

DOI: 10.13512/j.hndz.2014.01.014

仙游震群型地震的特点及地震机理分析

毛松林, 蔡欣欣

(厦门市地震局, 福建 厦门 361021)

摘要: 福建省仙游 2013 年 $M_L5.0$ 级地震是福建该省年度内发生的最大地震事件。在地震监测以及精定位的基础上, 从地震序列、震源深度和震源机制解等方面做了统计分析, 并依据震区地质构造图, 分析了地面流动重力反映的不同构造部位深部物质的变化及其与断裂构造和地应力的关系, 最后从断面凸破模型分析了地震发生的机理, 并与地球物理及震源机制解进行相互验证。

关键词: 仙游; 震群型地震; 机理; 分析

中图分类号: P315.332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2014) 01-0086-08

Analysis of the Characteristics and Mechanism of Xianyou Earthquake Swarm

MAO Songlin, CAI Xinxin

(Xiamen Seismological Bureau, Xiamen 361003, China)

Abstract: In 2013, Xianyou $M_L5.0$ earthquake is the largest earthquake in Fujian province. In this paper, Based on the earthquake monitoring and precise relocation, we made a statistical analysis from the earthquake sequence, focal depth and focal mechanism solution and so on, and on the basis of earthquake tectonic map, analyses the change of deep substance of different tectonic position reflected by the ground gravity flow and its relationship with fracture structures and ground stress. Finally from the fault convex broken model, the paper analyzes the mechanism of the earthquake, and verified the results each other by geophysical and focal mechanism solution.

Keywords: Xianyou earthquake swarm; Type; Mechanism; Analyse

收稿日期: 2013-12-08

作者简介: 毛松林, 男, 1960 年生, 高级工程师, 主要从事地震地质工作。

E-mail: cxxdtsc@sina.com.

0 前言

2013 年 9 月 4 日 06 时 23 分,莆田仙游发生 $M_L5.0$ 级地震,震中位于北西向沙县—南日岛断裂带附近(图 1)。该地震是 2010 年 8 月以来,发生在仙游的震群型地震活动中震级最大的一次,也是 2013 年发生在福建省内的最大地震。

1 地震序列及其特点

以震中($N25.63^\circ$, $E118.75^\circ$)为中心,半径 10 km,对该区域 1971 年以来福建台网记录的小震进行分析统计,结果显示:该区域自 2010 年 8 月 4 日发生 $M_L1.3$ 级地震以来,共记录 M_L (下同)0 级以上地震 1 496 次。震中分布 (图 1) 显示,1 000

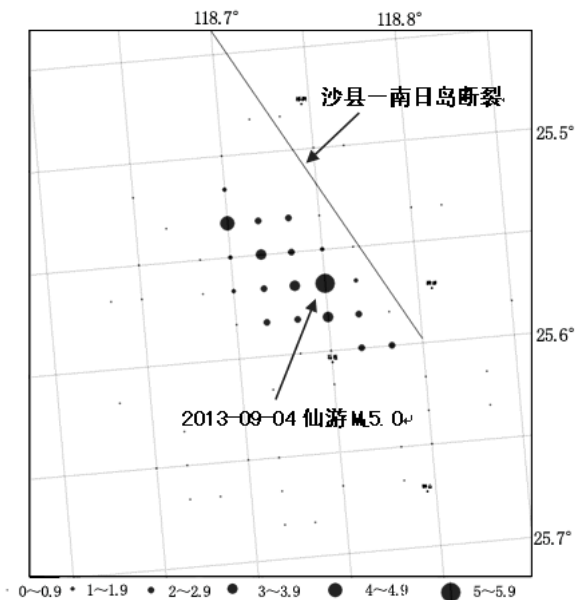


图 1 仙游地震序列震中分布图(2010-08-04~2013-12-31)

Fig.1 The epicenters distribution of Xianyou earthquake sequence (2010-08-04~2013-12-31)

多次小震在空间分布上呈现北西向分布的态势,与通过该区域的北西向沙县——南日岛断裂走向一致,北西长度最长达 13 km。对这些小震进一步分析显示,时间上大致可分为四组活动(表 1,图2):

- (1) 第 I 组活动。发生在 2010 年 8 月~9 月,最大震级为 2010 年 8 月 6 日的 1.8 级震。
- (2) 第 II 组活动。从 2010 年 11 月~2011 年 4 月 30 日,最大震级为 2011 年 1 月 29 日 2.8 级震;

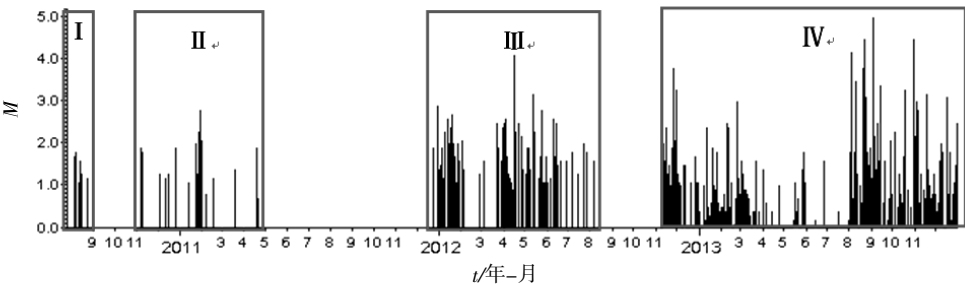


图 2 仙游地震序列 $M-T$ 图 (2010-08-04~2013-12-31, $M_L \geq 0$)

Fig.2 The $M-T$ diagram of Xianyou earthquake sequence (201-08-04~2013-12-31, $M_L \geq 0$)

表 1 莆田仙游地区地震分时段统计分析表

Table 1 The statistical analysis table of earthquakes in Xianyou region by time

统计时间段	地震频次						总频次	最大地震
	0.0~0.9	1.0~1.9	2.0~2.9	3.0~3.9	4.0~4.9	5.0~5.9		
2010-08-04~2010-08-23	17	3	0	0	0	0	20	2010-08-06 $M_L1.8$
2010-11-07~2011-04-30	8	35	6	0	0	0	49	2011-01-29 $M_L2.8$
2011-12-23~2012-08-07	31	165	32	2	1	0	231	2012-04-05 $M_L4.1$
2012-11-11~2013-12-31	892	248	39	13	3	1	1196	2013-09-04 $M_L5.0$

随后,该地区进入相对平静,长达 247 d,该地区未记录到 0 级以上小震。

(3) 第Ⅲ组活动。从 2011 年 12 月 23 日至 2012 年 8 月 7 日,最大地震为 2012 年 4 月 15 日的 4.1 级震。

2012 年 8 月 8 日至 11 月 11 日,仙游地区,

再次异常平静,持续时间 95 d。

(4) 第Ⅳ组活动。从 2012 年 11 月 11 日起,仙游地区的活动再次加剧,持续已达 13 个月,最大地震为 2013 年 9 月 4 日的 M_L 5.0 级地震。

震群活动的进一步分析, $M-T$ 图 (图 3) 显示,该组活动在 2013 年 8 月 3 日起震群活动加剧,

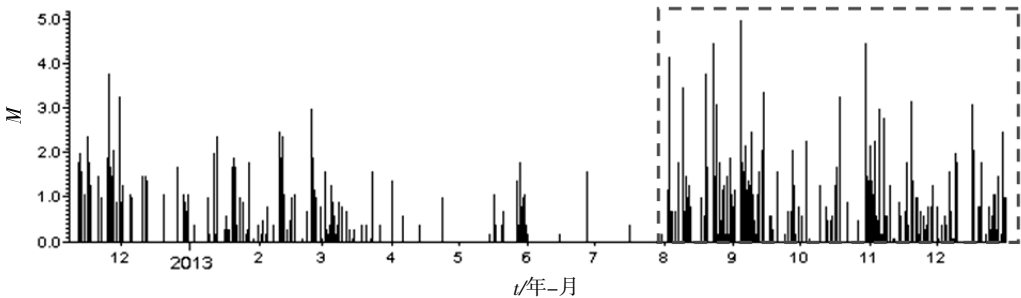


图 3 仙游地震序列 $M-T$ 图(2012-11-11~2013-12-31, $M_L \geq 0$)
Fig.3 The $M-T$ diagram of Xianyou sequence(2012-11-11~2013-12-31, $M_L \geq 0$)

2013 年 8 月 3 日~2013 年 9 月 3 日的地震序列参数计算结果显示,在 9 月 4 日 5.0 级地震震发生前一个月,仙游地区的小震序列的前兆性质明显,具有一定的指示意义(图 4,表 2)。

2 地震序列震源深度分析

仙游地震序列的震源深度时变图(图 5)显示,

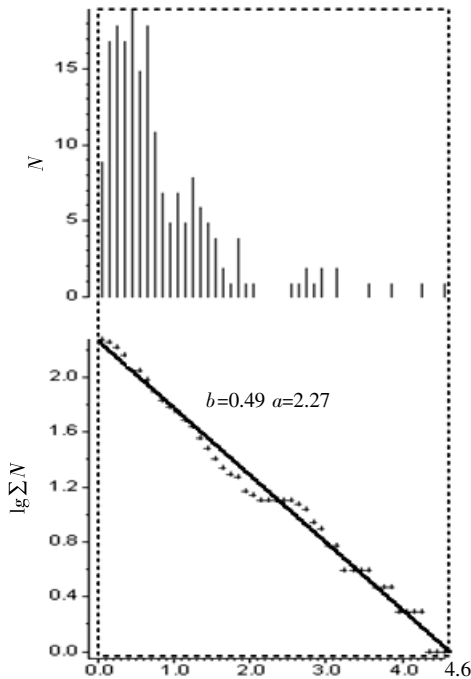


图 4 仙游地震序列 $lgN-M$ 图
(2013-08-03~2013-09-03-, $M_L \geq 0$)
Fig.4 The $lgN-M$ diagram of Xianyou earthquake sequence
(2013-08-03~2013-09-03, $M_L \geq 0$)

表 2 地震序列判定(2013-08-03~2013-09-03, $M_L \geq 0$)
Table 2 Determination of Xianyou earthquake sequence
(2013-08-03~2013-09-03, $M_L \geq 0$)

前兆震群判定标准	实际计算结果	判定结果
h	<1.0	0.30
U	>0.5	0.688 7
K	>0.7	0.551 8
ρ	<0.55	0.349 5
b	>0.65	0.59

2010 年 8 月~2011 年 4 月 30 日,震级较小,最大地震仅为 2.8 级;震源深度主要集中在 4~15 km 范围内分布,且有加深趋势。2011 年 11 月 11 日起,序列地震的震级加大,发生 16 次 3 级以上地震,最大地震达到 M_L 5.0 级,且震源深度随时间逐渐变浅。

根据仙游地震($M_L \geq 2.0$)震源深度时变图,对仙游地震序列($M_L \geq 2.0$)做进一步分析,可把它们分为五组活动(图 5),这五组活动在空间上的分布如图 6 所示。综合图 5、6 分析认为,五组中每组在时间上具有集中性,在空间上具有成团性。

3 地震序列震源机制解

根据福建省局分析预报中心对 2012 年 4 月 15 日以来的 7 个 3.8 级以上地震所做的震源机制解(图 7)表明,本次震群型地震发生在北西走向断层上,主压应力方向为北西向,使得该发震断裂呈现出右旋张剪性活动方式,这一计算结果与区域

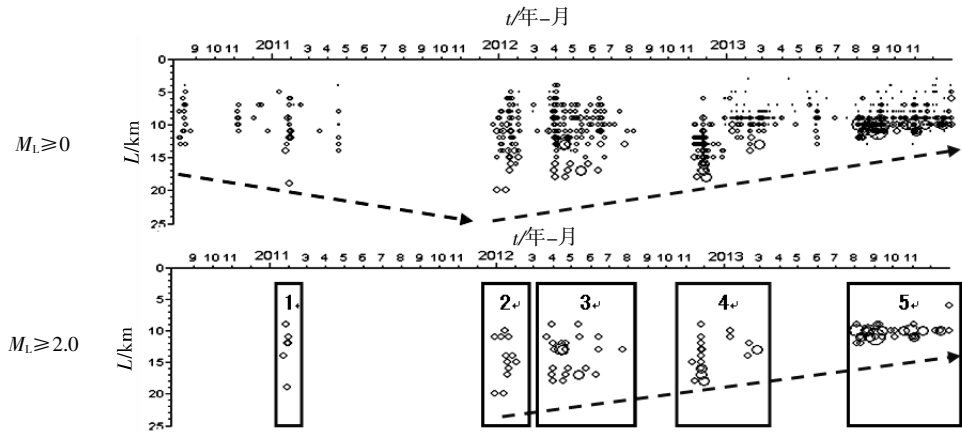


图 5 仙游地震序列震源深度时变图(2010-08-04~2013-12-31)

Fig.5 The diagram of focal depth varying time of Xianyou earthquake sequence (2010-08-04~2013-12-31)

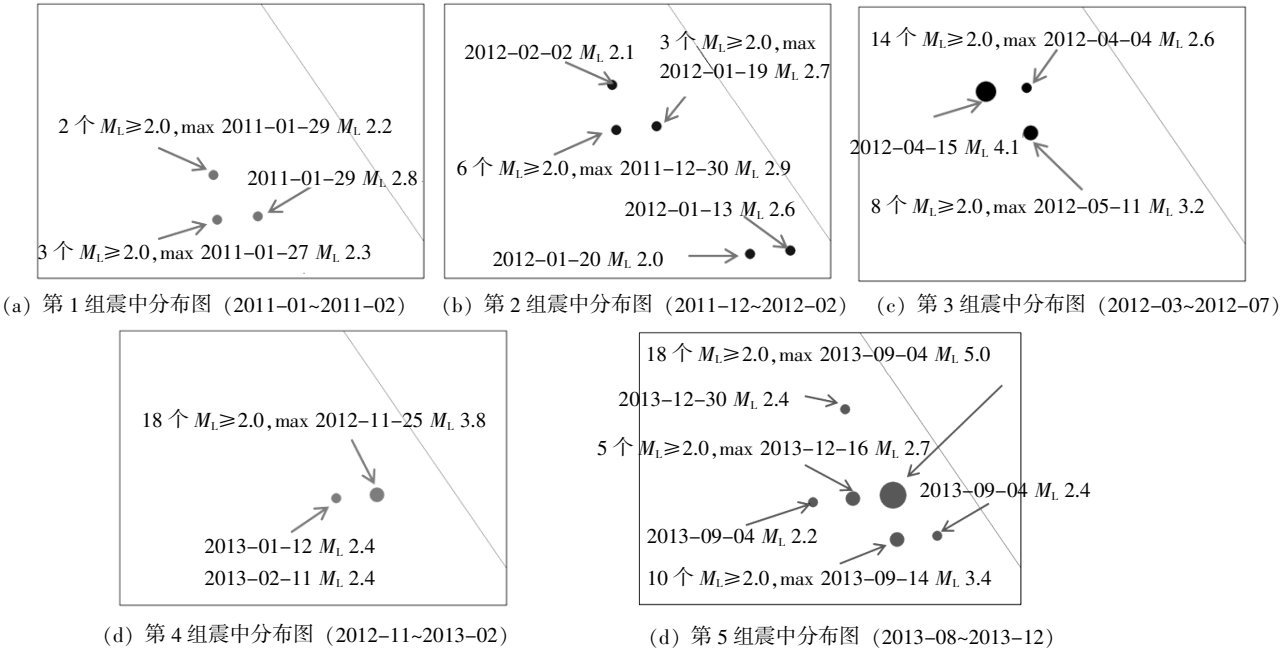


图 6 仙游地震序列震中分布图 (2010-08-04~2013-12-31)

Fig.6 The epicenters distribution of Xianyou earthquake sequence (2010-08-04~2013-12-31)

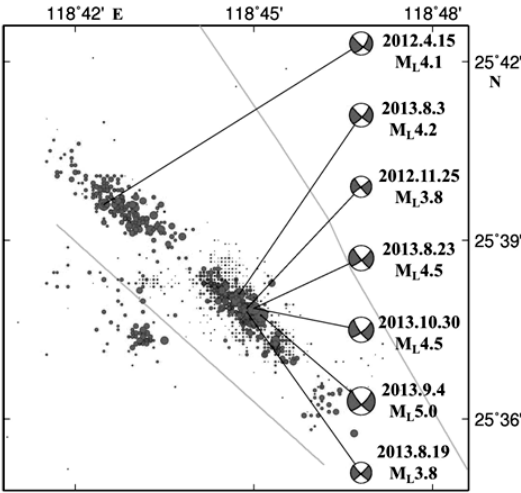


图 7 仙游地震震源机制解

Fig.7 Focal mechanism solution of Xianyou earthquake sequence (from QIU Yi)

地震地质条件吻合。

4 莆田环线重力复测

重力复测结果映射出长诏断裂带及其与北西

向断裂带的地应力概况和地球物理场的变化情况，指出了未来地震发生的可能地带。福建流动重力累积变化趋势图(2009-06~2013-04)(图 8) 显示，正负差异变化较为明显的出现在长乐-诏安断裂带北段以西地区，即莆田西北地区。2013 年 8 月~9

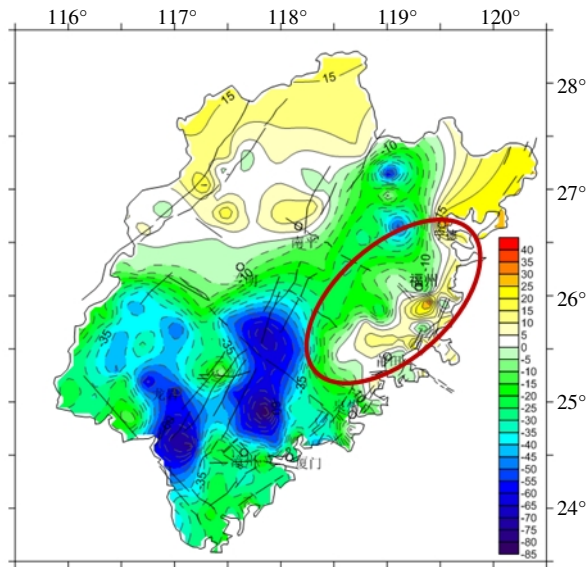


图 8 福建流动重力累积变化趋势图(2009-06~2013-04)

Fig.8 Trend map of cumulative changes of flow gravity in Fujian (2009-06~2013-04)

月，莆田仙游发生最大地震为 $M_L5.0$ 级的震群活动，其震中位置落于此区域内。

对莆田环线的重力复测资料分析，得出莆田环线的段差年变化情况(图 9)。分析显示，各段段差年变都在正常范围之内(± 30 ugal)，其中较大变化量出现在雷锋镇水口镇(+31 ugal)之间。相对而言，在莆田地区西部，即永泰-德化沿线出现正负异常变化，表明近期该地区活动相对较为活跃，需进一步关注永泰-仙游-德化环线区域。

5 地震机理的地震地质和构造背景分析

5.1 福建构造格局的形成

福建自晚元古代以来，经历前泥盆纪优地槽发展阶段，泥盆纪至三叠纪时期，整体抬升进入准地台发展阶段，这一时期处于长期隆起剥蚀环境之下。晚三叠世开始至晚侏罗世，受太平洋板块向欧亚板块的俯冲作用，构造运动进入了濒太平洋大陆边缘活动带的发展阶段，这一时期形成

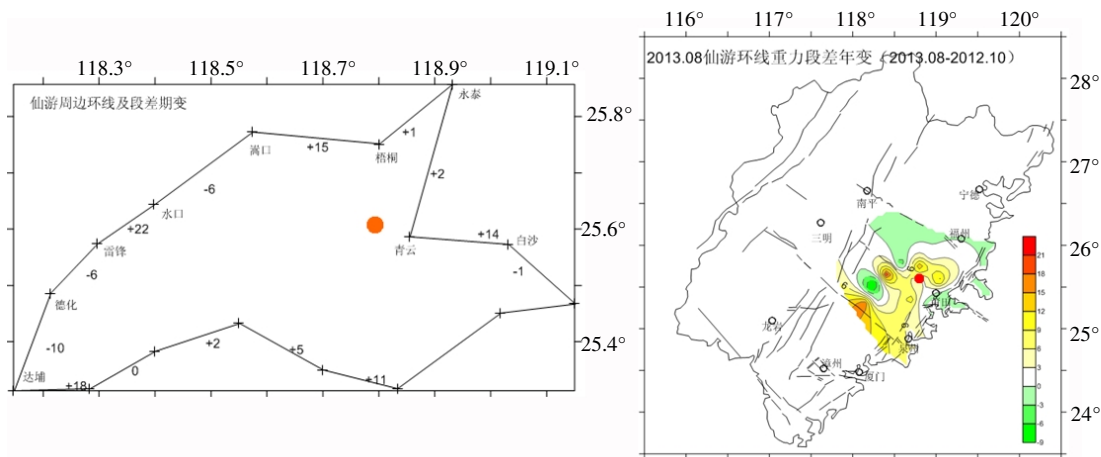


图 9 莆田环线重力段差年变图

Fig.9 Annual variation diagram of gravity segment difference in Putian

了滨海断裂(含长乐-诏安)压剪性断裂以及北西向张剪性等区域性断裂构造,造就了本区的大地构造基本格局。由于区域性断裂构造的发育和地壳运动的影响,该隆起区解体破碎并沿断裂带伴有大规模的中酸性火山岩喷发,构成了闽东火山喷发带。新生代时期,由于受菲律宾板块对欧亚板块的持续俯冲作用,区域地壳运动和断裂构造活动表现为具有继承性的特点(图 10)。

5.2 福建地应力与构造运动

地质历史时期不同的地应力及其方向,决定了断裂构造的性质和相互运动。按地应力及其方

向,从今向前推可分为三个发展阶段,并对应着各阶段的断裂性质和运动方式。

(1) 侏罗纪及以前时期(约 1 亿 4 千万年前)在进入晚侏罗纪时,福建已形成北东,北西向两组主要断层相互切割的菱形断块构造格局。进入侏罗纪后,可分为两个不同发展阶段。早侏罗纪,福建处于较为活跃的断陷构造环境。中、晚侏罗世,受太平洋板块与欧亚大陆板块碰撞影响,地壳受北西-南东古构造应力场强烈推挤,伴随着变形变质和岩浆活动,韧性剪切带、变质相带和岩浆岩带呈北东方向带状分布。

(2) 白垩纪-早第三纪时期(燕山运动期间,

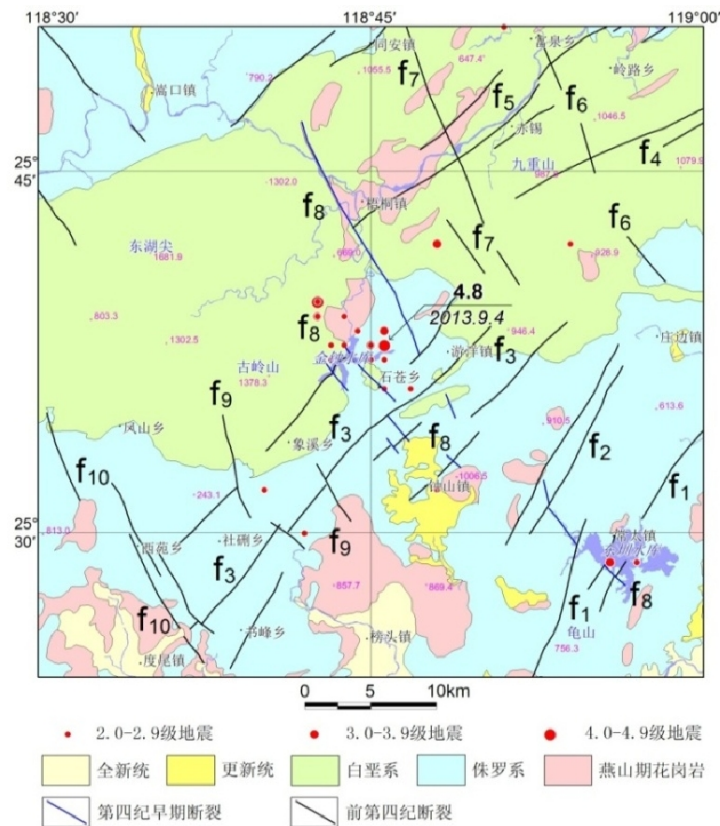


图 10 福建仙游震群型地震附近地质图

Fig.10 The geological map nearby Xianyou earthquake swarm

约 1 亿 4 千万~6 千 5 百万年)

白垩纪-早第三纪时期,本区区域构造应力场发生了巨大变化,挤压方向为北东-南西向,致使前白垩纪区域性北东向压(剪)性断层和北西向张性断层,分别转化为张(剪)性和压(剪)性,在已形成的北东,北西向两组主要断层相互切割的菱形断块构造格局基础上,致使北东向断裂产生左旋剪切运动,并切割北西向断裂,运动的结果给北西向断裂面造成了凸体,如图 11 所示。这一构造发展时期的另一特色是岩浆侵入活动较强烈,同时,

混合岩化进一步加强,表现为近海域一侧的小金门岛混合岩十分发育。

(3) 晚第三纪-第四纪时期(喜马拉雅运动以来,约 6 千 5 百万年以来)

这一时期,由于菲律宾板块向西北方向朝欧亚大陆板块俯冲,亚洲大陆边缘典型的岛弧-海沟系开始形成。期间地壳上升并造成断块差异活动,形成了一系列大小不等的断块隆升块体和拗陷区,同时,在金门-龙海牛头山发育有基性火山岩带。与地震发生关系密切的是,此时区域构造应力场

挤压方向复转为北西-南东向,早期形成的北东向和北西向断层不同程度地复活,尤其是在北西-南东向主压应力作用下,整个福建向南东方向运动,同时,使得北向西断裂产生右旋剪切运动,为使其运动继续,断层两盘必须“顶破”对方断层面上的凸体,“顶破”的过程即地震发生的过程(如图 10、11、12 所示)。

按地震地质分析方法,对仙游地震的发生机理及其特点有如下认识:

震中附近发育着北东向压剪性左旋断裂和与之呈共轭关系的北西向张剪性右旋断裂,在早期的地应力及其方向作用下,使得北东向断裂右旋

运动并切割北西向断裂,显然在上述两组断裂的交汇处,北西向断裂面上便形成了凸体,而现今的地应力场与早期的地应力及其方向存在显著地差异,即现今的主压应力方向为北西向,使得北西向断裂呈现右旋张剪性特征,并在此地应力及其方向作用下,断裂两盘必须“顶破”对面的凸体,才能继续沿着北西向断裂方向作右旋剪切运动,这种“顶破”对面的凸体即断面凸破,便随即产生了地震,由于这种断层运动所产生的断面凸体,分布在断层的倾向方向上,并沿着断层倾角向下延伸,因此,凸体的破裂是多次的,如果凸体破裂发生在近地表处,由于岩体中的应变能较低,

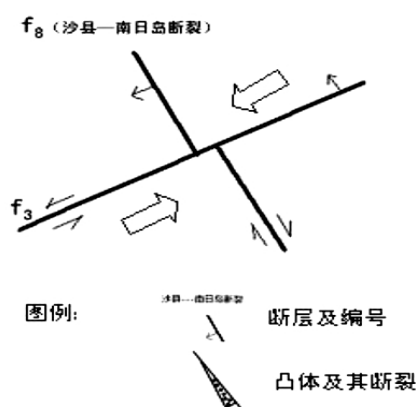


图 11 早期的地应力及其方向造成的断裂构造运动示意图
Fig.11 The schematic diagram of tectonic movement of fracture caused by the early ground stress terrestrial atress and its direction caused by the early tectonic movement and its direction

所以地震震级较小,越往地下深处,凸体破裂产生的地震震级越大。

6 结语

通过对仙游地震的震中、震源深度、震源机制、以及地震地质和构造等的综合分析认为:

(1) 福建地质历史演化表明,福建省陆域被北东向三组断裂和北西向多组断裂切割成菱块状,当今 GPS 和地应力监测指示,全省及台湾海峡受到北西向主压应力作用,使得北西向断裂呈现出右旋张剪性质,与震源机制解结果吻合,由此推断,本次发生在沙县-南日岛张剪性断裂带上的震群型地震,断层的性质决定了地震震级应当不会很大(截至目前,最大地震震级为 4.8 级)。

(2) 震群内的地震均发生在沙县-南日岛断裂与一条北东向断裂交汇处。

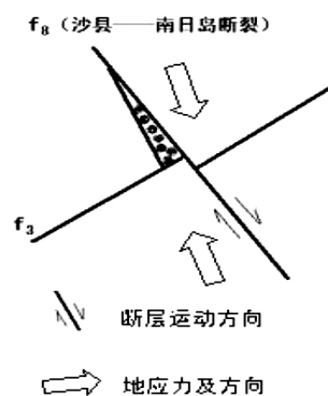


图 12 现今的地应力及其方向造成的断裂构造运动示意图
Fig.12 The schematic diagram of tectonic movement of fracture caused by the present ground stress and its direction

(3) 总体上看,仙游地震发生在同一地点,实质上各个地震的震中位置反映出沙县-南日岛断裂(向南东倾斜)和北东向断裂(向北西倾斜)共同切割岩体所构成的岩体内;分析认为,从 2010 年 8 月~2013 年 10 月,断层一盘每次“顶破”断层另一盘凸出岩体形成岩块,即发生一次地震,被破裂下来的岩块进一步破裂,便形成一系列小震(余震),因此,图 6 展示的 5 组地震,即为 5 次岩块的破裂,其震源在空间上呈团块状,震中位置在地面上呈集中的片状,由于震源位置的不同,震中在地表表现出震源越深,震中位置越向西南(即沙县-南日岛断层倾向方向)偏移的规律。通过两次较大震级地震相关数据的计算,获得沙县-南日岛断裂倾角约为 76° 。

(4) 2012 年 4 月 15 日 4.0 级和 2013 年 8 月 23 日 4.2 级地震的震源机制解表明,本次震群型地震发生在张剪性断层上,主应力方向为北西向,

这一计算结果与区域地震地质条件吻合。

(5) 从断面凸破模型即本次震群型地震发生机理分析, 所谓震群型地震只是对震级统计分析的表面描述, 本质上是断裂构造的性质和岩块破裂的大小与所释放的应力决定了震级的相近性。本文一方面仍然采用省地震局确认的震群型地震称谓, 另一方面, 按照断面凸破模型对仙游震群型地震的发生机理作了分析, 并非地震预测, 但可为进一步预测预报地震提供支撑。按此断面凸破模型分析, 凸体在不同深度上(4~23 km) 的破裂造成一系列对应深度的小地震, 依次推测, 未来不排除深度更深的凸体破裂引起较大震级地震的可能。

(6) 仙游震群型地震震中位于福建仙游县金钟水库附近, 金钟水库库容 1.06 亿 m^3 , 坝高 97.5 m, 2010 年开始蓄水, 8 月库区附近出现地震活动。分析认为, 地震与水库蓄水有一定关系。水库对地震发生的贡献或作用的本质是什么, 有哪些因素影响并决定着水库地震的发生及其大小? 从调查分析和实验结果综合分析认为, 水库对地震发生的作用或贡献, 本质上是库水被压入地下岩体之中, 使岩石处于饱和状态, 随之显著地降低了岩石的强度, 在地应力增强或相对不变的情

况下, 岩石破裂, 产生地震。由此可进一步推测, 正是由于未达到正常构造地震发生时应具备的地应力和应变能, 所以, 这类地震的震级不应很大。总结水库诱发或触发地震的决定性因素主要包括① 库区断裂构造格局、规模和性质; ② 地应力大小及其变化; ③ 水库坝高和库容; ④ 岩石及其强度等。

(7) 需要进一步研究的问题, 一是按照时间顺序, 一簇里震级大小之间是什么关系? 二是采用地球物理方法探测并绘制一簇震源处破碎岩块体的大小和形状。

参考文献:

- [1] 傅征祥, 刘桂萍, 邵志钢, 等. 板块构造和地震活动性[M]. 北京: 地震出版社, 2009.
- [2] 徐世芳, 李博主编. 地震学辞典[M]. 北京: 地震出版社, 2000.
- [3] Catalan, Ariel; Benavent-Climent, Amadeo; Cahis, Xavier, Selection and scaling of earthquake records in assessment of structures in low-to-moderate seismicity zones [J]. soil dynamics and earthquake engineering, 2010, 1-2(30): 40-49.
- [4] 刘博研, 史保平. $M_s 8.1$ 昆仑山口西地震和 $M_s 8.0$ 汶川地震余震序列的时空分布特征和持续时间的对比[J]. 地球物理学报, 2012, 55 (6): 1942-1951.