

王鹏, 孙冬军, 任烨, 于俊谊, 温燕林, 朱艾斓. 2017. 浙江珊溪水库 2014 年震群活动发震机理研究. 地震学报, 39(5): 648-658. doi:10.11939/jass.2017.05.002.

Wang P, Sun D J, Ren Y, Yu J Y, Wen Y L, Zhu A L. 2017. Investigation on the seismogenic mechanism of the 2014 earthquake swarm in Shanxi reservoir, Zhejiang Province. Acta Seismologica Sinica, 39(5): 648-658. doi:10.11939/jass.2017.05.002.

浙江珊溪水库 2014 年震群活动 发震机理研究^{*}

王 鹏¹⁾ 孙冬军¹⁾ 任 烨¹⁾ 于俊谊²⁾
温燕林¹⁾ 朱艾斓^{1),[†]}

1) 中国上海 200062 上海市地震局

2) 中国杭州 310013 浙江省地震局

摘要 本文使用双差定位法对 2014 年 9 月 12 日至 12 月 30 日浙江珊溪水库发生的 4184 次地震进行重定位, 并采用 CAP 方法对 11 次 $M_L \geq 3.0$ 地震事件的震源机制解进行反演, 讨论了震群序列的活动特征及其与断裂之间的关系, 分析了水库水位与地震之间的关系. 重新定位的结果显示, 在空间分布上, 2014 年震群序列发生在 2006 年震群序列 NW 向延伸的方向上, 两者形成一条线性条带, 该条带平行分布于双溪—焦溪垅断裂南侧. 重定位得到的震源主要在 0.7—6 km 深度范围内分层分布, 垂直于地震条带走向的震源剖面刻画出的结构面以高角度倾向 SW. 震源机制解结果显示多数地震为走滑型, 均存在一个与地震条带走向一致的 NW 向节面, 呈右旋走滑错动性质. 考虑到断裂的定位误差, 线性分布的震群活动极有可能沿双溪—焦溪垅断裂的破裂面活动, 精定位的震源位置和震源机制刻画出了该断裂的几何结构和活动性质. 但由于多数地震的震源深度在 6 km 以上, 因此震群活动不能归为双溪—焦溪垅断裂活动的结果, 即双溪—焦溪垅断裂不是这两次震群的发震构造, 而且仍然属于水库诱发地震, 而水库地震存在激发该断裂发生构造地震的可能. 水库水位上升或者下降与震群活动关系不大, 震群活动有随时间进一步增强的趋势, 可能是库水沿库底断层破裂面长期渗透和扩散增加了孔隙压所致.

关键词 珊溪水库 震群序列 发震机理 水库诱发地震 双溪—焦溪垅断裂
doi:10.11939/jass.2017.05.002 中图分类号: P315.2 文献标志码: A

Investigation on the seismogenic mechanism of the 2014 earthquake swarm in Shanxi reservoir, Zhejiang Province

Wang Peng¹⁾ Sun Dongjun¹⁾ Ren Ye¹⁾ Yu Junyi²⁾
Wen Yanlin¹⁾ Zhu Ailan^{1),[†]}

^{*} 基金项目 国家自然科学基金(41372222, 91214201)和上海市科学技术委员会科研计划(14231202600)联合资助.

收稿日期 2016-07-06 收到初稿, 2016-09-25 决定采用修改稿.

[†] 通讯作者 e-mail: alzhu@163.com



1) *Earthquake Administration of Shanghai Municipality, Shanghai 200062, China*

2) *Earthquake Administration of Zhejiang Province, Hangzhou 310013, China*

Abstract: We relocated 4184 earthquakes that occurred in Shanxi reservoir, Zhejiang Province from 12 September to 30 December, 2014 by using double-difference algorithm and determined the focal mechanism solutions of 11 $M_L \geq 3.0$ earthquakes using the method of CAP in this paper. Based on the analysis of the high-resolution hypocenters and focal mechanisms, we investigated the activity features of the earthquake swarm and its relationship with the fault. On the mapping view, the epicenters of the 2014 earthquake swarm occurred in the extended northwest direction of 2006 seismic swarm belt, which forms a linear belt, running parallel to the south of the Shuangxi-Jiaoxiyang fault. The relocated hypocenters mainly distribute in layers from 0.7 to 6 km in depth. The cross section profile which is perpendicular to the seismic belt strike shows that the seismic plane dips to southwest with a high angle. Most focal mechanisms are strike-slip type. The nodal planes of the focal mechanism solutions that share the same orientation with the trend of the seismic belt distribution of NW show the feature of dextral strike-slip. Taking the fault location error into consideration, the earthquake swarm may align along the rupture plane of the Shuangxi-Jiaoxiyang fault. The high-resolution hypocenters and focal mechanisms delineate the structure and activity nature of the fault. Since there is no distinctive main shock in the earthquake swarm and most earthquakes locate above 6 km in depth, so we can conclude that the earthquake swarm was not caused by the activity of the Shuangxi-Jiaoxiyang fault, but induced by the reservoir water storage. However, it is possible that the Shuangxi-Jiaoxiyang fault may be activated by the water storage of reservoir to generate tectonic earthquake in the future. No evidence shows that there is obvious relationship between the level of the reservoir water storage and seismicity, and the swarm activity becomes greater with time, which may be caused by the pore pressure increasement due to the long term penetration of the reservoir water to the fault plane.

Key words: Shanxi reservoir; earthquake swarm; seismogenic mechanism; reservoir induced seismicity; Shuangxi-Jiaoxiyang fault

引言

浙江珊溪水库位于浙江省温州市飞云江干流上游河段, 水库绝对坝高为 156.8 m, 坝长为 308 m, 设计最高库容为 18.24 亿 m^3 , 最高水位为 154.75 m. 该水库于 2000 年 5 月 12 日开始蓄水. 自 2002 年 7 月 28 日 $M_L 3.5$ 地震发生后, 库区地震活动变得频繁(钟羽云等, 2011). 截至 2014 年 12 月 31 日, 珊溪水库共记录到 8000 多次地震, 其中 $M_L \geq 4.0$ 地震 21 次, 最大地震为 2006 年 2 月 9 日 $M_L 4.6$ 地震. 库区地震以震群序列活动为主, 2006 年和 2014 年曾发生过两次明显的震群序列活动, 其它时间相对平静, 两次震群均无明显主震, 属典型水库诱发地震. 前人对 2006 年震群序列的发震构造、震源机制及波速特性等开展了较多研究: 朱新运等(2010)对珊溪水库 2006 年震群进行了重新定位, 并利用 P 波初

动计算了断层面解,讨论了该震群的发震构造;邹振轩等(2010)对水库地震的 S 波分裂进行了研究,认为库区应力场稳定,应力调整已结束,未来发生强余震的可能性较小;钟羽云等(2011)通过震源位置和速度结构联合反演拟合得到了 2006 年震群的发震断层面参数,之后利用 P 波初动法求解了 $M_L \geq 4.0$ 地震的震源机制解,并结合库区断层活动特性和宏观调查资料,得出珊溪水库地震序列是双溪—焦溪垅断裂右旋走滑的主破裂与南浦—焦溪垅断裂、东坑—章坑断裂、岩上断裂等多个次要破裂共同作用的结果;张帆等(2013)利用 P 波初动和直达 P, S 波最大速度振幅比联合求解小震震源机制的方法,得到 2006 年震群震源机制的主压应力为 NS 向,主张应力为 EW 向,应力方向以水平为主,发震断层倾角较大且多为走滑断层;钟羽云等(2015)研究了珊溪水库地震的波速比时空分布特征,认为位于水库淹没区的双溪—焦溪垅断裂西北段的波速比较小,位于水库库岸的双溪—焦溪垅断裂东南段在深度方向上存在两个波速比高、低值相间的区域. 为了进一步研究后续震群的发震特征及水库发震趋势,本文拟使用双差地震定位法对 2014 年 9—12 月发生的震群序列进行重新定位,并利用 Zhu 和 Helmberger(1996)发展的 CAP(cut and paste)方法根据 $M_L \geq 3.0$ 地震事件的波形数据反演震源机制解,在此基础上进一步研究珊溪水库地震的发震机理,结合水库水位变化和震级-时间关系,对珊溪水库地震的时间序列特征进行分析.

1 库区地质构造概况

珊溪水库位于浙东南褶皱带内温州—临海拗陷带的南部,即泰顺—温州断坳,库区出露主要为燕山期火山碎屑岩及花岗岩和闪长岩侵入体. 新近纪以来库区新构造运动主要表

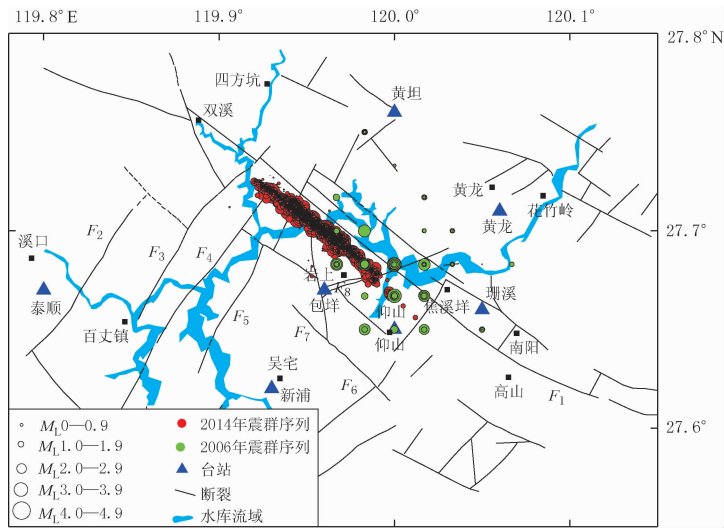


图 1 2006 年和 2014 年震群台网定位震中分布及库区断层分布图

F_1 : 双溪—焦溪垅断裂; F_2 : 百丈坑—蟬头断裂; F_3 : 百丈口—排前断裂; F_4 : 洪口—章坑断裂;
 F_5 : 江口—汇溪断裂; F_6 : 南浦—焦溪垅断裂; F_7 : 东坑—章坑断裂; F_8 : 岩上断裂

Fig. 1 Epicenter distribution of the 2006 and 2014 earthquake swarms and the faults in Shanxi reservoir region

F_1 : Shuangxi-Jiaoxiyang fault; F_2 : Baizhangkeng-Chantou fault; F_3 : Baizhangkou-Paiqian fault;
 F_4 : Hongkou-Zhangkeng fault; F_5 : Jiangkou-Huixi fault; F_6 : Nanpu-Jiaoxiyang fault;
 F_7 : Dongkeng-Zhangkeng fault; F_8 : Yanshang fault

现为大面积间歇性升降运动，以整体性抬升为主，断裂两侧活动差异不明显，地热与地震活动弱。由于库区地块大面积间歇性的强烈上升，形成了构造-侵蚀中低山地抬升区。河流侵蚀作用强烈，河谷深切，多峡谷，并发育四级河流阶地和五级剥夷面。第四纪地层主要由冲洪积砂砾石、细粉砂层组成，厚度仅几米至十余米。

珊溪水库库区内主要有 14 条规模不大的断裂，长度均在 10—25 km 之间，多为深度在 5 km 之内、走向以 NE 和 NW 向为主的陡倾角逆冲盖层断裂，且现今活动性不明确(钟羽云等，2011)。2014 年震群主要呈 NW 向分布在双溪—焦溪垵断裂南侧(图 1)，该断裂西北起自云湖双溪村，经涂山、塘堍、东龙，终止于珊溪镇焦溪垵村，全长约 20 km，总体走向为 NW，倾向为 SW，倾角约为 80°。该断裂在卫星影像上线性特征明显，断层所过位置表现为沟谷和垭口地貌特征。钟羽云等(2010，2011)通过对 2006 年震群序列重新定位并对震源机制进行研究后认为，该断裂为震群活动的发震构造，呈右旋走滑活动性质。

2 地震重定位

珊溪水库 2014 年震群始于 9 月 12 日，截至 12 月 30 日共发生 4266 次地震，最大地震为 10 月 25 日 $M_L4.4$ 地震。本文使用双差定位法(Waldhauser, Ellsworth, 2000)重新定位了具有 8 个及以上震相记录的地震，共获得 4184 次地震重定位的震中数据(图 2)。地震重定位使用了 25 个台站，震中距均为 100 km 以内，其中 8 个台站为震中距小于 20 km 的近台(图 1)。由于有近台控制，定位精度较高，定位残差由重新定位前的 0.11 s 下降至 0.02 s，水平向定位误差为 9 m，垂直向定位误差为 12.6 m。记录到的最小地震震级为 M_L0 ，由最大似然法估计的完整起始震级为 $M_L0.3$ 。

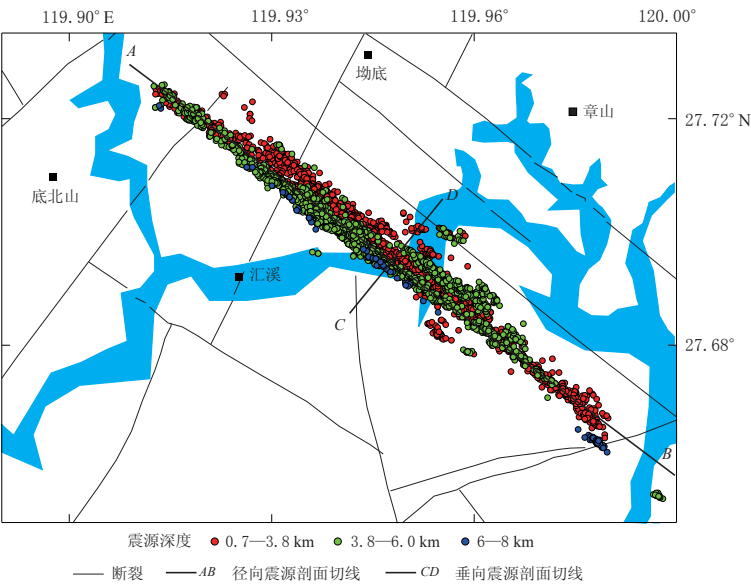


图 2 2014 年 9 月 12 日—12 月 30 日震群重新定位后的地震震中分布图

Fig. 2 Relocated epicenter distribution of the 2014 earthquake swarm from September 12 to December 30, 2014

2014 年震群经过重新定位后,其震中位置呈 NW 向线性条带分布在双溪—焦溪垸断裂南侧,地震条带长约 10 km,宽约 0.6 km. 图 3a, b 分别为沿着及垂直于线性条带方向所作的震源剖面,可见,震源深度主要分布在 0.7—6 km 之间,最大深度接近 8 km,与华南地区多数构造地震 0—20 km 的震源深度分布相比明显偏小,亦与钟羽云等(2010, 2011)对 2006 年震群重新定位得到的最大 9.5 km、平均 5.4 km 的震源深度相比要浅.

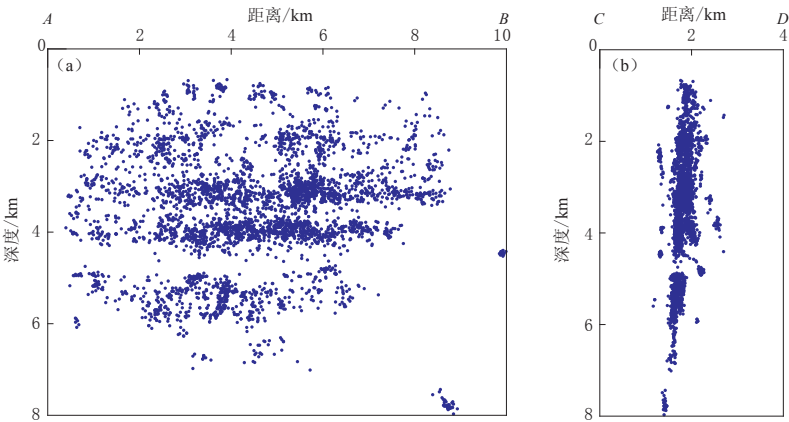


图 3 2014 年震群沿地震条带(a)与垂直于地震条带(b)的震源剖面
Fig. 3 Cross sectional profiles along (a) and perpendicular to (b)
the trend of the 2014 earthquake swarm belt

由沿线性条带方向所作的震源剖面 AB(图 3a)可见,地震活动分层现象明显,大致在 4.5—5 km 之间明显缺震.地震活动是由库水渗入断层形成的破裂面增加了孔隙压而产生,这种地震分布样式说明双溪—焦溪垸断裂形成的破裂面在垂向上高度不均匀且不连续.库区断裂发育在上侏罗统火山岩及下白垩统火山沉积岩地层中(钟羽云等, 2011),说明地下物质是由不同力学性质的岩层组成,岩性强度不同决定了变形特性不同,从而导致了地震分布的集中或缺失.沉积岩中可能存在柔性较大的岩层,柔性岩层不易产生脆性破裂,而会起到力学障碍体的作用,阻止流体的扩散(Roche, Baan, 2015),从而导致该层无地震发生,出现缺震现象.垂直线性条带的震源剖面刻画出高角度倾向 SW 的结构面(图 3b).

3 震源机制解反演

本文使用 CAP 方法计算震源机制解.该方法是一种全波形反演方法,对速度模型及介质的横向不均匀性依赖度较低(Zhao, Helmberger, 1994; Zhu, Helmberger, 1996),反演时将宽频带地震记录分为体波和面波两部分进行反演,并允许两者相对浮动,并在适当的时间变化范围内,搜索出合成地震图与观测地震图全局差异最小的震源机制解.本文选取浙江省地震监测预报研究中心记录的 2014 年 9—10 月 $M_L \geq 3.0$ 地震事件进行分析,并从中挑选出震相清晰、对震中包围较好、信噪比较高的 32 次地震进行反演.

采用 Crust2.0 双层地壳速度结构模型进行震源机制解反演,该模型将 0—33 km 的地壳分为两层(表 1).

CAP 方法将观测波形分解为 5 部分,通过移动每部分的波形,分别与理论(合成)地震

图进行拟合,使二者吻合得最好.在移动波形时产生了偏移时差,地壳速度模型是影响偏移时差的主要因素.图 4 为理论波形与观测波形的相似性对比图,图中仅给出最大事件,即 2014 年 10 月 25 日 M_L 4.4 地震的反演结果.图 4 中除少数台站的偏移时间差和 P 波实际到时与理论到时差稍大以外,大部分台站的时间差很小,说明选取的速度模型符合实际情况.理论波形与观测波形的相似性是判断反演结果是否可靠的依据之一.此次地震震源机制反演所选用 8 个台站的记录中,P 波拟合相关系数大于 0.6 的地震波形记录占 81%,面波拟合相关系数大于 0.8 的地震波形记录占 92%,说明反演得到的震源机制解是可靠的.

表 1 Crust2.0 地壳速度模型			
Table 1 The Crust2.0 velocity model			
层厚 /km	v_p /($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	v_s /($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	介质密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
21	6.01	3.5	2.75
12	6.88	3.6	2.80
0(莫霍面)	7.98	4.6	3.35

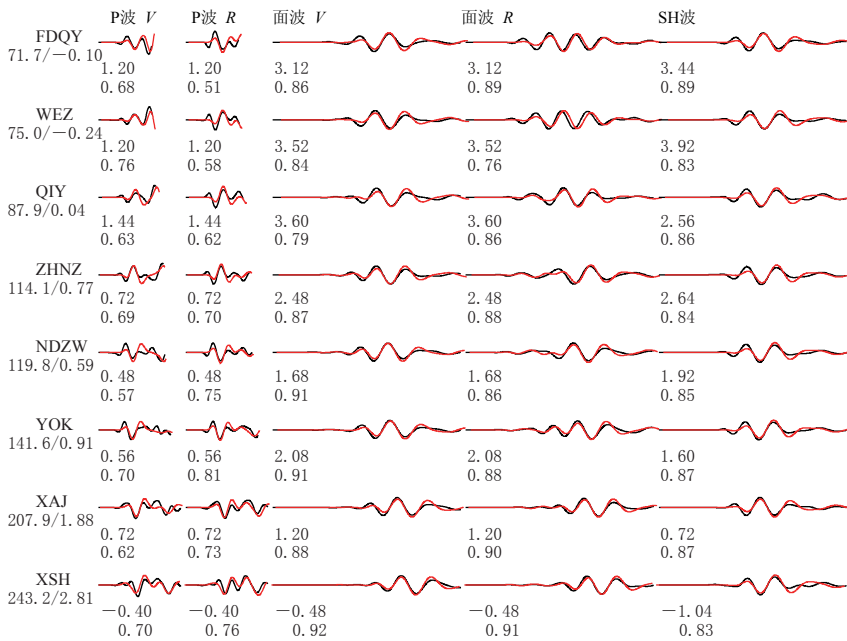


图 4 2014 年 10 月 25 日 M_L 4.4 地震观测波形图(黑色)与理论地震图(红色)的比较

台站名下方两个数字分别表示震中距(单位: km)和 P 波实际到时与理论到时差(单位: s),
波形下方第一行数值为观测值与理论到时差(单位: s),第二行数值为二者的相关系数

Fig. 4 The comparison between the observed waveforms (black) and the synthetic seismograms (red) of the M_L 4.4 earthquake occurred on October 25, 2014

The station codes are given at the left of the waveforms with epicentral distance (in km) and the difference of the P wave arrival times between observed and calculated values (in s) below. The first line below the waveform is the difference of the arrival times between observed and calculated values (in s), and the second line is the correlation coefficient between the previous two

判断反演结果是否可靠的另一个依据是最优深度拟合误差.反演结果显示 32 次地震中有 11 次事件的拟合误差均小于或等于 0.6%.本文仅从反演结果中选取两次地震的拟合误差随深度的变化关系进行展示(图 5).图中拟合误差曲线光滑,最小误差附近的震源机制解变化很小,说明深度反演结果稳定可靠.经相似度筛选得到 11 次地震事件中有 10 次

事件的反演深度小于 5 km，深度最大的事件为 10 月 26 日的 $M_L3.3$ 地震，其深度为 9.8 km. 综上本文的反演深度与精定位深度基本一致.

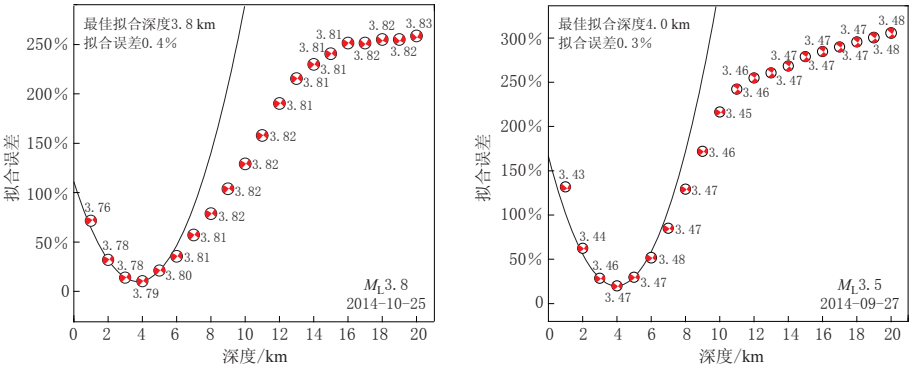


图 5 拟合误差和震源机制随不同震源深度的变化
沙滩球上的数字表示矩震级

Fig. 5 The fit errors of different depths and variations of focal mechanisms with different depths
The number on the beach-ball represents the moment magnitude

利用 CAP 法对珊溪水库 32 次 $M_L\geqslant3.0$ 地震事件进行反演，得到最佳深度处的震源机制解，从中挑选地震波形记录中观测波形与理论地震图拟合相关系数大于 0.6 占 80% 以上的 11 次事件(图 6)，其反演结果列于表 2.

由表 2 可知，11 次事件的震源机制解比较相似，均为走滑型地震，震中均位于双溪—焦溪垵断裂附近(图 6)，这些震源机制解均有一个与该断裂走向一致的 NW 向节面，该节面倾角较陡，近直立，为右旋走滑错动性质，为地震活动的破裂面.

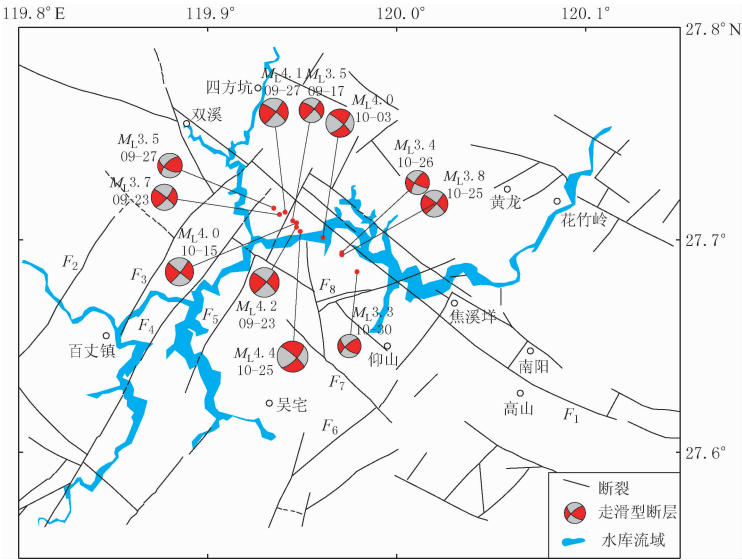


图 6 珊溪水库 2014 年震群拟合相关系数大于 0.6 占 80% 以上的 11 个 $M_L\geqslant3.0$ 地震震源机制解
Fig. 6 The focal mechanisms of eleven $M_L\geqslant3.0$ earthquakes that fitting correlation coefficient greater than 0.6 occupied more than 80% in the 2014 earthquake swarm

表 2 珊溪水库 2014 年震群 11 次 $M_L \geq 3.0$ 地震震源机制解
Table 2 The focal mechanisms of eleven $M_L \geq 3.0$ earthquakes in the
2014 earthquake swarm of Shanxi reservoir

发震时刻		M_L	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		B 轴	
月-日	时:分		走向 / $^{\circ}$	倾角 / $^{\circ}$	滑动角 / $^{\circ}$	走向 / $^{\circ}$	倾角 / $^{\circ}$	滑动角 / $^{\circ}$	方位角 / $^{\circ}$	倾角 / $^{\circ}$	方位角 / $^{\circ}$	倾角 / $^{\circ}$	方位角 / $^{\circ}$	倾角 / $^{\circ}$
09-17	20:47	3.5	308.7	72.1	172.6	41.0	83.0	1.0	173.9	7.5	266.1	17.7	61.6	70.7
09-23	13:20	4.2	311.0	81.0	173.0	42.1	83.1	9.1	176.4	1.5	266.7	11.3	79.1	78.6
09-23	17:40	3.7	309.2	83.2	164.9	41.0	75.0	7.0	355.8	5.7	264.3	15.5	105.5	73.5
09-27	08:30	4.1	38.0	83.0	10.0	306.8	80.1	172.9	172.2	2.1	262.6	12.0	72.7	77.8
09-27	08:41	3.5	119.0	60.0	150.0	225.1	64.3	33.7	351.2	2.7	83.6	41.3	258.1	48.6
10-03	11:42	4.0	311.0	71.0	174.0	43.0	84.3	19.1	175.7	9.2	268.5	17.5	58.9	70.1
10-15	15:49	4.0	39.0	83.0	-1.0	129.1	89.0	-173.0	354.3	5.7	263.9	4.2	137.2	82.9
10-25	18:42	4.4	311.0	81.0	-21.0	44.4	69.3	-170.4	266.1	21.5	359.2	8.0	108.8	67.2
10-25	19:29	3.8	310.0	81.0	172.0	41.3	82.1	9.1	175.6	7.1	265.7	12.0	81.9	78.0
10-26	07:03	3.4	118.0	77.0	163.0	211.9	73.4	13.6	165.4	2.4	74.5	21.1	261.7	68.7
10-30	19:25	3.3	130.0	63.0	161.0	228.9	73.1	28.3	357.7	6.7	91.8	31.7	257.2	57.4

4 珊溪水库震群与水库水位的关系

据中国地震台网中心提供的地震目录，2000 年以前珊溪水库库区鲜有地震发生。珊溪水库于 2000 年 5 月下闸蓄水，库区地震活动始于 2002 年 7 月 28 日的一次 $M_L 3.5$ 地震，此后每年均有地震活动，并表现出一定的时间特征(图 7)。

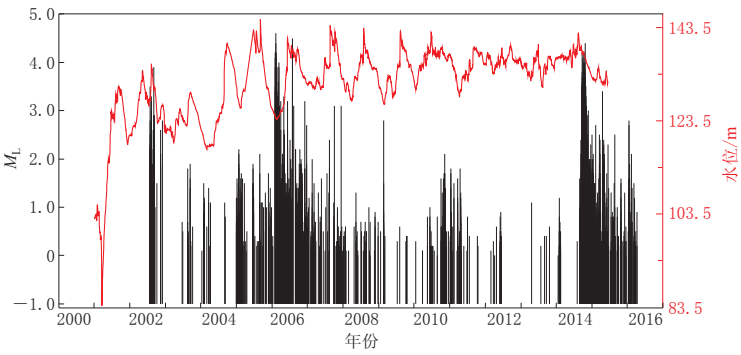


图 7 2000—2016 年珊溪水库库区地震 $M-t$ 图(黑色)及水库水位变化图(红色)
Fig. 7 $M-t$ diagram (black) of the earthquake records in Shanxi reservoir
region and the storage water level (red) from 2000 to 2016

从时间序列上看，珊溪水库库区大约每隔 4 年发生一次震群型地震，即 2002，2006，2010，2014 年均发生震群活动，其中 2006 年和 2014 年的震群序列震级较大，地震频度较高，且 2014 年震群活动频次明显升高，地震活动有随时间不断加强的趋势。研究表明，长期持续的高水位可诱发地震能量的集中释放，这在广东新丰江水库(华卫等，2012)、湖北丹江口水库(Liu *et al*，2011)及陕西石泉水库(陈希圣，1993)等均可观察到类似现象，而且水库水位的上升或者下降会诱发地震(陈希圣，1993；程惠红等，2013)。珊溪水库在 2006 年 $M_L 4.6$ 地震发生前数月，水位降幅约 21 m；在 2010 年震群发生前，水位涨幅约 13 m 左右；2011 年以后水库水位较高且变化平稳；2014 年震群发生前水位并无明显变化。总体

上, 珊溪水库的水位变化与震群活动的关系不明显, 震群活动可能是由库水向库底断层破裂面长期渗透扩散使孔隙压增加所致。

5 震群序列活动与断裂构造关系

震群活动是指没有明显主震事件的地震序列(Lay, Wallace, 1995), 在水库、火山及地热活动区发生的震群活动被认为是由地下流体的流动所诱发的(Johnson, McEvilly, 1995; Noir *et al*, 1997; Audin *et al*, 2002; Saccorotti *et al*, 2002; Parotidis *et al*, 2003; Yukutake *et al*, 2008)。根据地震活动特征分析, 珊溪水库诱发地震大致存在 4 年一次的爆发规律, 未来依然存在发生震群活动的条件。2006 年和 2014 年两次震群序列的重新定位结果显示震中均呈线性条带平行分布在双溪—焦溪垌断裂南侧, 2014 年震群序列发生在 2006 年震群的 NW 向延伸的方向上(钟羽云等, 2011), 两次震群的地震分布连成一条地震条带, 在构造图上该条带并未沿已知的 NW 向双溪—焦溪垌断裂分布, 而是分布在其南侧, 这可能是由于断裂的研究程度不高, 其定位误差较大所导致。一般认为由地下流体引发的震群活动主要沿先存断裂的破裂面活动(Hill, 1977; Sibson, 1987, 1996)。由震源机制解结果可知, NW 向节面的错动性质呈右旋走滑型, 与钟羽云等(2011)所得的 2006 年震群震源机制解的结果一致, 说明两次地震序列可能均为沿 NW 向双溪—焦溪垌断裂活动的结果, 且地震活动出现沿断裂向西迁移的现象。钟羽云等(2010)认为双溪—焦溪垌断裂为 2006 年珊溪水库震群的发震构造, 即该震群为断裂活动所产生的构造地震。虽然震群活动可能沿双溪—焦溪垌断裂分布, 并刻画出了断裂结构面特征及活动性质, 但由于没有明显的主震且其震源深度较浅, 迄今震群活动并非是断裂活动所导致的结果, 仍然是水库诱发地震活动, 即断裂产生的破裂面为库水的流动提供了通道, 由孔隙压的增加引发了震群活动。未来水库地震活动有激发该断裂活动的可能, 而一旦该断裂活动被激发, 则有发生构造地震的可能, 因此该断裂被激发的条件和现今活动性及未来发生地震的危险性均值得重视, 需要进一步深入研究。

6 讨论与结论

本文通过对珊溪水库 2014 年 9—12 月发生的震群序列的重新定位和 $M_L \geq 3.0$ 地震事件的震源机制解反演, 以及对水库水位与地震发生关系的分析, 获得了以下结论与认识:

1) 重新定位的珊溪水库 2014 年震群序列的震源主要在 0.7—6 km 深度范围内分层分布, 在 4.5—5 km 之间明显缺震。2014 年震群序列分布在 2006 年震群 NW 向延伸的方向上, 两者构成的同一条地震线性条带极可能分布在双溪—焦溪垌断裂上, 震群活动呈现沿断裂向 NW 迁移的现象。精定位震源分布刻画出双溪—焦溪垌断裂结构面以高角度倾向 SW, 且在垂向上高度不均匀和不连续, 呈右旋走滑活动性质。由于没有明显的主震且多数地震震源深度在 6 km 以上, 因此震群活动仍然属于水库诱发地震, 双溪—焦溪垌断裂不是震群序列的发震构造, 但其未来有被激发发生构造地震, 即破坏性地震的可能。

2) 珊溪水库库区蓄水前鲜有地震发生, 说明该水库地震属于水库诱发型地震, 发震周期大约为 4 年, 属震群型地震, 水库水位变化与震群活动关系不明显, 震群活动可能是由库水沿断层破裂面长期渗透扩散引起孔隙压的增加所致。从发震震级和频度看, 地震活动有随时间逐步增强的趋势, 断裂被激发发生构造地震的条件及未来发生地震的危险性值得

进一步深入研究.

3) 从发震震级和频度看, 地震活动有随时间逐步增强的趋势, 但这只是一种定性的推测, 本文尚未定量估计出震群活动的频度及未来最大震级, 同时双溪—焦溪垵断裂被激发发生构造地震即破坏性地震的条件等问题将是下一步研究的重点.

4) 本文所使用的双差定位方法具有较高的定位精度, 能细致地刻画发震断层的空间形态, 但定位时用到的地震目录所提供的震相、走时存在一定的人为误差, 未来可利用波形互相关技术减小人为因素的影响, 进一步提高定位精度. 另外利用层析成像技术可反演出库区的地下速度结构, 对比不同蓄水时期地下速度结构的变化, 对于理解水库向地下渗水的过程与地震之间的关系具有十分重要的意义.

浙江省地震局震害防御中心高级工程师赵冬提供了库区断层分布图, 中国地震局地震预测研究所“区域地震台网震源参数测定软件编制”项目组提供了 SEIS_CAP 反演程序, 浙江省地震监测预报研究中心提供了波形数据及地震目录, 作者在此一并表示真诚的谢意!

参 考 文 献

- 陈希圣. 1993. 陕西石泉 $M_L 4.7$ 地震成因探讨[J]. 西北地震学报, **15**(2): 76–80.
- Chen X S. 1993. Study on cause of formation of the Shiquan earthquake ($M_L 4.7$) [J]. *Northwestern Seismological Journal*, **15**(2): 76–80 (in Chinese).
- 程惠红, 张怀, 朱伯靖, 郑亮, 石耀霖. 2013. 卡里巴水库蓄水引起库区应力场变化影响分析[J]. 地震, **33**(4): 32–42.
- Cheng H H, Zhang H, Zhu B J, Zheng L, Shi Y L. 2013. Stress field changes after the impoundment of Kariba Reservoir [J]. *Earthquake*, **33**(4): 32–42 (in Chinese).
- 华卫, 陈章立, 郑斯华, 晏纯清. 2012. 水库诱发地震与构造地震震源参数特征差异性研究: 以龙滩水库为例[J]. 地球物理学进展, **27**(3): 924–935.
- Hua W, Chen Z L, Zheng S H, Yan C Q. 2012. Differences existing in characteristics of source parameters between reservoir induced seismicity and tectonic earthquake: A case study of Longtan reservoir [J]. *Progress in Geophysics*, **27**(3): 924–935 (in Chinese).
- 张帆, 朱新运, 钟羽云. 2013. 珊溪水库地震小震震源机制解特征研究[J]. 地震工程学报, **35**(3): 684–691.
- Zhang F, Zhu X Y, Zhong Y Y. 2013. Study on the characteristic of focal mechanism solutions of the Shanxi reservoir earthquake [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **35**(3): 684–691 (in Chinese).
- 钟羽云, 张震峰, 阚宝祥. 2010. 温州珊溪水库地震重新定位与速度结构联合反演[J]. 中国地震, **26**(3): 265–272.
- Zhong Y Y, Zhang Z F, Kan B X. 2010. Simultaneous inversion of earthquake relocation and velocity structure in the Shanxi-reservoir, Wenzhou [J]. *Earthquake Research in China*, **26**(3): 265–272 (in Chinese).
- 钟羽云, 张帆, 赵冬. 2011. 珊溪水库 $M_L 4.6$ 震群精确定位与发震构造研究[J]. 地震研究, **34**(2): 158–165.
- Zhong Y Y, Zhang F, Zhao D. 2011. Precise relocation and seismogenic structure of the Shanxi reservoir earthquake sequence in Wenzhou, Zhejiang Province [J]. *Journal of Seismological Research*, **34**(2): 158–165 (in Chinese).
- 钟羽云, 张震峰, 阚宝祥. 2015. 珊溪水库地震波速比时空分布特征[J]. 大地测量与地球动力学, **35**(5): 871–875.
- Zhong Y Y, Zhang Z F, Kan B X. 2015. The temporal and spatial distribution characteristics of seismic wave velocity ratio in Shanxi reservoir [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **35**(5): 871–875 (in Chinese).
- 朱新运, 张帆, 于俊谊. 2010. 浙江珊溪水库地震精细定位及构造研究[J]. 中国地震, **26**(4): 380–390.
- Zhu X Y, Zhang F, Yu J Y. 2010. Study on precise positioning and structure of the Shanxi reservoir earthquake, Zhejiang Province [J]. *Earthquake Research in China*, **26**(4): 380–390 (in Chinese).
- 邹振轩, 李金龙, 俞铁宏, 王政. 2010. 温州珊溪水库地震 S 波分裂研究[J]. 地震学报, **32**(4): 423–432.
- Zou Z X, Li J L, Yu T H, Wang Z. 2010. A study on S-wave splitting using waveform data from Shanxi reservoir

- induced earthquakes in Wenzhou of China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **32**(4): 423–432 (in Chinese).
- Audin L, Avouac J, Flouzat M, Plantet J. 2002. Fluid-driven seismicity in a stable tectonic context: The Remiremont fault zone, Vosges, France[J]. *Geophys Res Lett*, **29**(6): 1091. doi:10.1029/2001GL012988.
- Hill D P. 1977. A model for earthquake swarms[J]. *J Geophys Res*, **82**: 347–352.
- Johnson P, McEvilly T. 1995. Parkfield seismicity: Fluid-driven?[J]. *J Geophys Res*, **100**(B7): 12937–12950.
- Lay T, Wallace T. 1995. *Modern Global Seismology*[M]. New York: Springer: 393.
- Liu S M, Xu L H, Talwani P. 2011. Reservoir-induced seismicity in the Danjiangkou Reservoir: A quantitative analysis [J]. *Geophys J Inter*, **185**: 514–528.
- Noir J, Jacques E, Békri S, Adler P M, Tapponnier P, King G C P. 1997. Fluid flow triggered migration of events in the 1989 Dobi earthquake sequence of central Afar[J]. *Geophys Res Lett*, **24**: 2335–2338.
- Parotidis M, Rothert E, Shapiro S A. 2003. Pore-pressure diffusion: A possible triggering mechanism for the earthquake swarms 2000 in Vogtland/NW-Bohemia, central Europe[J]. *Geophys Res Lett*, **30**(20): 2075. doi:10.1029/2003GL018110.
- Roche V, Baan M. 2015. The role of lithological layering and pore pressure on fluid-induced microseismicity[J]. *J Geophys Res*, **120**: 923–943. doi:10.1002/2014JB011606.
- Saccorotti G, Ventura G, Vilardo G. 2002. Seismic swarms related to diffusive processes: The case of Somma-Vesuvius volcano, Italy[J]. *Geophysics*, **67**: 199–203.
- Sibson R H. 1987. Earthquake rupturing as a mineralizing agent in hydrothermal systems[J]. *Geology*, **15**(8): 701–704.
- Sibson R H. 1996. Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes[J]. *Struct Geol*, **18**(8): 1031–1042. doi:10.1016/0191-8141(96)00032-6.
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward fault[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **90**: 1352–1368.
- Yukutake Y, Takeda T, Obara K. 2008. Fine fault structure of a moderate earthquake in the 2007 earthquake sequence of Northern Mie, Japan[J]. *Earth Planet Space*, **60**: 981–985.
- Zhao L, Helmberger D V. 1994. Source estimation from broadband regional seismograms[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **84**(1): 91–104.
- Zhu L P, Helmberger D V. 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms [J]. *Bull Seismol Soc Am*, **6**(5): 1634–1641.