

徐晶, 邵志刚, 马宏生等. 鲜水河断裂带库仑应力演化与强震间关系. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1146-1158. doi: 10. 6038/ cjpg20130410.

Xu J, Shao Z G, Ma H S, et al. Evolution of Coulomb stress and stress interaction among strong earthquakes along the Xianshuihe fault zone. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(4): 1146-1158. doi: 10. 6038/ cjpg20130410.

鲜水河断裂带库仑应力演化与强震间关系

徐 晶, 邵志刚*, 马宏生, 张浪平

中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

摘 要 以鲜水河断裂带为研究区, 首先验证了该断裂带上 1893 年以来 $M \geq 6.7$ 以上地震的相互触发作用, 然后采用更符合实际的分层黏弹介质模型研究强震震后黏滞松弛引起的库仑应力变化对后续地震的影响, 并基于负位错理论计算鲜水河断裂带 10 个断层段的震间长期构造加载作用引起的断层上的应力积累. 在此基础上, 讨论同震、震后、震间效应引起的累积库仑应力变化与区域强震活动的关系, 给出断层上库仑应力随时间的演化. 结果表明, 鲜水河断裂带上 1893 年以来发生的 7 次强震均在其前面一系列强震及构造应力加载的驱使下发生, 同震、震后、震间三方面效应均引起了鲜水河断裂带不可忽略的库仑应力变化. 对断层上的库仑应力状态的研究, 可进一步为揭示地震的发生规律、找寻危险断层段提供线索.

关键词 鲜水河断裂带, 库仑应力变化, 黏滞松弛, 构造应力加载

doi: 10. 6038/ cjpg20130410

中图分类号 P315

收稿日期 2012-09-04, 2012-11-20 收修定稿

Evolution of Coulomb stress and stress interaction among strong earthquakes along the Xianshuihe fault zone

XU Jing, SHAO Zhi-Gang*, MA Hong-Sheng, ZHANG Lang-Ping

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

Abstract Taking Xianshuihe fault zone as the study area, initially, we verified the Coulomb stress triggering of earthquakes with $M \geq 6.7$ along the fault zone since 1893, then using a more realistic model of multi-layered viscoelastic media, we calculated the Coulomb stress changes caused by viscoelastic relaxation of previous strong earthquake. In addition, we calculated inter-seismic stress accumulation caused by the tectonic loading generated by plate motions, the inter-seismic stress accumulation is modeled by introducing "virtual negative displacements" along 10 major faults segments in the region under study. On this basis, we further discussed the Coulomb stress accumulation caused by the co-seismic, post-seismic, and inter-seismic effect and its relationship with the regional seismic activity, and then simulated the evolution of Coulomb failure stress changes with time along the fault. The result shows that the occurrence of all of seven strong events on Xianshuihe fault since 1893 was driven by a series of previous strong earthquakes and tectonic stress loading, and co-seismic dislocation, viscoelastic relaxation and inter-seismic tectonic loading significantly affect the stress state on the fault. The study of the

基金项目 自然科学基金项目(41004040)资助.

作者简介 徐晶, 女, 1987 年生, 中国地震局地震预测研究所研究生, 研究方向地震动力学. E-mail: xujing0803@gmail.com

* **通讯作者** 邵志刚, 副研究员, 1977 年生, 2007 年中国科学技术大学地空学院博士毕业, 主要从事地球动力学与地震活动性方面的研究. E-mail: shaozg@seis.ac.cn

Coulomb stress changes along the fault zone can provide clues to reveal the law of earthquakes occurrence and find the fault segment at risk.

Keywords Xianshuihe fault zone, Coulomb failure stress changes, Viscoelastic relaxation, Tectonic loading

1 引言

鲜水河断裂带是位于中国青藏高原东部的一条晚第四纪强烈活动的大型左旋走滑断裂,南与安宁河断裂在康定一带相接,北与甘孜—玉树断裂斜列,终止于东谷、甘孜一带^[1](图 1),是中国大陆境内动力作用环境和地壳运动变形最强烈的断裂带之一^[2].该断裂带历史上发生过多次强震,自 1700 年以来经历了两个地震活跃期,分别为 1700—1816 年以及 1893 年至今,两次大的活跃期中均存在强震迁移的特征^[3],且每一期地震都造成了鲜水河断裂带大部分断层段的破裂^[4].

鲜水河断裂带上相对完整的强震记录为研究地震迁移现象及验证地震静应力触发提供基础.张秋文等^[7]研究了鲜水河断裂带上包括 1973 年炉霍 $M7.6$ 地震在内连续发生的 4 次 $M6.0$ 以上地震所引起的周边断裂上的库仑应力变化,并认为主震后的余震大多发生于同震库仑应力增加较高的微破裂上;王辉等^[8]采用三维有限元模型研究断裂带上 1893 年以来 $M \geq 6.7$ 地震的相互作用及其对强震复发的影响,发现该断裂带上大地震产生的库仑应力变化明显影响后续中强地震的发生.这些研究均关注同震位错所引起的库仑应力变化对余震和后续强震间可能的触发关系,但未考虑震后黏滞松弛效应在应力应变调整中的作用,然而,越来越多的震例表明,震后黏弹性松弛造成的应力变化在几倍于弹性岩层厚度的远场、1 至数倍特征时间常数的稍长时间尺度上一般比同震形变所造成的应力变化大很多^[9],是引起断层上应力应变调整的重要因素^[10-13].另外,断层上的应力状态受强地震(同震、震后)的影响过程较短,而震间构造应力加载作用则长期影响断层上的应力应变积累^[14],Papadimitriou 等^[15]同时考虑了强震同震位错及震间构造应力加载,研究了鲜水河—安宁河—则木河及理塘断裂的应力演化和地震触发,虽然该研究同样未考虑震后黏滞松弛效应对断层上库仑应力状态的影响,但对于平均滑动速率可达 $(15 \pm 5) \text{ mm/a}$ ^[16] 的鲜水河断裂带来说,其震间效应显著,研究构造加载引起的断裂带的应

力积累是很有必要的.

本文在前人研究的基础上,采用更符合实际的分层黏弹介质模型,分析鲜水河断裂带 1893 年以来 $M \geq 6.7$ 地震间的同震相互触发过程,还考虑了强震震后黏滞松弛效应及震间构造应力加载作用,进一步关注该断裂带 150 余年来由同震、震后、震间效应所引起的库仑应力变化随时间的演化,讨论断层的应力累积状态与强震的关系.

2 计算原理和方法

库仑破裂准则被广泛地应用于岩石破裂研究,试验表明受压岩石的破裂近似遵守库仑破裂准则^[17].最初,地震学家们采用弹性半空间模型研究同震引起的库仑应力变化与余震空间分布的关系^[18];通过分析特定断层上的应力变化研究强震间的相互作用及断层的危险性.如 1992 年 6 月 28 日 Landers $M_w 7.3$ 地震的同震引起的库仑应力变化与余震有很好的对应,并触发了后续发生在 Landers 主震破裂以西约 20km 处的 Big Bear $M_w 6.5$ 地震^[18].由于热的下地壳和上地幔的黏弹性作用,在外力消失后,不能完全恢复其原始形状并存在一定的剩余应变,使应力传递到上地壳的孕震层,黏滞松弛效应广泛地应用于震后形变解释及强震间相互触发的研究中^[12, 19-20],Freed 和 Lin^[21]利用有限元数值模拟的方法计算,认为 Landers 震后松弛可能最终导致了 1999 年 Hector Mine 地震的提前发生.因地震的发生而被卸载了的断层通过更长时间尺度的震间构造作用而继续积累应力应变,震间效应同样是影响断层应力状态的重要方面,Deng 和 Sykes 以及 Nalbant 等^[22-23]基于负位错思想^[24-26],综合考虑了地震和构造应力加载效应来研究区域的地震活动.而加勒比海东北部 250 年的库仑应力演化表明,由同震、震后、震间效应引起的断层上的库仑应力变化在大小和正负上均有所差异^[27],研究断层上的应力状态,需综合考虑三方面效应的影响.

本文参考已有的研究方法,基于鲜水河断裂带 1893 年以来 $M \geq 6.7$ 强震的同震位错模型,分别计算了强震同震位错和震后黏滞松弛效应引起的库仑

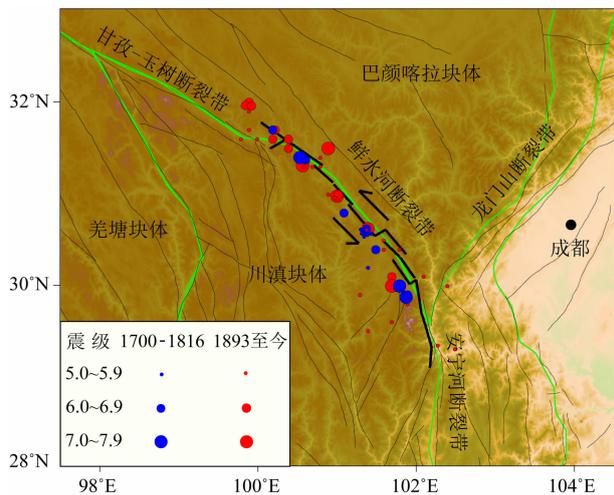


图1 鲜水河断裂带的构造背景及1700年来5级以上地震分布
黑线表示鲜水河断裂带,灰线表示活动断裂^[5],绿线表示块体边界^[6].

Fig. 1 Sketch map of tectonics background and distribution of earthquakes with $M \geq 5$ since 1700 on Xianshuihe fault zone
The black line is the Xianshuihe fault zone, the gray lines are the active faults^[5], and the green lines are the boundaries of activity block^[6].

破裂应力变化,包括瞬时弹性响应,呈指数衰减的短期响应,线性增加的长期稳态响应的综合影响;同时,基于负位错理论计算得到10个断层段震间构造应力加载引起的应力积累(图2),震间效应引起的库仑应力演化计算中,对于走滑型断层的情况,认为接近块体边界处的深部变形可简化为无应变积累的刚性块体运动和闭锁层的反方向均匀位错的联合效应^[26],即“负位错理论”.假设孕震层完全闭锁,“负位错”即可用断层段长期滑动速率和构造作用的时间来表示,并采用计算同震库仑应力变化的方法计算震间应力积累.从而进一步研究同震、震后、震间三方面效应对断层上库仑应力场的综合影响及其与后续强震的关系.

计算库仑应力变化时,我们需知道源地地震的断层几何参数和滑动矢量,以及我们所关注的接收断层的几何参数,静态库仑应力变化可表示为:

$$\Delta\sigma_t = \Delta|\tau| + \mu' \Delta\sigma_n,$$

$|\tau|$ 为断层面上的剪切应力大小, $\Delta|\tau|$ 为正时表示沿断层的破裂方向, σ_n 为断层面上正应力的大小, $\Delta\sigma_n$ 为正时表示张应力增加. μ' 称为有效摩擦系数^[28],它既包括了孔隙流体的影响又包括了断层区介质性质的影响.在不同研究中取值有所差异,本文取鲜水河断裂带应力触发研究中的最常用取值0.4^[8,15].采用Wang等给出的PSGRN/PSCMP程序^[29]、分层黏弹介质模型研究库仑应力演化.

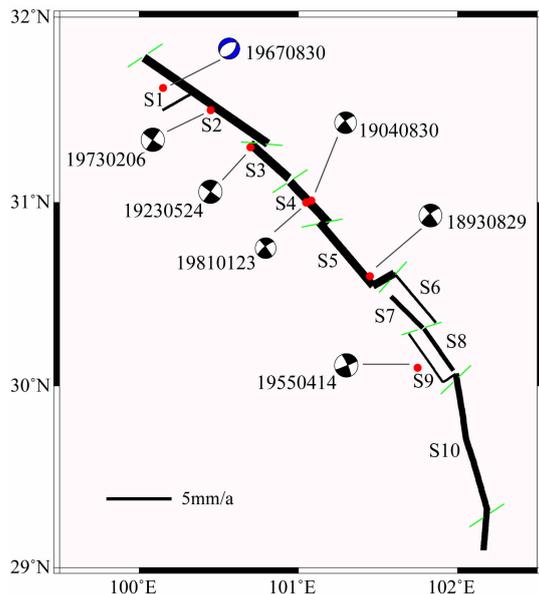


图2 应力演化计算中引起库仑应力变化的强震及主断层段^[4,15]

黑色表示走滑型地震,蓝色表示正断型地震^[4,15];
断层线粗细代表滑动速率大小^[4,15],具体见表2.

Fig. 2 Strong earthquakes and the major fault segments in stress evolution calculation

The black source ball represents strike, and the red one represents normal^[4,15], the thickness of the fault line represents the slip rate^[4,15], specific content refer to the Table 2.

3 模型的建立

3.1 介质模型

本文参考川西地区的奔子栏—唐克地震人工测深剖面的结果,给出地壳与上地幔的速度和密度结构(表1),鲜水河断裂带位于剖面中部,测线在道孚附近穿过断裂带^[30].鲜水河断裂带和东昆仑断裂带同属青藏高原中部的“松潘甘孜—羌塘—拉萨”古特提斯复合地体^[31],作为地体边界的东昆仑断裂的南北两侧在物质组成、变形构造体制、演化历史、地球物理异常及现代构造地貌特征上均有明显差异,印度/亚洲碰撞后,其由韧性剪切转变为脆性剪切,南侧为巨厚的三叠系复理石岩系;而青藏高原东南缘大量物质向南东及南方向逃逸,鲜水河断裂带形成并切割了三叠系砂板岩地层^[31].故本文在建立介质模型时,更多地参考了与鲜水河断裂带同属巴颜喀拉地块边界、均为青藏高原强烈活动的左旋走滑的东昆仑断裂带的流变性质^[10,30].邵志刚等^[32]利用震后短期内观测数据做约束反演给出的东昆仑断裂南侧的最佳黏滞系数为 $5.0 \times 10^{17} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,沈正康等^[12]分析东昆仑断裂地震间的黏弹性触发时所采用的中

下地壳的黏滞系数为 $6.3 \times 10^{18} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 该系数基于通海、炉霍、共和地震的平均震后形变弛豫时间计算得到, 这两个结果分别对应本文震后黏滞松弛的短期和长期效应. 我们基于 Burgers 体模型计算震后库仑应力演化, 下地壳、上地幔黏滞系数取 $\eta_1 = 5.0 \times 10^{17}$, $\eta_2 = 6.3 \times 10^{18}$ (表 1).

人工地震剖面显示松潘—甘孜地块 20~30 km 深有厚约 10 km 的低速层^[33]; 大地电磁测深探测到鲜水河断裂 25 km 以下有高导低阻物质存在^[34], 我们认为该断裂带孕震层可达 25 km, 黏弹性作用从这一深度开始. 由于地震滑动量的峰值集中在孕震层中间区域^[18], 且震源深度和地球物理的研究结果表明中国大陆西部的平均震源深度为 18 ± 8 ^[35], 鲜水河断裂带的强震发生在 10~15 km 左右深度^[30], 故本文以 10 km 为计算深度, 研究断层上的库仑应力演化.

3.2 断层分段及同震位错模型

计算断层段的震间构造加载引起的库仑应力变化时, 需确定鲜水河断裂带的主断层段划分, 并给定其长期滑动速率. 本文主要参考已有的研究结果^[15, 36-37], 将该断裂带划分为 10 个断层段, 自西向东依次为炉霍、恰叫、道孚、八美、雅拉河、色拉哈、康定、折多塘、磨西, 以及处于甘孜玉树和鲜水河断裂带之间拉分区的侏倭段. 滑动速率多为地质学上给出的长期平均滑动速率, 西北段相对于东南段较高. 断层分段的相关参数见表 2.

鲜水河断裂带自 1893 年以来共发生 7 次 $M \geq 6.7$ 强震, 本文主要参考 Papadimitriou 等^[15] 和 Wen 等^[4] 给出的同震位错及发震断层产状. 除 1967 年侏倭 $M6.8$ 地震发生在两个大型左旋走滑断裂之间的拉分区, 属正断型地震外, 其余六个地震均以走滑运动为主. 各参数见表 3.

表 1 鲜水河断裂带介质模型^[12, 30, 32]

Table 1 The medium model of Xianshuihe fault zone

层名	厚度/km	$V_p / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$V_s / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\eta_1 / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	$\eta_2 / (\text{Pa} \cdot \text{s})$
沉积层	3	4.6	2.656	2615		
上地壳	9	6.05	3.493	2760		弹性
	10	6.17	3.562	2679		
	3	6.25	3.608	2835		
下地壳	5	6.25	3.608	2835	5.0×10^{17}	6.3×10^{18}
	10	6.55	3.782	2835	5.0×10^{17}	6.3×10^{18}
	18	6.8	3.926	2977	5.0×10^{17}	6.3×10^{18}
上地幔	—	7.8	4.503	3175	0	1.0×10^{20}

注: V_p 表示 P 波速度, V_s 表示 S 波速度, ρ 表示壳幔密度, η_1 、 η_2 分别表示瞬时和稳态黏滞系数.

表 2 鲜水河断裂带断层分段参数^[15, 36, 37]

Table 2 Parameters of major fault segmentation of Xianshuihe fault zone

断层段编号	断层段名称	断层段中心		走向/ $^\circ$	倾角/ $^\circ$	长度/km	滑动速率/ $(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$
		纬度/ $^\circ\text{N}$	经度/ $^\circ\text{E}$				
S1	侏倭	31.60	100.20	240	60	20	4
S2	炉霍	31.55	100.42	305	90	90	13
S3	恰叫	31.225	100.82	312	90	31	13
S4	道孚	31.00	101.07	317	90	34	13
S5	八美	30.72	101.30	320	90	50	12
S6	雅拉河	30.50	101.76	320	75	39	4
S7	色拉哈	30.41	101.69	315	85	27	7
S8	康定	30.21	101.90	325	80	31	6.5
S9	折多塘	30.17	101.83	325	75	36	3.5
S10	磨西	29.76	102.07	335	80	77	9.5

4 计算结果

4.1 同震库仑应力变化

为研究鲜水河断裂带相继发生的强震间的触发作用及程度,我们根据表 3 给出的 7 次强震的同震位错模型,依时间顺序分别计算了每一次地震(源地震)的同震位错引起的下一次地震(接收断层)断层面上的库仑应力变化.图 3a 显示,1904 年道孚 $M7$ 地震位于由 1893 年八美 $M7$ 地震引起的同震库仑破裂应力显著增加的区域,破裂中心处库仑应力增加 0.218 MPa;图 3b 显示,1923 年炉霍—恰叫 $M7.3$ 地震同样位于 1904 年道孚 $M7$ 地震引起的同震库仑应力变化的高值区,破裂中心处应力增加 0.144 MPa.图 3(e、f)显示,1973 年炉霍 $M7.6$ 地震分布

于 1967 年侏倭 $M6.8$ 地震同震引起的库仑应力增加较大的区域,1981 年道孚 $M6.9$ 地震位于 1973 年炉霍 $M7.6$ 地震引起的同震库仑应力明显增加的区域,且增加量均超过触发阈值(0.01 MPa).而 1923 年炉霍—恰叫 $M7.3$ 地震仅引起了 1955 年折多塘 $M7.5$ 地震的断层面上的同震库仑应力略微上升(图 3c),类似的情况,1955 年折多塘 $M7.5$ 地震对 1967 年侏倭 $M6.8$ 地震的影响甚微(图 3d),其原因可能是同震位错对远场影响不明显.虽个别震例未达触发阈值,但总体上,断裂带上依时间顺序相邻的强震间存在触发作用.图 4 为累积同震库仑应力变化的计算结果,为某地震事件前发生的所有强地震共同产生的同震库仑应力变化.结果显示,所有强震破裂中心所在位置的累积同震库仑应力变化均已达到触发阈值.

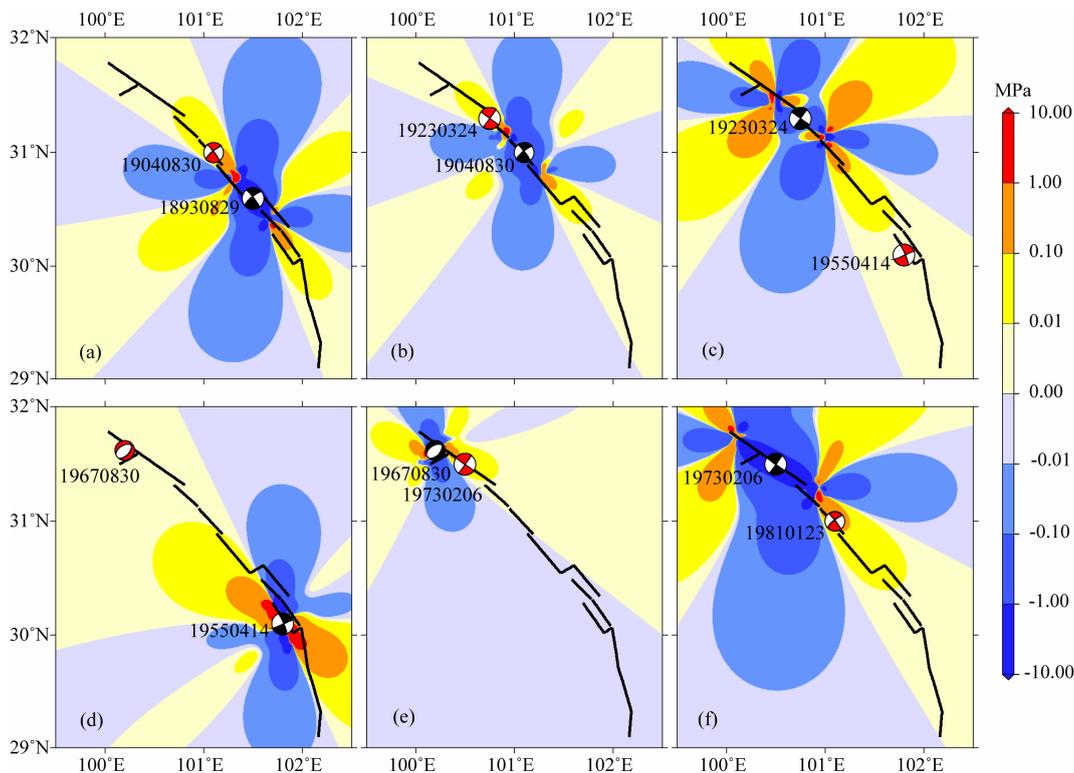


图 3 鲜水河断裂带同震位错引起的库仑应力变化

计算深度 10 km,黑色震源球表示源地地震震源机制,红色震源球表示接收断层震源机制.7 次强地震用其发震年份简要表示.(a)1893 年地震引起的 1904 年地震断层面上的同震库仑应力变化;(b)1904 年地震引起的 1923 年地震断层面上的同震库仑应力变化;(c)1923 年地震引起了 1955 年地震断层面上的同震库仑应力略微升高;(d)1955 年地震的同震对 1967 年地震的影响甚微(<0.01 MPa);(e)1967 年地震的同震引起了 1973 年地震破裂中心处的库仑应力显著增加;(f)1973 年地震的同震引起了 1981 年地震破裂中心处的库仑应力增加.

Fig. 3 Coulomb failure stress changes caused by the co-seismic dislocations on the Xianshuihe fault zone

The calculated depth is 10 km, the black source ball represents focal mechanism of the seismogenic fault, the red one represents mechanism of the receive fault. (a) Coulomb stress changes on the 1904 event's fault plane associated with the co-seismic dislocations of the 1893 event. (b) Coulomb stress changes associated with the co-seismic dislocations of the 1904 event. (c) Co-seismic stress changes associated with the 1923 event slightly promoted the 1955 event. (d) Co-seismic stress changes associated with the 1955 event slightly affected the 1967 event (<0.01 MPa). (e) Coulomb stress changes associated with the co-seismic dislocations of the 1967 event. (f) Co-seismic dislocations of the 1973 event caused an increase in Coulomb stress state of the 1981 event.

表 3 鲜水河断裂带的同震位错模型^[4,15]

Table 3 Co-seismic slip model of the earthquakes occurred on the Xianshuihe fault zone

时间 年-月-日	中心		走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	长度/km	SS/m	DS/m	震级	位置
	纬度/°N	经度/°E								
1893-08-29	30.6	101.5	322	85	13	70	+2.44	-0.56	7	八美
1904-08-30	31.0	101.1	322	85	13	50	+0.78	-0.18	7	道孚
1923-03-24	31.3	100.75	306	90	0	60	+3.00	0	7.3	炉霍—恰叫
1955-04-14	30.1	101.8	337	81	-3	35	+3.00	0	7.5	折多塘
1967-08-30	31.62	100.2	245	45	-70	18	+0.23	+0.64	6.8	侏倭
1973-02-06	31.5	100.5	125	87	0	90	+4.00	0	7.6	炉霍
1981-01-23	31.0	101.1	322	85	13	44	+0.50	0	6.9	道孚

注:SS为同震位错走向滑动分量,沿走向方向为正;DS为同震位错倾向滑动分量,沿下倾方向为正。

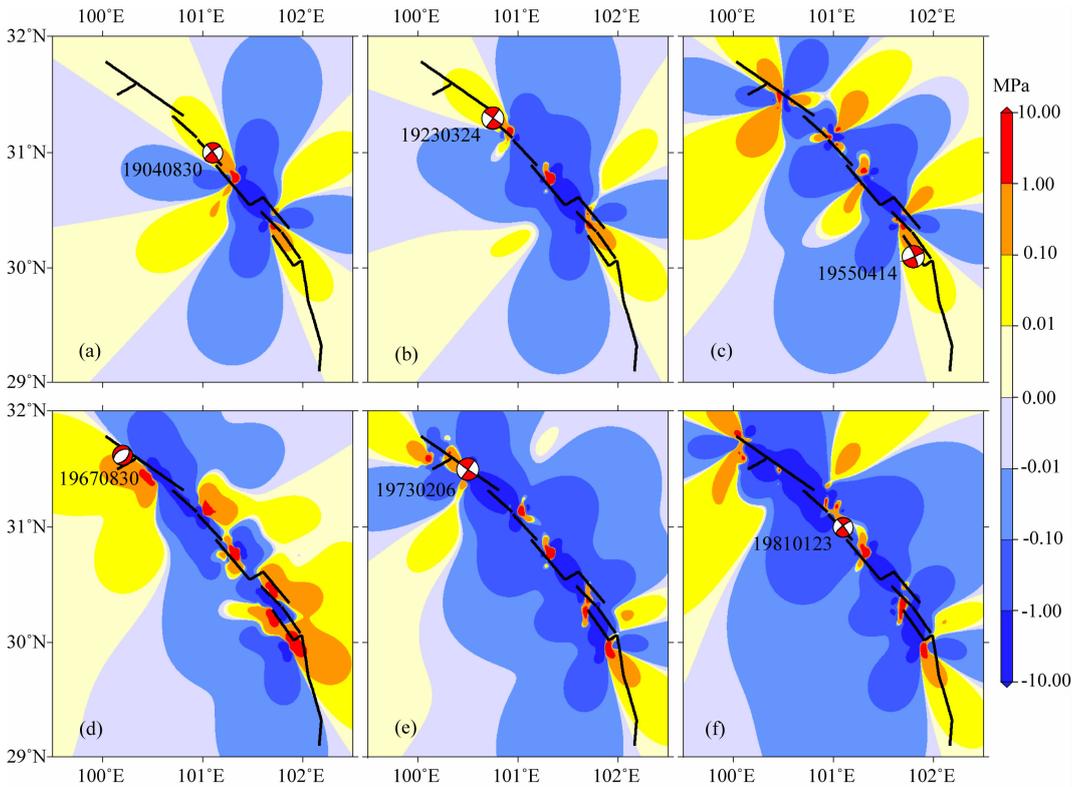


图 4 1893 年以来鲜水河断裂带先前所有地震的同震位错引起的累积库仑应力变化

计算深度 10 km, 红色震源球表示接收断层震源机制。(a)1893 年地震的同震引起的 1904 年地震断层面上的库仑应力变化;(b)1893 年地震的同震和 1904 年地震的同震共同引起的 1923 年地震断层面上的库仑应力变化;(c)1893 年以来,1955 年地震发生前的所有强震的同震位错共同引起的库仑应力变化;(d)1967 年地震的先前所有强震的同震位错共同引起的库仑应力变化;(e)1973 年地震的先前所有强震的同震位错共同引起的库仑应力变化;(f)1981 年地震的先前所有强震的同震位错共同引起的库仑应力变化。

Fig. 4 Cumulative Coulomb failure stress changes caused by the co-seismic dislocations of previous events on the Xianshuihe fault zone since 1893

The calculated depth is 10 km, the red source ball represents focal mechanism of the receive fault. (a)Coulomb stress changes on the 1904 event's fault plane associated with the co-seismic dislocations of the 1893 event. (b)Coulomb stress changes associated with the co-seismic dislocations of the 1893 event and the 1904 event. (c)Cumulative Coulomb stress changes caused by the co-seismic dislocations of previous events just before the 1955 event. (d)Coulomb stress changes caused by the co-seismic dislocations of previous events just before the 1967 event. (e)Coulomb stress changes caused by the co-seismic dislocations of previous events just before the 1973 event. (f)Coulomb stress changes caused by the co-seismic dislocations of previous events just before the 1981 event.

4.2 震后库仑应力变化

强震的震后黏滞松弛引起的库仑应力演化见图 5(a—f),为某地震事件发生前的所有强震震后黏滞松弛效应所造成的该地震断层面的库仑应力变化。例如,图 5a 表示 1893 年八美 $M7$ 地震震后 11 年的黏滞松弛效应在 1904 年道孚 $M7$ 地震断层面上产生的库仑应力变化;图 5b 表示 1893 年八美 $M7$ 地震震后 29.74 年以及 1904 年道孚 $M7$ 地震震后 18.74 年的黏滞松弛效应在 1923 年炉霍—恰叫 $M7.3$ 地震断层面上共同引起的累积震后库仑应力变化。结果表明,鲜水河断裂带上强震的震后黏滞松弛效应对后续地震有重要贡献,且均已达到触发阈值。下地壳、上地幔的黏滞松弛效应使走滑断层的库

仑应力变化随时间逐渐增大。

图 6 则表示某地震事件发生之前的所有强震的同震和震后黏滞松弛效应在该地震断层面共同引起的累积库仑应力变化,反映了前面发生的所有强震对后续地震的影响。结果显示所有地震均分布在强震引起的累积库仑应力变化高值区(0.01~1 MPa)。

4.3 震间库仑应力变化

本节基于负位错理论,计算 1893 年八美 $M7$ 地震后鲜水河断裂带 10 个断层段的震间长期构造加载作用在各地震破裂面产生的库仑应力变化,主断层段设置见表 2,计算结果如图 7。整体上,长期构造作用加载了该断裂带,并对强震的发生有重要贡献。结果显示,同为走滑型的接收断层的应力分布图像

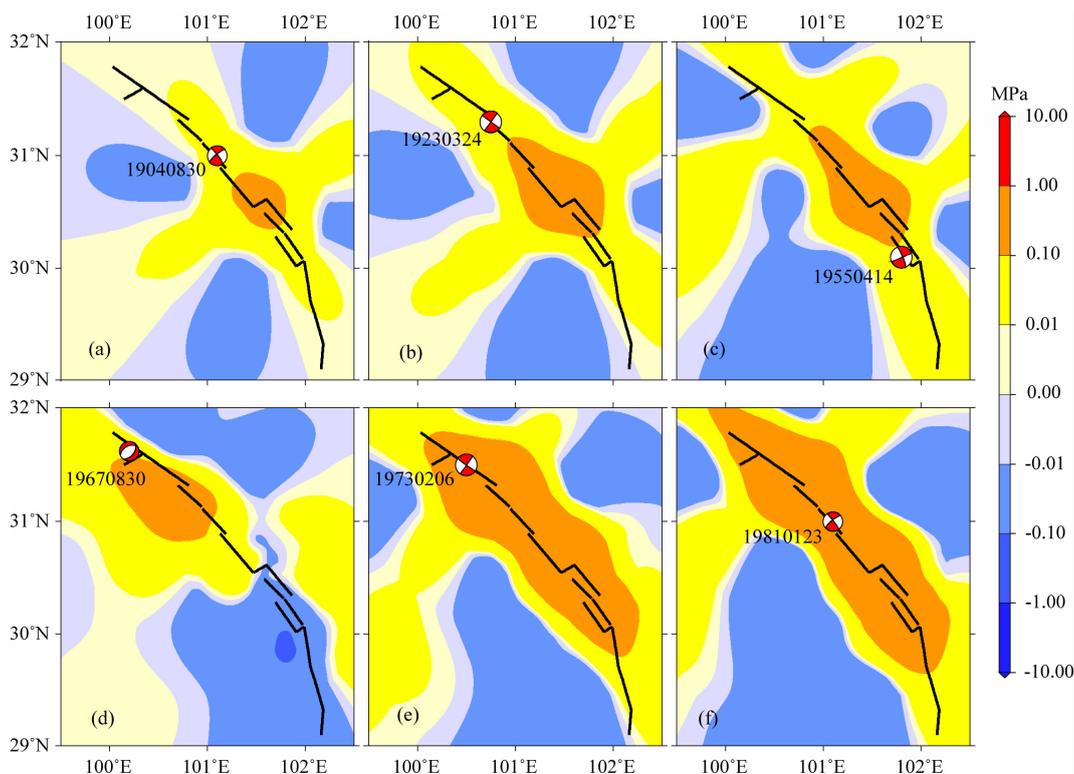


图 5 鲜水河断裂带 1893 年以来强震的震后黏滞松弛引起的库仑应力变化

计算深度 10 km,红色震源球表示接收断层震源机制。(a)1893 年地震震后 11 年的黏滞松弛效应在 1904 年地震断层面上产生的库仑应力变化;(b)1923 年地震的先前所有强震震后黏滞松弛效应共同引起的库仑应力变化;(c)1955 年地震发生前的所有强震震后效应共同引起的库仑应力变化;(d)1967 年地震的先前所有强震的震后效应共同引起的库仑应力变化;(e)1973 年地震的先前所有强震的震后效应引起的库仑应力变化;(f)1981 年地震的先前所有强震的震后效应引起的库仑应力变化。

Fig. 5 Coulomb failure stress changes caused by the post-seismic viscoelastic relaxation on the Xianshuihe fault zone since 1893. The calculated depth is 10km, the red source ball represents focal mechanism of the receive fault. (a)Coulomb stress changes on the 1904 event's fault plane associated with the post-seismic viscoelastic relaxation of the 1893 event. (b)Coulomb stress changes on the 1923 event's fault plane associated with the post-seismic viscoelastic relaxation of the 1893 event and the 1904 event. (c)Cumulative coulomb stress changes caused by the post-seismic viscoelastic relaxation of previous events just before the 1955 event. (d)Coulomb stress changes caused by the post-seismic viscoelastic relaxation of previous events just before the 1967 event. (e)Coulomb stress changes caused by the post-seismic viscoelastic relaxation of previous events before the 1973 event. (f) Coulomb stress changes caused by the post-seismic viscoelastic relaxation of previous events before the 1981 event.

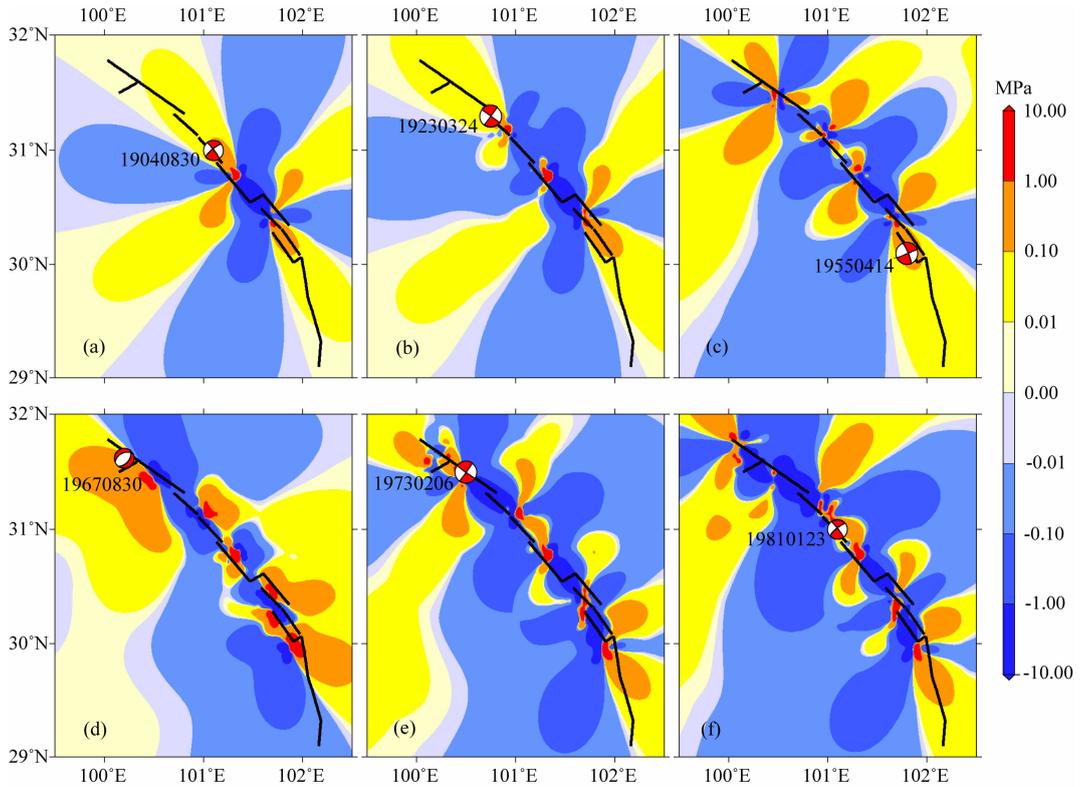


图 6 鲜水河断裂带 1893 年以来强震(同震+震后)引起的库仑应力变化

计算深度 10 km, 红色震源球为接收断层震源机制。(a)1893 年地震引起的 1904 年地震断层面的库仑应力变化;(b)1923 年地震发生前的所有强震引起的库仑应力变化;(c)1955 年地震发生前的所有强震引起的库仑应力变化;(d)1967 年地震的先前所有强震引起的库仑应力变化;(e)1973 年地震的先前所有强震引起的库仑应力变化;(f)1981 年地震的先前所有强震引起的库仑应力变化。

Fig. 6 Coulomb failure stress changes caused by the earthquakes (co-seismic+post-seismic) on the Xianshuihe fault zone since 1893

The calculated depth is 10km, the red source ball represents focal mechanism of the receive fault. (a)Coulomb stress changes on the 1904 event's fault plane associated with the 1893 event. (b)Coulomb stress changes on the 1923 event's fault plane associated with the 1893 event and the 1904 event. (c)Cumulative coulomb stress changes caused by previous events just before the 1955 event. (d)Coulomb stress changes caused by previous events before the 1967 event. (e) Coulomb stress changes caused by previous events before the 1973 event.

(f)Coulomb stress changes caused by previous events before the 1981 event.

较为相似, 而图 7d 为 1893—1967 年震间应力加载引起的库仑应力变化, 其接收断层为正断型的 1967 年侏倭 M6.8 地震的断层面, 应力分布图像显示了和其他走滑型断层面不同的特征, 说明接收断层产状的不同会造成应力分布图像的差异, 尽管如此, 长期构造作用仍对正断型的侏倭段起加载作用。图 7 (f—h) 分别为 1893 年起, 截至 1981、2012、2050 年震间效应引起的库仑应力积累, 接收断层均参考 1981 年道孚 M6.9 地震的断层面, 对比发现, 随着时间的推移, 长期的构造作用未改变对相应断层段的加载或卸载性质, 只是使断裂带及邻近区的正库仑应力变化在范围和强度上有所增加, 而这种上地壳的震间应力积累最终会被后续发生的地震所释放。

4.4 累积库仑应力变化

为考虑强震及构造应力加载引起的库仑应力变

化对后续地震的综合影响, 我们计算了最近一活跃期, 即 1893 年以来, 强震同震、震后黏滞松弛效应以及 10 个断层段震间构造应力加载引起的累积库仑破裂应力变化, 结果见图 8。图 8(a—f) 表明, 鲜水河断裂带的强震均发生在同震、震后、震间三方面效应引起的累积库仑应力变化的高值区。其中, 图 8c 为 1893 年八美 M7、1904 年道孚 M7 和 1923 年炉霍—恰叫 M7.3 地震的同震位错和震后黏滞松弛效应以及 1893—1955 年的震间构造应力加载作用在 1955 年折多塘 M7.5 地震断层面上引起的累积库仑应力变化量, 1955 年折多塘 M7.5 地震发生在累积库仑应力显著增加的区域; 而在同震库仑应力触发的计算中, 单独考虑 1923 年炉霍—恰叫 M7.3 地震的作用, 其同震位错仅引起 1955 年折多塘 M7.5 地震的断面上的库仑应力略微上升(图 3c)。类似的情

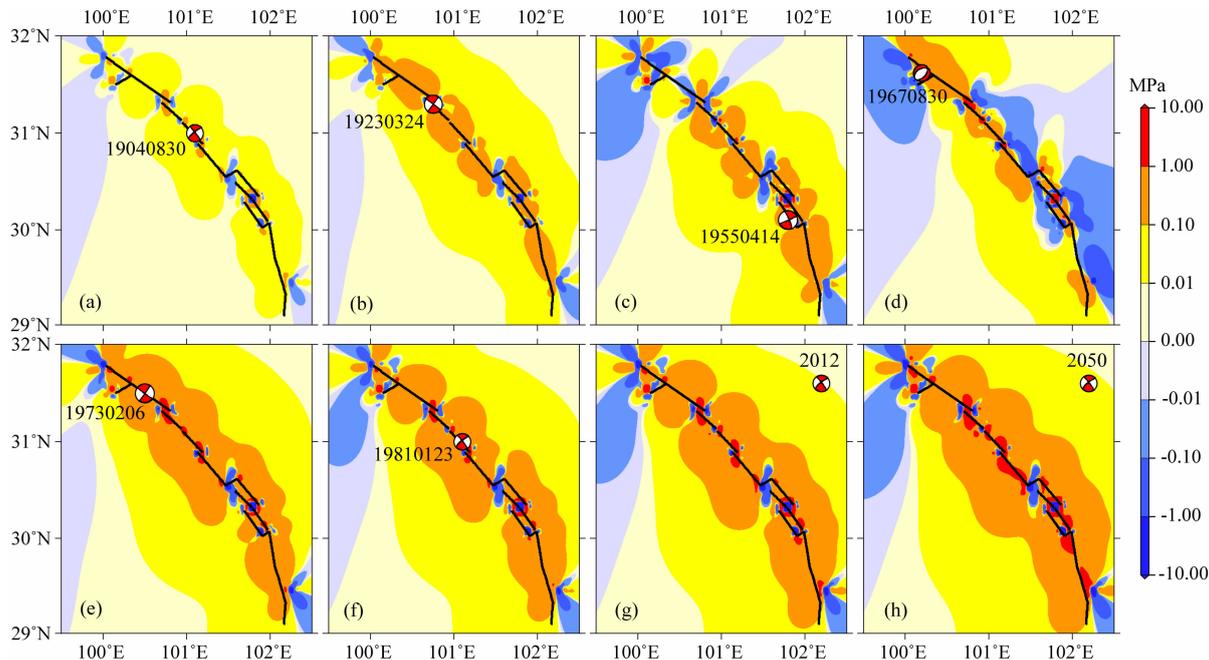


图7 1893年起鲜水河断裂带构造应力加载引起的库仑应力积累

计算深度 10 km, 红色震源球为接收断层震源机制。(a)1893—1904 年的长期震间构造应力加载引起的 1904 年断层面上的库仑应力积累; (b)1893—1923 年的震间效应引起的库仑应力积累; (c)1893—1955 年的震间效应引起的库仑应力积累; (d)1893—1967 年的震间效应引起的库仑应力积累; (e)1893—1973 年的震间效应引起的库仑应力积累; (f)1893—1981 年的震间效应引起的库仑应力积累; (g)1893—2012 年的震间效应引起的库仑应力积累; (h)1893—2050 年的震间效应引起的库仑应力积累, (g, h)中接收断层的震源机制仍参考 1981 年地震的震源机制。

Fig. 7 Accumulation of Coulomb failure stress caused by tectonic loading on the Xianshuihe fault zone since 1893

The calculated depth is 10 km, the red source ball represents focal mechanism of the receive fault. (a) Inter-seismic Coulomb stress accumulation caused by tectonic stress loading just before the 1904 event, since 1893. (b) Inter-seismic Coulomb stress accumulation just before the 1923 event. (c) Inter-seismic Coulomb stress accumulation before the 1955 event. (d) Inter-seismic Coulomb stress accumulation before the 1967 event. (e) Inter-seismic Coulomb stress accumulation before the 1973 event. (f) Inter-seismic Coulomb stress accumulation before the 1981 event. (g) Inter-seismic Coulomb stress accumulation until just before 2012. (h) Inter-seismic Coulomb stress accumulation till 2050, using the focal mechanism of the 1981 event for the receive fault.

况, 1955 年折多塘 $M7.5$ 地震的同震位错对 1967 年侏倭 $M6.8$ 地震的影响甚微(图 3d), 但从同震、震后以及震间构造应力加载引起的累积库仑应力变化结果看, 1955 年折多塘 $M7.5$ 地震和 1967 年侏倭 $M6.8$ 地震则被其前面发生的强震及构造加载作用触发(图 8d)。图 8 显示, 若考虑三方面效应对断层上库仑应力状态的影响, 鲜水河断裂带上所有强震, 不仅是强震破裂中心, 甚至强震的破裂段均位于累积库仑应力显著增加的区域(图 8(a—f))。

5 结论与讨论

1893 年以来, 鲜水河断裂带的库仑应力变化随时间演化的结果表明, 鲜水河断裂带的强震均在前面发生的一系列强震及构造应力加载的驱使下发生。该断裂带上强震间存在触发作用, 强震的震后黏

滞松弛效应对后续地震影响显著, 即大地震(同震、震后)产生的库仑应力增加, 有利于后续地震的发生。另外, 震间的长期构造应力加载作用对断裂带上强震的发生有重要贡献, 且随着时间的推移, 长期的构造作用增大了库仑应力变化正影响区的范围和强度。若考虑强震的同震、震后以及震间效应的综合影响, 所有后续强震, 不仅强震破裂中心, 甚至强震的破裂段均分布于三方面效应引起的累积库仑应力显著增加的区域。

前人的研究多考虑同震引起的应力变化, 震后黏滞松弛及震间构造加载效应则很少涉及, 然而, 我们的演化结果显示, 同震、震后、震间三方面效应均引起了鲜水河断裂带不可忽略的库仑应力变化。我们对这三方面效应在后续强震破裂中心产生的库仑应力变化大小进行分析。结果显示(表 4), 震前 1817—1892 年的长期构造加载作用显著, 在 1893

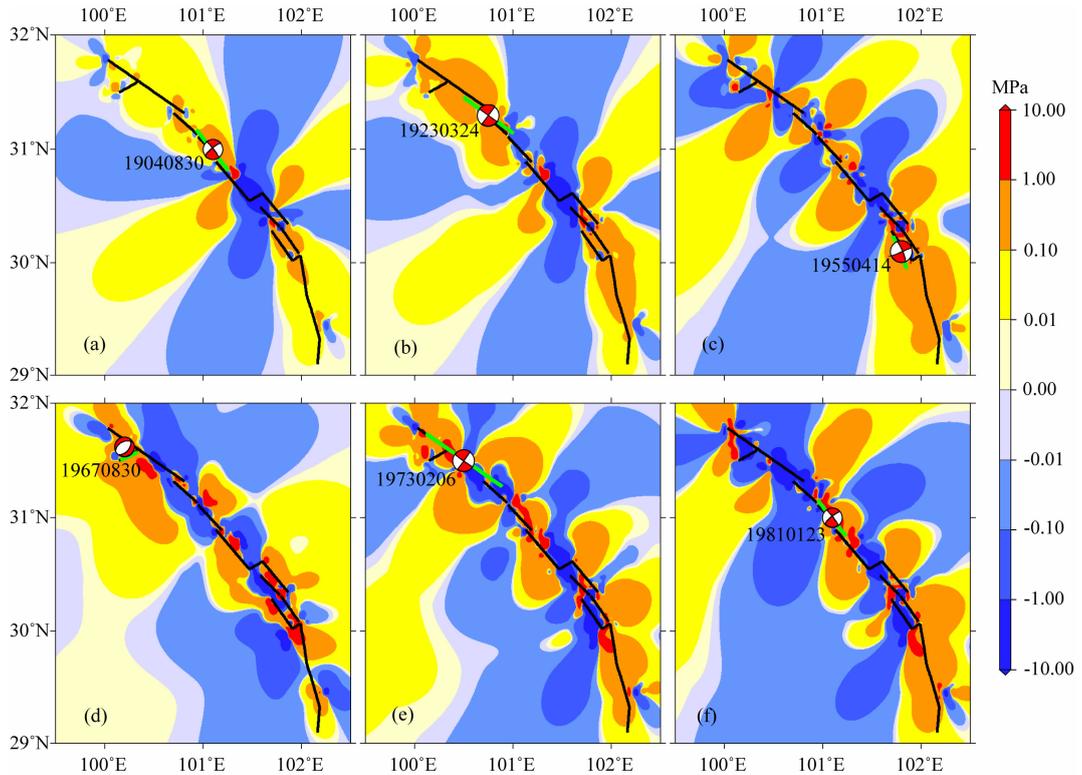


图 8 1893 年以来鲜水河断裂带累积库仑应力演化(同震+震后+震间)

计算深度 10 km, 红色震源球为接收断层震源机制, 绿色线段为发震断层位置。(a) 1893 年地震(同震+震后)以及 1893—1904 年震间长期构造应力加载引起的 1904 年地震断层面上的累积库仑应力变化; (b) 1923 年地震发生前的累积库仑应力变化; (c) 1955 年地震发生前的累积库仑应力变化; (d) 1967 年地震发生前的累积库仑应力变化; (e) 1973 年地震发生前的累积库仑应力变化; (f) 1981 年地震发生前的累积库仑应力变化。

Fig. 8 The evolution of cumulative Coulomb failure stress changes on the Xianshuihe fault zone since 1893

The calculated depth is 10 km, the red source ball represents focal mechanism of the receive fault, the green solid line represents the location of seismogenic fault. (a) Coulomb stress evolution until just before the 1904 event, stress changes associated with the 1893 earthquake as well as tectonic stress changes on the fault segments since 1893 are included. (b) Cumulative Coulomb stress changes until just before the 1923 event. (c) State of Coulomb stress just before the 1955 event. (d) State of Coulomb stress before the occurrence of the 1967 event. (e) Cumulative Coulomb stress changes just before the 1973 event. (f) Cumulative Coulomb stress changes before the 1981 event.

年后的这个活跃期里, 各断层段持续受构造应力加载作用影响, 有的强震破裂中心的库仑应力变化受同震或震后效应影响为主。具体的影响程度可能与同震位错大小、地震间的时间间隔及空间分布相关。

1893 年以来, 强震引起的沿断层走向方向的库仑应力演化结果显示(图 9a), 强震的同震滑动使其破裂段的库仑应力显著降低, 而使破裂段两侧的库仑应力增加, 从而触发后续地震, 如 1893 年八美 M7 地震的同震引起了 1904 年道孚 M7 的破裂段的库仑应力升高, 触发了道孚地震; 1967 年侏倭 M6.8 地震的同震造成了 1973 年炉霍 M7.6 地震的破裂面的库仑应力大幅度增加, 且范围有所扩大, 触发了炉霍地震, 这与表 4 中同震库仑应力变化对 1904 年道孚 M7、1973 年炉霍 M7.6 地震的发生有主要贡献的结果一致。震后黏滞松弛效应对断层段起加载

作用, 其中, 各地震的震后效应造成 1981 年道孚 M6.9 地震破裂段的库仑应力逐渐升高, 抵消了 1904 年道孚 M7 地震的同震滑动的影响, 并于 1973 年炉霍 M7.6 地震后, 库仑应力变化转为正值, 最终触发了 1981 年道孚 M6.9 地震, 而震后黏滞松弛效应在该地震破裂中心位置造成的库仑应力增量超过了同震和震间效应引起的应力增量(表 4)。图 9b 为综合考虑强震和 1893—2050 年构造应力加载作用得到的断层面上的累积库仑应力演化。随着时间的推移, 鲜水河断裂带各断层段由构造应力的加载作用引起的库仑应力积累有不同程度的增强。加入震间构造加载效应的应力演化结果显示, 与强震的影响相比(图 9a), 1923 年炉霍—恰叫 M7.3 和 1955 年折多塘 M7.5、1967 年侏倭 M6.8 地震的破裂段的库仑应力有显著增加, 而这三强震破裂中心的库

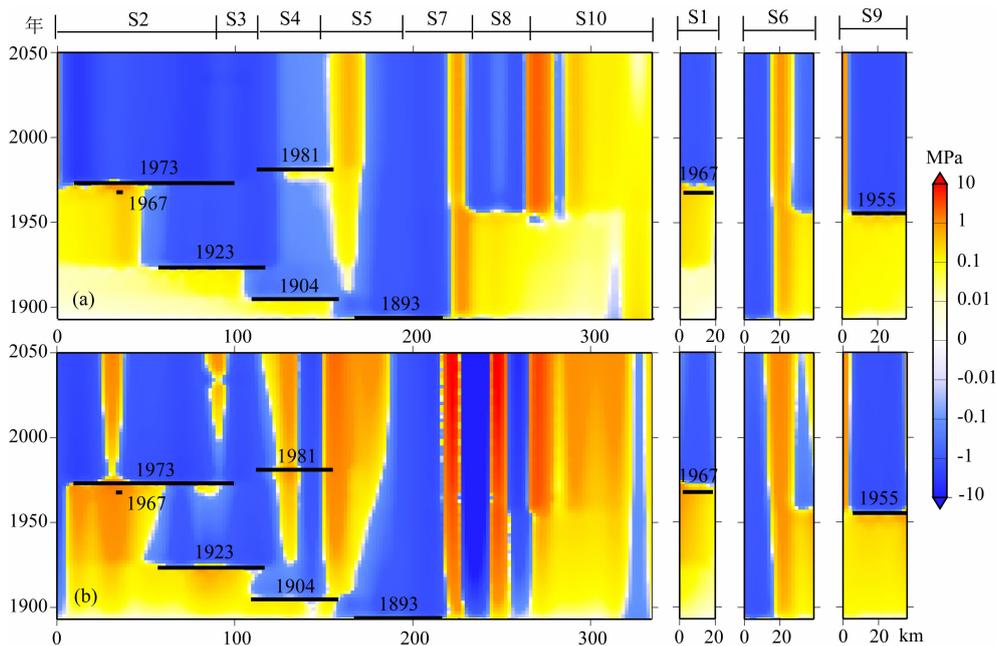


图9 1893—2050年沿鲜水河断裂带走向的库仑应力演化

(a) 强震(同震+震后)引起的库仑应力演化;(b) 累积库仑应力演化(同震+震后+震间)。

Fig. 9 The evolution of cumulative coulomb failure stress along the Xianshuihe fault zone from 1893 to 2050

(a) The evolution of Coulomb stress changes caused by earthquakes (co-seismic + post-seismic), (b) The evolution of cumulative Coulomb failure stress changes (co-seismic+post-seismic+inter-seismic).

仑应力增加也主要依赖于构造加载作用(表4),体现了震间效应对这三次强震的重要影响。

1981年道孚 M6.9 地震后,鲜水河断裂带至今未发生 6.7 级以上地震,将库仑应力演化计算持续到 2050 年,假设期间无强震发生. 计算结果显示,鲜水河南段 S10 磨西段的库仑应力始终处于较高的水平,库仑应力增加最为显著,该段上一次强震发生于 1786 年,地震危险性值得关注;受构造应力作用的影响,S5 八美段库仑应力正影响区的范围逐渐增加,至 2050 年,S4 道孚段、S7 色拉哈段、S8 康定段的库仑应力显著增加,鉴于上一活跃期(1700—

1816 年)有两个断层段联合破裂的历史^[4,15],若 S4、S5 段或 S7、S8 段的库仑应力增加区联合起来,将有触发大地震的可能;另外 S6 雅拉河段同样属于累积库仑应力增加段. 本文断层段库仑应力变化的结果与 Papadimitriou 等^[15] 和 Wen 等^[4] 的研究结果有一定可比性。

本文在应力计算中仍有不确定性存在,这种不确定性源于演化参数设置、分层地壳模型的参数选取、断层物理参数的确定等. 本文取有效摩擦系数 μ' 为 0.4,研究表明 μ' 选取可能与断层类型^[27,38] 及断层滑动速率相关^[38-40]. 我们分别采用有效摩擦系数为 0.2、0.4、0.8 进行敏感性分析,破裂中心的库仑破裂应力变化结果显示,对于以走滑为主、高滑动速率的鲜水河断裂带来说,有效摩擦系数的选取对应力演化结果影响不显著,认为有效摩擦系数取 0.4 较为合理. 除了黏滞松弛效应,震后余滑和孔隙回弹也是震后应力调整的一个方面,只是其理论尚未统一,在各研究中很少涉及;另外,震间库仑应力变化计算中,断层段完全闭锁是一种理想的近似,实际上震间的滑动速率相对于地质上的长期滑动速率要低. 另外,在库仑应力演化结果的基础上,如何结合背景地震发生率明确各断层段的地震危险性也是需关注的重要问题,在今后的深入研究中,有待进一步

表4 鲜水河断裂带 1893 年以后同震、震后、震间效应在强震破裂中心产生的库仑应力变化量(单位:MPa)

Table 4 Coulomb stress changes caused by the effects of co-seismic, post-seismic and inter-seismic at the strong earthquake rupture center on the Xianshuihe fault zone since 1893 (Unit: MPa)

库仑应力变化	1904	1923	1955	1967	1973	1981
同震	0.086	0.131	0.097	0.058	2.732	0.133
1893 年震后	0.04	0.062	0.085	0.063	0.307	0.558
以后震间	0.058	0.656	0.235	0.328	0.55	0.422
累积	0.183	0.848	0.418	0.449	3.589	1.114
1817—1892	0.396	1.654	0.286	0.333	0.453	0.396

改进和解决.

致谢 感谢闻学泽老师对本研究提出的建设性意见和有益的讨论.

参考文献(References)

- [1] 李坪. 鲜水河一小江断裂带. 北京: 地震出版社, 1993: 74.
Li P. The Xianshuihe-Xiaojiang Fault Zone (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1993: 74.
- [2] 张国民, 马宏生, 王辉等. 中国大陆活动地块边界带与强震活动. 地球物理学报, 2005, 48(3): 602-610.
Zhang G M, Ma H S, Wang H, et al. Boundaries between active-tectonic blocks and strong earthquakes in the China mainland. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(3): 602-610.
- [3] 王贵宣, 郑大林, 张肇诚等. 鲜水河断裂带地震活动特征及强震发生随时间增长概率. 地震研究, 1995, 18(3): 221-226.
Wang G X, Zheng D L, Zhang Z C, et al. The seismicity features of the Xianshuihe fault zone and increasing probability of strong earthquake occurrence with time. *Journal of Seismological Research* (in Chinese), 1995, 18(3): 221-226.
- [4] Wen X Z, Ma S L, Xu X W, et al. Historical pattern and behavior of earthquake ruptures along the eastern boundary of the Sichuan-Yunnan faulted-block, southwestern China. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2008, 168(1-2): 16-36.
- [5] 邓起东, 张培震, 冉永康等. 中国活动构造基本特征. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2002, 32(12): 1020-1031.
Deng Q D, Zhang P Z, Ran Y K, et al. Basic characteristics of active tectonics of China. *Science in China (Series D)*, 2003, 46(4): 356-372, 417-418.
- [6] 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: 地球科学, 2003, 33(增刊): 12-20.
Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, et al. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China. *Science in China (Series D)*, 2003, 46(S2): 13-24.
- [7] 张秋文, 张培震, 王乘等. 鲜水河断裂带断层间相互作用的触震与缓震效应. 地震学报, 2003, 25(2): 143-153.
Zhang Q W, Zhang P Z, Wang C, et al. Earthquake triggering and delaying caused by fault interaction on Xianshuihe fault belt, southwestern China. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2003, 25(2): 143-153.
- [8] 王辉, 刘杰, 石耀霖等. 鲜水河断裂带强震相互作用的动力学模拟研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(7): 808-818.
Wang H, Liu J, Shi Y L, et al. Dynamic simulation of interactions between major earthquakes on the Xianshuihe fault zone. *Science in China (Series D)*, 2008, 51(10): 1388-1400.
- [9] Pollitz F F. Postseismic relaxation theory on the spherical earth. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1992, 82(1): 422-453.
- [10] Pollitz F F, Sacks I S. The 1995 Kobe, Japan, Earthquake: A Long-Delayed Aftershock of the Offshore 1944 Tonankai and 1946 Nankaido Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1997, 87(1): 1-10.
- [11] 陈连旺, 陆远忠, 刘杰等. 1966 年邢台地震引起的华北地区应力场动态演化过程的三维粘弹性模拟. 地震学报, 2001, 23(5): 480-491.
Chen L W, Lu Y Z, Liu J, et al. Three dimensional viscoelastic simulation on dynamic evolution of stress field in north China induced by the 1966 Xingtai earthquake. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2001, 23(5): 480-491.
- [12] 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.
- [13] 邵志刚, 周龙泉, 蒋长胜等. 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震对周边断层地震活动的影响. 地球物理学报, 2010, 53(8): 1784-1795.
Shao Z G, Zhou L Q, Jiang C S, et al. The impact of Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake on the seismic activity of surrounding faults. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(8): 1784-1795.
- [14] Scholz C H. Earthquakes and friction laws. *Nature*, 1998, 391(6662): 37-42.
- [15] Papadimitriou E, Wen X Z, Karakostas V, et al. Earthquake triggering along the Xianshuihe Fault Zone of Western Sichuan, China. *Pure and Applied Geophysics*, 2004, 161(8): 1683-1707.
- [16] Allen C R, Zhuoli L, Hong Q, et al. Field study of a highly active fault zone; The Xianshuihe fault of southwestern China. *Geological Society of America Bulletin*, 1991, 103(9): 1178-1199.
- [17] Jaeger J C, Cook N G W. *Fundamentals of Rock Mechanics*. New York: Barnes and Noble Inc., 1969.
- [18] King G C P, Stein R S, Lin J. Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, 84(3): 935-980.
- [19] 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.
- [20] 程佳, 刘杰, 甘卫军等. 1997 年以来巴颜喀拉块体周缘强震之间的黏弹性触发研究. 地球物理学报, 2011, 54(8): 1997-2010.
Cheng J, Liu J, Gan W J, et al. Coulomb stress interaction

- among strong earthquakes around the Bayan Har block since the Manji earthquake in 1997. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(8): 1997-2010.
- [21] Freed A M, Lin J. Delayed triggering of the 1999 Hector Mine earthquake by viscoelastic stress transfer. *Nature*, 2001, 411(6834): 180-183.
- [22] Deng J S, Sykes L R. Evolution of the stress field in southern California and triggering of moderate-size earthquakes: A 200-year perspective. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B5): 9859-9886.
- [23] Nalbant S S, McCloskey J, Steacy S, et al. Stress accumulation and increased seismic risk in eastern Turkey. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 195(3-4): 291-299.
- [24] Savage J C, Burford R O. Geodetic determination of relative plate motion in central California. *Journal of Geophysical Research*, 1973, 78(5): 832-845.
- [25] Savage J C. A dislocation model of strain accumulation and release at a subduction zone. *Journal of Geophysical Research*, 1983, 88(B6): 4984-4996.
- [26] Matsu'ura M, Jackson D D, Cheng A. Dislocation model for aseismic crustal deformation at Hollister, California. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91(B12): 12661-12674.
- [27] Ali S T, Freed A M, Calais E, et al. Coulomb stress evolution in Northeastern Caribbean over the past 250 years due to coseismic, postseismic and interseismic deformation. *Geophysical Journal International*, 2008, 174(3): 904-918.
- [28] Harris R A. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(B10): 24347-24358.
- [29] Wang R J, Lorenzo-Martin F, Fong F. PSGRN/PSCMP-a new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory. *Computers & Geosciences*, 2006, 32(4): 527-541.
- [30] 王椿镛, 韩渭宾, 吴建平. 松潘—甘孜造山带地壳速度结构. *地震学报*, 2003, 25(3): 229-241.
- Wang C Y, Han W B, Wu J P, et al. Crustal structure beneath the Songpan-Garze orogenic belt. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2003, 25(3): 229-241.
- [31] 许志琴, 李海兵, 唐哲民. 大型走滑断裂对青藏高原地体构架的改造. *岩石学报*, 2011, 27(11): 3157-3170.
- Xu Z Q, Li H B, Tang Z M, et al. The transformation of the terrain structures of the Tibet Plateau through large-scale strike-slip faults. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2011, 27(11): 3157-3170.
- [32] 邵志刚, 傅容珊, 薛霆斌. 昆仑山 M_s 8.1级地震震后变形场数值模拟与成因机理探讨. *地球物理学报*, 2008, 51(3): 805-816.
- Shao Z G, Fu R S, Xue T X, et al. The numerical simulation and discussion on mechanism of postseismic deformation after Kunlun M_s 8.1 earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(3): 805-816.
- [33] 朱介寿. 汶川地震的岩石圈深部结构与动力学背景. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2008, 35(4): 348-356.
- Zhu J S. The Wenchuan earthquake occurrence background in deep structure and dynamics of lithosphere. *Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition)* (in Chinese), 2008, 35(4): 348-356.
- [34] Bai D H, Unsworth M J, Meju M A, et al. Crustal deformation of the eastern Tibetan plateau revealed by magnetotelluric imaging. *Nature Geoscience*, 2010, 3(5): 358-362.
- [35] 张国民, 汪素云, 李丽. 中国大陆地震震源深度及其构造含义. *科学通报*, 2002, 47(9): 663-668.
- Zhang G M, Wang S Y, Li L, et al. Focal depth research of earthquakes in Mainland China: Implication for tectonics. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(12): 969-974.
- [36] 闻学泽. 四川西部鲜水河—安宁河—则木河断裂带的地震破裂分段特征. *地震地质*, 2000, 22(3): 239-249.
- Wen X Z. Character of rupture segmentation of the Xianshuihe-Anninghe-Zemuhe fault zone, Western Sichuan. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2000, 22(3): 239-249.
- [37] 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, 33(S1): 153-162.
- Xu X W, Wen X Z, Zheng R Z, et al. Pattern of Latest tectonic motion and its dynamics for active blocks in Sichuan-Yunnan region, China. *Science in China*, 2003, 46(S2): 210-226.
- [38] Parsons T, Stein R S, Simpson R W, et al. Stress sensitivity of fault seismicity: A comparison between limited-offset oblique and major strike-slip faults. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(B9): 20183-20202.
- [39] 单斌, 熊熊, 郑勇. 2008年5月12日 M_w 7.9汶川地震导致的周边断层应力变化. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39(5): 537-545.
- Shan B, Xiong X, Zheng Y, et al. Stress changes on major faults caused by M_w 7.9 Wenchuan earthquake, May 12, 2008. *Sci. China Ser. D-Earth Sci.*, 2009, 52(5): 593-601.
- [40] 单斌, 熊熊, 金笔凯. 松潘—甘孜块体东北端强震间相互作用及地震危险性研究. *地球物理学报*, 2012, 55(7): 2329-2340.
- Shan B, Xiong X, Jin B K, et al. Earthquake stress interaction in the northeastern Songpan-Garze block and its implication for earthquake hazard. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(7): 2329-2340.