

北祁连山东段强震间静态库仑应力变化 与触发作用研究^①

刘方斌¹, 王爱国^{1,2}, 袁道阳^{1,2}

(1.中国地震局兰州地震研究所,甘肃 兰州 730000;

2.中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地,甘肃 兰州 730000)

摘要:基于 Coulomb3.3 软件,通过研究地震累加与单震的库仑应力变化对后续地震的触发关系,对北祁连山东段及邻区自 1561 年以来的 9 次强震静态库仑应力变化进行了研究。结果表明:对于叠加现象来说,后一地震事件除了门源地震落在应力影区外,先前地震活动对后续地震都产生了明显的触发作用,库仑应力变化在 0.1~4.066 bar 之间;而对于单独事件的应力变化,断层距较小的地震之间相互触发的影响较大。根据库仑应力变化和年应力累积量的比值,得出地震在没有先前地震作用下还需要的应力累积时间。最后根据大震后区域断裂库仑应力变化及断裂强震活动历史等特征,对本区未来强震地震危险性进行分析,得出本区未来地震危险区位于云雾山断裂以及天祝—景泰—古浪一带的金强河断裂上。

关键词:北祁连山东段;强震;库仑应力变化;应力触发

中图分类号: P315.727

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)02-0360-12

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2014.02.0360

Static Coulomb Stress Changes and Triggering Interaction among Strong Earthquakes in the Eastern Segment of North Qilian Mountain

LIU Fang-bin¹, WANG Ai-guo^{1,2}, YUAN Dao-yang^{1,2}

(1.Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2.Lanzhou base of Institute of Earthquake Science, CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Earthquakes are a natural phenomenon caused by sudden rupture and slippage of crustal rocks after stress reaches the point of rock failure. The coseismic dislocations of a major earthquake not only cause the stress state changes in adjacent areas, but also change the Coulomb stress. Research shows that a very small static Coulomb stress changes can trigger seismic activity (i.e., earthquakes). Therefore, it is important to explore the relationship between Coulomb stress changes and earthquake triggering. First of all, we conducted primary research for strong earthquakes by Coulomb 3.3 on the static Coulomb stress changes with the primary study region being the eastern margin of north Qilian Mountain and adjacent area from 1561 to present. Meanwhile, we used cumulative and individual methods to calculate the Coulomb stress changes between fore-shocks and aftershocks. Our results show that the next events, except Menyuan earthquake in

① 收稿日期:2013-11-06

基金项目:中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(2013A77;2013-2)

作者简介:刘方斌(1989-),男(汉族),山东青岛人,硕士研究生,主要从事地球动力学及活动构造学研究.Email:liufangbin8908@163.com.

通讯作者:王爱国(1972-),男(汉族),湖北洪湖人,副研究员,主要从事地震地质、工程地震、寒区工程方向的研究.Email:waguo2008@163.com

1986, would occur in the stress triggering area. The value of changes is between 0.1 bar and 4.066 bar, and trigger rate reached a high of 87.5%. In other instances, when the source fault is closed to receive fault, the former event can trigger the next. Secondly, according to the relationship between Coulomb stress changes and stress accumulation rate, we calculated the stress accumulated before the next event, not considering foreshocks. Finally, we assessed the future strong seismic hazard for this area according to earthquake migration and stress triggering. We used Okada's method to calculate the change of static Coulomb failure stress among faults for the study area. In 1920 and 1927, two magnitude 8 earthquakes occurred, prior to the earthquakes the Coulomb stress significantly increased in the eastern side of Yunwu Mountain and western part of Jingtai—Tianzhu—Gulang. This suggests that an increase of Coulomb stress may forecast a triggered earthquake. It is noteworthy that the Tianzhu 6.2 earthquake occurred in the western part of the danger zone after two prior earthquakes. Considering the Coulomb stress triggering and the history of seismic activity, future earthquake risk should be strong in this area as well as the eastern side of Yunwu Mountain and Jinqianghe fault zone in the western part of Jingtai—Tianzhu—Gulang. This paper attempts to combine Coulomb stress adjustment and fracture characteristics with seismic activity. Results are consistent with other approaches in the Northeastern Qilian area, indicating that Coulomb stress changes can be used as an indicator of oncoming seismic activity. Application of this method will require further improvement to assess future seismic risk.

Key words: the eastern segment of North Qilian Mountain; strong earthquakes; Coulomb stress changes; stress triggering

0 引言

强震的孕育与发生不是一个简单的破裂过程,而是在一定的构造应力场条件下断层之间相对运动的结果。一次大地震的同震位错会改变周围断裂或邻近区域的应力状态,从而导致库仑应力发生变化。研究表明,很小的静态库仑应力变化(阈值为 0.1 bar)就可能触发地震^[1-2]。根据库仑破裂准则,应力变化将影响断裂的破裂失稳条件,当应力变化为正值时,加速了周围断裂或邻近区域的应力累积,使得下次地震提前发生,这种作用即是地震触发效应;相反,应力变化为负值时,周围断裂或邻近区域的应力累积进程会出现延缓滞后现象^[3]。近年来大地震产生的库仑破裂应力变化在时间和空间上影响后续事件发生的研究引起了地震学家的广泛关注。刘桂萍^[4]、郝平^[5-8]、刘强^[9]等先后对多次地震的强余震触发问题进行了研究,发现库仑破裂应力的增加明显加速了后续中强地震的发生^[10-12];吴小平^[13]运用 DWN(离散波数)法计算和研究了 1988 年云南澜沧—耿马 $M_s 7.6$ 地震产生的完全库仑破裂应力变化的时空演化图像,证实了耿马 $M_s 7.2$ 地震受到了澜沧 $M_s 7.6$ 地震产生的动态和静态库仑破裂应力的触发作用;万永革等人^[14]依托 GPS 等数据资料,依据多层麦克斯韦弹粘性介质中位错产生的应力变

化,认为 1937 年 $M_s 7.5$ 花石峡地震、1963 年 $M_s 7.1$ 都兰地震、1973 年 $M_s 7.3$ 玛尼地震、1997 年 $M_s 7.5$ 玛尼地震造成 2001 年可可西里地震断层面上库仑破裂应力的增加。

北祁连山东段地处于青藏高原东北缘,是我国西部主要的活动断裂分布区之一,强震活动频繁,因此有很多学者对该区断裂及发震能力进行了研究^[15-19]。由于处于统一的构造应力场背景中,地震之间必然存在明显的应力调整作用。本文依据弹性半空间模型研究各次地震后库仑应力的变化及其与后续地震之间的关系,这对于研究该区地震迁移规律及未来地震危险区预测具有重要理论与实践意义。

1 孕震构造环境与资料选取

北祁连山东段位于青藏高原东北缘,主要分布有冷龙岭断裂、金强河断裂、老虎山—毛毛山断裂、海原断裂、古浪—中卫—同心活动断裂等多条大型左旋走滑活动断层(图 1)。由于受到印度板块向北挤压以及阿拉善和鄂尔多斯两大块体的阻挡,形成了向北凸出的弧形构造体系,该区历史上发生了多次强震,如 1709 年中卫南 $7\frac{1}{2}$ 级地震、1920 年海原 $8\frac{1}{2}$ 级地震、1927 年古浪 8 级地震等,近代中强地震

也时有发生。

本文选取区内自 1561 年至今为止 8 次 $M_s \geq 6.0$ 的历史地震和近代强震作为研究对象。尽管该区北部发生的 1739 年银川 8.0 级地震不属于祁连山区,但由于震级较大,破坏严重,且距本区相对较近,因此把它也作为研究对象。

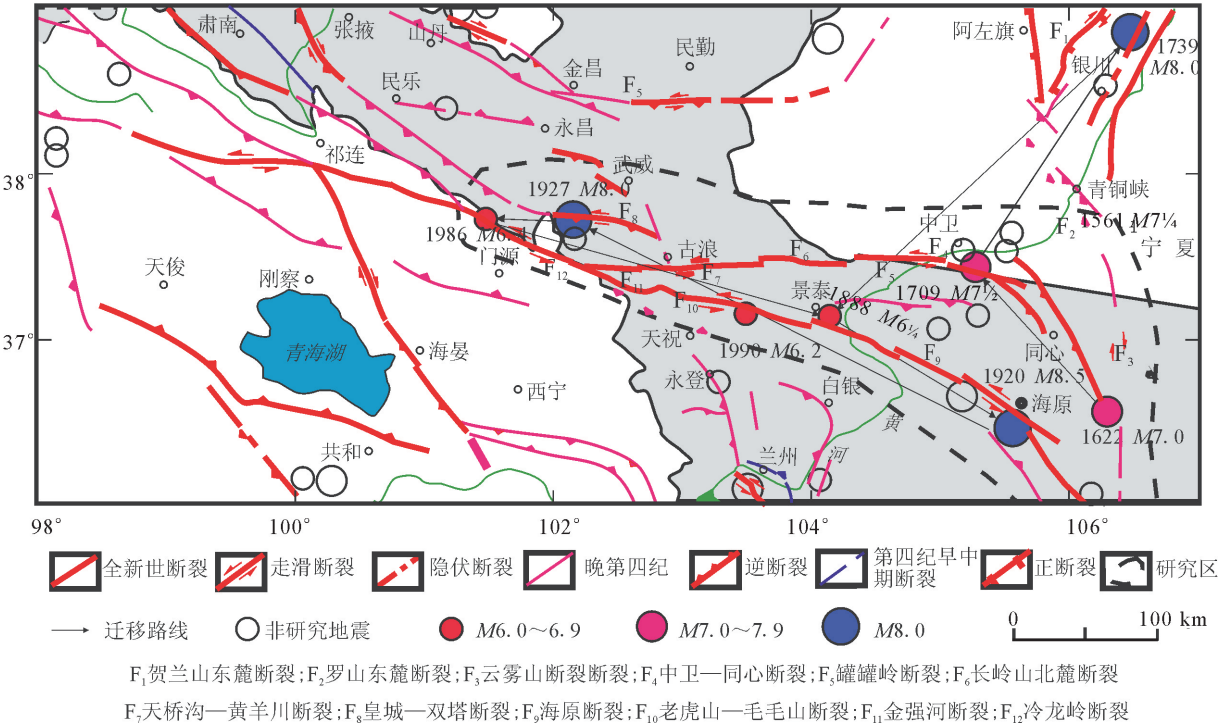


图 1 研究区活动断层及强震震中分布图

Fig.1 Distribution of active faults and epicenters in the study area

2 库伦破裂应力变化计算

2.1 库伦应力变化基本原理

根据库伦破裂准则,当岩石发生破裂时,促使它产生破裂的剪应力 τ 受到材料的内聚应力 S (内聚强度或剪切强度) 和乘以常数的平面法向应力 σ_n (拉张为正) 及孔隙压力 p 的抵抗,即平面中的抗剪强度为 $S - \mu(\sigma_n + p)$ 。因此,破裂面上的库伦应力可定义为

$$CFS = \tau + \mu(\sigma_n + p) - S \tag{1}$$

式中, τ 为破裂面上的剪应力; μ 为内摩擦系数; σ_n 为正应力,拉张为正,压缩为负; p 为地壳内部的孔隙产生的张性应力。所以,当剪应力 τ 越接近于 $S - \mu(\sigma_n + p)$ 时,材料就越容易破裂。倘若 μ 和 S 不随时间的变化而变化,那么,库伦应力变化可以表示为

$$\Delta CFS = \Delta \tau + \mu(\Delta \sigma_n + \Delta p) \tag{2}$$

为简化孔隙压力在库伦应力变化上带来的影响,Rice 和 Cleary^[20] 以及 Roeloffs^[21] 假设材料介质为均质各向同性。在静态应力发生变化后,流体自由流动之前,规定空隙压力变化为

$$\Delta p = -\beta' \Delta \sigma_{kk} / 3 \tag{3}$$

式中, β' 是斯肯普顿系数^[20,22-23],取值为 0.5 ~ 0.9^[20-21,24]; $\Delta \sigma_{kk}$ 是应力张量的对角线之和,即 $\Delta \sigma_{kk} = \Delta \sigma_{11} + \Delta \sigma_{22} + \Delta \sigma_{33}$ 。若 $\Delta \sigma_{11} = \Delta \sigma_{22} = \Delta \sigma_{33}$,则 $\Delta \sigma_{kk} / 3 = \Delta \sigma$ 。因此,公式(3)变为:

$$\Delta p = -\beta' \Delta \sigma \tag{4}$$

将式(4)代入式(2),得

$$\Delta CFS = \Delta \tau + \mu' \Delta \sigma \tag{5}$$

其中, $\mu' = \mu(1 - \beta')$ 为视摩擦系数。本文根据 Stein^[26]、King^[27]、万永革^[28]、Troise^[29]、Astiz^[30] 的计算,将视摩擦系数定为 0.4。数值试验表明,改变此值对库伦破裂应力变化的空间分布影响不大,但对应力变化的大小有一定的影响^[28]。

基于 Okada^[31] 所提出的弹性半空间模型,根据源断层的同震位错量计算在周围断面(目标断层)上的库伦破裂应力变化。其中, $\Delta CFS > 0$ 和 $\Delta CFS < 0$ 分别表示断面上被加载(应力加大)或被卸载(应力松弛)。

2.2 断层位错模型

建立基于 Okada 的弹性半空间位错模型。已

知的各地震破裂主断层的相关参数见表 1。采用地震累积和单震计算原理,对强震间的库仑应力变化进行研究对比,得出强震之间的触发关系以及库仑应力变化图像。

表 1 北祁连山东段发震断层产状及断层位错参数

Table 1 Parameters of faults offsets and occurrence in eastern segment of north Qilian mountain

地震		发震断层	震中		产状/(°)			断层规模/km			位错/m		文献
时间/年	震级/M		E/(°)	N/(°)	走向	倾向	滑动角	长度	宽度	深度	水平	垂直	
1561	7¼	罗山东麓	106.18	37.5	348	70	—165.5	60	26.6	25	5.4	—1.5	[32]
1622	7	云雾山	106.3	36.5	180	90	180	50	25	25	1	0	[32]
1709	7½	中卫—同心	105.3	37.2	108	60	6	64	34.64	30	—7.4	0.75	[32]
1739	8	贺兰山东麓南	106.5	38.8	37	70	—164.3	37.5	21.28	20	4.37	—2.1	[32]
		贺兰山东麓北			50	70	—164.3	42.5	21.28	20	4.37	—2.1	
1888	6¼	老虎山北缘	104.18	37.1	290	78	5	38	17.49	15	—3.6	1.57	[33]
1920	8½	海原东	105.3	37.1	325	90	0	60	30	30	—6.1	0	[32]
		海原中			304	90	0	73	30	30	—8	0	[33]
		海原西			298	90	0	104	30	30	—5.1	0	
1927	8	皇城—双塔	102.18	37.7	105	50	90	76	41.7	38	0	7.4	[23]
		天桥沟黄羊川			90	64	13	75	42.2	38	—6.5	1.5	[17]
1986	6.4	冷龙岭	101.458	37.653	125	37	—55	24.5	10.09	30	—0.34	0.49	[19]
1990	6.2	老虎山—毛毛山	103.72	37.11	98	85	—9	38	30.11	30	—4	0.6	[33]
		罐罐岭			265	80	36	40			—6	1.75	[43]
		长岭山北麓			85	84	180	58			8.3	0	[44][45]
		金强河			295	60		34					[33]

注:罐罐岭断裂、长岭山北麓断裂以及金强河断裂没有历史地震记录,作为危险性分析目标断层,空虚部分记录不详。水平位错右旋为正,垂直位错逆断层为正。

2.3 地震相互作用间的库仑应力变化

(1) 1561 年中宁 7¼ 级地震

该地震发生在宁夏中宁地区,位于罗山东麓断裂上。该断裂是青藏块体和鄂尔多斯块体的分界构造之一,呈近 SN 走向。地震产生了一条长约 60 km,宽 26.6 km 的正右旋走滑断层面,本文将其作为首要发震断层,对后续地震事件的库仑应力变化进行计算。计算中将本次地震之前的库仑应力变化归为零,并将地震的震源深度作为库仑应力计算深度。

(2) 1622 年固原 7 级地震

1561 年中宁 7¼ 级地震发生的 60 多年后,在其南面的云雾山断裂上发生了一次 7 级地震,断面上的库仑应力变化值均为正值(图 2(a)),断面最小值也在 0.3 bar 之上,震中的库仑应力变化值为 0.7 bar,反映了 1561 年中宁 7¼ 级地震对 1622 年的地震有触发作用。

(3) 1709 年中卫 7½ 级地震

1709 年 10 月 14 日在宁夏中卫县附近发生了一次 7½ 级地震,发震断层为中卫—同心活动断裂带,是北祁连山断裂系东段的重要组成部分^[33]。该断裂带由 EW 向转为 NNW 向弧形延伸长 200 余公里,由多条断裂段雁列而成,宽 3~16 km^[34]。如图 2(b)可知其震中库仑应力变化值为 0.355 bar,而图 2(c)中震中却落在应力影区,这说明 1561 年地震对中卫南地震有明显触

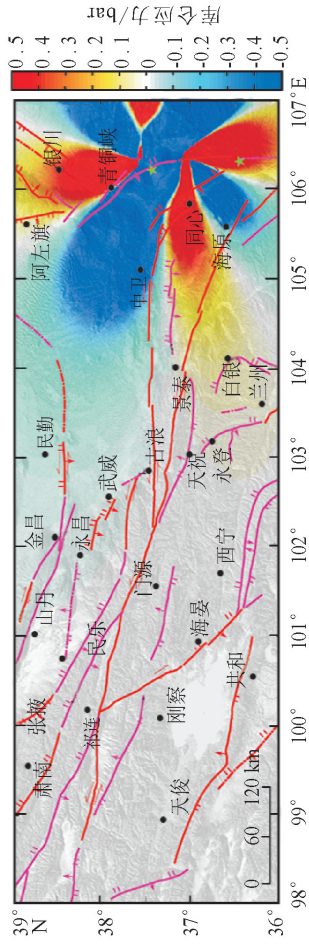
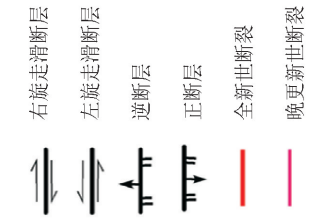
发作用,而 1622 年地震则对其有延缓或滞后作用。出现这种现象的原因是由目标断层与源断层性质及空间位置关系决定的。

(4) 1739 年银川—平罗 8 级地震

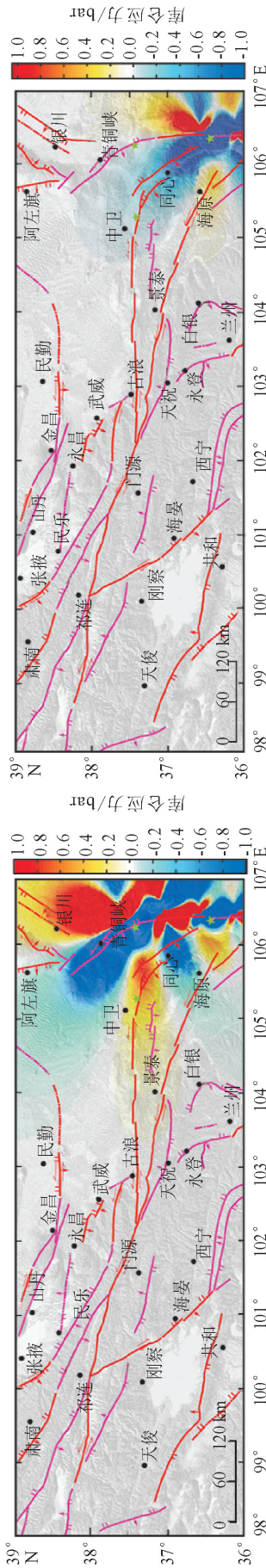
银川—平罗 8 级地震发生在贺兰山东麓,黄河西岸,位于中国南北地震带北端地震活动最活跃的区段。1561 年、1622 年和 1709 年 3 次大震的应力叠加使得贺兰山东麓断裂均落在库仑应力增加区域,最小值也在 0.1 bar 之上,其中震中库仑变化值为 0.434 bar(图 2(d))。就单独的 1709 年地震来说,在贺兰山东麓断裂上的库仑应力变化值也是增加的,震中的值则小于先前叠加值,为 0.146 bar(图 2(e))。可见先前 3 次地震都有利于促使本次地震的发生,且应力处于长时间累积阶段。

(5) 1888 年景泰 6¼ 级地震

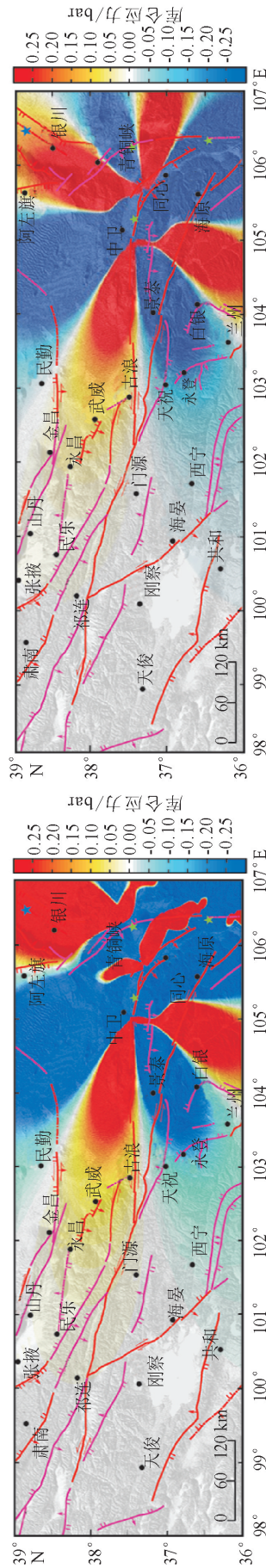
1888 年景泰地震的地表破裂带位于老虎山断裂带上,断裂总体呈 NW 走向,向西沿着老虎山和毛毛山北麓,经天祝县后与 1927 年古浪地震断层相交。由于老虎山断裂为左旋走滑断层,其水平位移分量远大于垂直分量,我们将 1561 年、1622 年、1709 年和 1739 年四次地震的目标断层采用最优走滑断层来计算,得出 1888 年震中恰好落在库仑应力增加区,其值大于 0.1 bar(图 2(f))。由于景泰地震震中与 1739 年地震震中



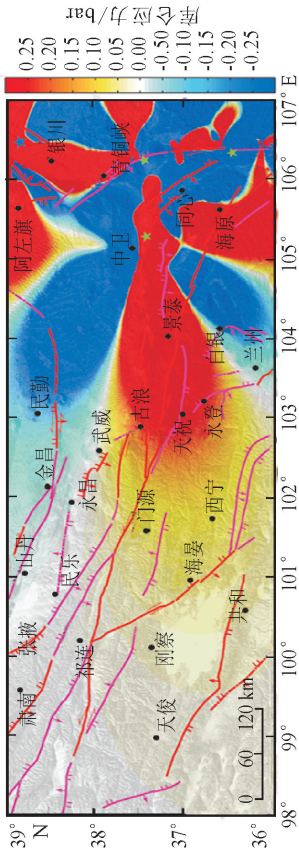
(a) 1561年中宁地震对云雾山断裂



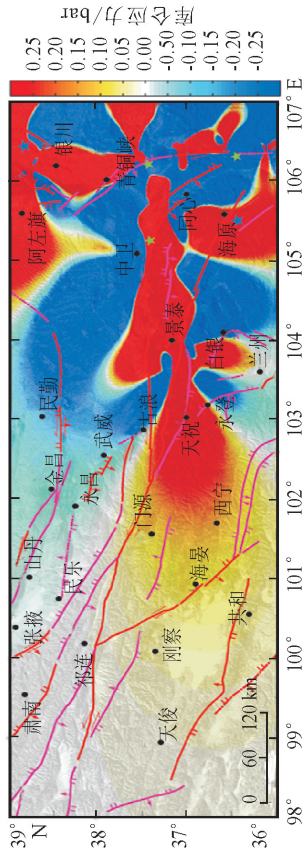
(b) 1622年中宁地震和1622年固原地震对中卫-同心断裂



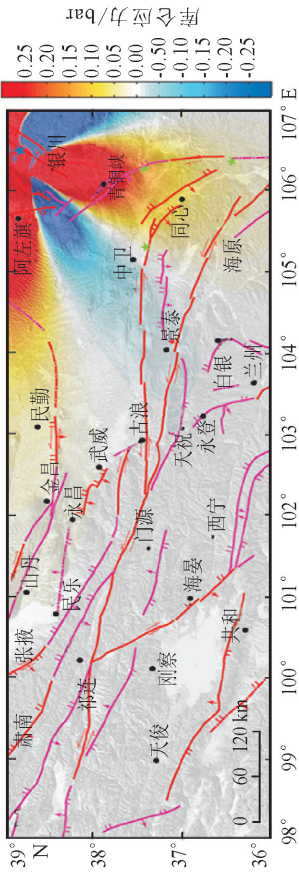
(c) 1709年中宁地震对贺兰山东麓断裂



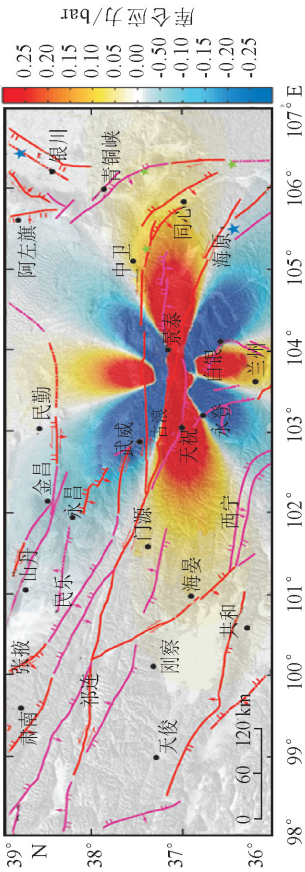
(f) 1561年地震、1622年地震、1709年地震和1739年银川-平罗地震对老虎山断裂



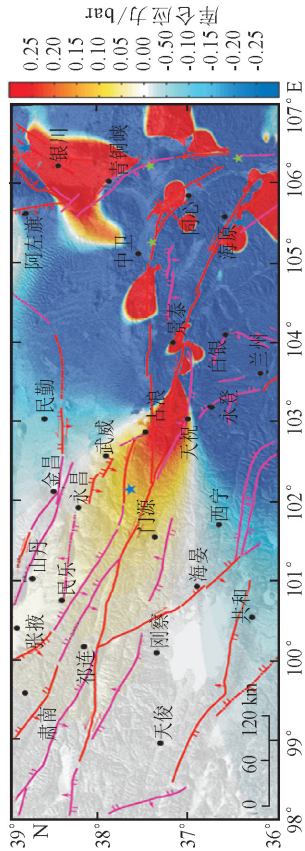
(h) 1561年、1622年、1709年、1739年和1888年景泰地震对海原断裂



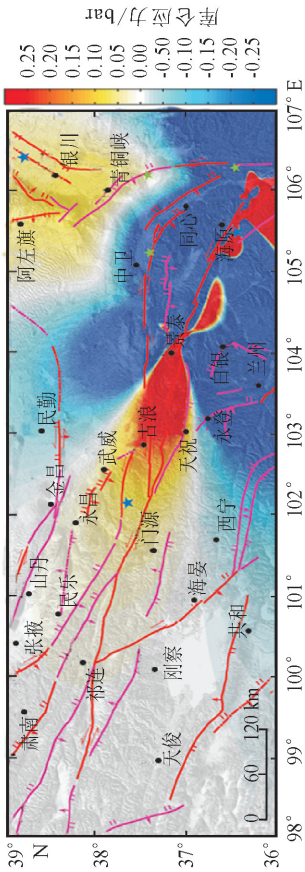
(g) 1739年银川-平罗地震对老虎山断裂



(i) 1888年景泰地震对海原断裂



(j) 1561-1920年海原地震对皇城-双塔断裂



(k) 1920年海原地震对皇城-双塔断裂

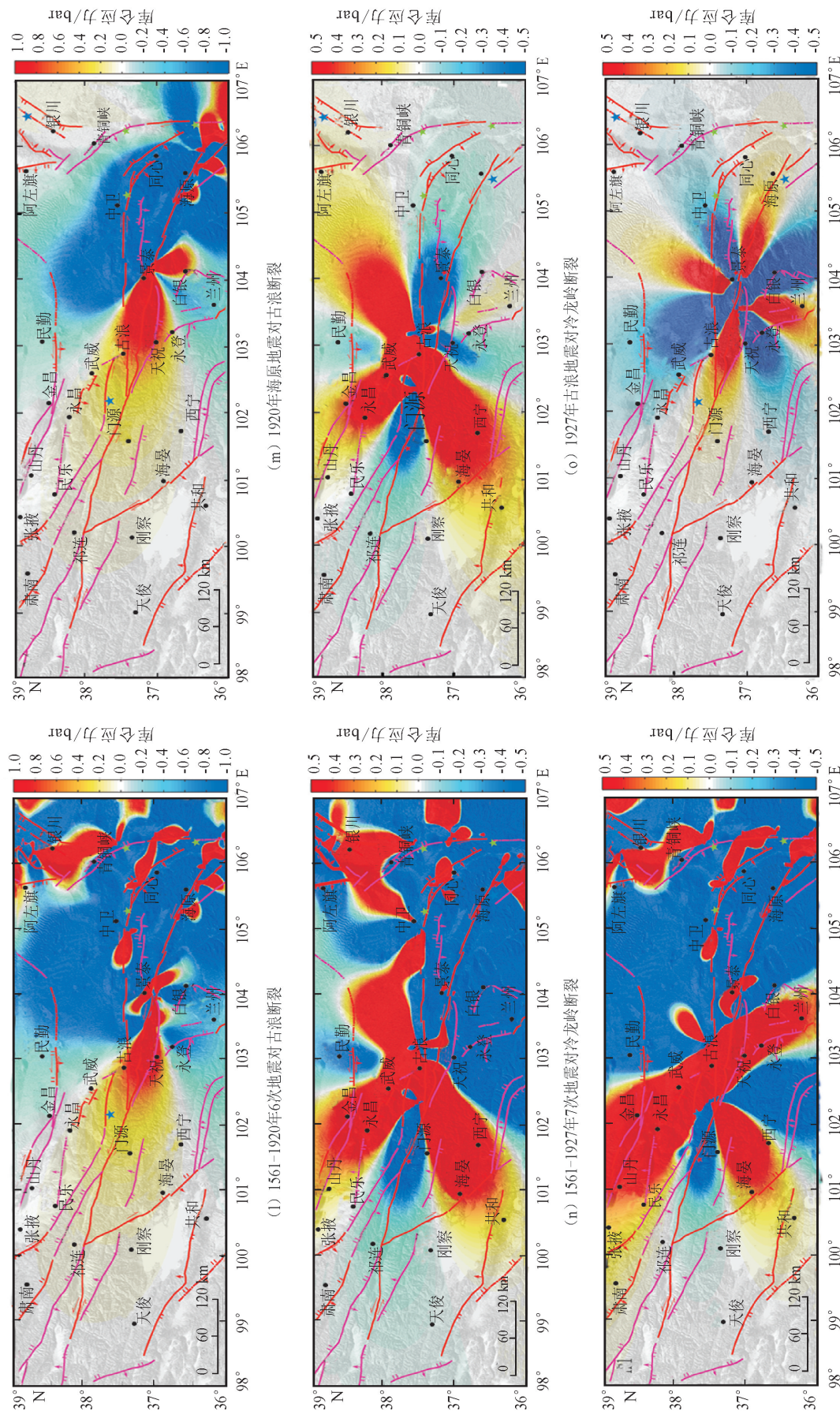


图2 各次强震之间的库仑应力变化分布图
Fig. 2 Images of Coulomb stress change among strong earthquakes

相隔 283 km,距离相对较远,两者之间基本不存在触发作用(图 2(g))。

(6) 1920 年海原 8½ 级地震

1920 年 12 月海原 8½ 级地震发生在青藏高原东北缘的海原断裂上,该断裂是早更新世晚期以来开始强烈活动的左旋走滑断层,其走滑位移量达 10~15 km^[35]。根据对海原断裂以及震源机制等的认识,将海原地震作为直立的左旋走滑破裂事件^[3]。因此把海原断裂作为目标断层,将源断层采用叠加和单独两种方式分别进行计算。叠加的震中库仑应力变化为 0.8 bar(图 2(h));而 1888 年景泰地震在海原断裂上的库仑应力变化量级很小,基本处于 0 左右(图 2(i))。也就是说景泰 6¼ 级地震对海原地震应力触发和抑制的作用不明显,而先前几次地震的库仑应力累积量则对海原地震有一定的触发。

(7) 1927 年古浪 8 级地震

1927 年古浪 8 级地震是继 1920 年海原 8½ 级地震之后的又一次大震,是祁连山—河西走廊地区有记录以来最大的一次破坏性地震,其震中烈度达到 XI 度。对于此次地震的发震断层存在众多争议^[36-39]①,主要集中在发震断层是皇城—双塔断裂还是天桥沟—黄羊川断裂上,是走滑性质还是逆冲性质?对此,研究中分别采用前述两条断层为古浪地震的发震断层进行库仑应力计算。结果显示,利用前者作为发震断层得出古浪地震发震断层上地震累加和单次地震的静态库仑应力变化分别为 0.097 bar(图 2(j))和 0.068 bar(图 2(k)),这与刘桂萍^[40]和傅征祥^[36]得出的结果相差不大;利用后者得出值为 0.263 bar(图 2(l))与 0.197 bar(图 2(m)),都处在阈值之上。因此可以分析出天桥沟—黄羊川断裂应该是古浪地震的首要发震断层,皇城—双塔为次要断层,该地震可能是两断层共同作用的结果。

(8) 1986 年门源 6.4 级地震

此次地震发生在门源县城北约 30 km 处的沿冷龙岭山脊通过的断层上,其走向为 N60°W,与地震的高烈度区的长轴一致,是北祁连断层带中段的组成部分^[41]。冷龙岭断裂全长 127 km,总体走向 N60°~70°W,倾向 NE,倾角 50°~60°^[18]。通过将前几次强震叠加与古浪地震在该次地震断裂上的库仑应力变化进行计算,得出结果均在应力影区,其值分别为-0.56 bar(图 2(n))和-0.59 bar(图 2(o)),即古浪地震使门源地震推迟发生。

(9) 1990 年天祝 6.2 级地震

该地震发生在甘肃省天祝、景泰和古浪三县交

界地区,是继 1954 年山丹 7¼ 级和民勤 7 级地震之后甘肃省境内发生的最大一次地震。此次地震发震断层为老虎山北麓断裂,长约 48 km,呈 N70°W 向。该断裂全新世活动较为强烈,但自 1500 年以来该区仅发生两次 M_s 6.0 以上地震,说明该断裂可能一直处于应力积累阶段。据上述推论,我们对该断裂进行库仑应力计算,从图 2(n)和 2(p)可以看出,两图应力变化基本相似,唯一不同的是图 2(p)的老虎山西段库仑应力变化由负变为正,这可能与门源地震触发有关。而老虎山北麓断裂却几乎没有任何变化,这跟门源地震和天祝地震震中距离较远且震级较小有关,说明它们之间不存在触发关系。而 1888 年景泰 6¼ 级地震与该地震震中相隔 20 km 左右^[42],发震断裂均为老虎山断裂,且由此推出两次地震可能存在某种力学联系。为此,我们采用 1888 年地震的发震断层为源断层进行计算,得出图 2(q),图像显示本次地震震中位于应力增加区,值为 1.479 bar。由此可以断定,此次地震的发生可能与包括 1888 年在内的几次地震的库仑应力积累有关系,诱发该次地震提前发生。

3 年应力累积率及累积时间

年应力累积率指一个区域库仑应力的年增加量。根据上述强震的位错参数以及地质资料计算了大震发生后对周围地区库仑应力变化,通过其与年应力累积率的比值,得出地震在没有先期地震作用下所需要的累积时间^[43]

$$\Delta t = \frac{\Delta CFS}{\dot{\tau}} \quad (6)$$

其中 $\dot{\tau}$ 是断层平面上的年应力累积率。在简单情况下

$$\dot{\tau} = 2G\dot{\gamma} \quad (7)$$

式中, G 是刚性模量,对于地壳中花岗岩取 $2\sim 3\times 10^{10}$ Pa,本文对其折中取 2.5×10^{10} Pa; $\dot{\gamma}$ 是年应变速率,公式为

$$\dot{\gamma} = \frac{iL}{L} \quad (8)$$

L 和 i 分别是断层沿滑动方向长度,即断层总位移值和年滑移速率。其中年滑移速率可以根据地质资料得出,断层沿滑动方向长度可以根据下式可以得出:

① 刘百箴,等.1927 年古浪 7.9 级地震的地表破裂带研究(内部报告),1987.

$$L = \frac{l}{|\cos\theta|} \tag{9}$$

其中 l 为断层面水平长度; θ 为滑动角。
因此,我们可以根据式(6)、(7)、(8)、(9)可以计算出各断层之间的相互作用使得后续地震提前或滞

后发生的大致时间(表 2)。从表中可以看出,前震对后续地震触发时间的提前或延迟取决于源断层与目标层的位置及活动性质。其中断层距较小的地震之间相互触发的影响相对较大,大震对后续地震触发作用产生的累积时间影响较大。

表 2 库仑应力变化统计一览表

Table 2 Parameters of Coulomb stress changes

源地震/M	目标地震/M	目标断层	$\Delta CFS/\text{bar}$		$\dot{\epsilon}/$ ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)	$\dot{\tau}/$ ($\text{bar} \cdot \text{a}^{-1}$)	$\Delta t/\text{a}$		断层距/km
			叠加	单独			叠加	单独	
中宁 7¼	固原 7	云雾山		0.7	1.0	0.01		70	58
固原 7	中卫 7½	中卫—同心	0.355	−0.06	2.5	0.0194	18	−3	100
中卫 7½	银川 8	贺兰山东麓	0.434	0.146	3.65	0.022	20	7	162
银川 8	景泰 6¼	老虎山	>0.1	<0	4.80	0.0629	>2	<0	264
景泰 6¼	海原 8½	海原断裂	0.8	~0	6.4	0.0135	59	0	20
海原 8½	古浪 8	古浪	0.263	0.197	3.474	0.0225	12	9	56
古浪 8	门源 6.4	冷龙岭	−0.56	−0.59	4.003	0.047	−12	−13	105
景泰 6¼	天祝 6.2	老虎山	4.066	1.479	4.80	0.063	65	23	0

4 研究区未来地震危险区初步分析

特大地震的发生会对区域一定范围内的应力状态进行较大调整,从而改变区域未来地震格局。研究区于 1920 年与 1927 年分别在不同区段发生了 8½ 级地震和 8 级地震,对于本区应力状态进行了极大调整,图 3(a)为以这两次地震为输入源,以区内的贺兰山断裂、罗山东麓断裂、云雾山断裂、中卫—同心断裂、罐罐岭断裂、长岭山北麓断裂、天桥沟—黄羊川断裂、皇城—双塔断裂、海原断裂、老虎山—毛毛山断裂、金强河断裂以及冷龙岭断裂为目标断层进行计算得到的区域库仑应力变化。从图中可以看出这 2 次地震产生的库仑应力明显增加区位于东侧的云雾山以及西段景泰—天祝—古浪两个地区,而海原断裂则都处于应力影区。该两次大震之后发生的 1990 年天祝 6.2 级地震恰好位于景泰—天祝—古浪应力增加区,说明这两次大地震对该地震有明显触发作用,大震之后的库仑应力明显增加区应为后期地震危险性重点关注区。

图 3(b)是以海原、古浪、天祝三次地震为输入源,同样以上述邻近断层为目标断层进行计算所得到的库仑应力变化图。可以看出计算的区域库仑应力变化格局与图 3(a)基本一致,主要变化在于天祝地区内库仑应力变化由正值变为负值,这可能与天祝地震作用有关,使得该区能量急剧释放,无法达到强震发生对于区域应力场往往有大的调整,研究区内 1920 年和 1927 年连续发生两次 8 级以上大

饱和状态。考虑到东侧的云雾山以及西段景泰—天祝—古浪这两个库仑应力明显增加区断裂地震活动历史等特征,古浪断裂由于历史大震离逝时间较短,虽然有一定的触发作用,短期内也不会有大震发生的危险性;而金强河断裂未有历史大震记载,最近一次古地震离逝时间已距今约为 4 000 年^[16],加之这 3 次地震的明显库仑应力触发,应为该区未来的地震危险区;云雾山断裂上次发震时间为 1622 年,距今已 391 年,离逝时间长,未来发生大震的可能性也相对较大。

5 结论与讨论

通过以上数值计算与分析得知,北祁连山东段由于处于统一的构造应力场背景及同一构造体系中,各断裂之间地震发生具有明显的触发作用。运用叠加方法计算出研究区在近 9 次强震中,除了门源地震落在应力影区外,前震活动对后续地震都产生了明显的触发作用,库仑应力变化在 0.1~4.066 bar 之间,触发率达到 87.5% 之高。发现前一地震对后续地震中一半地震具有很好的触发现象,而另一半则存在抑制作用。前震对后续地震是触发提前还是抑制延迟取决于源断层与目标断层的位置及断层活动性质,其中断层距较小的地震之间相互触发的影响相对较大,强震对后续地震触发或延迟作用明显。

震,对于区内应力分布具有明显的调整作用。根据两次大震对区内活动断裂库仑应力变化的计算,其

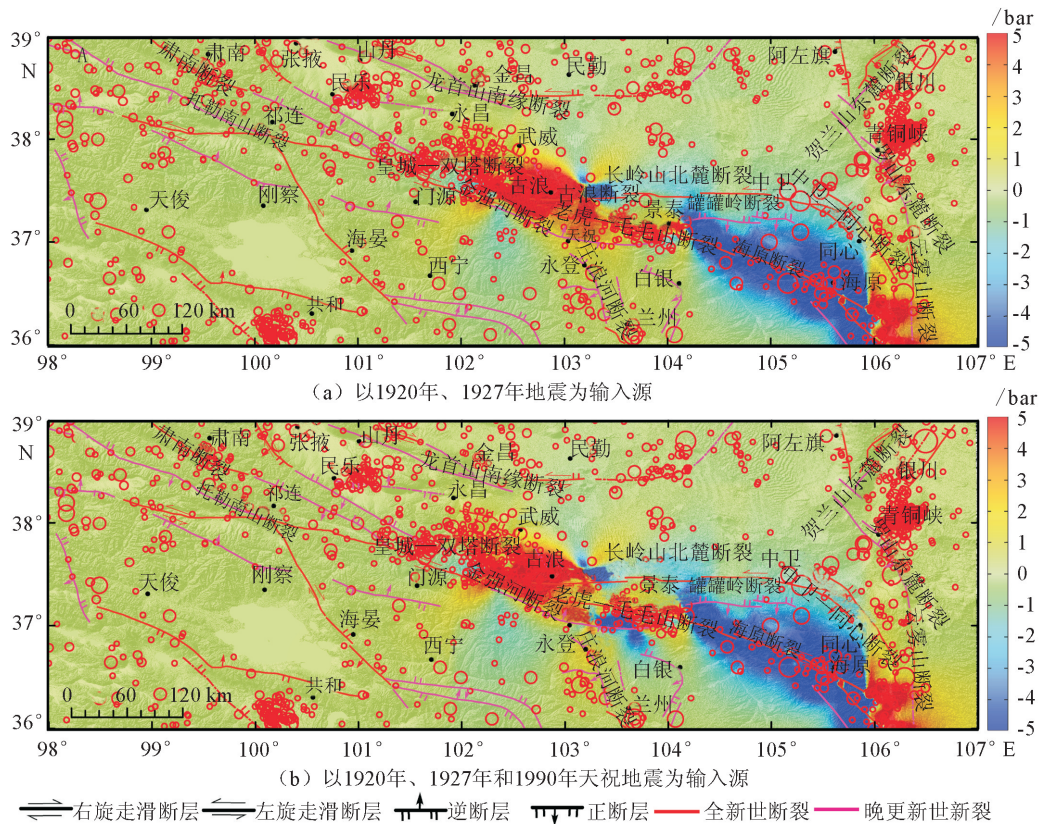


图 3 大震对邻近区域库仑应力变化分布的影响

Fig.3 Images of Coulomb stress change caused by strong events on adjacent faults

库仑应力明显增加区位于东侧的云雾山以及西段景泰—天祝—古浪两个地区,具有地震提前触发的危险,随后发生的1990年天祝6.2级地震正好位于西段危险区内,是一个比较好的验证。综合考虑库仑应力触发及断裂地震活动历史等特征,未来地震危险性较强的区域应为云雾山断裂以及西段景泰—天祝—古浪地区的金强河断裂一带。

静态库仑应力变化对后续地震的触发作用已经得到大量事例验证^[46]。本文尝试性结合区域大震后库仑应力调整分布及断裂地震活动历史等特征,采用Okada的弹性半空间模型对北祁连山东段未来地震危险区进行研究,而部分学者采用分层弹性介质模型进行静态库仑应力变化的计算^[47]。另外,本文研究时间尺度较大,加之地壳处于长期运动过程中,GPS形变和地球介质的粘弹性松弛均可能对研究区的应力变化产生影响。因此在以后的研究中应尽可能采用更为准确的物理参数,充分考虑震后余滑、粘弹性松弛及孔隙弹性压力对库仑应力变化的影响,并综合分析研究区域的应力演化过程。

致谢:本人在此由衷地感谢各位审稿专家对本文提出的宝贵意见!

参考文献(References)

- [1] Harris R A. Introduction to Special Section: Stress Triggers Stress Shadows and Implications for Seismic Hazard[J]. J Geophys Res, 1998, 103: 24347-24358.
- [2] Stein R S. The Role of Stress Transfer in Earthquake Occurrence[J]. Nature, 1999, 402: 605-609.
- [3] 解朝娣, 朱元清, Xinglin LEI, 等. Ms8.0 汶川地震产生的应力变化空间分布及其对地震活动性的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(6): 688-698.
XIE Chao-di, ZHU Yuan-qing Q, Lei X L, et al. Pattern of Stress Change and Its Effect on Seismicity Rate Caused by 8.0 Wenchuan Earthquake[J]. Sci China: Earth Sci, 2010, 40(6): 688-698. (in Chinese)
- [4] 刘桂萍, 傅征祥. 1973年炉霍大地震($M_s=7.6$)最大余震($M_s=6.3$)的库仑破裂应力触发[J]. 中国地震, 2002, 18(2): 175-182.
LIU Gui-ping, FU Zheng-xiang. The Triggering Mechanism of the Largest Aftershock ($M_s=6.3$) of the 1973 Luhuo Great Earthquake ($M_s=7.6$) [J]. Earthquake Research In China, 2002, 18(2): 175-182. (in Chinese)
- [5] 郝平, 傅征祥, 田勤俭, 等. 昆仑山口西8.1级地震强余震库仑破裂应力触发研究[J]. 地震学报, 2004, 26(1): 30-37.
HAO Ping, FU Zheng-xiang, TIAN Qin-jian, et al. Large After-

- shocks Triggering by Coulomb Failure Stress Following the 2011 $M_s = 8.1$ Great Kunlun Earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2004, 26(1): 30-37. (in Chinese)
- [6] 郝平, 傅征祥, 田勤俭, 等. 1970 年通海 7.7 级大地震强余震触发[J]. *地震*, 2004, 24(2): 38-46.
- HAO Ping, FU Zheng-xiang, TIAN Qin-jian, et al. The Tress Triggering of Large Aftershocks Following the 1970 Tonghai Great Earthquake ($M = 7.7$) [J]. *Earthquake*, 2004, 24(2): 38-46. (in Chinese)
- [7] 郝平, 田勤俭, 傅征祥, 等. 2000 年 1 月 15 日姚安 6.5 级地震较强余震的应力触发[J]. *地震研究*, 2004, 27(3): 246-251.
- HAO Ping, TIAN Qin-jian, FU Zheng-xiang, et al. Study of Stress Triggering of Strong Aftershocks Following the Yao'an M_s 6.5 Earthquake on January 15, 2000 [J]. *Journal of Seismological Research*, 2004, 27(3): 246-251. (in Chinese)
- [8] 郝平, 田勤俭, 傅征祥, 等. 1937 年花石峡地震滑动亏损和后续地震应力触发研究[J]. *地震*, 2004, 24(增刊): 33-39.
- HAO Ping, TIAN Qin-jian, FU Zheng-xiang, et al. The Slide Deficit of 1937 Tress Triggering of Huashixia Earthquake and Following Earthquakes [J]. *Earthquake*, 2004, 24(Supp): 33-39. (in Chinese)
- [9] 刘强, 倪四道, 秦嘉政, 等. 2007 年宁洱 6.4 级地震强余震库仑破裂应力触发研究[J]. *地震研究*, 2007, 30(4): 331-336.
- LIU Qiang, NI Si-dao, QIN Jia-zheng, et al. Triggered Strong Aftershock by Coulomb Failure Stress Change Caused by the 2007 Ning'er, Yunnan, M_s 6.4 Earthquake [J]. *Journal of Seismological Research*, 2007, 30(4): 331-336. (in Chinese)
- [10] Deng J, Sykes L R. Evolution of the Stress Field in Southern California and Triggering of Moderate-size Earthquakes: A 200 year Perspective [J]. *J Geophys Res*, 1997, 102: 9859-9886.
- [11] Nalbant S S, Hubert A, King G C P. Stress Coupling Between Earthquakes in Northwest Turkey and the north Aegean Sea [J]. *J Geophys Res*, 1998, 103: 24469-24486.
- [12] Papadimitriou E E, Sykes L R. Evolution of the Stress Field in the Northern Aegean Sea (Greece) [J]. *Geophys J Int*, 2001, 146: 747-759.
- [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[J]. *中国科学: D 辑*, 2007, 37(6): 746-752.
- WU Xiao-ping, HU Xiong-lin, Michel Bouchon, et al. Complete Coulomb Failure Stress Changes and Subsequent Dynamic and Static Stress Triggering of the M_s 7.6 Lancang-Gengma, Yunnan [J]. *Science in China: D Series*, 2007, 37(6): 746-752. (in Chinese)
- [14] 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[J]. *地震学报*, 2007, 29(2): 115-129.
- WAN Yong-ge, SHEN Zheng-kang, ZENG Yue-hua, et al. Evolution of Cumulative Coulomb Failure Stress in Northeastern Qinghai—Xizang (Tibetan) Plateau and Its Effect on Large Earthquake Occurrence [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2007, 29(2): 115-129. (in Chinese)
- [15] 侯康明, 吴启民. 1927 年古浪 8 级大震的基本特征[J]. *高原地震*, 1999, 11(1): 12-18.
- HOU Kang-ming, WU Qi-min. Fundamental Characteristics of Gulang M_s 8 Earthquake in 1927 [J]. *Earthquake Research In Plateau*, 1999, 11(1): 12-18. (in Chinese)
- [16] 袁道阳, 林学文, 侯康明, 等. 1996 年 6 月 1 日甘肃省天祝—古浪 5.4 级地震的发震构造探讨[J]. *西北地震学报*, 1997, 19(4): 40-46.
- YUAN Dao-yang, LIN Xue-wen, HOU Kang-ming, et al. Study on the Causative Structure of the Tianzhu—Gulang M_s 5.4 Earthquake in Gansu on June 1, 1996 [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 1997, 19(4): 40-46. (in Chinese)
- [17] 郑文俊, 袁道阳, 何文贵. 祁连山东段天桥沟—黄羊川断裂古地震活动习性研究[J]. *地震地质*, 2004, 26(4): 645-657.
- ZHENG Wen-jun, YUAN Dao-yang, HE Wen-gui. Characteristics of Palaeo-earthquake Activity Along the Active Tianqiaogou-Huangyangchuan Fault on the Eastern Section of the Qilianshan Mountain [J]. *Seismology and Geology*, 2004, 26(4): 645-657. (in Chinese)
- [18] 何文贵, 刘百簋, 袁道阳, 等. 冷龙岭活动断裂的滑动速率研究[J]. *西北地震学报*, 2000, 22(1): 90-97.
- HE Wen-gui, LIU Bai-chi, YUAN Dao-yang, et al. Research on Slip Rates of the Lenglong Ling Active Fault Zone [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2000, 22(1): 90-97. (in Chinese)
- [19] 刘静, 徐锡伟, 李岩峰, 等. 以海源断裂甘肃老虎山段为例浅析走滑断裂古地震记录的完整性—兼论古地震研究中的若干问题[J]. *地质通报*, 2007, 26(6): 650-660.
- LIU Jing, XU Xi-wei, LI Yan-feng, et al. On the Completeness of Palaeoseismic Records of Strike-slip Faults: an Example From the Laohushan Segment of the Haiyuan Fault in Gansu, China, with a Discussion of Several Problems in the Palaeoearthquake Study [J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(6): 650-660. (in Chinese)
- [20] Rice J R, Cleary M P. Some Basic Stress Diffusion Solutions for Fluid-saturated Elastic Porous Media With Compressible Constituents [J]. *Rev Geophys*, 1976, 14: 227-241.
- [21] Roeloffs E A J. Fault Stability Changes Induced Beneath a Reservoir With Cyclic Variations in Water level [J]. *J Geophys Res*, 1988, 93: 2107-2124.
- [22] Skempton A W. The Pore Pressure Coefficients A and B [J]. *Geotechnique*, 1954: 4143-4147.
- [23] Kuempel H J. Poroelasticity: Parameters Reviewed [J]. *Geophys J Int*, 1991, 105: 783-799.
- [24] Roeloffs E, J W Rudnicki. Coupled Deformation Diffusion Effects on Water Level Changes due to Propagating Creep Vvents [J]. *Pure Appl Geophys*, 1985, 122: 560-582.
- [25] Roeloffs E A. Adv. Poroelastic Techniques in the Study of Earthquake-related Hydrologic Phenomena [J]. *Geophys*, 1996, 37: 135-195.
- [26] Stein R S, King G C P, Lin J. Change in Failure Stress on the Southern San Andreas Fault System Caused by the 1992

- Magnitude=7.4 Landers Earthquake[J].Science, 1992, 258: 1328-1333.
- [27] King G C P, Stein R S, Lin J. Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes[J]. Bull Seism Soc Amer, 1994, 84: 935-953.
- [28] 万永革, 吴忠良, 周公威, 等. 几次复杂地震中不同破裂事件之间的“应力触发”问题[J]. 地震学报, 2000, 22(6): 568-576.
WAN Yong-ge, WU Zhong-liang, ZHOU Gong-wei, et al. “Stress Triggering” between Different Rupture Events in Several Earthquakes[J]. Acta Seismologica Sinica, 2000, 22(6): 568-576. (in Chinese)
- [29] Troise C, De Natale G, Pingue F, et al. Evidence for Static Stress Interaction Among Earthquakes in South-central Apennines (Italy)[J]. J Geophys Int, 1998, 134: 809-817.
- [30] Astiz L, Shearer P M, Agnew D. Precise Relocations and Stress Change Calculations for the Upland Earthquake Sequence in Southern California[J]. J Geophys Res, 2000, 105: 2937-2953.
- [31] Okada Y. Internal Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half Space[J]. Bull Seism Soc Amer, 1992, 82: 1018-1040.
- [32] 韩竹军, 董绍鹏, 谢富仁, 等. 南北地震带北部 5 次 (1561—1920) $M \geq 7$ 地震触发关系研究[J]. 地球物理学报, 2008, 51(6): 776-1784.
HAN Zhu-jun, DONG Shao-peng, XIE Fu-ren, et al. Earthquake Triggering by Static Stress: the 5 Major Earthquakes with $M \geq 7$ (1561—1920) in the Northern Section of South-north Seismic Zone, China[J]. Chinese J Geophys, 2008, 51(6): 1776-1784. (in Chinese)
- [33] 刘百箴, 曹娟娟, 袁道阳, 等. 青藏高原北部活动地块内部的活断层定量资料[J]. 地震地质, 2008, 30(1): 161-175.
LIU Bai-chi, CAO Juan-juan, YUAN Dao-yang, et al. Quantitative Data of Active Faults Within the Active Tectonic Block in North Qinghai-Xizang Plateau[J]. Seismology and Geology, 2008, 30(1): 161-175. (in Chinese)
- [34] 王爱国, 杨斌, 张向红, 等. 中卫—同心活动断裂带现代构造应力分布特征及地震破裂危险区判定[J]. 西北地震学报, 2006, 28(1): 20-25.
WANG Ai-guo, YANG Bin, ZHANG Xiang-hong, et al. Characteristics of Present Tectonic Stress Along Zhongwei-Tongxin Active Fault Zone and Predication of Earthquake Rupture Risk area[J]. Northwestern Seismological Journal, 2006, 28(1): 20-25. (in Chinese)
- [35] 张培震, 闵伟, 邓启东, 等. 海原活动断裂带的古地震与强震复发规律[J]. 中国科学: D 辑, 2003, 33(8): 705-713.
ZHANG Pei-zhen, MIN Wei, DENG Qi-dong, et al. Paleoeearthquake Rupture Behavior and Recurrence of Great Earthquakes Along the Haiyuan fault, Northwestern China[J]. Science in China: Series D, 2003, 33(8): 705-713. (in Chinese)
- [36] 傅征祥, 刘桂萍, 陈棋福. 青藏高原北缘海原、古浪、昌马大地震间相互作用的动力学分析[J]. 地震地质, 2001, 23(1): 35-42.
FU Zheng-xiang, LIU Gui-ping, CHEN Qi-fu. Dynamic Analysis on Interaction Between the Haiyuan-Gulang-Changma Great Earthquake in the North Boundary of the Tibetan Plateau[J]. Seismology and Geology, 2001, 23(1): 35-42. (in Chinese)
- [37] 周光. 甘肃省山丹地震的地质现象[J]. 地质学报, 1954, 34(3): 291-300.
ZHOU Guang. Geological Phenomena of Earthquakes of Shandan, Gansu Province[J]. Geologica Sinica, 1954, 34(3): 291-300. (in Chinese)
- [38] 刘洪春, 贾云鸿, 陈永明, 等. 1927 年古浪 8 级地震地表破裂带研究[G]//活动断裂研究(4). 北京: 地震出版社, 1995.
LIU Hong-chun, JIA Yun-hong, CHEN Yong-ming, et al. Surface Rupture zone Associated with the 1927 Gulang ($M_s = 8$) Earthquake[G]//Research on Active Fault(4). Beijing: Seismological Press, 1995. (in Chinese)
- [39] 贾云鸿, 陈志泰, 戴光华, 等. 1927 年古浪地震断层特征及其与活动断层的关系[G]//中国地震断层研究. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1988.
JIA Yun-hong, CHEN Zhi-tai, Dai Guang-hua, et al. Characteristics of the 1927 Gulang Earthquake Faults and its Relationships to Active Faults[G]//Research on Earthquake Faults in China. Urumqi: Xinjiang People Press, 1988. (in Chinese)
- [40] 刘桂萍, 傅征祥. 海原大地震对古浪大地震的静应力触发研究[J]. 地球物理学报, 2001, 44: 107-115.
LIU Gui-ping, FU Zheng-xiang. A study on the great Gulang Earthquake Triggered Probably by Static Stress Change Resulting from the Great Haiyuan Earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2001, 44: 107-115. (in Chinese)
- [41] 兰州地震研究所青海地震局联合考察队. 1986 年 8 月 26 日门源 6.4 级地震考察初步总结[J]. 西北地震学报, 1987, 9(2): 75-80.
Joint Investigation Team (Seismological Institute of Lanzhou and Seismological Bureau of Qinghai Province). A preliminary Summarization of Menyuan Earthquake ($M = 6.4$) on Aug. 26, 1986[J]. Northwestern Seismological Journal, 1987, 9(2): 75-80. (in Chinese)
- [42] 阎志德, 王周元. 1990 年 10 月 20 景泰地震的活动图象及其特征[J]. 西北地震学报, 1992, 14(2): 42-58.
YAN Zhi-de, WANG Zhou-yuan. Seismic Pattern and Characteristics of the Jingtai Earthquake of Oct. 20, 1990[J]. Northwestern Seismological Journal, 1992, 14(2): 42-58. (in Chinese)

- ology in China, 2006, 33(2):275-285. (in Chinese)
- [20] 徐纪人, 赵志新. 中国岩石圈应力场与构造运动区域特征[J]. 中国地质, 2006, 33(4):782-792.
XU Ji-ren, ZHAO Zhi-xin. Regional Characteristics of the Lithospheric Stress Field and Tectonic Motions in China and its Adjacent Areas[J]. Geology in China, 2006, 33(4):782-792. (in Chinese)
- [21] 曾融生, 孙卫国. 青藏高原及其邻区的地震活动性和震源机制及高原物质东流的讨论[J]. 地震学报, 1992, 14(增刊):534-564.
ZENG Rong-sheng, SUN Wei-guo. Discussion of the Seismic and mechanism as well as the Oriental Flowing of the Material in Qinghai-Tibet Plateau and its Adjacent Areas 1992, 14 (Supp.):534-564. (in Chinese)
- [22] 张培震, 王琪, 马宗晋. 青藏高原现今构造变形特征与 GPS 速度场[J]. 地学前缘, 2002, 9(2):442-450.
ZHANG Pei-zhen, WANG Qi, MA Zong-jin. GPS Velocity Field and Active Crustal Deformation in and Around the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2):442-450. (in Chinese)
- [23] 郑勇, 傅容珊, 熊熊. 中国大陆及周边地区现代岩石圈演化动力学模拟[J]. 地球物理学报, 2006, 49(2):415-427.
ZHENG Yong, FU Rong-Shan, XIONG Xiong. Dynamic Simulation of Lithospheric Evolution From the Modern China Mainland and Its Surrounding Areas[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(2):415-427. (in Chinese)

(上接 371 页)

- [43] 杜鹏, 柴焱章, 沈卫华, 等. 罐罐岭断裂带最新活动特征[J]. 地震地质, 2007, 29(3):597-606.
DU Peng, CHAI Zhi-zhang, SHEN Wei-hua, et al. Characteristic of the Holocene Activity of the Guanganling Fault Zone [J]. Seismology And Geology, 2007, 29(3):597-606. (in Chinese)
- [44] 柳焯, 王爱国, 李明永, 等. 长岭山北麓断裂晚第四纪活动性及构造稳定性研究[J]. 中国地震, 2006, 22(4):394-404.
LIU Yu, WANG Ai-guo, LI Ming-yong, et al. Research on Active Features and Tectonic Stability in the Late Quaternary of the North Piedmont Fault of Changlingshan [J]. Earthquake Research in China, 2006, 22(4):394-404. (in Chinese)
- [45] 郭良迁, 周海涛, 杜雪松, 等. 中国大陆应变应力场研究[J]. 华南地震, 2012, 32(1):1-10.
GUO Liang-qian, ZHOU Hai-tao, DU Xue-song, et al. Studies on Stress-strain Field of Chinese Mainland [J]. South China Journal of Seismology, 2012, 32(1):1-10. (in Chinese)
- [46] Wang J, Shieh C, Chang T. Striggering Mechanism of a Shallow Earthquake: Case Study of the 1999 Chi-Chi (Taiwan) Earthquake [J]. Phys Earth Planet Inter, 2003, 135(1):17-25.