

李欣波, 吴鹏, 杨凡, 等. 河南小浪底水库库区地震剪切波分裂研究 [J]. 华北地震科学, 2021, 39(1): 42-48. doi:10.3969/j.issn.1003-1375.2021.01.006.

LI Xinbo, WU Peng, YANG Fan, et al. Seismic Shear-wave Splitting of Henan Xiaolangdi Reservoir Region[J]. North China Earthquake Sciences, 2021, 39(1): 42-48. doi:10.3969/j.issn.1003-1375.2021.01.006.

河南小浪底水库库区地震剪切波分裂研究

李欣波¹, 吴 鹏¹, 杨 凡², 贾 华¹, 赵长红¹

(1. 河北省地震局邯郸中心台, 河北 邯郸 056001; 2. 河北省地震局, 石家庄 050021)

摘要: 采用河南小浪底水库数字地震台网 2009—2016 年的地震观测资料, 结合双差重定位结果, 利用剪切波分裂系统分析方法, 获得了小浪底水库库区 8 个数字地震台站的剪切波分裂参数。研究表明, 小浪底库区地震主要分布在库区中段的石井河断层附近, 呈团状散布; 该区域的剪切波快波平均偏振方向为 $100.4^{\circ} \pm 45.0^{\circ}$, 慢波平均时间延迟为 $(2.87 \pm 1.13) \text{ms} \cdot \text{km}^{-1}$; 研究区快波偏振方向与华南地块主压应力场方向一致性较好, 区域内多数台站快波偏振方向与附近断层走向平行, 慢波时间延迟与华北地块的研究结果相当。

关键词: 小浪底水库; 地壳各向异性; 剪切波分裂; 快剪切波偏振方向

中图分类号: P315.31 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-1375 (2021) 01-0042-07

doi:10.3969/j.issn.1003-1375.2021.01.006

0 引言

地震各向异性研究是地震学中一个重要的研究领域。20 世纪 70 年代, Crampin 发现地壳剪切波分裂现象, 提出了张性扩容各向异性(EDA)理论^[1-2]。不断发展的地震观测技术, 特别是高分辨率数字地震仪的广泛使用, 为剪切波分裂研究提供了技术保障。近年来, 剪切波分裂方法被广泛应用于全球不同构造区的地壳各向异性研究^[3-6]。

剪切波在传播过程中, 穿过各向异性介质, 导致剪切波的传播速度和偏振特性发生变化, 分裂为快剪切波和慢剪切波, 简称快波和慢波^[7]。快波偏振方向可用于研究地壳应力场特征^[8-9], 而慢波时间延迟则反映了介质各向异性的强弱和区域应力环境的变化^[10]。受到不同的地质构造、断裂分布和应力环境等影响, 在上地壳会产生不同方向、尺度不一的 EDA 微裂隙, 微裂隙的定向排列导致了上地壳地震各向异性。因此, 剪切波分裂特性对地壳应力变化引起的岩石裂隙变化反映灵敏。

小浪底水利枢纽位于河南省孟津县境内, 是国内大型综合性水利工程, 是黄河中游最后一段峡谷的出口处。水库总库容 126.5 亿 m^3 , 坝顶高程 281 m,

水库正常蓄水位 275 m, 库水面积 272 m^2 , 调水调沙库容 10.5 亿 m^3 , 淤沙库容 75.5 亿 m^3 , 长期有效库容 51.0 亿 m^3 。水库呈东西带状, 长约 130 km, 上段较窄, 下段较宽, 平均宽度 2 km, 属峡谷河道型水库。

对于水库库区的地壳各向异性研究, 前人做了大量工作。史海霞等^[11]采用传统的相关系数法和偏振分析法, 对广西龙滩库区地震剪切波分裂特征进行了系统研究; 邹振轩等^[12]利用互相关系数法, 借助遗传算法与人工判读相结合, 测量了温州珊溪水库地震序列的快剪切波偏振方向和快慢剪切波的时间延迟; 张永久等^[13]采用剪切波分裂 SAM 系统分析方法获得了四川紫坪铺水库库区的剪切波分裂参数, 探讨了快剪切波偏振方向与区域应力场以及龙门山断裂带的关系; 邵玉平等^[14]计算得到了四川锦屏水库地区地壳剪切波分裂参数, 分析了其地壳各向异性特征, 讨论了水库蓄水对剪切波分裂特征的影响。本研究利用小浪底水库数字地震台网记录的资料开展地壳各向异性研究, 对于了解小浪底库区应力状态、潜在的地震危险性具有重要意义。

1 构造背景

小浪底水库库区处于秦岭大别造山带以北, 太

收稿日期: 2020-05-14

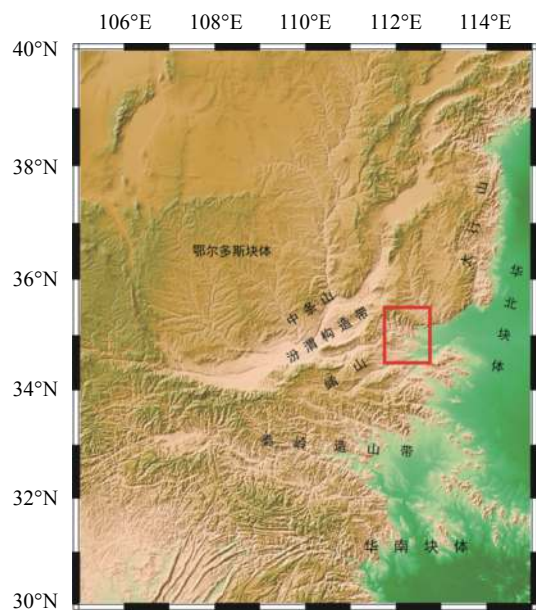
基金项目: 2017 年河北省地震科技星火计划项目(DZ20170509038)

第一作者简介: 李欣波(1964—), 男, 河北邯郸人, 高级工程师, 主要从事地震观测、仪器运维等工作。

E-mail: 13011547355@126.com



行山东南的弧形部位(图1)。研究区北起中条山、王屋山南麓,南抵崤山东北余支北坡,西接汾渭盆地,东临华北平原。区内构造可分为形成于燕山期的近EW向构造、NW向构造和喜山期形成的NE向构造。区域地质构造主要受豫皖断块西北的汾渭断陷带、太行断块与冀鲁断块交界的太行山山前断裂带控制^[15]。



注:红色方框表示研究区域

图1 研究区域构造背景

小浪底水库库坝区及周边展布多条第四纪活动断层(图2),其中城崖地断层、塔底断层和石井河断层是库区较重要的3条大断层。其他小断层与这3条断层力学作用机制一致,属于次一级断层,如盘古寺断层、封门口-五指岭断层、连地断层、坡头断层、小南庄断层、王良断层和霍村断层等。

城崖地断层走向 315° 左右,倾角 $65^{\circ}\sim 75^{\circ}$,倾向NE,为左旋扭动的压扭性正断层。在新安,该断层为中低山与山前平原的分界线;在伊洛盆地,断层两侧上下第三系及第四系的厚度有明显差异。塔底断层形成于燕山期,是垣曲断拗盆地的南侧边缘断层,走向 295° 、倾向N、倾角 70° ,为左旋扭动的平移正断层,控制了垣曲断拗盆地的南部地区。石井河断层总体走向 285° 、倾向N、倾角大于 60° ,在库坝区内由西向东直抵坝址区右岸。该断层为燕山期早期产物,总体特征是南盘上升,北盘下降的正断层^[16]。

2 资料选取与计算方法

小浪底数字地震台网共有8个台站(图2),架设

北京港震机电公司生产的地震仪。其中,6个台站架设FSS-3M短周期地震仪,2个台站架设BBVS-60宽频带地震仪,采样率为100sps(样本/秒)。本研究选取小浪底数字地震台网2009—2016年记录的 $M_L 1.0$ 以上的地震事件波形,采用双差定位方法重新定位并分析重定位事件,根据每个台站的数据记录状况进行讨论。

2.1 地震重定位

开展剪切波分裂计算过程中,地震事件的定位精度对剪切波分裂参数的计算结果影响较大,主要体现在以下两方面:①会影响剪切波窗口内数据的挑选;②时间延迟的变化更易受到震源与台站相对位置、外部环境等的影响^[17]。地震定位的精度问题是地震学领域始终关注和研究的基本问题,地震学家通过不断地改进定位方法来提高地震定位的精度。目前,对于震源重新精定位的双差定位法是相对较为准确的一种定位方法^[18]。通过“双差”定位可以将速度模型带来的定位误差减小到最低。双差定位法比主事件法的使用范围更大,其避免了主事件的误差传递到其他待定事件中。

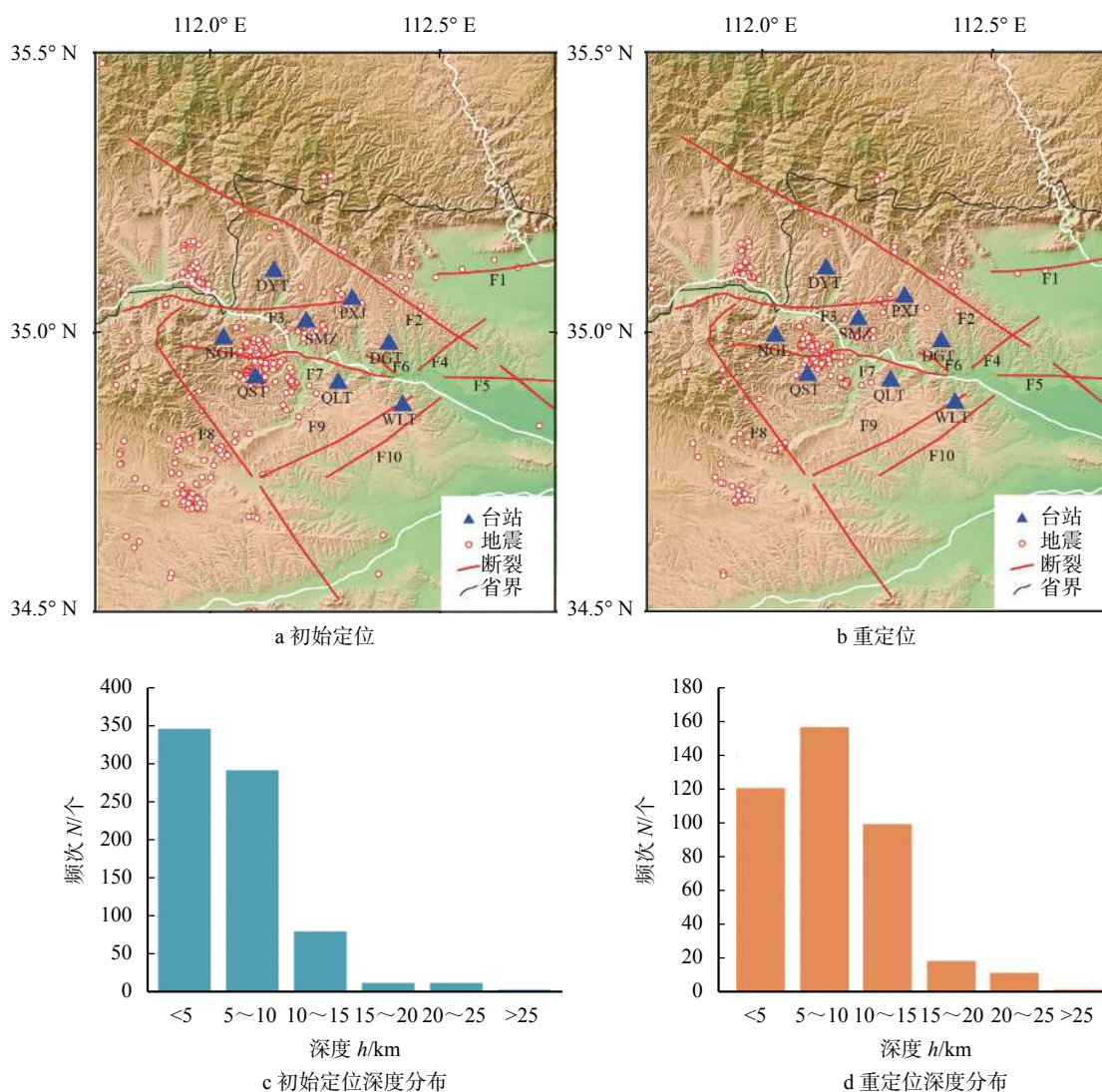
利用双差定位法对研究区域内 $M_L \geq 1.0$ 的744次地震事件进行重新定位后,得到了540个地震定位结果(图2)。重定位后的均方根残差平均值为0.085s,震源位置的估算误差EW方向平均为0.2km,NS方向平均为0.3km,垂直方向平均为0.3km。从空间分布看,小浪底库区地震主要分布在库区中段的石井河断层附近,呈团状散布。研究区的地震主要发生在15km以内,其中第一优势分布在5~10km范围,次优势分布为0~5km,表明研究区内发生的地震主要以浅源地震为主。

2.2 剪切波分裂方法

剪切波入射到自由表面,当入射角大于临界角度时,会发生全反射现象,这时观测到的剪切波波形会发生畸变。因此,发生全反射的临界角度就是剪切波窗口的限定范围。对于泊松介质,其剪切波窗口为 35° ,考虑到弯曲的波前和低速的地壳表面沉积等影响,剪切波窗口可以有效增大到 $45^{\circ}\sim 50^{\circ}$ ^[19]。

本文采用高原等^[20]提出的剪切波分裂系统分析方法(即SAM方法)对研究区进行剪切波分裂参数的计算。SAM分析方法包括相关函数计算、时间延迟校正和偏振分析检验3部分,能够实现自检,提高结果的准确性。

在利用SAM方法进行剪切波分裂参数计算时,设置剪切波窗口为 45° ,挑选研究区域各台站记



注: F1 盘古寺断层; F2 封门口-五指岭断层; F3 塔底断层; F4 连地断层; F5 坡头断层; F6 小南庄断层; F7 石井河断层; F8 城崖地断层; F9 王良断层; F10 霍村断层; 白色线段表示河流。

图2 研究区地震事件定位及深度分布图

录到的剪切波窗口内的、震相清晰的地震事件波形 218 条, 计算得到 8 个台站的剪切波分裂参数。图 3~5 是利用 SAM 方法进行剪切波分裂分析的实例, 其中图 3 为乔岭地震台 (QLT) 2015 年 7 月 17 日 15 时 27 分 59 秒记录的滤波后的地震波形图, 震级 $M_L 1.4$, 震源深度 18 km, 滤波频率范围 1~10 Hz。地震发生后产生的剪切波在通过各向异性介质时分裂成两列新波列 (快波和慢波), 快波到达后、慢波到达前, 剪切波质点运动轨迹的方向与正北方向成夹角 α , 这一角度就是快波的偏振方向。慢波到达后, 叠加到快波上, 质点的运动轨迹就会发生变化。图 4 显示了水平方向剪切波的质点运动轨迹 (偏振图)。将 2 个分量的剪切波同时旋转 α 角度可以实现快、慢剪切波的分离。理论上, 快、慢剪切波来自于同一震源的同一列剪切波, 消除时间延迟

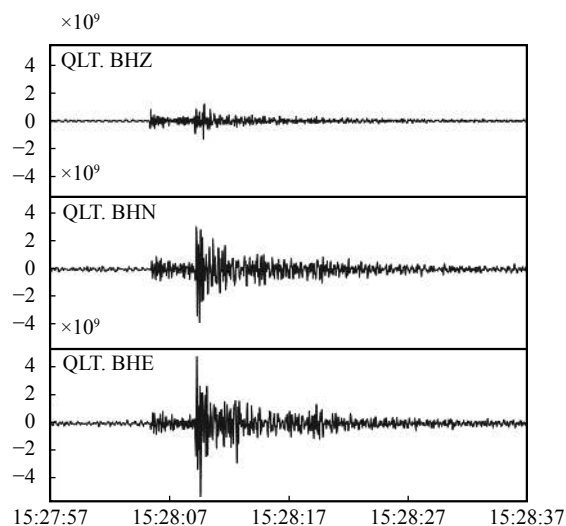
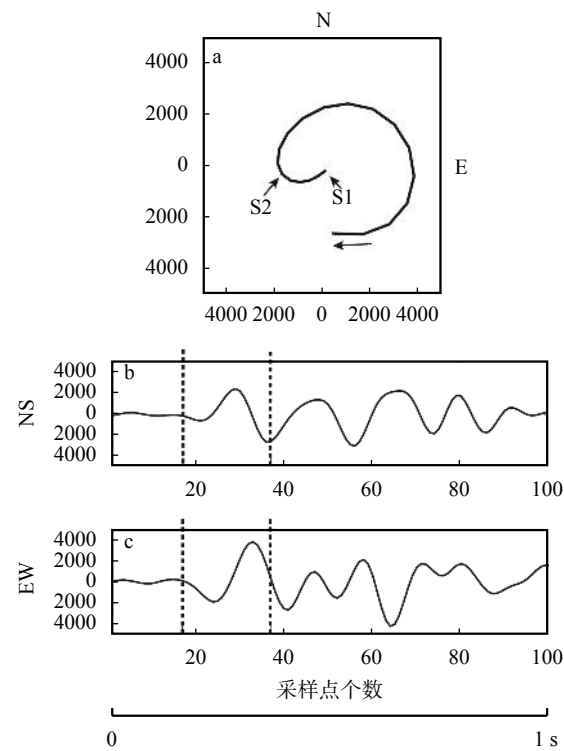


图3 乔岭地震台 2015 年 7 月 17 日地震记录图



注: S1、S2 分别表示快、慢剪切波振动起始位置; 箭头表示质点运动轨迹方向, 剪切波质点运动轨迹; 虚线表示偏振图中显示的剪切波波形范围; NS、EW 分别代表南北、东西向分量的剪切波波形。

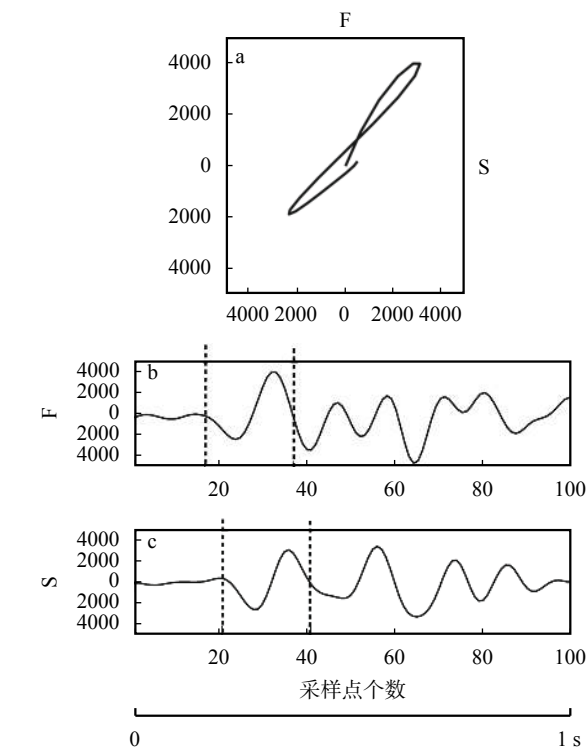
图 4 水平方向剪切波的质点运动速度轨迹(偏振图)

后, 质点的运动轨迹应具有线性相关。图 5 显示, 经过时间延迟校正后, 2 个分量的剪切波质点运动轨迹线性度很高, 证明了分析结果的可靠性。

3 快剪切波偏振方向

表 1 为研究区域内 6 个台站基本参数与剪切波分裂参数, 图 6 为研究区域所有台站快剪切波偏振方向等面积投影玫瑰图。综合各台站的剪切波分裂结果, 得到小浪底库区内快剪切波平均偏振方向为 $100.4^{\circ} \pm 45.0^{\circ}$, 慢剪切波平均时间延迟为 $2.87 \pm 1.13 \text{ ms} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

研究得到了小浪底库区 6 个台站的快剪切波偏振方向(图 7), 当腰台(DYT)、上孟庄台(SMZ)、



注: 快剪切波(F)和慢剪切波(S)的质点运动轨迹图, 已经消除了时间延迟的影响; F、S 分别是快、慢剪切波波形; 虚线显示偏振图中显示的剪切波波形范围, 把慢剪切波提前一个时间延迟的量, 这样在偏振图中就扣除了时间延迟的影响。

图 5 偏振分析检验

南关郎台(NGL)、青石台(QST)等 4 个台站的快剪切波优势偏振方向一致性较好, 为 NWW 向或近 EW 向; 螃蟹脚台(PXJ)的快剪切波优势偏振方向为 NE 向; 乔岭台(QLT)的快剪切波优势方向为近 NS 向。

4 讨论

4.1 快剪切波偏振方向

研究表明, 快波偏振的优势方向与区域最大主压应力方向一致, 而位于活动断裂上的台站, 其快波偏振优势方向与断层走向一致^[22]。在构造复杂的区域, 如不同走向断层的交汇处, 快波偏振方向会表现出一定的离散性^[23]。综合各台站的剪切波分裂

表 1 小浪底库区 8 个台站基本参数与剪切波分裂参数

台站名称	台站代码	经度/(°E)	纬度/(°N)	记录条数	快剪切波偏振 方向/(°)	偏振方向标准 差/(°)	慢剪切波时间 延迟/(ms/km)	时间延迟标准 差/(ms/km)
当腰台	DYT	112.14	35.11	21	104.3	±39.9	3.09	±1.26
上孟庄	SMZ	112.21	35.02	42	92.9	±39.1	4.18	±2.78
螃蟹脚	PXJ	112.31	35.06	19	37.1	±23.1	3.73	±2.36
南关郎	NGL	112.03	34.99	43	101.6	±39.8	2.67	±1.87
青石台	QST	112.10	34.92	59	101.0	±38.0	2.63	±3.25
乔岭台	QLT	112.28	34.91	15	178.7	±47.0	0.92	±0.52

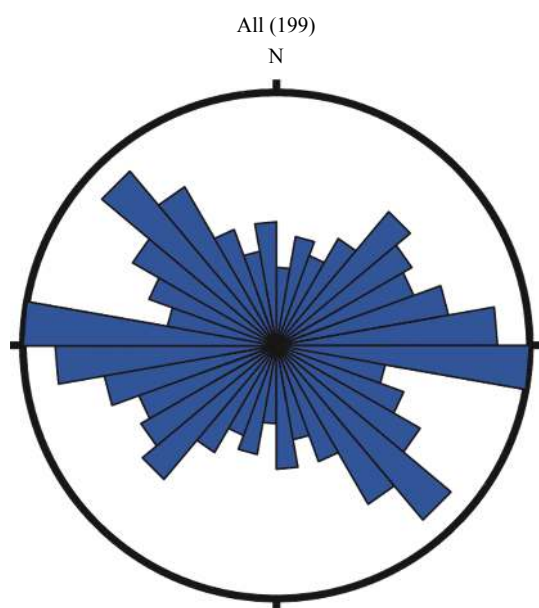
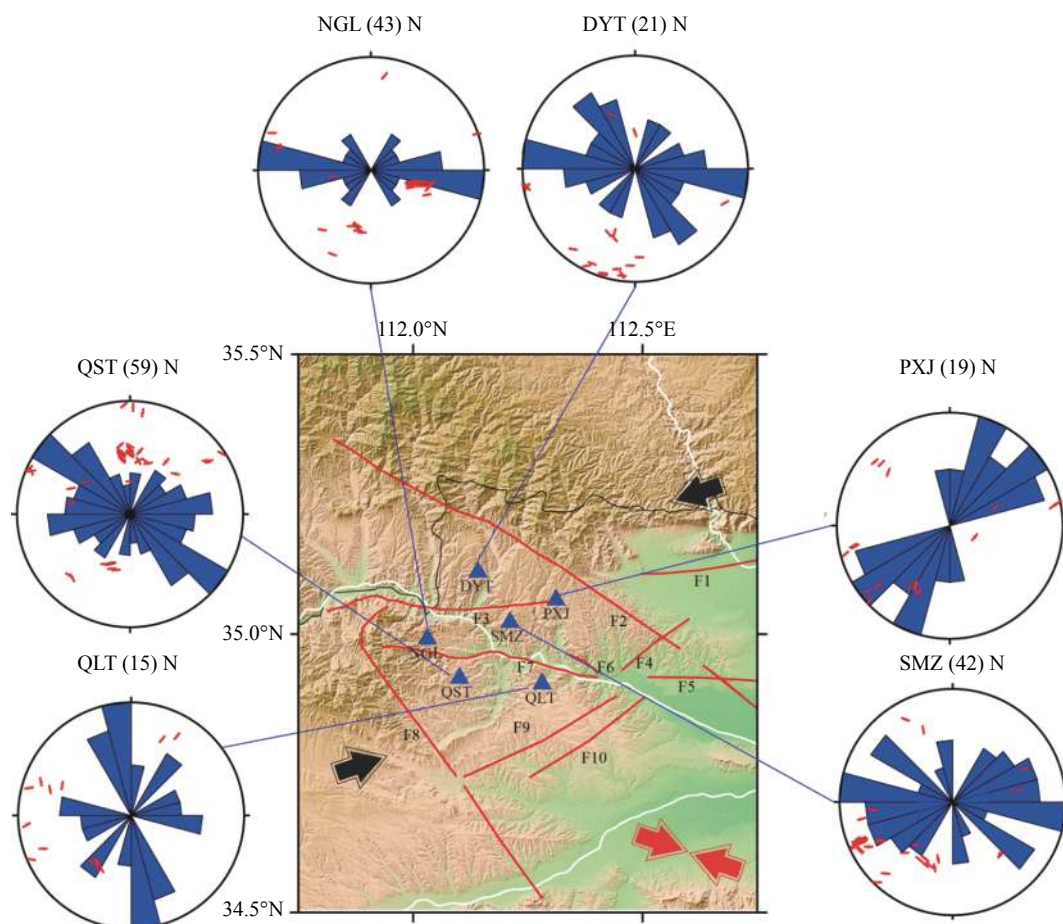


图6 快剪切波偏振方向下半球等面积投影玫瑰图

参数,小浪底库区快剪切波平均偏振方向为 $100.4^{\circ} \pm 45.0^{\circ}$,与华北地区最大主压应力方向成锐角相交,与刘庚等^[24]得到的秦岭微地块的地壳各向异性结果一致,同时与华南地块的最大主压应力方向一致^[25]。

图1显示,研究区域位于华北地块与华南地块的交汇区域,南临秦岭造山带,西接渭河盆地。推测研究区受到的应力场控制作用主要来自于秦岭造山带及华南地块。

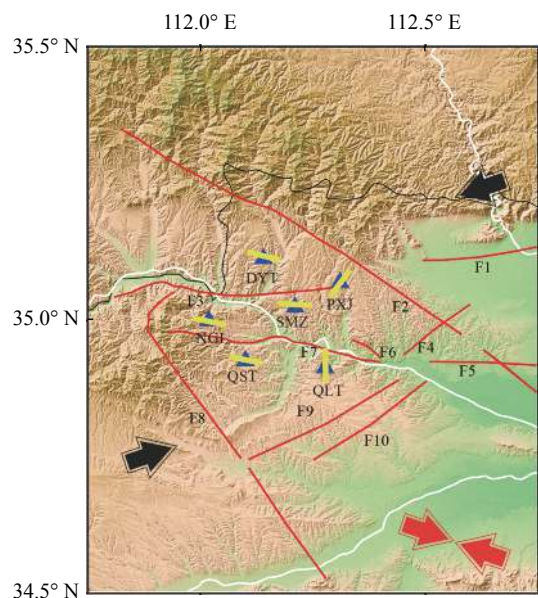
当腰台(DYT)位于塔底断层的北侧,其快波偏振方向较离散,但仍能看出其优势方向为NW向。上孟庄(SMZ)和南关郎(NGL)均位于塔底断层的南侧、石井河断层的北侧,这2个台的快波偏振方向为近EW向。青石(QST)位于石井河断层的南侧,快剪切波优势偏振方向也为NW向。以上4个台站的快剪切波优势偏振方向与区域主压应力方向不一致,但与台站附近塔底断层、石井河断层的走向基本一致,表明其快波方向受区域应力场作用较弱,地震各向异性主要来自台站附近的构造断裂。螃蟹脚台(PXJ)位于塔底断层东端,快剪切波优势偏振方向为NE向,与华北地区最大主压应力方向基本一致。资料显示,塔底断层以剪切滑移为主,分析认为螃蟹脚台位于断层顶端,断层有可能对其控制作用较弱,而主要受区域应力场作用,因此其与前面提到的4个台站结果差别较大。乔岭台



注:黑色箭头表示华北地区主应力场方向^[21];红色箭头表示华南地块主压应力场方向;台站代码后面括号中的数字表示参与分析的地震事件次数;其他含义同图2。

图7 小浪底库区各台站快剪切波偏振方向等面积投影玫瑰图

(QLT)的结果比较离散,但从图8中可以看出其快剪切波优势偏振方向为近NS向,与区域主压应力方向、断层走向均不一致,推断可能是快波偏振受到区域应力场、断裂和地形的多重影响,导致偏振方向比较离散。



注:黑色箭头表示华北地区主应力场方向,红色箭头表示华南地块主压应力场方向;黄色短线为台站有效记录的快剪切波优势偏振方向;其他含义同图2。

图8 快剪切波优势偏振方向图。

研究区域快剪切波偏振方向与华南地块主压应力场方向一致性较好,与秦岭造山带走向一致。受到区域构造背景应力环境的作用,局部地区受构造、地形等制约,导致了局部的复杂分布结果。另外,可能由于在水库库区,地壳内定向排列的微裂隙充满液体后,定向排列的优势方向不明显导致地壳各向异性结果离散。

4.2 慢剪切波时间延迟

慢波的时间延迟反映了地壳介质各向异性的程度,它是震源到台站剪切波传播路径的累积效应。由于每个地震具有不同的震中距,为了统一描述介质各向异性程度,同时也方便比较,把时间延迟归一化,即计算单位射线长度上的时间延迟(单

位为 $\text{ms} \cdot \text{km}^{-1}$)。

由表1可知,研究区域慢剪切波的平均延迟时间为 $2.87 \pm 1.13 \text{ ms} \cdot \text{km}^{-1}$,其中最大的是上孟庄台,时间延迟为 $4.18 \pm 2.78 \text{ ms} \cdot \text{km}^{-1}$;最小的是乔岭台,时间延迟为 $0.92 \pm 0.52 \text{ ms} \cdot \text{km}^{-1}$ 。吴鹏等^[26]、吴晶等^[27]得到的华北地块南部不同区域的慢波时间延迟结果相当。张永久等^[13]计算出四川紫坪铺水库库区慢波平均时间延迟为 $3.92 \pm 2.72 \text{ ms} \cdot \text{km}^{-1}$;邹振轩等^[12]得到温州珊溪水库库区各台站平均慢剪切波时间延迟在 $2.12 \sim 8.66 \text{ ms} \cdot \text{km}^{-1}$ 之间,与本文得到的小浪底库区慢波时间延迟明显偏大,反映了小浪底库区地壳各向异性要弱于温州珊溪水库和四川紫坪铺水库,这有可能是地理环境和构造背景的影响导致。

5 结论

本文使用小浪底水库地震台网的资料,对小浪底库区2009—2016年的地震事件进行了双差重定位,采用SAM方法计算并初步得到小浪底库区各台站的剪切波分裂参数。

1)利用双差定位法对研究区域内 $M_L \geq 1.0$ 的744次地震事件进行重新定位后,得到了540个地震定位结果。从空间分布看,小浪底库区地震主要分布在库区中段的石井河断层附近,呈团状散布。重定位后,均方根残差平均值为0.085 s,震源位置的估算误差EW方向平均为0.2 km、NS方向平均为0.3 km、垂直方向平均为0.3 km,震源深度优势分布为5~10 km。

2)得到了小浪底库区剪切波分裂参数的空间分布特征。小浪底库区内快剪切波平均偏振方向为 $100.4^\circ \pm 45.0^\circ$,慢剪切波平均时间延迟为 $2.87 \pm 1.13 \text{ ms} \cdot \text{km}^{-1}$ 。研究区快波方向与秦岭造山带走向一致,与华南地块主压应力场方向一致。慢波时间延迟与华北地区其他区域的结果相当,但与四川紫坪铺水库、温州珊溪水库的结果相差较大,可能是地理环境和构造背景所导致。

参考文献:

- [1] Crampin S. A review of the effects of anisotropic layering on the propagation of seismic waves[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1977, 49(1): 9-27.
- [2] Crampin S. Seismic-wave propagation through a cracked solid: polarization as a possible dilatancy diagnostic[J]. *Geophysical Journal International*, 1978, 53(3): 467-496.
- [3] Crampin S, Evans R, Üçer S B. Analysis of records of local earthquakes: the Turkish Dilatancy Projects(TDP1 and TDP2)[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1985, 83(1): 1-16.
- [4] 吴晶,高原,陈运泰,等.首都圈西北部地区地壳介质地震各向异性特征初步研究[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(1): 209-220.

- [5] Gao Y, Shi Y T, Wu J, et al. Shear-wave splitting in the crust: Regional compressive stress from polarizations of fast shear-wave[J]. *Earthquake Science*, 2012, 25(1): 35-45.
- [6] 太龄雪, 高原, 刘庚, 等. 利用中国地震科学台阵研究青藏高原东南缘地壳各向异性: 第一期观测资料的剪切波分裂特征 [J]. *地球物理学报*, 2015, 58(11): 4079-4091.
- [7] 张辉, 高原, 石玉涛, 等. 基于地壳介质各向异性分析青藏高原东北缘构造应力特征 [J]. *地球物理学报*, 2012, 55(1): 95-104.
- [8] 吴晶, 高原, 石玉涛, 等. 基于地壳介质各向异性分析江苏及邻区构造应力特征 [J]. *地球物理学报*, 2010, 53(7): 1622-1630.
- [9] Gao Y, Wu J, Fukao Y, et al. Shear wave splitting in the crust in North China: stress, faults and tectonic implications[J]. *Geophysical Journal International*, 2011, 187(2): 642-654.
- [10] Gao Y, Crampin S. Observations of stress relaxation before earthquakes[J]. *Geophysical Journal International*, 2004, 157(2): 578-582.
- [11] 史海霞, 赵翠萍. 广西龙滩库区地震剪切波分裂研究 [J]. *地震地质*, 2010, 32(4): 595-606.
- [12] 邹振轩, 李金龙, 俞铁宏, 等. 温州珊溪水库地震 S 波分裂研究 [J]. *地震学报*, 2010, 32(4): 423-432.
- [13] 张永久, 高原, 石玉涛, 等. 四川紫坪铺水库库区地震剪切波分裂研究 [J]. *地球物理学报*, 2010, 53(9): 2091-2101.
- [14] 邵玉平, 高原, 戴仕贵, 等. 四川锦屏水库地区地壳剪切波分裂特征及蓄水影响初探 [J]. *地球物理学报*, 2017, 60(12): 4557-4568.
- [15] 王世昌, 刘耀炜, 张培华. 小浪底水库诱发地震的危险性分析 [J]. *地震地磁观测与研究*, 2006, 27(2): 9-15.
- [16] 贺为民, 刘明军, 李智毅, 等. 小浪底水库断裂构造分析与诱发地震预测 [J]. *华南地震*, 2001, 21(1): 63-68.
- [17] 赵博, 高原. 地壳剪切波分裂研究及地震定位误差对剪切波分裂分析的影响 [J]. *地震*, 2010, 30(1): 115-124.
- [18] Waldhauser F, Ellsworth W L. A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the Northern Hayward fault, California[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2000, 90(6): 1353-1368.
- [19] Crampin S, Peacock S. A review of shear-wave splitting in the compliant crack-critical anisotropic Earth[J]. *Wave Motion*, 2005, 41(1): 59-77.
- [20] 高原, 刘希强, 梁维, 等. 剪切波分裂系统分析方法(SAM)软件系统 [J]. *中国地震*, 2004, 20(1): 101-107.
- [21] 许忠淮. 东亚地区现今构造应力图的编制 [J]. *地震学报*, 2001, 23(5): 492-501.
- [22] 石玉涛, 高原, 赵翠萍, 等. 汶川地震余震序列的地震各向异性 [J]. *地球物理学报*, 2009, 52(2): 398-407.
- [23] 石玉涛, 高原, 吴晶, 等. 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*, 2006, 28(6): 574-585.
- [24] 刘庚, 高原, 石玉涛. 秦岭造山带及其两侧区域地壳剪切波分裂 [J]. *地球物理学报*, 2017, 60(6): 2326-2337.
- [25] 徐纪人, 赵志新, 石川有三. 中国大陆地壳应力场与构造运动区域特征研究 [J]. *地球物理学报*, 2008, 51(3): 770-781.
- [26] 吴鹏, 李相平, 高原, 等. 邢台地区地壳各向异性特征初步研究 [J]. *地震*, 2017, 37(1): 73-81.
- [27] 吴晶, 高原, 石玉涛, 等. 太行山山前断裂西南段地壳介质各向异性特征浅析 [J]. *地震*, 2008, 28(2): 115-122.

Seismic Shear-wave Splitting of Henan Xiaolangdi Reservoir Region

LI Xinbo¹, WU Peng¹, YANG Fan², JIA Hua¹, ZHAO Changhong¹

(1. Handan Central Seismic Station, Hebei Earthquake Agency, Handan 056001, China;

2. Earthquake Agency, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Collecting the seismic data from 2009 to 2016 recorded by Henan Xiaolangdi Reservoir Digital Seismic Network, and combining with the results obtained by Double-Difference Hypocenter Locations, this study has obtained the S wave splitting parameters of 8 digital seismic stations distributed in the Xiaolangdi Reservoir region using the SAM method. The results show that the earthquakes occurred in the Xiaolangdi reservoir area are mainly distributed near the Shijing River fault, which is located in the middle of the reservoir area. The dominant polarization direction of the fast shear wave is $100.4^{\circ} \pm 45.0^{\circ}$ and the average time delay of the slow shear wave is (2.87 ± 1.13) ms/km. The dominant polarization direction is consistent with the direction of the regional principal compressive stress of the South China Block. The dominant polarization direction of the fast shear wave of most stations in the region is consistent with the fault strike of the region. The slow wave time delay is equivalent to the results obtained from the North China Block.

Key words: Xiaolangdi Reservoir; crustal anisotropy; shear-wave splitting; fast shear-wave splitting polarization direction