

朱 航, 闻学泽. 1973~1976 年四川松潘强震序列的应力触发过程. 地球物理学报, 2009, 52(4): 994~1003, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.016

Zhu H, Wen X Z. Stress triggering process of the 1973 to 1976 Songpan, Sichuan, sequence of strong earthquakes. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(4): 994~1003, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.016

1973~1976 年四川松潘强震序列的应力触发过程

朱 航¹, 闻学泽^{2,1}

1 四川省地震局, 成都 610041

2 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

摘 要 本文计算和研究了 1973~1976 年四川松潘 4 次强震组成的序列引起的库仑应力变化图像, 分析了由该序列各次事件引起的近场应力变化及其与后续强震发生以及余震分布的关系, 同时分析了该序列引起的远场应力变化与随后 25 年区域中-强地震活动的关系. 结果显示: 1973 年 8 月 11 日松潘黄龙 6.5 级地震导致虎牙断裂带中段上库仑应力的显著增加并触发了 1976 年 8 月 16 日的 7.2 级地震; 此后, 又沿断层向南相继触发了 1976 年 8 月 22 日的 6.7 级地震和 8 月 23 日的 7.2 级地震. 该序列的绝大多数余震主要发生在主震发震断层的近场库仑应力增加区. 另外, 在该强震序列发生后的 25 年中, 在距该序列发震断层中部约 200 km 范围内, 6 次 5.0~6.6 级地震均发生在由该序列引起的远场、微量的库仑应力变化增加区中.

关键词 松潘强震序列, 静态应力触发, 库仑应力变化, 近场, 远场

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.016

中图分类号 P315

收稿日期 2008-05-21, 2008-07-02 收修定稿

Stress triggering process of the 1973 to 1976 Songpan, Sichuan, sequence of strong earthquakes

ZHU Hang¹, WEN Xue-Ze^{2,1}

1 Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

2 Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

Abstract In this paper, the patterns of Coulomb stress change induced by a sequence of 4 strong earthquakes occurred in Songpan County, Sichuan province in 1973 and 1976 are calculated and studied. We analyze the near-field stress changes induced by each event in the sequence and their relationship to the occurrence of the succeeding events and to the aftershock distribution. Moreover, we evaluate the far-field effect of stress change that was also induced by this sequence on the regional seismicity of moderate-strong earthquakes occurred in the following 25 years. Our results suggest, firstly, that the M_s 6.5 Huanglong, Songpan earthquake of Aug. 11, 1973 raised Coulomb stress on the mid-segment of the Huya fault and then triggered the M_s 7.2 event of Aug. 16, 1976, and further successively triggered the M_s 6.7 event of Aug. 22, 1976 and the M_s 7.2 event of Aug. 23, 1976 southward along the fault. Secondly, we find that most aftershocks of the sequence occurred in areas where Coulomb stress has been increased along the near-field zones of the seismogenic fault-segments of the mainshocks. Thirdly, in the 25 years following the sequence and within an about 200 km radius area centered at the mid-segment of the seismogenic Huya fault of the sequence, 6 events with magnitudes 5.0 to 6.6 all occurred in those far-field

zones with very small amount of increase in Coulomb stress induced by the sequence.

Keywords Songpan sequence of strong earthquakes, Static stress triggering, Coulomb stress change, Near-field, Far-field

1 引言

决定地震发生过程的两个最重要的因素是区域地壳应力及其相对变化^[1]. 虽然难以对地壳应力值直接进行精确测量,但是利用库仑应力模型和数值模拟方法可以估计应力的相对变化. 1992 年 6 月 28 日在美国南加州发生了 Landers $M_w 7.3$ 地震,仅过了 3 小时 26 分钟, Landers 主震破裂以西约 20 km 处发生了 Big Bear $M_w 6.5$ 地震; 1999 年 10 月 16 日在 Landers 地震震中东北 20 km 处再次发生 Hector Mine $M_w 7.1$ 地震. 这些地震在时间和空间上相对集中的现象引起地震学家研究断层之间相互作用和地震触发过程的兴趣. 已通过库仑应力计算发现 Landers 地震在 Big Bear 地震断层上产生了很大的应力增量, Hector Mine 地震也发生在 Landers 地震引起的应力增加区^[2~4]. 此例的研究有力地表明,一次地震将降低发震断层的应力水平,但同时可能增加相邻断层(段)的应力水平,后续地震则可能发生在由前一次地震应力加载的相邻断层(段)上. 这些已促使科学家们对相邻断层(段)之间的相互力学作用与后续强震发生以及时间上提前与滞后的关系等问题开展研究^[5~9]. 例如,马瑾等^[8]通过岩石力学实验,验证了相邻断层之间的相互力学作用的促震和减震效应; 闻学泽和马胜利^[9]则基于历史和现代地震资料分析了大地震破裂促使相邻断层段强震提前发生的实例.

2001 年 11 月 14 日我国昆仑山口西发生 $M_s 8.1$ 地震后,沈正康等^[10]研究了东昆仑断裂带历史大地震引起的应力转移和断层(段)之间的相互力学作用,结果表明,1937 年以来沿该断裂带发生的 4 次 $M_s \geq 7$ 地震均造成 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震断层面上库仑破裂应力的增加. 万永革等^[11]研究了青藏高原东北部 1920 年以来由地震破裂引起的积累库仑破裂应力的演化,发现在 20 次 $M_s \geq 7$ 地震中有 17 次发生在库仑破裂应力变化为正的区城,触发率达 85%. Papadimitriou 等^[12]研究了自 1893 年以来我国四川鲜水河及附近断裂带上库仑破裂应力的演化,发现研究区的 $M_s \geq 6.5$ 强震均发生在库仑破裂应力变化增加的断层段上,他们还基于断层平

均滑动速率计算了直到 2025 年的库仑破裂应力分布图像,并评估了未来可能发生强震的断层段. 吴小平等^[13]研究了 1988 年 11 月 6 日云南澜沧—耿马 $M_s 7.6, 7.2$ 地震产生的完全库仑破裂应力变化的时空演化图像,证实第 1 次主震触发了第 2 次主震; 他们对 1976 年 5 月 29 日云南龙陵 $M_s 7.3, 7.4$ 地震产生的完全库仑破裂应力变化的研究也得到相似的结论^[14]. 因此,研究由地震破裂引起的库仑应力变化及其分布可以合理解释特定区域的强震成因,有助于判定潜在的强震危险性,同时,也是近十多年来国际地震构造力学与地震预测探索的重要领域之一^[2~16].

1976 年 8 月 16 日至 23 日,四川省松潘—平武交界地区的虎牙断裂带中-南段发生了由 $M_s 7.2, 6.7, 7.2$ 级三次地震组成的强震群,此前的 1973 年 8 月 11 日还在虎牙断裂带的北段发生松潘黄龙 $M_s 6.5$ 强震. 这四次强震在空间沿 NNW-近 SN 向虎牙断裂带由北而南分布,形成本文所称的“1973~1976 年松潘强震序列”(图 1). 我们关心的是: 1976 年 8 月为何在一周之内连续发生了由 $M_s 7.2, 6.7$ 和 7.2 三次地震组成的强震群? 其发生与 1973 年 $M_s 6.5$ 地震有关吗? 这种沿虎牙断裂带由北而南的破裂迁移是否属于应力触发的结果? 另外, 1973~1976 年松潘强震序列的发生对周边地区的中、强地震活动有何影响? 等等. 以往研究的认识中暗含了这 4 次强震沿断裂的迁移可能与应力触发有关^[17], 但一直没有得到证明. 本文拟利用库仑应力分析的研究思路与方法,分析 1973~1976 年松潘强震序列引起的应力变化图像,证明是否存在应力触发的过程,以对该强震序列中各次破裂沿断裂带的迁移现象做出合理解释; 同时,拟由库仑应力的空间分布进一步分析该强震序列对周边地区中、强地震活动的可能影响.

2 原理、方法与计算程序

关于库仑破裂准则以及地震的应力触发理论已有大量论述^[2~6, 15, 16]. 简而言之,当地壳中先存断层面上积累的应力超过断层带的滑动阻抗强度时,沿断层将会发生新的摩擦滑动或者“破裂”. 库仑破裂

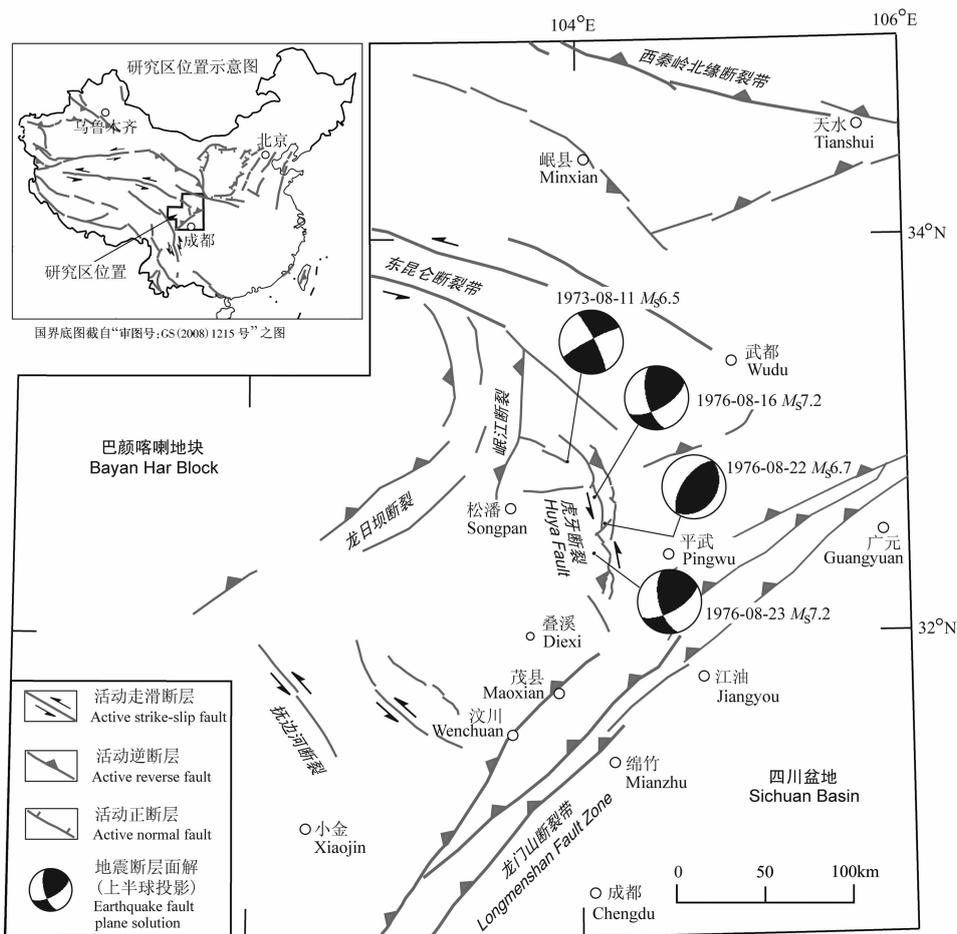


图 1 1973~1976 年四川松潘强震序列 4 次强震的断层面解及区域活动构造环境
Fig. 1 A map of the fault plane solutions and regional active tectonic environment of the 1973 to 1976 sequence of 4 strong earthquakes in Songpan, Sichuan

准则确定了岩体中先存断层重新发生摩擦滑动或者“破裂”的应力条件^[1, 18]. 断层上的库仑应力若发生改变, 将影响该断层重新滑动或破裂的失稳条件, 从而增加或缩短断层发生潜在破裂所需的时间^[2, 3]. 断层趋于破裂的过程可以使用库仑应力变化 $\Delta\sigma_f$ 进行数值描述:

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau_s + \mu' \Delta\sigma_n, \quad (1)$$

式中, $\Delta\tau_s$ 为断层面的剪切应力变化(沿滑动方向为正), $\Delta\sigma_n$ 为正应力变化(张应力为正), μ' 为断层面的摩擦系数.

当一次强震发生时, 发震断层的应力将在一定程度得以释放, 同时, 地震时的同震位错会引起附近区域的静态应力变化. 当引起的相邻断层(段)上的库仑应力变化为正值时, 该断层(段)重新发生黏滑(另一次地震)的可能性增大, 或者会很快发生另一次地震, 这种情况即是地震的应力触发作用; 当引起

的相邻断层(段)上的库仑应力变化为负值时, 该断层(段)重新发生黏滑(地震)的可能性降低. 一般称库仑应力变化的正值区域为应力触发区, 负值区域为应力影区^[2, 3, 6, 15]. 引起应力变化的地震和破裂面称为“源地震”和“源断层”, 区域中的其他先存断层称为“接受断层”. 根据 Okada^[16] 提出的均匀各向同性弹性半空间模型, 可由源断层的同震位错计算接受断层的库仑应力变化量. 本文采用 King 等^[2] 推导的库仑应力变化公式以及发展的相关算法, 并采用远田晋次(Shinji Toda) 等开发的 Coulomb3.1 软件^[20] 进行库仑应力变化的计算. 计算中地壳的剪切模量取 3.3×10^{10} Pa, 泊松比取 0.25. 另外, King 等曾讨论过(1)式中 μ' 的取值问题, 发现改变 μ' 值对库仑应力变化图像影响不大^[2], 本文沿用其 $\mu' = 0.4$ 的经验取值.

由以上库仑应力原理及 Coulomb3.1 软件计算

的、接受断层上的库仑应力变化量,其正负号和大小取决于源断层的几何特征(断层走向、倾角、滑动角)与源地震的同震位错,以及接受断层的几何特征及断层摩擦系数^[2].

研究主震发生后应力变化与余震空间分布的关系基于一个假说,即小地震发生在由区域应力和主震同震应力变化共同作用促使其破裂的最优取向断层面上^[2, 3]. 为了分析 1973~1976 年松潘强震序列引起的应力变化与余震分布是否存在相关性,我们利用 Coulomb3.1 软件中提供的算法与功能,假设源地震发生以后,源断层附近存在大量不同走向的、可能发生余震的小断层,选择能使库仑应力变化量达到最大的最优取向断层面作为接受断层再进行计算;此时的断层面最优取向不仅与源断层的同震应力变化有关,还与先存的区域应力作用方式有关.

根据以上方法与程序,我们计算了由 1973~1976 年松潘强震序列引起的静态库仑应力变化,并由应力变化图像研究该序列中的强震触发以及余震的空间分布,并进一步分析该强震序列对周边地区随后 25 年内的中、强地震活动的影响.

3 发震断层与同震位错模型

本文研究的 1973~1976 年松潘强震序列发生在 NE 向龙门山断裂带和 NW 向东昆仑断裂带所围限的巴颜喀喇地块^[19]的东部顶角区,震中位于 NW-近 SN 向的虎牙断裂带上(图 1). 我们综合已有地质资料并进行卫星影像解译表明,虎牙断裂带

在地表由两条大体平行的活动断层组成,全长约 80 km. 根据震源机制解^[16, 21],松潘黄龙以北,虎牙断裂带的北段走向 NW,以左旋走滑运动为主;黄龙以南,虎牙断裂带的中、南段为 NNW-近 SN 走向,表现为左旋走滑兼逆冲的运动方式. 该断裂带的中、南两段之间被一北东走向的断裂(小河断裂)隔开,后者表现为逆冲型运动.

为了从库仑应力变化的角度分析上述松潘强震序列 4 次强震沿虎牙断裂带由北向南依次发生的相互联系并证明是否存在触发作用,我们在综合多种资料的基础上,获得这 4 次地震事件的发震断层产状以及同震位错参数(表 1). 其中,1973 年 8 月 11 日松潘黄龙 M_s 6.5 地震的发震断层位置、走向、错动方式等参数,是根据极震区的位置与等震线长轴^[21]、成尔林^[22]给出的震源机制解、以及 Jones 等^[17]重新定位的余震分布等综合判定的,相应的同震位错量由闻学泽^[23]建立的走滑型地震断层的经验公式估计:

$$\ln(u \times l) = 2.33M_s - 5.53, \quad (2)$$

式中, $u \times l$ 是同震平均位错 u 与破裂长度 l 的乘积(单位 m^2), M_s 是面波震级. 松潘强震序列中的 1976 年 8 月 7.2 级震群三次主震的发震断层产状、错动方式及滑动角、破裂长度等参数取自 Jones 等^[17]给出的震源机制解以及分时段重新定位的余震分布,同震平均位错也取自他们由地震矩和破裂面积估计的结果. 松潘强震序列 4 次地震的震源机制解参见图 1,相应的破裂范围以及重新定位的余震分布参见图 2.

表 1 用于计算的松潘强震序列 4 次事件的发震断层产状及同震位错参数

Table 1 Seismogenic fault attitudes and coseismic slips of 4 events in the Songpan sequence of strong earthquakes

事件		震中位置		发震断层产状			破裂长度 (km)	滑动角(°)	发震断层 错动方式	走向滑动 (m)	倾向滑量 (m)
年-月-日	M_s	北纬	东经	走向(°)	倾向	倾角(°)					
1973-08-11	6.5	32°56'	103°54'	153.5	SW	81	15	5	左旋走滑	1.0	0.1
1976-08-16	7.2	32°43'	104°05'	165	SWW	63	30	40	左旋逆冲	1.1	0.9
1976-08-22	6.7	32°37'	104°09'	215	NW	60	12	90	逆冲	0	1.2
1976-08-23	7.2	32°29'	104°05'	165	SWW	65	22	40	左旋逆冲	1.1	0.9

注:参数来源见本节正文.

4 库仑应力变化图像与结果分析

4.1 近场库仑应力变化与强震触发

为了研究表 1 中 4 次强震破裂是否存在相继的应力触发作用以及作用的程度,本研究以虎牙断裂

带的中段为中心,取长 100 km、宽 85 km 的矩形范围作为发震断层的近场研究区. 从 Jones^[17]给出的、重新定位的余震分布看出,1973~1976 年松潘强震序列中、绝大多数地震的震源深度位于 15 km 以上. 因此,可认为本区地壳的脆性破裂向下大约止于 15 km. 本研究在库仑应力变化的计算中,将断层面

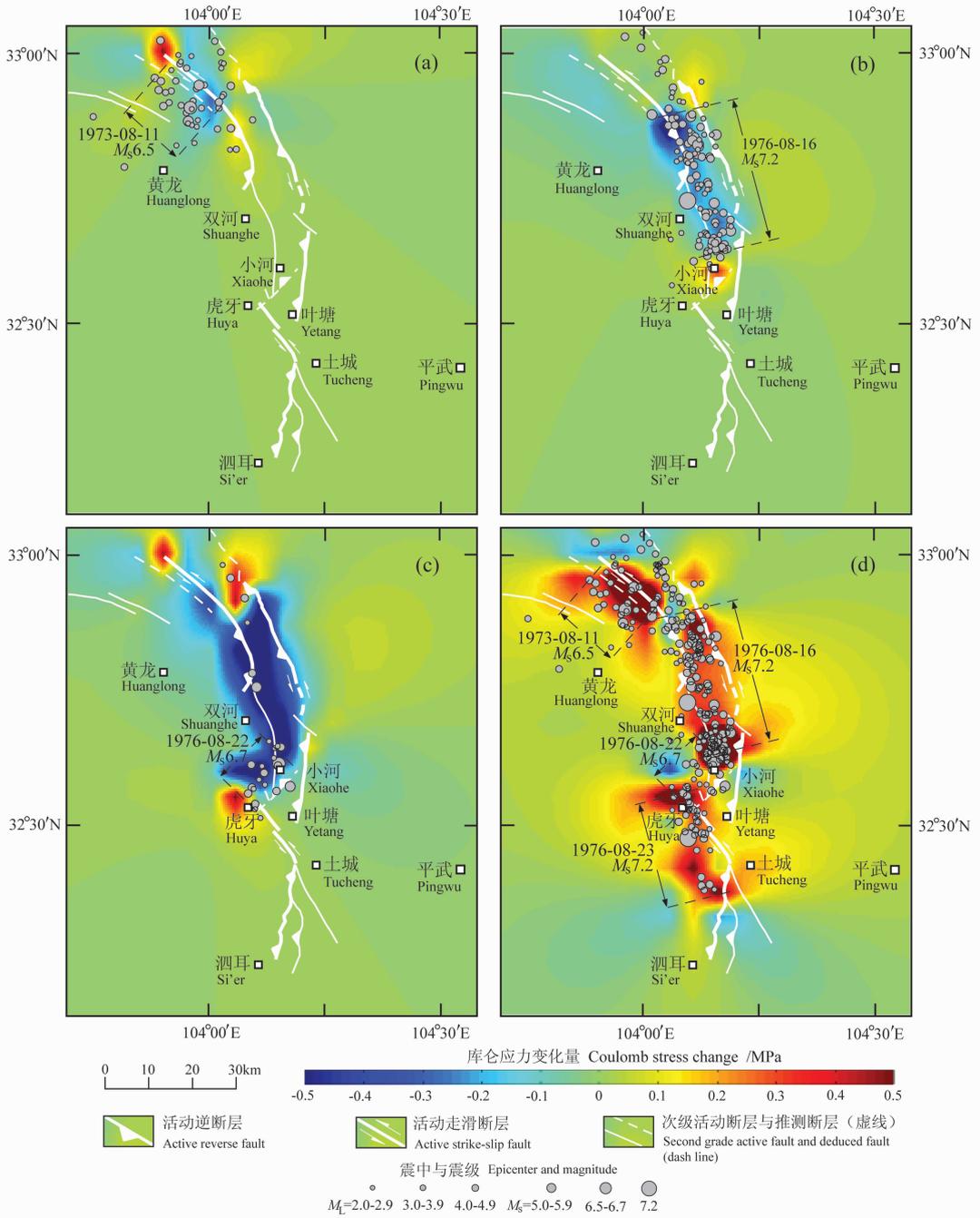


图 2 虎牙断裂带 1973~1976 年的强震破裂序列、库仑应力变化与余震图像

Fig. 2 Maps of the 1973~1976 rupture sequence of strong earthquakes along the Huya fault zone, with their Coulomb stress changes and aftershock distributions

(a) 1973 年 8 月 11 日 $M_s6.5$ 破裂及其引起的库仑应力变化(以 1976 年 8 月 16 日 $M_s7.2$ 破裂段作为接受断层); (b) 前一破裂以及 1976 年 8 月 16 日 $M_s7.2$ 破裂及其引起的库仑应力变化(以 1976 年 8 月 22 日 $M_s6.7$ 破裂段作为接受断层); (c) 前 3 次破裂及其引起的库仑应力变化(以 1976 年 8 月 23 日 $M_s7.2$ 破裂段作为接受断层); (d) 1973~1976 年 4 次地震破裂后的库仑应力变化(以最优选向断层面作为接受断层)与余震分布图像. 各图中给出由 Jones 等^[17]重新定位的、分时段的后震分布: (a) 1973 年 8 月 11 日 $M_s6.5$ 地震的余震; (b) 图 a 的余震加 1976 年 8 月 16 日 $M_s7.2$ 地震的余震; (c) 前两图的余震加 1976 年 8 月 22、23 日 $M_s6.7、7.2$ 地震的余震; (d) 图 a、b、c 的全部余震.

深度范围取地表至地下 15 km 处, 但根据 Coulomb3.1 软件的算法原理, 仅计算地表以下 8 km 深度的水

平二维库仑应力变化图像. 这符合同震位错的峰值位于发震断层面中等深度上的观点^[24].

根据表 1 给出的 4 次强震的发震断层及同震位错模型,依时间顺序分别计算每一次地震(源地震)的同震位错引起的静态库仑应力的相对变化量,并在包含有发震断层几何特征以及余震分布的地图上绘出库仑应力变化图像.如果已发生 2 次破裂,则为 2 次破裂事件引起的库仑应力变化的线性叠加,以此类推.计算中,将第一次强震发生前(1973 年 8 月 11 日前)的库仑应力变化量归为零.

图 2a 为 1973 年 8 月 11 日 6.5 级地震施加的、以 1976 年 8 月 16 日 7.2 级地震破裂段作为接受断层的库仑应力变化图像.其反映出在源断层的两端均存在库仑应力变化的高值区,北西端的应力变化最高,但由于发震断裂终止于此,故随后在发震断裂的北西方向未触发强震;然而,源断层南东端的库仑应力变化增加区基本覆盖了虎牙断裂带的其余部分,应力变化量在与源断层紧邻的虎牙断裂带中段表现为高值,并随距离的增加而减小.另外,从图 2a 看到,1973 年 8 月 11 日 6.5 级地震已经在 1976 年 8 月 16 日 7.2 级地震的潜在破裂段上触发了若干小地震.

图 2b 为 1973 年 8 月 11 日 6.5 级和 1976 年 8 月 16 日 7.2 级地震施加的、以 1976 年 8 月 22 日 6.7 级地震破裂段作为接受断层的库仑应力变化图像.其反映此时的库仑应力变化最高值区出现在 1976 年 8 月 16 日 7.2 级地震破裂的南端附近,即 NE 走向的小河断裂附近,而小河断裂刚好是 1976 年 8 月 22 日 6.7 级地震的发震断裂.

图 2c 为前 3 次强震破裂共同引起的、以 1976 年 8 月 23 日 7.2 级地震破裂段作为接受断层的库仑应力变化图像.图中可看到,从已破裂断层的南端附近开始的库仑应力变化增加区覆盖了即将发生的 1976 年 8 月 23 日 7.2 级地震的发震断层段,应力变化的高值区位于 8 月 22 日 6.7 级地震破裂的南西端以及 8 月 23 日 7.2 级地震潜在破裂的北西端.另外,虎牙断裂带东支断裂的北端也存在明显的库仑应力变化增加区,但没有触发强震,主要原因是那里已经没有相同规模的断裂,不存在发生强震的构造条件.

本小节的计算与分析结果表明,1973 年 8 月 11 日沿虎牙断裂带北西段发生 6.5 级地震时,在破裂南东端产生的库仑应力的显著增加促使约 3 年后沿 NNW 走向的虎牙断裂带中段发生 1976 年 8 月 16 日的 7.2 级地震.在后一地震破裂南端的库仑应力显著增加区内,一周后沿 NE 向小河断裂发生 1976

年 8 月 22 日 6.7 级地震,它随即又向南触发了 1976 年 8 月 23 日发生在虎牙断裂带南段的第二次 7.2 级地震.因此,1976 年四川松潘—平武间的 7.2 级震群实际上是在 8 天内沿同一断裂带发生的相继应力触发的地震序列,而其中的第一次事件又是由 1973 年松潘黄龙 6.5 级地震触发的.

4.2 近场同震库仑应力变化与余震分布

图 2d 是 1973~1976 年沿虎牙断裂带的 4 次强震破裂引起的近场库仑应力变化与余震分布图像.与图 2(a、b、c)的计算有所不同,在对图 2d 的库仑应力计算中,假设余震破裂的方式与虎牙断裂带的总体错动方式类似,即以左旋走滑破裂为主,并以最优取向断层面作为接受断层.为此,参考区域 GPS 站点位移矢量的方向及其分布^[25],取近场最大水平主压应力方向为 345° ,数值为 10 MPa ^[2].

由图 2d 看到:1973~1976 年 4 次强震的 90% 余震发生在沿虎牙断裂带近场的应力触发区内,特别是 1973 年 8 月 11 日 6.5 级和 1976 年 8 月 23 日 7.2 级地震的余震,主要分布在主震破裂段南西外侧的库仑应力显著增加区;而在应力影区,余震明显偏少或者没有余震发生,例如在叶塘附近的 NNE-近 SN 向断裂上.这表明沿虎牙断裂带近场的库仑应力显著增加对 1973~1976 年松潘强震序列的余震发生具有明显的控制作用.

4.3 远场库仑应力变化与滞后的中-强震活动

1976 年松潘强震群是巴颜喀喇地块东边界及其附近自 1933 年四川茂县叠溪 7.5 级地震后发生的最大地震.其发生以来,周缘地区至今发生 1 次 6 级以上的强震(1989 年 9 月 22 日小金北 6.6 级地震)以及若干次 5 级的中-强地震.那么,1976 年松潘强震群与周缘地区中-强地震的发生有何联系?其引起的远场断层上的库仑应力变化是否具有促震与缓震效应?针对这些问题,在本节中,我们进一步计算了由 1973~1976 年松潘强震序列引起的远场库仑应力变化,并分析其与巴颜喀喇地块东边界以及川-甘交界地区后来发生的中-强地震的关系.考虑到 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 级巨大地震的发生也引起巴颜喀喇地块东缘及川-甘交界地区一定程度的库仑应力变化^[11],本节将区域地震活动性的分析时段确定为 1973~1976 年松潘强震序列后至 2001 年 11 月 13 日.在此期间,研究区内共发生 5.0~6.6 级地震 6 次,分别距离松潘强震序列的发震断层(虎牙断裂带)100~200 km.

如图 1 所示,研究区内的活动断层主要有 NE

走向的逆断层(如龙门山断裂带、龙日坝断裂等)和 NW-NWW 走向的左旋走滑断层(如东昆仑断裂带和抚边河断裂等),以及部分近 SN 走向的逆断层(如岷江、虎牙断裂带,以及图 1 中未绘出的、在东昆仑断裂带东段附近的次级近 SN 向的断裂). 据此,本节的计算主要分别考虑将北东向逆断层和北西向左旋走滑断层作为 1973~1976 年松潘强震序列施加应力的接受断层,并根据对多条断层走向方位的加权平均结果,设定北东向接受断层的参数为:走向 225°、倾向北西、倾角 45°、滑动角 110°;设定北西向接受断层的参数为:走向 120°,倾角 90°,滑动角 0°.

图 3a 为 1973~1976 年松潘强震序列引起的、以北东向逆断层作为接受断层的库仑应力变化图像,同时绘出研究区至 2001 年 11 月 13 日、与北东向断层有关的中-强地震分布. 从图中看出,由松潘强震序列引起的库仑应力增加区和影区交替分布,其中远离源断层(虎牙断裂带)100~200 km 处,断层上的库仑应力变化量仅为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ MPa,属微量变化. 然而,在研究时段中,研究区内共发生 5 级

以上 NE 向逆冲型或逆冲-走滑型地震 3 次,全部位于微量的库仑应力增加区,而影区内无 5 级以上地震发生. 需要说明的是:1987 年 1 月 8 日的 $M_s 5.9$ 地震的发震断层已判定为位于东昆仑断裂带东段附近的次级 NNE 向逆冲-右旋断层^[26]. 因此,该地震虽然发震断层的走向偏 NNE,但依然发生在由松潘强震序列引起的、以北东向逆断层作为接受断层的远场库仑应力变化的增加区中.

图 3b 为松潘强震序列发生后,以北西向左旋走滑断层作为接受断层的库仑应力变化图像,同时绘出研究区至 2001 年 11 月 13 日、与北西向断层有关的中-强地震分布. 从图中看出,研究时段中,北西向断裂上共发生 5 级以上左旋走滑型地震 3 次,包括 1989 年 9 月小金北的 6.6 级地震. 这些地震也全部位于微量的库仑应力增加区,而影区内无 5 级以上地震发生.

在图 3 中,已将上述 6 次 5 级以上地震的断层面解标绘于相应的震中位置. 这些断层面解的参数及来源列于表 2.

表 2 松潘强震序列发震断层远场(~200 km 范围内)1976~2001 年期间发生的 5 级以上地震的断层面解

Table 2 Fault plane solutions of $M_s \geq 5$ earthquakes occurred in the far-field (an about 200 km radius area) of the seismogenic faults of the Songpan sequence of strong earthquakes

事件		震中位置		节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		发震断层 错动方式	资料 来源
年-月-日	M_s	北纬	东经	走向 (°)	倾向 (°)	倾角 (°)	走向 (°)	倾向 (°)	倾角 (°)	方位 (°)	仰角 (°)	方位 (°)	仰角 (°)		
1978-07-13	5.4	31°56'	102°57'	36	NW	75	116	SSW	59	260	34	164	10	NW 向左旋走滑 [27]	
1987-01-08	5.9	34°10'	103°14'	20	SEE	60	149	SW	43	267	9	161	61	NNE 向逆右旋 [26]	
1989-03-01	5.0	31°30'	102°26'	78	SSE	74	342	NEE	70	129	26	30	30	NW 向左旋走滑 [28]	
1989-09-22	6.6	31°33'	102°23'	69	NW	78	348	NE	58	122	13	23	32	NW 向左旋走滑 [28]	
1999-09-14	5.0	31°36'	104°05'	29	SE	75	29	NW	15	298	29	118	60	NE 向逆冲 [29]	
1999-11-30	5.0	31°26'	104°20'	42	NW	32	316	NE	88	196	39	72	35	NE 向逆左旋 [30]	

综上,研究区内中-强地震的发生与 1973~1976 年松潘强震序列引起的远场库仑应力微量增加区存在很好的相关性,而在远场库仑应力的微量减小区(影区)内,相同时段中未发生 5 级以上地震,反映出在远离虎牙断裂带 100~200 km 处,由松潘强震序列 4 次破裂引起的微量库仑应力变化量仍然具有一定的促震或延缓地震发生的效应. 沈正康等^[10]的研究认为:当地壳系统加载到接近破裂的临界状态时,任何小量的应力增加均可能导致地震的发生. 本小节的研究结果进一步印证了沈正康等的认识.

5 讨论与结论

Jones 等^[17]对 1973~1976 年四川松潘强震序列的研究中,已暗含了这 4 次强震沿虎牙断裂迁移,可能与应力触发有关的认识,但这种认识一直没有得到有力的证明. 本文的研究通过对库仑应力变化图像的分析,很好地解释了松潘强震序列的时空特征与力学上的相互联系. 即 1973 年 8 月 11 日松潘黄龙 6.5 级地震向 1976 年 8 月松潘 7.2 级震群的发震断层(虎牙断裂带中-南段)施加了正的库仑应

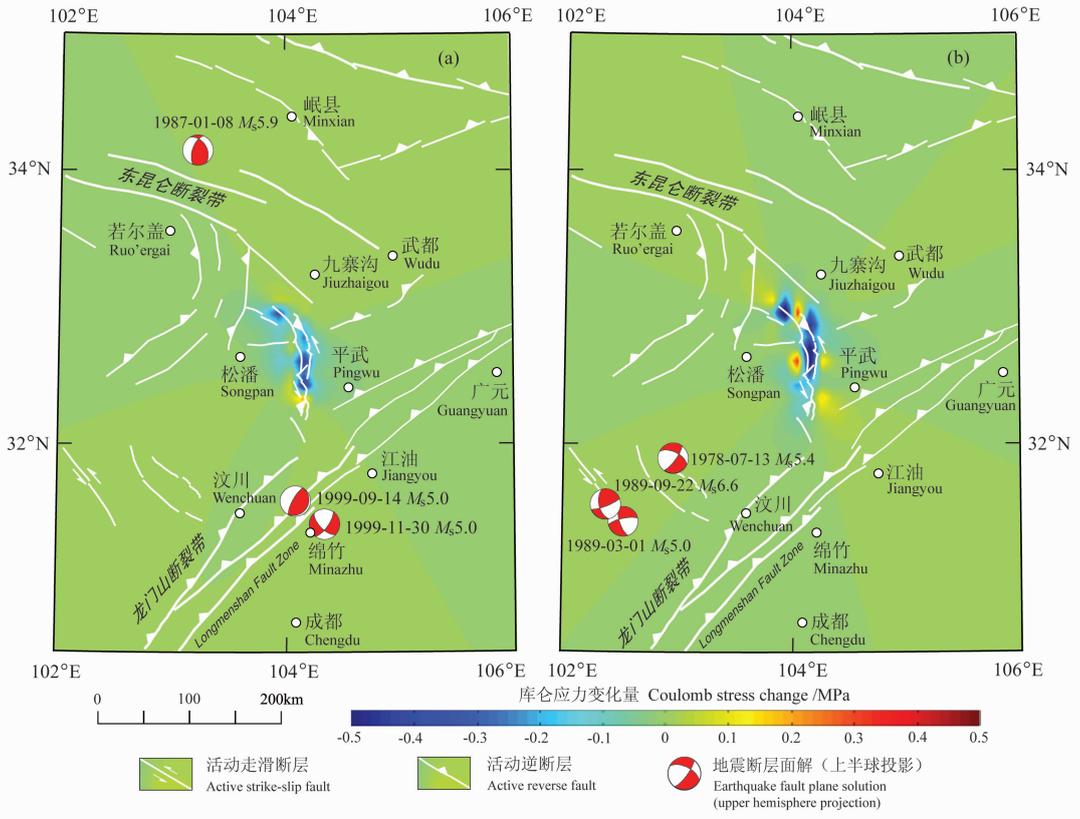


图 3 1973~1976 年松潘强震序列引起的远场库仑应力变化图像与周缘地区随后中-强地震的关系
 (a) 以北东向逆断层作为接受断层的库仑应力变化图像以及发生在此类断层上的 5 级以上地震;
 (b) 以北西向左走滑断层作为接受断层的库仑应力变化图像以及发生在此类断层上的 5 级以上地震。
 使用的中-强地震资料时段为 1976 年 8 月 24 日~2001 年 11 月 13 日。

Fig. 3 Maps of far-field Coulomb stress changes induced by the 1973 to 1976 Songpan sequence of strong earthquakes and their relationships to distribution of moderate and strong earthquakes occurred subsequently in the surrounding areas
 (a) Coulomb stress changes which use NE striking reverse faults as receiver and $M_s \geq 5$ earthquakes occurred on those faults;
 (b) Coulomb stress changes which use NW left-lateral strike-slip faults as receiver and $M_s \geq 5$ earthquakes occurred on those faults. Earthquake catalog is from Aug. 24, 1976 to Nov. 13, 2001.

力变化,从而触发了 1976 年 8 月 16 日 7.2 级地震;然后又相继触发了 1976 年 8 月 22 日的 6.7 级地震和 8 月 23 日的 7.2 级地震.1973 年松潘黄龙 6.5 级地震虽引起虎牙断裂带中-南段库仑应力显著增加,但那里在 3 年后才发生松潘 7.2 级震群,这种延迟的触发可能反映了 1973 年 6.5 级地震发生时,其破裂以南的虎牙断裂带中段尚未达到失稳状态,但由 1973 年 6.5 级地震引起的正的库仑应力变化促使那里的一次 7.2 级地震提前到 1976 年 8 月 16 日发生;当 1976 年 8 月 16 日 7.2 级地震发生时,破裂以南的两个断层段(小河断裂与虎牙断裂南段)可能均已处于临近失稳状态,因而又相继触发了 8 月 22、23 日的 6.7 和 7.2 级地震.以最优取向断层面作为接受断层计算的库仑应力变化图像很好解释了 1973~1976 年松潘强震序列的余震空间分布特征,

反映出该强震序列的余震主要发生在各次主震破裂近场的库仑应力增加区及其附近.

1973~1976 年松潘强震序列之后的 25 年中,在距虎牙断裂带 100~200 km 的范围内发生过 6 次中-强震,它们均位于松潘强震序列引起的远场、微量的库仑应力触发区内,那里的库仑应力变化量仅为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ MPa.这一现象可能在中-长期地震危险性分析中具有参考意义和应用前景,值得进一步探索.

致谢 本研究用于计算静态库仑应力变化的 Coulomb3.1 软件是由日本地质调查局的远田晋次(Shinji Toda)、美国地质调查局的 Ross Stein 和 Volkan Sevilgen、以及美国 Woods Hole 海洋学研究所的林间(Jian Lin)等科学家编制的.我们感谢美国地质调查局在网上提供使用这一软件.

参考文献(References)

- [1] Scholz C. The Mechanics of Earthquakes and Faulting. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 439
- [2] King G C P, Stein R S, Lin J. Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bull. Seismo. Soc. Amer.*, 1994, **84**(3):935~953
- [3] Stein R S. The role of stress transfer in earthquake occurrence. *Nature*, 1999, **402**(9):605~609
- [4] Pollitz F F, Sacks I S. Stress triggering of the 1999 Hector Mine earthquake by transient deformation following the 1992 Landers earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 2002, **92**(4):1487~1496
- [5] Deng J, Sykes L R. Evolution of the stress field in southern California and triggering of moderate-size earthquakes: A 200-year perspective. *J. Geophys. Res.*, 1997, **103**:9859~9886
- [6] Stein R S, Barka A A, Dieterich J H. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering. *Geophys. J. Int.*, 1997, **128**:594~604
- [7] Papadimitriou E E, Sykes L R. Evolution of the stress field in the northern Aegean Sea(Greece). *Geophys. J. Int.*, 2001, **146**:747~759
- [8] 马瑾, 马胜利, 刘力强等. 断层相互作用型式的实验研究. 自然科学进展, 2002, **12**(5):503~508
Ma J, Ma S L, Liu L Q, et al. Experimental study on patterns of fault interaction. *Progress in Natural Sciences* (in Chinese), 2002, **12**(5):503~508
- [9] 闻学泽, 马胜利. 唐山大地震对相邻断裂段地震复发的影响. 自然科学进展, 2006, **16**(10):1346~1350
Wen X Z, Ma S L. Effect of the large Tangshan earthquake on earthquake recurrence of an adjacent fault segment. *Progress in Natural Sciences* (in Chinese), 2006, **16**(10):1346~1350
- [10] 沈正康, 万永革, 甘卫军等. 东昆仑活动断裂带大地震之间的黏弹性应力触发研究. 地球物理学报, 2003, **46**(6):786~795
Shen Z K, Wan Y G, Gan W J, et al. Viscoelastic triggering among large earthquakes along the east Kunlun fault system. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, **46**(6):786~795
- [11] 万永革, 沈正康, 曾跃华等. 青藏高原东北部的库仑应力积累演化对大地震发生的影响. 地震学报, 2007, **29**(2):115~129
Wan Y G, Shen Z K, Zeng Y H, et al. Evolution of cumulative Coulomb failure stress in northeastern Qinghai-Xizang (Tibetan) plateau and its effect on large earthquake occurrence. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2007, **29**(2):115~129
- [12] Papadimitriou E E, Wen X, Karakostas V, et al. Earthquake triggering along the Xianshuihe fault zone of western Sichuan, China. *Pure Appl. Geophys.*, 2004, **161**:1683~1701
- [13] 吴小平, 虎雄林, Michel Bouchon 等. 云南澜沧-耿马 $M_s 7.6$ 地震的完全库仑破裂应力变化与后续地震的动态、静态应力触发. 中国科学(D辑), 2007, **37**(6):746~752
Wu X P, Hu X L, Bouchon M, et al. Complete Coulomb stress changes induced by the $M_s 7.6$ earthquake in Lancang-Gengma, Yunnan and triggering of aftershocks by dynamic and static stress. *Science in China* (Series D), 2007, **50**(11):1655~1665
- [14] 吴小平, 付虹, Michel Bouchon 等. 完全库仑破裂应力变化与云南龙陵震群序列的应力触发. 地球物理学报, 2007, **50**(4):1111~1122
Wu X P, Fu H, Bouchon M, et al. Complete Coulomb failure stress changes and stress triggering of Yunnan Longling earthquake sequence. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(4):1111~1122
- [15] Harris R A. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**:24347~24358
- [16] Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 1992, **82**(2):1018~1040
- [17] Jones L M, Han W, Haoksson E, et al. Focal Mechanisms and aftershock locations of the Songpan earthquakes of August 1976 in Sichuan, China. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**(B9):7697~7707
- [18] Jaeger J C, Cook N G W. Fundamentals of Rock Mechanics, 3rd ed. New York: Chapman and Hall, 1979
- [19] 张培震, 邓起东, 张国民等. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学(D辑), 2003, **33**(增刊):12~20
Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, et al. Active tectonic blocks and strong earthquake activities in the continent of China. *Science in China* (Series D), **46**(Suppl.):13~24
- [20] <http://quake.usgs.gov/research/deformation/modeling/coulomb/index.html>
- [21] 四川地震资料汇编编辑组编. 四川地震资料汇编(第二卷). 成都:四川人民出版社, 1981. 1~224
Editor Group of the Data Compilation of Earthquakes in Sichuan (EGDCES). The Data Compilation of Earthquakes in Sichuan (Book 2) (in Chinese). Chengdu: Sichuan People's Publishing House, 1981. 1~224
- [22] 成尔林. 四川及其邻区现代构造应力场和现代构造运动特征. 地震学报, 1981, **3**(3):231~241
Cheng E L. Recent tectonic stress field and tectonic movement of the Sichuan province and its vicinity. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1981, **3**(3):231~241
- [23] 闻学泽. 活动断裂地震潜势的定量评估. 北京:地震出版社, 1995. 150
Wen X Z. Quantitive Estimates of Seismic Potential on Active Faults(in Chinese). Beijing:Seismological Press, 1995. 150
- [24] King G, Oppenheimer D, Amelung F. Block versus continuum deformation in the western United States. *Earth Planet Sci. Lett.*, 1994, **128**:55~64
- [25] 张培震, 沈正康, 王敏等. 青藏高原及周边现今构造变形的运动学. 地震地质, 2004, **26**(3):367~377
Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, et al. Kinematics of

- present-day tectonic deformation of the Tibetan plateau and its vicinities. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2004, **26** (3):367~377
- [26] 肖丽珠,石特临,张秀珍. 1987 年 1 月 8 日甘肃省迭部 5.9 级地震. 见:中国震例(1986~1988). 北京:地震出版社,1999. 128~141
Xiao L Z, Shi T L, Zhang X Z. The Diebu, Gansu province, earthquake of M_s 5.9 of January 8, 1987. In: *Earthquake cases in China(1986~1988)* (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1999. 128~141
- [27] 任昭明,李桂芳,程 式. 1978 年 7 月 13 日四川省黑水 5.4 级地震. 见:中国震例(1976~1980). 北京:地震出版社, 1990. 264~274
Ren Z M, Li G F, Cheng S. The Heishui, Sichuan province, earthquake of M_s 5.4 of July 13, 1978. In: *Earthquake Cases in China(1976~1980)* (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1990. 264~274
- [28] 四川省地震局. 1989 年四川小金地震. 成都:四川科学技术出版社, 1993. 1~13
Earthquake Administration of Sichuan Province. The Xiaojin, Sichuan Province. *Earthquake of 1989* (in Chinese). Chengdu: The Science and Technology Publishing House of Sichuan, 1993. 1~13
- [29] 吴 江,杜 方,孙 毅等. 1999 年 9 月 14 日和 11 月 30 日四川省绵竹两次 5.0 级地震. 见:中国震例(1997~1999). 北京:地震出版社, 2003. 317~346
Wu J, Du F, Sun Y, et al. Mianzhu earthquakes of M_s 5.0 on 14 Sept. and 30 Nov. 1999 in Sichuan province. In: *Earthquake Cases in China (1997 ~ 1999)* (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2003. 317~346
- [30] 赵 珠,汪碧澜,龙思胜. 1999 年四川绵竹 5.0 级地震序列揭示的孕震结构. *中国地震*, 2001, **17**(4):386~391
Zhao Z, Wang B L, Long S S. Earthquake-generating structure revealed by 1999 Mianzhu earthquake sequence with $M_s = 5.0$ in Sichuan. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 2001, **17**(4):386~391

(本文编辑 胡素芳)