

祁连山地震带地震活动特征及序列类型

刘小凤, 肖丽珠, 梅秀萍, 徐 辉

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:祁连山地震带中强地震具有成组活动特征,震前地震活动图象表现为地震空区、前兆地震、区域地震活动增强等。地震空区以中期异常为主,中期向短期过渡的标志为空区边缘或内部出现前兆地震、空区停止围空 1~3 个月或空区内发生小地震而导致空区解体。前兆地震一般于震前 1~6 个月出现,多数前兆地震与主震之间距离小于 30 km,震级差 1.5~3.0。通过序列类型及参数的统计分析,为震后趋势判定提供了依据。

关键词:地震活动特征; 地震序列类型; 祁连山地震带

中图分类号:P315.75 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0844(2005)01-0056-05

Characteristics of Seismicity and Sequence Patterns in Qilianshan Seismic Belt

LIU Xiao-feng, XIAO Li-zhu, MEI Xiu-ping, XU Huei

(Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China)

Abstract:The moderate—strong earthquakes in Qilianshan seismic belt shows the character of becoming groups. The seismicity patterns before the main shock are seismic gaps, precursor earthquakes, and enhanced regional seismicity, et al.. The seismic gaps mostly are mid—term abnormality. The signs from mid—term to short—term are those precursor earthquakes occur at the edge of or in the gaps, the gaps cease for 1~3 months, or the gaps dissemble with the small earthquake occurs in it. The precursor earthquakes generally occur 1~6 months before the main shock and the distances between the precursor earthquake and main shock are less than 30 km, with the $\Delta M=1.5\sim 3.0$. Furthermore, the earthquake sequence patterns, the b, h values of the aftershock sequences are statisticsed and analysed. All above reseach will serve in seismic trend prediction after strong earthquake.

Key words:Seismicity character; Earthquake sequence pattern; Qilianshan seismic belt

0 引言

祁连山地震带从阿尔金至六盘山地区,是青藏高原东北缘地区一个相对独立的构造单元,属于活动地块的边界,地质构造复杂,地震活动强度大,频次高。自 2000 年以来祁连山地震带连续发生了 4 次 5 级以上地震,处在一个新的丛集活跃时段。因此,关于祁连山地震带地震活动特征、震后趋势判定及序列类型分析就显得十分必要。本文基于 1970 年以来祁连山地震带发生的多次中强地震前区域弱

震图象特征、地震后余震活动的时空强分布特征、地震序列类型和序列参数 b 值、 h 值等的系统分析,试图寻找具有短临预测意义的前兆异常指标,并为震后趋势判定提供较可靠的依据。

1 地震活动基本特征

祁连山地震带以天祝为界,西段属于祁连山主体地区,地质构造复杂,中强震成组活动现象比较明显;东段为陇西盆地及局部隆起地区,地震活动主要

收稿日期:2004-07-05

基金项目:地震科学联合基金(102063)及“十五”攻关课题(2002BA601B01-03-01)资助。

中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC20050011.

作者简介:刘小凤(1965—),女(汉族),甘肃宁县人,副研究员,主要从事地震预报和地震地质研究。

集中在一些挤压隆起的应力集中区或盆地内的次级断裂上。1900 年以来的 $M-t$ 图显示 5 级以上地震表现出 3 个集中丛集活动的阶段(图 1)。第一阶段为 1920—1932 年,连续发生了 3 次强震,分别为东段 1920 年海原 8.5 级地震,中段 1927 年古浪 8 级地震,西段 1932 年昌马 7.6 级地震。间隔时间分别为 7 年和 5 年,并依次由东向西迁移,发震地点分别位于地震带的不同构造单元。第二阶段为 1951—1962 年,最大地震为 1954 年山丹 7.3 级地震,发生在祁连山地震带北部的龙首山断裂带上,该断裂带

也是祁连山地块与阿拉善地块的分界线。第三阶段为 1980—1993 年,以中强地震活动为主,包含了 3 次 6 级地震,最大地震为 1986 年门源 6.4 级地震,发生在中段的冷龙岭断裂带。第四阶段始于 2000 年,发生了 4 次地震,到目前为止最大地震为 2003 年民乐—山丹 6.1 级地震。从百年的演化过程中不难发现每个活动阶段持续 10 年左右,因此预计第四阶段也将持续活动 10 年左右。总体特征表现为以 1920 年海原 8.5 级地震为标志,地震强度呈逐渐率减的趋势。

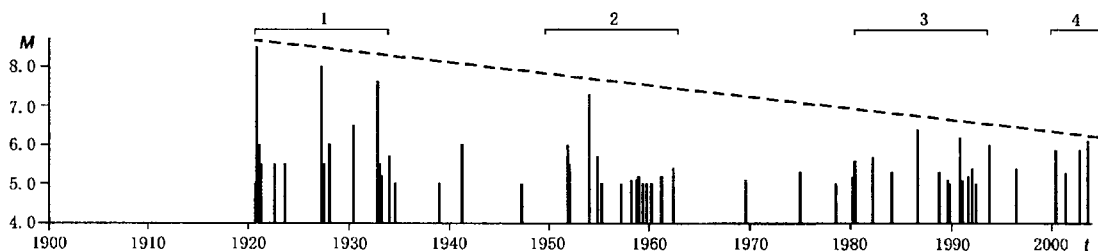


图 1 祁连山地震带 $M_s \geq 5.0$ 地震 $M-t$ 图

Fig. 1 $M-t$ chart of $M_s \geq 5.0$ earthquakes in Qilianshan seismic belt since 1900.

祁连山地震带地震活动不但具有成组活动特征,而且具有从东向西再折返向东迁移的特征。1920 年海原地震后沿海原断裂向西迁移,发生了 1927 年古浪地震和 1932 年昌马地震,再折返向东发生了 1954 年山丹地震。这种强震的迁移过程跨越了第一和第二活动阶段,地震强度大,持续时间长。第四阶段以 2000 年景泰地震为标志出现了类似的情况,地震首先向西迁移发生了 2001 年肃南地震和 2002 年玉门地震,然后折返向东发生了 2003 年民乐—山丹地震,但地震强度和迁移时间明显小于前一个迁移过程。

2 地震活动空间图象异常特征

地震活动空间图象包括地震空区、条带、前兆地震、地震增强和平静等。地震空区、条带和增强活动属于中短期指标,比较普遍,条带相对出现的较少;前兆地震多数为短临指标。本文通过 20 次震例的分析得到祁连山地震带的图象特征。

祁连山西段地震空区主要分布在酒泉盆地及周缘地区,空区呈 NW 向,长轴为 100~250 km,主震发生在空区的边缘或内部。祁连山中东段以空段或空区异常为主,空区呈 NW~NWW 向,主要集中在民乐盆地及附近地区,而地震一般发生在空区边缘的活动构造带或内部的次级断裂带;地震空段分布在东段的海原走滑活动断裂带上,长轴呈 NW~NWW 向,长 90~180 km,主震发生在空段的端部。不同构造

单元空区形成与演化特征表明,地震空区以中期异常为主,中期向短期过渡的标志为空区边缘或内部出现前兆地震、空区停止围空 1~3 个月或空区内发生小地震而导致空区解体。2003 年民乐—山丹 6.1 级地震前形成 2 级和 3 级地震空区,2 级地震空区形成时间为 2002 年 4 月 29 日—2003 年 6 月 14 日,围空时间为 14.5 个月,空区长轴 NWW 向,长 120 km(图 2(a))。3 级地震空区形成时间为 1996 年 7 月 28 日—2003 年 6 月 14 日,围空时间为 7 年,空区长轴 NW 向,长 160 km。根据统计公式 $M_s = 3.69 \log L - 1.71 \pm 0.47$,计算出 3 级地震空区对应主震震级为 6.42 ± 0.47 ,2 级地震空区对应主震震级为 5.92 ± 0.47 。在地震空区内部有民乐—永昌活动断裂,空区边缘包含了龙首山断裂和北祁连山山前断裂,由此确定该空区为孕震空区,主震发生在空区内部。另外,2003 年 1—10 月沿祁连山地震带快速形成两组 4 级地震条带,其中一组呈北西向,沿祁连山地震带分布;另一组条带北东向,两组条带在张掖地区交汇,由此确定该地区为未来发震地点,同时根据组成条带的震级大小估计发震震级至少为 6 级(图 2(b))。

本区中强地震前出现前兆地震的震例有 12 次,一般于震前 1~6 个月出现,大多数前兆地震与主震之间距离小于 30 km,震级差 1.5~3.0。2003 年民乐—山丹 6.1 级地震前 4.5 个月在未来震中区发生

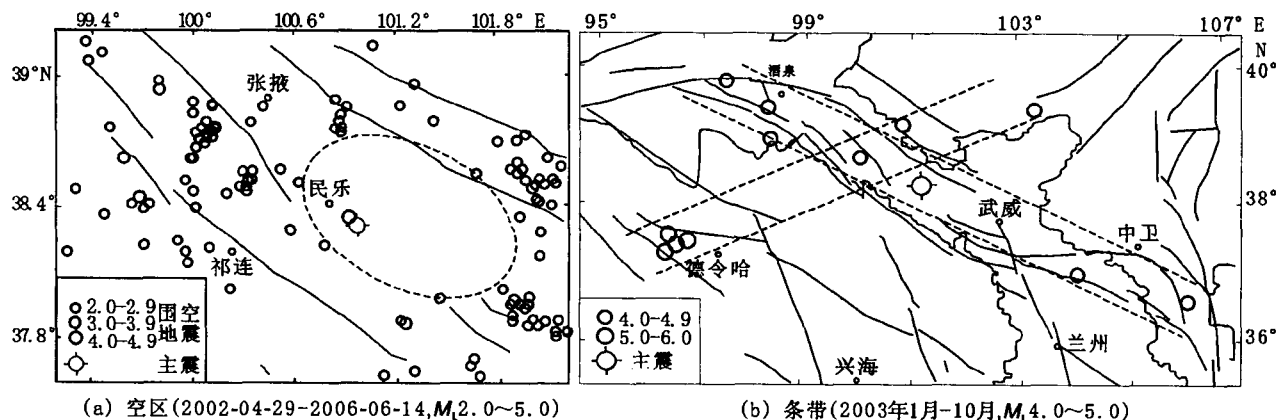


图 2 民乐—山丹 6.1 级地震前的地震空区和条带

Fig. 2 Seismic belts and gaps before of Minle—Shandan $M_s 6.1$ earthquake.

了 1 次 $M_s 2.8$ 地震, 震级差为 3.3, 与主震空间距离仅差 1.8 km; 其次, 震前 19 天在震区以西 97 km 发生了肃南 $M_s 3.7$ 地震, 这 2 次前兆地震的发生为该次地震的较成功预报提供了参考依据。

3 序列类型及特征

1970 年以来祁连山地震带共发生了 25 次 5 级以上地震, 其中有 18 次地震有余震序列资料。本文选取这些有较好记录的 $M_s \geq 5.0$ 地震序列, 分别就余震空间分布、持续时间、最大余震震级, 与主震震级差及时间间隔, 序列参数 b 、 h 值等进行分析, 希望从中发现有共性特征的信息, 为今后的震后趋势判定及预测提供较可靠的依据。

3.1 序列类型的划分

地震类型的划分原则遵循大家较公认的方法^[1-4], 一般须满足能量比和震级差两项指标, 并结合具体的地震活动特征。据此将青藏高原北部地区地震序列划分出四种类型:

(1) 主震—余震型序列: $90.0\% \leq E_m / \sum E \leq 99.9\%$, $0.7 < \Delta M < 2.4$ 。

(2) 孤立型序列: $E_m / \sum E \geq 99.9\%$, $\Delta M \geq 2.4$ 。

(3) 前震—主震—余震型序列: $90.0\% \leq E_m / \sum E \leq 99.9\%$, $0.7 < \Delta M < 2.4$, 并在主震前若干天有明显的前震或前震序列活动。

(4) 多震型序列: $E_m / \sum E \leq 90.0\%$, $\Delta M < 0.7$, 包括震群型和双震型序列。地震序列中没有突出的主震, 由震级相近的 2 次或多次地震组成。

3.2 序列类型基本特征

通过对 18 次地震序列的研究确定出地震类型为孤立型、主震—余震型、前震—主震—余震型和双

震型。以主震—余震型为主, 占总数的 50%。主震释放能量占全序列能量 99% 的地震达 15 次(表 1)。表中全序列持续时间以余震向外扩散或频次明显降低作为余震截止时间, ΔM 为主震与最大余震震级差。

由表 1 可以看出, 余震活动的强度和频度存在较大的差异。大多数地震后余震较少, 只有少数地震后有大量余震发生。余震主要集中在主震发生后前 30 天, 能量也基本在前三天释放完成。孤立型地震主要分布在走滑剪切构造单元, 最大余震与主震震级差为 1.8~3.2; 主震—余震型地震主要分布在挤压逆冲构造单元, 最大余震与主震震级差为 1.2~2.0; 双震型或多震型地震最大余震与主震震级差仅为 0.3。

已有研究表明, b 值的大小与该区的应力状态有关, 地震序列的 b 值反映了震源区介质性质及区域应力场状态。选择余震比较发育的 13 次地震计算出 b 值为 0.3~0.8, h 值为 1.2~1.6, 整个祁连山地震带表现出较好的一致性。

地震序列类型与发震构造的运动性质和动力环境有密切的关系, 一般来说, 发生在挤压逆冲构造单元的地震由于断裂几何性质复杂, 地表浅层断裂与地下深处的基底深大剪切走滑活动断裂之间有千丝万缕的关系, 地表一组或多组挤压逆冲断层均为能量释放的通道, 因此当主震沿某一条断裂发生后, 其它断裂也会受到不同程度的影响, 出现一系列弱震的丛状活动, 所以表现出来的地震序列类型以主震—余震型为主, 余震也比较发育, 如酒泉、古浪、六盘山等地区。而发生在以走滑剪切活动为主的构造单元的地震, 发震断裂几何结构相对简单, 断裂水平剪切运动幅度远远大于垂直运动, 使得主震能量释放

表 1 祁连山地震带地震序列参数及类型判定

序号	时间	地点	位置		震级 /M	震级差 ΔM	$E_m/\sum E$ /%	全序列持续时间/天	序列类型及特征
			纬度	经度					
1	1978-08-16	民乐	38.2°	101.0°	5.0	2.3	99.9	4	孤立型,余震少
2	1982-04-14	海原	36.7°	105.5°	5.7	3.1	99.9	>120	孤立型, $b=0.55$,余震少
3	1984-01-06	九条岭	37.9°	102.1°	5.3	1.9	99.5	>120	前-主-余型, $b=0.6$, $h=1.2$
4	1984-02-17	刚察	37.9°	100.7°	5.2	1.3	97.5	70	前-主-余型, $b=0.45$, $h=1.1$
5	1986-08-26	门源	37.7°	101.5°	6.4	1.0	96	>60	主-余型, $b=0.8$, $h=1.5$
6	1988-11-22	肃南	38.4°	99.3°	5.3	0.3	88	70	多震型, $b=0.47$, $h=0.84$
7	1988-12-26	祁连	39.0°	100.0°	5.1	2.0	99.89	71	基本为孤立型,余震少
8	1990-10-20	景泰	37.1°	103.5°	6.2	1.1	99.8	60	主-余型, $b=0.62$, $h=1.5$
9	1991-01-02	祁连	38.2°	99.9°	5.1	1.2	99.9	50	主-余型,余震不发育
10	1991-10-01	祁连	37.8°	101.4°	5.2	1.8	99.4	12	主-余型, $b=0.49$, $h=1.5$
11	1992-01-12	镜铁山	39.7°	98.3°	5.4	3.0	99	60	前主余型, $b=0.5$, $h=2.2$
12	1992-06-21	祁连	38.5°	99.5°	5.0	2.0	99.82	180	主-余型,余震不发育
13	1993-10-26	托莱	38.6°	98.7°	6.0	3.2	99.99	30	孤立型, $b=1.46$, $h=0.7$
14	1996-06-01	天祝	37.2°	102.9°	5.4	1.5	99.95	29	主-余型, $b=0.66$, $h=1.6$
15	2000-06-06	景泰	37.1°	104.0°	5.9	1.1	97.8	40	前主余型, $b=0.65$, $h=1.3$
16	2001-07-11	肃南	39.2°	98.0°	5.3	2.0	96.7	14	主-余型, $b=0.56$, $h=1.3$
17	2002-12-14	玉门	39.8°	97.3°	5.9	1.5	96.50	50	主-余型, $b=0.69$, $h=1.4$
18	2003-10-25	民乐	38.4°	101.2°	6.1	0.3	71.7	70	双震型, $b=0.68$, $h=1.5$

比较充分,余震活动微弱,表现出来的地震序列类型为孤立型,如东段的景泰—海原地区。祁连山地震带由于地质构造复杂,断裂几何结构及运动性质多样,不同断裂之间和同一断裂不同活动段之间既有挤压逆冲分量又有走滑剪切分量,所以地震序列类型包含了所有的四种类型,但主要还是以主震—余震型为主,反映了整个地区以挤压为主的的受力状态。

3.3 序列深度分布特征

祁连山地震带广大地区测震台网精度属于 1、2 类,只有西部酒泉地区台网控制能力较弱,因此余震深度分析资料相对可靠。以下选择不同构造单元的

比较典型的四个 6 级左右地震来分析余震在深部的活动特征(图 3),门源地震发生在应力集中的古浪推覆体地区,余震丰富,主要分布在 0~20 km 范围内,沿 NW 向构造延伸 10 km 左右,密集成丛。民乐地震发生在民乐盆地内,余震发育,集中在 10 km 深度,地表以下 6 km 范围内没有一个地震,反映了地震破裂主要产生在 10 km 深处。景泰地震发生在以剪切活动为主的老虎山~毛毛山断裂带,余震发育且散布在 0~30 km 深度范围内,长轴沿构造线方向超过了 10 km。玉门地震因台网控制能力较差记录到震源深度的地震较少,深度集中在 20 km 以内,主震深度也达到了 22 km,仅有的资料也

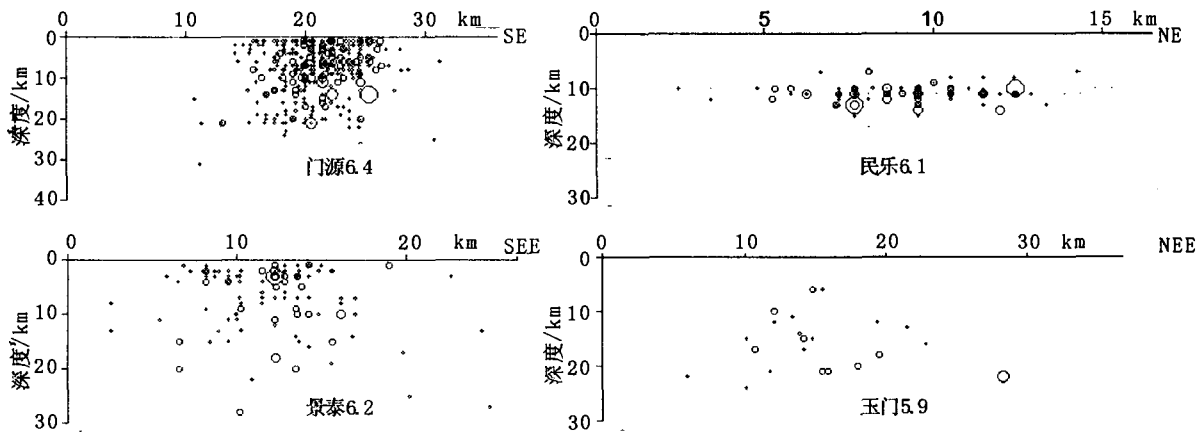


图 3 余震深度分布特征

Fig. 3 Distribution of aftershocks in depth.

反映了发震构造在深部的延伸状态,间接地说明了地表破坏较弱的原因。可见,余震在深部的分布既反映了发震构造的结构特征以及震源区介质的复杂程度,也反映了震源区破裂特性。

4 结论

(1) 祁连山地震带地震活动具有成组性,每个阶段持续10年左右,2000年景泰地震为标志开始了新的活动阶段,已持续了5年,发生了5次中强地震,这些地震具有从东向西再折返向东迁移的规律。未来一段时间该地区仍然是中强地震孕育的场所之一。

(2) 地震空间活动图象以地震空区为主,地震空区属于中期异常指标,中期向短期过渡的标志为空区边缘或内部出现前兆地震、空区停止围空1~3个月或空区内发生小地震而导致空区解体。地震条带中具有中短期预测意义的有震条带并不多见。前兆地震一般于震前1~6个月出现,有7次与主震时间间隔小于3个月,大多数前兆地震与主震之间距离小于30 km,震级差1.5~3.0。

(3) 序列类型包括孤立型、主震—余震型、前震

—主震—余震型和双震型。以主震—余震型为主,占总数的50%。全序列持续时间一般小于60天,多数在主震后前3天释放99%以上的能量。余震基本有两种形式,一种有大量余震发生,另一种余震不发育,而且余震活动的强度和频度在各序列之间存在较大差异,其原因可能与震源区的介质、构造差异有关。计算得到的 b 值为0.3~0.8, h 值为1.2~1.6,表现出了一定的区域特征,反映了整个地震带的协调一致性。

【参考文献】:

- [1] 周翠英,张玉霞,王华林,等. 地震序列类型的早期判断[A]. 见:国家地震局地震预防司. 地震短期预报的理论理论与方法—“八五”攻关三级课题论文集[C]. 北京:地震出版社,1997. 176—188.
- [2] 黄耘,郑江蓉. 华东地区中强地震序列特征研究[J]. 地震, 1999,19(2):190—198.
- [3] 杨立明,王振亚,程建武,等. 祁连—海原地震带中强地震序列类型分布及其应用[J]. 西北地震学报,2001,23(2):137—142.
- [4] 陈玉华,马文静,张瑞斌. 青海及邻区中强地震序列类型及特征研究[J]. 西北地震学报,2001,23(3),250—256.