

新疆成组中强地震活动前后地震 活动图像的时空演化特征

白超英, 王筱荣

(新疆维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:用“震源触发-系统响应”孕震模式, 分析讨论了新疆 1996~1998 年成组强震活动前后地震活动图像的时空演化特征, 由此定义了“诱发信号震”. 进而分析研究了诱发信号震与后续主震的关系. 结果表明, 强震发生后触发(或引起)的中等地震活动区及边缘很可能是未来强震发生的地点; 强震或其强余震发生当天或稍后 1 天内发生的信号震具有预报意义. 信号震发生后, 其周围 200 km 范围内未来 3 年发生强震的可能性较大, 其震级可能比信号震的震级高 0.5~2.0. 最后对成组强震活动的机理进行了分析和讨论.

关键词:新疆; 强震; 地震活动特征; 信号震

中图分类号: P315.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2001)02-0149-06

0 引言

在前人提出的关于地震孕育的理论模式^[1~3]的基础上, 本文引入系统非线性失稳的观点. 假定某一子系统(震源)失稳发生了地震(相当于亚失稳系统内部的一次涨落现象), 则整个系统将出现非线性响应, 使那些已处于(或接近)临界失稳状态的子震源失稳(高应力状态的孕震区及附近)而发生显著的地震活动. 由于这种响应是非线性的, 因此响应区内的地震活动在时空分布上也就具有非线性行为, 诸如在空间上形成相对密集活动区或条带, 在时间上形成丛集现象等. 这些响应区出现的显著地震活动有可能预示着该区是未来强震发生的地点. 换句话说, 这些显著地震活动区已接近临界失稳状态, 这就是作者提出的“震源触发-系统响应”孕震模式^[4].

当系统处于相对稳定(地震活动相对平静时段)状态时, 系统内部个体的涨落很难使系统出现非线性响应, 也就是说, 个别中强地震的发生很难触发(或引起)较远区域内的地震活动. 反之, 当系统处于亚失稳状态(地震活动相对活跃时段)时, 系统内部个体的涨落(个别强震的发生)将有可能触发其附近乃至较远的处于高应力状态下的区域内的地震活动. 根据这种具有非线性响应行为的显著地震活动现象就可以识别近期强震发生的危险地点. 本文以新疆 1996~1998 年中强地震活动为例, 研究强震活动的非线性响应行为.

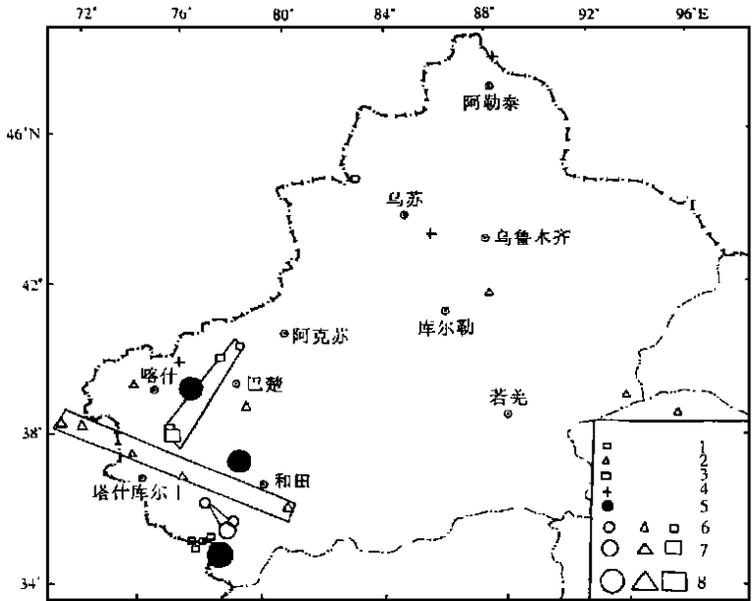
1 新疆地区成组中强地震活动图像的时空演化特征

1996~1998年新疆地区地震活动强烈,共发生5级以上地震43次,其中有 $M_s \geq 6.0$ 地震14次, $M_s \geq 7.0$ 地震1次(表1),强震活动呈现大范围成组活动的特征,这在新疆有地震记录以来是十分罕见的。

表1 1996~1999年新疆地区 $M_s \geq 5.0$ 地震参数

发震时间	震中位置		震级 (M_s)	发震地点
	北纬	东经		
1996-01-09	43°48'	85°35'	5.2	沙湾
1996-03-05	35°43'	78°44'	5.0	喀喇昆仑山
1996-03-13	48°24'	88°14'	6.1	阿勒泰
1996-03-19	40°08'	76°38'	6.7	阿图什
1996-03-22	40°10'	76°46'	5.2	阿图什
1996-11-19	35°26'	78°21'	7.1	喀喇昆仑山
1996-11-20	35°16'	78°04'	5.2	喀喇昆仑山
1996-11-21	35°11'	78°20'	5.2	喀喇昆仑山
1996-11-23	38°15'	76°41'	5.0	叶城
1997-01-21	39°36'	77°02'	6.0	伽师
1997-01-21	39°35'	77°03'	6.2	伽师
1997-03-01	39°34'	76°57'	6.0	伽师
1997-04-06	39°31'	77°02'	6.4	伽师
1997-04-06	39°33'	77°02'	6.2	伽师
1997-04-11	39°36'	76°58'	6.4	伽师
1997-04-13	39°33'	77°00'	5.5	伽师
1997-04-16	39°41'	76°58'	6.2	伽师
1997-05-17	39°34'	77°00'	5.4	伽师
1997-06-04	43°19'	84°15'	5.0	新源
1997-10-18	39°33'	77°00'	5.1	伽师
1997-11-08	35°49'	87°23'	7.3	玛尼
1997-11-09	34°51'	88°18'	5.1	玛尼
1997-11-15	36°09'	87°51'	5.0	玛尼
1998-01-14	35°18'	86°50'	5.6	玛尼
1998-01-15	35°17'	86°54'	5.1	玛尼
1998-01-23	48°43'	84°52'	5.8	斋桑
1998-03-06	38°30'	73°32'	5.5	帕米尔
1998-03-19	40°07'	76°49'	6.0	阿图什
1998-05-29	37°34'	79°02'	6.2	皮山
1998-05-29	37°35'	79°00'	5.5	皮山
1998-06-07	41°32'	77°51'	5.2	阿合奇
1998-06-25	41°33'	80°15'	5.1	阿克苏
1998-07-12	48°01'	82°38'	5.4	斋桑
1998-07-28	41°44'	81°32'	5.4	伽师
1998-08-02	39°13'	77°03'	6.1	伽师
1998-08-27	39°49'	77°18'	5.2	伽师
1998-08-27	39°48'	77°16'	5.0	伽师
1998-08-27	39°49'	77°08'	6.4	伽师
1998-09-03	39°40'	77°16'	5.1	伽师
1999-01-30	41°33'	88°26'	5.6	托克逊
1999-02-28	41°20'	76°36'	5.3	阿合奇
1999-03-15	41°48'	82°41'	5.7	库车
1999-03-25	39°36'	77°18'	5.2	伽师
1999-06-17	41°53'	84°46'	5.0	拜城
1999-08-04	37°53'	86°57'	5.5	且末
1999-09-23	42°21'	84°28'	5.1	轮台

视新疆地区为一个大系统, 而不同的地震区(带)为子系统, 逐个对中强地震发生后 $M_S \geq 4.0$ 地震的空间分布情况进行扫描, 寻找那些不稳定的子系统. 密集区(带)范围一般控制在 4 平方度范围内. 从图 1 中可以看出, 自 1996 年 1 月 9 日沙湾 $M_S 5.2$ 地震发生后至同年 3 月 13 日阿勒泰 $M_S 6.1$ 地震发生前, 新疆境内 4 级以上地震全部集中在和田西南地区, 即 1996 年 11 月 18 日喀喇昆仑山口 $M_S 7.1$ 地震震中区附近. 在此期间共发生 4 级地震 2 次, 5 级地震 1 次. 这 3 次地震的间隔时间逐渐缩短, 在空间上形成相对密集区, 同时震中位置逐渐靠近 $M_S 7.1$ 地震震中. 因此无论从时间上, 还是在空间上地震活动均显示出明显的非线性响应行为. 1996 年 3 月 14 日至 18 日, 即阿图什 $M_S 6.7$ 地震前, 新疆境内无 4 级以上地震发生. 自 1996 年 3 月 19 日阿图什 $M_S 6.7$ 地震后至同年 11 月 17 日, 即喀喇昆仑山口 $M_S 7.1$ 地震前, 新疆地区共发生 4 级地震 7 次, 并形成了和田南—塔什库尔干北 4 级地震活动条带. 在该条带的空段于 1998 年 5 月 29 日发生了皮山 $M_S 6.2$ 地震. 此外, 在阿图什地震发生后 1 天在和静发生了 $M_S 4.3$ 地震, 在距伽师地震区稍远处发生了 2 次 4 级地震, 但未形成密集区. 自 1996 年 11 月 18 日喀喇昆仑山口 $M_S 7.1$ 地震发生后至 1997 年 1 月 20 日伽师强震群发生之前, 新疆境内共发生 4 级以上地震 5 次, 其中 4 次集中在伽师强震群附近, 形成一走向 NE 的地震活动条带, 1997 年 1 月 21 日的 2 次地震就发生在该条带的中部.



1 1996-01-09~03-13 地震; 2 1996-03-19~11-18 地震;
3 1996-11-19~1997-01-20 地震; 4 已发生的主震; 5 预测地震
6 $M_S = 4.0 \sim 4.9$; 7 $M_S = 5.0 \sim 5.9$; 8 $M_S = 6.0 \sim 6.9$

图 1 1996-01-09 ~ 1997-01-20 新疆地区 $M_S \geq 4.0$ 地震分布
Fig. 1 Distribution of $M_S \geq 4.0$ earthquakes in Xinjiang region from Jan. 9, 1996 to Jan. 20, 1997.

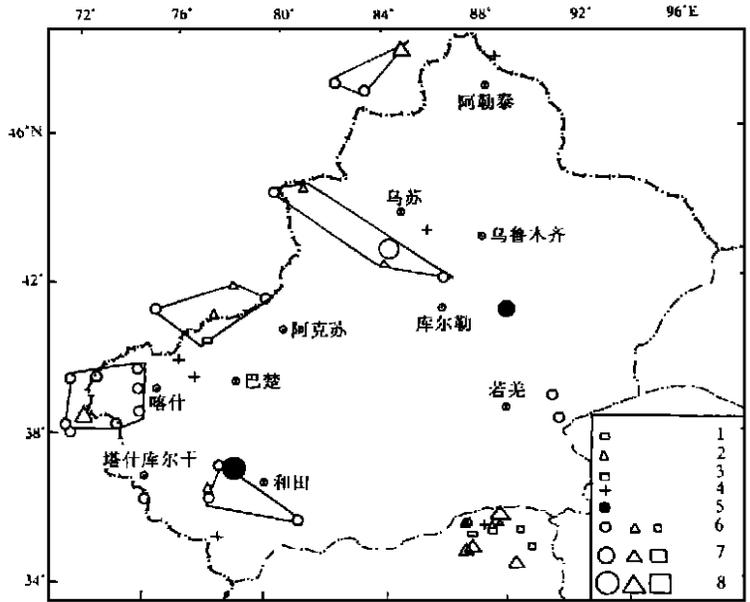
由图 2 可见, 自 1997 年 1 月 21 日伽师强震群开始至同年 11 月 8 日西藏玛尼 $M_S 7.3$ 地震之前, 新疆境内共发生 4 级以上地震 13 次(余震区地震除外), 主要集中在和田附近和喀什西南一带. 在和田附近发生了 1998 年 5 月 29 日皮山 $M_S 6.2$ 地震; 在喀什附近发生了 1998 年 3 月 6 日乌恰西 $M_S 5.5$ 地震; 在新疆境外的斋桑泊附近 1998 年 1 月 23 日发生了 $M_S 5.8$ 地震. 2000 年 1 月 31 日, 在若羌东 2 次 4 级地震活动区发生了 5.4 级地震. 自 1997 年 11 月 8 日西藏玛尼 $M_S 7.3$ 地震后至 1998 年 3 月 18 日阿图什 $M_S 6.0$ 地震前, 新疆境内共发生 4 级以上地震 4 次, 结合 1997 年 1 月 21 日至 1997 年 11 月 8 日 4 级以上地震空间分布可以看出, 在和田附近、阿克苏西和喀什西南形成了 3 个 4 级地震密集区和温泉—库尔勒地震活动条带. 在和田附近 1998 年 5 月 29 日发生了皮山 $M_S 6.2$ 地震; 喀什西南密集区与阿克苏西密集区之间于 1998 年 3 月 19 日发生了阿图什 $M_S 6.0$ 地震; 在温泉至库尔勒地震活动条带东南端的延长线上 1999 年 1 月 30 日发生了托克逊 $M_S 5.6$ 地震. 1998 年 3 月 19 日阿图什 $M_S 6.0$ 地震至

1998 年 5 月 28 日皮山 M_S 6.2 地震前, 新疆境内只发生了一次 4 级地震, 震中距伽师强震群震中区不足 100 km.

由图 3 可见, 自 1998 年 5 月 29 日皮山 M_S 6.2 地震后至 1998 年 8 月 2 日伽师 M_S 6.0 地震前, 新疆境内发生 4 级以上地震 3 次, 其中有 2 次 5 级地震. 这 3 次 4 级以上地震集中分布在阿克苏—拜城附近, 形成 4 级以上地震密集区, 结合新疆境外同期 4 级以上地震分布, 可以看出在拜城—阿克苏一带形成 EW 向的 4 级以上地震活动条带. 1999 年 3 月 15 日在该条带的东端 4 级以上地震密集区附近发生了库车 M_S 5.7 地震. 1998 年 8 月 2 日伽师 M_S 6.0 地震后至 1998 年 8 月 27 日伽师 M_S 6.4 地震前, 新疆境内只发生了 2 次 4 级地震, 一次发

生在距伽师震区不足 100 km 处; 另一次震中位置在阿克苏东, 位于阿克苏—拜城 4 级以上地震密集区内. 在此之后, 伽师地区发生了 1998 年 8 月 27 日 M_S 6.4 地震; 阿克苏附近发生了 1999 年 3 月 15 日库车 M_S 5.7 地震. 1998 年 8 月 27 日伽师 M_S 6.4 地震后至 1999 年 10 月 31 日新疆境内 4 级以上地震空间分布显示, 在阿克苏—库尔勒一线形成了 4 级以上地震活动条带, 结合 1998 年 5 月 29 日皮山 M_S 6.2 地震以来 4 级以上地震的空间分布, 除以上出现的地震活动条带外, 在阿克苏—库车和巴楚西北形成 2 个 4 级以上地震活动密集区. 因此要特别警惕在以上密集区及边缘、条带端部及空段近期发生强震的危险性.

以上分析表明, 在强震活跃时段, 一次强震的发生很可能触发(或引起)其附近乃至较远处处于高应力水平区域的中等地震活动, 从而形成中等地震活动相对密集区或短时间的地震活动条带. 这些密集区及附近或条带的端部及空段很可能是未来强震的危险地点. 在强震(或强震群)频发时段, 如 1997 年 1 月 21 日至 4 月 16 日, 除伽师震区外, 新疆境内几乎无 4 级以上地震发生, 即使有个别 4 级地震发生, 也离强震群不远(一般震中距小于 200 km). 作者称这种现象为地震紧缩现象, 它可以作为判定强震群发生后后续强震危险性的一项重要指标. 反之, 若此期间发生的 4 级以上地震距震中区较远, 一般大于 350 km(作者称这种地震为松弛地震), 则强震群发生后的后续强震的紧迫性将有所缓解, 且预测的强度也应有所下降. 由图 1~图 3 可见, 1997 年伽师地震前新疆的 4 级地震明显集中在伽师地区、喀拉昆仑山口和皮山附近, 而当发生了伽师地震、喀拉昆仑山口地震和皮山地震后, 4 级地震扩散. 1998 年 4 月~7 月 4 级地震再次明显集中, 所不同的是地震集中区分布在伽师至阿克苏地区, 1998 年 8 月 2 日伽

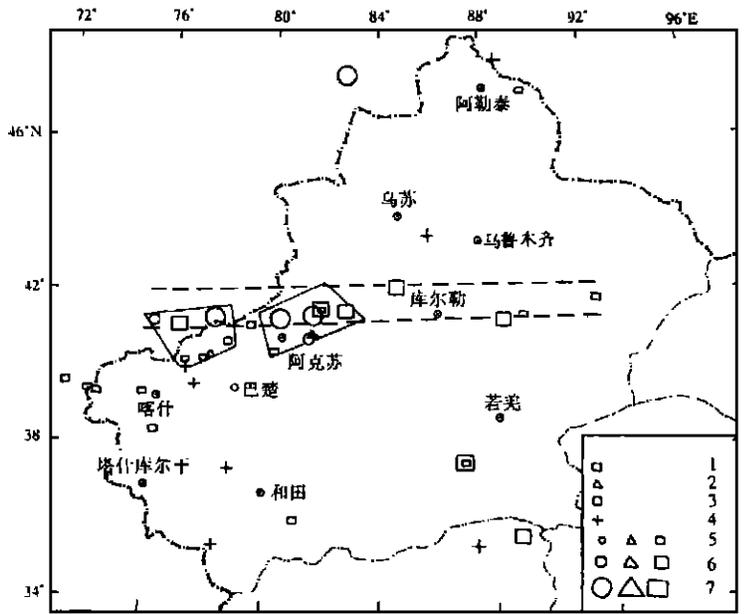


1 1997-01-21~11-07 地震; 2 1997-11-08~1998-03-18 地震;
3 1998-03-19~05-28 地震; 4 已发生的主震; 5 预测地震;
6 $M_S = 4.0 \sim 4.9$; 7 $M_S = 5.0 \sim 5.9$; 8 $M_S = 6.0 \sim 6.9$

图 2 1997-01-21~1998-05-28 新疆地区 $M_S \geq 4.0$ 地震分布
Fig. 2 Distribution of $M_S \geq 4.0$ earthquakes in Xinjiang region from Jan. 21, 1997 to May 28, 1998.

师 6 级地震发生后, 4 级地震再次扩散。

应该指出的是, 1997 年和 1998 年伽师地震前的地震活动图像与 1998 年阿图什地震前不同, 作者认为这可能是由于二者的深部构造环境以及应力场不同所致。阿图什地震是具有逆倾滑分量的单侧破裂事件, 主压应力方向为 SE, 近水平, 主张应力方向 NNE, 近于垂直。而伽师地震是具有正倾滑分量的破裂事件, 主压应力方向 NE, 近于垂直, 主张应力方向为 SE, 近水平^①。阿图什地震发生在南天山深大断裂上, 而伽师地区可能存在与地震活动条带方向相一致的隐伏构造。1997 年和 1998 年伽师



- 1 1998-05-30~08-01 地震; 2 1998-08-02~26 地震;
- 3 1998-08-27~1999-10-31 地震; 4 已发生的主震;
- 5 $M_s = 4.0 \sim 4.9$; 6 $M_s = 5.0 \sim 5.9$; 7 $M_s = 6.0 \sim 6.9$

图 3 1998-05 ~ 1999-10 新疆地区 $M_s \geq 4.0$ 地震分布

Fig. 3 Distribution of $M_s \geq 4.0$ earthquakes in Xinjiang region from May, 1998 to Oct., 1999.

2 次地震前地震活动图像的不同可从地震紧缩现象得到解释。

2 诱发信号震与后续主震关系的讨论

作者将那些与强震或其强余震几乎同时发生的地震定义为诱发信号震。本文重点研究了 4 次强震的诱发信号震及后续地震活动情况, 结果见表 2。自 1996 年 1 月 9 日至 1999 年 10 月 31 日除了上述 4 次地震外新疆境内共发生 $M_s \geq 4.0$ 地震 60 次, 其中可作为诱发信号震的地震有 13 次, 占总数的 22%, 说明这些诱发信号震在时间上不是随机发生的, 很可能是源场呼应的结果。信号震与后续主震的震级差一般为 0.5 ~ 2.0。后续主震与信号震的间隔时间一般为 0 ~ 34 个月。信号震与后续主震的距离一般小于 200 km。这就是说, 一旦诱发信号震发生, 则距该信号震 200 km 范围内未来 3 年有较大可能发生震级比诱发信号震高 0.5 ~ 2.0 的中强地震。图 4 给出了这些诱发信号震与后续主震的空间分布。目前还无中强地震对应的诱发信号震有 3 个, 分布在阿勒泰、哈密及柯坪地区。因此要警惕以上 3 个地区近期发生中强地震的危险。

3 结语

本文根据地震相对活跃阶段成组强震活动特点, 从震源触发失稳系统的观点提出了“震源触发-系统响应”的孕震模式, 定义了“诱发信号震”。对新疆 1996 ~ 1998 年出现的强震成组活动现象进行了分析和讨论。所提出的孕震模式以及诱发信号震与后续主震的关系, 为在地震相

① 单新建. 新疆伽师强震群和阿图什地震震源破裂特征. 见: '99 天山地震国际学术研讨会论文集摘要集, 1999.

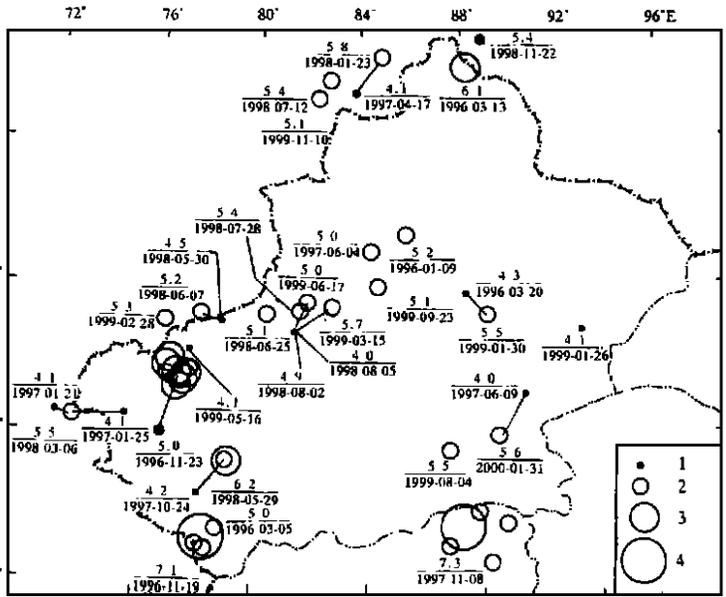
对活跃时段发生的中强地震三要素的预测提供了理论依据和判别标准.

表2 主震、诱发信号震及后续地震的关系

地震	强震及4.0级以上余震数	同日或次日发生中地震数	可作为诱发信号震的地震参数			后续地震参数			震级差	滞后时间/月	距离/km
			时间	震级	地点	时间	震级	地点			
1998-05-29 皮山 M_S 6.2 地震	3	1	1998-05-30	4.5	阿图什北	1998-06-07	5.2	阿图什北	0.7	0	200
1996-03-19 阿图什 M_S 6.7 地震	7	1	1996-03-20	4.3	库尔勒	1999-01-30	5.6	托克逊	1.3	34	100
1996-11-19 喀拉昆仑 M_S 7.1 地震	21	1	1996-11-23	5.0	莎车	1997-01-21	6.2	伽师	1.2	2	150
1997-01-21 伽师 M_S 6.0 地震	91	10	1997-01-21	4.1	乌兹别里	1998-03-06	5.5	乌兹别里	1.4	14	50
			1997-01-25	4.1	塔什库尔干西	1998-03-06	5.5	乌兹别里	1.4	14	200
			1997-04-17	4.1	塔城西	1998-07-12	5.4	塔城西	1.3	15	150
			1997-06-09	4.0	若羌	2000-01-31	5.6	若羌	1.6	31	150
			1997-10-25	4.2	皮山	1998-05-29	6.2	皮山	2.0	7	100
			1998-08-02	4.9	阿克苏	1999-06-17	5.0	拜城	0.1	10	100
			1998-08-05	4.0	阿克苏	1999-03-15	5.7	库车	1.7	7	150
			1998-11-22	5.4	阿勒泰	?					
			1999-01-26	4.1	哈密	?					
			1999-05-16	4.1	柯坪	?					

成组强震活动前后地震活动的时空演化特征不仅表现在中等地震活动图像之中,在中小地震活动中也有所表现^[4].

值得强调指出的是,本文的讨论是建立在系统已处在亚失稳状态下(地震相对活跃时段).只有在这种条件下,系统内部个体的涨落才能引起系统的非线性响应,外部因素的触发才能同时调制若干个子系统与之响应,同时可能出现源场呼应现象以及长程关联行为.至于某个高应力集中区受到几次强地震的触发后发生地震,这可能与该集中区接近临界失



1 诱发信号震; 2 $M_S = 5.0 \sim 5.9$; 3 $M_S = 6.0 \sim 6.9$; 4 $M_S = 7.0 \sim 7.9$
图4 诱发信号震与相应主震震中分布

Fig. 4 Distribution of signal inducing earthquakes and succeeding strong earthquakes.

稳状态的程度、震源触发强度和作用方式有关.诱发信号震的震级大小可能主要取决于信号震所在区域的介质环境和应力水平,而与强震的触发强度和作用方式关系不大.

[参考文献]

A STUDY ON EARTHQUAKE TREND OF KUMA FAULT ZONE AFTER THE HENAN $M_s5.1$ AND MAQIN $M_s5.0$ EARTHQUAKES IN QINGHAI PROVINCE

DU Chang-ting¹, Yang Guang-hua²

(1. *Seismological Bureau of Qinghai Province, Xining 810001, China;*

2. *Dulan Seismostation, Qinghai Province, Dulan 816100, China*)

Abstract: The earthquake trend of Kuma fault zone after the Henan $M_s 5.1$ and the Maqin $M_s 5.0$ earthquakes is analyzed and discussed on the basis of seismicity, anomalous changes of coda lasting time by Dawu seismic station and radon contents in groundwater by Changning, Huangyuan and Xining stations. The results show that there is an obvious corresponding relation between mid-strong earthquakes in Henan—Maqin area and strong earthquakes along Kuma fault zone. There is a gap by $M_L \geq 3.0$ earthquakes at middle section of the Kuma fault zone. Anomaly of the coda lasting time still exists and the trend anomalies of radon content in groundwater still continue. Therefore, there is a background of strong earthquake along the Kuma fault zone after the two earthquakes.

Key words: Qinghai; Kuma fault zone; Seismicity trend of earthquake

(上接 154 页)

[1] 郭增建. 由立交模式讨论地震预报[J]. 西北地震学报, 1985, 17(1): 95—101.

[2] 白超英, 秦保燕. 深部剪切形变带对浅源地震控制的讨论——“立交模式”三维有限元的模拟计算[J]. 西北地震学报, 1990, 22(1): 1—11.

[3] 周硕愚. 系统科学导引[M]. 北京: 地震出版社, 1988. 110—128.

[4] 白超英. 成组中强震前后小震的时空活动特征[J]. 华南地震, 1998, 18(2): 47—52.

THE TIME-SPACE EVOLUTION OF SEISMICITY PATTERN BEFORE AND AFTER GROUP MEDIUM-STRONG EARTHQUAKES IN XINJIANG REGION

BAI Chao-ying, WANG Xiao-rong

(*Seismological Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China*)

Abstract: Based on the “focus trigger-system response” seismogenic model, the time-space evolution characters of seismicity pattern before and after group strong earthquakes in Xinjiang region from 1996 to 1998 are discussed and analyzed. The signal inducing earthquake is defined. The relation between the signal inducing earthquakes and succeeding strong earthquakes is studied. The results show that the medium earthquake activity area that is triggered by strong earthquake and its border may be a dangerous region of future strong earthquake. The signal inducing earthquake within two days after the strong earthquake or its strong aftershock has forecast significance. There is a very fair possibility of strong earthquake with magnitude larger than that of the signal earthquake by $0.5 \sim 2$ to occur in range of 200 km around the signal event within 3 years after the event. Finally a preliminary discussion on the mechanism of group strong earthquake activity is made.

Key words: Xinjiang; Strong earthquake; Seismicity feature; Signal inducing earthquake