

2018年云南通海5.0级地震前波速比变化特征^{*}

刘自凤¹, 张天继¹, 付虹¹, 李智蓉¹, 王光明¹, 赵小艳¹, 余达远²

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 玉溪市防震减灾局, 云南 玉溪 653100)

摘要:采用云南数字地震台网记录的2011年1月1日至2018年7月31日 $M_L \geq 2.0$ 地震的震相到时数据, 利用单台多震和达法计算了云南地区51个台站的波速比, 分析了2018年通海5.0级地震前波速比时空演化特征。结果表明: (1) 通海地震前震中附近波速比以高值变化为主要特征, 有4个台站在高值变化前经历了较长时间的下降—回升过程; (2) 波速比变化出现的时间与震中距有一定关系, 距离震中较近的TOH台波速比开始下降、回升和达到高值的时间都比稍远的JIS, YUJ和GEJ台要晚; (3) 2015—2017年云南4次 $M_s \geq 5.0$ 地震震中均位于发震前一年波速比均值降低或正负变化交界地区, 此次通海地震也遵从了上述规律, 震中位于2018年1—7月波速比升高和降低区域的交汇地带。初步分析认为这次地震前波速比升高可能是地震孕育过程后期震中周围有流体渗入, 流体的参与使得前期因应力增强造成的微裂隙达到了水饱和状态, 从而导致波速比 v_p/v_s 增大。

关键词:通海地震; 波速比; 单台多震和达法; 云南

中图分类号: P315.727

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2018)04-0494-09

0 引言

在地壳演化的过程中, 介质的物性将产生一系列变化, 如微破裂、扩容、塑性硬化及相变等, 地震波通过地壳介质时, 波速也会相应发生变化, 这是利用波速比研究介质物性的重要依据(冯德益, 1981)。我国老一辈地震学者在这方面做了大量工作, 对大量中强地震前后波速比的变化特征作了较为系统的分析(冯德益等, 1974, 1978)。“十五”数字化测震台网运行以来, 数字地震观测仪器的有效改进、台站布局的合理改善和布设密度的优化, 积累了大量震相资料, 观测精度也得到大幅提高, 这些条件保证了利用数字地震资料分析中强地震前后波速变化的可靠性。很多学者使用这些高精度数据进行了波速比研究, 黎明晓和刘杰(2006)利用多台法计算了2000年姚安6.5级、2001年施甸5级、2001年永胜6.0级、2003年大姚6.2和6.1级4个地震序列的波速比, 发现在主震发生后、强余震发生前波速比出现趋势性下降; 王林瑛等(2008)关于文安和唐山附

近地区地震波速比的计算结果表明, 震前波速比异常的演化过程为正常—降低—恢复—发震; 邹振轩等(2006)在水库地震前也监测到同样的变化形态, 即波速比存在下降—回升—发震的发展过程。不同学者通过研究不同区域中强地震前后、地震序列强余震前和水库地震波速比变化特征, 对震前存在波速异常予以了肯定。但这些研究主要是使用单震多台和达法开展的, 得到的波速比是较大范围地震的平均结果, 求取了平均, 因此可能会弱化小区域的局部波速比异常, 从而降低空间分辨率。

为提高波速比空间分布特征的空间分辨率, 不少学者开始采用单台多震和达法研究特定区域的台站波速。李艳娥等(2014)利用该方法研究了汶川地区自2001年以来波速比变化特征, 发现汶川地震前波速比显著变化的台站基本分布在孕震区范围内; 王林瑛等(2014)研究结果表明, 芦山 $M_s 7.0$ 地震前部分台站也随时间变化出现了波速比低值异常现象; 翁钊强等(2015)提出2010年以来山西3次 $M_s \geq 4.5$ 地震前远台波速比异常出现时间较早, 而近台波速比异常出现时间

^{*} 收稿日期: 2018-08-24.

基金项目: 2018年中国地震局监测预报司地震大形势项目——南北地震带及新疆地震精确定位和云南地区地震精确定位(036022004050316)联合资助。

相对较晚,因此可通过远台、近台所围限的范围来缩小地震预测地点。上述研究结果为研究震前震源区是否存在地壳介质的显著时空变化提供了有利证据。

2018年8月13、14日在云南省玉溪市通海县先后发生2次5.0级地震,为了研究地震前震源区台站波速比是否出现异常,异常如何演化,笔者利用云南数字地震台网记录的2011年1月1日至2018年7月31日 $M_L \geq 2.0$ 地震震相到时数据,采用单台多震和达法计算震中附近台站的波速比,分析地震前波速比的时空演化特征。

1 研究方法

日本地震学家 Watati (1928) 提出了波速比计算方法(傅征祥,程燕,1988)。即在假定震源区到地表介质为理想均匀弹性的条件下,对于理想的均匀弹性介质,纵波波速 v_p 和横波波速 v_s 与介质泊松比 σ 、杨氏模量 E 和介质密度 ρ 之间的关系为(李善邦,1981):

$$v_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \left(1 + \frac{2\sigma^2}{1 - \sigma - 2\sigma^2} \right)} \quad (1)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \left[\frac{1}{2(1 + \sigma)} \right]} \quad (2)$$

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{2(1 - \sigma)}{1 - 2\sigma}} \quad (3)$$

式中:波速比 v_p/v_s 为介质的泊松比的函数,反映的是地壳上层介质泊松比的变化。

利用震相报告获得直达波到时数据,计算出P波走时和P波、S波到时差,再根据它们的线性关系得到的 v_p/v_s ,见式(4),根据式(5)计算出线性相关系数 R ,根据式(6)估算误差 γ 。

$$v_p/v_s = 1 + \frac{n \sum_{i=1}^n \Delta T_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \Delta T_i \right)^2}{n \sum_{i=1}^n \Delta T_i T_{Pi} - \sum_{i=1}^n \Delta T_{Pi} \sum_{i=1}^n \Delta T_i} \quad (4)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{Pi} - \bar{T}_{Pi})(T_i - \bar{T}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{Pi} - \bar{T}_{Pi})^2 \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T}_i)^2}} \quad (5)$$

$$\gamma = (v_p/v_s - 1)^2 \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n (\delta t'_{Pi})^2}{(n-2) \left[n \sum_{i=1}^n \Delta T_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \Delta T_i \right)^2 \right]}} \quad (6)$$

($i = 1, \dots, n$)

$$\delta t'_{Pi} = (T_{Pi} - T_0) - \frac{\Delta T_i}{v_p/v_s - 1} \quad (7)$$

式中: T_{Pi} 为P波走时; T_{Si} 为S波走时; $\Delta T_i = T_{Si} - T_{Pi}$; D_i 为震中距; n 为每个地震到时数据个数; T_0 为发震时刻。

为了尽量减小每次参与计算的地震震中位置的不稳定性、时间服务的不稳定性和精度对计算结果稳定性产生的影响,本研究设置约束条件为:到时数据个数取50; $T_{S-P} \leq 12$ s;相关系数 $R \geq 0.95$;误差 $\gamma \leq 0.05$;震中距 ≤ 100 km。在研究 v_p/v_s 的时间变化特征时,为了降低路径差异和分布不均匀的射线对计算结果的影响,本研究对计算结果进行10个地震滑动平均处理,这样每次滑动平均所参与计算的震相数据大量增加,可有效地提高 v_p/v_s 随时间变化特征的稳定性和可靠性。

2 资料选取及预处理

本文通过全国编目网收集了云南地区($20^\circ \sim 30^\circ N$, $97^\circ \sim 106^\circ E$)2011年1月1日至2018年7月31日(即测震台网“十五”数字化改造且运行基本稳定后)19 946次 $M_L \geq 2.0$ 地震的正式观测报告。进行初步挑选(挑选原则为只保留至少被4个台站记录到的地震),最后得到18 340次地震的到时数据,震中分布如图1a所示。经过台网改造,包括川滇交界的部分台站,台站数增至56个(表1),这使得定位结果更加可靠,走时数据精度提高。震中距 ≤ 100 km地震的P波和S波走时曲线如图1b所示,剔除了显著离散的少量震相数据后,P波、S波走时曲线易于分辨且震相离散度小,这表明研究采用的震相数据精确性较高,确保了波速比变化结果的可靠性。

利用预处理后震相数据,采用单台多震和达法计算满足约束条件(到时数据个数取50; $T_{S-P} \leq 12$ s;相关系数 $R \geq 0.95$;误差 $\gamma \leq 0.05$;震中距 ≤ 100 km)地震的波速比。由于XUW, LOP, GOS, FUN和KMI台附近地震较少、满足计算条件的地震更少等原因,计算出的波速比不可用,

故本文共计算了其它 51 个台站 2011 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日（下称Ⅰ时段）和 2011 年 1 月 1 日至 2018 年 7 月 31 日（下称Ⅱ时段）2 个时段

的波速比。研究中波速比高于 +1 倍方差线或略低于 +1 倍方差线称高值；相反，低于 -1 倍方差线或略高于 -1 倍方差线称低值。

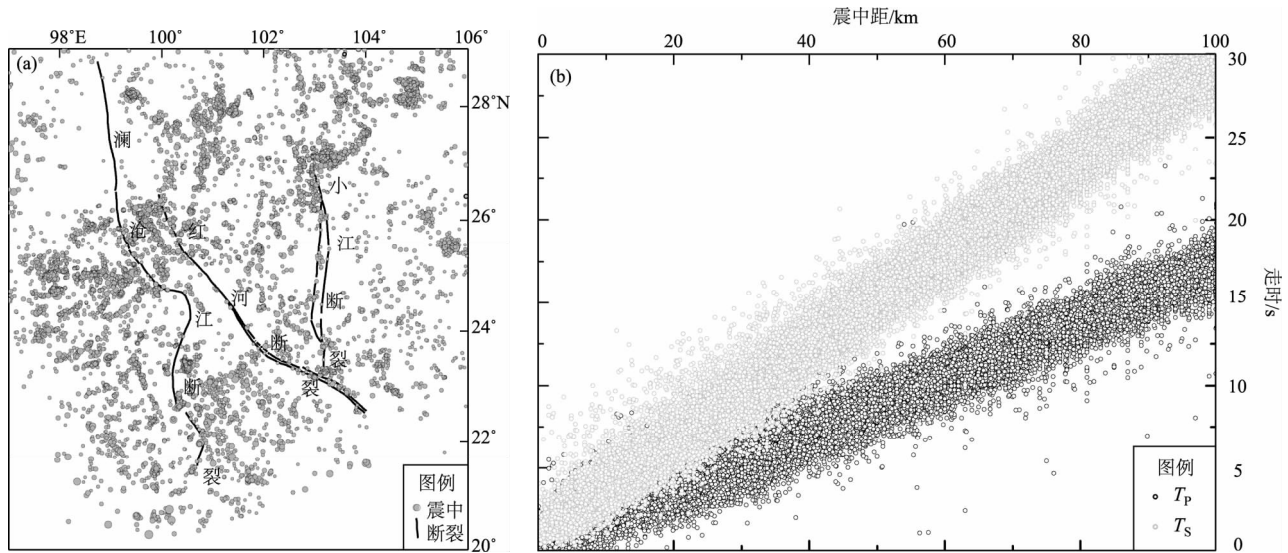


图 1 所选地震震中分布图 (a) 和 P 波、S 波走时曲线图 (b)

Fig. 1 Epicenter distribution map (a) and travel time graphs of P and S waves (b) about selected earthquakes

表 1 56 个台站名称及代码表

Tab. 1 Name and code list of 56 seismic stations

序号	台站名	台站代码	序号	台站名	台站代码	序号	台站名	台站代码	序号	台站名	台站代码
1	黑龙潭	HLT	15	团山	TUS	29	宣威	XUW	43	华坪	HUP
2	通海	TOH	16	保山	BAS	30	大姚	DAY	44	富宁	FUN
3	弥勒	MIL	17	云县	YUX	31	罗平	LOP	45	勐腊	MLA
4	马龙	MAL	18	景洪	JHH	32	麻栗坡	MLP	46	孟连	MEL
5	易门	YIM	19	中甸	ZOD	33	金平	JIP	47	昆明	KMI
6	禄劝	LUQ	20	畹町	WAD	34	建水	JIS	48	镇沅	ZHY
7	楚雄	CUX	21	文山	WES	35	元江	YUJ	49	管口	QKT
8	永胜	YOS	22	昭通	ZAT	36	景谷	JIG	50	热海	RHT
9	丽江	LJH	23	个旧	GEJ	37	澜沧	LAC	51	新华	XHT
10	云龙	YUL	24	洱源	EYA	38	临沧	LIC	52	宁蒗	NIL
11	鹤庆	HEQ	25	腾冲	TNC	39	永德	YOD	53	泸沽湖	LGH
12	东川	DOC	26	元谋	YUM	40	芒市	MAS	54	乡城	XCE
13	沧源	CAY	27	盐津	YAJ	41	泸水	LUS	55	盐源	YYU
14	思茅	SIM	28	巧家	QIJ	42	贡山	GOS	56	雷波	LBO

3 波速比特征分析

3.1 空间分布特征

本文分别利用Ⅰ，Ⅱ时段 $M_L \geq 2.0$ 地震震相数据计算 51 个台站的波速比，并分析高波速比和低波速比台站的空间分布特征。从短期来看，

2017 年年底云南地区低波速比台站共有 13 个，分别为 LGH，NIL，BAS，RHT，XHT，YOD，LIC，CAY，SIM，MLA，WES，YIM 和 CUX 台，高波速比台站有 7 个，分别为 YYU、YOS、MIL、TOH、JIS、YUJ 和 GEJ 台（图 2a）。图 2a 显示，这 20 个台站主要在滇西北川滇交界、滇南和小滇西—滇西南地区，其中低波速比台站在澜沧江

断裂以西的小滇西—滇西南地区呈带状分布, 而高波速比台站则集中分布在玉溪市和红河州交界地区(此次地震震中附近); 2018年7月底低波速比台站减少至8个, 分别为YUL、TUS、XHT、LIC、SIM、ZHY、YIM和QIJ台, 这8个台站分布地区较广, 在大理、德宏、临沧和普洱等地区均有分布, 而高波速比台站数量无变化, 且依然集中分布在滇南地区(图2b)。

2018年通海2次5.0级地震发生在短期内高波速比台站相对集中的滇南地区, 以往关于解释震前波速异常的模式很多, “扩容—进水”的DD模式机制可解释在波速上所表现出明显的降低—

上升—发震的异常过程。波速在干燥裂隙的环境下, 随裂隙密度的增加而减小, 在水饱和和裂隙的情况下却随之增加而增大(冯德益, 1981)。孕震过程中, 随着应力增加, 介质密度随之增加, 微裂隙也在断裂带附近逐渐发育和集中, 微裂隙扩容后地下流体的渗入, 为最终的破裂解锁创造有利条件(王林瑛等, 2009)。据此分析认为, 通海地震前短时间内波速比以高值变化为主要特征可能是因为此次地震孕育过程后期有流体渗入, 流体的参与使微裂隙达到了水饱和状态, 从而导致波速比 v_p/v_s 变大。可见, 波速比下降—回升后的高值变化区域应该引起关注。

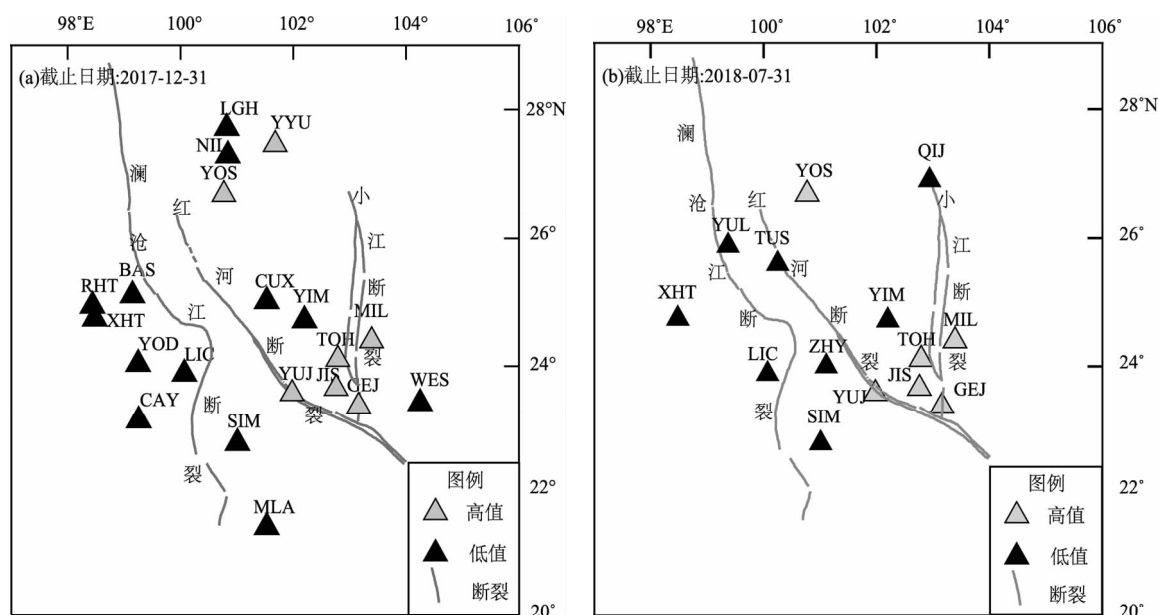


图2 云南地区不同时期高波速比和低波速比台站空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution map of stations with high and low velocity ratios in Yunnan in different periods

3.2 时间变化特征

分析高、低波速比台站数变化情况和空间分布特征可知, 滇南地区波速比高值台站较为集中, 为了详细分析地震前波速比的时间演化特征, 本文给出了2011年1月1日至2018年7月31日震中附近6个台站的波速比时序图(图3)。

由图3可见, 震前较短时间内仅YIM台的波速比下降, 其余5个台站均表现为高值变化, 其中TOH、JIS、MIL和GEJ台波速比均高于+1倍方差线, YUJ台在+1倍方差线附近波动。这似乎与已有的研究结果相悖, 因为强震前波速比存在下降现象在以往震例中已得到较好验证(邹振轩等,

2006; 王林瑛等, 2008, 2014; 李艳娥等, 2014), 且部分强余震发生前波速比也会迅速下降(黎明晓, 刘杰, 2006)。但从长期来看, 此次地震前TOH、JIS、YUJ和GEJ台的波速比表现出下降—低值变化—回升—高值变化—发震的演化过程, 与已有研究结果是相吻合的。TOH台波速比于2015年年初开始下降并达低值, 2015年年中开始持续回升, 2017年下半年达高值; JIS台波速比于2013年年底开始下降, 2014年年初低于-1倍方差线后回升, 2014年年中至2016年年初一直在均值附近波动, 2016年年中以来在+1倍方差线附近变化; YUJ台波速比于2013年年中开始持续下降,

2014 年年中达低值后开始回升, 2016 年年底达高值并在 +1 倍方差线附近波动; GEJ 台波速比于 2012 年年中开始缓慢下降, 2014 年年初达 -1 倍方差线, 2015 年年中开始回升, 2016 年以来以高值变化为主要特征。从这 4 个台发生转折变化的时间不难看出, 距离震中较近的 TOH 台波速比开始

下降、回升和达到高值的时间都要晚于稍远的 JIS, YUJ 和 GEJ 台。翁钊强等 (2015) 分析了 2010 年以来山西地区 3 次 $M_s \geq 4.5$ 地震前波速比变化特征得到了震前波速比出现下降变化, 且远台波速比异常出现时间较早, 而近台波速比异常出现时间相对较晚的结论。

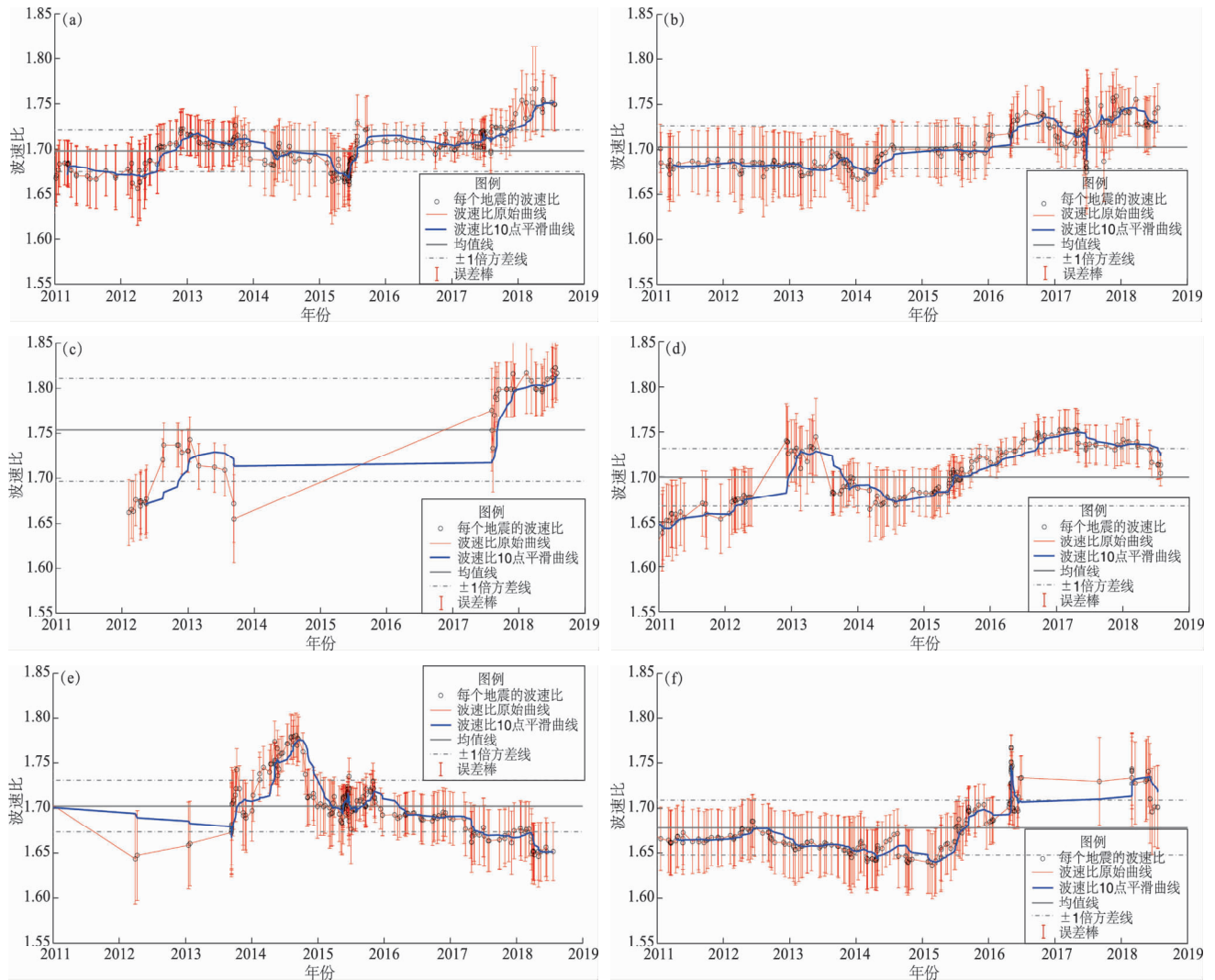


图3 通海地震前 TOH 台 (a), JIS 台 (b), MIL 台 (c), YUJ 台 (d), YIM 台 (e), GEJ 台 (f) 波速比时序图 (资料截止日期: 2018-07-31)

Fig. 3 Time series diagram of velocity ratio about stations of TOH (a), JIS (b), MIL (c), YUJ (d), YIM (e) and GEJ (f) before the Tonghai earthquake (data deadline: 2018-07-31)

为了回溯云南地区 $M_s \geq 5.0$ 地震前波速比的变化特征, 笔者对 2013 年以来云南省内 10 组 14 次 $M_s \geq 5.0$ 地震前震中 100 km 范围内台站的波速比变化进行了详细梳理, 结果见表 2。由于 2013 年香格里拉地震震中 100 km 范围内仅有中甸台, 且符合约束条件的地震较少, 在此不做讨论。另

外 9 组地震前, 震中附近台站波速比都出现过下降现象, 但地震发生时段存在较大差异, 有的在波速比下降过程中发生地震, 有的在下降后回升过程中发震, 也有在下降后回升至高值水平才发震的。通海地震前震中附近有 4 个台站波速比经历了下降—回升—高值的演化过程。回溯的 9 组震例中

表 2 2013 年以来云南 $M_s \geq 5.0$ 地震前震中 100 km 范围内台站波速比变化特征统计表

Tab. 2 Statistic of change characteristics of wave velocity ratio of stations in the area within 100 km of the epicenter before the $M_s \geq 5.0$ earthquakes in Yunnan since 2013

地区	地震事件	震中 100 km 范围内台站波速比变化特征
滇西北地区	2013-03-03 洱源 5.5 级地震 2013-04-17 洱源 5.0 级地震	EYA: 高值—持续下降—低值—发震 YUL: 低值—回升—高值附近波动—发震 TUS: 低值—回升至高值—发震 HEQ: 持续下降至低值—发震 LUS: 高值—持续下降—均值附近波动—发震
		100 km 范围内仅有 ZOD 台, 符合条件的数据少, 无法分析
		YUL: 下降—低值—回升至高值—发震 EYA: 高值—下降—低值—发震 LUS: 下降—低值附近波动—发震 HEQ: 高值—下降—低值—发震 TUS: 高值—下降—低值波动—发震 BAS: 高值—下降—低值波动—发震
		EYA: 2016 年云龙地震后从极低值回升至 -1 倍方差线附近发生此次地震 YUL: 2016 年云龙地震后从高值下降至 +1 倍方差线附近发生此次地震 TUS: 低值—回升至均值—发震 HEQ: 下降—低值波动—发震 LUS: 低值—回升—高值波动—发震 BAS: 低值波动—上升至高值—发震
	2016-05-18 云龙 5.0 级地震	
	2017-03-27 漾濞 5.1 级地震	
滇东地区	2014-04-05 永善 5.3 级地震 2014-08-17 永善 5.0 级地震	YAJ: 低值—回升过程中发生第一次主震, 回升至高值后发生第二次主震 ZAT: 快速下降—发震 LBO: 高值—持续下降—均值附近波动—发震
	2014-08-03 鲁甸 6.5 级地震	QIJ: 持续下降—低值—回升至均值—发震 ZAT: 高值—快速下降—回升至均值—发震 DOC: 高值—下降—低值波动—发震 YAJ: 低值—持续回升—高值—发震
小滇西— 滇西南地区	2014-05-24 盈江 5.6 级地震 2014-05-30 盈江 6.1 级地震	QKT: 快速下降—低值—发震 RHT: 快速下降—低值—回升至均值—发震 XHT: 高值—持续下降—回升—发震 TNC: 高值—快速下降—回升—发震 MAS: 下降—回升—均值水平—发震 WAD: 持续下降—快速回升—均值水平—发震
		JIG: 低值—持续回升—高值—发震 SIM: 高值—下降—回升至均值—发震 LIC: 降低—回升—高值—发震 LAC: 高值—下降—低值波动—发震 YUX: 低值—回升—均值附近波动—发震
	2014-10-07 景谷 6.6 级地震	CAY: 高值—持续下降—均值附近波动—发震 YOD: 下降—回升—高值波动—发震 MAS: 低值—回升—发震 WAD: 低值—回升—均值附近波动—发震
	2015-03-01 沧源 5.5 级地震	BAS: 低值—回升—高值波动—发震 YUL: 持续下降—回升—均值水平—发震 TUS: 高值—下降—低值波动—发震 YUX: 低值—回升—均值附近波动—发震 LUS: 低值—回升至高值—下降—发震
	2015-10-30 昌宁 5.1 级地震	

(表2),震中附近也有台站的波速比在震前短时间内回升至高值。如2013年洱源地震前YUL和TUS台、2014年永善5.0级地震和2014年鲁甸地震前YAJ台、2014年景谷地震前JIG和LIC台、2015年沧源地震前YOD台、2015年昌宁地震前LUS和BAS台、2016年云龙地震前YUL台、2017年漾濞地震前YUL和BAS台的波速比都在震前短时间内上升,并达到了+1倍方差线或在其附近波动。

蔡静观等(1999)对云南地区第4强震活跃期6.3级以上强震前波速比异常图像进行了动态追踪,发现波速比存在明显的南北差异,具体表现为滇西南和中缅交界处的4组地震前波速比出现低值异常,而滇西北和滇东的3组地震前震源区以高值异常为主。分析表2发现,2013年以来云南地区 $M_s \geq 5.0$ 地震前震中附近台站的波速比也表现出类似特征,滇西北和滇东地区的地震前波速比从高值开始转折下降或已从低值回升至高值状态的台站居多,而小滇西—滇西南地区的地震前多数台站的波速比以下降后转折回升为主要特征。

3.3 波速比变化量分析

为了研究通海地震前较短时间内波速比的变化特征,笔者计算了2018年1—7月51个台站的波速比均值变化量 $\Delta v_p/v_s$,空间分布如图4a所示,该时段波速比变化量在滇南的曲靖、昆明和玉溪交界地区和滇西的大理、怒江和保山交界地区显著升高,在红河地区和楚雄—临沧一带则表现为波速比降低。图4a显示2018年8月13日、14日通海2次5.0级地震发生在2018年1—7月波速比正变化区域边缘,毗邻楚雄—临沧一带和红河地区波速比降低区域,可见此次地震发生在波速比正负变化区域的过渡地带,且震源区震前波速比变化较剧烈。杨志高和张雪梅(2016)研究震源区的地壳厚度和波速比特征时得到相同结论,1927年甘肃古浪大地震和2016年门源地震就发生在泊松比变化强烈且偏向于低泊松比区域。

本文分别计算了2014,2015和2016年波速比均值年变化量,计算结果见图4b~d。2015年昌宁 $M_s 5.1$ 和沧源 $M_s 5.5$ 地震发生在2014年波速比均

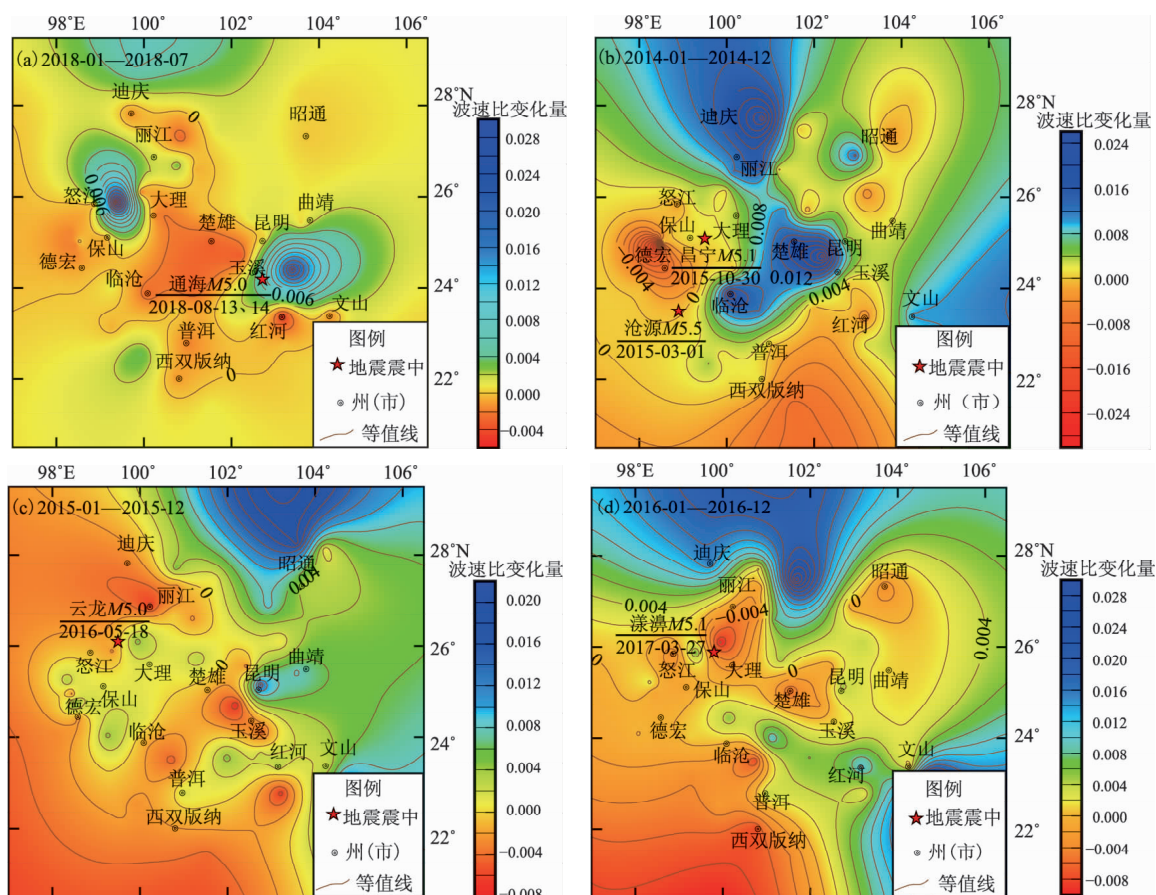


图4 不同时段波速比均值变化量等值线图

Fig. 4 Contour map of the mean value of wave velocity ratio change in different time periods

值正负变化的交界地区; 2016年云龙 $M_s 5.0$ 地震发生在2015年波速比均值降低的滇西北地区; 2017年漾濞 $M_s 5.1$ 地震发生在波速比均值年变化量正、负变化区域之间。综上, 2015年以来4次 $M_s \geq 5.0$ 地震的震中均位于波速比均值降低或正负变化交界地区, 此次地震也遵从了上述规律。

4 计算结果可靠性分析

影响波速计算精度的主要因素有: 直达P波和S波的到时判读精度、参与拟合的台站个数、地震定位精度。为了尽量减小上述因素对计算结果的影响, 在保证计算样本量的基础上, 设置了较为严苛的约束条件, 即: 到时数据个数取50; $T_{s-p} \leq 12$ s; 相关系数 $R \geq 0.95$; 误差 $\gamma \leq 0.05$; 震中距 ≤ 100 km。

本文选择2011年1月1日至2018年7月31日的震相数据, 在计算前对震相数据作了预处理, 挑选至少被4个台站记录到的地震参与计算, 初步剔除了走时数据离散度较大的地震。由于云南水系较为丰富(展布有金沙江、怒江、澜沧江、元江和南盘江等), 波速比受地下流体影响较大, 为了尽量减小河流对波速比的影响, 计算时对 T_{s-p} 和震中距的限制较为严格, 分别设置了12 s和100 km的界限。在 $T_{s-p} \leq 12$ s的情况下, 一方面可基本保证波形具有较高的清晰度, 便于精确判读, 判读精度一般在0.02 s以内; 另一方面选取范围相对有限, 每个地震计算出的波速比基本代表了距地震震中半径100 km范围内地下介质的平均物性, 能弱化一些客观因素造成的显著随机变化。

为了保证计算结果的可靠性, 本文只选取相关系数 $R \geq 0.95$ 和误差 $\gamma \leq 0.05$ 的计算结果进行分析, 并统计了51个台站各时段的相关系数平均值 \bar{R} 和误差平均值 $\bar{\gamma}$, 其分布范围分别为0.97~0.99和0.016~0.039, 可见二者变化范围较小; 51个台站中 $\bar{\gamma} \leq 0.03$, $\bar{R} \geq 0.99$ 的台站有39个, 占比76%。

在分析 v_p/v_s 值的时间变化特征时, 为了降低路径差异和射线不均匀分布对计算结果的影响, 本文采取10个地震滑动平均处理, 这样每次滑动平均所参与计算的震相数据大量增加, 能有效地提高 v_p/v_s 值随时间变化特征的稳定性和可靠性。

综上, 经过挑选后的震相数据在较为严苛的

约束条件下平滑处理得到的结果误差小、相关系数大, 具有较好可靠性和稳定性。

5 结论与讨论

采用2011年1月1日至2018年7月31日云南地震台网提供的 $M_L \geq 2.0$ 地震的震相到时数据, 利用单台多震和达法计算了51个台站2011年1月至2017年12月和2011年1月至2018年7月2个时段的平均波速比和均值变化量, 分析了2018年8月13、14日通海2次5.0级地震前波速比时空演化特征。主要得出如下结论:

(1) 从近期变化趋势来看, 地震前震中附近6个台站中有5个呈高值变化, 但从长期变化来分析, 5个高值台站中有4个台站(TOH, JIS, YUJ和GEJ)经历了下降—回升—高值—发震的变化过程。通过分析历史震例, 发现2013年以来云南省内9组震例前震中附近都有台站的波速比呈现类似变化趋势, 这与已有研究结果也相一致(黎明晓, 2006; 邹振轩等, 2006; 王林瑛等, 2008, 2014; 李艳娥等, 2014)。波速比下降是由于孕震过程中震源区应力积累导致微裂隙增加从而引起 v_p 降低造成的, 而回升至高值的阶段则可解释为在孕震过程的后期, 随着微裂隙扩容后地下流体的渗入使微裂隙达到了水饱和状态引起S波速度降低, 从而导致波速比 v_p/v_s 变大。可见, 波速比下降回升后的高值变化区域也应该引起关注。

(2) 从震前变化趋势较为一致的4个台站波速比发生转折变化的时间看出, 距离震中较近的TOH台波速比开始下降、回升和达到高值的时间都要晚于稍远的JIS, YUJ和GEJ台, 可见异常出现时间的早晚与震中距有一定关系。

(3) 2015—2017年云南4次 $M_s 5.0$ 地震的震中均位于一年波速比均值降低或正负变化交界地区, 此次通海地震也遵从了上述规律, 震中在2018年1—7月波速比升高(曲靖、昆明和玉溪交界处)和降低区域(楚雄—临沧一带、文山地区)的交汇地带。但由于资料限制, 可分析的震例少, 此规律还需要积累更多震例加以验证。

本文数据处理运用了中国地震局地球物理研究所王林瑛研究员等编写的计算程序, 研究过程中得到付虹研究员的耐心指导, 在此表示衷心感谢。

参考文献:

- 蔡静观,张喜玲,李永莉. 1999. 云南地区波速比异常图像的南北差异[J]. 西北地震学报, 21(4): 363–369.
- 冯德益,顾瑾平,王周元,等. 1978. 我国西部地区一些强震及中强震前后波速异常的初步研究(三)——和达曲线的曲率变化[J]. 地球物理学报, 21(4): 292–309.
- 冯德益,谭爱娜,王克芬. 1974. 近地震波速异常与地震预报[J]. 地球物理学报, 17(2): 84–98.
- 冯德益. 1981. 地震波速异常[M]. 北京:地震出版社, 2–15, 140–149, 236–246.
- 傅征祥,程燕. 1988. 北京和张家口地区地壳平均波速比的联合测定[J]. 地震, 8(4): 30–36.
- 黎明晓,刘杰. 2006. 云南地区地震序列的波速比(V_p/V_s)异常研究[J]. 地震, 26(1): 26–34.
- 李善邦. 1981. 中国地震[M]. 北京:地震出版社, 522–528, 566–575.
- 李艳娥,王林瑛,郑需要. 2014. 汶川地震前后波速比变化特征的再研究[J]. 地震学报, 36(3): 425–432.
- 王林瑛,郭永霞,刘芳,等. 2008. 文安地震前后首都圈分区波速比时变特征[J]. 地震学报, 30(3): 240–253.
- 王林瑛,李艳娥,刘芳,等. 2009. 汶川地震前后地震波速比时间变化特征的研究[C]//中国地震学会. 中国地震学会成立三十年学术研讨会论文摘要集: 1–12.
- 王林瑛,李艳娥,郑需要,等. 2014. 芦山 $M_s 7.0$ 强震前单台波速比变化特征研究[J]. 地震学报, 36(1): 42–58.
- 翁钊强,梁向军,吴昊昱,等. 2015. 单台多震和达法研究山西地区的波速比变化特征[J]. 中国地震, 31(1): 89–100.
- 杨志高,张雪梅. 2016. 2016 年门源 $M_s 6.4$ 地震震区地壳厚度及波速比研究[J]. 地震研究, 39(4): 566–573.
- 邹振轩,李金龙,俞铁宏. 2006. 应用多台和达法测定温州珊溪水库地区地震的平均波速比[J]. 地震, 26(4): 133–137.
- Watati K. 1928. Shallow and deep earthquakes[J]. Geophysical Magazine, 1: 162–202.

Characteristics of Wave Velocity Ratio Change before Yunnan Tonghai $M_s 5.0$ Earthquake in 2018

LIU Zifeng¹, ZHANG Tianji¹, FU Hong¹, LI Zhirong¹, WANG Guangming¹, ZHAO Xiaoyan¹, YU Dayuan²

(1. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

(2. Yuxi Earthquake Prevention and Disaster Mitigation Bureau, Yuxi 653100, Yunnan, China)

Abstract

Based on the phase arrival time data of the $M_L \geq 2.0$ earthquakes recorded by Yunnan Digital Seismic Network from Jan. 1, 2011 to Jul. 31, 2018, we calculated the wave velocity ratios of 51 stations by using the Wadati method of single station and multi-earthquake, and analyzed the temporal and spatial evolution characteristics of wave velocity ratios before the Tonghai $M_s 5.0$ earthquake on Aug. 13 and Aug. 14 in 2018. The results show that: (1) Before the Tonghai earthquake, the mian characteristic of the wave velocity ratio near the epicenter shows high value changes. The wave velocity ratio of four stations experienced the process of decline – recovery in a long period before the high value. (2) There is a certain relationship between the occurrence time of wave velocity change and epicentral distance. The time of wave velocity ratio begins to decline, rise and reach high value of the Tonghai Station which is closer to the epicenter is later than that of Jianshui, Yuanjiang and Gejiu Stations which are farther from the epicenter. (3) The epicenters of the four $M_s \geq 5.0$ earthquakes in Yunnan from 2015 to 2017 located at the area of decreasing or the positive and negative changes of wave velocity ratio in one year before the earthquake. And the location of epicenter of Tonghai earthquake follows the same law, which is the intersection zone of increasing and decreasing wave velocity ratio from Jan. to Jul. in 2018. The preliminary analysis suggests that the increasing of the wave velocity ratio before the earthquake may be due to the fluid infiltration around the epicenter during the late stage of the seismogenic process. The participation of fluid makes the micro-crack caused by stress enhancement in the early stage reaches the state of water saturation, resulting in the wave velocity ratio v_p/v_s increased.

Keywords: the Tonghai $M_s 5.0$ earthquake; wave velocity ratio; Wadati method of single station and multi-earthquake; Yunnan