

廖丽霞,陈伟,周跃勇. 2025. 福建地区温泉对中国台湾6级以上地震映震能力分析[J]. 地震研究, 48(2): 312–325, doi:10.20015/j.cnki. ISSN1000–0666. 2025. 0033.

Liao L X, Chen W, Zhou Y Y. 2025. Discussion on geochemical observation anomaly and mechanism of Fujian hot springs before earthquakes of magnitude 6 and above in Chinese Taiwan[J]. *Journal of Seismological Research*, 48(2): 312–325, doi:10.20015/j.cnki. ISSN1000–0666. 2025. 0033.

# 福建地区温泉对中国台湾6级以上地震映震能力分析\*

廖丽霞, 陈伟, 周跃勇

(福建省地震局, 福建 福州 350003)

**摘要:** 为监测预测闽台地震, 沿福建地区主要构造部位布设了16个温泉点, 构建了构造地球化学观测网, 观测温泉气体中的氮、氦、碳同位素、氢气浓度及体积占比、气体流速、水化学离子等用于短临地震预测研究。基于2021年1月—2023年6月这16个温泉点的地球化学参数观测结果, 探讨了其对于研究时段内以2022年中国台湾花莲 $M_L6.8$ 震群为代表的中国台湾地区发生的芮氏6级以上地震的映震能力。结果表明: ① 6级以上地震发生前福建地区温泉地球化学出现群体性异常且具重现性。温泉气体表现突出, 以高值异常为主; 水化学离子主要呈趋势上升、持续高值、震荡等异常形态; 这些异常对强震发震时间具有较好的短临和短期预测意义。② 福建地区的构造背景与中国台湾地区6级以上地震的关联性较强。台湾地震多为板块碰撞俯冲引起, 其应力能通过深大断裂的深部动力传导引起福建温泉的响应, 导致温泉气体及水化学离子产生异常; 福建地区特有的中酸性岩浆岩地球化学背景也是水化学离子映震灵敏的因素之一。

**关键词:** 中国台湾6级以上地震; 预测指标; 福建地区温泉; 构造地球化学观测网; 温泉气; 水化学离子

**中图分类号:** P315.723

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000–0666(2025)02–0312–14

doi:10.20015/j.cnki. ISSN1000–0666. 2025. 0033

## 0 引言

2022年9月, 中国台湾花莲县发生 $M_L6.8$ 震群型地震, 震源深度均在10 km左右, 其中9月18日 $M_L6.8$ 地震是自2006年中国台湾南部海域 $M_S7.2$ 地震发生以来中国台湾地区发生的最大地震, 福建、广东、上海等沿海地区震感明显。福建省地震局除了承担福建地区的地震监测预测工作外, 还同时承担着台湾地区的地震监测预测任务, 但由于地域限制, 目前对中国台湾地区的地震预测主要依靠测震学。

温泉是重要的映震敏感点, 能很好地反映深部构造运动特征; 同时构造活动又控制着温泉群的出露, 对热源的形成也具有明显的控制作用(张森琦等, 2020)。华南陆缘是中国大陆具有

独特动力学背景的岩浆–构造演化带, 在太平洋板块俯冲过程中, 热地幔物质上涌, 导致华南沿海地区上地幔在新生代时期处于高热状态(赵海玲等, 2003), 形成高热流异常区。因此东南沿海地区中–低温地热资源丰富, 温泉出露点密集, 但该区还未正式建立连续观测台站, 无法应用温泉地球化学特征开展震情跟踪工作。2020年中国地震局地震预测研究所在福建地区设立了5个温泉观测点进行水化学离子连续测量, 发现中国台湾海峡及其附近海域 $M_S \geq 6.0$ 地震前, 这5个温泉中的 $Cl^-$ 和 $Na^+$ 浓度显著增加(Wang et al, 2021); 福建省地震局构造地球化学攻关团队对该区域的温泉气体进行研究, 发现温泉气体 $^3He/^4He$ 、 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 及气体流速在时间域上的高值对中国台湾地区6级强震具有显著的短临异常指示(Liao et al, 2023)。

\* 收稿日期: 2024–06–08.

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划攻关项目(XH21013).

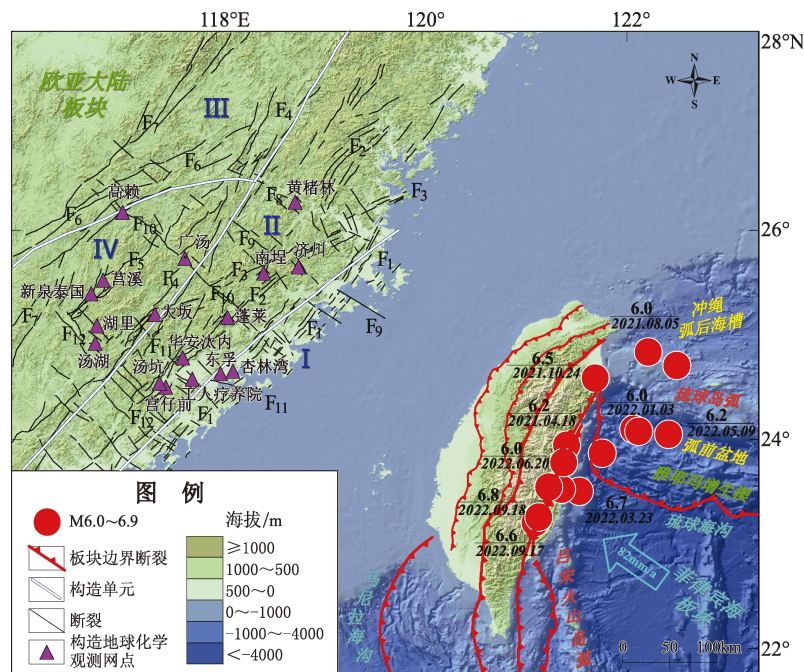
第一作者简介: 廖丽霞(1965–), 高级工程师, 主要从事地震地下流体监测预测研究.

E-mail: 909051757@qq.com.

为进一步探索闽台地区地震短临预报的有效方法,充分利用福建省境内温泉遍布及紧邻中国台湾的地域优势,提升闽台地区地震监测预测能力,2021年福建省地震局构造地球化学攻关团队沿福建地区的主要构造部位布设了16个温泉观测点,构建福建构造地球化学观测网,观测温泉气体中的氦氖碳同位素、氢气浓度及体积占比、气体流速、水化学离子等用于短临地震预测研究,以期为闽台地区地震预测提供判定依据。经过2年多的观测和研究,目前已初步掌握了福建地区温泉地球化学的基本特征,取得了较好的研究效果,并根据这些动态特征对2022年9月18日花莲 $M_L 6.8$ 震群做出了正确预测。为提高短临预测时效,2023年4月,团队还从中挑选3个温泉点建立了氢气连续观测站用于捕捉温泉气体的短临信息,结束了福建无温泉气体数字化连续观测的历史。基于以上观测记录,本文开展了福建温泉地球化学与台湾6级以上地震的相关性研究,并尝试将其应用于日常震情跟踪工作。

## 1 研究区地质概况

受太平洋构造域影响,福建地区发育了一系列与菲律宾海板块和欧亚板块的缝合带大致平行的NE向深大断裂及NW向横张调整性断裂,两组断裂相互交错形成福建地区棋盘状构造格局(图1)。其中NE向断裂多为构造单元的分界线,如政和—海丰断裂带( $F_4$ )是福建西部华夏地块、东部东南沿海中生代岩浆带两大构造单元的分界;福建地区东部又以长乐—诏安断裂带( $F_1$ )为界,形成平潭—东山剪切构造带(I)和闽东火山断拗带(II);其西部则以南平—宁化断裂带( $F_6$ )为界,形成北武夷隆起区(III)和南武夷晚古生代拗陷区(IV)(福建省地质调查研究院,2016)。闽东火山断拗带以大规模火山喷发为主(王培宗等,1993),发育有福安—南靖断裂带( $F_2$ )和闽江口—永定断裂带( $F_3$ ),该区热流值在全省最高;温泉沿 $F_2$ 极其发育,在漳州地区发育地热田,



$F_1$ : 长乐—诏安断裂带;  $F_2$ : 福安—南靖断裂带;  $F_3$ : 闽江口—永定断裂带;  $F_4$ : 政和—海丰断裂带;  $F_5$ : 上杭—屏南断裂带;  
 $F_6$ : 南平—宁化断裂带;  $F_7$ : 邵武—河源断裂带;  $F_8$ : 闽江断裂带;  $F_9$ : 沙县—南日岛断裂带;  $F_{10}$ : 永安—晋江断裂带;  
 $F_{11}$ : 九龙江断裂带;  $F_{12}$ : 上杭—云霄断裂带; I: 平潭—东山剪切构造带;  
 II: 闽东火山断拗带; III: 北武夷隆起区; IV: 南武夷晚古生代拗陷区

图1 福建地区构造地球化学观测网点及2021年1月—2023年6月中国台湾芮氏6级以上地震空间分布

Fig. 1 Tectonic geochemical observation network in Fujian and spatial distribution of earthquakes with magnitude 6 or above in Chinese Taiwan since observation

在  $F_2$  与 NW 向九龙江断裂带 ( $F_{11}$ ) 交会区域形成汰内、汤坑、宫仔前等温泉,在与  $F_3$  交会区域发育石牛山火山机构,出露济川温泉和中国东部自流温泉中水温最高的南埕自冒泉。 $F_{11}$  与  $F_1$  交会处则发育有中国东部水温最高的热水井工人疗养院井。平潭—东山剪切构造带 (I) 以强烈的动力变质作用为特点,发育东孚、杏林湾等温泉。以上这些温泉的水热活动主要叠加于地幔热源之上的晚中生代花岗岩中的放射性生热元素,且沿着以新生代垂直升降运动为主的断裂带分布 (张健等, 2018)。

2 采样和测量方法

2020 年以来,福建省地震局构造地球化学攻关团队综合现场调查、地球化学测试指标、震例分析和构造解析结果,从 104 个温泉普查点中初筛出 16 个温泉点,构建构造地球化学观测网 (图 1、表 1),开展温泉气季度观测及采样率为 3 d 的水

化学观测。野外现场温泉气体采样采用排水集气法,采样容器为 500 mL 的玻璃瓶。温泉气送中国科学院西北生态环境资源研究院油气资源研究中心进行测量,其中氦、氡同位素 ( $^3\text{He}/^4\text{He}$ 、 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ ) 使用英国 Nu Instruments 公司生产的 Noblesse 惰性气体质谱仪分析,仪器误差不超过 3%;碳同位素 ( $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ ) 使用 MAT253 同位素比值质谱仪测定,用传统的每密耳  $\delta$  记法 (‰) 表示根据 Pee Dee Belemnite (PDB) 之后的碳同位素比率。碳同位素比值的测量误差为  $\pm 0.2\text{‰}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  的分析精度为 0.3‰ (Tian *et al.*, 2021)。水样离子在福州地震监测中心站用赛默飞 ICS-600 型离子色谱仪观测,样品浓度  $RSD\leq 5\%$ ;  $\text{H}_2$  使用超矩 ATG-300H 型便携式测氢仪测量,最低检测限为:  $\leq 5\times 10^{-3}\text{ppm}$ ,误差  $\leq 5\%$ 。为跟踪温泉气体的变化动态,在德化县南埕自冒泉开展采样率为 3 天的气体流速连续观测,用秒表记录 500 mL 玻璃瓶排空瓶中温泉水的时间,计算得出气体逸出的流速。

表 1 福建地区构造地球化学观测网点的基本情况  
Tab. 1 Basic information on geochemical observation networks in Fujian

泉点名称	观测项目	构造位置	$\varphi_N/(\circ)$	$\lambda_E/(\circ)$	水点类型	海拔/m	水温/ $(\circ\text{C})$	温泉出露岩性
南埕 ZK1	水质、水温	$F_3$ 、 $F_9$ 、 $F_2$ 交会处	25.56	118.38	自流热水井	340	93.7	晚侏罗纪—早白垩纪火山凝灰岩
南埕自冒泉	气体流速季测气体	$F_3$ 、 $F_9$ 、 $F_2$ 交会处	25.57	118.38	基岩裂隙上升泉	337	88.4	晚侏罗纪—早白垩纪火山凝灰岩
工人疗养院	水质水温	$F_1$ 与 $F_{11}$ 交会地带	24.51	117.65	自流热水井	10	93.5	花岗岩闪长岩
黄楮林	水质水温	$F_2$ 和 $F_8$ 交会处	26.28	118.70	基岩裂隙上升泉	265	51.3	燕山早期花岗岩
高赖	水质水温季测气体	$F_6$ 与 $F_{10}$ 交会处	26.18	116.94	基岩裂隙上升泉	309	77.7	寒武纪变质砂岩与印支期花岗岩交界
汤湖	水质水温季测气体	$F_{12}$ 、 $F_5$ 地带	24.87	116.65	基岩裂隙上升泉	227	60.2	加里东期花岗岩
莒溪	季测气体	$F_5$ 地带	25.49	116.74	基岩裂隙上升泉	365	33.9	二叠纪粉砂岩与石炭纪砂砾岩交界
广汤	水质季测气体	$F_4$ 与 $F_{10}$ 交会处	25.72	117.57	自流热水井	461	84.5	侏罗纪砂砾岩与三叠纪粉砂岩交界
新泉泰国	水质水温季测气体	$F_5$ 地带	25.36	116.61	自流热水井	293	70.1	白垩纪砾岩与印支期花岗岩交界
湖里	水质水温季测气体	$F_{12}$ 、 $F_5$ 地带	25.04	116.67	自流热水井	285	67.6	燕山早期花岗岩
济川	水质水温	$F_9$ (水库库底震群多发区)地带	25.63	118.74	自流热水井	175	46.6	晚侏罗纪—早白垩纪熔结凝灰岩
华安汰内	水质水温季测气体	$F_2$ 和 $F_{11}$ 交会地带	24.72	117.55	基岩裂隙上升泉	60	59.8	晚侏罗纪—早白垩纪火山凝灰岩
东孚	水质、水温	$F_1$ 和 $F_{11}$ 交会附近	24.56	117.94	抽水热水井	14	81.9	侏罗纪火山凝灰岩
汤坑	季测气体	$F_2$ 和 $F_{11}$ 地带	24.46	117.32	抽水热水井	30	75.9	燕山期花岗岩闪长岩
宫仔前	水质、季测气体	$F_2$ 和 $F_{11}$ 地带	24.43	117.38	抽水热水井	36	71.8	燕山期花岗岩
大坂	水质	政和—海丰断裂带	25.16	117.27	基岩裂隙上升泉	435	58.1	喜山早期花岗岩斑岩

3 观测异常提取方法及资料选取

地震的孕育和发生过程始终伴随着地下物质

运移、能量传输和条件改变,从而导致流体中元素和同位素的迁移与演化,进而形成地表可观测到的流体地球化学异常 (李营等, 2022)。流体地球化学前兆异常多以变化幅度大为主要特点,

容易识别。如2008年汶川 $M_s 8.0$ 地震前后康定地区部分断裂带交会处的温泉水样中 $K^+$ 和 $SO_4^{2-}$ 浓度增加了19.3%~59.6% (Chen *et al.*, 2014)。气体异常幅度比离子更大,如一般地震前 $H_2$ 浓度异常幅度会很大,高于背景值几十倍甚至更高(王基华等, 1991);且 $H_2$ 浓度多是在短时间内突然出现大幅度的异常升高,具有明显的突发性(张培仁等, 1993)。因此,可使用原始数据趋势动态法和经验阈值法提取流体地球化学异常,经验阈值法提取原则是根据地震的最佳对应效果确定判据,排除干扰后达到某阈值并多次对应地震且符合孕震机理,这个阈值则作为异常判定标准;原始数据趋势动态法提取原则为当某特征出现后多次对应地震,则这个特征可作为异常判定标准。本文研究资料为2021年1月—2023年6月构造地球化学观测网记录的水温、逸出气体及水化学离子观测数据,其阴、阳离子的测量误差绝对值均小于5%。地震目录采用中国地震台网中心的速报目录,由于该地震目录是动态的,为便于分析,所有图中的震级参照中国台湾地区气象局(均为 $M_L$ 震级),选取研究时段内中国台湾地区气象局 $M_L \geq 6.0$ 的地震目录(表2)进行分析。

表2 研究时段内中国台湾地区发生的6级以上地震

Tab. 2 Earthquakes with magnitude of 6 or above that have occurred in Chinese Taiwan during the selected research period

发震日期	发震地点	震中位置		统一快报震级 ( $M_S$ )	台湾地区气象局震级 ( $M_L$ )	震源深度/ km
		$\varphi_N/$ ( $^\circ$ )	$\lambda_E/$ ( $^\circ$ )			
2021-04-18	花莲县	23.94	121.43	6.1	6.2	5
2021-08-05	宜兰海域	24.82	122.31	5.8(6.3*)	6.0	10
2021-10-24	宜兰县	24.55	121.80	6.3	6.5	60
2022-01-03	花莲海域	24.00	122.39	6.4	6.0	15
2022-03-23	台东海域	23.45	121.55	6.6	6.7	20
2022-05-09	花莲海域	24.01	122.51	6.2	6.2	16
2022-06-20	花莲县	23.66	121.52	5.9(6.5*)	6.0	10
2022-09-17	台东县	23.05	121.21	6.5	6.6	10
2022-09-18	花莲县	23.14	121.20	6.9	6.8	10
2022-12-15	花莲海域	23.78	121.85	6.1	6.5	10

注:带“\*”震级来自中国地震台网中心正式目录。

## 4 观测结果分析

从观测结果可以看出,福建地区16个温泉的温泉气和水化学离子对中国台湾芮氏6级以上地震都有较为灵敏的反应,尤其是台湾花莲 $M_L 6.8$ 震群观测异常较多。温泉气体比温泉水化学离子反应更为灵敏,多表现为短临及短期特征,温泉水化学离子则多表现为短期和短临特征。温泉气体异常多为高值异常,温泉水化学离子异常则表现为高值异常、趋势上升及震荡或突跳等特征。异常幅度与震级相关性不大,但异常持续时间与震级有一定的相关性,一般表现为震级越大、异常持续时间越长、异常的空间分布范围越广。

### 4.1 温泉气体异常

#### 4.1.1 南埕自冒泉气体流速

2022年9月17—18日花莲 $M_L 6.8$ 震群发生前,南埕自冒泉气体流速于2022年6月29日出现超出经验阈值现象,于2022年7月12日达到最高值0.9708 mL/s,在持续1个多月的多次超经验阈值上限后,于8月17日恢复到阈值上限内,但高于均值;9月9日再次出现超经验阈值上限现象,随后发生了花莲 $M_L 6.8$ 震群,并于9月28日恢复到均值附近震荡(图2),这些现象表明南埕自冒泉气体流速表现为短临和短期预测相结合的指示意义。自2022年以来,南埕自冒泉气体流速在超经验阈值后,中国台湾地区发生芮氏6级以上地震共有7次,具体表现为南埕自冒泉气体流速超经验阈值后3~21 d内发震,该温泉气体流速具有良好的短临预测指示意义(图2)。

工人疗养院温泉水温与南埕自冒泉气体流速出现准同步异常,显示温泉异常具有区域性特征,这与中国台湾地区地震趋势增强是相符的。工人疗养院温泉水温自2022年3月起开始处于高于均值的状态,于3月3日达最高值101.3℃后发生了3月23日台东海域 $M_L 6.7$ 地震,震后于4月25日恢复到低于均值状态,4月30日又迅速回升到高于均值状态并一直维持高值状态(图3),且在5月9日花莲海域 $M_L 6.2$ 地震发生后也没有恢复的迹象,并于5月28日开始出现井喷,同时地热井周围地面上亦有强烈的水汽混合物喷出,测其水温均在102℃左右,井喷现象在花莲 $M_L 6.8$ 震群发生后仍未结束。

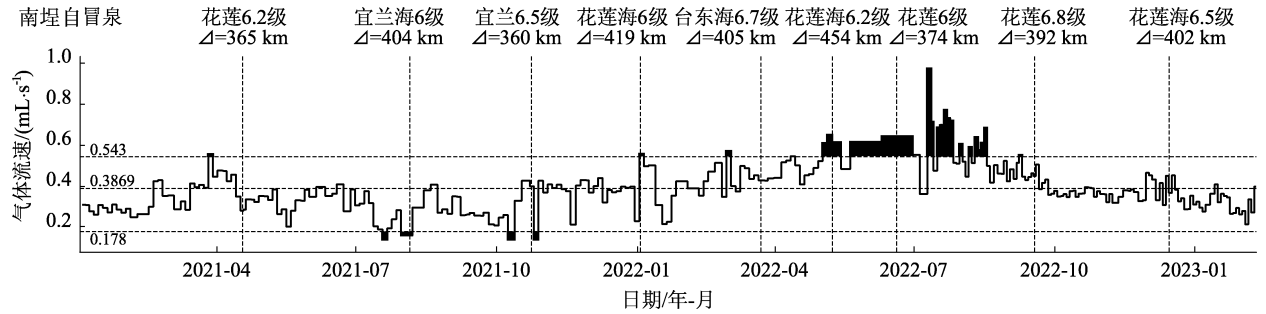


图2 南埕自冒泉气体流速与台湾6级以上地震的对应时序图

Fig. 2 The gas flow velocity in Nancheng hot spring in Fujian and earthquakes in Taiwan region from Jan., 2021 to Jan., 2023

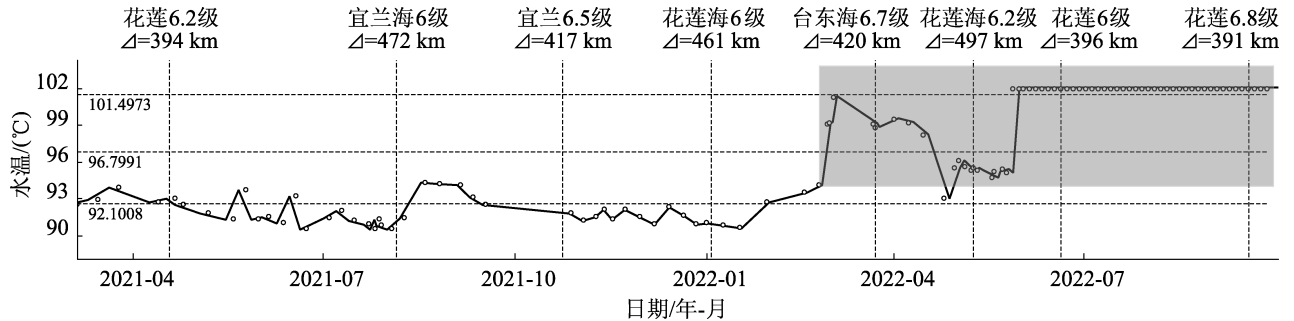


图3 工人疗养院井水温与台湾6级以上地震的对应时序图

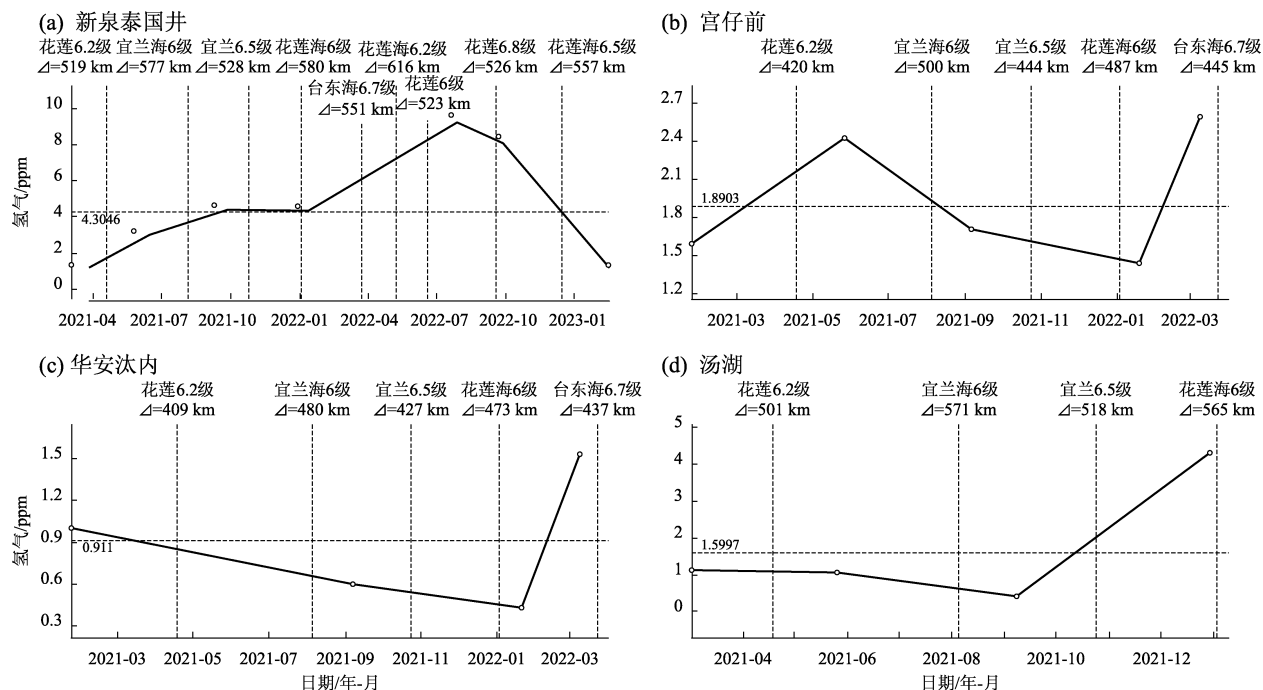
Fig. 3 Time series of water temperature in workers' sanatorium well in Fujian and earthquakes in Taiwan region

#### 4.1.2 $H_2$ 浓度及体积百分含量

通过对多期季度现场观测资料进行对比分析,发现多个观测点  $H_2$  浓度在临震前都出现较大幅度上升,最高值均出现在离发震时间最近的一期观测中,其中南埕自冒泉表现最为突出。2022 年花莲  $M_L 6.8$  震群发生前 2 个月南埕自冒泉逸出气  $H_2$  浓度高达 9.264 ppm,同样的现象发生在 3 月 23 日台东海域  $M_L 6.7$  地震前 13 d,  $H_2$  浓度比正常观测平均值大 4.6 倍;与南埕自冒泉  $H_2$  浓度最高值同时段观测的新泉泰国井  $H_2$  浓度也高达 9.63 ppm,比前后一个半月无地震事件发生的 2021 年 3 月 3 日的测值高出 8.31 ppm,同样的现象发生在 2022 年 1 月 3 日花莲海域  $M_L 6.0$  地震前,测值为 4.58 ppm,比 2021 年 3 月 3 日的测值高出 3.26 ppm;而前后各超 60 d 没有 6 级地震事件发生的 2023 年 2 月 15 日进行现场观测,  $H_2$  测值也仅为 1.31 ppm (图 4a)。因疫情影响,其他观测点在花莲  $M_L 6.8$  震群发生前未进行现场观测和取样,无法获取观测数据,但在之前的台湾芮氏 6 级地震前亦有此现象,如图 4b~d 所示。宫仔前、华安汰内温泉  $H_2$  浓度最高值分别出现在 2022 年 3 月 23 日台东海域  $M_L 6.7$  地震前 14 d 和 15 d,汤湖温泉  $H_2$  浓度最高值出现在 2022 年 1 月 3

日花莲海域  $M_L 6.0$  地震的前 4 d。这与王基华等 (1982) 和张培仁等 (1993) 的研究结果是相符的,即  $H_2$  浓度在震前出现异常时间较短,大多数在震前几十天、几天到几天。

通过对多期季测温泉气样中  $H_2$  体积百分含量的对比分析发现,多个温泉的  $H_2$  体积百分含量在震前 5 d 到 2 个月从 0 上升到可观测量级,这同样佐证了  $H_2$  浓度在临震前是突升的,且呈一定的量级。2022 年 9 月 18 日台湾花莲  $M_L 6.8$  地震前,南埕自冒泉和新泉泰国井  $H_2$  体积百分含量均创新高。因疫情影响,其他温泉观测点在该时段无法进行现场采样获取数据,但类似的现象在花莲  $M_L 6.8$  地震之前的台湾 6 级以上地震也出现过,如 2022 年 3 月 23 日台东海域  $M_L 6.7$  地震前 15 d 内  $H_2$  体积百分含量突升 (表 3)。这一观测现象说明福建温泉气中的  $H_2$  映震灵敏,在震前会出现一定量级的突变,同时也说明  $H_2$  逸出通道顺畅,逸出性极强,能以温泉为载体在地面被观测到。但  $H_2$  体积百分含量只对  $M_L 6.6$  以上地震有高值异常对应,并未取得小于  $M_L 6.6$  地震震例,如在花莲海域  $M_L 6.0$  地震前 7 d 内,高赖温泉并未记录到有  $H_2$  浓度异常。

图4 福建地区温泉观测点典型  $H_2$  浓度时序图Fig. 4 Typical  $H_2$  concentration time series in Fujian表3 福建温泉气体中  $H_2$  体积含量占比映震情况Tab. 3 Proportion of  $H_2$  volume content in the gas of hot springs in Fujian reflecting earthquakes in Taiwan region

测点名称	观测日期	$H_2$ 体积含量占比 (%)	距离地震天数/d	地震事件
南埕自冒泉	2022-01-18	—	—	—
	2022-03-10	0.003 3	13	2022-03-23 台东海域 $M_L$ 6.7 地震
	2022-07-19	0.003 8	60	2022-09-18 花莲 $M_L$ 6.8 震群
	2022-09-19	0.005 0	1 *	2022-09-18 花莲 $M_L$ 6.8 震群
汰内温泉	2021-09-07	—	—	—
	2022-01-21	—	—	—
	2022-03-08	0.001 2	15	2022-03-23 台东海域 $M_L$ 6.7 地震
高赖温泉	2021-09-10	—	—	—
	2021-12-27	—	7	2022-01-03 花莲海域 $M_L$ 6.0 地震
	2022-03-11	0.000 8	12	2022-03-23 台东海域 $M_L$ 6.7 地震
新泉泰国井	2021-09-09	—	—	—
	2021-12-29	0.000 8	5	2022-01-03 花莲海域 $M_L$ 6.0 地震
	2022-07-21	0.001 1	60	2022-09-18 花莲 $M_L$ 6.8 震群
	2022-09-21	0.002 0	3 *	2022-09-18 花莲 $M_L$ 6.8 震群

注：“—”表示低于检出限，“\*”表示震后天数。

#### 4.2 温泉水化学离子异常

福建温泉水化学离子在台湾6级地震前也出现了许多观测异常，尤其是2022年9月18日花莲  $M_L$  6.8 地震前，福建构造地球化学观测网温泉观测点的水化学离子出现了群体性、准同步异常，呈趋势上升、持续高值、超经验阈值、震荡、临震

突跳等动态。

趋势上升：黄楮林、南埕 ZK1 自流热水钻孔  $F^-$ ，华安汰内温泉水溶性  $SiO_2$  在台湾6级地震发生前多表现为趋势上升。如2022年1月3日花莲海域  $M_L$  6.0、3月23日台东海域  $M_L$  6.7 地震及9月18日花莲  $M_L$  6.8 震群前，黄楮林  $F^-$  表

现为趋势上升,并于震后恢复。南埕 ZK1  $F^-$  在 2022 年 1 月 3 日花莲海域  $M_L 6.0$  地震前发生趋势上升,震后于 1 月 10 日恢复,但从 1 月 13 日又开始加速上升,直到台东海域  $M_L 6.7$  地震前 1 个月达最高值后逐渐恢复,恢复到均值附近发震,在 9 月 18 日花莲  $M_L 6.8$  震群发生前 2 个月又开始出现趋势上升,并于震后恢复。在统计的 9 次台湾地震中有 4 次地震发生前汰内温泉水溶

性  $SiO_2$  出现趋势上升现象,分别是 2022 年 3 月 23 日台东海域  $M_L 6.7$  地震、5 月 9 日花莲海域  $M_L 6.2$  地震、9 月 18 日花莲  $M_L 6.8$  震群及 12 月 15 日花莲海域  $M_L 6.5$  地震,如图 5 所示。2023 年中国台湾地区没有发生 6 级以上地震,这些温泉观测点的水化学离子测值均在均值附近正常波动,汰内温泉和黄楮林温泉的水化学离子低值是因为暴雨洪水混入所致。

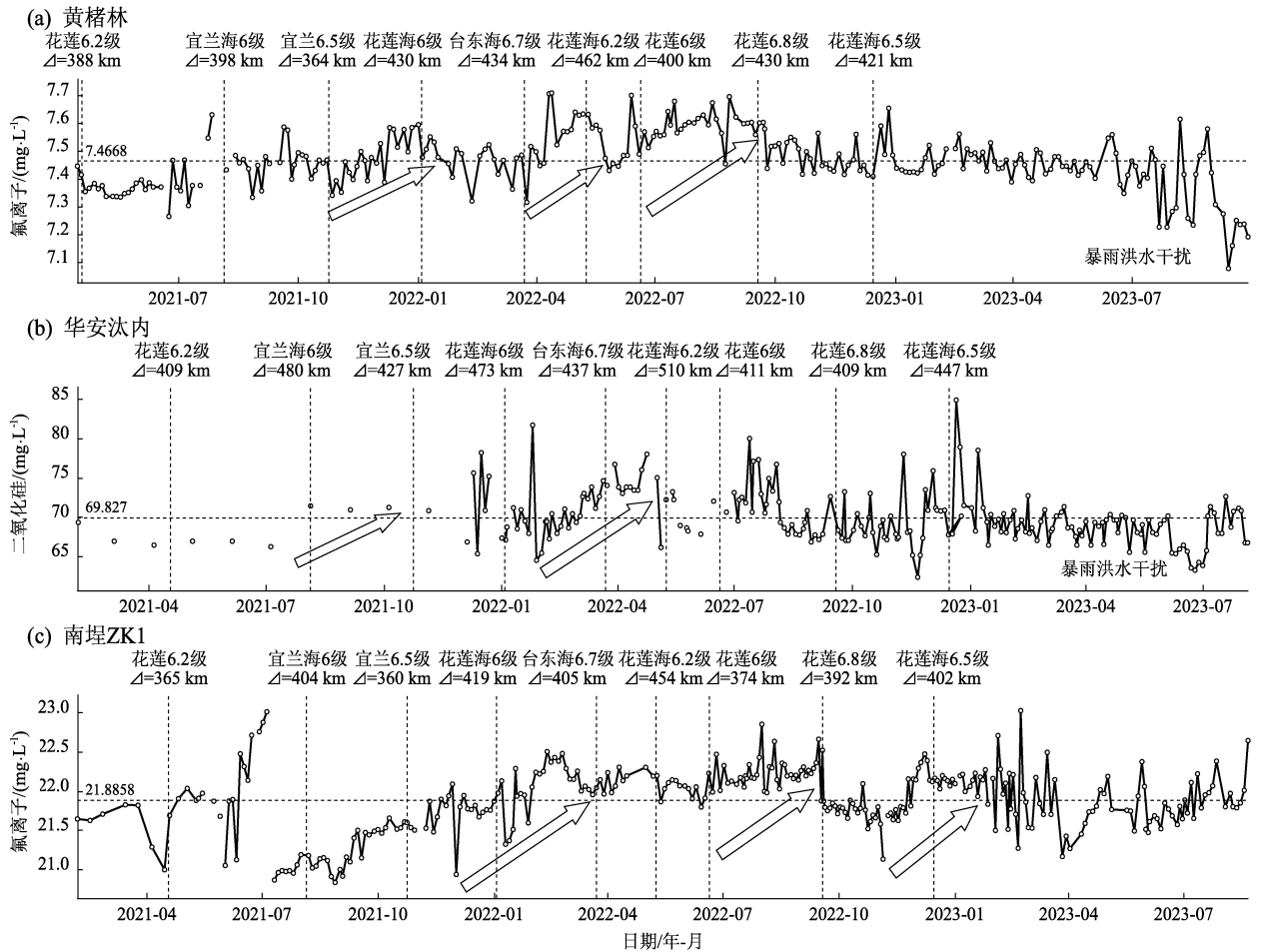


图5 福建地区温泉观测点典型趋势上升异常

Fig. 5 Typical upward trend anomalies of the hydrochemical ions in the hot springs in Fujian

震荡、临震突跳:这一现象在 2022 年 9 月 18 日花莲  $M_L 6.8$  震群发生前尤为突出(图 6)。黄楮林  $Na^+$ 、 $K^+$  在花莲  $M_L 6.8$  震群发生前 9 月 10 日发生临震突跳,同样的现象在 5 月 9 日花莲海域  $M_L 6.2$  地震前 8 天、2021 年 10 月 24 日宜兰  $M_L 6.5$  地震前 1 天也发生过。花莲  $M_L 6.8$  震群发生前一个月内南埕 ZK1 自流热水钻孔  $F^-$ 、 $Cl^-$ 、 $Li^+$ 、 $Na^+$ 、 $K^+$  出现群体临震突跳;在花莲  $M_L 6.8$

震群发生前后(9 月 7 日至 10 月 6 日),高赖  $SiO_2$  出现震荡、突跳;8 月 31 日  $SO_4^{2-}$  发生突跳并超经验阈值,一直持续至 9 月 28 日后回落,在 1 月 3 日花莲海域  $M_L 6.0$ 、5 月 9 日花莲海域  $M_L 6.2$  地震前也发生过  $SO_4^{2-}$  临震突跳及震前高值异常现象。济川的  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  在花莲  $M_L 6.8$  震群震前 1 个月左右突跳,同样的现象在其他几次台湾 6 级地震前也出现过。大坂温泉  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  在

2022年9月1日出现临震突跳。新泉泰国井  $\text{Na}^+$  在9月5日临震突跳, 这种现象在1月3日花莲海域  $M_L 6.0$ 、3月23日台东海域  $M_L 6.7$ 、5月9日花莲海域  $M_L 6.2$  地震前半个月内也出现过。东

孚井阳离子在花莲  $M_L 6.8$  震群临震前一天即9月16日发生群体突跳、湖里  $\text{SiO}_2$  在震前一个月出现突跳; 华安温泉阴离子在临震前一个半月内出现群体震荡、突跳。

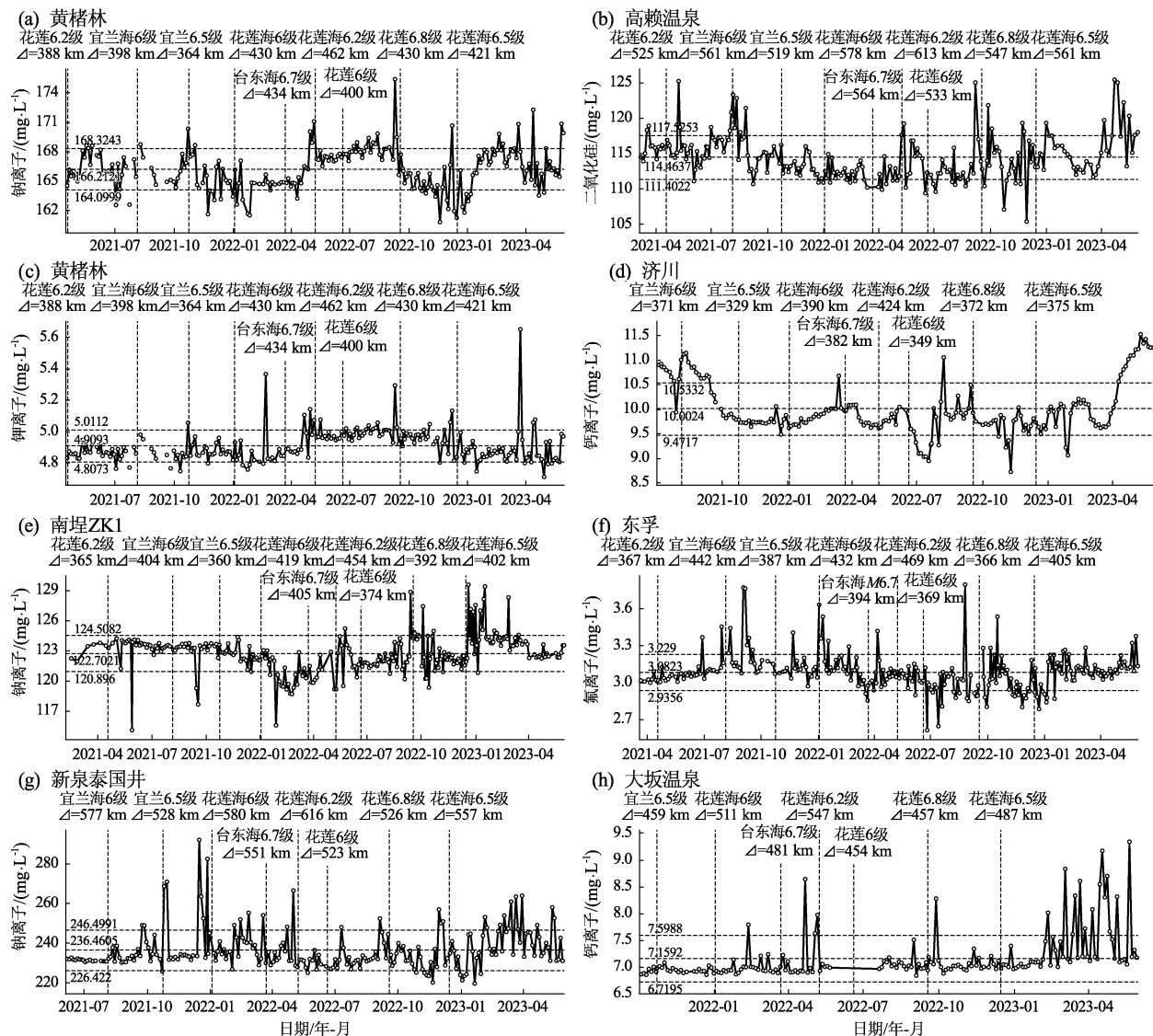


图6 福建地区温泉观测点典型震荡突跳异常

Fig. 6 Typical oscillation abrupt changing anomalies of the values of the hydrochemical ions in the hot springs in Fujian

持续高值: 2022年花莲  $M_L 6.8$  震群发生前, 南埕 ZK1 的  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{F}^-$  于5月中旬开始持续高值, 并于震后恢复到均值附近; 广汤的阴离子于4月22日开始发生趋势上升, 在5月9日花莲海域  $M_L 6.2$  地震发生后并未恢复, 而是继续维持高值, 最终于花莲  $M_L 6.8$  震群发生后恢复正常; 高赖温泉  $\text{F}^-$  在4月下旬开始呈现趋势上升, 并于5月9日花莲海域  $M_L 6.2$  地震发生后立即回

落, 随后又发生震荡并超经验阈值, 之后一致持续高值, 8月31日与  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  同步突跳上一新台阶并持续到花莲  $M_L 6.8$  震群发生后12天即9月30日回落, 显示出较好的短临特征; 湖里温泉的  $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Li}^+$  于5月开始持续高值,  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Li}^+$  在花莲  $M_L 6.8$  震群发生前半个月内恢复正常,  $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$  在震后仍持续高值 (图7)。

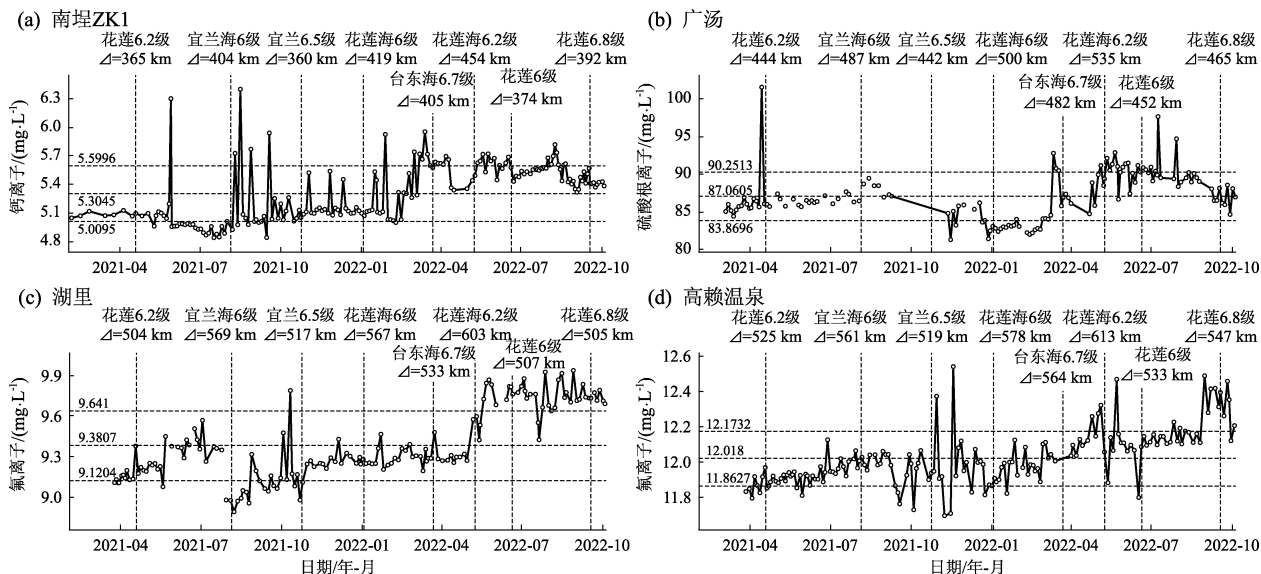


图7 福建地区温泉观测点典型持续高值异常

Fig. 7 Typical sustained high-value anomalies of the hydrochemical ions in the hot springs in Fujian

## 5 异常机理讨论

中国台湾地区地震均由与板块运动有关的大型板块主边界构造错动导致,发震区域主要位于板块碰撞-俯冲的琉球俯冲带、花东纵谷缝合带等。2021年1月—2023年6月中国台湾地区发生多次6级强震,从发震构造及其运动性质可以看出,菲律宾海板块在琉球俯冲体系的震源破裂以右旋走滑运动为主,其震源破裂以逆断兼左旋走滑运动为主(图1)。前人研究显示这一区域的构造运动均有一个动力机制,即菲律宾海板块持续以82 mm/a的速率往北西305°~309°向欧亚板块推挤(Suppe, 1981; Lee *et al*, 2015; Sibuet *et al*, 2021),故台湾地区6级以上强震均与板块运动有关。而符合板块运动特征的强震事件,一般具有较大的影响范围和较远的传播距离,一旦台湾地区孕育强震,深部流体就有可能通过这些强构造关联提供的良好通道由温泉携带到地表,从而被福建地区温泉的地球物理和水文地球化学参数捕捉到。总结本文震例可见,温泉点的映震震中距最远达562 km,远大于《震例总结规范》(DB/T 24—2007)对5.0~5.9、6.0~6.9和7.0~7.9级地震的前兆异常的总结范围200、300和500 km。廖丽霞等(2010, 2019, 2020)研究也显示福建地区温泉对中国台湾地区6及以上地震的映震范围在258~568 km,最近的为1994年9月16日台湾

海峡 $M_s$ 7.3地震,最远的为1996年9月6日南屿 $M_s$ 7.1地震。

本文以南垵温泉为例,尝试使用闽台板块应力传导模式,并结合地球化学对该温泉的地球物理和地球化学异常进行解析。通过对2021年—2023年7月台湾东部地区花莲—宜兰一带芮氏6级以上强震案例研究发现,该区地震对福建构造区域的动力影响因发震构造部位和应力方向的不同,产生两种影响模式:第一种是正向挤压模式,深部物质受到压缩而发生加速向上运移导致气体含量骤增。以2022年花莲 $M_L$ 6.8震群为例,其发震断层主要为花东纵谷断裂带内的池上、玉里断层,由菲律宾海板块向WN推挤造成,而南垵温泉位于菲律宾海板块向欧亚板块推挤的应力轴上,受板块正向挤压,温泉气体流速会随着地壳应力的增大而增加;当应力突破极限状态气体流速激增到极大值后发生地震;震后随着应力调整,气体流速又会逐渐回落,闽台板块应力的传导模式如图8所示。花莲、台东地区的多次地震均符合该传导模式,异常特征表现为震前气体浓度及流速逐渐增大,并于震后回落。第二种是走滑拉张模式,震中位于琉球俯冲带弧后冲绳海槽区域,处于弧后拉张环境,该区的孕震环境使福建陆块受到走滑拉张作用,因此温泉气体流速呈现相反状态,异常特征表现为震前气体流速降低,并于震后回升,如2021年8月5日宜兰海域 $M_L$ 6.0地震、2021年10月24日宜兰 $M_L$ 6.5地震就是如此。

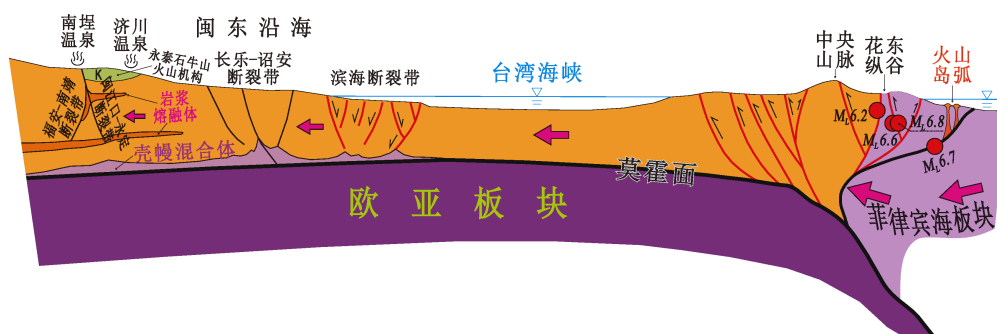
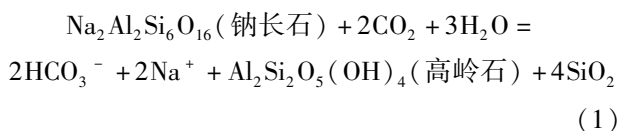


图 8 闽台板块应力传导模式示意图

Fig. 8 Schematic cartoon showing the stress transmission mode between the Fujian and Taiwan plates

离子浓度主要与水-岩相互作用有关,  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$  等离子主要与地壳岩石中的长石组分有关,  $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  等离子主要与岩石中黑云母及来自于幔源的矿物如辉石有关,  $F^-$  和  $Cl^-$  主要来自地壳的花岗岩或酸性火山岩。 $F^-$  还有可能是由地幔流体通过深切地幔的深大断裂借助温泉上传到地面的, 而福建地区发育有大面积的中酸性岩浆岩, 因此上述离子在地震孕育过程中较为活跃, 可以捕捉到地震前兆异常。对南埕温泉进行野外考察发现, 温泉含水层的岩性是中酸性火山凝灰岩, 钻孔岩芯中可见的矿物有斜长石、钾长石、黑云母、绢云母、绿泥石。福建地区 16 个温泉观测点的含水层岩性多为中酸性岩浆岩 (表 1), 这些岩石的主要矿物为长石, 而温泉水多为大气降水补给深循环形成, 溶有较充足的  $CO_2$ , 水岩之间存在多种动态化学反应, 从而使离子及水溶性  $SiO_2$  浓度在孕震过程中随温度、压力的改变发生变化。以钠长石为例存在如下动态过程:



离子浓度的趋势上升很可能是应力逐渐增强的体现,持续高值则是应力趋于新的平衡点的体现,突跳则可能是深部物质突然上涌的体现。从图 1、5 可见,  $F^{-}$ 、 $SiO_2$  浓度趋势上升的温泉观测点多出现在闽东火山断拗带 (II), 这一构造块体在中生代以大规模火山喷发活动为主, 形成大面积燕山期花岗岩和火山岩, 岩石中含有大量富含  $F^{-}$ 、 $Cl^{-}$  等挥发分的包裹体, 尤其是  $F^{-}$  在应力逐渐增强的情况下持续溶入温泉中; 同时作

为地幔流体中挥发分的主要成分,  $F^-$  还可借助断裂通道上涌, 使  $F^-$  浓度呈现趋势上升动态。由于离子之间也存在化学反应, 水化学离子的映震动态则更为复杂, 影响离子浓度的因素除温度、气压外, 还有离子性质、酸碱度、不同含水层混合等其他因素, 所以离子映震动态更加复杂多样。

温泉观测点所处的构造位置也为应力和深部信息的传导提供了有利条件,前人研究认为断层的交会部位可成为热流体向地表运移的重要通道。从全球尺度来看,气体强烈排放带与板块缝合带、火山带、地热带和地震带等都有极高的重合度 (Tamburello *et al.*, 2018), 福建构造地球化学观测网点均布设在这些 NE 和 NW 向深大断裂交会部位,如黄楮林、南埕、广汤、高赖温泉等。从图 9 可以明显看出,NE 向断裂规模大、切割深,宁化—泉州地质剖面西侧高赖温泉所处的  $F_6$  及其东侧的  $F_1$  都是切割到莫霍面的超壳断裂,剖面中部的  $F_4$  明显错断莫霍面,这一构造格局与燕山早期古太平洋板块俯冲以及燕山晚期—喜马拉雅早期,福建陆内地幔上隆、地壳大范围伸展减薄、幔源物质底侵 (李三忠等, 2019) 有关。剖面西部局部区域也存在糜棱岩或岩浆熔融带,如广汤温泉下方。南埕温泉中地壳和下地壳存在两层岩浆熔融带,与断裂构造连通,为南埕温泉提供热源、深部流体来源及深部物质上涌的通道。福建省地震局近年来的深部探测成果也证实南埕温泉下地壳存在隆起 (蔡辉腾等, 2016), 推测该处存在一层壳幔混合体。黄楮林温泉所在区域出露的橄榄玄武岩中夹有形成深度 136 km 的地幔深源包体—石榴子石二辉橄榄岩 (刘若新等, 1985), 上地幔

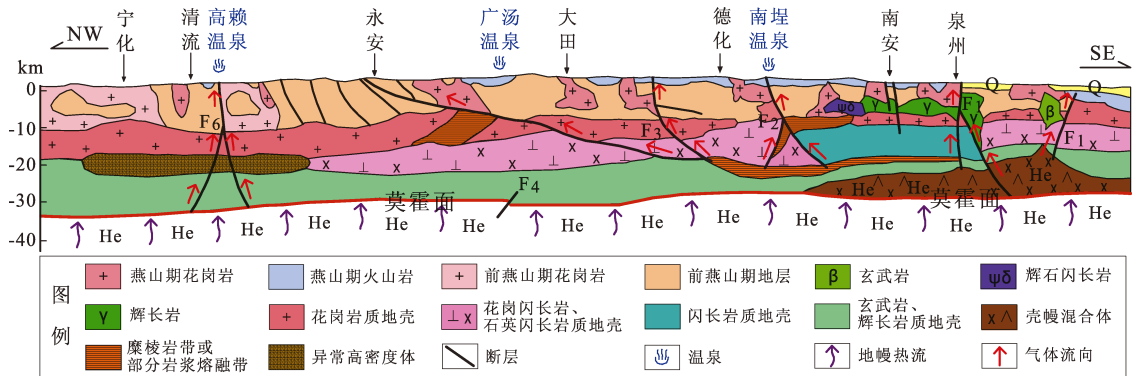


图9 福建省宁化—泉州地质剖面 (据马丽芳, 2002 修改)

Fig. 9 Ninghua - Quanzhou geological section in Fujian province (Modified from Ma, 2002)

顶部有明显断开的迹象, 断距为 3 km, 福州盆地下方存在地幔上隆 (廖其林等, 1990)。福建地区 NW 向断裂带是区域最新构造, 基本切割其他走向的构造, 力学性质多以扭性、张性和张扭性为主, 断裂带多为  $60^\circ$  以上的高倾角, 其中以  $F_8$ 、 $F_{11}$  的倾角最大, 达  $75 \sim 85^\circ$  (王善雄等, 2019), 为深部物质上涌提供了有利通道。

氦同位素是一种判识幔源气体最灵敏的地球化学示踪指标, 理论上认为  $^3\text{He}/^4\text{He}$  是深部信息多少的标尺 (陶明信等, 2005), 在地表检测到的深源气体可以很好地反映地球深部信息 (方震等, 2012)。大气中  $^3\text{He}/^4\text{He}$  的比值以  $R_a$  表示, 其值为  $1.4 \times 10^{-6}$ , 样品中的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  测值以  $R$  表示。为消除样品在取样及地表以下存在的大气污染, 通过样品的  $^4\text{H}/^{20}\text{Ne}$  对样品的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  进

行大气污染校正, 经校正后的样品  $^3\text{He}/^4\text{He}$  表示为  $R_c$ 。  $R_c/R_a$  可以对比评估幔源气体向大气释放的强度。自 2021 年福建地区构造地球化学观测网布设以来, 已捕捉到多个温泉观测点在多次台湾地区 6 级以上强震临震前发生深部信息增强的观测事实。通过对多期的季度观测资料 (图 10、表 4) 进行对比分析发现, 广汤、莒溪、黄楮林、新泉泰国等温泉气体的氦同位素比值  $R_c/R_a$  最高值均出现在震前 10 d 左右 (因疫情影响, 未取到花莲  $M_L 6.8$  地震临震前半个月的气样, 故无震例), 说明震前幔源物质上涌的动态平衡被破坏, 发生幔源物质的加速上涌。这种地震前后温泉气体中同位素测值上升的现象在 2008 年汶川  $M_S 8.0$  地震前后、2016 年理塘  $M_S 5.1$  地震前也出现过 (Zhou *et al*, 2015, 2017)。

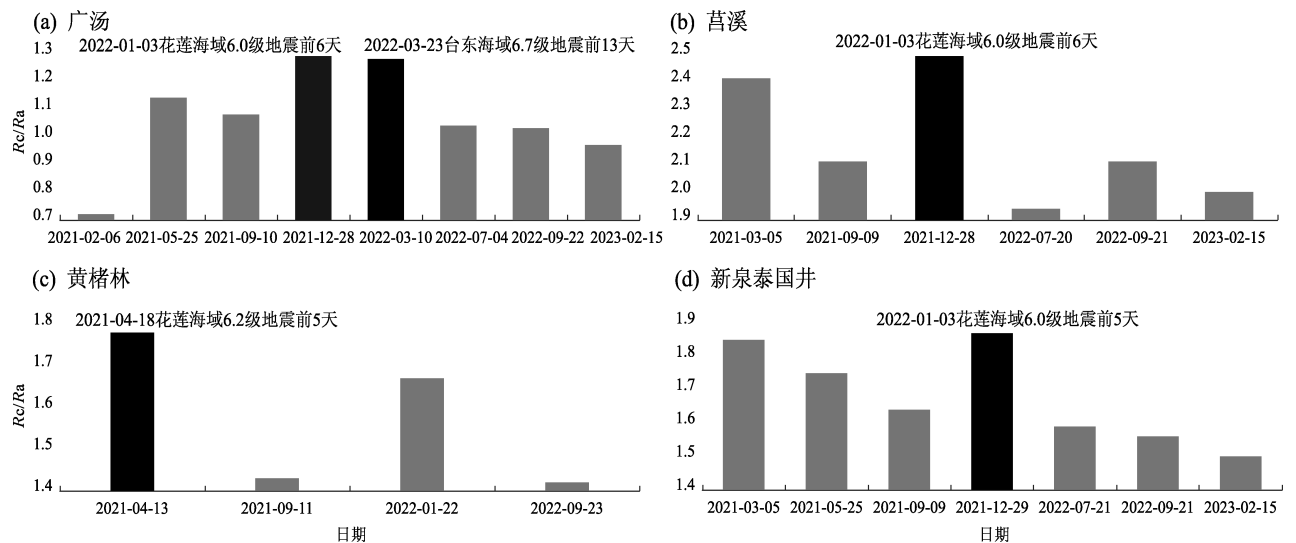
图10  $R_c/R_a$  时序图Fig. 10 Helium isotope ratio  $R_c/R_a$  changing with time

表4  $R_c/R_a$  季度观测比值  
Tab. 4 Helium isotope ratios  $R_c/R_a$

温泉名称	取样时间	$R_c/R_a$	温泉名称	取样时间	$R_c/R_a$
新泉泰国	2021-03-05	1.85	黄楮林	2021-04-13	1.78
	2021-05-25	1.75		2021-09-11	1.43
	2021-09-09	1.64		2022-01-22	1.67
	2021-12-29	1.87		2022-09-23	1.42
	2022-07-21	1.59	广汤	2021-02-06	0.72
	2022-09-21	1.56		2021-05-25	1.14
	2023-02-15	1.50		2021-09-10	1.08
莒溪	2021-03-05	2.41		2021-12-28	1.29
	2021-09-09	2.11		2022-03-10	1.28
	2021-12-28	2.49		2022-07-04	1.04
	2022-07-20	1.94		2022-09-22	1.03
	2022-09-21	2.11		2023-02-15	0.97
	2023-02-15	2.00			

## 6 结论

福建地区特殊的地质构造使16个温泉观测点的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 和 $\text{H}_2$ 、水化学离子浓度在2022年9月18日台湾花莲 $M_L 6.8$ 震群前出现异常,温泉气体表现为短临异常特征,水化学离子表现为短期和短临异常特征,其他台湾6级以上强震亦有类似的前兆异常,其成因及映震特征总结如下:

(1) 福建地区的构造格局与台湾地区6级以上地震关联性较强,台湾强震多数由板块碰撞-俯冲引起,能够通过深部动力传导引起福建地区温泉的响应。规模大、切割深的断裂带多是深部流体逸出的良好通道,而多组不同方向断裂带的交会处常是映震灵敏点,如福建地区NE与NW向两组断裂带交会处的黄楮林、南埕、广汤温泉等。

(2) 临震前,福建地区温泉中有仪器可观测到量级的深部流体从地幔或地壳深处涌出,温泉气体更为突出,而这种量级的涌出常常是突发性的,只有临近地震时才出现。 $\text{H}_2$ 浓度异常因其逸出性极强更易以温泉为载体被观测到,取得的震例最多。 $\text{H}_2$ 浓度、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 及温泉气体流速可以作为地震的短临(期)预测指标加以应用。

(3) 福建地区中酸性岩浆岩遍布,使温泉水化学离子在孕震过程中非常活跃,会因温度、压

力、浓度的改变呈现趋势上升、持续高值、震荡、突跳等特征,可以作为短期预测指标。

温泉地球化学观测投入少、观测灵活、信息量大,能观测到许多深部信息且多具有短临特征,是较好的时间预测指标。福建温泉地球化学观测的深入研究,对判断闽台地震危险性及地震预测指标提取具有重要意义,对地震台站遴选也可提供技术支撑,还可为其他省份开展这项研究提供借鉴。

本文中涉及到国界的插图均已送相关部门审查并获通过。受理号:国审字(2024)第03038号;审图号:GS(2024)2976号。

本研究是在福建省地震局构造地球化学攻关团队工作的基础上提炼而成,感谢攻关团队全体成员的辛勤工作。感谢三明、龙岩、泉州、漳州、莆田、厦门、宁德各地市地震局及福州市防震减灾中心在温泉观测点遴选及现场观测中提供的多方支持和帮助;感谢李立武研究员和邢蓝田副研究员在氦、氩、碳同位素及温泉气体体积百分比观测方面提供的支持。

## 参考文献:

- 蔡辉腾,金星,王善雄,等. 2016. 宁化—大田—惠安地壳构造与速度结构特征[J]. 地球物理学报, 59(1): 157-168.
- Cai H T, Jin X, Wang S X, et al. 2016. The crust structure and velocity structure characteristics beneath Ninghua - Datian - Hui'an[J]. Chinese Journal of Geophysics, 59(1): 157-168. (in Chinese)
- 方震,刘耀炜,杨选辉,等. 2012. 地震断裂带中气体来源及运移机制研究进展[J]. 地球物理学进展, 27(2): 483-495.
- Fang Z, Liu Y W, Yang X H, et al. 2012. Research progress on gas sources and migration mechanisms in earthquake fault zones [J]. Progress in Geophysics, 27(2): 483-495. (in Chinese)
- 福建省地质调查研究院. 2016. 中国区域地质志·福建志[M]. 北京:地质出版社.
- Geology Investigation Institute of Fujian Province. 2016. Regional geology of Fujian, China [M]. Beijing: Geology Press. (in Chinese)
- 李三忠,曹现志,王光增,等. 2019. 太平洋板块中—新生代构造演化及板块重建[J]. 地质力学学报, 25(5): 642-677.
- Li S Z, Cao X Z, Wang G Z, et al. 2019. Meso - cenozoic tectonic evolution and plate reconstruction of the Pacific plate[J]. Journal of Geomechanics, 25(5): 642-677. (in Chinese)
- 李三忠,索艳慧,李玺瑶,等. 2018. 西太平洋中生代板块俯冲过程与东亚洋陆过渡带构造-岩浆响应[J]. 科学通报, 63(16): 1550-1593.

- Li S Z, Suo Y H, Li X Y, *et al.* 2018. Mesozoic plate subduction in West Pacific and tectono-magmatic response in the East Asian ocean-continent connection zone [J]. Chinese Science Bulletin, 63 (16): 1550-1593. (in Chinese)
- 李营, 陈志, 胡乐, 等. 2022. 流体地球化学进展及其在地震预测研究中的应用[J]. 科学通报, 67(13): 1404-1420.
- Li Y, Chen Z, Hu L, *et al.* 2022. Advances in seismic fluid geochemistry and its application in earthquake forecasting [J]. Chinese Science Bulletin, 67(13): 1404-1420. (in Chinese)
- 廖丽霞, 秦双龙, 洪旭瑜. 2020. 华南地区流体地震预测指标建立、应用和反思[J]. 地震研究, 43(2): 310-319.
- Liao L X, Qin S L, Hong X Y. 2020. Establishment, application and reflection of fluid earthquake prediction index in South China [M]. Journal of Seismological Research, 43(2): 310-319. (in Chinese)
- 廖丽霞, 郑永通, 袁丽雯. 2010. 华安汰内井水氢对闽台地震的映震特征差异性分析[J]. 地震, 30(4): 133-139.
- Liao L X, Zheng Y T, Yuan L W. 2010. Analysis on the difference of reflecting characteristics of hydro-radon in Huaan-Taini well to earthquakes in Fujian and Taiwan region [J]. Earthquake, 30(4): 133-139. (in Chinese)
- 廖丽霞. 2019. 福建地下流体典型异常核实及分析应用[M]. 北京: 地震出版社.
- Liao L X. 2019. The verification and analysis of typical anomalies in underground fluids in Fujian Province [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 廖其林, 王振明, 邱陶兴, 等. 1990. 福州盆地及其周围地区地壳深部结构与构造的初步研究[J]. 地球物理学报, 33(2): 163-173.
- Liao Q L, Wang Z M, Qiu T X, *et al.* 1990. Study on the deep crustal structure and tectonics of the Fuzhou Basin and its surrounding Areas [J]. Chinese Journal of Geophysics, 33(2): 163-173. (in Chinese)
- 刘若新, 樊祺诚, 孙建中. 1985. 中国几个地方的石榴石二辉橄榄岩捕虏体研究[J]. 岩石学报, 1(4): 24-33.
- Liu R X, Fan Q C, Sun J Z. 1985. Study on garnet lherzolite xenoliths from eastern China [J]. Acta Petrologica Sinica, 1(4): 24-33. (in Chinese)
- 马丽芳. 2002. 中国地质图集[M]. 北京: 地质出版社.
- Ma L F. 2002. Geological atlas of China [M]. Beijing: Geology Press. (in Chinese)
- 陶明信, 徐永昌, 史宝光, 等. 2005. 中国不同类型断裂带的地幔脱气与深部地质构造特征[J]. 中国科学: 地球科学, 35(5): 441-451.
- Tao M X, Xu Y C, Shi B G, *et al.* 2005. Mantle degassing and deep geological structure characteristics of different types of fault zones in China [J]. Scientia Sinica Terrae, 35(5): 441-451. (in Chinese)
- 王基华, 孙凤民, 张培仁. 1991.  $H_2$  异常和地震活动的关系[J]. 华北地震科学, 9(2): 59-64.
- Wang J H, Sun F M, Zhang P R. 1991. Relationship between hydrogen anomaly and seismic activities [J]. North China Earthquake Sciences, 9(2): 59-64. (in Chinese)
- 王基华, 张培仁, 孙凤民. 1982. 地震前后地下氢气异常变化的又一实例[J]. 地震, 2(4): 17-34.
- Wang J H, Zhang P R, Sun F M. 1982. Another example of abnormal changes in underground hydrogen gas before and after earthquakes [J]. Earthquake, 2(4): 17-34. (in Chinese)
- 王培宗, 陈耀安, 曹宝庭, 等. 1993. 福建省地壳-上地幔结构及深部构造背景的研究[J]. 福建地质, 7(2): 79-158.
- Wang P Z, Chen Y A, Cao B T, *et al.* 1993. Crust-upper-mantle structure and deep structural setting of Fujian Province [J]. Geology of Fujian, 7(2): 79-158. (in Chinese)
- 王善雄, 陈伟, 林琛, 等. 2019. 永安-晋江断裂带活动性研究[M]. 北京: 地质出版社.
- Wang S X, Chen W, Lin C, *et al.* 2019. Study on the activity of the Yong'an Jinjiang fault zone [M]. Beijing: Geology Press. (in Chinese)
- 张健, 王蓓羽, 唐显春, 等. 2018. 华南陆缘高热流区的壳幔温度结构与动力学背景[J]. 地球物理学报, 61(10): 3917-3932.
- Zhang J, Wang B Y, Tang X C, *et al.* 2018. Temperature structure and dynamic background of crust and mantle beneath the head of the South China continental margin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 61(10): 3917-3932. (in Chinese)
- 张培仁, 王基华, 孙凤民. 1993. 氢——预报地震的灵敏元素[J]. 地震地质, 15(1): 69-77.
- Zhang P R, Wang J H, Sun F M. 1993. Hydrogen—a sensitive element to predictable earthquake [J]. Seismology and Geology, 15(1): 69-77. (in Chinese)
- 张森琦, 吴海东, 张杨, 等. 2020. 青海省贵德县热水泉干热岩体地质-地热地质特征[J]. 地质学报, 94(5): 1591-1605.
- Zhang S Q, Wu H D, Zhang Y, *et al.* 2020. Geological and geothermal characteristics of hot water spring dry hot rock mass in Guide County, Qinghai Province [J]. Acta Geologica Sinica, 94(5): 1591-1605. (in Chinese)
- 赵海玲, Frey F A, Hang S C, 等. 2003. 东南沿海地区古近纪大陆岩石圈地幔特征及成因[J]. 地学前缘, 10(3): 77-85.
- Zhao H L, Frey F A, Hang S C, *et al.* 2003. Characteristics and genesis of the Paleogene continental lithospheric mantle in the southeastern coastal region [J]. Earth Science Frontiers, 10(3): 77-85. (in Chinese)
- DB/T 24—2007, 震例总结规范[S].
- DB/T 24—2007, Summary specification for earthquake cases [S]. (in Chinese)
- Chen Z, Du J G, Zhou X C, *et al.* 2014. Hydrogeochemistry of the hot springs in western Sichuan Province related to the Wenchuan  $M_{8.0}$  earthquake [J]. The Scientific Word Journal, doi: org/10.1155/2014/901432.
- Lee Y H, Byrne T, Wang W H, *et al.* 2015. Simultaneous mountain building in the Taiwan orogenic belt [J]. Geology, 43(5): 451-454.
- Liao L, Zhou Y, Lin Z, *et al.* 2023. Gas geochemistry of the hot springs gas in Fujian province, SE China: Insight into the deep faults and seis-

- mic activity[J]. *Front Earth Sci*, 11:1277100.
- Sibuet J C, Zhao M, Wu J, *et al.* 2021. Geodynamic and plate kinematic context of South China Sea subduction during Okinawa trough opening and Taiwan orogeny [J]. *Tectonophysics*, 817, 229050.
- Suppe J. 1981. Mechanics of mountain building and metamorphism in Taiwan[J]. *Memoir of The Geological Society of China*, 4:67–89.
- Tamburello G, Pondrelli S, Chiodini G, *et al.* 2018. Global – scale control of extensional tectonics on CO<sub>2</sub> earth degassing[J]. *Nat Commun*, 9: 4608.
- Tian J, Li Y, Zhou X, *et al.* 2021. Geochemical characteristics of hydrothermal volatiles from southeast China and their implications on the tectonic structure controlling heat convection[J]. *Frontiers in Earth Science*, 9:1863–4621.
- Wang B, Zhou X, Zhou Y, *et al.* 2021. Hydrogeochemistry and precursory anomalies in thermal springs of Fujian(Southeastern China) associated with earthquakes in the Taiwan Strait[J]. *Water*, 13(24):3523.
- Zhou X C, Liu L, Chen Z, *et al.* 2017. Gas geochemistry of the hot spring in the Litang fault zone, Southeast Tibetan Plateau[J]. *Applied Geochemistry*, 79:17–26.
- Zhou X C, Wang W C, Chen Z, *et al.* 2015. Hot spring gas geochemistry in western Sichuan Province, China after the Wenchuan  $M_s 8.0$  Earthquake[J]. *Terr Atmos Ocean Sci*, 26(4):361–373.

## Discussion on Geochemical Observation Anomaly and Mechanism of Fujian Hot Springs before Earthquakes of Magnitude 6 and above in Chinese Taiwan

LIAO Lixia, CHEN Wei, ZHOU Yueyong  
(Fujian Earthquake Agency, Fuzhou 350003, Fujian, China)

### Abstract

In order to monitor and predict earthquakes in Fujian and Taiwan of China, we have set up a geochemical observation network at 16 hot spring sites along the main tectonic parts of Fujian, observing the helium – neon – carbon isotope, hydrogen concentration and volume ratio, gas flow rate, and hydrochemical ions in the hot spring gas for short-term and imminent seismic prediction research. Based on the observation results from Jan., 2021 to Jul., 2023, this paper discusses the seismic reflection ability of Fujian hot spring geochemistry on the  $M_L 6.8$  earthquake in Hualian, Taiwan in 2022 and other earthquakes of magnitude  $M_L 6$  and above that occurred between 2021 and Jul., 2023. The results show that: ① Before the earthquake, there were group anomalies in the geochemistry of Fujian hot springs with reproducibility; Hot spring gases are more prominent, with high value anomalies predominating; the main abnormal forms of hydrochemical ions are upward trend, sustained high values, and oscillations; anomalies have good short-term and imminent prediction significance for the occurrence of strong earthquakes. ② The tectonic pattern of Fujian is closely related to Taiwan, and Taiwan earthquakes are mostly caused by plate collision and subduction. The stress can cause the response of Fujian hot springs through deep dynamic conduction of deep faults, leading to anomalies in hot spring gases and hydrochemical ions; The unique mid-acidic geochemical background in Fujian is also one of the factors that contribute to the sensitivity of hydrochemical ions to earthquakes.

**Keywords:** earthquakes with  $M_L 6$  or above in Taiwan region; prediction index; hot springs in Fujian region; tectono – geochemical observation network; hot spring gas; hydrochemical ion