

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. 地震学报, 32(4): 423-432.
Zou Zhenxuan, Li Jinlong, Yu Tiehong, Wang Zheng. 2010. A study on S-wave splitting using waveform data from Shanxi reservoir induced earthquakes in Wenzhou of China. *Acta Seismologica Sinica*, 32(4): 423-432.

温州珊溪水库地震 S 波分裂研究^{*}

邹振轩^{*} 李金龙 俞铁宏 王政

(中国杭州 310013 浙江省地震局)

摘要 通过对温州珊溪水库地震序列开展了近一年的近场源剪切波分裂参数研究, 在进行精确定位并确保所用资料满足剪切波窗要求的基础上, 采用互相关系数法, 借助遗传算法与人工判读相结合, 测量了地震序列的快剪切波偏振方向和快慢剪切波的时间延迟。结果表明, 地震序列的 S 波分裂现象明显, 台站记录到的地震快剪切波平均偏振方向与区域最大水平主应力方向基本一致; 温州珊溪水库地区快剪切波平均偏振方向在近 N-S 向; S 波分裂快剪切波偏振方向所表现出的离散和空间差异性, 认为可能是由于局部构造影响; 目前库区应力场稳定, 应力调整已经结束, 未来发生强余震的可能性较小。

关键词 S 波分裂 水库地震 互相关系数法 快剪切波偏振 主应力
doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2010.04.005 中图分类号: P315.3⁺1 文献标识码: A

A study on S-wave splitting using waveform data from Shanxi reservoir induced earthquakes in Wenzhou of China

Zou Zhenxuan^{*} Li Jinlong Yu Tiehong Wang Zheng

(Earthquake Administration of Zhejiang Province, Hangzhou 310013, China)

Abstract: More than 1000 earthquakes induced by the Shanxi reservoir in Wenzhou, Zhejiang province of China, were recorded by both Zhejiang regional digital seismic network and Shanxi reservoir local digital network during the period from Feb. 4 to Oct. 31, 2006. Using wave form data of these earthquakes we studied S-wave splitting characteristics in the reservoir region. The earthquakes were relocated and the S-wave records with travel paths within S-wave window were selected out for analysis. The fast wave polarity azimuth and the slow wave time delay were determined by using the technique of cross-correlation coefficient analysis. The result indicates that S-waves coming from the reservoir earthquakes show notable splitting. The average fast wave polarization azimuth obtained at different stations generally coincides with the orientation of regional maximum principal stress therein. In Shanxi reservoir region the average polarization azimuth of fast S-wave is nearly in N-S direction. The scattering and spatial variation of the deduced fast S-wave polarity may be attributed to

* 基金项目 地震科学联合基金(C07056)和浙江省科技厅重大科技专项(2006C13026)共同资助。

收稿日期 2008-12-19 收到初稿, 2009-12-09 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: zouzhenxuan@163.com

the effect of local structure inhomogeneity. Presently the stress field in the reservoir region has recovered to stable state, and there would be little possibility of occurrence of a next strong earthquake.

Key words: S-wave splitting; reservoir earthquake; cross-correlation coefficient; fast S-wave polarization; principal compressive stress

引言

地震的孕育和发生是地球介质与应力场相互作用的结果,介质各向异性的存在更易受应力场变化的影响,从而使岩石裂纹的几何参数发生变化,介质各向异性广泛存在于地壳和上地幔中已为很多地震学家所承认。利用快剪切波偏振方向的地震学观测,可以快速有效地获得应力特征的信息。近年来,裂隙介质各向性的研究已成为地震学家关注的热点之一,在河北卢龙地区(姚陈等,1992)、唐山地区(高原,冯德益,1995)、海南省东方地区(高原等,1996)、云南大姚(华卫等,2006)、首都圈地区(赖院根等,2006)、首都圈东南部地区(吴晶等,2008)、四川省地区(张永久等,2008)和辽宁岫岩地区(太龄雪等,2008),利用区域数字地震资料开展这方面的研究,取得了一定的成果。

Crampin(1978)提出了EDA,即大范围扩容各向异性(高原,2006)以来,研究者不但从理论上对S波分裂进行研究,而且还进行了大量野外观测及计算机数字模拟,力图证明EDA假说的正确性,也即受应力作用的直立平行排列裂隙系具有各向异性,它可使地震横波发生分裂。引起S波分裂的原因是地壳中存在有效的各向异性介质体,即垂直平行裂隙系,使向上传播的S波中平行于裂隙面的振动分量以快于垂直于裂隙面的振动分量的速度传播。其中一列波的偏振方向(或偏振面)与裂隙面平行,以较快的速度传播,称为快剪切波;另一列波的偏振方向(或偏振面)与裂隙面垂直,以较慢的速度传播,称为慢剪切波。这两列S波在离开各向异性介质后,偏振方向不变,具有这种特性的各向异性介质称为横向各向同性介质。形成这种介质的原因,Crampin等(1978)认为是应力场的作用,水平的或近似水平的主压应力使平行于主压应力的裂隙张裂扩大,垂直主压应力的裂隙封闭缩小,这种按应力方向排列的充液微裂隙和孔隙称为EDA裂隙。地壳中各向异性的直接原因是平行垂直裂隙系中沿平行和垂直裂隙面水平方向传播的波速差异引起的。研究表明,快剪切波的偏振方向与区域的主压应力的方向一致(Crampin,1978;高原等,1995),快剪切波先于慢剪切波到达台站,其到时差称为S波分裂的时间延迟。慢剪切波相对快剪切波的时间延迟反映了介质各向异性的程度,其大小与各向异性介质里裂隙的密度及波在各向异性介质里传播路径的长短有关。EDA裂隙对应力变化反应灵敏,并能在地震孕育区较大范围内监测到EDA裂隙改变所产生的各向异性参数的变化(Crampin,2003,2004)。

自2006年2月4日—2006年10月31日,浙江省区域数字地震台网和珊溪水库台网记录到温州珊溪水库地区发生 M_L 1.0以上地震1137次。其中1—1.9级地震875次,2—2.9级地震217次,3—3.9级地震43次,4—4.9级地震11次,最大地震为 M_L 4.6。目前库区还有余震发生,但强度和频度已趋弱,地震造成了不同程度的经济损失和很大的社会影响。2006年2月4日地震发生后,浙江省地震局短时间内在震中附近增设了4个宽频带、大动态、高采样率数字流动台,加上2003年布设的两个流动台,组成了拥有6个子台的实时传输的库区监测台网,这6个台站全部为基岩台。由于台站与余震区相距较近,获

得了大量高质量的数字地震观测资料。该台网的运行为利用该地区丰富的地震观测资料进行剪切波分裂参数变化特征的研究提供了有利条件。

1 数据资料

由于 S 波分裂研究受限于一定的观测条件, 即至少有两个水平向的高质量数字地震记录, 以及震源必须落在横波窗之内, 即 S 波的入射角要小于临界角。由于台站与余震的距离较近, 此时余震的震源深度对入射角的计算影响很大, 而在日常地震定位中, 震源深度的误差一般是比较大的, 所以可用的资料相对比较少。为了满足 S 波的入射角要小于临界角的条件, 首先要求得到比较准确的震源深度。本文利用石川法定位结果(李金龙等, 2007)(图 1), 表明珊溪水库地震序列震中沿 N57°W 向展布, 倾角约为 67°, 长度约 12 km, 宽度约 2.5 km, 震源深度主要分布在 2—6 km 区域, 地震序列几乎分布在同一条直线上。

在对余震事件进行精确定位的基础上, 挑选出符合条件的地震波进行 S 波分裂研究。其条件是选用 $M_L \geq 2.0$ 、信噪比高、地震波形记录完整, 同时要求选择 P 波波列短、S 波振幅比 P 波振幅大的记录。实际的 S 波分裂研究受到 S 波窗的很大限制, 所谓的 S 波窗是指用来分析的地震震中距限度。根据斯耐尔定律, 当 S 波的入射角满足 $i = \sin^{-1}(v_s/v_p)$ 时, S 波发生全反射, 在临界角之外会产生一个沿表面传播的局部 S-P 转换波, 它看起来好像是 S 波之前的先兆。与此同时, S 波的径向分量减小, 因而在水平面上 S 波似乎成横向偏振。此外, S 波的垂直分量还会被表面作用严重畸化和减小。鉴于这些原因, 临界角常被用来作为距离窗。当 $v_s/v_p = \sqrt{3}$ 时, 则 $i_s = 35^\circ$, 人们将这个范围称为 S 波窗口。本文中采用浙江台网在定位时使用的 4 层的速度模型, 即界面深度为 0.5, 5.3 km 和 26 km 时, 对应的 P 波速度分别为 3.02, 4.52 km/s 和 5.95 km/s, 结合精确的定位结果, 可以计算每次地震到台站的入射角。

对地壳结构认识越精细, 入射角的计算精度就越高。考虑到地震波射线在接近地表时, 传播的速度逐渐降低, 低速层的存在会使入射角减小, 射线传播时的轨迹趋向垂直方向, 地震波速度模型对入射角影响较大, 故实际计算时采用临界角为 40° 的剪切波窗。以此为限制, 确保所用资料满足剪切波窗的要求, 在这个窗内可避免地表 S-P 转换波对剪切波分裂的影响。在 203 次地震事件、6 个台站共 1218 条地震记录中依据上述规则, 有 406 条地震记录被挑选出来分析 S 波分裂现象。

2 S 波分裂计算方法

因为所用地震波形是近震产生的, 其频率主要在 5—10 Hz, 因此首先采用 5 阶 0.8—10 Hz 的巴特沃兹带通滤波器对原始波形进行滤波(图 2b)(华卫等, 2006; Peng, Ben, 2004), 以抑制噪音, 提高数字地震波形的质量。由于剪切波分裂对接收到的波形影响以及

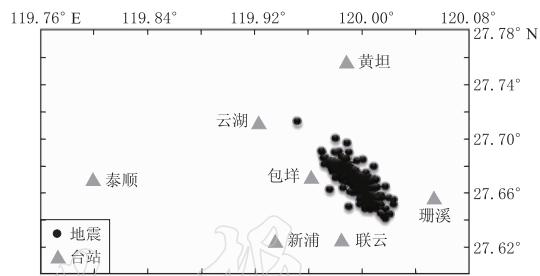


图 1 温州珊溪水库地震序列石川法定位结果。数据来自李金龙等(2007)

Fig. 1 Epicenters of relocated Shandong reservoir induced earthquakes

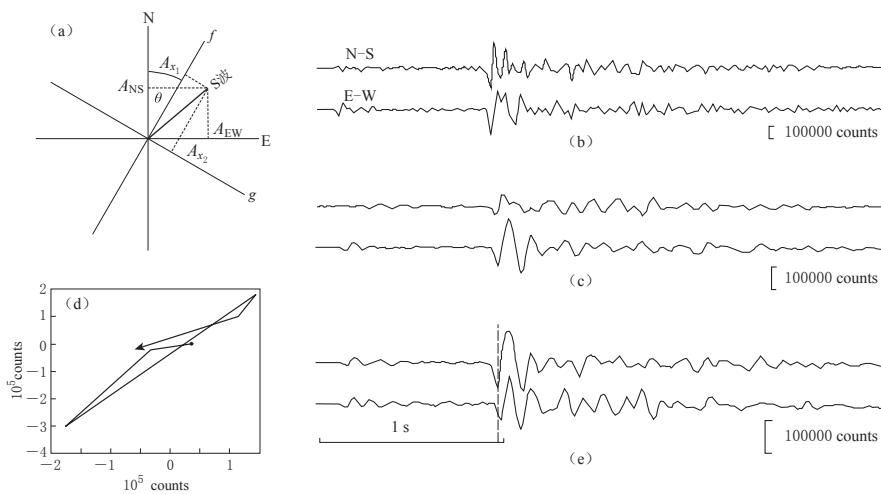


图 2 互相关系数法 S 波分裂算例(包垟台记录的 2006 年 2 月 19 日 11 时 9 分, $M_L 2.6$ 地震)

(a) 波形旋转原理图; (b) 水平向原始地震记录; (c) 经过巴特沃兹带通滤波器(5 阶 0.8—10 Hz)滤波后的波形; (d) 质点运动轨迹图; (e) 两水平向数据交换, 波形旋转后的波形
(快剪切波偏振方向为 52.38°, 时间延迟 0.02 s)

Fig. 2 An example of S-wave splitting derived with cross-correlation coefficient method. Earthquake origin time: 11^h09^m on February 19, 2006, $M_L 2.6$, Baoyang station. (a) Principle of waveform rotation; (b) original horizontal component wave records; (c) after Butterworth band-pass filtering (order 5, 0.8–10 Hz); (d) particle motion trajectory; (e) two horizontal records exchanged, then wave rotated; fast S-wave polarization azimuth is at 52.38° and slow wave time delay is 0.02 s

地震波的能量都主要集中在两水平向的波形上, 故本文利用互相关系数法(Okada *et al*, 1994; 高原等, 1995; 华卫等, 2006; Crampin, Gao, 2006)计算剪切波的分裂参数。首先截取 S 波开始一段波形进行计算, 选取的时间窗大致为一个至一个半周期的剪切波, 将记录的两个水平分量的波形进行旋转, 以北向为起始方向, 顺时针在 0°—180°旋转(图 2a), 步长为 0.01°, 时间延迟从 0—0.2 s 进行选择, 得到两个新波列。由于 E-W 和 N-S 方向数据在旋转 90°时, 数据发生交换, 且不区分正相关和负相关。如果角度小于 90°, 表示 E-W 向比 N-S 向慢, 否则相反。利用遗传算法对两水平向的波形进行计算, 自动选择互相关系数最大时的时间延迟与快剪切波偏振方向。图 2 所示是用互相关系数法处理剪切波分裂的一个例子。旋转后得到的快慢剪切波水平分量 A_{x_1} 和 A_{x_2} 的振幅为

$$\begin{cases} A_{x_1}(t, \theta) = A_{\text{EW}}(t) \sin \theta + A_{\text{NS}}(t) \cos \theta \\ A_{x_2}(t, \theta) = A_{\text{EW}}(t) \cos \theta - A_{\text{NS}}(t) \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中, A_{EW} 和 A_{NS} 分别表示东西向和南北向分量的振幅, θ 为旋转角。在一个确定的时间窗内, 调整时间延迟, 计算 x_1 和 x_2 分量的互相关系数。互相关系数定义为

$$C(\theta, \tau) = \frac{\sum_{t=t_0}^{t_0-t_w} A_{x_1}(t, \theta) A_{x_2}(t+\tau, \theta)}{\left[\sum_{t=t_0}^{t_0+t_w} A_{x_1}^2(t, \theta) \sum_{t=t_0}^{t_0+t_w} A_{x_2}^2(t+\tau, \theta) \right]^{1/2}} \quad (2)$$

式中, t , t_0 , τ , t_w 分别是波的记录时间、剪切波的到时、快慢剪切波到时差和时间窗长度。实际计算时为了保证波形的完整性与计算的准确性, t_0 是东西向与南北向完整波形的开始时间; t_w 是剪切波形窗长度, 是完整波形的结束时间减去开始时间。

由于地震波的采样率为 100 Hz, 时间延迟的最小分辨率是 0.01 s, 故小于 0.01 s 的数据不予采用。不论采用何种处理方法, 最后都经过了质点运动轨迹和人工旋转偏振方向对计算结果进行检查和校正。如果质点运动轨迹近似线性变化, 如图 2d 中表现的那样, 那么这个结果就是令人满意的, 并予以采用。对结果的人工判读比较繁琐但非常重要, 它确保了解的可靠性、稳定性和科学性。本文采用地震记录共计 142 条, 占地震波总记录 11.66%。上述限制条件非常严格, 挑选出用来讨论分析的地震波质量很高, 应该能客观反映地震区上地壳各向异性介质的真实特征。图 2 给出了包垟台记录到的一次地震事件的 S 波分裂的算例。

3 计算结果

3.1 平均偏振方向和时间延迟

由水库台网台站基本参数与剪切波分裂参数(表 1)和快剪切波偏振方向的频度与延时分布图(图 3)可知, 经过上述严格挑选后, 能满足条件的台站和记录并不是很多, 但地震序列的 S 波分裂现象却很明显。由于同一台站接收到的不同事件的快剪切波偏振方向不完全一致, 为进一步统计分析, 分别计算了每个台站的平均快剪切波偏振方向与 R 值。 R 值在 0—1.0 之间。其大小反映了快剪切波偏振方向集中的程度, 越接近 1.0 说明平均快剪切波偏振方向越集中。珊溪、包垟、黄坦、云湖记录到的地震快剪切波偏振方向较集中, 新浦和联云台站记录到的地震快剪切波偏振方向相对来说较分散。

表 1 水库台网台站基本参数与剪切波分裂参数
Table 1 S-wave splitting parameters for stations in reservoir region

台站名称	地震计		采样率 /Hz	事件数	偏振方向 /°	偏振方向标准差 (置信区间 95%) ±	R 值	平均慢剪切波时间 延迟/ms · km ⁻¹
	类型	型号						
包垟	短周期	FSS-3B	100	49	171.99	13.17	0.82	8.66
珊溪	宽带	FBS-3B	100	48	166.27	9.25	0.89	6.04
联云	宽带	BBVS-60	100	16	20.91	24.4	0.80	7.33
云湖	宽带	BBVS-60	100	11	17.81	23.33	0.87	2.63
新浦	短周期	FSS-3B	100	7	172.19	24.14	0.91	3.50
黄坦	短周期	FSS-3B	50	11	37.46	29.42	0.80	2.12

3.2 S 波分裂结果比较

对于本文来说, 珊溪、包垟台分裂结果所得资料比较多, 可用来分析讨论这次地震发生前后水库地区上地壳介质的变化情况。由珊溪台快剪切波偏振方向随时间变化(图 4a)可见, 珊溪台记录到的 2006 年 2 月份地震偏振方向明显较离散, 主震群发生后, 方向比较集中。由珊溪台快剪切波偏振方向空间分布(图 4c, d)可见, 珊溪台、包垟台的快剪切波偏振方向空间分布比较集中, 为近似北南向。从时间延迟方面看, 珊溪台、包垟台的平均快慢剪切波时间延迟相差不大。

4 讨论

在时间延迟方面, 大部分台站的慢剪切波与快剪切波的时间差明显偏小(大部分 $\leqslant 0.06$ s),

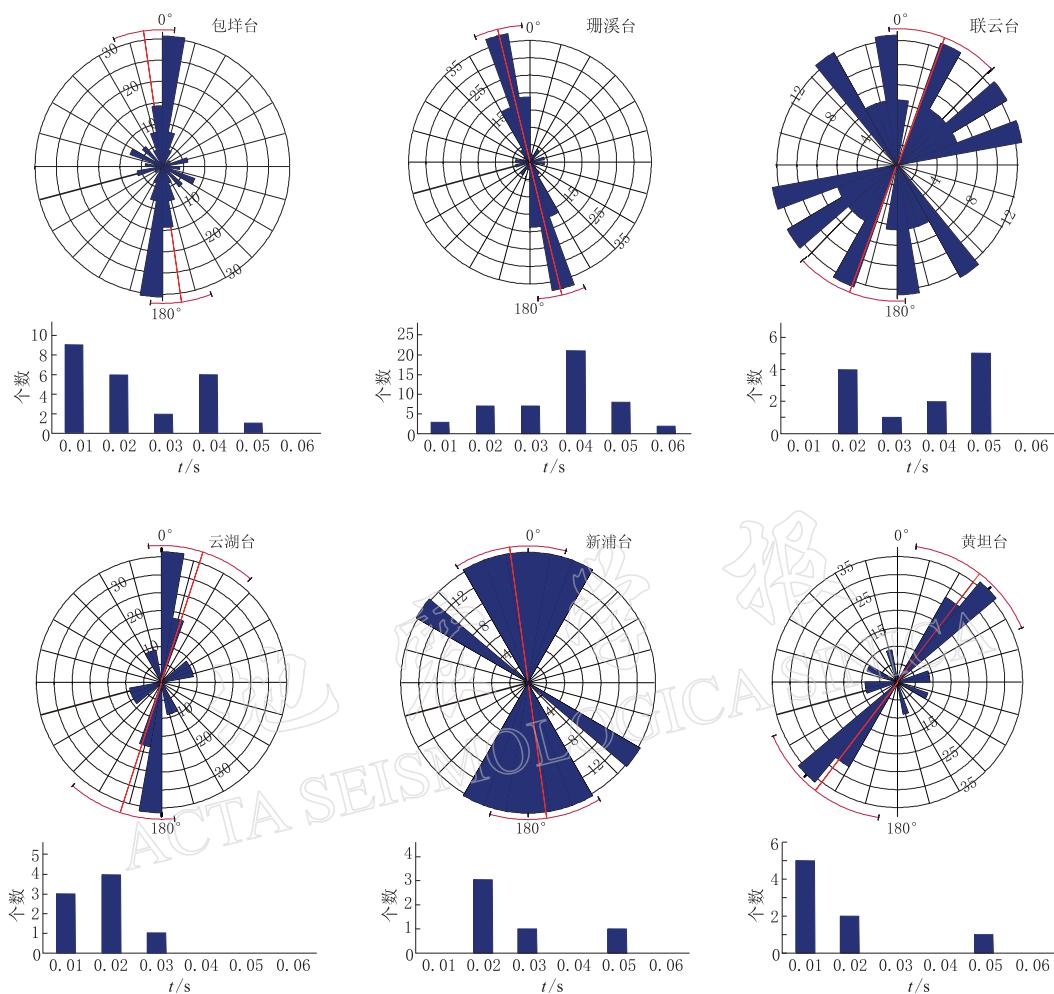


图3 快剪切波偏振方向的频度与时间延迟分布

偏振图中红线表示平均值，偏振方向标准差用弧度表示，线棒的长短按照快剪切波偏振方向的频率大小比例

Fig. 3 Statistics of fast wave polarization azimuth (rose-lobe) and slow wave delay time (histogram)

Red line on circle plot denotes average azimuth, red arc marks azimuth standard deviation

平均慢剪切波时间延迟在 2.12—8.66 ms/km，其变化关系很难确定。S 波分裂研究结果中，快剪切波的偏振方向其实是地震由震源到台站的射线所穿过地区的裂隙排列方向。根据大范围扩容各向异性理论认为，这种裂隙排列的方向是由区域应力场中最大水平主应力方向控制，它们的方向应该是比较一致和稳定的。然而研究也发现，出现了同一个序列不同地点的余震 S 波快剪切波偏振方向不一样的现象。

珊溪台在 2006 年 2 月份主震群地震活跃期表现出偏振方向的离散(图 4a)，表明在库区应力处于调整期，震源区孔隙流体处在高压的状态下。2 月份主震群发生后局部孕震应力场得到了极大的释放，快剪切波偏振方向主要受区域应力场控制，方向趋向集中。分裂横波不仅携带着地震处于相对平静期应力场的信息，而且也携带了地震孕育、发生和发展过程应力场变化的动态信息。强震发生时应力场方向发生偏转的震例已有多次报道(李瑞

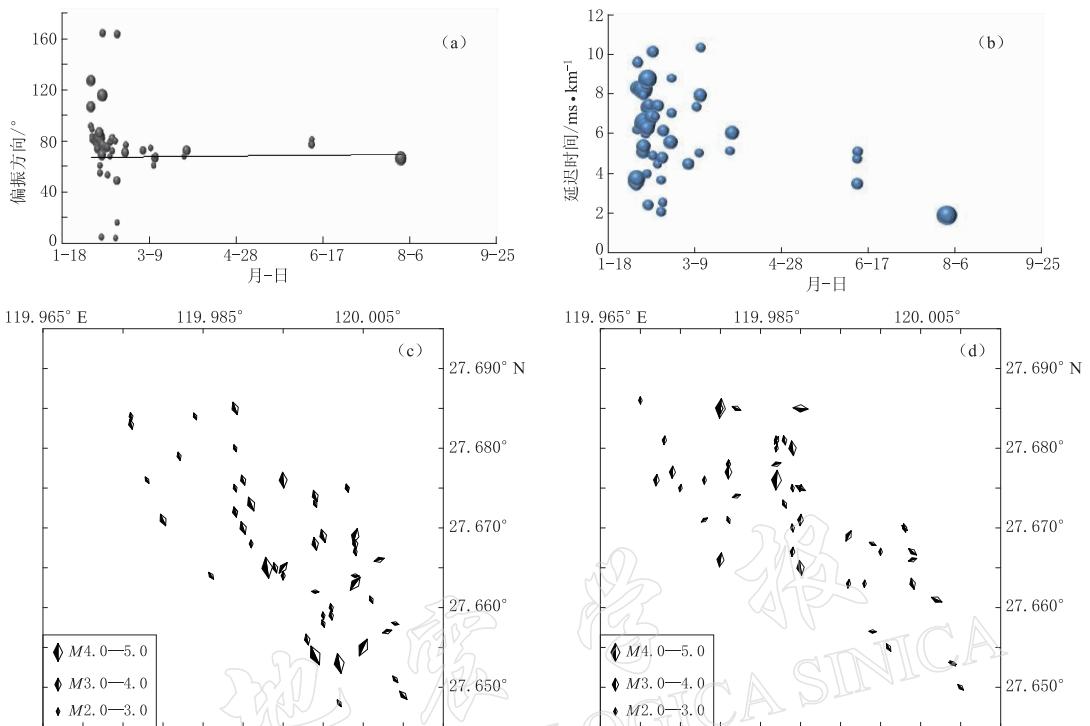


图 4 剪切波分裂结果比较

(a) 2006 年珊溪台快剪切波偏振方向随时间变化, 其大小与地震震级成正比, 实线为利用最小二乘回归分析对相关数据进行拟合的结果; (b) 2006 年珊溪台时间延迟随时间变化; (c) 珊溪台快剪切波偏振方向空间分布; (d) 包垟台快剪切波偏振方向空间分布. 磁针方向代表快剪切波偏振方向, 其长短按照震级大小比例

Fig. 4 S-wave splitting result

(a) Temporal variation of the polarization azimuth obtained from Shanxi station records, dot size proportional to quake magnitude, solid line denotes linear regression fitted result; (b) temporal variation of the delay time from Shanxi station records; (c) spatial variation of the polarization from Shanxi station, needle mark length proportional to quake magnitude; (d) spatial variation of the polarization directions obtained from Baoyang station

莎等, 2008; 付虹等, 2004; 王绍晋, 龙晓帆, 2000), 如果强震发生后回到原先的区域应力场方向, 则后面再次发生强震的可能性就很小, 我们认为可以作为应力预测的一个前兆指标. 基于上述结果认为目前库区应力场稳定, 应力调整已经结束, 未来发生强余震的可能性较小.

4.1 区域应力场的方向讨论

对一个地区中引起地震滑动的平均应力水平进行区域平均, 可作为当地的绝对应力水平的一个间接的估计, 区域应力场的方向往往用该地区震源机制解的主压应力 P 轴的平均方向来近似. 使用 P 波初动符号方法, 计算了 11 个 $M_L \geq 4.0$ 地震的震源机制解. 结果显示, 节面 A 集中分布 $N30^\circ—60^\circ E$, 节面 B 集中分布 $N30^\circ—60^\circ W$, 结合余震分布情况, 推测地震断层面为北西向, 主压应力 P 轴方向的优势取向为近北南向(图 5a), 主张应力 T 轴方向为近东西向, 具有较好的一致性. 把有剪切波偏振结果的 6 个台站数据综合起来显示(图 5b), 温州珊溪水库地区的快剪切波偏振的平均偏振方向在 $N1.86^\circ W \pm 7.94^\circ$, 大致近北南向, 与震源机制解的结果很吻合.

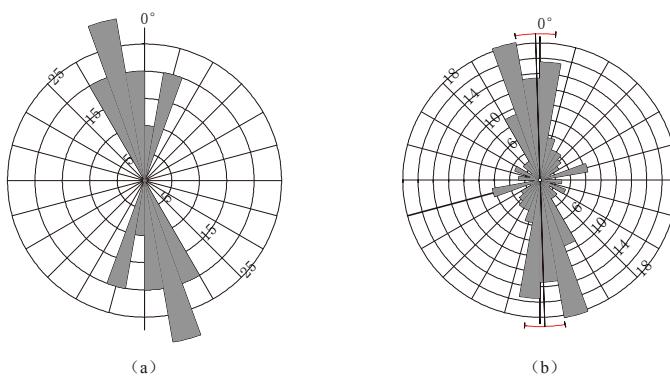


图 5 (a) 2006 年 2—10 月 $M_L \geq 4.0$ 地震震源机制解 P 轴分布; (b) 快剪切波偏振方向频度图(使用了 6 个台站数据)

Fig. 5 (a) Statistics of P -axis azimuth from focal mechanism solutions of $M_L \geq 4.0$ earthquakes;
 (b) statistics of fast S-wave polarization azimuth obtained from all 6 stations

4.2 库区构造背景

库区出露的断裂构造,以北西向和北东向两组构造为主,少量南北向及东西向断裂。根据地质调查及野外采样点样品测年数据显示,地震活动与下洋山—洋滨断裂有关。该断裂走向 $N50^{\circ}W$, 倾向 30° , 倾角 70° , 为一逆冲断层。断层内见有断层泥和构造透镜体, 该断层在库区石台下西南 100 m 处附近出露。在该点附近出露岩层灰色中厚层至厚层状含角砾凝灰岩, 该断层主要沿库区分布。

4.3 快剪切波偏振方向空间差异性讨论

按 EDA 介质假定, 裂隙的排列方向随区域主压应力方向而变, 一个地区裂隙方位的平均值应与该地区应力场最大主压应力方向一致, 而各个局部的裂隙形态则主要与该局部应力的大小和方向有关。区域应力场与局部孕震应力场的相互作用必然会影响 EDA 裂隙的排列, 使得快剪切波偏振方向较为分散, 根据地震台站对于剪切波分裂的反应不同, 推测区域应力场的变化以及台站周围介质的变化可能与它们的相对位置有关。珊溪、包垟台站靠近地震震源, 其偏振方向的变化不明显, 可能是各向异性强度的变化所致; 而联云、新浦、黄坦、云湖等台站有限的数据难以供我们观察其临震期的表现。

复杂的局部构造会控制或影响台站的快剪切波偏振优势方向, 造成与主要活动断裂走向不一致, 或与相邻台站的结果相差较大的现象。在空间分布上快剪切波偏振优势方向与区域最大主压应力场方向基本一致(高原等, 1995), EDA 裂隙通常伴随断层活动产生。研究发现, 一个区域的快剪切波偏振方向分布可能非常复杂, 反映出主压应力场、地质构造上的复杂特征(高原等, 1995; 赖院根等, 2006)。对于活动断裂上(或附近)的台站而言, 其快剪切波偏振优势方向与断层走向较为一致(Peng, Ben, 2004; 石玉涛等, 2006; 吴晶等, 2008; 张永久等, 2008)。在地质结构比较复杂的区域, 如不同走向断层的交汇处, 台站的快剪切波偏振方向具有一定的离散性。各向异性的复杂性反映了地震和区域构造的局部信息, 对于理解水库地区的实际局部构造和局部应力分布等特征非常有益。

水库地区地质构造和断裂较复杂, 剪切波偏振方向随空间变化的现象说明, 这一地区的地壳介质各向异性来源于多种结构和机制, 断层附近地区目前的应力场是由应力场叠加

共同作用的结果。Iidaka(2003)在分析日本西南部后续震相剪切波分裂时,认为线性构造可能是剪切波分裂的原因。根据温州珊溪水库地区快剪切波偏振优势方向在水利部华东勘测设计研究院编制的库区工程地质图上投影(图 6),进行应力场特征研究和地震断层性质判断时,发现北南向存在的 EDA 裂隙与贯穿库区地质线状构造(箭头所示断层)的方向较一致,认为该线性构造可能是剪切波分裂的主要原因。

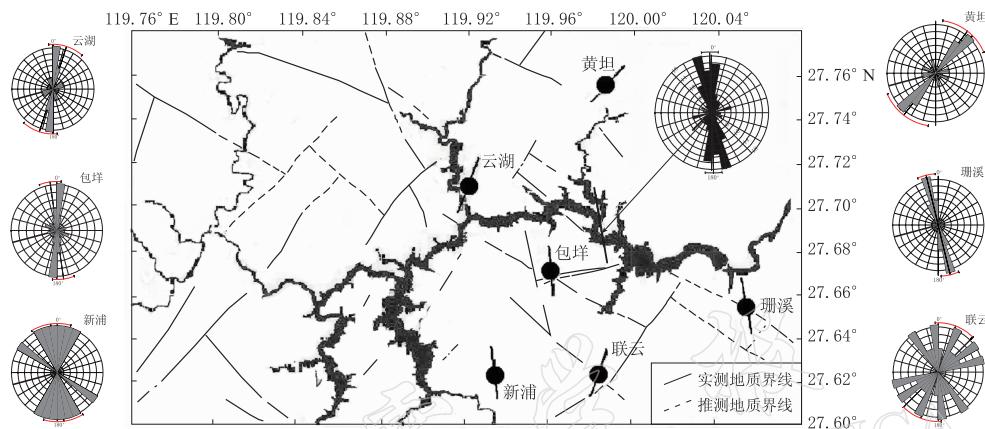


图 6 温州珊溪水库地区快剪切波偏振优势方向在地质图上的投影(线棒方向代表平均偏振方向)

Fig. 6 Fast S-wave polarization azimuths plotted on geological map of the Shanxi reservoir region.

Line bar denotes average polarization direction at respective station

5 结论

本研究的初步结果表明,温州珊溪水库地区地震序列的 S 波分裂现象比较明显,珊溪、包垟台在地震活跃期所表现出来的偏振方向离散的发生,反映出临震状态下震源区孔隙流体处于高压活动的状态,做应力调整,可作为应力预测的一个重要的指标。基于珊溪台的结果认为目前库区应力场稳定,应力调整已经结束,未来发生强余震的可能性较小;大部分台站记录到的地震的快剪切波偏振方向比较一致,平均偏振方向在 $N1.86^{\circ}W \pm 7.94^{\circ}$ 之间,结合震源机制解结果,认为该区域的水平主压应力方向为近北南向;S 波分裂快剪切波偏振方向所表现出的离散和空间差异性,认为可能是由于局部构造影响所致。

水库地震一般持续时间长,震源浅,烈度大,社会影响要比一般同级别天然地震大。需要指出的是,在我们所处理的地震序列资料中,地震台站珊溪、包垟有较为显著的剪切波分裂现象,非常适合开展近场源剪切波分裂研究。珊溪水库地震序列剪切波分裂参数随时间、空间的变化,反映了区域应力场的动态变化,其结果有助于了解水库地区介质各向异性构造活动特征,分析地壳介质属性及其动力学特征。

感谢郑斯华、刘杰、高原教授给予的帮助。

参 考 文 献

- 付虹,王绍晋,王赟赟,黄毓珍,龙晓帆. 2004. 1999 年至 2001 年云南几次中强震前应力场方向动态变化及其预测意义 [J]. 地震研究, 27(21): 6–11.
高原, 冯德益. 1995. 唐山地区近震 S 波分裂的观测与研究 [J]. 地震, (3): 208–213.

- 高原, 郑斯华, 孙勇. 1995. 唐山地区地壳裂隙各向异性[J]. 地震学报, **17**(3): 283-293.
- 高原, 郑斯华, 王培德. 1996. 海南省东方地区 1992 年小震群剪切波分裂研究[J]. 地球物理学报, **39**(2): 221-232.
- 高原. 2006. 利用剪切波分裂研究地壳介质各向异性[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), **29**(3): 205-211.
- 华卫, 刘杰, 陈章立, 郑斯华. 2006. 2003 年云南大姚 6.2 级、6.1 级地震序列 S 波分裂研究[J]. 地震学报, **28**(4): 357-371.
- 赖院根, 刘启元, 陈九辉, 刘洁, 李顺成, 郭飚, 黄志斌. 2006. 首都圈地区横波分裂与地壳应力场特征[J]. 地球物理学报, **49**(1): 189-196.
- 李金龙, 邹振轩, 张震峰. 2007. 珊溪水库震群的地震定位[J]. 地震地磁观测与研究, **28**(1): 14-18.
- 李瑞莎, 崔效锋, 刁桂苓, 张红艳. 2008. 华北北部地区现今应力场时空变化特征研究[J]. 地震学报, **30**(6): 21-26.
- 石玉涛, 高原, 吴晶, 程万正. 2006. 云南地区地壳介质各向异性: 快剪切波偏振特性[J]. 地震学报, **28**(6): 574-585.
- 太龄雪, 高原, 曹凤娟, 吴晶, 石玉涛, 焦明若. 2008. 辽宁 1999 年 $M_{S}5.9$ 岫岩地震的剪切波分裂特征[J]. 地震学报, **30**(4): 340-354.
- 王绍晋, 龙晓帆. 2000. 武定 6.5 级地震前后环境剪应力场动态变化[J]. 地震研究, **23**(3): 8-13.
- 吴晶, 高原, 陈运泰. 2008. 首都圈东南部地区地壳介质各向异性[J]. 地震学报, **30**(1): 1-11.
- 姚陈, 王培德, 陈运泰. 1992. 卢龙地区 S 波偏振与上地壳裂隙各向异性[J]. 地球物理学报, **35**(3): 305-315.
- 张永久, 高原, 石玉涛, 程万正. 2008. 四川地区地震台网的剪切波分裂研究[J]. 地震学报, **30**(2): 123-134.
- Crampin S. 1978. Seismic wave propagation through a cracked solid: Polarization as possible dilatancy diagnostic[J]. *Geophys J R astr Soc*, **53**(3): 467-496.
- Crampin S, Chastin S. 2003. A review of shear wave splitting in the crack-critical crust[J]. *Geophys J Int*, **155**(1): 221-240.
- Crampin S, Volti T. 2004. A successfully stress forecast earthquake[J]. *Geophys J Int*, **157**(2): 578-582.
- Crampin S, Gao Y. 2006. A review of techniques for measuring seismic shear-wave splitting above small earthquakes[J]. *Phys Earth Planet Interi*, **159**(1/2): 1-14.
- Iidaka T. 2003. Shear-wave splitting analysis of later phases in southwest Japan-a lineament structure detector inside the crust[J]. *Earth Planets Space*, **55**(5): 277-282.
- Okada T, Matsuzawa T, Matsumoto S, Nida K, Ito A, Hasegawa A. 1994. Shear wave splitting observed in the southwestern part of Fukushi-ma prefecture, northeastern Japan[J]. *J Phys Earth*, **42**(4): 303-319.
- Peng Z, Ben Zion Y. 2004. Systematic analysis of crustal anisotropy along the Karadere-Duzce branch of the North Anatolian fault[J]. *Geophys J Int*, **159**(1): 253-274.