

赵小艳、孙楠、苏有锦, 2015, 云南地区前震时空分布及其统计特征研究, 中国地震, 31 (2), 209 ~ 217。

云南地区前震时空分布及其统计特征研究

赵小艳 孙楠 苏有锦

云南省地震局, 昆明市北市区北辰大道 650224

摘要 分析了 1965 ~ 2014 年发生在云南地区的共计 223 次 $M \geq 5.0$ 地震, 发现其中有前震的地震 74 次, 占 33.2%; 云南不同构造区前震的比例差异较大, 前震较多的地区是澜沧-耿马地块和腾冲-保山地块; 前震与主震的震级差、时间间隔、空间距离优势分布分别为 0.5 ~ 2.9、10 天内和 20km 内, 可以利用这些特点在识别出前震后进而对后续主震做出预测。

关键词: 前震 主震 震级差 云南地区

[文章编号] 1001-4683 (2015) 02-0209-09

[中图分类号] P315

[文献标识码] A

0 引言

国际地震学与地球内部物理学协会 (IASPEI) 下属的地震预测分委员会对各国专家自己提名的有意义的 37 项地震前兆进行评审, 最终认定了 5 项有意义的地震前兆, 前震即为其中的第一项 (陈运泰, 2007)。在所有的地震短临前兆中, 前震是学术界公认的预测强震最有效的方法之一 (Jones et al, 1979)。在我国具有明显减灾实效和社会显示度的多次地震短临预测中, 直接前震的贡献也是显而易见的, 如 1975 年 2 月 4 日辽宁海城 7.3 级地震、1995 年 7 月 12 日云南孟连 7.3 级地震、1999 年 11 月辽宁岫岩 5.6 级地震等 (王林瑛等, 2006)。由此可见, 前震在地震预测尤其是短临预测中具有显著的优势和作用。将前震应用于地震预测中存在的主要问题是, 在主震发生前如何识别前震活动。已有的研究表明, 尽管部分前震在某些特征方面表现出与一般震群的差异性 (吴开统等, 1990; 崔子健等, 2012; 程万正等, 2003a; Chen et al, 2013), 但到目前为止, 也没有一种通用的、有效且可以从一般地震活动背景中识别前震的方法和技术手段。

全球前震比例存在巨大差异, 这种差异可能与前震定义的不确定性有关。但在同一前震定义条件下得出的不同地区发生前震的概率不同是真实存在的, 如 Michel 等 (2013) 发现板间地震的前震序列要显著多于板内地震; 南加州 5 个不同分区 $M \geq 5.0$ 地震前震比例有显著差异, 从 15% ~ 40% 不等 (苏怡之, 1991); Maeda (1996) 研究发现 1961 ~ 1988 年在日本附近发生的 $M > 5$ 地震中, 平均 37% 的地震有前震现象, 其中又以伊豆地区的比例最高 (57%)。

[收稿日期] 2015-02-28; [修定日期] 2015-03-16

[项目类别] 云南省地震局继续深入推进预防和处置地震灾害能力建设 10 项重点工程“前震及其识别技术研究”资助

[作者简介] 赵小艳, 女, 1982 年生, 主要从事地震活动的预测研究。E-mail: 47535120@qq.com

云南地区地震活动十分频繁,2011年以来发生过多有前震活动的强震,如2011年3月盈江5.8级、2011年6月腾冲5.2级、2013年8月香格里拉5.9级地震。但历史上云南地区中强地震前的前震活动状态尚无人研究。本文利用云南地区地震目录,挑选出1965年以来云南地区 $M \geq 5.0$ 地震前有前震的震例,分析了前震空间分布及其构造差异性、前震与主震震级差、前震与主震时间间隔及其空间距离等统计特征。

1 前震的定义及数据分析

前震是指震前发生在大震(相对意义)震源区内与大震有关的一些地震,但到目前为止仍没有统一的定义。早期的一些研究者认为主震发生前数天乃至数月、且距离主震震中几十千米以内的地震都是前震;而目前多数震源物理学家则认为只有距离主震震中很近(数千千米或更近)、且发生在主震之前的地震才是真正意义上的前震(倪四道等,2010)。根据震源物理的前震定义,并考虑到前震在地震预测中的实际作用以及云南地区历史地震的监测能力(苏有锦等,2003;刘丽芳等,2012),在本文中我们将前震定义为:发生在主震震源(破裂)区内、主震前半年时间内、震级差 ≥ 0.5 且震级 ≥ 2.5 的地震。主震震源(破裂)区采用余震区震中分布范围来确定。对于没有余震序列的主震,采用库仑破裂经验公式,根据不同震源机制类型地震的破裂长度计算不同主震的经验破裂区(Donald et al,1994)。

根据上述前震定义,利用云南省地震局汇编的云南地震台网测定的1965年以来云南小震月报目录^①,对1965~2014年发生在云南地区($20^{\circ} \sim 29^{\circ}N, 97^{\circ} \sim 106^{\circ}E$)共计223次 $M \geq 5.0$ 地震的前震进行了挑选和统计,共挑选出具有前震的震例74次(61组),占主震事件总数的33.2%,其中有25次(11组)为震群型主震。

1965~2014年发生在云南地区($20^{\circ} \sim 29^{\circ}N, 97^{\circ} \sim 106^{\circ}E$)共计223次 $M \geq 5.0$ 地震,其中 $M \leq 5.9$ 地震178次,6.0~6.9级地震35次, $M \geq 7.0$ 地震10次。有前震的地震震级分类情况如下: $M \leq 5.9$ 地震57次;6.0~6.9级地震12次; $M \geq 7.0$ 地震5次,这5次地震分别是1976年龙陵7.4、7.3级,1988年澜沧7.6级、耿马7.2级和1995年孟连7.3级地震。图1(a)给出了云南地区不同震级档地震具有前震的比例。由图1(a)可见,震级 $M \leq 5.9$ 、 $M 6.0 \sim 6.9$ 的主震前发生前震的概率差别不大,而 $M \geq 7.0$ 地震前发生前震的比例较高,这种偏高可能是由于这5次7级地震中有4次是以震群形式发生的。如果将震群型地震视为1次地震,则1965~2014年共发生 $M \geq 5.0$ 地震183次,其中 $M \leq 5.9$ 地震145次,6.0~6.9级地震30次, $M \geq 7.0$ 地震8次;在61次有前震的地震中, $M \leq 5.9$ 地震48次,6.0~6.9级地震10次, $M \geq 7.0$ 地震3次。由此可见,与前一种情况相比 $M \leq 5.9$ 、 $M 6.0 \sim 6.9$ 档主震具有前震的比例无明显差异,而 $M \geq 7.0$ 档的比例明显减小(图1(b))。

2 前震分布的时空特征

在印度板块和欧亚板块碰撞下的阿萨姆楔体的作用造成了川滇地区不同块体的非均匀运动,进而形成川滇地区不同块体地震活动水平、地震类型、地震错断类型的差异性(程万正等,2003b)。云南地区深大断裂发育,有以NS向为主的怒江、澜沧江、程海、元谋-绿汁江

^① 云南省地震局,2014,云南地震目录(区域台网)

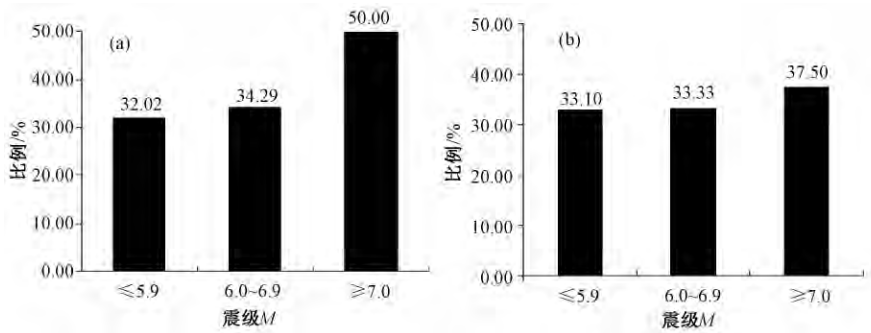


图 1 云南地区不同震级档主震具有前震的比例
(a) 全部 74 次地震; (b) 将震群视为 1 次地震

和小江等断裂以及 NW 向的金沙、红河断裂(苏有锦等,1999)。这些断裂构成了云南地区的主要构造格架,根据这些断裂的展布、地震活动在边界带的成带性以及各地块内部构造、活动的整体性等将云南地区从东到西划分为 6 个次级地块,即滇东地块、滇中地块、印支地块、盐源-丽江地块、耿马-澜沧地块和腾冲-保山地块(图 2)。

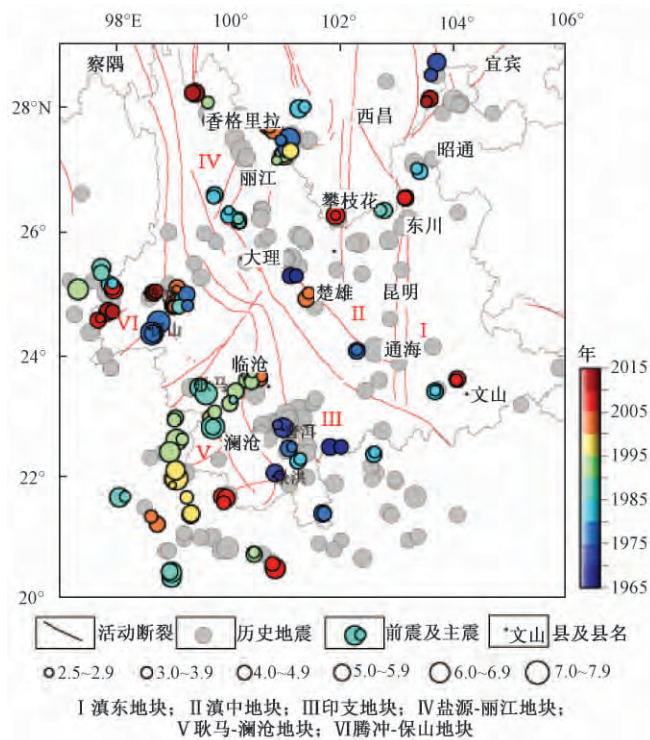


图 2 云南地区前震及对应主震、历史地震震中分布

图 2 给出了 74 次(61 组)前震、对应主震以及云南地区 1965 年以来的 $M \geq 5.0$ 地震震中分布。由图 2 可见,云南地区有前震的地震分布极不均匀,具有空间丛集性,绝大部分地

震分布在红河断裂带以西地区。为弄清不同构造分区前震比例的分布特征,我们统计了上述 6 个分区前震的比例(表 1)。统计结果显示, $M \geq 5.0$ 地震前发生前震比例最高的地区是澜沧-耿马地块,其次是与其相邻的腾冲-保山地块,比例最低的是滇中地块、印支地块。

崔效锋等(2006)根据震源机制解、断层滑动反演资料和水压致裂应力测量等应力数据点的空间分布认为,川滇地区存在 2 条近 NS 向的应力转换带,其中东边的应力转换带与川滇菱形块体的东边界相吻合;西边的应力转换带与川滇菱形块体的西边界——红河断裂带南段并不完全一致,而是与 NNW 向的营盘山断裂带相重合。根据上述 2 条应力转换带的位置,则澜沧-耿马地块、腾冲-保山地块位于西边应力转换带的西侧,在有些研究中将这 2 个地块合称为滇西地块(皇甫岗等,2007)或密支那-西盟块体(程万正等,2003b),它们具有相同的动力源,即 NE 向运动的印度板块在喜马拉雅“东构造结”阿萨姆弧以南地区派生的近 NEE 向分量的作用。此外,这 2 个地块在速度结构上均为上地壳低速区(苏有锦等,1999)。故这 2 个地块在前震活动上具有相似性,即前震比例较高,这与板内地震的前震活动特征类似(Michel et al,2013)。地震序列和震源机制统计结果显示这 2 个分区均为走滑-双震型区(皇甫岗等,2007)。

滇中、盐源-丽江和印支等地块位于 2 条应力转换带的中间,其中滇中地块、印支地块 2 个构造区的前震比例属云南最低。近年来的 GPS 研究认为,川滇地块的 SSE 向运动已经穿越了红河断裂带^②,沿川滇菱形块体东边界一直延伸到滇西南地区直至缅甸。这表明滇中地块和印支地块可以划分为 1 个大的构造区,故二者的地震活动具有一定的共性特征,即前震不发育且地震序列多为主-余型(皇甫岗等,2007)。

盐源-丽江地块长期处于裂陷环境,震源机制类型及应力场构造复杂(赵小艳等,2013),滇西的维西-乔后断裂、丽江-小金河断裂带、程海断裂带的水平最大主应力方位有 NW 和 NNE 向 2 个优势分布方向(谢富仁等,1994;崔效锋等,2006)。因此,该区地震类型复杂,表现为震群型和双震型占有很大的比例,且前震发育。

滇东地块有前震的地震分布在滇东北和滇南,小江断裂带及其附近区域 $M \geq 5.0$ 地震前无前震发生。该地块受到华南地块的强烈阻挡,地下介质相对完整,地震活动水平从北到南不断降低,北部的昭通-鲁甸断裂、马边断裂地震活动强度大、频度高,地震类型比南部复杂。

云南地区受到板块碰撞的影响,表现为明显的地壳增厚和缩短、高原隆升、块体旋转以及侧向挤出等复杂的运动、变形及其差异(王椿镛等,2002)。不同构造运动及深部介质环境可造成区域地震活动强弱、地震序列类型空间分布的差异性(刘建华等,1989;蒋海昆等,2006)。云南不同构造区发生前震的比例差异可能也与区域构造运动形式、区域深部介质

表 1 云南地区不同构造块体

分区	具有前震的 地震个数	比例/ %	历史地 震个数
滇东地块	6	23.08	26
滇中地块	5	17.86	28
盐源-丽江地块	12	34.29	35
印支地块	8	16.33	49
耿马-澜沧地块	27	58.70	46
腾冲-保山地块	16	41.03	39
合计	74	33.18	223

② 云南省地震局,2013,云南省 2013 年度地震趋势研究报告。

环境等因素有关。讨论这一问题的难点在于认识前震发生的机理。有人认为前震仅仅是地震成核过程中的“副产品”,或者说是强震孕育过程中应力释放的表现之一,没有特殊的物理机制(Ohnaka,1992),总而言之,前震产生机理的模糊是认识前震空间分布差异性时存在的主要困难之一。

图3给出了上述前震及主震的 $M-t$ 分布及其累计频度。由图3可见,具有前震的地震并没有十分明显的时间丛集性,除了几个频次较高的年份如1976、1988、1994、2001年,其余时间段的分布较为均匀。此外,在大地震前发生前震的较多,如1976年龙陵7.4、7.3级,1988年澜沧7.6级、耿马7.2级和1995年孟连7.3级地震前。

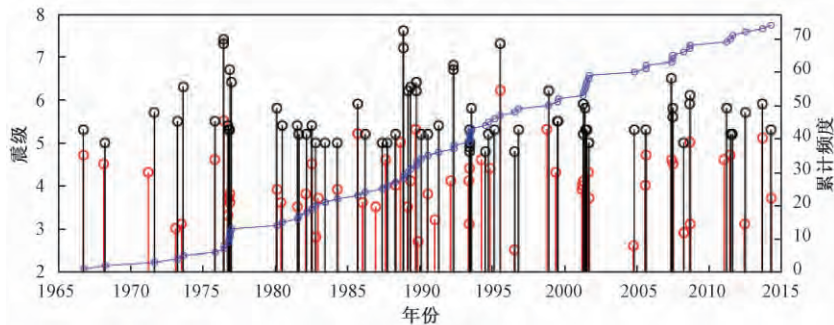


图3 云南地区具有前震的主震、前震 $M-t$ 图及其累计频度
黑色为主震 $M-t$;红色为前震 $M-t$;蓝色为主震累计频度

3 前震与主震的统计关系研究

3.1 震级差

为了解前震与主震的震级差分布特征,本文统计了74次主震震级、前震震级及前震与主震的震级差(图4)。结果显示,前震震级最小为2.5,最大为6.2,震级为 $M_L 3.5 \sim 4.9$ 的前震较多。全部74个震级差的结果显示震级差为0.5~1.9的较多,其次是2.0~2.9。部分小于0.5的震级差不符合前震的定义,这是由于这些前震是1个震群的前震,震群中有个别主震的震级与前震的震级差较小所致。如果将主震震级按6.0划分,分别统计主震 $M < 6.0$ 、 $M \geq 6.0$ 的震级差,发现二者有较大差异,即主震 $M < 6.0$ 时,震级差集中分布在0.5~1.9;主震 $M \geq 6.0$ 时,震级差为2.5~2.9的较多,表明随着主震震级的增大,前震震级不一定会增大。

进一步统计前震震级、前震-主震震级差与主震震级的关系发现,随着主震震级的增加,前震震级也随之增加(图5(a)),不同震级档前震震级存在较大差异,即 $M \geq 7.0$ 主震的前震震级均为 $M \geq 5.0$, $M 6.0 \sim 6.9$ 主震的前震震级为3.1~5.3,平均4.14; $M < 6.0$ 主震的前震震级为2.5~5.1,平均3.87。前震-主震震级差与主震震级不相关,主震震级 < 6.0 的震级差比较分散;主震震级为6.0~6.9的震级差较大;主震震级 ≥ 7.0 的震级差比主震震级为6.0~6.9的震级差要小(图5(b))。

3.2 时间间隔特征

图6(a)为前震与主震时间间隔的统计结果。由图6(a)可见,云南地区近40%的前震

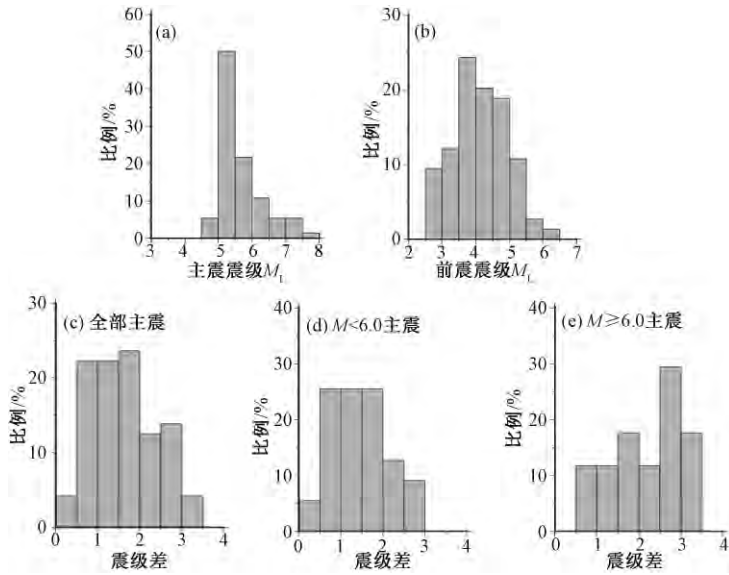


图4 云南地区具有前震的主震震级(a)、前震震级(b)及震级差(c、d、e)统计

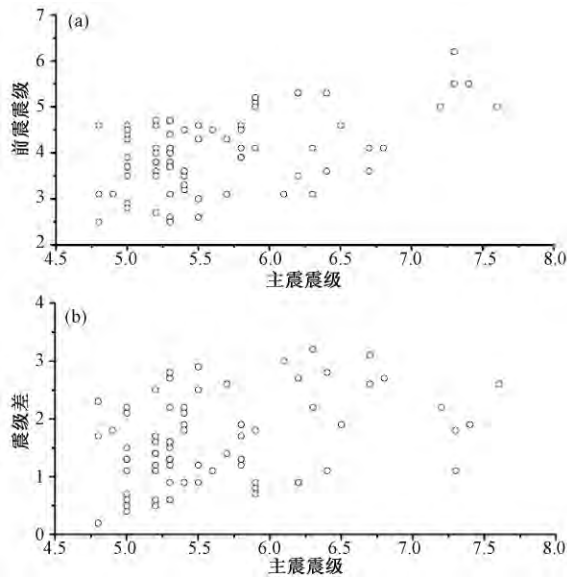


图5 主震震级与前震震级(a)及前震-主震震级差(b)的关系

都发生在主震前 10 天以内。将时间间隔在 10 天以内的地震再做细分可以发现,近 50% 的地震发生在主震前 1 天以内,即 74 次地震中有 16 次前震发生在主震前 1 天以内,如此短的时间间隔给利用前震来预测主震带来不小的挑战。

图 6(b) 为时间间隔与主震震级的关系。由图 6(b) 可见,绝大多数前震都发生在主震前 120 天以内,但有 4 个震例的前震-主震时间间隔较长,它们分别是 1971 年马边 5.7 级(间隔 158 天)、1983 年巧家 5.0 级(间隔 174 天)、1987 年鹤庆 5.0 级(间隔 168 天)、1994

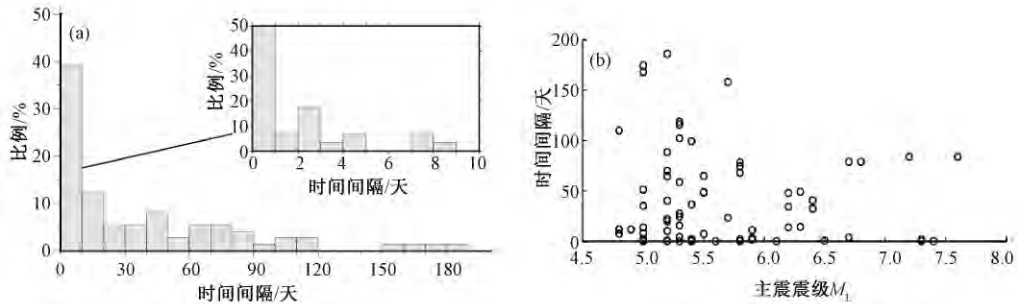


图6 前震与主震时间间隔统计(a)、时间间隔与主震震级的关系(b)

年景谷4.8、5.2级震群(间隔107、185天),这可能是由我们的前震定义所致。鉴于云南地区中、小地震发生比例较高,故前震时间间隔的定义可限定在120天以内。

3.3 空间距离

图7(a)给出了前震震中与主震震中空间距离的统计结果。结果显示,距离最远的是1988年耿马7.2级地震的前震,其震中距主震震中62km。此外,还有1993年景谷5级地震震群,其中1次主震震中与该震群的前震震中间距也较远,达45km。从统计结果看,85%前震的震中与主震震中的距离集中分布在20km以内,其中距离在10km以内的前震最多,占60%。这可能是由于主震多为 $M \leq 6.0$ 的地震,其破裂尺度较小。这也表明我们对于前震与主震位置的定义是合适的、恰当的。前震-主震震中距与主震震级的关系见图7(b)。

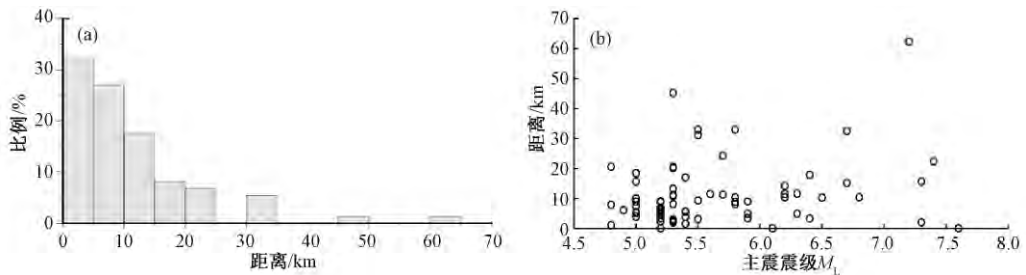


图7 前震震中与主震震中的距离统计(a)、距离与主震震级的关系(b)

4 结论与讨论

本文根据震源物理的前震定义,对1965~2014年发生在云南地区($20^{\circ} \sim 29^{\circ}N, 97^{\circ} \sim 106^{\circ}E$)共计223次 $M \geq 5.0$ 地震的前震进行了挑选和统计,共选出具有前震的震例74次,并分析了前震及其主震的时空分布特征,统计了不同构造分区 $M \geq 5.0$ 地震的前震比例,并从前震-主震震级差、时间间隔、空间距离等3个方面对前震与主震的相互关系进行了分析,得到如下结论:

(1) 云南地区约33.2%的 $M \geq 5.0$ 地震前会发生前震,不同震级档发生前震比例的差异较小。

(2) 云南不同构造区前震的比例差异较大,比例最高的地区是澜沧-耿马地块,其次是

与其相邻的腾冲-保山地块,比例最低的是滇中地块和印支地块。区域构造运动形式、区域深部介质环境可能是导致这一差异的主要原因。

(3) 74 个震级差的统计结果显示,震级差为 0.5 ~ 1.9 的较多,其次是 2.0 ~ 2.9。 $M < 6.0$ 主震的震级差集中分布在 0.5 ~ 1.9; $M \geq 6.0$ 主震的震级差为 2.5 ~ 2.9 的较多。

(4) 云南地区近 40% 的前震都发生在主震前 10 天以内,其中又以 1 天以内的前震居多,如此短的时间间隔给利用前震预测主震带来困难。研究表明,前震也符合类似于余震的大森定律,即离主震时间越近,地震越频繁,但主震之前会有短暂的平静现象。因此,如果从前震-主震序列的时间演化规律有足够的了解,由前震序列的演化过程推断主震发生的时刻也是有可能的(倪四道等,2010)。

(5) 85% 前震的震中与主震震中的距离集中分布在 20km 以内,其中 10km 以内的前震最多,占 60% ;

(6) 尽管前震震级、前震-主震时间间隔、距离等均与主震震级不相关,但在识别出可靠的前震后,可以根据震级差(0.5 ~ 2.9)、时间间隔(10 天)、距离的优势分布(20km 以内)等尝试对主震做出一定程度的预测。

参考文献

- 陈运泰,2007,地震预测——进展、困难与前景,地震地磁观测与研究,28(2),1~24。
- 程万正、陈天长、魏娅玲等,2003a,2001 年四川雅江 6 级地震的前震与余震震源参数的变化,地震学报,25(4),351~360。
- 程万正、刁桂苓、吕弋培等,2003b,川滇地块的震源力学机制、运动速率和方式,地震地质,25(1),71~87。
- 崔效锋、谢富仁、张红艳,2006,川滇地区现代构造应力场分区及动力学意义,地震学报,28(5),451~461。
- 崔子健、李志雄、陈章立等,2012,判别小震群序列类型的新方法研究——谱振幅相关分析法,地球物理学报,55(5),1718~1724。
- 皇甫岗、秦嘉政、李忠华等,2007,云南地震类型分区特征研究,地震学报,29(2),142~150。
- 蒋海昆、李永莉、曲延军等,2006,中国大陆中强地震序列类型的空间分布特征,地震学报,28(4),389~398。
- 刘建华、刘福田、吴华等,1989,中国南北带地壳和上地幔的三维速度图象,地球物理学报,32(2),143~151。
- 刘丽芳、李志海、蒋长胜,2012,云南地区地震目录最小完整性震级研究,地震研究,35(4),491~499。
- 倪四道、王伟涛、李丽,2010,2010 年 4 月 14 日玉树地震:一个有前震的破坏性地震,中国科学: D 辑,40(5),535~537。
- 苏怡之,1991,前震在南加州实时地震灾害评价中的应用,地震科技情报,21(1),10~14。
- 苏有锦、李永莉、李忠华等,2003,川滇地区区域地震目录完整性最小震级分析,地震研究,26(增刊),10~16。
- 苏有锦、刘祖荫、蔡民军等,1999,云南地区强震分布的深部地球介质背景,地震学报,21(3),313~322。
- 王椿镛、Mooney W D、王溪莉等,2002,川滇地区地壳上地幔三维速度结构研究,地震学报,24(1),1~16。
- 王林瑛、陈佩燕、吴忠良,2006,前震特征及其识别研究,地震学报,27(2),171~177。
- 吴开统、焦远碧、吕培苓等,1990,地震序列概率,151~155,北京:北京大学出版社。
- 谢富仁、刘光勋、梁海庆,1994,滇西北及邻区现代构造应力场,地震地质,16(4),329~338。
- 赵小艳、付虹,2013,2013 年洱源 $M_s 5.5$ 、 5.0 地震发震构造识别,地震学报,36(3),640~650。
- Chen X W, Shearer P M, 2013, California foreshock sequences suggest aseismic triggering process, Geophys Res Lett, 40, 1~6.
- Donald LW, Kevin J C, 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, Bull Seism Soc Am, 84(4), 974~1002.
- Jones L M, Molnar P, 1979, Some characteristics of foreshocks and their possible relationship to earthquake prediction and premonitory slip on fault, J Geophys Res, 84, 3596~3608.
- Michel B, Virginie D, David M, et al, 2013, The long precursory phase of most large interplate earthquakes supplementary information, Nature Geoscience, 6(4), doi: 10.1038/ngeo1770.

Maeda K, 1996, The use of foreshocks in probabilistic prediction along the Japan and Kuril Trenches, *Bull Seism Soc Am*, **86** (4), 242 ~ 254.

Ohnaka M, 1992, Earthquake source nucleation: A physical model for short term precursors, *Tectonophysics*, **211**, 149 ~ 178.

Spatial-temporal distribution and their statistical characteristics of foreshocks in the Yunnan region

Zhao Xiaoyan Sun Nan Su Youjin

Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, China

Abstract The 223 earthquakes with $M \geq 5.0$ in the Yunnan region during 1965 ~ 2014 were analyzed. Among them, 74 earthquakes have foreshocks (about 33.2%). There is great difference between different structures: the Lancang-Gengma and Tengchong-Baoshan block have the most abundant foreshocks in the Yunnan region; the predominant magnitude difference, time interval and spatial distance are 0.5 ~ 2.9, within 10 days and within 20km respectively. We can use those characteristics to forecast the mainshock after the identification of a foreshock.

Key words: The Yunnan region Foreshock Mainshock Magnitude difference