

穆慧敏、黄春玲、常姣等,2019,山西省 4 口井(泉)水化学特征与水氡映震效能研究,中国地震,35(4),654~665.

# 山西省 4 口井(泉)水化学特征 与水氡映震效能研究

穆慧敏<sup>1,4)</sup> 黄春玲<sup>2,4)</sup> 常姣<sup>2,4)</sup> 杨静<sup>3,4)</sup>  
李民<sup>2,4)</sup> 姚林鹏<sup>2,4)</sup> 张文男<sup>2,4)</sup>

- 1) 山西省地震局,太原 030025
- 2) 山西省地震局夏县中心地震台,山西夏县 044400
- 3) 山西省地震局临汾中心地震台,山西临汾 041000
- 4) 太原大陆裂谷动力学国家野外科学观测研究站,太原 030025

**摘要** 对山西 4 口水化学观测井(泉)及周边地表水进行水化学和氢氧同位素分析,利用 Piper 图、durov 图、Na-K-Mg 三角图等方法研究其水化学特征及成因,得出井(泉)水岩平衡程度、热储温度、地下水循环深度及地下水补给来源详情;分析了井(泉)水氡测项映震特征,应用水氡映震效果与水岩平衡程度、地下水循环深度表现出的特征,评价了地震监测效能。评价结果显示夏县井、奇村井优于临猗井,适于开展地震水化学观测;定襄泉应用该水化学方法评价尚存不足之处,需要探索适用于该类观测泉点的物理与化学相结合的评价方法。

**关键词:** 井(泉) 水化学 水氡 地震监测

[文章编号] 1001-4683(2019)04-0654-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

在地震地下流体观测中,地下水的补给来源、循环与演化等水文地质环境特征,是分析地下流体前兆信息的基本依据;同时地下流体组分和同位素组成的变化与地下应力和构造活动等有着密切关系,能够灵敏地反映地壳的应力、应变状态及地震活动。研究地下流体化学特征变化与地震的关系,在地震预测、震后趋势判断及异常核实方面具有重要意义。目前,在地下水的补给、循环与演化等方面的研究中,水化学、环境同位素和地下水测年等方法越来越成为有效的研究手段。采用这些方法对地下流体观测点的水文地质环境开展研究和评价,探讨观测点地下水的补给来源和循环演化特征,为分析地震地下流体前兆信息提供重要的参考依据和基础信息(张国盟,2015;汪成民,1991)。同时,将水化学和同位素示踪方法应

[收稿日期] 2019-05-21; [修定日期] 2019-07-31

[项目类别] 中国地震局“监测、预报、科研”三结合项目“山西流体观测井水化学特征与监测效能评价指标研究”(3JH-201902011)和山西省地震局科研项目(SBK-1830)共同资助

[作者简介] 穆慧敏,女,1981年生,工程师,主要从事地震监测与数据分析工作。E-mail:469764337@qq.com  
黄春玲,通讯作者,女,1973年生,高级工程师,主要从事地震前兆监测与资料分析工作。  
E-mail:422715413@qq.com

用于地震地下流体监测点的相关研究,对于地下流体地震前兆信息的评估、流体在地震孕震过程中作用的探讨以及井孔的映震效能评估等方面具有重要的科研和应用价值(刘耀炜等,2009;张磊等,2014;张国盟等,2015)。

目前,山西地下流体台网有 19 个台站开展了水物理及水化学观测,其中 4 个台站开展水化学观测,其余均为水物理台站,水化学观测始于 20 世纪 80 年代。水化台站包含山西南部运城盆地夏县台热水井、临猗热水井;山西北部忻定盆地定襄自流泉、奇村热水井。除临猗井未进入国家库外,其余 3 口井(泉)均进入国家库;除定襄台为自流冷泉外,其余均为热水井,并开展水氡、水汞等多种水化学观测项目。为完善井(泉)水化学基础信息,2018~2019 年陆续在山西地区系统采集了井(泉)水样,测试得到了离子浓度及氢氧同位素相关数据。本文通过对山西 4 口水化学观测井(泉)及周边地表水进行水化学和氢氧同位素分析,得出观测井(泉)水化学类型、水岩平衡状态、地下水循环深度相关研究结果;同时分析井(泉)水氡观测资料,以期将水岩平衡状态、地下水循环深度水文地质评价指标与水氡映震效能有效结合,尝试评价井(泉)的地震监测效能。

## 1 井(泉)测点水文地质概况

依据山西地堑活动性构造断裂的分布及地震活动性等特点,山西地下流体台站分别布设在各盆地山前主干断裂附近,盆地内台站较密集,两侧隆起区台站较稀疏。观测网内有多个独立的水文地质单元,各观测层主要以基岩裂隙承压水为主(图 1)。

夏县台热水井(以下简称夏县井)位于南山底村夏县地震台院内,处于夏县南山底地热田中心部位。构造上属于中条山北麓断裂带东段(夏县段)(杨静等,2019),为运城断陷盆地与中条山隆起的分界断裂。热水井建于 1982 年,井深 170m,出水口温度常年保持在  $(42.5\pm 0.5)^{\circ}\text{C}$ ,地下热水主要靠大气降水和基岩裂隙侧向补给,地下水从洪积扇的顶部向底部排泄,排入冲积平原,富水性较好。

临猗热水井(以下简称临猗井)位于猗氏镇里寺村南,处于猗氏地热田中心地带,地热田内没有基岩裸露,为第四系黄土覆盖。构造上属于峨嵋台地南缘断裂南侧,为运城断陷盆地与峨嵋台地隆起的分界断裂。热水井建于 1988 年 5 月,井深 48.92m,水温  $41.7^{\circ}\text{C}$ 。取水层为第四系下更新统( $Q_1$ ),取水层底层为第三系上新统( $N_2$ ),含水层厚度 18.25m。

定襄七岩泉(以下简称定襄泉)位于定襄县南王乡茶房口村七岩沟中,构造上位于忻定盆地定襄凹陷东南系舟山北麓断裂的南段。七岩泉属奥陶系灰岩喀斯特裂隙岩溶水,为具有承压性的上升泉。大气降水、岩溶裂隙水从褶皱南东翼较高部位补给、径流,在西北翼低处溢出。泉水水温约  $9.9^{\circ}\text{C}$ ,高于年平均气温(约  $8.9^{\circ}\text{C}$ ),泉水流量随季节的变化很大,枯水季节最小为  $0.9\text{L/s}$ ,雨季最高可达  $25.8\text{L/s}$ 。

忻州奇村地震台热水井(以下简称奇村井)位于奇村东,处于忻州奇村地热田中心部位。构造上属于金山凸起西缘断裂,为忻州断陷盆地金山凸起与原平凹陷的分界断裂。热水自基岩断裂破碎带涌出,进入松散层与冷水混合,形成水温-水氡散晕。热水运移形式为:大气降水在中低山区入渗补给后,通过断裂和基岩裂隙的深循环形成热水。地下水径流强烈,含水层渗透性较好。热水井井深 50.26m,成井时水温  $51.5^{\circ}\text{C}$ ,流量  $1.14\text{L/s}$ 。

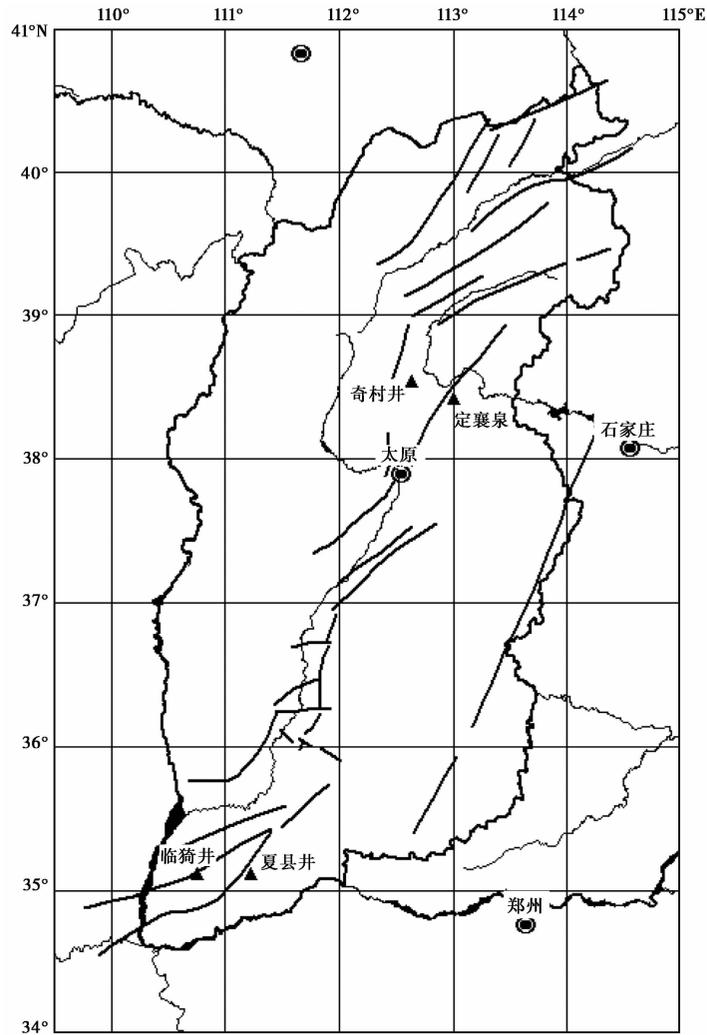


图 1 井(泉)位置分布

## 2 井(泉)离子成分及氢氧稳定同位素分析

### 2.1 样品采集及测试结果

2018 年 4 月~2019 年 4 月期间陆续对山西地下流体测点进行采样测试,样品容器采用 100ml、30ml 的聚乙烯瓶。取样时用井水将瓶子清洗 3 次后,直接装满水,排除顶空,避免空气对水样的影响,用封口膜缠紧瓶口。

各井(泉)2018~2019 年份的水化学项目由中国地震局地壳动力学重点实验室(地下流体动力学实验室单元)测定,水化学离子分析使用仪器为 ICS-2100 离子色谱仪,氢氧同位素分析仪器为 LWA-24-EP 氢氧同位素分析仪;其余年份的数据均通过查阅井(泉)历史资料获取。通过计算,每口井(泉)阴阳离子平衡校验误差( $R$ )值均小于 5%,说明测量结果可靠。表 1 为各井(泉)不同时期以及井(泉)周边地表水的水化学测试数据。

表 1 井(泉)水样测试结果

井(泉)名称	采样时间	水温 / $^{\circ}\text{C}$	主要离子含量/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )							$R$ /%	$\delta^2\text{H}$ / $\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}$ / $\text{‰}$	电导率 /( $\text{us}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	矿化度 /( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )
			$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$					
夏县井	1982	42.8	600	28.1	7.9	71.1	806.5	374.6	94.6	-1.9	—	—	—	—
夏县井	2018	41.5	570.3	26.2	3.4	50.1	573.4	341.5	148.3	3.1	-71.88	-9.62	3496	1746
夏县水库	2018	16.0	21.5	2.9	26.9	68.8	11.3	86.0	274.5	-1.1	-55.35	-8.05	605	302
临猗井	1988	41.7	674	6.2	37.7	86.2	826	532	177	0.8	—	—	—	—
临猗井	2019	42.0	687	6.9	58.1	103.7	810	509	209	3.4	-87.28	-11.76	5110	2560
定襄泉	2018	10.2	6.9	3.0	17.9	82.6	2.7	54.6	274.6	0.97	-73.63	-10.72	464	232
定襄泉	2019	10.6	4.3	1.3	15.5	73.6	4.5	42.1	256.3	-1.2	-73.42	-10.52	540	270
定襄泉辅助	2019	11.0	8.5	2.3	25.9	89.0	8.7	100.0	236.2	4.3	-64.99	-9.13	561	281
奇村井	2017	46.3	209.6	5.1	0.4	15.6	198.3	136.6	88.4	-2.9	-77.26	-10.45	—	—
奇村井	2019	39.5	217.9	5.6	0.19	17.9	209.1	152.4	79.3	-2.4	-80.50	-11.15	1555	775

注：“—”标注为无测量值数据、“定襄泉辅助”为定襄泉周边地表水采样；夏县井(1982)、临猗井(1988)、奇村井(2017)的数据取自于“山西省地震监测志”(山西省地震局,2006)及“山西地下流体台站基础信息手册”<sup>①</sup>。

### 2.2 水化学类型及特征分析

按照 Ca、Mg、Na-K 相对浓度和 Cl、SO<sub>4</sub> 及 HCO<sub>3</sub> 相对含量对表 1 中的水样数据绘制 piper 三线图及 durov 图(图 2,为便于绘制,图中化学元素均未添加离子符号)。从图 2 可以看出:①山西水化井、泉中的夏县井(1982、2018 年)、奇村井(2017、2019 年)、临猗井(1988、2019 年)的水化学类型较为接近,均位于 piper 图及 durov 图中“B”区域,水化学类型为 Cl·SO<sub>4</sub>-Na 型。其中夏县井、临猗井矿化度较大,分别为 1746mg/L 和 2560mg/L,根据李学礼等(2010)的分类,当矿化度在 1000~3000mg/L 时,可将其定义为微咸水。由此判定夏县井与临猗井的水并非大气降水的直接补给,而是经过一定时间补给后的水-岩相互作用和地下水的混合形成的,也可能反映了干旱、半干旱地区地下水补给过程中溶滤作用较强,使得 Cl 和 SO<sub>4</sub> 浓度相对富集(王丽等,2004),同时也反映地下水的循环深度、滞留时间或补给路径相对较大等特点。②定襄、定襄辅助及夏县水库位于 piper 图及 durov 图的“A”区域,水化学类型为 HCO<sub>3</sub>-Ca 型。具备典型的地表水特征,属于大气降水与岩石的初步反应阶段,由矿化度分析属低矿化度水。③夏县井、夏县水库水样的水化学类型差别较大,水库水属于地表水补给,说明夏县井与周边地表水无水力联系;定襄、定襄辅助(周边地表水)水化学类型较一致。

### 2.3 水-岩化学平衡特征分析

Na-K-Mg 三角图常被用来评价水岩平衡状态和区分不同类型的水样(Giggenbach,1988;苏鹤军等,2010)。图 3 为 10 个水样的 Na-K-Mg 三角图,图中曲线为矿物平衡线,由完全平衡线和部分平衡线把整个三角图分为完全平衡水、部分平衡水和未成熟水 3 个区域。

由图 3 可见,不同年代的夏县井、奇村井及临猗井均为部分成熟水,表明其地下水的补给来源除了大气降水外,还有较深层地下水的混入,水-岩反应相对较强,水流系统相对较为稳定,不易受到干扰;分析结果显示,夏县井 2018 年较成井时的 1982 年更接近部分成熟水

① 山西省地震局,2018. 山西地下流体台站基础信息手册. 内部交流资料.

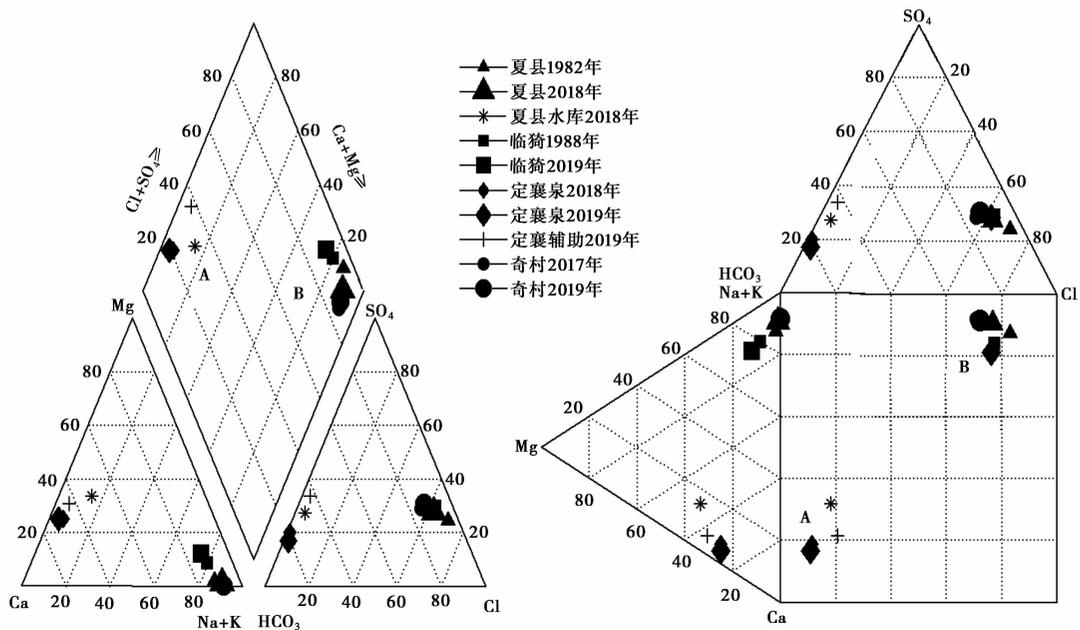


图2 水样的 piper 及 durov 图(单位:mg/L)

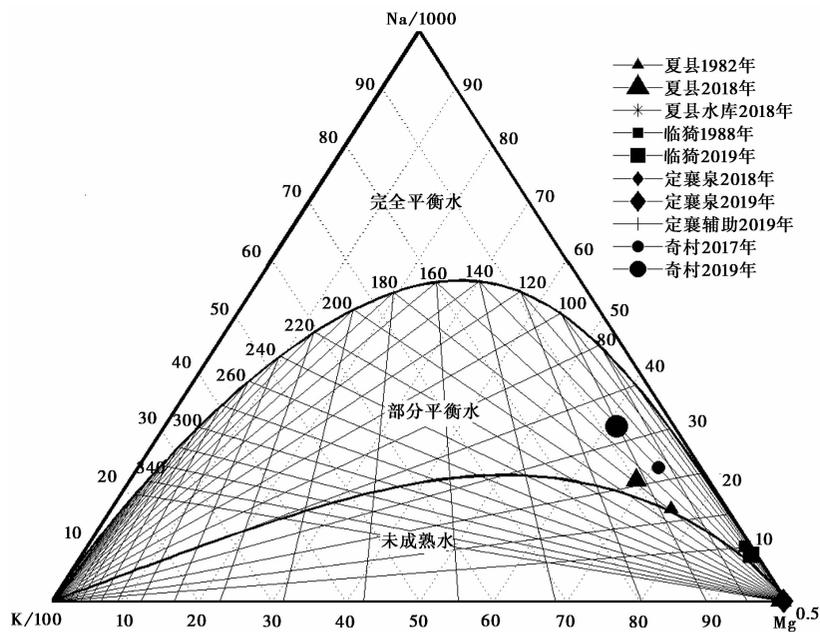


图3 水样的 Na-K-Mg 三角图(单位:mg/L)

区域,奇村井 2019 年较 2017 年更接近成熟水区域,说明随着时间的推移,夏县井、奇村井水岩反应程度在逐渐增强,临猗井较成井时变化特征不明显;定襄泉(含 2018、2019 年)、定襄辅助及夏县水库水属于未完全成熟水,水样几乎位于 Mg 端元附近,表明它们属于典型的地表水,其主要接受大气降水的补给,循环周期相对较快,水-岩之间尚未达到离子平衡状态,

水岩作用仍在进行。由图 3 还可以看出,夏县井的热储温度约位于 180℃ 线左右,奇村井的热储温约位于 140℃ 线左右,临猗井热储温度约位于 80℃ 以下。

**2.4 井(泉)热储温度估算**

热储温度是划分地下热水系统成因类型不可缺少的重要参数,地球化学温标是估算这一参数的有效方法。目前,地球化学温标的方法很多,所依据的理论原理与实际资料均不同,应用条件差异很大,受条件限制,文中仅讨论使用 Na-K 阳离子温标法计算热储温度。

Na-K 阳离子热储温度是利用地下水成分中阳离子之间的比值与温度之间的关系建立的温标方法,全部阳离子温标法均为经验性的近似方法,阳离子温标建立在阳离子交换反应的基础上,反应平衡常数随温度的改变而改变(刘永涛,2009)。由水样 Na-K-Mg 三角图(图 3)分析可知,夏县井、临猗井及奇村井均位于部分平衡水区域,因此可以采用阳离子温标法来计算温泉水的热储温度。

根据表 2 中的阳离子温标公式,计算夏县井、临猗井及奇村井不同时期的地下水热储温度。结果显示夏县井温度最高,约为 150.1℃,奇村井约为 111.2℃,临猗井温度较低,约为 63.0℃。计算出的地下水热储温度均低于上述估读的温度值,且同一井(泉)不同时期温度存在差别。热储温度计算详情见表 3。

**2.5 地下水的循环深度估算**

地下水的温度受其赋存与循环处的地温控制,根据地下水的温度可以大致推算地下水的循环深度(王大纯等,1980)。温泉井的循环深度可以根据温泉水的热储温度以及当地的地温梯度进行计算。当已知地下水水温( $T$ )、年平均气温( $t$ )、地温梯度( $r$ )和年常温带深度( $h$ )时,可以推算地下水的大致循环深度( $H$ ),即

$$H = \frac{T - t}{r} + h \quad (1)$$

计算循环深度所采用的地下水水温( $T$ )均以表 3 中井(泉)的最新数据(2018~2019 年测试)为准。

**表 2 Na-K 阳离子温标计算公式**  
(据刘永涛(2009)修改)

序号	公式
1	$T = \frac{856}{0.857 + \log(\text{Na/K})} - 273.15$
2	$T = \frac{883}{0.780 + \log(\text{Na/K})} - 273.15$
3	$T = \frac{933}{0.933 + \log(\text{Na/K})} - 273.15$
4	$T = \frac{1319}{1.699 + \log(\text{Na/K})} - 273.15$
5	$T = \frac{1217}{1.483 + \log(\text{Na/K})} - 273.15$
6	$T = \frac{1178}{1.470 + \log(\text{Na/K})} - 273.15$
7	$T = \frac{1390}{1.750 + \log(\text{Na/K})} - 273.15$

**表 3 井(泉)水样阳离子温标热储温度计算结果**

井(泉)名称	采样年份	温度结果/℃							平均值
		公式 1	公式 2	公式 3	公式 4	公式 5	公式 6	公式 7	
夏县井	1982	118.4	145.4	139.2	162.4	159.6	147.6	178.3	150.1
夏县井	2018	116.9	143.8	137.7	161.2	158.3	146.4	177.0	148.8
临猗井	1988	22.7	40.4	41.1	80.0	72.7	62.8	94.0	59.1
临猗井	2019	26.6	44.7	45.2	83.6	76.5	66.5	97.7	63.0
奇村井	2017	73.2	95.7	93.2	125	119.8	108.8	140.1	107.9
奇村井	2019	76.7	99.4	96.6	127.9	122.9	111.8	143.0	111.2

以往研究表明,夏县地区的年平均气温( $t$ )为 12.5℃,年常温带深度( $h$ )为 32m(李强, 2015),地温梯度( $r$ )为 4℃/100m(左海风,1998),当地下水水温( $T$ )为 148.8℃时,其最大循环深度为 3.44km;因临猗井与夏县井同位于运城盆地,两地气候相差不明显,计算参数均以夏县井为准,经计算,临猗井循环深度为 1.29km;奇村井位于忻州地区,该地区年平均气温( $t$ )为 8.7℃(李强,2017),年常温带深度( $h$ )取为 32m,地温梯度( $r$ )使用地壳平均地温梯度 3.0℃/100m,地下水水温( $T$ )为 111.2℃时,奇村井循环深度为 2.45km。表 4 为井(泉)地下水循环深度的计算结果。

表 4 井(泉)地下水循环深度计算结果

井(泉)名称	采样年份	参数及计算结果				
		水温 $T/℃$	气温 $t/℃$	地温梯度 $r/(℃/100m)$	常温带深度 $h/m$	循环深度 $H/km$
夏县井	2018	148.8	12.5	4	32	3.44
临猗井	2019	63.0	12.5	4	32	1.29
奇村井	2019	111.2	8.7	3	32	2.45

### 2.6 氢氧稳定同位素组成分析

地下水在其形成之后,经过蒸发、径流和水-岩相互作用等环节不断发生循环和演化,一般认为,氢氧同位素在上述过程中会发生动力分馏、与高温岩石等其它物质发生交换和反应,从而造成地下水样品中的氢氧同位素组成与大气降水线发生一定的偏离。因此,氢氧环境同位素作为示踪剂,可以用来分析地下水补给后的循环和演化特征。

地下水氢氧同位素的组成特征一般利用区域雨水线进行对比分析,由于降水的氢氧同位素组成受纬度效应、季节效应、大陆效应以及海拔效应等影响,不同地区、不同季节的大气雨水线各不相同。大气降水线引自 Craig(1961)给出的方程式  $\delta^2H = 8\delta^{18}O + 10‰SMOW$ ,其中  $\delta^2H$  为氢同位素实测比值, $\delta^{18}O$  为氧同位素实测比值,由水样测试结果可知井(泉) $\delta^2H$  的范围为  $-87.28‰ \sim -55.35‰$ , $\delta^{18}O$  的范围为  $-11.76‰ \sim -9.13‰$ 。

图 4 给出水样氢氧同位素与全球大气降水线的关系,其结果可以用来说明井(泉)测试样品的来源及其相互转化关系。由图 4 可见,不同年代的定襄泉水样测试数据差别不大,但较大气降水线略向左偏移,位于大气降水线上方,说明地下水存在与  $CO_2$  的交换作用,这与该处为灰岩含水层富含  $CO_2$  有一定的关系;夏县、临猗及奇村井氢氧同位素数据均略位于全球大气降水线右侧,显示为  $O_2$  富集,表明其来源除大气降水补给外,还可能存在其它深部补给源,由表 1 数据可见,夏县井、临猗井、奇村井的电导率及矿化度数值均较大,说明水-岩反应较充分,因此温泉井的氧漂移很可能主要是在地下水和周围岩石相互作用的过程中发生的,从而导致地下水中的氧同位素与周边岩石发生了交换;夏县水库及定襄泉辅助完全位于大气降水线上,表明其来源全部为大气降水补给。

## 3 井(泉)地震监测效能评价

水氡、水位等映震效能与地下水的补给来源、循环深度、水-岩反应程度等是否有关,仍是亟需研究的科学问题之一。本文通过对比分析 4 口井(泉)水氡观测资料,采用已发生的地震样本对水氡观测资料进行预测效能检验,结合水岩平衡状态、地下水循环深度等结果,

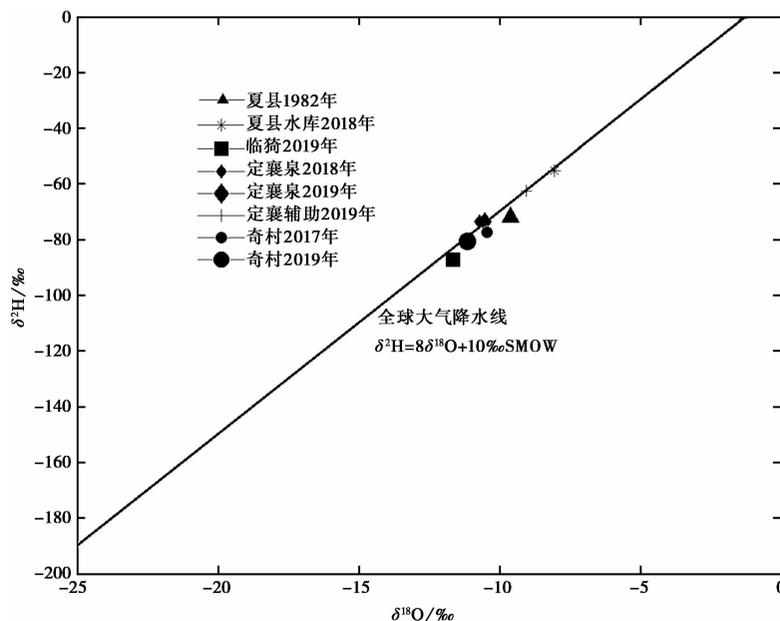


图 4 水样氢氧同位素与全球大气降水线的关系

讨论映震效能与水岩平衡状态、地下水循环深度等之间的关系。

### 3.1 井(泉)水氢日常动态分析

图 5 为夏县井、奇村井、临猗井、定襄泉水氢及辅助测项日值曲线,其中图 5(a)显示夏县井水氢年变特征明显,表现为明显的夏高冬低型,水氢主要受周边热水开采影响,与水位呈现负相关形态(范雪芳等,2000)。奇村井水氢无年变(图 5(b)),但季节性抽水时段 4 月、6~8 月会造成水氢升高,范雪芳等(2008)普查取样分析可知,热田的西南部、观测井的西南方向存在 2 个高氢低温水区。奇村井水氢高值异常产生的机理应该为混合作用。水氢的变化过程为:处于水化井东北部的多口农灌井大量抽水,引起包括水化井水位在内的大范围地下水位下降,并使地下水的流向改变和流速增大,故地下水由西南至东北方向加速向农灌井汇集,致使西南部的高氢低温水流入观测井,造成水氢上升和水温下降。

临猗井水氢为夏高冬低型(图 5(c)),该井氢值与水温变化趋势特征不显著;定襄泉年变为“正弓型”(图 5(d)),水氢突变与流量关系明显,当 1 年内的累计降雨量超过一定阈值时,含氢量低的雨水可以从泉口周围渗入,与地下水混合;另一方面,由于泉点处于冲沟的一侧,降雨引发的洪水可直接混入泉口,这 2 种原因致使水中氢的含量减小(范雪芳等,2008)。

### 3.2 井(泉)水氢映震分析

图 6 为 4 口井(泉)1990 年(数据库现存)至 2019 年的水氢月均值曲线(临猗井观测于 1997 年 9 月),同时标出了统计观测期间山西带上南部及北部发生的 6 次  $M_L \geq 5.2$  地震。由图 6 可见,在超出均值线的 1990~2000 年期间,夏县水氢、奇村水氢及定襄水氢均表现出较明显的准同步性高值变化趋势;1991~1999 年期间山西带上地震较活跃,北部、南部相继发生了 1991 年 1 月 29 日忻州  $M_L 5.5$ 、1991 年 3 月 26 日阳高  $M_L 6.1$ 、1996 年 5 月 3 日包头  $M_L 6.6$ 、1998 年 1 月 5 日西安  $M_L 5.2$ 、1998 年 1 月 10 日张北  $M_L 6.2$  及 1999 年 11 月 1 日阳高

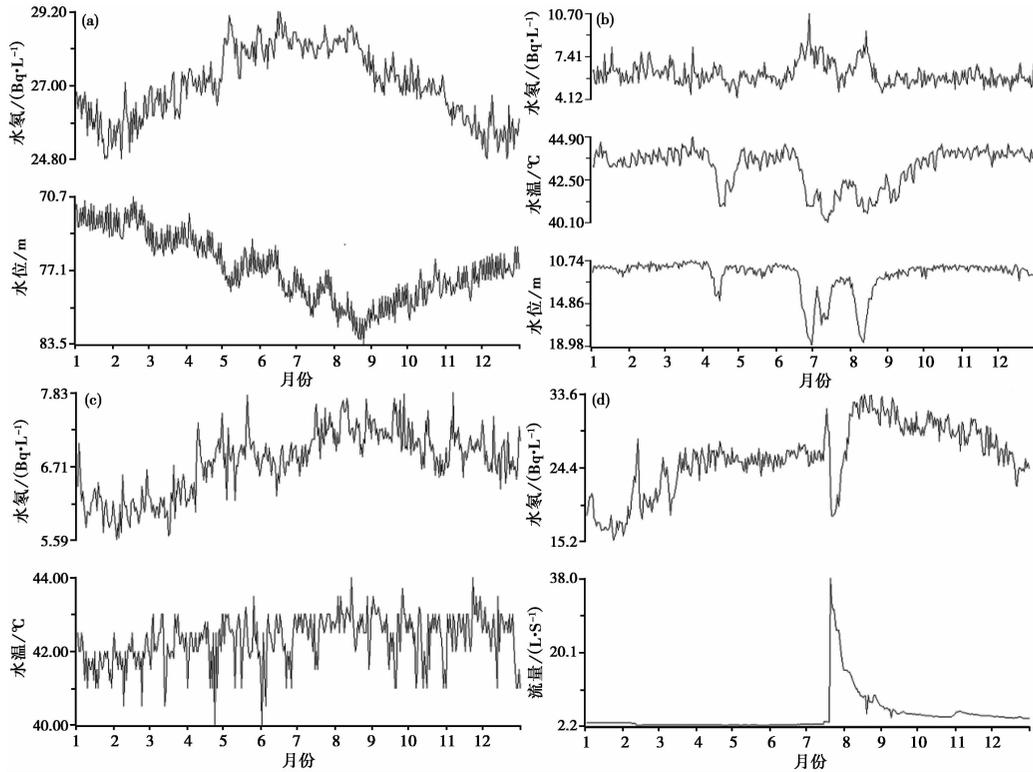


图5 水氡及辅助测项日值曲线(2016年)

(a) 夏县井水氡、水位; (b) 奇村井水氡、水温及水位; (c) 临猗井水氡、水温; (d) 定襄泉水氡、流量

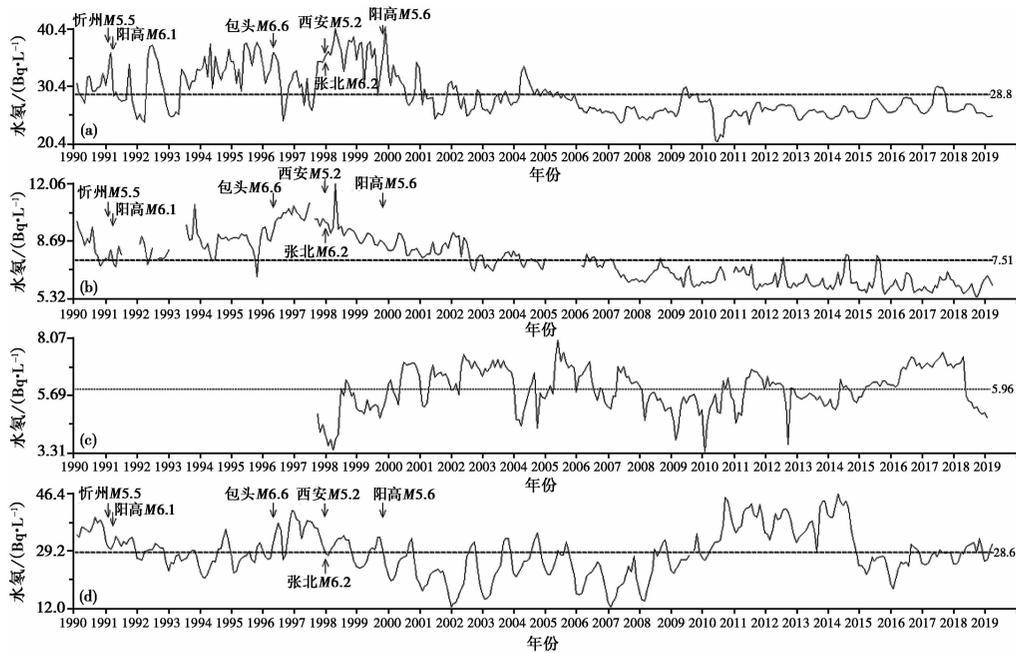


图6 夏县井(a)、奇村井(b)、临猗井(c)、定襄泉(d)水氡月均值曲线

$M_L$  5.6 等一系列中等强度地震,反映出夏县井、奇村井及定襄泉水氡映震的灵敏性;定襄泉 2010~2014 年高值台阶变化,期间无地震发生,2014 年 8~9 月取样口改造后,数据恢复至均值线背景,截至 2019 年三井(泉)水氡数据值趋于平稳阶段,且基本在月均值线下波动;临猗井水氡月均值与地震的对应关系不明显,并且在无震时段数据波动较大。

### 3.3 井(泉)监测效能评价

前人研究表明,地下热水的循环深度与地震孕育、发生有一定的联系(林元武,1993)。通过已有资料分析显示四口井(泉)水氡动态特征明显,且具有一定的规律性;进一步分析显示,夏县井、奇村井位于水岩部分平衡水状态且循环深度较大,研究 2 口井水氡自 1990 年以来出现的高值准同步变化与山西带北部、南部一系列中强地震的对应关系,表明夏县井、奇村井 2 口温泉井水不仅具有本地的补给来源,同时可能含有远距离的补给源。

定襄水氡表现出明显的映震特征,水化学三角图显示其位于未成熟水状态,说明定襄泉位于循环周期相对较快的区域,水氡迁移的距离很短,只能反映局部信息,因此该指标在用于自流泉评价时尚存有不足之处。但鉴于其具有多年映震灵敏性的特征,加之该泉眼又位于构造敏感部位,应进一步开展其地下水年龄等其它水化学的相关研究(潘树新等,2001),探索其与地震发生关系,进而用于评价自流泉监测效能。

综上所述,温泉井中夏县井、奇村井的循环深度计算、水岩平衡结果及水氡显示出的映震特征均优于临猗井,说明这 2 口温泉井可能反映了深部、远距离流体的补给、循环以及强烈的水-岩相互作用等,适于开展地震水化学等多种观测;临猗井由于观测时间较短,加之地层无基岩裸露,黄土层覆盖较厚,对地震信息响应不灵敏,故应逐步优化;定襄泉使用该指标尚有不足之处,应进一步探索其它水化学研究方法进行科学评价。

## 4 结论与讨论

本文运用水化学及氢氧同位素分析方法研究了山西流体水化井(泉),并分析了 4 口井(泉)水氡资料,得出以下认识:

(1) 夏县井、临猗井、奇村井 3 口温泉井的水化类型基本一致,属  $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$  型水,且离子交换作用较强;定襄泉与其周边地表水取水样品的水化学类型一致,为  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  型水,属典型地表水特征,其补给为大气降水;夏县井、临猗井、奇村井位于水岩部分平衡状态,表明除大气降水补给外,还有较深层地下水的混入;地下水循环深度最深的井为夏县井,其次为奇村井、临猗井。

(2) 由于山西省地下流体水化学井(泉)测点较少,且位置分布较分散,加之可用于统计的地震样本也有限,本文仅使用了水氡资料与水化学水岩平衡状态、地下水循环深度相结合的方式应用于评价温泉井、自流泉的监测效能。评价结果显示,温泉井中夏县井、奇村井优于临猗井,定襄泉使用该指标尚有不足之处。在日常监测工作中还应结合井(泉)所处地质构造的灵敏性,并与其它地震前兆观测资料相互结合,对井(泉)开展更科学的研究。其次,还需适时开展地下水年龄等相关研究工作,更好地将地下水化学方法应用于地震监测领域中。

(3) 建议对多个测点进行多次连续的水化学组分观测,以便能够较详细地分析季节性的补给特征,对分析判断水化学演化起到较好的帮助,同时也能完善地下流体基础信息,使地

下流体信息动态化。

**致谢:** 山西省地震局同事为样品采集及资料分析提供了帮助,审稿专家提出了宝贵意见,在此一并感谢。

### 参考文献

- 范雪芳、高文玉、杨泽峰,2008,山西定襄奇村水氡观测短期异常分析,山西地震,(4),19~24.
- 范雪芳、郭君杰、米秋霞,2000,山西临猗-永济 5.0 级地震前的地下流体异常,山西地震,(2),31~33,38.
- 李强,2015,运城市地热水水化学特征及评价研究,水利与建筑工程学报,13(5),127~130,184.
- 李强,2017,山西省不同区域气候调研与分析,科技与创新,(16),136~137,140~141.
- 李学礼、孙占学、刘金辉,2010,水文地球化学,3 版,北京:原子能出版社.
- 林元武,1993,红河断裂带北段温泉水循环深度与地震活动性的关系探讨,地震地质,15(3),193~206.
- 刘永涛,2009,云南省龙陵县邦腊掌温泉水文地球化学与间歇喷泉研究,硕士学位论文,北京:中国地质大学(北京).
- 刘耀炜、任宏微、王博,2009,环境同位素及其示踪技术在地震预测研究中的应用前景,地学前缘,16(2),369~377.
- 潘树新、高安泰,2001,地下水年龄与泉点映震能力的关系及其在地震预报中应用的初步探讨,西北地震学报,23(2),189~193.
- 山西省地震局,2006,山西省地震监测志,北京:地震出版社.
- 苏鹤军、张慧、史杰,2010,祁连山断裂带中东段地下水地球化学特征研究,西北地震学报,32(2),122~128.
- 汪成民,1991,中国地震地下水动态网的科学创新与应用前景,地震学刊,(3),4~8.
- 王大纯、张人权、史毅红,1980,水文地质学基础,北京:地质出版社.
- 王丽、王金生、林学钰,2004,运城盆地漏斗区水文地球化学演化规律研究,资源科学,26(2),23~28.
- 杨静、常姣、李民等,2019,山西夏县中心地震台水化学观测地质环境概述,山西科技,34(1),48~51.
- 张国盟,2015,新疆天山带地下流体观测点水文地质环境评价与研究,硕士学位论文,北京:中国地震局地壳应力研究所.
- 张国盟、刘耀炜、张磊等,2015,地下水测年方法及其在地震监测中的应用展望,中国地震,31(1),1~10.
- 张磊、刘耀炜、孙小龙等,2014,基于水化学和物理方法的井水位异常分析,地震地质,36(2),513~522.
- 左海风,1998,浅层测温在夏县南山底地热研究中的应用,华北地质矿产杂志,13(2),170~177.
- Giggenbach W F,1988,Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers,Geochimica et Cosmochimica Acta,52(12):2749~2765.
- Craig H,1961,Isotopic variations in meteoric waters,Science,133:1702~1703.

## Study on the Relationship between Hydrochemical Characteristics and Predictive Effect of Radon in 4 Wells (springs) in Shanxi Province

*Mu Huimin*<sup>1,4)</sup> *Huang Chunling*<sup>2,4)</sup> *Chang Jiao*<sup>2,4)</sup> *Yang Jing*<sup>3,4)</sup> *Li Min*<sup>2,4)</sup>  
*Yao Linpeng*<sup>2,4)</sup> *Zhang Wennan*<sup>2,4)</sup>

1) Shanxi Earthquake Agency, Taiyuan 030021, China

2) Xiaxian Central Seismic Station, Shanxi Earthquake Agency, Xiaxian 044400, Shanxi, China

3) Linfen Central Seismic Station, Shanxi Earthquake Agency, Linfen 044100, Shanxi, China

4) State Key Observatory of Shanxi Rift System, Taiyuan 030025, China

**Abstract** After the analysis of the hydrochemical, hydrogen isotope and oxygen isotope in 4 wells (springs) and surface water of its surrounding areas in Shanxi Province by the Piper diagram, durov diagram, and Na-K-Mg triangulation, the equilibrium degree of water rock, the temperature of heat storage, the depth of groundwater circulation and the source of groundwater recharge are observed. The seismic reflection characteristics of the well (spring) water radon measurement are analyzed, and the characteristics of the earthquake monitoring effect are evaluated by using the characteristics of the water radon reflection effect and the water-rock balance and the groundwater circulation depth. The result presents that the Xiaxian well and Qicun well are fitter than the Linyi well to be used to observe hydrochemical characteristics, and Dingxiang well in hydrochemical evaluation is still insufficient, and needs new method.

**Key words:** Wells(springs); Hydrochemical; Water radon; Seismic observation