

云南三次强震前后环境 剪应力场动态变化^{*}

王绍晋 龙晓帆

(中国昆明 650041 云南省地震局)

摘要 采用陈培善等由断裂力学理论研究地震破裂过程的破裂模式, 导出的利用地震波资料测算地震震源处相对剪应力值的方法, 获得云南及邻区 1986~1997 年 6 月中小地震剪应力值 τ_0 , 并追踪分析了云南及中缅边境 3 次强震前后环境剪应力场的动态变化过程。结果表明, 强震发生在环境剪应力场高值分布的区域。强震孕育过程中, 潜在震源区及其附近环境剪应力场明显增强, 经历了环境剪应力场由低—高—低—高多次反复递进增强过程, 为长时间内多次反复出现环境剪应力高值分布的区域。环境剪应力场动态变化图象, 反映出云南及邻区出现的强震孕育“多源场”, 在滇西南、滇西北、滇西和滇东同时出现多处环境剪应力场增强区域, 3 次 7 级左右强震发生在环境剪应力场增强最显著的区域。

关键词 环境剪应力场 动态变化 强震前后 云南

引言

地壳构造运动是一个在时间和空间上复杂的演变过程。在空间上, 地壳构造运动与一定地域内多层次地壳块体及其边界断裂的相互运动和相互作用密切相关; 在时间上, 地壳构造运动与多层次地壳块体的运动及其相互作用的时序发展密切相关。地震的发生是地壳介质在构造应力场作用下产生急速破裂错动的结果, 是地壳内部复杂的破裂过程。由于地壳内部介质和力学性质存在着显著的不均匀性, 地壳内部广泛分布着力学软弱面(破裂面), 在地壳构造运动中, 在一定地域、一定时期形成多个应力集中源, 构成地震孕育的多源场。地震的孕育、发生及其发展与地壳构造运动所产生的构造应力场极其复杂的动态发展变化密切相关。研究表明, 环境剪应力场是控制地震发生的主要因素, 高剪应力值分布区往往是容易发生强震的危险地区。环境剪应力场近期显著增高、起伏变化急剧的地区, 近期发生强震的危险性明显增大。追踪分析环境剪应力场时空动态变化, 是地震中期预测的一种行之有效的方法。

1995 年 7 月 12 日云南孟连西中缅边境发生了 $M_s=7.3$ 地震, 之后又于 1995 年 10 月 24 日在滇中武定发生了 $M_s=6.5$ 地震, 1996 年 2 月 3 日在滇西丽江发生了 $M_s=7.0$ 地震。在短短的 7 个月内, 在云南及边境连续发生了 3 次 7 级左右强震, 这在云南地震发生

* 中国地震局“95-04-04-02-03”课题资助。

1998-06-22 收到初稿, 1998-09-16 收到修改稿, 1998-09-25 决定采用。

史上是罕见的。本研究利用地震记录资料,测算出中小地震震源处的相对剪切应力强度值,追踪分析了云南及近邻近期环境剪应力场动态图象变化及其与这3次强震发生的关系。

1 资料和方法

地震是地壳内部的破裂现象,是地壳内原有的或新生的力学软弱面——裂纹或断裂在构造应力作用下发生急速破裂的结果。地震的发生与地壳内部的环境应力场或初始应力状态密切相关。大量地震破裂过程和震源机制的分析研究结果表明,绝大多数地震是地壳内部断裂急速剪切破裂的结果。显然,地壳中的环境剪应力场对地震的发生起着重要的作用。陈培善等(1977, 1978)和陈培善(1981)把断裂力学观点引入地震破裂过程研究中,认为地震是地壳内的裂纹在环境剪应力场作用下,由稳态扩展发展为失稳扩展的结果。地壳岩石中原有的构造断裂或新生的构造断裂,在构造环境剪应力场作用下,在初始的稳态扩展过程中,应力强度因子不断增加。当其大于临界值时,断裂就以很大的破裂速度急速失稳扩展,从而发生地震。在整个破裂过程中,应力强度因子与区域剪切应力值成正比,并与断裂的大小有关。陈培善等在假定中小地震为纯剪切圆盘形破裂模型的情况下,导出了地震破裂的等效破裂半径 a 和震级 M 与构造环境剪应力值 τ_0 的关系式

$$\lg \tau_0 = 0.75M - 1.51g(2a) - 0.77 \quad (1)$$

震源破裂半径 a 可以利用地震波资料在时间域或频率域里测定。对云南及邻区,我们利用云南区域地震台网和地方地震台网记录到的, $2.0 \leq M_L \leq 4.9$ 地震的直达 P 波(震中距 $\Delta \leq 110$ km)初动半周期资料,在时间域里测定震源破裂半径 a ,然后由式(1)计算得到地震震源处的相对剪切应力强度 τ_0 值。云南及邻区 1986~1996 年,每年获得 500~1 000 次地震的 τ_0 值,约占全年发生 $2.0 \leq M_L \leq 4.9$ 地震总数(不包括余震)的 70%~90%,1997 年 1~6 月获得 250 次地震的 τ_0 值。采用数值分析方法对这些资料进行处理,并绘制不同时段环境剪应力值等值线图,据此对强震前后环境剪应力场动态图象变化作追踪分析,探讨由中小地震所反映的环境剪应力场时空变化过程与强震的关系。

2 云南及邻区环境剪应力场空间分布基本特征

根据我们对云南及邻区 1986~1997 年 8 000 多次地震剪应力 τ_0 值的统计分析, τ_0 平均值约为 10 MPa。陈培善等利用震源参数估计了全球地震的剪应力值,得到大震($6 \leq M_w \leq 7$)的 τ_0 平均值为 10 MPa,并认为构造剪应力强度是控制地震发生的主要因素,只有当构造剪应力积累到相当高的程度(10 MPa 左右),才会发生大地震(陈培善等, 1995, 1998)。据此将 10 MPa 作为区分地震剪应力值高低的基值,即把剪应力值 $\tau_0 \geq 10.0$ MPa 的地震视为高剪应力值地震,高剪应力值地震集中分布的地方,或应力等值线大于 10.0 MPa 的分布区域即为高剪应力值分布区。近年来,我们在对云南及邻区地震危险性中期预测(1~3 年左右)实践,以及“‘八五’地震预报攻关课题”中(王绍晋, 龙晓帆, 1994),把 $\tau_0 \geq 10.0$ MPa 的高剪应力值分布区作为异常区,据此对强震危险区及其近期危险性作出了预测。经实际检验,有一定的预报效果,尤其是在强震发生地点的预测方面,效果更为明显。因此,将 $\tau_0 \geq 10.0$ MPa 的高剪应力值分布区,作为环境剪应力动态变化的异常区,其与强震孕育过

程的关系是明显的。

对云南及邻区 1986 年 1 月～1997 年 6 月环境剪应力场空间分布进行综合分析, 表明其空间分布具有以下基本特征:

(1) 大多数地震剪应力值小于 10.0 MPa. 统计表明, 在每年计算得到剪应力值的地震中, $\tau_0 \geq 10.0$ MPa 的地震占总数的 8%～21%, 平均为 15%.

(2) 对云南及邻区多年环境剪应力场空间分布作综合分析. 图 1,2 分别给出 1987～1992 年和 1993～1996 年环境剪应力值 ≥ 10.0 MPa 的等值线空间分布图. 由图上可以看出, 大部分区域处在应力等值线小于 10.0 MPa 的低环境剪应力状态, 在此背景上相间分布着若干高剪应力值分布区.

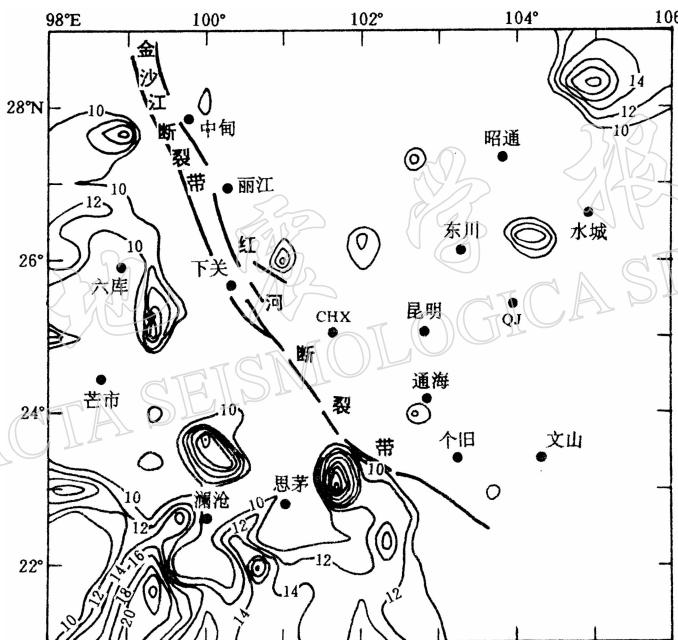


图 1 云南及邻区 1987～1992 年剪应力 (≥ 10.0 MPa) 等值线空间分布图

(3) 由图 1, 2 还可以看出, 大致以金沙江断裂带和红河断裂带为界, 云南及邻区环境剪应力场空间分布, 呈现出西高东低的显著差异. 西部地区环境剪应力值明显较东部地区高, 滇西南地区、尤其是澜沧江断裂带以西明显偏高. 环境剪应力场呈现出自西向东逐渐降低的趋势.

云南及邻区近期环境剪应力场空间分布特征, 是近期印度板块对欧亚板块的碰撞挤压, 沿缅甸缝合线侧面挤压剪切作用加剧的反映. 根据我们对我国西南地区地壳构造运动多层次动力过程与强震活动关系的研究, 认为印度板块对欧亚板块的碰撞挤压, 作为一级层次的构造运动力源对滇西南地区产生显著的直接作用, 其动力作用过程即是印度板块沿缅甸缝合线侧面挤压剪切作用过程^①. 云南及邻区以金沙江断裂带和红河断裂带为界, 西部地区出现的剪应力场空间分布的高值状态, 尤其是滇西南地区的高剪应力分布, 是该层

① 王绍晋, 龙晓帆. 1996. 西南地区多层次动力过程与强震活动研究. 地震联合基金资助课题(94149)研究报告.

次构造动力源作用过程的结果。环境剪应力场出现的西高东低分布状态,与距离板块边界动力源的远近及其作用的强烈程度有关。强震活动的时空特征是构造动力作用强烈程度的直接反映。强震活动性分析表明,此种动力作用在本世纪出现过两次:第1次大致出现在1941年左右,它造成了1941~1955年西南地区的强震活动高潮(王绍晋等,1996);第2次是在1988年前后出现的西南地区最近一次强震活动高潮,这次活动高潮至今尚未结束。云南及邻区环境剪应力场空间分布格局,与西南地区地壳构造运动的多层次动力过程相关。

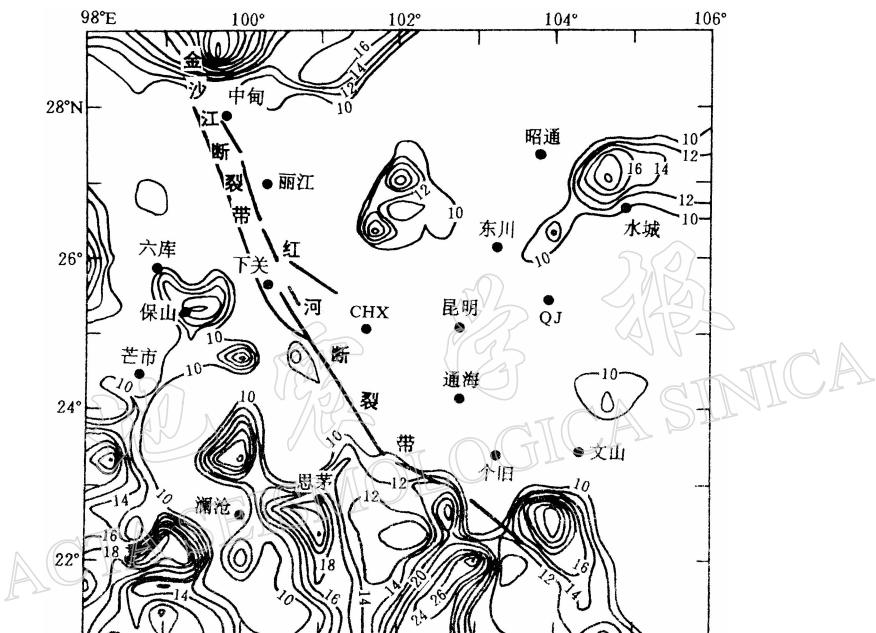


图2 云南及邻区1993~1996年剪应力(≥ 10.0 MPa)等值线空间分布

3 云南及邻区近期环境剪应力场动态图象与强震活动

研究表明,强震孕育的各个发展阶段,强震潜在震源区及其周围地区,环境应力场时空分布呈现出明显的动态变化过程(王绍晋,龙晓帆,1996)。研究还表明,一次强震后在震区及周围一定地域,一段时间内应力场会出现相应的调整变化,之后逐渐回复到正常状态。1998年11月滇西南发生了澜沧-耿马7.6和7.2地震,因此,我们要区分出澜沧-耿马地震后,云南及邻区环境应力场基本趋于正常状态的时间,作为分析近期应力场变化的起始,由此往后,分析研究与近期3次强震活动有关的环境剪应力场动态变化过程。

我们采用数值分析方法,计算出云南及邻区1989年1月~1997年6月,共8年零6个月时间中小地震($2.0 \leq M_L \leq 4.9$)的 τ_0 值,每3个月做出一张环境剪应力等值线分布图。为了突出高应力分布,图面上只给出大于5.0 MPa的等值线分布。限于篇幅,本文只给出部分有代表性的图幅。

资料显示,1988年11月6日澜沧-耿马地震后,至1990年6月大约一年半时间内,震区及周围较大空间范围,环境应力场呈现出较急剧的调整变化状态。此种调整变化以澜沧-耿马震区及其附近为主体,同时在滇西的泸水、保山一带,以及滇东的东川、贵州水城一

带都相继出现高剪应力值分布区。图3给出1989年7~9月和1990年4~6月两个时段的环境剪应力等值线分布图,显示出这一期间云南及邻区环境剪应力场动态变化的典型状态。地震活动表明,在此期间澜沧-耿马震区仍然有5~6级强余震发生,在震区附近的双江等地有5级地震发生,在滇西泸水、滇东嵩明均有5级地震发生。此种现象表明,一次大震之后,在震区及周围较大空间范围内,会出现环境剪应力场较急剧的调整变化,在某些局部区域出现应力场增强过程,这些区域往往有中强地震发生。

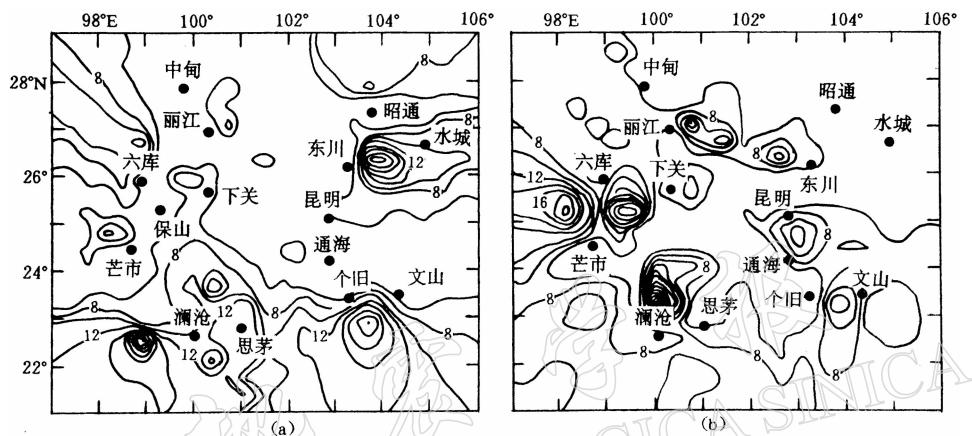


图3 云南及邻区1989年7~9月(a)和1990年4~6月(b)
剪应力(>5.0 MPa)等值线空间分布图

在经历了一年半左右环境剪应力场较急剧的调整变化之后,从1990年7月至1991年6月的大致一年时间内,云南及邻区环境剪应力场处在相对低值状态,绝大部分区域应力等值线小于10.0 MPa。图4是1990年7~9月和1991年4~6月剪应力等值线分布图,它明显显示出大范围的相对低应力状态。

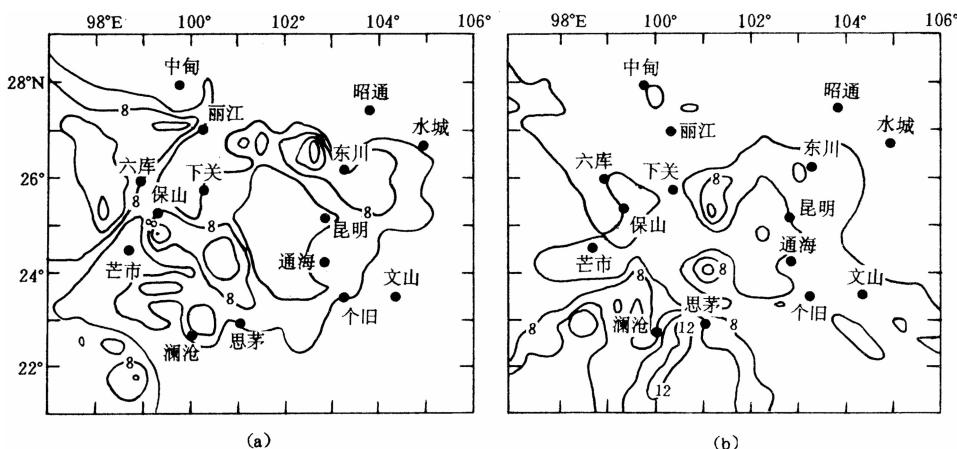


图4 云南及邻区1990年7~9月(a)和1991年4~6月(b)
剪应力(>5.0 MPa)等值线空间分布图

资料显示,大致从1991年7月起,云南及邻区进入了又一轮环境应力场增强过程。图

5 是 1991 年 7~9 月剪应力等值线分布. 与 1991 年 4~6 月(图 4b)时段剪应力等值线分布比较, 环境剪应力场明显增强. 整个增强过程有以下特点:

(1) 以金沙江断裂带和红河断裂带为界, 以西地区环境剪应力场显著增强, 滇西南地区尤为突出. 进一步突出了云南及邻区环境剪应力场西高东低的空间分布特征;

(2) 滇西南、滇西和滇西北是环境剪应力场增强最为显著的地区. 同时, 滇东、滇东北地区也显示出环境剪应力场的明显增强. 云南及邻区同时出现多个环境剪应力场增强区域. 实际上, 它们是强震孕育多源场的显示. 以后的地震活动表明, 在环境剪应力场反复增强区域, 几乎都有 5 级以上强震发生;

(3) 整个环境剪应力场增强过程自 1991 年 7 月至 1997 年 3 月, 持续了近 6 年时间, 经历了环境剪应力场高—低—高的多次反复增强过程;

(4) 在整个环境剪应力场增强过程中, 云南及邻区发生了 7 级地震 2 次, 6 级地震 5 次(其中包括丽江地震序列 6 级最强余震 1 次), 5 级地震多次. 显然, 整个剪应力场增强过程既包括了与多次强震孕育有关的剪应力场增强过程, 又包括了每一次强震发生后剪应力

场的调整变化过程, 这就使得环境剪应力场动态变化图象更加复杂化. 尽管如此, 与孟连西中缅边境和丽江两次 7 级地震及武定 6.5 级地震的孕育、发生有关的环境剪应力场动态变化过程, 仍然可以区分出来.

4 3 次强震孕育、发生的环境剪应力场动态变化过程

(1) 滇西南及附近地区, 从一开始就出现了明显的环境剪应力场高值状态, 并且在高低起伏变化中多数时段都处在高剪应力值环境中. 反映这里是环境剪应力场反复持续增强区域, 剪应力等值线分布密集, 出现剪应力等值线梯级陡变带. 该区域是云南及邻区近期环境剪应力场增强最显著、量值最高、持续时间最长、高低起伏变化最明显的区域. 这里近期先后发生了 1992 年 4 月 23 日中缅边境 $M_s=6.7, 6.8$ 强震、1993 年 1 月 27 日普洱 $M_s=6.3$ 强震和 1995 年 7 月 12 日孟连西中缅边境 $M_s=7.3$ 大震. 值得注意的是, 1992 年 4 月 23 日中缅边境两次 6 级地震, 以及 1993 年 1 月 27 日 6.3 级普洱地震后, 滇西南地区, 乃至滇西地区, 环境剪应力场不但没有在调整变化中减弱, 反而在以后的多个时段出现反复增强, 直到 1995 年 7 月 12 日 7.3 级地震发生. 图 6 是 1993 年 4~6 月、1994 年 4~6 月和 1995 年 4~6 月 3 个时段环境剪应力等值线分布, 它们清楚地反映出环境剪应力场的反复增强过程. 7.3 级大震后, 该区域环境剪应力场高值状态大约持续了一年半的时间, 从 1997 年 4 月后, 呈现出相对低剪应力状态. 图 7 为 1997 年 4~6 月剪应力等值线分布图,

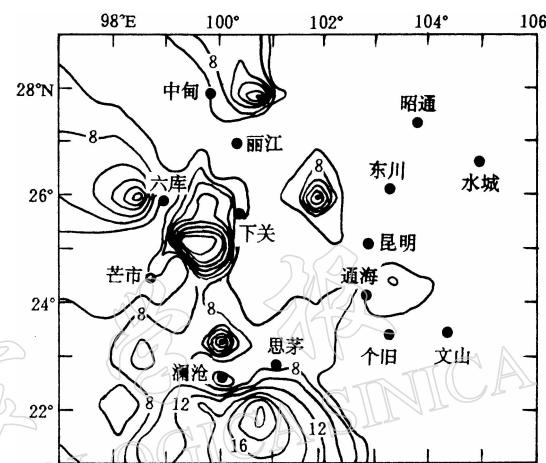


图 5 云南及邻区 1991 年 7~9 月剪应力
(>5.0 MPa)等值线空间分布图

显示出云南及邻区环境剪应力场相对低值状态.

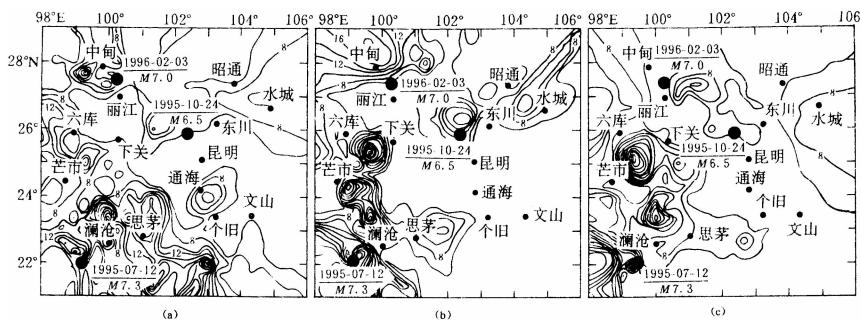


图 6 云南及邻区 1993 年 4~6 月(a)、1994 年 4~6 月(b)和 1995 年 4~6 月(c)剪应力(>5.0 MPa)等值线空间分布图

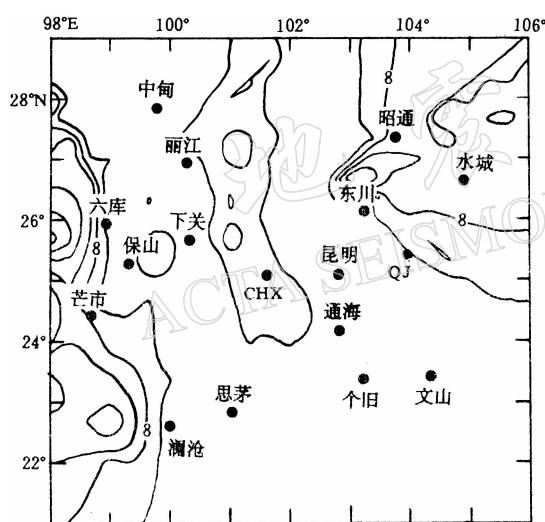


图 7 云南及邻区 1997 年 4~6 月剪应力(>5.0 MPa)等值线空间分布图

状态增强了许多，并且在多个时段出现反复增强过程。1994 年 4~12 月，1995 年 4 月~10 月 23 日等多个时段，在武定 6.5 级地震震区及附近，多次出现环境剪应力场高值分布状态，显示出武定 6.5 级地震前环境剪应力场的反复增强过程。图 8 给出了 1994 年 10~12 月和 1995 年 8 月~10 月 23 日两个时段剪应力等值线分布。它们和图 6 几个时段剪应力等值线分布，清楚地反映出武定 6.5 级地震前震区及附近环境剪应力场多次反复增强过程。

(4) 滇西和滇西北地区，1992 年 1 月~1996 年 1 月丽江地震前，发生过 5 级地震 4 次，这与该地区环境剪应力增强过程密切相关。在中甸、丽江一带，即后来发生丽江 7.0 级地震的区域，多次显示为高剪应力值分布区。尤其值得注意的是，1993 年 7 月 17 日中甸发生 5.8 级地震后，该区域环境剪应力场不但没有减弱，反而出现多时段环境剪应力场增强。其中中甸 5.8 级地震后至 1994 年 6 月的一年内，中甸—丽江一带环境剪应力场增强最

(2) 在此期间，云南及邻区同时出现了大范围环境剪应力场的增强过程，除了滇西南高值区外，滇西北、滇西、滇东和滇东北都出现了剪应力值分布的高值区。其中有的区域为反复持续增强区，剪应力等值线密集分布，为等值线梯级陡变带。在以后的地震活动中，这些区域往往有 5 级以上强震发生。

(3) 滇东北、滇东地区也相继出现了环境剪应力场的高值分布区，突破了云南东部地区环境剪应力场相对较低的空间分布格局。虽然它的高值区最高量值不及滇西南、滇西和滇西北高，高值区的持续时间不及滇西南、滇西和滇西北长，高值区的分布区域也不及滇西南、滇西和滇西北大，但它较该区域的正常

为显著。图 6, 8 多个时段剪应力等值线分布, 同样显示出丽江 7.0 地震前, 震区及其附近环境剪应力场增强过程。

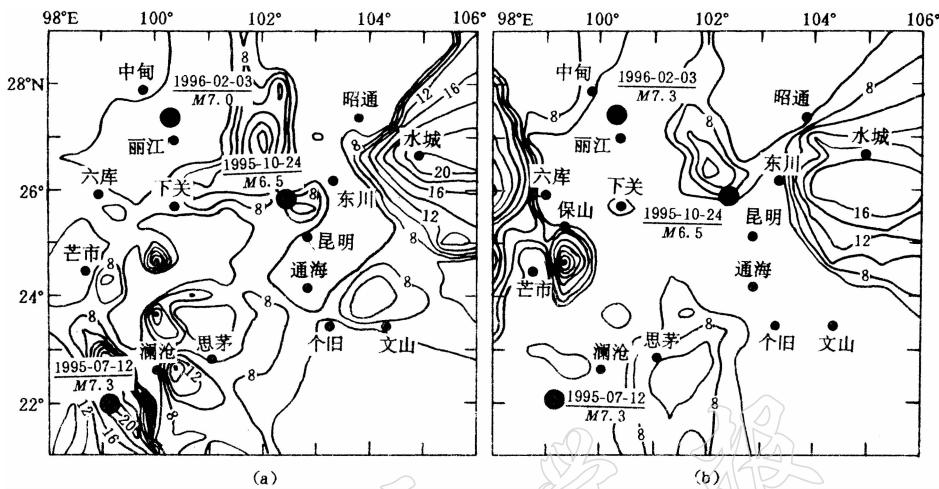


图 8 云南及邻区 1994 年 10~12 月(a)和 1995 年 8~10 月(b)
剪应力(>5.0 MPa)等值线空间分布图

(5) 以上资料表明, 滇西南、滇西北和滇东 3 个区域环境剪应力场增强过程, 在区域大小、剪应力强度、增强时段的持续时间和变化起伏的次数等方面均有明显的差别, 这些差异可能与未来所发生地震的大小有一定关系。

(6) 孟连西中缅边境 7.3 级地震、武定 6.5 级地震和丽江 7.0 级地震之后, 云南及邻区大范围内出现环境剪应力场的调整变化。几次强震震区及附近区域环境剪应力场维持在相对较高值, 此种状态一直持续到 1997 年 3 月左右; 1997 年 4 月后, 云南及邻区转入环境剪应力场相对低值状态(图 7)。应该说, 孟连西中缅边境 7.3 级地震后, 云南及邻区环境剪应力场空间分布处在非常复杂的状态, 它既包含强震后环境剪应力场的调整变化过程, 又反映出与后来所发生的强震孕育有关的环境剪应力场的增强过程。

5 结论和讨论

(1) 强震孕育、发生的各个阶段, 震区及周围一定空间范围, 环境剪应力场的增强和调整变化是一个复杂的过程, 其动态变化图象可以揭示此种演化过程。通过对环境剪应力场动态图象的追踪分析, 可以为强震发生的中、短期预测, 尤其是强震发生地点的预测, 提供环境应力场变化的前兆信息。

(2) 强震往往发生在区域环境剪应力场具有高值分布背景的地方, 云南 3 次强震均发生在长期环境剪应力较周围地区相对高的区域。

(3) 强震孕育过程中, 潜在震源及附近地区为环境剪应力场明显增强区域, 它是高剪应力值分布区, 应力等值线分布密集, 往往是应力等值线梯级陡变带。

(4) 强震潜在震源区, 往往是近期环境剪应力反复多次增强的区域, 它是近期多次高剪应力值分布区, 空间大小相对固定, 高应力值状态持续时间较长, 较周围地区变化急剧。

环境剪应力场增强区域，往往经历了高—低—高的多次起伏变化过程。那些仅在个别时段偶然出现的高剪应力值分布区，往往不是强震危险区。通海附近在 1993 年 4~6 月曾出现过高剪应力值分布区（图 6a），但往后多年一直为低剪应力值状态，近年来这里没有发生过 5 级以上地震。

（5）强震通常并不发生在高剪应力分布区中应力值最高的地点，而往往发生在剪应力等值线梯度陡变带上。

（6）地壳构造运动具有区域性特征，往往在相当大的地域产生影响，造成构造应力场在大范围内调整变动，相继出现多处环境应力场增强区域，形成地震孕育的“多源场”；地壳构造运动还具有时效性，往往在相当长的时期产生构造动力作用，在相关地域形成构造应力场的反复变化和多期增强过程；地壳构造运动还具有层次性。由于地壳是由一系列具有层次结构的块体组成的不稳定的非线性系统，每一级块体可能隶属于上一级更大的块体，而同时又可能包含次一级更小的块体。在地壳构造运动过程中，块体与块体之间及其边界断裂的相互作用，形成了多层次动力系统，使得地壳构造运动在时序发展进程中出现层次性。因此，环境应力场的动态变化和增强过程，也表现出具有层次结构。

（7）分析表明，环境剪应力场近期反复出现高值、明显增强的区域，是发生强震的危险地区。环境剪应力场动态变化区域的大小、剪应力强度的最高值，以及随时间进程剪应力强度变化的幅度大小等因素，可能都与未来发生地震的强度有关。环境剪应力场变化过程持续时间的长短，可能与未来强震发生的时间有关。这些都有待于通过对更多震例的剖析和进一步的深入研究，以期寻找出这些因素与强震孕育过程的定量关系。

参 考 文 献

- 陈培善. 1981. 分析地震波估算地壳内的应力值. 地震学报, 3(3): 251~263
 陈培善, 白彤霞, 肖磊. 1995. 根据环境应力场寻找中国大陆地区的潜在震源区. 地震学报, 17(3): 294~304
 陈培善, 谷继成, 李文香. 1977. 从断裂力学观点研究地震的破裂过程和地震预报. 地球物理学报, 20(3): 185~201
 陈培善, 肖磊, 白彤霞, 等. 1998. 美国南加州的构造环境剪应力场和地震危险区. 地震学报, 20(2): 128~136
 陈培善, 卓钰如, 金严, 等. 1978. 唐山地震前后京津唐张地区的应力场. 地球物理学报, 21(1): 34~58
 王绍晋, 龙晓帆. 1994. 强震危险区应力场环境动态分析与近期危险性预测. 中国地震, 10(增刊): 39~55
 王绍晋, 龙晓帆. 1996. 西南地区强震活动的群体特征. 地震研究, 19(1): 9~14