

秦双龙, 洪旭瑜, 洪明泉. 华安汰内温泉水化学及水氡映震特征与预测效能检验评估[J]. 华南地震, 2022, 42(2): 25–32. [QIN Shuanglong, HONG Xuyu, HONG Mingquan. Hydrochemistry and Radon Reflection Characteristics of Tainei Hot Spring Water in Hua'an and Prediction Efficiency Test and Evaluation [J]. South China journal of seismology, 2022, 42(2): 25–32]

# 华安汰内温泉水化学及水氡映震特征 与预测效能检验评估

秦双龙, 洪旭瑜, 洪明泉

(福建省地震局, 福州 350003)

**摘要:** 在对福建华安汰内温泉水文地球化学特征分析的基础上, 以1987年以来该温泉的水氡观测资料为研究对象, 分析其变化形态和影响因素, 结合期间台湾地区发生的多次7级以上强震, 研究水氡的异常变化特征, 并利用Molchan图表法对其预测效能进行检验和评估。结果显示: 该温泉水化学类型为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Na}$ , 表明经历了较长的补给路径且具有一定的深层水信息; 该温泉水氡呈现夏高冬低的年变动态, 与观测水位和气温呈正相关性; 在台湾多次7级以上强震前水氡呈现明显的趋势高值异常, 地震多发生在水氡高值异常结束或转折时; Molchan图表法检验结果显示该温泉水氡异常与台湾7级以上强震具有较好的相关性, 地震主要发生在在异常出现后180 d内, 以中短期异常特征为主。通过对华安汰内温泉水氡的异常特征及预测效能评估研究, 有助于对台湾及其周围的震情跟踪分析。

**关键词:** 温泉水氡; 水文地球化学特征; Molchan图表法; 台湾强震

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2022)02-0025-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.02.04

## Hydrochemistry and Radon Reflection Characteristics of Tainei HotSpring Water in Hua'an and Prediction Efficiency Test and Evaluation

QIN Shuanglong, HONG Xuyu, HONG Mingquan

(Fujian Earthquake Agency, Fuzhou 35003, China)

**Abstract:** Based on the analysis of hydrogeochemical characteristics of the Tainei hot spring in Hua'an, Fujian Province, taking the radon observation data of the hot spring since 1987 as the research object, this paper analyzes its variation patterns and influencing factors, studies the abnormal variation characteristics of water radon combining with the multiple strong earthquakes with  $M \geq 7.0$  in Taiwan during the period, and uses the Molchan

收稿日期: 2022-02-10

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划攻关项目(XH21013); 中国地震局震情跟踪定向工作任务(2021020301); 国家重点研发计划专题(2019YCF1509404-4)和福建省地震局基金项目(SF202008)联合资助。

作者简介: 秦双龙(1984-), 工程师, 主要从事地下流体、地震预报等相关研究工作。

E-mail: slqin0624@126.com

chart method to test and evaluate its prediction efficiency. The results show that: the hydrochemical type of Hua'an hot spring is  $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Na}$ , indicating that it has experienced a long recharge path and has certain deep water information; radon in Hua'an hot spring water shows an annual variation of high in summer and low in winter, which is positively correlated with the observed water level and temperature; before several strong earthquakes with  $M \geq 7.0$  in Taiwan, the radon in Hua'an hot spring water shows an obvious trend of high value anomaly, and earthquakes mostly occur at the end or turning point of high value anomaly of radon in water; the test results of Molchan chart method show that the radon anomaly in Hua'an hot spring water has a good correlation with strong earthquakes with the  $M \geq 7.0$  in Taiwan, and the earthquakes mainly occurs within 180 days after the occurrence of the anomaly, mainly characterized by medium and short-term anomalies. Through the analysis and evaluation of the abnormal characteristics and prediction efficiency of radon in the hot spring water, it is conducive to the monitoring and tracking analysis of the earthquake situation in and around the area.

**Keywords:** Radon in hot spring water; Hydrogeochemical characteristics; Molchan chart method; Taiwan strong earthquake; Earthquake situation tracking

## 0 引言

氡作为地下流体映震敏感组分,在目前地震前兆监测预报中占有重要的地位,尤其是在我国地震地下流体学科中,与水位并列作为两大主测项而受到重视<sup>[1-3]</sup>。在1944年日本西南海岸发生的8.3级地震震前 Hatuda 观测到氡的突变现象<sup>[4]</sup>,引发了地震科学家开展氡与地震关系之间的研究,此后,前苏联、中国、美国、日本、欧洲等许多国家和地区开展了氡观测和地震预测及构造活动的研究,并积累了大量的资料。

车用太等依据大量的震例,提出了水氡异常的水动力学机制,即在较低的应力水平下含水岩体的变形与其水动力状态的变化引起水氡的异常机制<sup>[5]</sup>;范雪芳等对定襄泉的水氡异常特征进行了可靠性论证,认为该井水氡在1998年张北6.2级地震前存在可信的前兆异常<sup>[6]</sup>;晏锐等对2008年汶川8.0级地震前的地下流体资料进行回顾与异常特征进行分析,认为震前多井的水氡异常存在一定程度的趋势性异常,且异常形态多以趋势性高值异常为主<sup>[7]</sup>;苏小芸等以2008年汶川8.0级2013年甘肃岷县—漳县6.6级地震为例研究了甘东南地区的多个台的水氡变化,认为在两次地震前水氡浓度均存在临界慢化特征<sup>[8]</sup>。长期的观测结果表明,氡等地下流体地球化学组分存在震前具有显著的异常变化<sup>[9-12]</sup>。

在地质构造上,台湾及其附近海域位于欧亚板

块与菲律宾板块的交接带,受到菲律宾板块的推挤,强震活动十分频繁<sup>[13]</sup>。华安汰内温泉水氡观测点位于靠近台湾海峡南部的闽粤交界附近,受台湾强震的影响,该区域内中强以上地震相对较为活跃,一直是该区震情关注的重点。该温泉水氡自1987年开始观测,至今已积累了30多年的观测资料期间也出现过不同程度的中短临前兆异常<sup>[14-17]</sup>,为该区域的地震预报提供一定的经验尝试。本文在对华安汰内温泉水文地球化学特征分析的基础上,研究其温泉水氡的变化形态和影响因素,结合期间台湾地区发生的多次7级以上强震,对映震特征进行研究,并利用Molchan图表法对其预测效能进行检验和评估,得出最佳的异常判定指标和有效的预测时间。

## 1 温泉点区域地质构造及概况

华安汰内温泉水氡观测点位于福建省漳州市华安县沙建镇汰内村(24.72°N, 117.55°E),海拔高程105 m,测点处于华南块体东缘,NE—NNE向长乐—诏安断裂带的西侧断裂与政和—海丰断裂带的东侧断裂通过本区,并与斜贯本区的NW—NNW向九龙江断裂交汇,控制着该区的现代断块差异运动、地震活动和温泉出露<sup>[18]</sup>。华安汰内温泉出露于北325°西的张性断裂新华夏系尚卿—坂里断裂带和第四纬向构造带复合部,NNE向的福安—南靖断裂带中段,坂里—汰内—南蔗构造变质带上,断层倾角直立,两盘裂开约10 cm左右(图1)。

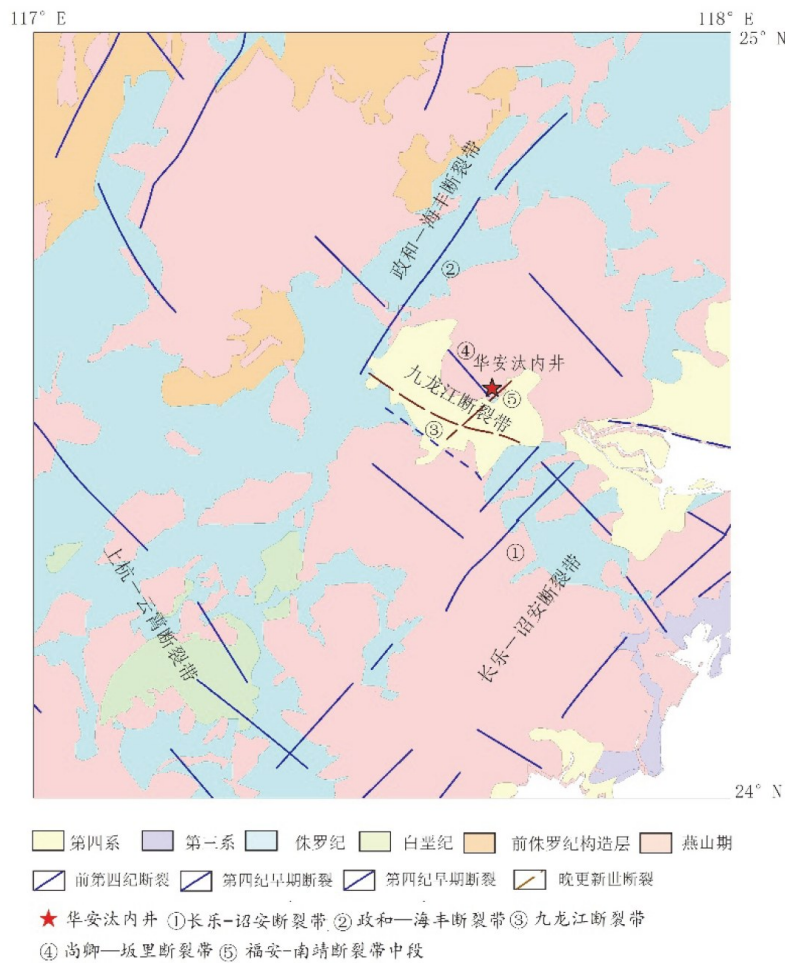


图1 福建华安汰内温泉地质构造图

Fig.1 Geological structure map of Tainei hot spring in Hua'an, Fujian

华安汰内温泉井始建于1982年7月,该泉点为自流上升热泉,水头高度2.5 m,泉口水温61℃,1983年进行改造,用直径10 cm的水泥管下埋4 m至基岩,排除地表水干扰。目前主要测项为水氢和水化学离子,辅助测项有水位和气温。该温泉井水氢的观测系统由FD-125氢钽分析仪和DB-2001A标定器组成,主机、副机各一套,每日8:00定时采样进行测量,该温泉水氢资料多年来一直变化比较稳定,被评估为A类。

2 温泉水文地球化学特征

地下水水化学特征是岩土体中的矿物成分和地下水流之间相互作用的结果,它决定于地下水运动时接触的围岩成分、水文地质条件和氧化还原环境等<sup>[19]</sup>。本次研究中,于2021年7月在华安汰内温泉泉口取样,水样寄送至中国地震局地壳应力研究所进行水质检测,水质分析见下图(表1)。

样品显示华安汰内温泉水体的矿化度为

408.23 mg/L,泉水阴离子主要成份为HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>,含量146.44 mg/L;其次为SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,含量112.45 mg/L。阳离子主要成份为Na<sup>+</sup>,含量为103.32 mg/L,其次为Ca<sup>2+</sup>,含量为16.64 mg/L。泉水水化学类型为HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Na型水(图2),水化学类型显示该温泉水体经历了较长的补给路径,发生较为强烈的Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>阳离子交替吸附作用以及还原反应,同时Na-K-Mg三角图解法结果也显示出该温泉水体处于部分平衡水状态(图3)。

表1 华安汰内温泉水化学主要离子成份

Table 1 Main ion components of water chemistry of Tainei hot spring in Hua'an

阳离子/( mg · L <sup>-1</sup> )		阴离子/( mg · L <sup>-1</sup> )	
离子成份	含量	离子成份	含量
K <sup>+</sup>	3.862	Cl <sup>-</sup>	13.393
Ca <sup>2+</sup>	15.470	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	107.451
Na <sup>+</sup>	94.921	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	146.440
Mg <sup>2+</sup>	0.078	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.325

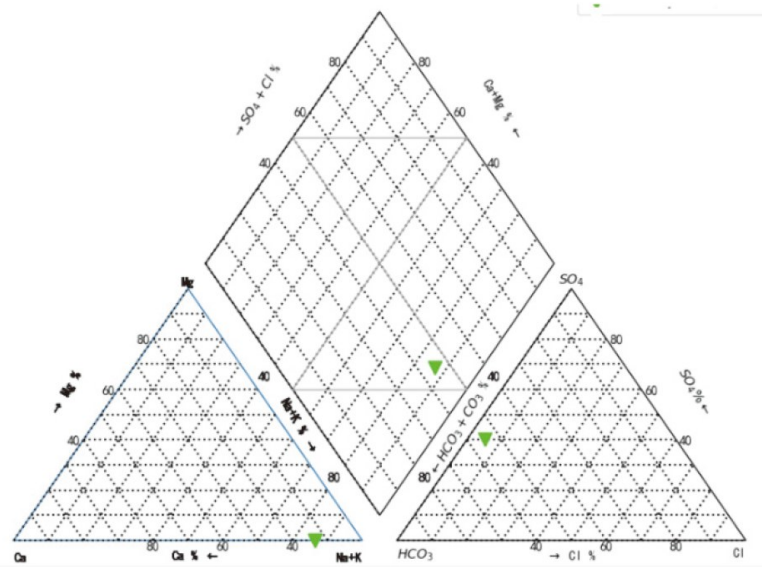


图2 华安汰内温泉水化学成分Piper三线图解

Fig.2 Piper three line diagram of chemical composition of Tainei hot spring in Hua'an

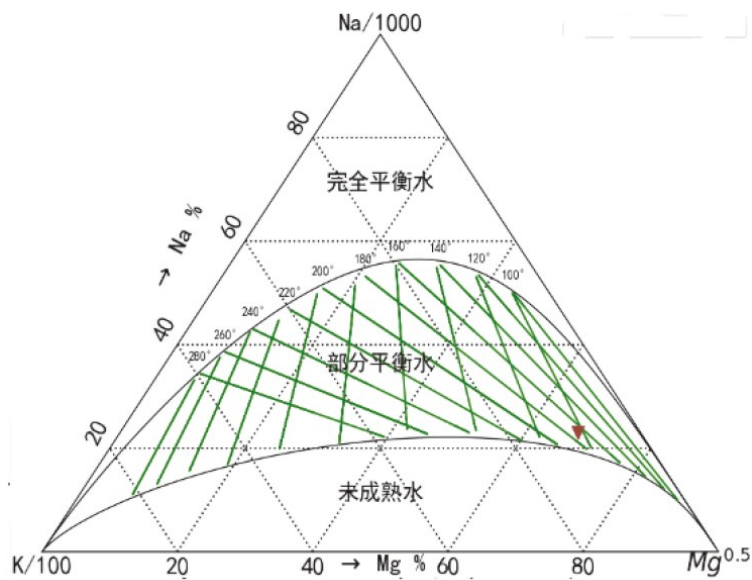


图3 华安汰内温泉 Na-K-Mg 三角图解

Fig.3 Na-K-Mg triangle diagram of Tainei hot spring in Hua'an

3 水氡资料动态及影响因素分析

研究表明，温泉水氡在观测过程中不仅会受到构造因素的影响，还会受到气温、降雨和流量等非构造因素的影响<sup>[20-21]</sup>，图4为1987—2020年华安汰内温泉水氡日测值资料，显示水氡测值变化比较稳定，表现出明显的夏高冬低年变动态特征。为分析水位和气温与水氡测值的相关关系，选取2010年1月—2020年12月共计252个月值数据(图5)，利用

一元线性回归方法对水氡资料多年来的变化与水位、气温之间相关性进行拟合分析，结果显示(图6)，水氡与水位测值的相关系数为0.4442，拟合方程为 $y = 27.2725x + 58.5121$ ；水氡与气温测值的相关系数0.4377，拟合方程为 $y = 0.4231x + 74.2604$ ，水位、气温与水氡都呈正相关性，相关程度基本相同。表明在该区域，随着气温的变化引起大气中水循环和降水的变化，引起水位产生变化，从而引起温泉水中溶解水氡含量的变化，三者呈现出一定的正相关性。



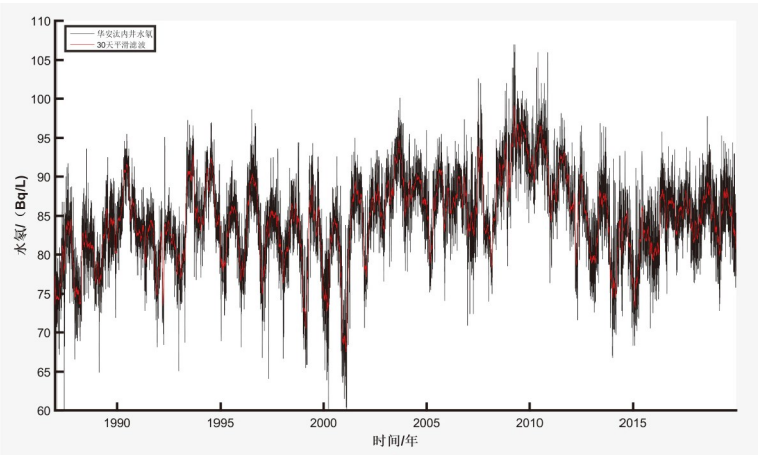


图4 华安汰内温泉水氡测值曲线图

Fig.4 Measured value curve of water radon of Tainei hot spring in Hua'an

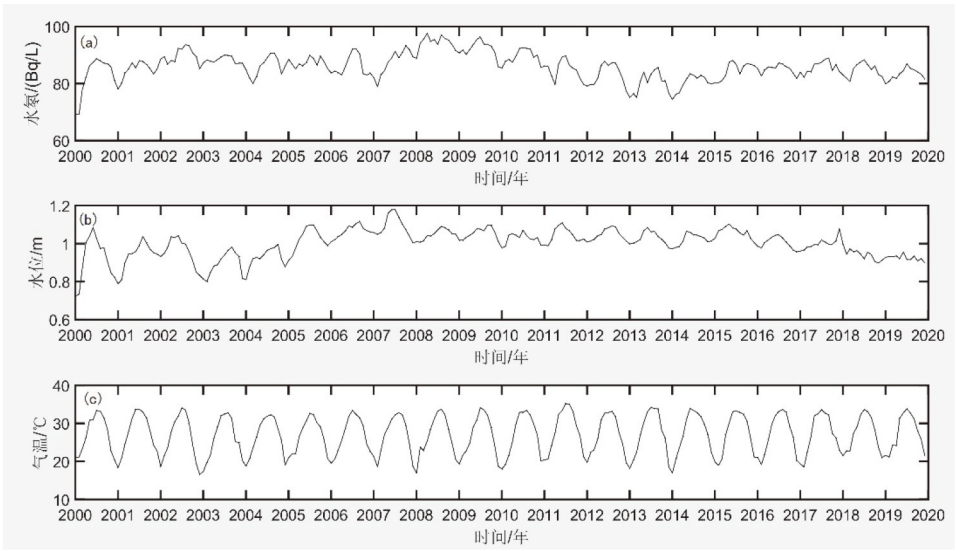


图5 华安汰内温泉水氡(a)、水位(b)、气温(c)观测曲线

Fig.5 Observation curves of water radon(a), water level(b) and air temperature(c) of Tainei hot spring in Hua'an

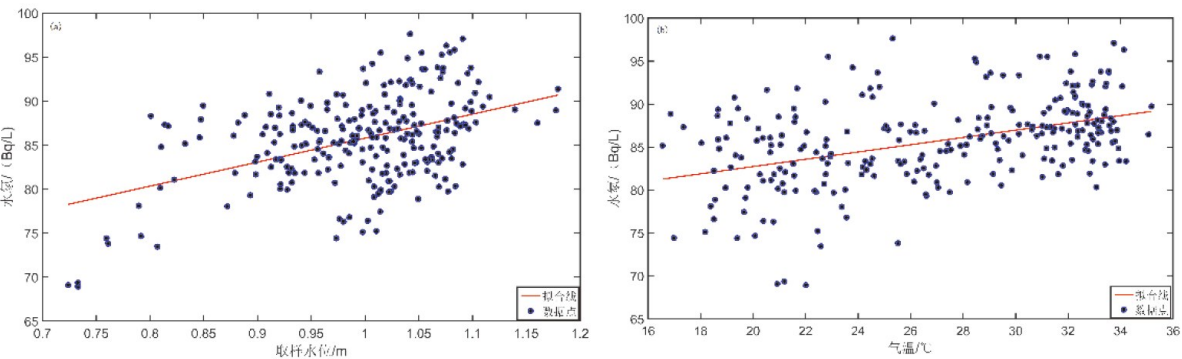


图6 水氡浓度与水位(a)和气温(b)的相关性

Fig.6 Correlation between water radon concentration and water level(a) and air temperature(b)

4 地震预测效能检验与评估

基于华安汰内温泉水氡出现的高值异常与台

湾地区7级以上强震间具有较好的对应关系，显示出华安汰内温泉水氡在台湾多次强震前具有较好的映震能力。利用有效可靠的前兆预测指标和方法来识别异常实现地震预报的主要途径，开发具

有一定预报效果的预测指标是实现短临预报的重要技术途径。

为了验证华安汰内温泉水氢异常指标的预报效能，采用 Molchan 图表法值对其进行检验和评估。Molchan 图表法(Molchan Error Diagram)最早是对 20 世纪 80—90 年代开展的经验性地震预测进行的科学总结，解决固定研究区强震时间的预测问题，并试图给出概率解释而逐渐发展起来的概率统计检验方法。由于该方法既可以直观地反映预测效能，又可以对观测资料进行评估和对异常进行定量分析，从而得出最佳阈值所对应的异常判别指标<sup>[22-27]</sup>，对后续前兆资料的异常识别判定具有重要的意义。

为突出资料的前兆异常信息，利用差值方法将水氢资料消除其年变动态成分。本次检验使用 1987—2020 年的月均值差值观测数据(图 9a)，检验地震为 1987—2020 年期间台湾及近海海域的 7 级以上强震 10 次(表 2、图 7)。对不同滑动步长的检验结果如图 8 所示，颜色表示有效预测期，从蓝色至红色表示有效预测期从 1—365 d 内，检验效果从概率增益和预测效果两方面来估计。

表 2 1987—2020 年台湾及近海海域  $M \geq 7.0$  强震目录  
Table 2 List of strong earthquakes with  $M \geq 7.0$  in Taiwan and offshore water from 1987 to 2020 year

发震日期/ (年-月-日)	震中位置		地点	震级 ( $M$ )
	经度/( $^{\circ}$ )	纬度/( $^{\circ}$ )		
1990-12-14	121.80	24.10	台湾花莲	7.1
1994-05-24	122.50	24.10	台湾花莲	7.0
1994-06-05	121.70	24.80	台湾花莲	7.0
1994-09-16	118.65	22.70	台湾海峡	7.3
1996-09-06	121.90	21.50	台湾南屿	7.1
1999-09-21	121.10	23.70	台湾南投	7.6
1999-09-26	121.10	23.90	台湾花莲	7.1
2002-03-31	122.10	24.40	台湾花莲	7.5
2003-12-10	121.40	23.10	台东海域	7.0
2006-12-26	120.60	21.90	台南海域	7.2

从图 8 可以看出，华安汰内温泉水氢预测效能较好，基本上所有数据点的概率增益均大于 1，而且预测效能绝大部分在 0.65 以上，具有统计和检验意义。同时可以看出，在地震前 200 d 左右检验效果最好，预测效能都大于 0.7，概率增益大于 2.0，表明华安汰内井水氢的映震特征以中短期为主。

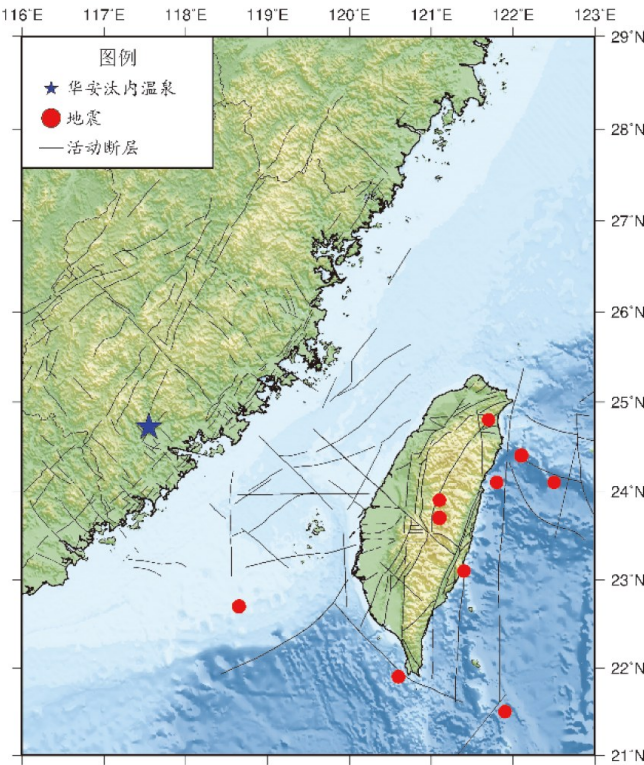


图 7 华安汰内温泉井及台湾及近海海域  $M \geq 7.0$  强震分布图  
Fig.7 Distribution of strong earthquakes with  $M \geq 7.0$  of Tainei hot spring well in Hua'an and Taiwan and offshore waters

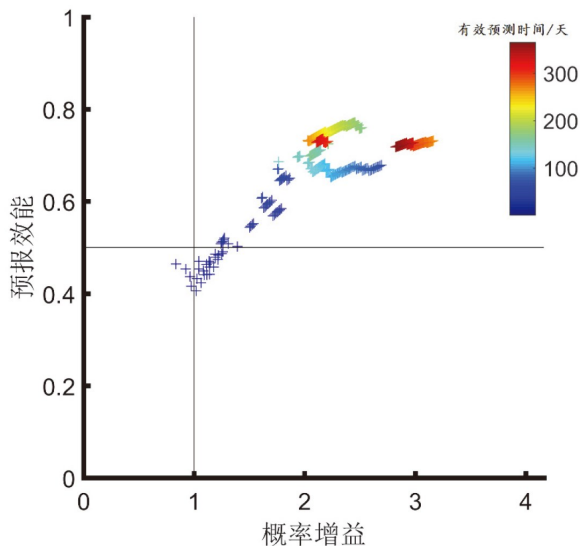


图8 华安汰内温泉水氡对台湾强震预测效能检验

Fig.8 Effectiveness test of water radon of Tainei hot spring in Hua'an for strong earthquake prediction in Taiwan

图9a为华安汰内温泉井水氡月均值差值曲线,红色五角星和虚线分别代表选取的10个地震和最优阈值线;图9b为华安汰内温泉水氡漏报率 $\nu$ 与时间占有率 $\tau$ 关系曲线及不同显著性水平 $\alpha$ 等值线。折线为不同阈值从大到小滑动求得的 $\tau - \nu$ 值连线,蓝色圆圈为离原点(0, 0)最近的 $\tau - \nu$ 值,相应的阈值可作为最优阈值。

基于华安汰内温泉水氡预测效能检验结果,利用 Molchan 图表法定量提取得到该温泉水氡前兆异常判定指标,从图9a可以看出,该温泉水氡异常的最佳阈值线为3.9977 Bq/L,从图9b可以看出10个实际发生的地震中,报准8个,漏报2个,报准率80%,漏报率20%,时间占有率0.32,显著性水平 $\alpha$ 接近最小的 $\alpha$ 等值线,置信水平高,说明预测效果好。

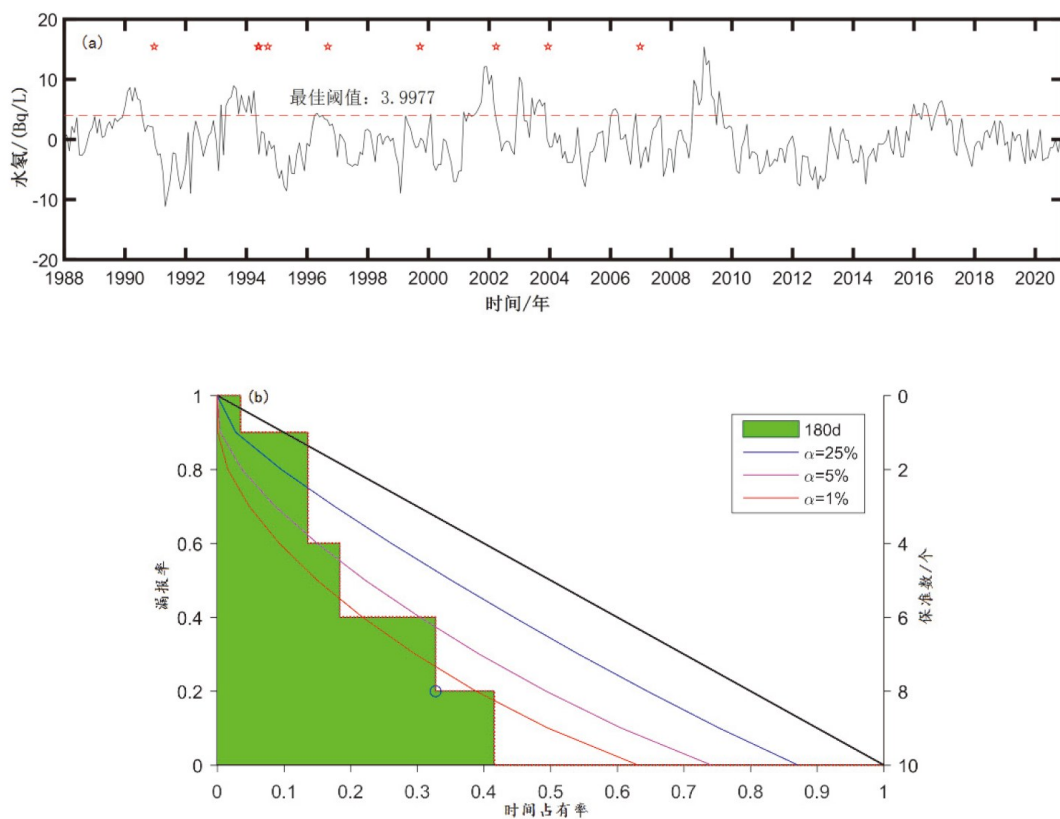


图9 华安汰内温泉水氡 Molchan 检验结果

Fig.9 Molchan test results of water radon in Tainei hot spring in Hua'an

## 5 结论

华安汰内温泉水氡在台湾多次7级强震震前显示出明显的高值异常变化特征,表明该温泉水氡

对台湾地区的7级以上强震活动引起的构造应力反映敏感。通过该温泉的水文地球化学特征、观测水氡的影响因素、映震特征及地震预测效能的检验评估,得出以下结论:

(1)水文地球化学特征显示,华安汰内温泉水

体循环深度较大,具有一定的深层水信息,水化学类型为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Na}$ 型水,水体经历较长的补给路径;

(2)华安汰内温泉水氡的观测动态呈现夏高冬低年变形态,与水位和气温具有一定的正相关性,且相关程度基本相同,表明随着气温的变化引起的水循环变化,使得水位产生变化,从而引起温泉水体中水氡含量的变化;

(3)基于 Molchan 图表法对华安汰内温泉水氡资料的检验结果显示,该温泉水氡异常提取的最佳预测指标为 3.9977 Bq/L,最佳预报时间为异常出现后 180 d 内,表明华安汰内温泉水氡映震效能以中短期特征为主。

致谢:本工作得到国家自然灾害防治研究院孙小龙博士和中国地震台网中心王博博士在 Molchan 图表法程序上提供的指导和帮助,在此向他们表示衷心的感谢。

## 参考文献

- [1] Wakita H, Nakamura Y, Notsu K, et al. Radon anomaly: a possible precursor of the 1978 Izu-Oshima-Kinkai earthquake[J]. Science, 1980, 207(4433): 882-883.
- [2] 刘耀伟, 范世宏, 曹玲玲. 地下流体中短期异常与地震活动性指标[J]. 地震, 1999, 19(1): 19-25.
- [3] 刘耀伟, 施锦. 强震地下流体前兆信息特征[J]. 地震学报, 2000, 22(1): 102-107.
- [4] Sugisaki R, Takamoriito, Nagamine K, et al. Gas geochemical changes at mineral springs associated with the 1995 southern Hyogo earthquake ( $M7.2$ ) [J]. Japan Earth and Planetary Science Letters, 1996(139): 239-249.
- [5] 车用太, 鱼金子, 刘五洲. 水氡异常的水动力学机制[J]. 地震地质, 1997, 19(4): 353-357.
- [6] 范雪芳, 马朝晖, 赵文星, 等. 定襄泉水氡正常与异常动态特征及其相互关系的研究[J]. 地震, 2007, 27(2): 112-120.
- [7] 晏锐, 蒋长胜, 张浪平. 汶川 8.0 级地震前水氡浓度的临界慢化现象研究[J]. 地球物理学报, 2011, 54(7): 1817-1826.
- [8] 苏小芸, 陈丽君, 王文才, 等. 甘东南地区水氡浓度的临界慢化现象研究[J]. 地震工程学报, 2020, 42(5): 1104-1110.
- [9] 邱永平. 宁波台水氡、水位在汶川 8.0、日本 9.0 级地震中的异常现象分析[J]. 内陆地震, 2013, 27(1): 15-19.
- [10] 瞿少刚, 延海军, 梅浩, 等. 小口子泉水氡映震范围及能级研究[J]. 内陆地震, 2007, 21(4): 342-347.
- [11] 汪成国, 赵刚. 新 30 号泉水氡映震特征分析[J]. 内陆地震, 2010, 24(3): 281-288.
- [12] 张超美, 陈永花, 俞伟. 2016 年青海门源 6.4 级地震前后湟源地震台水氡异常特征分析[J]. 地震研究, 2016, 39(S1): 108-111.
- [13] 陆明勇, 杨凌, 杨立明. 台湾地区强震活动特征及其解释[J]. 西北地震学报, 2000, 22(4): 436-441.
- [14] 廖丽霞. 模拟水氡异常识别[J]. 内陆地震, 2008, 22(2): 143-150.
- [15] 廖丽霞, 郑永通, 袁丽雯. 华安汰内井水氡对闽台地震的映震特征差异性分析[J]. 地震, 2010, 30(4): 133-139.
- [16] 廖丽霞, 秦双龙, 黄圣棕, 等. 福建泉州四至井水氡低值异常成因探讨[J]. 内陆地震, 2017, 3(1): 1-8.
- [17] 方宏芳. 华安汰内水氡井近震映震能力分析[J]. 华南地震, 2008, 28(1): 101-107.
- [18] 张远城. 漳州地区地下热水的水文地质特征及映震效应[J]. 台湾海峡, 1993, 12(3): 272-279.
- [19] 何洋, 李晓, 肖尧, 等. 草科温泉的水文地球化学特征及成因分析[J]. 地下水, 2015, 37(1): 30-32.
- [20] 范雪芳, 马朝晖, 赵文星, 等. 定襄泉水氡正常和异常动态特征及其相互关系的研究[J]. 地震, 2007, 27(2): 112-119.
- [21] 钟骏, 王博, 晏锐, 等. 洱源温泉水氡预测效能检验及其水化学特征[J]. 地震研究, 2021, 44(4): 564-571.
- [22] Mogro-Campero A, Flenscher R. L., Likes R. S. Changes in subsurface radon concentration associated with earthquake [J]. Geophys Res, 1980, 85(B6), 3053-3078.
- [23] Molchan G M. Strategies in strong earthquake prediction[J]. Phys Earth and Planetary Interiors, 1990, 61(1): 84-98.
- [24] Molchan G M. Structure of optimal strategies in earthquake prediction[J]. Tectonophysics, 1991, 193(4): 267-276.
- [25] Molchan G M. Earthquake prediction as a decision-making problem[J]. Pure and Applied Geophysics, 1997, 149(1): 233-247.
- [26] Molchan G M. Space-time earthquake prediction: the error diagrams[J]. Pure and Applied geophysics, 2010, 167(8-9): 907-917.
- [27] 蒋长胜, 张浪平, 韩立波, 等. 中长期地震危险性概率预测中的统计检验方法 I: Molchan 图表法[J]. 地震, 2011, 31(2): 106-113.