

阮祥、张永久、谢蓉华等, 2013, 瀑布沟库区地震活动及应力场特征, 中国地震, 29(3), 316 ~ 326。

· 研究论文 ·

## 瀑布沟库区地震活动及应力场特征

阮祥 张永久 谢蓉华 胡先明 杜瑶

四川省地震局, 成都市人民南路三段 29 号 610041

**摘要** 通过对瀑布沟水库和成都数字遥测地震台网记录的波形数据的研究发现, 四川瀑布沟水库库区大量的所谓小震活动皆是爆破成因, 从而改变了此前对该库区蓄水前地震活动密集, 蓄水后地震活动骤然平静的认识。2009 年 11 月水库蓄水后在蓄水区域周边 10km 范围内仅发生  $M_L 1.5$  以上地震 1 次, 即 2010 年 8 月 8 日  $M_L 1.7$  地震, 蓄水前后小震稀少。水库西侧的 2 个地震密集区的走滑型地震占较大比例, 区域主压应力为 NWW 向。水库东、北部区域的地震震源机制解呈多种类型。瀑布沟水库区小震活动总体受区域应力场控制, NWW 向近水平主压应力有利于库区 NNW 向中小断裂发生走滑型错动。

**关键词:** 水库地震 瀑布沟水库 震源机制 应力场特征

[文章编号] 1001-4683(2013)03-0316-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

### 0 引言

四川省业已建成的最大水电工程——瀑布沟水电站工程位于四川省汉源县与甘洛县交界的大渡河干流山上, 水库正常蓄水位 850m, 总库容 53.97 亿  $m^3$ , 调节库容 38.8 亿  $m^3$ , 总装机容量 4260MW, 是典型的高山峡谷型高坝大水库, 大渡河干流回水至石棉县城, 库长 72km。工程于 2004 年 3 月开工建设, 2009 年 11 月 1 日正式进入蓄水阶段。

随着相关法律法规的出台, 与水电工程配套的水库地震台网建设也更趋规范化, 测震台站的密度和地震记录质量也都大幅度提高, 这都为更好地利用数字地震记录对水库地震开展深入研究提供了基础条件。于俊谊等(2008)将浙江珊溪水库地震震源参数与无水库背景地震震源参数进行了对比, 发现两者间无明显差异; 陈翰林等(2009)对广西龙滩水库地震机制解特征及应力场进行了分析研究, 提出载荷作用所引起的剪应力增大不是龙滩水库蓄水诱发地震的主要因素, 而蓄水所产生的孔隙压力和库水渗透的润滑弱化效应的耦合作用可能是主要的成因。汶川 8.0 级地震后, 四川紫坪铺水库由于其特殊的地理位置成为人

[收稿日期] 2012-06-04

[项目类别] 中国地震局地震科技星火计划项目(XH-1022)、国家科技支撑项目“汶川地震断裂带科学钻探——断裂带深部流体观测及其与余震活动关系研究(WFSD-10-03)”共同资助

[作者简介] 阮祥男, 1981 出生, 工程师, 主要从事数字地震学、震源物理方面的研究工作。

E-mail: ruanxiang8110@163.com

们关注的焦点,陈颢(2009)认为从现象学和力学分析角度看,汶川地震不是蓄水引起的水库地震。诸多的学者将研究集中在了紫坪铺水库蓄水对龙门山断裂带可能造成的影响以及蓄水前后该区域震源和介质参数的变化方面(雷兴林等,2008;张永久等,2010a、2010b;周斌等,2010)。

瀑布沟水库位于强震多发的龙门山、鲜水河和安宁河三大断裂带交汇区域,而目前对该水库与地震相关的工作尚较少。本文将对瀑布沟水库及其附近区域地震活动、震源机制和应力场特征等开展分析研究。

## 1 研究区域和分析方法

瀑布沟水电站水库地处青藏高原与四川盆地的过渡地带,位于扬子地台西部之古老的康滇地轴北段东侧,与现代强烈活动的川滇菱形地块毗邻。水库水域区周围存在多条活动断裂:水库东北是龙门山逆倾型断裂构造,该断裂带于2008年5月12日发生了有记录以来四川境内最大的汶川8.0级地震;水库西北为走滑型断裂构造——鲜水河断裂带,历史上曾发生包括1955年康定7.5级和1973年炉霍7.6级在内的多次7级以上地震;水库以南是与鲜水河断裂相接的安宁河—则木河断裂和大凉山断裂,古地震考察显示安宁河—则木河断裂承载了多次7级地震的平均位错量(闻学泽等,2000),大凉山断裂带的古地震震级也在7级以上(宋方敏等,2002),如图1右下角小图所示。本文的研究区域(101.8~103.4°E, 28.7~29.7°N)包括了瀑布沟水库蓄水区域、鲜水河断裂带磨西以南段和安宁河断裂带及大凉山断裂带北段的部分区域,以及水库以东的多条中等活动断裂构造区。近场内主要发育NW、NE向断裂构造,瀑布沟水库蓄水区域主要在第四系沉积区上,金坪断裂穿过瀑布沟水库蓄水区域,附近区域分布有美罗断裂、顺河断裂、锣锅坪断裂、红花断裂、黑马乡断裂、乌斯河断裂等多条小规模断裂,有记录以来未发生过中等以上地震;水库蓄水区域以东分布着多条中等规模断裂,包括NW向的保新厂—凰仪断裂,NE向的峨眉山断裂和近NS向的六道河—柳江断裂、宜坪—万坪断裂、苦竹坝—砂匡断裂等,该区域地震活动水平为5级左右;水库蓄水区域以西和以南区域分布着多条规模较大断裂,包括泸定—安顺场—公益海断裂、西油坊—子耳山断裂、鹿子坪—大桥断裂、石棉—马前山断裂、马哈拉断裂等,其分属鲜水河断裂带南段和安宁河断裂带、大凉山断裂带北段。据已有资料(孙成民,2010)记载,研究区内有明确地震定位的最大地震为1989年6月9日石棉5.2级地震,但仍具有7级地震的活动背景(图1)。

本项工作利用了瀑布沟水库地震遥测台网和成都数字遥测地震台网的波形数据。瀑布沟水库地震遥测台网共13个微震子台和3个中继站,分两期(1期,2005年12月16日~2007年3月;2期,2007年5月~2008年1月)建成(图1)。测震台站采用rsfs-1型反馈式短周期速度地震计,观测频带范围1~40Hz,加之高分辨率、大动态范围的EDAS-24L型数据采集器,采样率100SPS。台网对库区内地震的监测能力的震级下限为 $M_L 0.5$ 。成都数字遥测地震台网在“十五”改造后,监测能力和记录质量也大幅提高,现已新建或改造遥测地震台60个。在不包含瀑布沟水库台网数据的情况下,对瀑布沟水库附近区域监测能力震级下限为 $M_L 1.5$ 。台网子台采用CTS-1E、CMG-3ESPC和BBVS-60等3种类型宽频带地震计,以及EDAS-24L和EDAS-24IP数据采集器,采样率为100SPS。

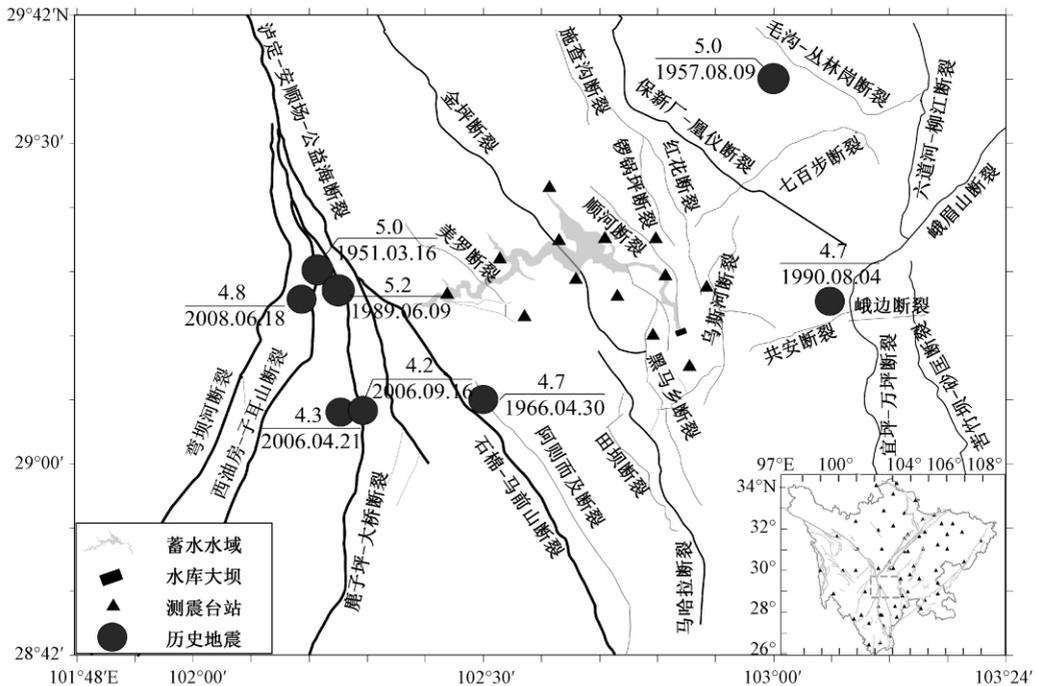


图1 研究区内断裂、历史地震分布及瀑布沟水库测震台网分布

根据区域地质调查报告,1:20 万地质图石棉幅①、荣经幅②改绘;右下角小图为成都数字遥测地震台网台站分布,其中虚线框为本文研究区域

考虑到库区范围内瀑布沟水库地震台网密度较高,我们收集整理了2007~2011年瀑布沟库区范围内有清晰记录的 $M_L 1.5$ 以上波形数据,去除其中被判定为爆破的记录后,进行震源机制解反演。库区以外的研究区域则采用成都遥测地震台网 $M_L 2.0$ 以上有清晰记录的地震波形。进行震源机制解反演时,对于 $M_L > 3.5$ 的地震采用CAP方法(Zhao et al, 1994; Zhu et al, 1996),对于 $M_L \leq 3.5$ 地震采用P波、S波振幅比方法(梁尚鸿等,1984;刁桂苓等,1993)。

## 2 库区地震活动及爆破识别

瀑布沟水电站作为一项耗资巨大的系统性工程,在建设期间大量的爆破不可避免,为避免施工爆破在震源机制及应力状态分析中带来干扰,本文从时间、空间上进行了对比分析,以期对其进行有效排除。

根据双差定位法(Waldhauser et al, 2000)对研究区内到时清晰的地震进行重新定位,结果显示在瀑布沟库区存在a、b、c、d等4个地震活动密集区(图2),a区和b区基本呈现圆形或椭圆分布,c区和d区则分别为NW向和NE向条带状展布。

根据4个地震丛集区的地震活动时间(图3)分布可以看出:a区在2010年下半年后未

① 四川省地质局,1972,区域地质调查报告——石棉幅(H-48-XXV)

② 四川省地质局,1975,区域地质调查报告——荣经幅(H-48-XIX)

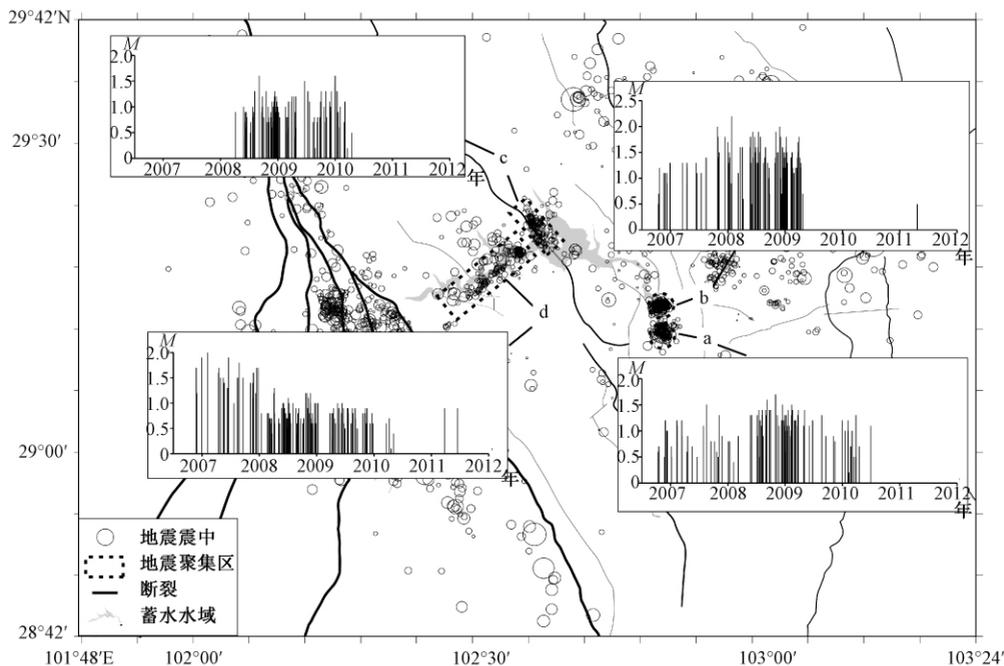


图2 研究区内重新精确定位后地震分布及四个地震丛集区  $M-t$  图(断裂名同图1)

再记录到地震活动,与之前几年高度密集状况形成明显反差;b区从2009年下半年开始除记录到1次0.5级地震外再未记录到地震活动;c区的地震活动时间集中在2008年上半年至2010年初;d区在2010年下半年后仅记录到2次1.0级以下地震。4个地震密集活动区内记录到的地震震级几乎都在2.0以下,显示地震活动强度低、频度高。

瀑布沟库区内地震监测能力震级下限为0.5级,我们分别对库区内a、b、c、d等4个地震活动密集区0.5级以上地震的发生时间点进行统计,结果显示4个区在每天的11、12时和17、18时出现2个地震活动的峰值,a、b区较c、d区在这2个时点的地震活动更为突出,a区在某些时点上的地震次数是其他时间点的近40倍,b区则超过70倍。c、d区除2个峰值时间段地震密集发生外,在7时至20时之间也有地震发生,但在午夜时段没有地震发生。从地震时间点统计可以看出,a、b区属于同一类型地震活动,c、d区属于不同于a、b的另一种地震活动类型。在足够长的统计时段内大于某一完整性震级的地震在1天中各个时点的频度应基本相同,而非在某一时点出现高频度。作为对比,我们将四川及邻区内与4个分区相同统计时间段(即2007年~2011年)的 $M_{\geq 2.0}$ 以上地震进行时间点的统计,结果显示在1天内各个时间点地震活动发生均匀,各时间点地震频次相差很小, $K-S$ 检验显示其符合正态分布(图4(b)),即表示1天内发生1270次地震的时间点最多,高于或低于该频次时间点相对减少,且没有大偏移量的时间点。很明显,a、b区中地震活动密集区出现了大偏移量的时间点,c、d区中地震活动密集区发震时间统计出有较大偏移量的时间点外,优势频次时间点不明显,不符合正态分布,这体现了4个地震活动密集区与普通天然地震的区别。

为落实4个地震活动密集区地震密集发生的原因,本文沿4个区所处位置进行了现场实地了解调查。调查发现瀑布沟大坝上游4km左右和下游尼日河支流1km左右为大

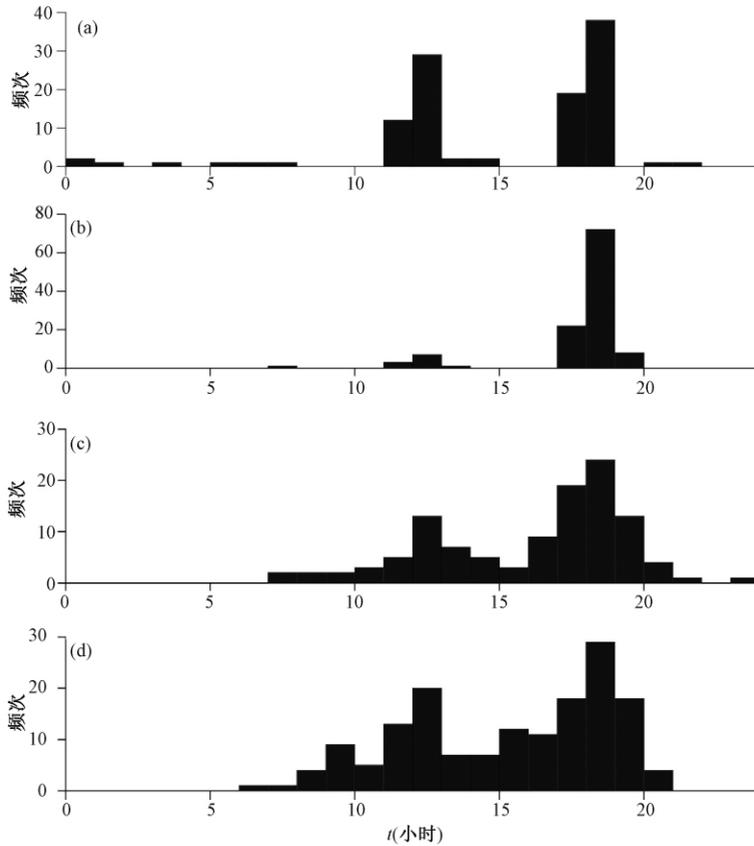


图3 4个地震活动密集区地震发生时间点统计(分图序号与图2中序号相对应)

坝修建时的采料场,为大坝修建提供石料。两个采料场与我们精确定位后的 a、b 两个地震密集区位置完全一致。地震密集 c 区地震活动展布呈 NW 向,根据现场调查,其与汉源新县城建设整体展布一致。由于瀑布沟水库蓄水导致汉源老县城已淹没于水中,重新选址后在图 1 中 c 区进行了新城建设,图 1 中 c 区地震活动集中在 2008 年 3 月~2010 年 4 月,该时间段正是汉源新县城平整地基等一系列爆破工程实施的时段。地震活动密集的 d 区较其他几个区展布长度更长,呈现为 NE 向,与 c 区展布方向近垂直。现场调查发现,该地震密集区位置及展布形态与 2012 年 5 月 1 日通车的雅安至西昌高速公路一致。这条高速公路修建难度极大,在 d 区段内均为隧道和桥梁,需要大量施工爆破。d 区  $M-t$  图(图 2)显示,地震密集时段在 2010 年 4 月以前,且震级逐渐减小,表明了建设初期和后期的爆破当量变化状况。

综上所述认为,瀑布沟库区内 4 个地震活动密集区内所监测到的地震活动绝大部分应该是该区内施工爆破所致,主要包括了采料场开石、县城平地建设、高速公路修建等 3 个方面的爆破施工。当然也不能完全排除其中含有天然地震的可能,我们根据以下条件对地震事件与爆破事件进行区分:首先去除 11~13 时、17~19 时 2 个时间段内的事件;其次,双差精确定位结果显示 73% 地震的震源深度在 3km 以上,且在 3km 深度地震分布最少,考虑地

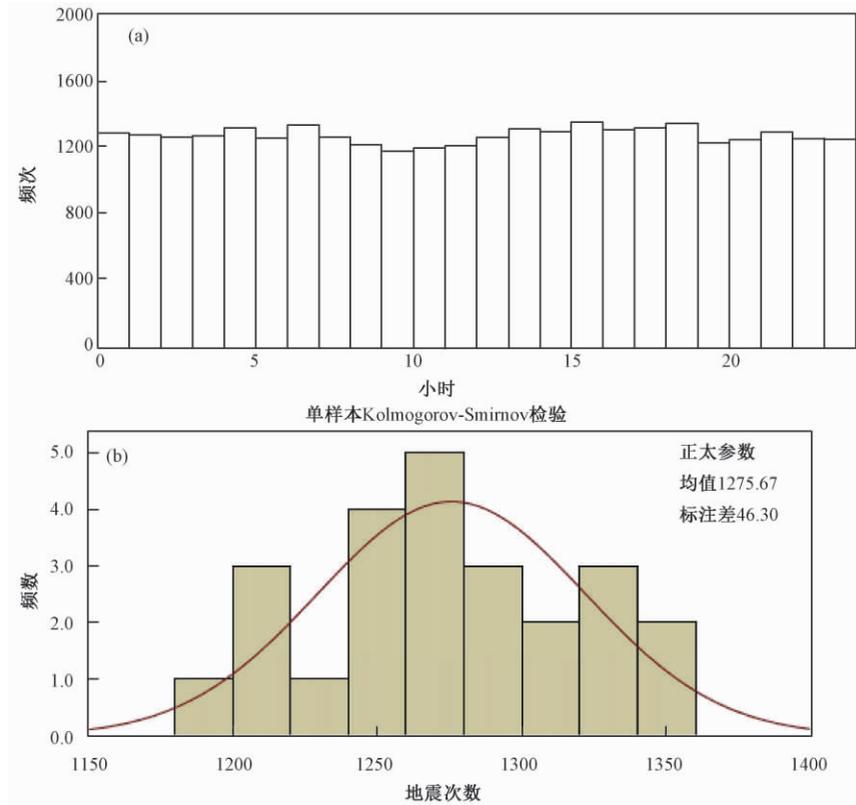


图4 四川及邻区  $M_L \geq 2.0$  地震发生时刻统计 (a) 及其样本  $K-S$  检验 (b)

震重新定位可能出现的误差,我们去除深度小于 3km 的事件;结合爆破波形的基本特征:①近震爆破有瑞利型面波,天然地震瑞利型面波极不发育,甚至可以看作没有;②人工爆破的 P 波与 S 波的最大振幅比  $A_p/A_s \approx 1.0$ ,天然地震是  $A_p/A_s = 0.25 \sim 0.1$  (中国地震局监测预报司,2009),并将初动全部向上的事件去除。经过筛选后得到水库水域区大于 1.5 级地震仅 1 次,即 2010 年 8 月 8 日 14 时 49 分  $M_L 1.7$  地震。

### 3 震源机制及应力状态分析

在去除了可能现于库区的爆破事件后,我们应用 P 波、S 波振幅比结合初动方法 (梁尚鸿等,1984;刁桂苓等,1993) 反演了 2007 年以来库区 1 个 1.5 级以上、经排除为非爆破的地震事件的震源机制解,同时对研究区内库区附近区域内  $2.0 \leq M_L \leq 3.5$  地震同样利用该方法反演其震源机制解,该方法要求震中周围有尽量多且分布均匀的台站包围,反演过程中我们同时利用了成都数字遥测地震台网和瀑布沟水库地震台网记录清晰的数字地震波形资料,保证每个地震周围不少于 5 个测震台站分布,结合部分清晰的 P 波初动符号,结果的可靠性可得到保证。反演得到 2007 年 1 月~2011 年 12 月期间地震震源机制解 51 个。对于震级较大地震 ( $M_L 3.5$  以上) 我们应用 CAP 方法 (Zhao et al,1994;Zhu et al,1996) 利用成都数字遥测地震台网的宽频带记录反演得到 12 个地震的震源机制解结果。图 5 给出了反演

得到的 63 个震源机制解,由图可见,地震主要集中在研究区西部,即鲜水河断裂带与安宁河断裂、大凉山断裂带交汇区域。根据滑动角对震源错动分类进行划分发现,图 5 中绿色震源机制显示为走滑型地震,红色震源机制显示为逆倾型地震,蓝色震源机制显示为正倾型地震。

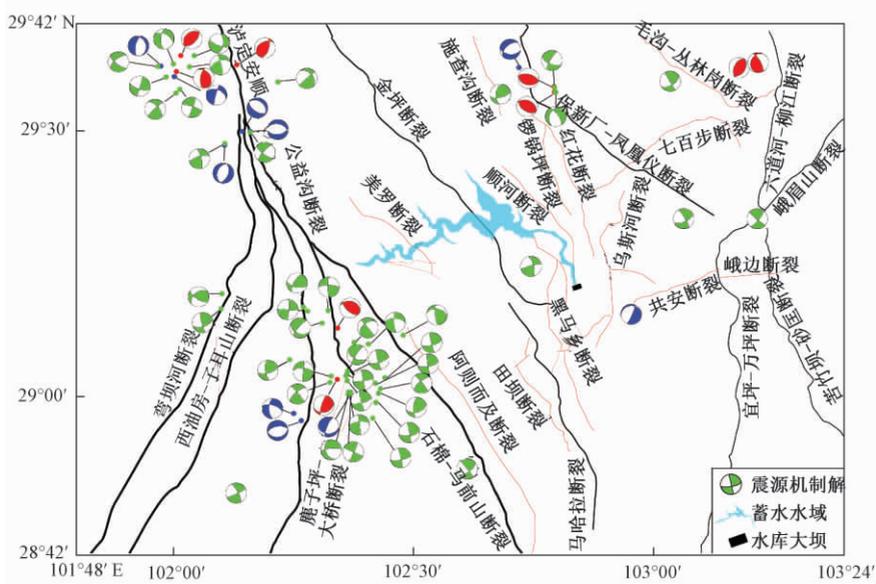


图 5 研究区内震源机制解分布

震源机制解中绿色为走滑型地震,蓝色为正倾型地震,红色为逆倾型地震

如前文所述,水库水域区仅发现 1 次  $M_L 1.5$  以上天然地震,即 2010 年 8 月 8 日 14 时 49 分  $M_L 1.7$  地震,震源机制为走滑型,地震震中距蓄水区 5km 左右,位于金坪断裂和黑马乡断裂之间,为蓄水后发生。

水库水域区西侧,包括 2 个地震活动密集区。其中研究区西北部,鲜水河断裂磨西以南,泸定-安顺场段是第四纪新隆起的显著地貌贡嘎山东边界(周荣军等,2001),该区的丛集地震震源机制类型中走滑型、逆倾型和正倾型地震皆有呈现,这也反映出该区域构造环境的复杂。研究区西南部“扫帚状”构造是中、小地震集中分布区,该区域小震明显以走滑型地震为主,正倾和逆倾型地震稀少。表明该区域的“扫帚状”构造以走滑的断层为主。

水库水域区北部共得到 9 个震源机制解,分别位于保新厂-凰仪断裂和六道河-柳江断裂附近,也呈现多种震源机制解类型,分析认为应是该地细小断裂不同产状受应力场左右所致。

水库水域区东部共得到 3 个震源机制解,2010 年 11 月 18 日 6 时 46 分  $M_L 2.3$  地震位于大坝东南距大坝水平距离超过 10km,显示为正倾型地震,即主要受 NW-SE 向拉张力作用。峨眉山断裂上的走滑型地震,其中一个节面与断裂走向完全一致,即 NE-SW 向,如果该节面为断层面则地震为右旋走滑地震。

图 6 给出了研究区内震源机制随时间变化的图示。红色区域表示逆倾型地震,可以看出,逆倾型地震在包括汶川地震前后、水库蓄水前后的时段内均有出现,出现时段较为均匀;

蓝色区域表示正倾型地震,该型地震在汶川地震后近两年时间未出现;绿色区域表示走滑型地震,走滑型地震是研究区域内最主要的错动类型,从图中可看出,汶川地震后其数量较汶川地震前明显下降,汶川地震后至蓄水前与蓄水后相比变化不明显。

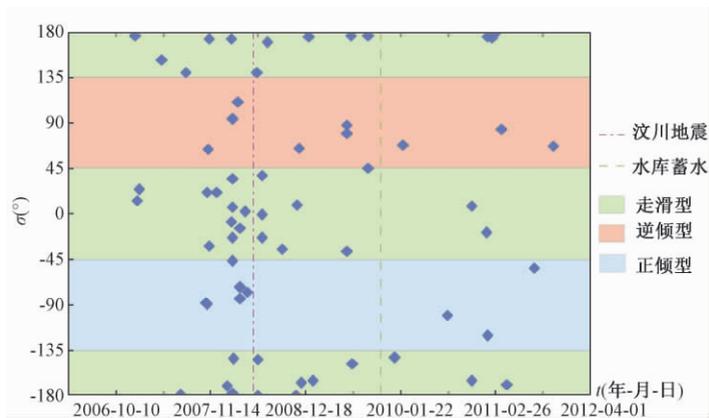


图6 震源错动类型随时间变化

对于研究区西部的2个地震密集发生区,我们通过应用ZMAP软件内集成的应力张力反演模块(Michael, 1984、1987a、1987b、1991; Michael et al, 1990)分别反演其应力张量。结果显示,研究区西北的泸定区域最大主应力S1方位角为 $109^{\circ}$ ,俯角为 $14.7^{\circ}$ ,最小主应力S3方位角 $202^{\circ}$ ,俯角为 $8.7^{\circ}$ ,中间主应力S2方位角 $222^{\circ}$ ,俯角为 $72.8^{\circ}$ (图7(a))。由于中、小地震震源机制有一定随机性,部分震源机制并非完全与区域应力场一致,拟合结果有一定的离散性。但总体来看,该区域最大主应力呈NWW-SEE向,最小主应力呈NNE-SSW向,且都接近水平,中间主应力接近垂直。根据Zoback(1992)提出的力轴方向划分错动类型的规则,该区域主应力分布方位等效于一个走滑型错动。

对研究区内西南部地震密集区反演的应力张量结果显示,其最大主应力S1方位角 $284^{\circ}$ ,俯角为 $4.2^{\circ}$ ,最小主应力S3方位角 $15^{\circ}$ ,俯角 $22.9^{\circ}$ ,中间主应力S2方位角 $184^{\circ}$ ,俯角 $66.6^{\circ}$ (图7(b))。与西北部的泸定区域一样,该区域的最大、最小主应力也分别呈NWW-SEE向和NNE-SSW向,力轴近水平,中间主应力俯角较之稍缓。本区内地震震源机制力轴

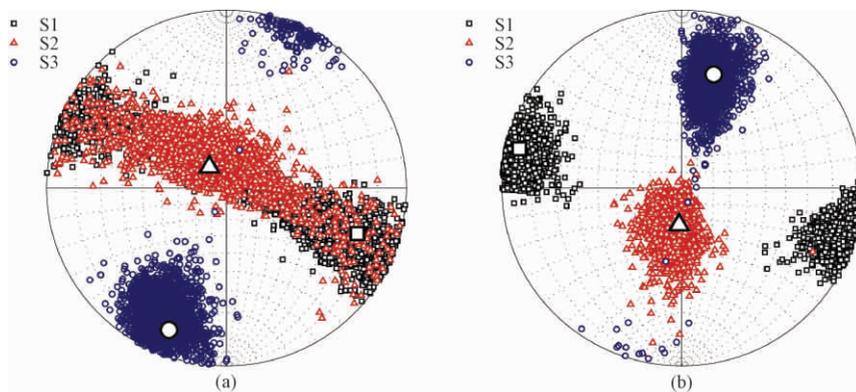


图7 两个地震密集区应力张量。(a)研究区西北部;(b)研究区西南部

一致性较好,反演结果离散度较低,其主应力分布方位同样等效于一个走滑型错动。

由前文可知,两个区域位于鲜水河断裂南段和安宁河断裂北段交汇处,受同一应力场控制,即都主要受近水平的 NWW-SEE 向主压应力作用,主要的断层产状为走滑型构造。在整体大区域上,与其所属的雅江地块的应力场状态保持一致(程万正等,2006)。研究区其他区域由于样本量不足并未给出应力张量反演结果。

## 4 分析讨论

经过对库区内密集的地震活动进行识别,大量地震被判别为因爆破所致,从而改变了之前的瀑布沟水库蓄水前地震活动密集,蓄水后地震活动骤然平静的认识。虽然在典型的紫坪铺水库和龙滩水库都有蓄水后地震活动减弱现象,但经本研究可知瀑布沟水库并未出现该现象,蓄水后在蓄水区域周边 10km 范围内仅发生  $M_L 1.5$  以上地震 1 次,即 2010 年 8 月 8 日  $M_L 1.7$  地震,蓄水前后库区基本保持了较一致的地震活动平静。程万正等(2010)提出 3 条水库蓄水后是否发生诱发地震活动的判断依据,即水库大坝及水域区是否有活动断裂,岩体深部是否裂隙发育渗透性强,是否历史上曾发生过大地震等。瀑布沟水库并未处于几大主干断裂上,蓄水水域有中等规模的金坪断裂通过,大坝附近主要展布微小断裂,水库库尾距石棉-马前山断裂、安顺场-公益海断裂等几条大规模断裂较近,但水库库尾水位升降较小,且水库本身处于大渡河上,因此水库的蓄水对这些断裂的渗透作用有限。从实际地震活动看,水库经过两轮蓄放水所产生的库水下渗、孔隙压力变化等并未对所在区域的地震活动产生实质影响,历史上发生的大地震都分布在水库区外围的主干大断裂上,库区并没有大地震记录。

曹建玲等(2011)通过数值模拟河道型水库地应力变化发现,蓄水增加的压应力非常有限。而区域构造应力场的变化是影响库区地震活动的主要因素。水库水域区西侧两个地震活动密集区  $M_L 2.0$  以上地震走滑型占较大比例,即鲜水河断裂带南段、安宁河断裂带北段、大凉山断裂带北段的各条近场分支断裂以走滑型为主,均受 NWW 向主压应力作用。由于水库蓄水水域区断裂也基本为 NNW 向或近 NS 向,与其西部的主干断裂带各分支断裂展布一致,亦应有利于走滑型地震发生。按已有的研究经验推测,随着库区蓄、放水轮回的继续,加卸载作用将使水沿断裂进一步下渗,断层含水量逐渐饱满,断层面抗剪强度降低,库区走滑型地震将逐渐增多,如紫坪铺水库在加卸载第 3 阶段才出现小震活动相对增加。

综上所述,瀑布沟库区地震活动总体受区域应力场控制, NWW 向近水平主压应力有利于库区 NNW 向中小断裂发生走滑型错动。从已有的研究结果看,随水库蓄、放水轮回和库水渗透作用的持续,若库区及周围地区中小震活动有所增强亦属正常。水库以西的主干断裂受库水渗透影响不大,估计未来发生的背景性强震应仍主要受控于区域应力场变化。

**致谢:**感谢雅安市防震减灾局、汉源县防震减灾局在野外现场工作中给予的大力支持和帮助,感谢程万正研究员在本文撰写中提出的宝贵的建议。

## 参考文献

- 曹建玲、石耀霖,2011,河道型水库蓄水诱发地震的数值模拟,中国科学院研究生院学报, **28**(1),19~26。
- 陈翰林、赵翠萍、修济刚等,2009,龙滩库区水库地震震源机制及应力场特征,地震地质, **31**(4),686~698。
- 陈颢,2009,汶川地震是由水库蓄水引起的吗? 中国科学 D 辑:地球科学, **39**(3),257~259。
- 程万正、阮祥、张永久,2006,川滇次级地块震源机制解类型与一致性参数,地震学报, **28**(5),561~573。
- 程万正、张致伟、阮祥,2010,紫坪铺水库区不同蓄水阶段的地震活动及成因分析,地球物理学进展, **25**(3),759~767。
- 刁桂苓、于利明、宁杰远等,1993,1989 年大同震群的破裂特征,地球物理学报, **36**(3),360~368。
- 雷兴林、马胜利、闻学泽等,2008,地表水体对断层应力与地震时空分布影响的综合分析——以紫坪铺水库为例,地震地质, **30**(4),1046~1064。
- 梁尚鸿、李幼铭、束沛镛等,1984,利用区域地震台网 P、S 波振幅比资料测定小震震源参数,地球物理学报, **27**(3),247~257。
- 宋方敏、李如成、徐锡伟,2002,四川大凉山断裂带古地震研究初步结果,地震地质, **24**(1),27~34。
- 孙成民,2010,四川地震全纪录(上、下卷),成都:四川人民出版社。
- 闻学泽、杜平山、龙德雄,2000,安宁河断裂带小相岭段古地震的新证据及最晚事件的年代,地震地质, **22**(1),1~8。
- 于俊谊、朱颀运,2008,浙江珊溪水库地震震源参数研究,中国地震, **24**(4),379~387。
- 张永久、张致伟,2010a,汶川 8.0 级地震前紫坪铺库区震源机制及应力场特征,地震地质, **32**(4),614~627。
- 张永久、高原、石玉涛等,2010b,四川紫坪铺水库库区地震剪切波分裂研究,地球物理学报, **53**(9),2091~2101。
- 中国地震局监测预报司,2009,实用数字地震分析,北京:地震出版社。
- 周斌、薛世峰、邓志辉等,2010,水库诱发地震时空演化与库水加卸载及渗透过程的关系——以紫坪铺水库为例,地球物理学报, **53**(11),2651~2670。
- 周荣军、何玉林、杨涛等,2001,鲜水河-安宁河断裂带磨西-冕宁段的滑动速率与强震位错,中国地震, **17**(3),25~34。
- Michael A J, 1984, Determination of stress from slip data: Faults and folds, *Journal of Geophysical Research*, **89**, 11517~11526.
- Michael A J, 1987a, Stress rotation during the Coalinga aftershock sequence, *Journal of Geophysical Research*, **92**, 7963~7979.
- Michael A J, 1987b, Use of focal mechanisms to determine stress: A control study, *Journal of Geophysical Research*, **92**, 357~368.
- Michael A J, 1991, Spatial variations of stress within the 1987 Whittier Narrows, California, aftershock sequence: new techniques and results, *Journal of Geophysical Research*, **96**, 6303~6319.
- Michael A J, Ellsworth W L, Oppenheimer D, 1990, Co-seismic stress changes induced by the 1989 Loma Prieta, California earthquake, *Geophysical Research Letters*, **17**, 1441~1444.
- Waldhauser F, Ellsworth W L, 2000, A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward Fault, California, *Bull Seism Soc Am*, **90**(6), 1353~1368.
- Zhao L S, Helmberger D V, 1994, Source Estimation from broad-band regional seismograms, *Bull Seism Soc Am*, **84**(1), 91~104.
- Zoback M L, 1992, First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: the world stress map project, *J Geophys Res*, **97**, 11703~11728.
- Zhu L, Helmberger D V, 1996, Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms, *Bull Seism Soc Am*, **86**(5), 1634~1641.

## Characteristic of seismicity and stress field of the Pubugou reservoir

Ruan Xiang Zhang Yongjiu Xie Ronghua Hu Xianming Du Yao

Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

**Abstract** By using waveform data from the Pubugou reservoir seismographic network and Chengdu digital telemeter seismographic network, we found lots of small earthquakes in reservoir area are results of explosions. The research has changed the previous understanding that seismicity level is higher before the impoundments rather than after. There was one earthquake with magnitude greater than  $M_L 1.5$  within 10km of water area of the Pubugou area after impoundment:  $M_L 1.7$  on August 8, 2010. In fact, earthquake occurring before or after impoundment is rare. The proportion of strike-slip earthquakes is larger than others in the two clusters which are on the west of Pubugou reservoir, and the direction of principal compressive stress of these clusters is NWW. On the east and north of reservoir the focal mechanisms take on diversity. The small earthquake activity is totally controlled by region stress field, and NWW horizontal principal comprehensive stress may help generate the strike-slip rupture of moderate and small faults with direction of NNW.

**Key words:** Reservoir earthquakes The Pubugou reservoir Focal mechanism  
Characteristic of stress field