

## 山东省深部岩溶热储地热水同位素特征分析

王成明, 杨询昌, 徐勇, 王悦琪

(山东省鲁北地质工程勘察院, 山东 德州 253015)

**摘要:**通过现场调查并对不同类型深部岩溶热储地热水进行采样,测定其 $\delta D$ , $\delta^{18}O$ 稳定同位素与 $^{14}C$ 放射性同位素,对全省深部岩溶热储地热水成因、年龄、热储性质及水力联系等进行了分析。结果表明:山东省深部岩溶热储地热水属大气降水成因,其形成年代久远,补给途远,径流速度缓慢。同一构造单元的滨海-孤岛地区、齐河与聊城地区水力联系密切,其他地区水力联系较差。

**关键词:**深部岩溶热储;地热水;同位素;山东省

**中图分类号:**P632.7

**文献标识码:**A

同位素技术是核科学技术的重要组成部分,在地热流体补给来源和混合作用研究中,同位素地球化学方法的应用最为广泛,常采用的同位素有 $\delta^{18}O$ , $\delta D$ , $^{14}C$ 等。通过测定热水中的氢氧同位素指标,并与大气降水全球分馏线或地方分馏线进行对比,可判别地下水补给来源究竟是大气降水、岩浆水或海水;与 $^{14}C$ 测年指标相结合,可进一步判断热水的年龄或补给时期<sup>[1]</sup>。通过 $\delta^{18}O$ , $\delta D$ , $^{14}C$ 等同位素指标,对全省深部岩溶热储地热水成因、年龄、热储性质及水力联系等进行了分析,其研究成果对山东省深部岩溶热储地热水资源的合理开发利用及管理奠定了基础,具有重要理论意义和实用价值。

## 1 深部岩溶热储地热水地质特征

山东省在大地构造单元上隶属华北板块,沂沭断裂带自南而北将山东省分为鲁西与鲁东两大地质块体,深部岩溶热储可分为12个地热区,主要分布在沂沭断裂带以西的寒武-奥陶纪地层中,面积约4.4万 $km^2$ (图1)。热储顶板埋深一般500~3000 m,热储厚度300~1600 m,水温28.5~98.5 $^{\circ}C$ ,矿化度1~20 g/L不等(表1),热储代表性岩性为灰岩、泥质灰岩、白云质灰岩、白云岩、灰质白云岩及泥质白云岩与砂、页岩互层等,孔隙度一般1%~5%<sup>①</sup>。

**表1 不同地热区深部岩溶热储特征**

地热区	面积 ( $km^2$ )	顶板埋深 (m)	厚度 (m)	水温 ( $^{\circ}C$ )	矿化度 (g/L)
埕子口-宁津隆起地热区	1309.7	1000~3000	800~1300	62.5~98.5	3~10
沾化-车镇拗陷地热区	1325.8	1000~3000	200~1500	52.0~98.5	5~20
东营拗陷地热区	3040.3	500~3000	200~1500	39.0~98.5	3~20
惠民拗陷地热区	344.6	1000~1500	1000~1300	65.0~70.0	5~10
临清拗陷地热区	1216.1	1000~3000	1000~1500	67.0~98.5	2~20
泰山-沂山隆起地热区	9461.2	500~3000	600~1500	32.5~92.8	0.5~7
肥城-泰莱拗陷地热区	1365.6	500~2200	500~850	31.0~82.3	1~3
大汶口-蒙阴拗陷地热区	1316.0	500~1500	300~850	32.5~46.5	2~3
泗水-平邑拗陷地热区	2955.4	500~2500	300~1600	28.5~65.0	2~10
枣庄-韩庄拗陷地热区	1031.2	500~1500	500~1000	31.0~55.5	1~3
菏泽-兖州隆起地热区	16896.7	500~3000	500~1300	31.0~98.5	1~5
沂沭断裂带地热区	4094.4	500~3000	300~1200	39.3~84.3	1~3

## 2 稳定同位素

### 2.1 地热水来源

通过地热流体 $\delta D$ , $\delta^{18}O$ 同位素指标与大气降水分馏线进行分析,可判别地热水的来源成因。山东大气降水稳定同位素检测数据相对较少,故该次以中国大气降水线方程(图2)进行分析。图中直线为

\* 收稿日期:2012-10-11;修订日期:2012-12-25;编辑:曹丽丽

作者简介:王成明(1979—),男,甘肃敦煌人,工程师,主要从事水工环地质工作;E-mail:chmwang2562@163.com。

①山东省鲁北地质工程勘察院,杨询昌等,山东省深部岩溶热储研究报告,2012年。

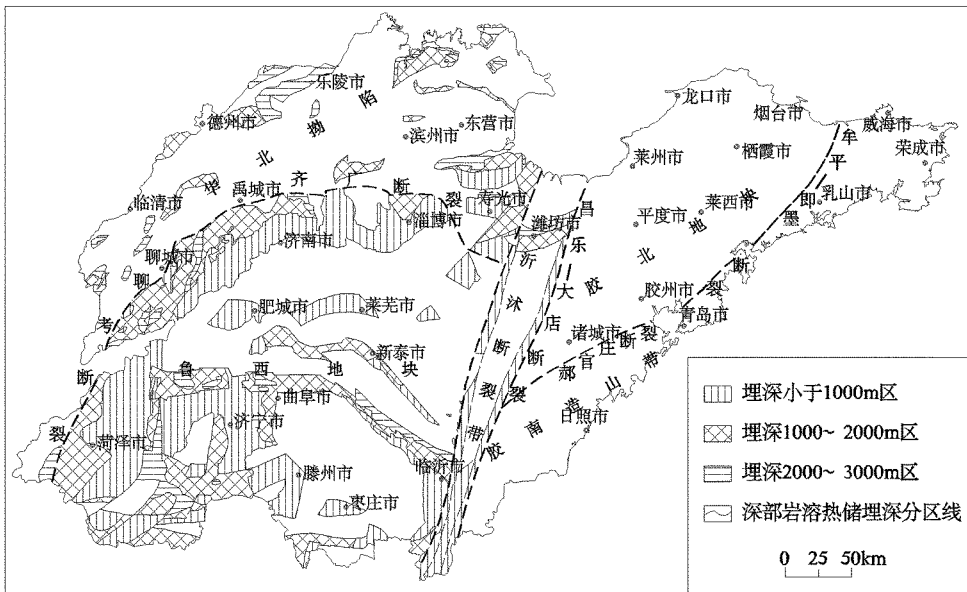


图 1 山东省深部岩溶热储埋藏分布图

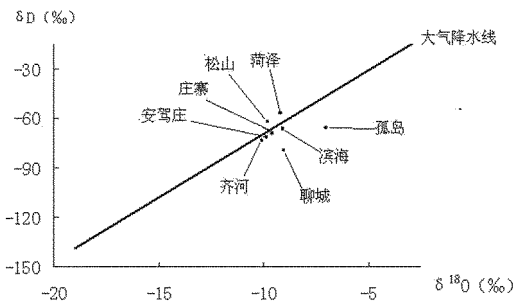


图 2 大气降水线与地热热水样  $\delta D-\delta^{18}O$  关系图

中国大气降水线,其方程表达式为: $\delta D=7.7\delta^{18}O+7.5$ ,它表明中国大气降水的同位素组成点应大致沿这条直线分布。

表 2 为山东深部岩溶热储地热水稳定同位素监测资料,将表中  $\delta D, \delta^{18}O$  同位素绘至中国大气降水线上(图 2)。由图 2 可以看出,山东省深部岩溶地热水中的  $D, ^{18}O$  组成点均位于中国大气降水线( $\delta D=7.7\delta^{18}O+7.5$ )附近,因此可以判定区内深部岩溶地热水通过深循环在地温作用下加热形成,均为现代大气降水来源,也就是间接获得大气降水补给,属大气降水成因。图中大部分  $\delta D, \delta^{18}O$  同位素组成点稍位于大气降水线之下,表明这些地区深部岩溶热储地热水后来在漫长的地质年代中,接受了下部地层中蒸汽的稀释作用。孤岛、聊城地区,地热水中  $\delta D, \delta^{18}O$  同位素组成点离大气降水线较远,氧漂移

较明显,表明该地区深部岩溶地热水受蒸气稀释作用更加强烈或与大气降水的密切程度较其他地区稍低,这也是孤岛、聊城地区热水温度较高的主要原因。而与孤岛处于同一构造单元的滨海乡,地热水中  $\delta D-\delta^{18}O$  稳定同位素组成点却距大气降水线较近,这可能是该井成井时间较长,井壁上受腐蚀损坏并混入部分浅层凉水原因(因为该井目前水温仅  $39^{\circ}C$ ,与成井时温度存在一定差异)。菏泽、松山地区深部岩溶热储地热水  $\delta D, \delta^{18}O$  同位素点位于中国大气降水线之上,表明该地区深部岩溶地热水的来源为大气降水,受蒸发浓缩及蒸气稀释的影响相对小。

表 2 地热流体同位素组分

地热区	取样位置	$\delta D\%$	$\delta^{18}O\%$	$^{14}C$	
				现代碳百分数(%)	表观年龄(ka)
鲁西北拗陷地热区	滨海	-66	-9.1	$3.04 \pm 0.34$	$28.87 \pm 0.92$
	齐河	-73	-10.1	$8.19 \pm 0.45$	$20.68 \pm 0.46$
鲁西南潜隆起地热区	聊城	-79.55	-9.05	$5.19 \pm 0.40$	$24.45 \pm 0.64$
	菏泽	-57	-9.2	$6.20 \pm 0.44$	$22.99 \pm 0.59$
	庄寨	-69	-9.6		
	孤岛	-65.68	-7.03		
鲁中南地热区	安驾庄	-71.6	-9.84	$53.02 \pm 2.65$	$5.25 \pm 0.42$
沂沭断裂带地热区	铜井		-9.37	$67.40 \pm 1.18$	$3.26 \pm 0.15$
	松山	-61.55	-9.82		

## 2.2 热储性质及水力联系分析

地热水都不同程度地存在氧漂移,  $\delta^{18}O$  同位素

难以真实地刻画地热水的运移规律,因此以下利用 $\delta D$ 稳定同位素对地热水的运移情况进行分析。由表2中各地热区的稳定同位素 $\delta D$ 可知:处在沾化-车镇凹陷同一构造单元内的滨海乡与孤岛镇深部岩溶热储地热水 $\delta D$ 值(滨海:-66,孤岛:-65.68)相差不大,这说明其水力联系密切,属同一来源,这也反映了同一介质性质的热储层,其沉积结构、沉积环境、水赋存和运移条件、补给条件都极为相似;齐河与聊城热储地热水 $\delta D$ 值也比较接近,说明其水力联系也较密切。除上述地区外,其他地区深部岩溶热储地热水稳定同位素 $\delta D$ 组分与年龄均有一定差别,说明这些地区深部岩溶热储水力联系较差,热水沉积环境、赋存和运移条件、补给条件等均存在一定差异。

### 3 放射性同位素

目前,水文地质条件研究中常用的放射性同位素方法有氡和 $^{14}C$ 测年法<sup>[2,3]</sup>。 $T$ (氡)的半衰期为12.26 a,而 $^{14}C$ 的半衰期为(5 730 $\pm$ 40)a,因此前者适于研究浅层年龄较小的地下水,后者则适于研究深层年龄较大的地下水,因此常用 $^{14}C$ 法研究地热水的运移机制<sup>[4-6]</sup>。

区内深部岩溶热储地热水埋藏较深,年龄较老,因此采用 $^{14}C$ 测定地下水的年龄较为准确。根据该次 $^{14}C$ 同位素分析测试结果(表2)可以看出:山东省深部岩溶热储地热水年龄一般均在3 000 a以上,最长约2.88万 a,不同地区年龄并不完全相同,鲁西北拗陷地热区深部岩溶热储地热水年龄最长,鲁西南潜隆起地热区次之,鲁中南带状兼层状热储年龄最短。其年龄的差异主要是由补给距离的远近及沉积环境的不同造成的,这反应了区内深部岩溶热储地热水主要来源于鲁中及南部山区,地热水区域总体流向是由西南流向东北。不同地区地下水年龄与深度关系如图3所示。

由图3可以看出,区内铜井、安驾庄深部岩溶热储地热水年龄远远低于其他地区深部岩溶热储地热水年龄,说明该地区深部岩溶热储地热水补给路径较近,地热水运移速度较快,水交替相对频繁,这与铜井、安驾庄均处在鲁中山区,在空间上典型的带状热储特征,热储埋藏浅,岩溶裂隙及断裂构造发育等实际情况完全相符。齐河、聊城、菏泽、滨海地区深

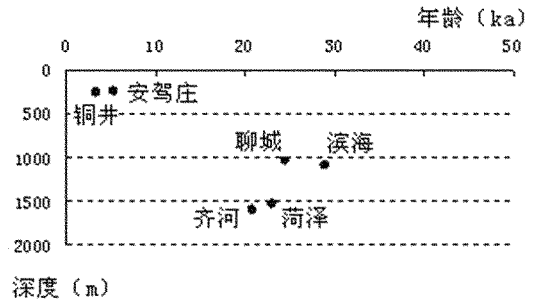


图3 地热水年龄与深度关系图

部岩溶热储埋藏较深(>1 000 m),其地热水年龄均在2 2000年以上,属古老水,说明地下热水深埋越深,地热水年龄越大,同时也说明该地区深部岩溶热储地热水运移速度缓慢,水交替条件较差。特别是处在远离补给区的滨海地区,深部岩溶热储地热水补给路径最长,地下水径流缓慢,因此其深部岩溶热储地热水的形成年龄最长。由于 $^{14}C$ 分析水样的采集过程或多或少地要与现代大气接触,现代大气中的 $CO_2$ 进入所采集的水样中,使所测年龄要远小于地下水的实际形成年龄。由此可见,区内深部岩溶地热水的形成年代久远,其补给途径长,径流速度缓慢。

垂向上,一般处在同一构造单元的同一热储地热水年龄会随着深度的增加而增加。图3中处在同一构造单元的齐河、聊城深部岩溶热储地热水年龄并不随深度增加而增加;相反,深度较大的齐河地热水年龄还较聊城地区小。这是因为齐河距南部山区较近,同时也说明了地热水的运移方向为东南向西北,即齐河、聊城地热水的补给源来自东南部鲁中南山区。

### 4 结语

(1)研究区深部岩溶热储地热水成因为大气降水。

(2)研究区滨海与孤岛地区,齐河与聊城地区深部岩溶热储沉积结构、沉积环境、水赋存和运移条件、补给条件相似,其热储地热水水力联系密切,分属同一来源,其他地区深部岩溶热储水力联系较差。

(3)研究区深部岩溶热储地热水形成年龄为0.326万~2.88万 a,其形成年代久远,补给途径长,径流速度缓慢;处在同一构造单元的深部岩溶热储埋藏越深,地热水年龄越长,且在垂向上随着深度的增加而增加,遵循天然的埋藏规律。

**参考文献:**

- [1] 张保建,徐军祥,马振民,等.运用 H、O 同位素资料分析地热流体补给来源[J].地质通报,2010,29(4):125-131.
- [2] 满开言.用环境同位素氧 18、氘、氡探讨地下水运动规律[J].北方交通大学学报,1994,18(1):50-55.
- [3] 顾慰祖,陆家驹,谢民,等.乌兰布和沙漠北部地下水资源的环境同位素探讨[J].水科学进展,2002,13(3):326-332.
- [4] 周廷强,林健旺,高宝珠,等.放射性同位素<sup>14</sup>C 在地热研究中的应用[J].焦作工学院学报,2003,22(3):21-24.
- [5] Wang K,Zhu L. A conceptual model of the Timaji-geothermal system based in isotopic studies[J]. Techno-logies Sciences (SeriesE), 2001, 44 (Supplement):160-164.
- [6] 张涛.胶东温泉地热水水化学及同位素特征研究[J].山东国土资源,2011,27(12):15-20.

## Study on Isotopic Characteristics of Deep Karst Geothermal Water in Shandong Province

WANG Chengming, YANG Xunchang, XU Yong, WANG Yueqi

(Lubei Geo-engineering Exploration Institute, Shandong Dezhou 253015, China)

**Abstract:** Through investigation and collecting samples of different deep karst geothermal water, isotope  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$  and radioactive isotope <sup>14</sup>C have been determined, and the origin, age, property of geothermal reservoir and hydraulic connection have been analyzed. It is showed that the origin of deep karst geothermal water in Shandong is air precipitation. Its formation age is antique, recharge way is long and runoff velocity is slow. Hydraulic connection of the same strucute in coastal area and lonely island zone, Qihe and Li-aocheng area is very close, while it is weak in other places.

**Key Words:** Deep karst thermal reservoir; geothermal water; isotope; Shandong province