

利用主动源研究宾川地区地壳各向异性^{*}

叶 泵, 杨 军, 李孝宾

(中国地震局滇西地震预报实验场, 云南 大理 671000)

摘要: 通过剪切波分裂法研究 2015 年 11—12 月宾川主动源实验数据, 对各个台站的分裂参数进行分析, 结果表明: (1) 宾川地区平均剪切波分裂参数的快波偏振方向为 25.1° , 上地壳平均慢波延迟为 0.006 s/km ; (2) 宾川地区的快波方向在区域内变化很大, 分布在 $-9^\circ \sim 66^\circ$ 之间, 这种剧烈变化可能与程海断裂与红河断裂在此区域交汇, 造成该区域块体结构破碎有关; (3) 研究时间段内发生 3 次 $M_L \geq 1.0$ 小震, 在地震发生前后没有观测到快波方向和快慢到时差的显著变化。

关键词: 主动源; 各向异性; 剪切波分裂

中图分类号: P315.23

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2017)04-0565-07

0 引言

云南地区位于青藏高原、印支地块和扬子地台相互作用的交汇部分, 区域内地震活动性较高, 宾川地区位于云南西部。该地区位于川滇菱形块体的西北部, 丽江—小金河断裂带与金沙江—红河断裂在此处汇集, 块内活动断裂发育, 地震活动强烈, 无论是横向还是纵向的地壳各向异性明显 (皇甫岗等, 2007; 罗睿洁等, 2015; 王双绪等, 2013), 是探讨地震活动性与地壳各向异性的理想地区。

地球介质内部应力积累是地震孕育和发生过程的重要因素, 通过研究地壳内各向异性可监测地球内部微弱的变化, 从而为分析地震发生过程甚至寻找地震的前兆提供了可能 (Aggarwal *et al.*, 1973)。相对于地球介质结构的研究, 目前对地球介质变化的研究还处于初步阶段, 由于很难直接深入地球内部进行测量, 只能通过分析地震波来研究地球内部的变化 (王宝善等, 2011)。近年来, 利用主动源激发的地震波来研究地下各向异性, 并试图找出其与地震活动相关性的研究一直在进行。结合气枪主动源数据和前人的研究成果, 本文拟采用剪切波分裂的参数快波方向和快慢波

到时差来描述地壳各向异性的时空变化。

Crampin 等 (2004) 研究发现, 当剪切波在各向异性介质中传播时, 会分裂成两个波, 速度较快的为快剪切波, 速度较慢的为慢剪切波, 两列剪切波的偏振方向相互垂直 (吴晶, 2007)。自这个现象得到土耳其扩容计划项目研究结果的确认以来, 地震波各向异性的研究已成为理论地震学、勘探地震学、地球动力学研究以及地震灾害预测中的热点 (常利军等, 2008)。剪切波分裂参数的变化主要受区域内的压应力和断裂活动控制, 地震活动性与其相关性较高, 因此可以通过研究地震前后剪切波分裂参数的变化来预报地震。国际上, 计算剪切波分裂参数用的是 PS 转换波震相, 随着观测技术的提升, SKS、SKKS 和 PKS 等震相也被用于剪切波分裂研究, 从而将剪切波研究范围从地壳推向了上地幔。在应用领域, 由于剪切波分裂特性对地壳应力场的微小变化敏感, Crampin 等 (2004) 将其应用于临震预报, 其中最为成功的一次是对冰岛 6.6 级地震的临震观测。在国内, 剪切波分裂应用最早是研究华北地区地壳各向异性, 采用的是固定台站的数据, 随着数据来源和质量的提高, 剪切波分裂研究地下介质各向异性在中国大陆都有进行。具体到本研究区域, 孙长青等 (2013) 使用云南地区 21 个宽频带地震

^{*} 收稿日期: 2017-04-11.

基金项目: 云南省青年基金 (201413)、云南省地震局“传帮带”项目和云南省陈颢院士工作站 (2014IC007) 联合资助联合资助。

台记录到的 370 个远震事件的接收函数, 得到宾川地区的快波偏振方向为 100.33° , 估算上地壳慢波延迟时间为 0.200 s 。由于计算中使用台站较少, 数据主要是 $M_L \geq 6.0$ 天然远震事件, 对结果分析有较大的限制。前人研究剪切波分裂主要使用的天然地震 (王椿镛等, 1997; 刘志等, 2000), 但是, 天然地震的频率低, 定位也存在较大的误差, 因此, 将人工地震引入剪切波分裂研究介质应力分布及其变化具有重要的意义。近年来, 随着陆地气枪技术的应用, 利用剪切波分裂分析气枪产生的地震波获得了成功 (张尉等, 2009; 赵雯佳等, 2013)。

2011 年初以来, 中国地震局地球物理所与云南省地震局合作在宾川地区开展主动源项目, 布置了 40 个流动地震台, 收获了大量的数据。本文利用这些数据, 分析云南宾川地区的浅部地壳各向异性分布特点。

1 资料与方法

2010—2016 年, 中国地震局地球物理所与云南省地震局在云南宾川地区联合开展主动源项目, 图 1 为研究区域部分台站分布及主要断裂分布。主动源系统由两部分组成: 一部分是激发地震波的

气枪震源, 主要由 4 支气枪组成, 每支气枪的容量为 $2\ 000\text{ L}$, 沉放在项目基地的湖水中, 沉放深度为 10 m , 目前的实验频率是每天进行一组实验, 每组实验约 16 次; 另一部分是 40 个流动地震台组

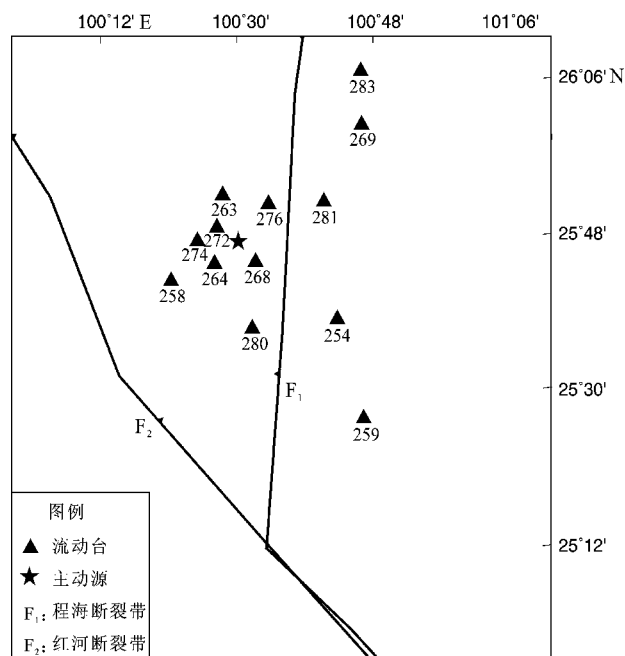


图 1 研究区域背景及流动地震台站示意图
Fig. 1 Tectonic setting of the study area and distribution of portable seismic stations

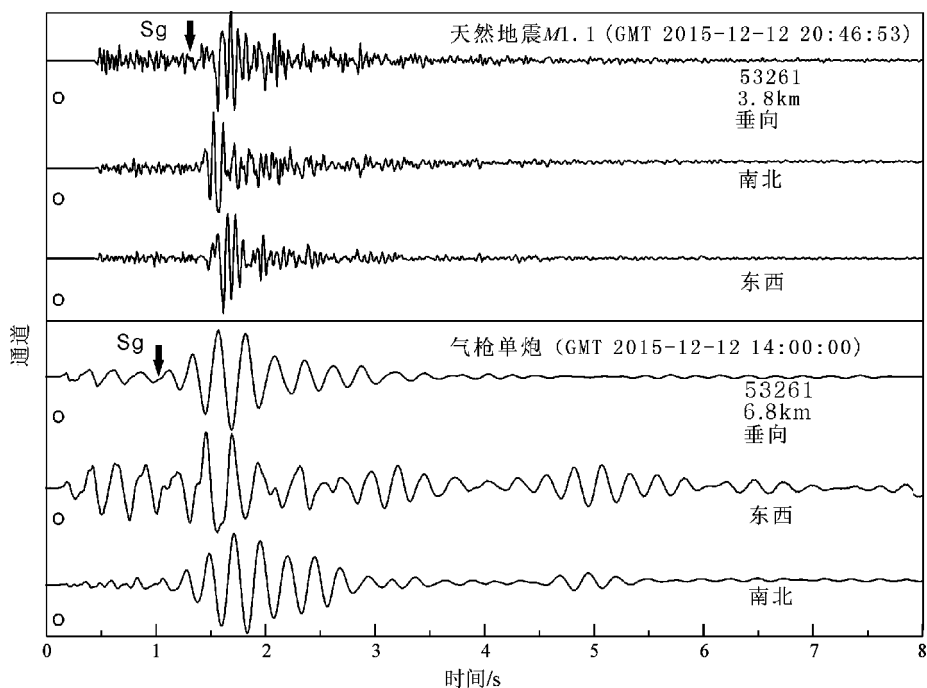


图 2 天然地震和气枪震源产生的 S 波比较

Fig. 2 Comparison of the shear wave from airguns and natural earthquakes

成信号接收系统，使用的是 Guralp40T 短周期地震计，Reftek130B 数据采集器，采样率是 100 Hz。该套系统制造的震源具有可重复性高、低成本、环保等特点（杨微等，2013）。在 2015 年 11 月 18 日至 12 月 16 日期间，气枪震源在宾川水库中定时激发，生成了大量高质量的数据，积累大量的资料。根据前人的研究，气枪每一次激发高度相似，但气枪所置水深、枪内压力、枪所在区域水库底部地形等因素都能影响气枪信号重复性。为了避免气枪源的变化对结果的影响，我们选择合适的实验时段，尽可能保证水库水位稳定，以提高气枪震源的重复性。本文拟用该时间段记录到的 943 个

事件，选取信噪比较高的事件进行计算。

将台站接收的气枪信号按震中距排列，主动震源信号高度重复性，但能量较小，根据林建民等（2010）的研究，单次激发的能量相当于 $M_L0.7$ 天然地震，部分台站在震中距 120 km 处可见单次激发信号。对实验期间的事件进行滤波并叠加，再按震中距排列，可在震中距 110 km 处观察到清晰的剪切波，如图 3 所示。由于本研究试图寻找剪切波分裂参数在时间轴上的变化，因此选择参与计算的台站震中距在 50 km 以内，以保证单次激发的数据有较高的信噪比，可以清晰地读取到剪切波起跳。

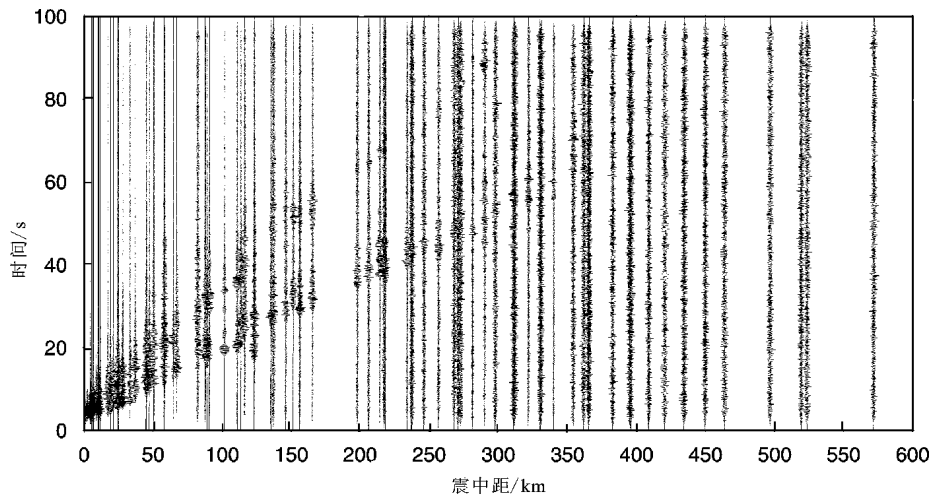


图 3 800 次气枪信号叠加并按震中距排列

Fig. 3 Waveform from stacked result of 800 airgun signals arranged based on epicentral distances

2 数据处理及结果

本文研究所用分析软件 Splitlab 可以采用旋转相关法、最小能量法和特征值法 3 种方法计算剪切波分裂。其中，特征值法的周期跳跃效应严重，最小能量法对干扰敏感，而本文数据来自流动地震台，相对于固定台干扰较多，选择较远台站时信噪比较低（张尉等，2009，赵雯佳等，2013）。为了保证计算精度，在计算中使用旋转相关法和最小能量法，结合计算结果综合考量，在最后分析中选取的结果是旋转相关法得到的。此方法结果相对其他方法稳定，不易突跳，抗干扰能力较强。

如图 2 所示，水库气枪震源产生的剪切波不同于天然地震或者陆上爆炸震源，其频率偏低，但 3 个分量上的 S 波振幅均大于 P 波，与地震相似。水

库气枪震源的 S 波是 P 波在震源附近的水底固液界面产生的转换波，传播路径与 P 波大致相同。由于剪切波分裂测量中需提供 S 波到达时间，S 波窗的选择直接关系计算结果的准确性，因此识别 S 波到时是一个重要的工作。本文主要根据两点来识别 S 波，一是根据震相分析，二是根据理论模型计算 S 波的理论到达时间，所选理论地壳模型见表 1。

表 1 采用的速度模型			
Tab. 1 Velocity model used in this study			
地壳厚度/ km	V_P / ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	V_S / ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	密度/ ($\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
15	6.1	3.58	2.32
7	6.3	3.7	2.76
7	6.4	3.76	3.06
21	6.64	3.91	3.31

根据上述模型, 计算每个台站的剪切波理论到达时间, 并结合理论到时前后水平向质点振动轨迹, 选定剪切波分裂窗, 如图 4 所示。在实际计算中, 为了减小误差, 根据震中距调整剪切波分裂窗长, 一般震中距小于 15 km 时选择时窗长为 0.5 s, 超过 20 km 时窗长为 1 s。同一个台站所有事件选择的分裂窗长度相同。根据张尉等 (2009) 的研究, 气枪信号 S 波中心频率主要集中在 3 ~ 8 Hz, 计算前对选用的事件进行相应的滤波。

根据上述方法选定时间窗, 对每一个事件进行计算。由于主动源信号能量较小, 震中距较远的接收台站信号干扰较大。在开始计算之前, 对所有数据进去倾、去噪和挑选等工作。在实际的

研究中发现, 剪切波分裂受到入射角的限制, 对于泊松比为 0.25 的介质, 剪切波入射角大于 35° 时, 剪切波入射到地表时会产生畸变, 影响计算精度。为了提高结果可靠性, 我们计算了所有台站的人射角, 放弃入射角大于 45° 的台站数据。入射角的计算是以表 1 为地壳 P 波速度模型, 根据 Snell 定理, 对剖面进行射线追踪, 如果只计算 PS 震相, 震中距小于 15 km 均符合要求, 对于较远的台站, 选择多次反射波进行计算, 使其入射角符合要求, 其入射角计算同理。由于震源在地球表面, 射线所走路径较短, 所积累的分裂参数较小, 我们对事件进行了重采样, 将采样率提高 1 000 Hz, 以保证结果精度。为了检验计算结果, 选择

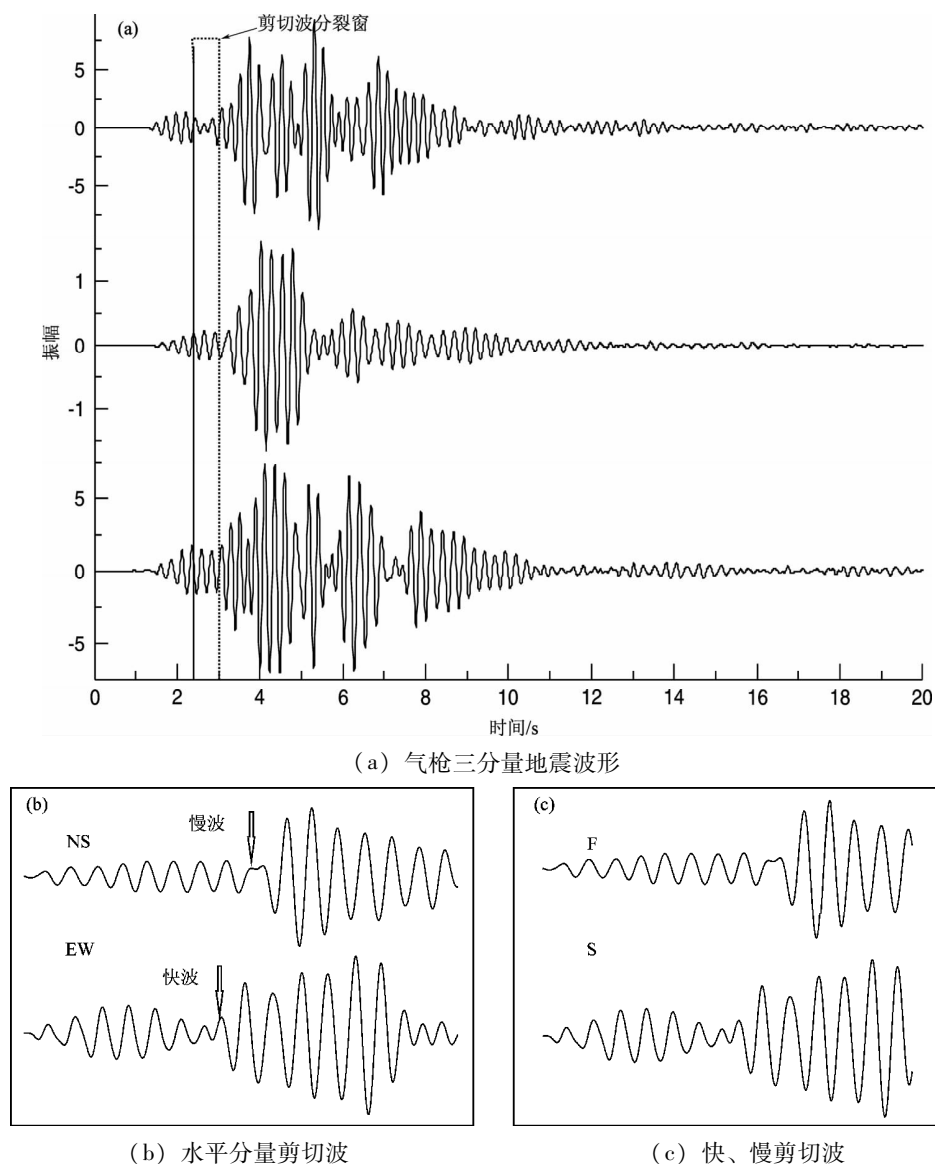


图 4 53261 台事件波形及选定时间窗

Fig. 4 The waveform for earthquake events recorded by station 53261 and the selected time windows

了实验期间宾川地区发生的 3 次天然地震作为对比，计算过程同上，部分台站结果略有误差，大部分台站计算结果相同。

对 35 个台记录的 943 个事件进行计算，排除入射角不符合要求的，发现只有 12 台站能得到稳定的结果。所得结果如表 2 所示，宾川地区的快波偏振方向分布在 $-9^{\circ} \sim 66^{\circ}$ 之间，平均偏振方向为 25.1° ，各向异性强度在 $0.012 \sim 0.145$ s 之间。根据孙长青等（2013）的计算，宾川地区快波方向平均为 35° ，这与本次研究所有台站的平均结果相近。由于震源在地表，将震中距视作射线路径，得到平均延迟量。除两个台站明显偏大外，其余台站平均延迟量在 $0.0027 \sim 0.0054$ s/km 之间。高原和 Crampin（2009）认为，云南地区平均延迟时间约为 (1.8 ± 1.2) ms/km，这里给出的平均延迟量是整个地壳的平均，而一般认为，下地壳平均延迟量较小，上地壳平均延迟量较大，本研究的结果验证了这种说法。

如图 5 所示，宾川地区的快波偏振方向变化剧烈，大部分台站的偏振方向受红河断裂、程海断裂影响。台站的偏振方向在程海断裂及其右侧，

偏振方向较一致，而在红河断裂与程海断裂包夹的中间块体，偏振方向振荡极大。

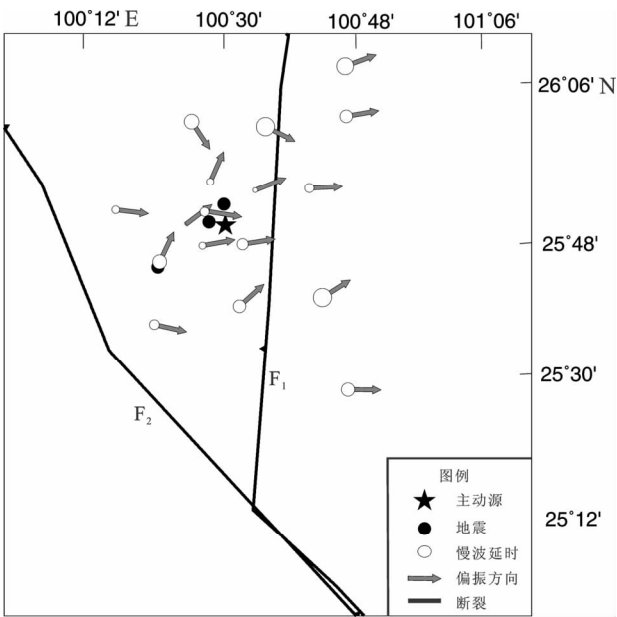


图 5 快波方向及实验期间发生的 $M \geq 1.0$ 地震
Fig. 5 Fast wave direction and earthquakes occur between the tests

表 2 宾川地区分裂参数
Tab. 2 The splitting parameters beneath the Binchuan region

台站 编号	台站位置			分裂时差 Δt /s			平均延迟时间/ (s · km ⁻¹)	快波偏振方向/(°)			事件 个数
	$\lambda_E/(^{\circ})$	$\varphi_N/(^{\circ})$	震中距/km	最小值	平均值	最大值		最小值	平均值	最大值	
53254	100.724	25.658	27.9	0.096	0.145	0.173	0.0052	20.9	31.6	51.9	321
53258	100.354	25.731	17.1	0.09	0.110	0.127	0.0064	47.4	64.4	81.4	407
53259	100.783	25.467	47.3	0.01	0.106	0.244	0.0022	-17.5	-0.8	86.6	156
53263	100.469	25.896	10.1	0.042	0.055	0.07	0.0054	-88.1	65.9	88.9	402
53264	100.451	25.764	7.1	0.058	0.053	0.042	0.0075	3.0	10.1	37.0	73
53268	100.542	25.768	6.1	0.087	0.088	0.089	0.0144	6.0	9.0	12.0	274
53269	100.778	26.031	37.1	0.082	0.100	0.106	0.0027	6.4	9.8	12.4	123
53272	100.456	25.834	5.2	0.074	0.076	0.077	0.0146	-16.4	-9.2	1.6	432
53274	100.413	25.808	8.8	0.01	0.012	0.013	0.0014	36.1	37.1	38.1	231
53276	100.571	25.879	10.4	0.035	0.041	0.047	0.0039	9.2	21.5	41.2	221
53280	100.535	25.640	19.1	0.01	0.104	0.2	0.0054	39.6	41.9	43.6	143
53283	100.776	26.133	45.2	0.11	0.137	0.152	0.0030	7.4	20.2	67.4	331

3 讨论

3.1 各向异性的分布

本次研究在小区域内使用了大量台站数据，使得剪切波分裂在水平向有较高的分辨率。对分裂参数进行分析发现快波偏振方向可分为 2 种情

况，一种与平均偏振方向一致，另一种情况比较复杂，变化剧烈，有较大的随机性。考虑到震源在地表，而剪切波分裂参数是整个传播路径上的各向异性的积累，以上结果可总结为：宾川地区的快波偏振方向主要受红河断裂和程海断裂双重影响，研究区域的快波偏振方向在 $-7^{\circ} \sim 66^{\circ}$ 之间，平均偏振方向为 25° ，偏振方向变化剧烈可能是受

这个地区帚状活动构造影响(罗睿洁等, 2015)。研究区域的慢波延迟量在 $0.012 \sim 0.145$ s 之间。由于这些台站震中距差距较大, 而慢波延迟时间反应的是射线经过路径的延迟量的积累, 我们假设慢波延迟量在 PS 波产生时即开始积累, 那么可得到平均每千米的慢波延迟累积量, 平均慢波延迟量为 0.006 s/km。

如图 5 所示两条断裂将研究区域划分为左、中、右三块。由于左边块体没有数据, 暂不予讨论。中间区域, 部分台站的偏振方向与程海断裂平行, 其余台站偏振方向与程海断裂、红河断裂均无较大相关性, 慢波延迟量并不完全与震中距相关。通常认为, 地壳各向异性是由其内部有大量的裂隙在压应力的作用下定向排列引起的。针对这种解释, 有 2 种假说, 即裂隙扩容假说和各向异性孔隙弹性假说, 它们在解释裂隙如何导致剪切波分裂方面略有不同, 但共同表明, 剪切波的快波方向与裂隙的排列方向、压应力方向是一致的。根据钱晓东等(2011)的研究, 宾川地区的压应力场是 SE、SSE 向, 与上述结果有较大的区别。造成这种情况可能有 2 种原因: 一是区域应力分布复杂, 程海断裂和红河断裂共同作用这一小片区域, 造成区域应力在小范围内多变, 可能是造成分裂参数多变的原因, 另外一种可能是地震

波穿透深度浅, 计算结果在较大程度上反映浅地表的应力状态。右边块体的台站偏振方向几乎一致, 没有表现出与断裂的相关性, 可能表明程海断裂右侧块体比较稳定, 其所受应力与程海断裂在这一小片区域的走向无关。

3.2 地震前后各向异性的变化

一般认为, 剪切波分裂是与压应力分布有关, 而地震是一个应力释放的过程。因此, 地震前后很可能观测到剪切波分裂参数的变化。利用剪切波分裂参数寻找地震前兆前人早有研究, 最为成功的一次发生在 2000 年冰岛 $M_L 6.6$ 地震期间(高原, Crampin, 2009)。然而, 还是有一些干扰因素能影响到剪切波分裂分析, 如地震的震级能造成剪切波分裂参数的改变, 因此, 高原和 Crampin (2009) 提出以可控源为基础的应力监测站台网, 以便排除震级对参数的影响。这与我们利用主动源数据计算剪切波分裂参数极为相似。

如图 5 所示, 本次实验期间发生了 3 次 $M_L \geq 1.0$ 地震。为了观测地震前后分裂参数的变化, 选取 53258 台进行分析。53258 台位于程海断裂右侧, 对其分裂参数变化作归一化后如图 6, 从图中可以看到, 快波方向和到时差在时间域内呈现一定规律的变化, 这种有规律的变化可能与固体潮有关。在 3 次地震前后剪切波分裂参数没有明显的

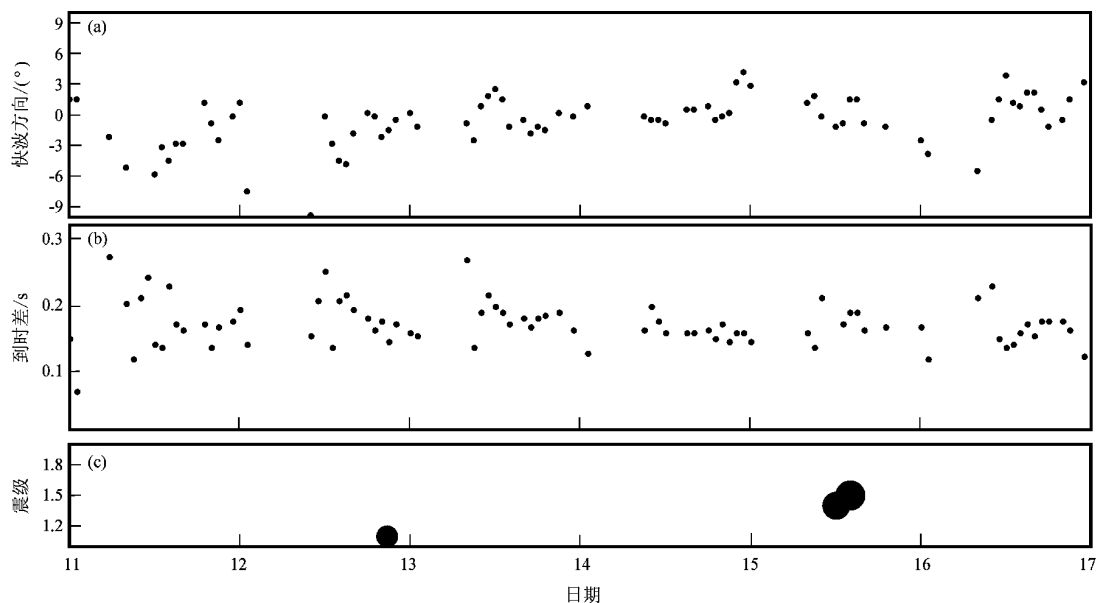


图 6 53258 台偏振角度去均值后随时间的变化 (a)、快慢波到时差随时间的变化 (b) 及实验期间发生的 $M_L \geq 1.0$ 地震分布 (c)

Fig. 6 Polarization after mean removing (a) and arrival time difference of fast and slow wave (b) varied with time, recorded by station 53258, and distribution of $M_L \geq 1.0$ earthquakes in the period of experiment

变化, 导致这种情况有几种可能, 首先, 本次研究中的地震能量过小, 没有产生足够的压应力去破坏裂隙, 导致分裂参数没有改变, 其次是产生的分裂参数变化过小, 淹没在干扰信号中, 还有一种可能, 主动源事件射线路径在浅地表传播, 没有穿过地震产生的破裂区域。

4 结论

通过计算 2015 年 11 月 18 日至 12 月 16 日期间的 943 个主动源地震事件的剪切波分裂参数, 结果显示: 宾川地区的剪切波平均快波偏振方向为 25.1° , 横向变化极大, 这可能与程海断裂与红河断裂在此区域的汇集有关。程海断裂左侧与红河断裂汇合的区域剪切波快波方向极不稳定, 显示出该块体由于和海断裂与红河断裂在该区域的碰撞导致块体破碎, 块体内形成众多的小结构导致主应力方向多变。从时间上看, 快波方向和慢波到时差均呈现出一定规律的变化, 这种变化没有受到小震的影响。

本研究使用了云南宾川地震信号发射台的气枪震源激发记录资料, 感谢王宝善研究员的帮助。

参考文献:

常利军, 王椿镛, 丁志峰, 等. 2008. 青藏高原东北缘上地幔各向异性研究[J]. 地球物理学报, 51(2): 431–438
高原, CRAMPIN S. 2009. 剪切波分裂与地震预测[J]. 世界地震译丛, (6): 1–10.

皇甫岗, 李忠华, 秦嘉政, 等. 2007. 川滇菱形块体强震活动关联分析[J]. 地震研究, 30(3): 205–209.
林建民, 王宝善, 葛洪魁. 2010. 大容量气枪震源子波激发性分析[J]. 地球物理学报, 53(2): 342–349.
刘志, 张先康, 嘉世旭, 等. 2000. 泰安—忻州部面 S 波分裂计算及介质各向异性与深部构造相关性探讨[J]. 地球物理学进展, 15(3): 61–69.
罗睿洁, 吴中海, 黄小龙, 等. 2015. 滇西北宾川地区主要活动断裂及其活动构造体系[J]. 地质通报, 34(1): 155–170.
钱晓东, 秦嘉政, 刘丽芳. 2011. 云南地区现代构造应力场研究[J]. 地震地质, 33(1): 91–106.
孙长青, 雷建设, 李聪, 等. 2013. 云南地区地壳各向异性及其动力学意义[J]. 地球物理学报, 56(12): 4095–4105.
王宝善, 王伟涛, 葛洪魁, 等. 2011. 人工震源地下介质变化动态监测[J]. 地球科学进展, 26(3): 249–256.
王椿镛, 丁志峰, 陈学波, 等. 1997. 大别山造山带地壳 S 波分裂和介质各向异性[J]. 科学通报, 42(23): 2539–2542.
王双绪, 蒋锋云, 郝明, 等. 2013. 青藏高原东缘现今三维地壳运动特征研究[J]. 地球物理学报, 56(10): 3334–3345.
吴晶. 2007. 地壳介质各向异性区域性特征研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
杨微, 王宝善, 葛洪魁, 等. 2013. 大容量气枪震源主动探测技术系统及试验研究[J]. 中国地震, 29(4): 399–410.
张尉, 戴恒昌, 李向阳, 等. 2009. 水库气枪震源产生的 S 波及其分裂[J]. 地震地质, 31(1): 22–32.
赵雯佳, 王宝善, 徐平. 2013. 利用水库气枪震源研究剪切波分裂随时间的变化[C]. 中国地球物理 2013—第十二分会场论文集.
AGGARWAL Y P, SYKES L R, ARMBRUSTER J, et al. 1973. Premonitory Changes in Seismic Velocities and Prediction of Earthquakes[J]. Nature, 241(5385): 101–104.
CRAMPIN S, VOLT T, PEACOCK S, et al. 2004. The scatter of time – delays in shear – wave splitting above small earthquakes[J]. Geophysics J Int, 156(1): 39–44.

Study on Crustal Anisotropy in Binchuan Area by Active Seismic Source Data

YE Beng, YANG Jun, LI Xiaobin

(Western Yunnan Earthquake Prediction Study Area, China Earthquake Administration, Dali 671000, Yunnan, China)

Abstract

In this paper, the shear wave splitting method is used to study the active source data of Binchuan area. The active seismic data were recorded during November to December 2015. We analyzed the splitting parameters, the results are as follows: (1) The average fast polarization direction is 25.1° , and the average slow wave delay is 0.006s/km. (2) The fast direction are decreasing from -9° to -66° in Binchuan area, this may be caused by the intersection of the Chenghai fault and Red river fault. (3) During the study period, three earthquake with M_L larger than 1.0 occurred. No variety was observed before and after the three earthquakes.

Keywords: active source; seismic anisotropy; shear wave splitting