶地热田地下热水成因模式图

Fig.4 Origin mode chart of the hot spring in karst geothermal field, east Liaocheng

- 1. 第四系;2. 新近系;3. 古近系;4. 侏罗系;5. 石炭—二叠系;6. 寒武—奥陶系;7. 新太古代变质岩系;8. 地壳深部均一传导热流;
- 9. 热流向热传导率高的凸起区集中;10. 深循环热水沿断裂带上涌;11. 局部水热对流;12. 地下水流动方向

钻孔测温资料表明,聊考断裂带内地温梯度为 $5.3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 左右,比断裂带周边地区高 $2.0^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 左右,说明聊考断裂为一控热构造。据地震、石油部门资料^[8,9],聊考断裂带为氮异常带,说明聊考断裂带曾经作为幔源氮气向上运移的通道,有可能导通深部热源。由于岩石热导率的差异,来自地球内部的较均一的热流在传导过程中,于地壳浅部再分配,局部地由凹陷区向凸起区集中,形成阳谷凸起局部的地热异常。另外该断裂是现代仍在活动的新构造活动带,其断层摩擦热也是本区热源之一。

5 结 论

本区地下热水为受聊考深大断裂构造控制的深循环低温热水,为近代大气降水入渗起源的中度或高度变质水,以 40 年前的古水占优势,新近入渗水的补给量较小。本区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,水化学类型属 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4 - \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 水,地下热水中锶、偏硅酸、氟、锂等微量元素丰富。

本区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。地下热水成为传导对流型,深部热源沿聊考深大断裂等传导,形成阳谷凸起局部的地热异常,在寒武—奥陶系灰岩及白云岩热储内对流形成地下热水。

参考文献

- [1] 王学潮,向宏发. 聊城—兰考断裂综合研究及黄河下游河道稳定性分析[M]. 郑州:黄河水利出版社,2001.
- [2] 沈照理. 水文地球化学基础[M]. 北京:地质出版社,1983:135.
- [3] 文冬光. 水—岩相互作用的地球化学模拟理论及应用[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1998.
- [4] 陶维屏. 中国非金属矿床成矿系列[M]. 北京:地质出版社,1994:261—265.
- [5] 陈静生. 水环境化学[M]. 北京:高等教育出版社,1987:83—84.
- [6] 柳忠泉,纪晓东,逢建东. 在平构造带古生界原生油气勘探前景[J]. 石油实验地质,1999,21(1):48—49.
- [7] 汪集旸. 中低温地热流体对流型地热系统[M]. 北京:科学出版社,1993.
- [8] 国家地震局华北地球化学背景场课题组. 华北地震水文地球化学研究[M]. 上海:上海科学技术文献出版社,1989:153—154.
- [9] 鲁雪松,鲁红利,蒋有录,等. 东濮凹陷兰聊断裂带流体活动的证据[J]. 断块油气田,2007,14(2):12—13.

Analysis on hydro-chemical features and origin of the hot spring in karst geothermal field, east Liaocheng city

ZHANG Bao-jian¹, SHEN Zhao-li¹, QIAO Zeng-bao², QI Lin³

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. No. 1 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Jinan, Shandong 250014, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on the analysis of chemical composition, isotopes and hydro-geologic features of the hot spring in karst geothermal field, east Liaocheng city, the origin and evolution of the hot spring were studied in the paper. The results show that the formation of the hot spring is controlled by deep faults and basement structure. And it is the consequence of natural comprehensive function during a long geological history. The hot spring is moderate or high degree metamorphic water originated from the infiltrating modern meteoric water, among which forty-years old ancient water dominates, while the now water is less, which can be explained by the relationship between δD and $\delta^{18}\text{O}$ and tritium (T) values and coefficient of hydro-chemical characteristics. The formation of hydrochemistry ingredient is primarily leaching and dissolving, and the trace element ingredient is rich, which reflect that the groundwater passed through a long and complex runoff process cycle.

Key words: features of hot spring; analysis on the origin; karst geothermal field; Liaocheng city