

青藏高原北部地区地震窗口特征 及其预报意义

刘小凤, 梅秀萍, 张小美

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 利用青藏高原北部地区弱震活动资料筛选出3个具有中短期预报效能的地震窗口, 分析了 $M_s \geq 5.0$ 地震前各个窗口的异常特征, 提取出半定量的中短期预报指标, 即: 在中强地震前80%的异常出现在地震前1~6个月, 以中心异常出现时间向后推1~6个月作为预测的发震时间; 异常幅度与未来震级之间没有明显的对应关系. 对于7级以上大地震, 古浪窗的显著异常主要对应边界水平剪切走滑活动断裂上发生的地震; 舟曲窗和乌海窗的显著异常主要对应活动块体内部挤压逆冲断裂上发生的地震. 而5~6级的中等地震没有明显的对应规律.

关键词: 地震窗口; 青藏高原北部地区; 中短期地震预测

中图分类号: P315.75 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2003)04-0359-06

0 引言

地震窗是指某些能以弱震活动形式灵敏反映区域应力场变化的特殊构造部位^[1]. 在华北、新疆地区和云南地区地震窗研究已经取得了一定的成果^[2~4], 并将该方法应用于各个地区的中短期和短临地震预测. 青藏高原北部地区特殊的条件使得地震活动窗口的研究一直是一个空白, 本次开展这方面的研究完全是受2001年昆仑山口西8.1级地震和甘肃肃南5.3级地震之前本区某些特殊构造部位弱震集中活动的启发. 青藏高原北部地区地震构造相对复杂, 地震台网控制能力相差较大, 一般采用多台综合定位. 在本项研究中采用了中国地震局小震目录, 对青藏高原北部地区1970年以来发生的76次 $M_s \geq 5.0$ 地震前6个月的弱震活动情况进行了全时空扫描, 确定了3个具有前兆指示意义的地震窗口.

1 地震窗的构造地质背景

青藏高原北部地区构造复杂, 地震活动频繁. 北部为NWW—NW向祁连山活动构造带; 东部为近SN向六盘山和龙门山挤压逆冲构造带; 南部为近EW—NWW向库玛断裂带; 西部为NEE向阿尔金活动断裂带. 这四条边界所围限的块体内部还有次级活动断裂, 如NWW向的西秦岭北缘断裂和NNW向的鄂拉山断裂、拉脊山断裂、庄浪河断裂等. 这些次级断裂将块体又划分成次一级的构造块体, 形成了复杂的孕震构造条件和发震机制. 其中大型断裂转折拐弯、断裂交汇等应力相对集中的地方岩石破碎, 次级断裂发育, 必然成为小震密集活动的场所, 使得这些地方成为反映区域中强震活动的窗口.

1970年以来青藏高原北部地区弱震活动空间分布和时间演化图像清楚的表明, 主要的活动构造为NWW和NNW两组, 中强以上地震主要发生在区内主要活动断裂带或断裂带交汇的地区, 弱震也发生在以上地区或周围. 几个比较集中的弱震活动地区分别为古浪推覆体、肃南、六盘山、舟曲、兴海、格尔木北东方向的锡铁山等地区. 这些区域恰好是活动断裂转折拐弯或与其它断裂交汇的地方, 当区域应力场增强时

收稿日期: 2002-09-03

基金项目: “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: LC2003063

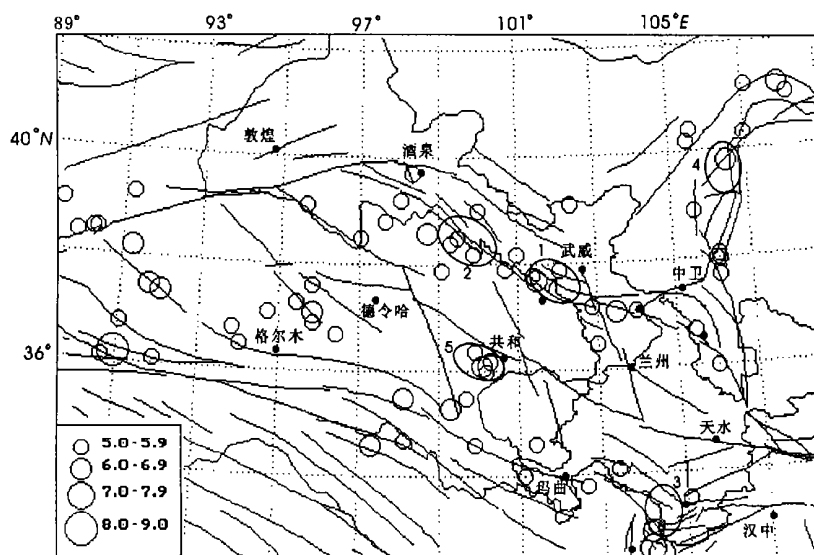
作者简介: 刘小凤(1965—), 女(汉族), 甘肃宁县人. 副研究员, 主要从事地震预报和地震地质研究.

首先在这些地区发生一系列小地震,不久的中强地震就发生在与周围构造相关的其它断裂带上,使得这些地区成为反映区域应力场变化的窗口和大震即将来临的前兆异常标志.这些窗口具有各自不同的介质和构造条件,又处在统一的构造应力场下,因此表现出的异常既有共性又有差异.

2 资料与方法

研究地震窗口所用的小震记录资料有两种方法,新疆与华北地区地震窗口的研究采用单台记录,取 $S-P \leq 10s$ 左右, $M_L \geq 1.0$ 地震的月频度、旬频度和日频度资料.本文弱震资料采用中国地震局监测预报司的地震目录,局部地区引用了甘肃省地震目录.中强震和强震资料采用中国地震局强地震目录.

地震窗口的选择首先寻找大区域应力场控制下青藏高原北部地区中强地震前中小地震活动有明显变化的,能够反映出某种信息的特殊构造部位,然后利用该地区发生的 $M_S \geq 6.0$ 地震前6个月 $M_L 2.0 \sim 5.0$ 地震活动情况进行全时空 $1^\circ \times 1^\circ$ 的扫描,选择地震活动相对集中的、频度明显高于周围其他地区的空间,然后将这些地区逐月跟踪,进一步确定高频度地区的确切范围.根据以上方法筛选出5个地震窗口,分别为古浪窗、舟曲窗、乌海窗、肃南窗和兴海窗(图1),其中前3个窗口可以作为前兆窗口,肃南窗地震频次偏低,兴海窗口为余震窗,结合我们短临预测的目的,仅重点分析3个前兆窗口.



1. 古浪窗 2. 肃南窗 3. 舟曲窗 4. 乌海窗 5. 兴海窗

图1 青藏高原北部地区地震窗和中强以上地震

Fig. 1 Seismic windows and mid-strong earthquakes in north areas of Qinghai—Xizang plateau.

3 地震窗口的异常特征

根据1970年以来发生的76次 $M_S \geq 5.0$ 地震前三个窗口的小震活动的统计分析,异常特征一般为小震活动高值出现之后发震,各个窗口小震活动频度特征为增强—平静—发震.异常在时间上表现为地震前1~6个月窗口地区出现小震活动频度增强的现象,异常结束后6个月内发震.在空间上各窗口异常时间与未来地震存在一定的关系,而且与区域构造条件有一定的相关性.

3.1 异常的时间特征

对76个震例的研究结果表明,各个窗口的异常幅度差异较大,主要依赖于本地区地震活动的总体水平.旬频度超过均方差线即为异常.异常时间有一定的共性:古浪窗震前出现异常在1~6个月的地震达80%,1~3个月占60%;舟曲窗震前在1~6个月出现异常的地震达86%,1~3个月占60%;乌海窗在震

前出现 1~6 个月异常的地震达 84%, 1~3 个月占 52%。可见 80% 的地震发生在异常出现后 1~6 个月, 50% 以上地震发生在异常出现后 1~3 个月, 因此将异常中心点向后推 1~6 个月作为发震的时间预报指标。

3.1.1 1976 年松潘地震

1976 年 8 月 16 日和 23 日松潘 7.2 级双震发生在研究地区东南边缘。地震之前距震中最近的舟曲窗于 1976 年 6 月观测到短期异常, 异常超前时间为 2.5 个月, 异常频次 14 次, 异常幅度超过平均值 2 倍, 异常结束后当月发震(图 2)。古浪窗有两个异常段, 第一次为 1975 年 11 月~1976 年 2 月, 异常幅度超过平

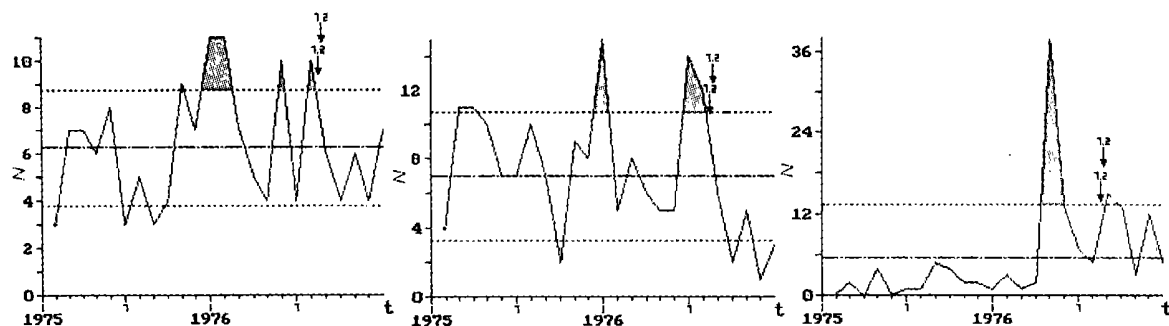


图 2 1976 年松潘地震小震月频度曲线

Fig. 2 Anomalous curves of mouthly frequency before Songpan earthquake in 1976.

均值 2 倍, 超前时间为 8 个月, 频次 10 次。第二次为 1976 年 5 月 9 日和 7 月 23 日, 超前时间为 1~3 个月, 频次为 10。乌海窗于 1976 年 4 月观测到异常, 超前时间为 4 个月, 频度 38 次, 异常结束后 2.5 个月发震。可见舟曲窗和乌海窗的异常幅度最大, 异常最明显, 表明舟曲窗和乌海窗对该次地震的反映最敏感。

3.1.2 1990 年共和地震

1990 年 4 月 26 日共和 7.0 级地震发生在该地区中部共和次级地块内。由于该时段内青藏高原北部地区中强震活动频繁, 为了排除相互的干扰和影响, 从中提取出各自不同的异常特征, 采用小震旬频度数据。地震之前距震中最近的古浪窗于 1990 年 1 月出现最大异常, 超前时间为 3 个月, 频次 12 次; 舟曲窗最大异常出现在 1990 年 1 月 25 日, 超前时间为 3 个月, 频次 5 次, 是平均值的 2 倍, 异常结束后 2.5 个月发震; 乌海窗最大异常出现在 1990 年 3 月 11 日, 超前时间为 2.5 个月, 频次 8 次, 是平均值的 4 倍, 异常结束后 1 个月发生地震(图 3)。可见, 舟曲、乌海和古浪窗在震前均有明显的异常, 但异常窗口出现的时间与未来的发震地点之间没有明显的关系。

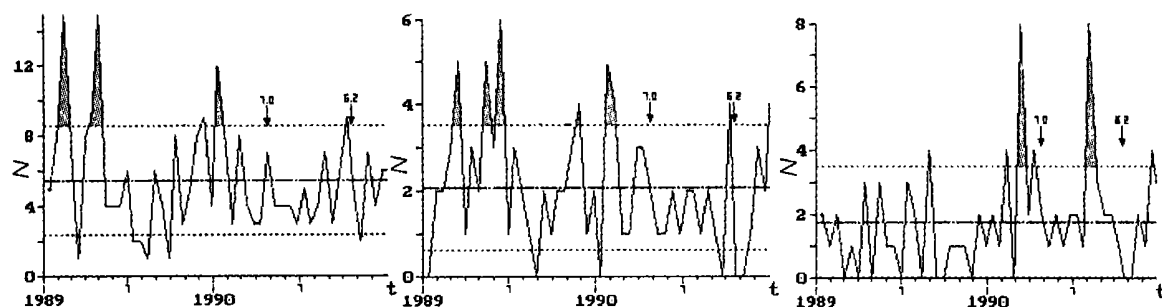


图 3 1990 年共和地震小震旬频度曲线

Fig. 3 Anomalous curves of ten-day frequency before Gonghe earthquake in 1990.

3.1.3 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震

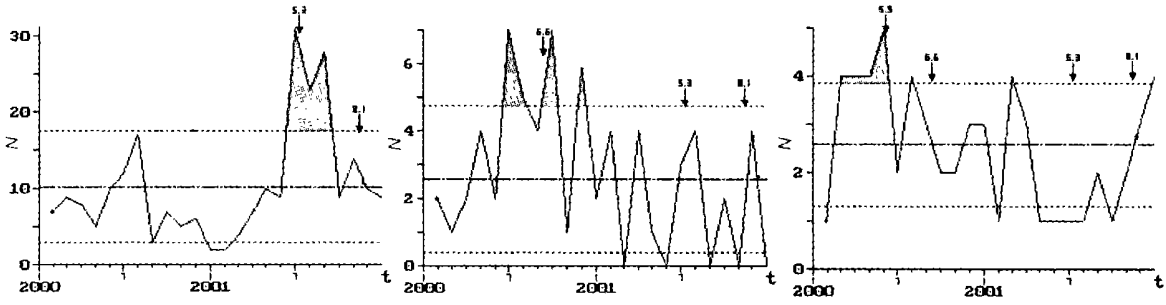


图 4 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震小震月频度曲线

Fig. 4 Anomalous curves of mouthly frequency before West to Kunlunshan pass earthquake in 2001.

2001 年昆仑山口西 8.1 级地震发生在青藏高原北部地区的南边界库玛活动断裂带上. 地震之前距震中较近的古浪窗出现明显的中短期异常特征, 而乌海窗和舟曲窗异常不明显. 古浪窗 2001 年 6 月出现异常, 超前时间为 6.5 个月, 频次 31 次, 异常结束后 2.5 个月发震; 乌海窗于 2001 年 2 月出现异常, 超前时间为 10 个月, 频次 4 次, 2001 年 4 月至地震发生弱震活动一直平静. 舟曲窗和该地震属于同一构造带, 地震发生在库玛地震带的西段, 而窗口位于地震带的东端, 地震前未出现异常, 表明应力的集中区仅限于西段(图 4). 古浪窗位于祁连山大型左旋走滑断裂带中段和西段的构造转换位置, 反映了大型区域活动断裂在空间上和动力学上的相关性.

3.2 异常的空间分布

前已述及, 地震窗口在时间预测上有较明显的优势, 在发震地点的预测上无规律可循同样是一个重要的问题. 以下就各个窗口与未来地震在距离上的相关性进行分别讨论.

古浪窗距窗口中心 500 km 范围内的 14 次地震中 11 次有异常显示, 3 次为漏报. 3 次漏报地震分别为 1988 年祁连 5.1、1991 年祁连 5.1 和共和 5.8 级地震, 与窗口的距离较近反而无异常显示. 而与窗口较远的 1987 年迭部 5.8、2001 年昆仑山口西 8.1 级地震前均有明显的异常显示.

舟曲窗 500 km 范围内的 12 次地震中 11 次有异常显示, 1 次为漏报. 有明显异常的地震为 1978 年民乐 5.0、1982 年海原 5.7、1989 年民勤 5.0、肃北 5.1、固原 5.0、2000 年兴海 6.6 级地震.

乌海窗 500 km 范围内的 11 次地震中 8 次有异常显示, 3 次为漏报. 有明显异常的地震为 1976 年阿左旗 6.2、1979 年五原 6.0 和 1997 年乌拉特旗 5.0 级地震. 大于 500 km 范围还有明显异常的地震为 1986 年门源 6.4、1990 年共和 7.0、景泰 6.2 和 1994 年共和 6.0 级地震.

参与统计的 76 次地震中 48 次有震源机制解资料, 根据 P、T 轴可以确定断层面的错动性质. 48 次地震中包含 28 次走滑断层运动、18 次逆断层运动和 2 次正断层运动. 三个窗口采用统一的旬频度异常标准. 古浪窗出现显著异常的 37 次地震中, 23 次为走滑断层, 14 次为逆断层; 舟曲窗的 23 次显著异常中, 走滑断层 15 次, 逆断层 8 次; 乌海窗的 26 次显著异常中, 19 次为走滑断层, 7 次为逆断层. 可见, 各个窗口的显著异常对应了不同的发震断层类型. 对于 7 级以上大地震, 古浪窗的显著异常主要对应边界水平剪切走滑活动断裂上发生的地震; 舟曲窗和乌海窗的显著异常主要对应活动块体内部挤压逆冲断裂上发生的地震. 而 5~6 级的中等地震没有明显的规律. 同时, 异常出现的先后顺序与未来的发震地点之间没有明显的对应关系, 预测的发震地点不仅与距离有关, 而且受区域构造条件制约.

4 统计检验结果

1970~2002 年 6 月以来区内发生 $M_s \geq 5.0$ 地震 76 次, 其中 1976 年松潘 7.2 级双震、1990 年共和 7.

0 级地震和 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震的强余震进行了删除。

根据已有的资料,在预报能力检验和评分中对报准、虚报、漏报做了以下规定:由异常月向后数第 1 至第 6 个月为预测的发震月,凡在此 6 个月中发生的地震作为有震报准(n_1^1);在预测的发震月中实际无地震发生者为虚报(n_0^1);而在预测的无震月中实际有地震发生者为漏报(n_1^0)。预报效能 R 值评分采用以下公式

$$R = \frac{\text{报准地震数}}{\text{应报地震数}} - \frac{\text{预报占时间}}{\text{研究总时间}}$$

该公式适用于固定预报范围,预报地点明确,每次预报时段不定的空间扫描情况。当 R 值大于 $R_{97.5\%}$ 置信度水平时,则通过检验。

表 1 为各窗口异常预报地震效能 R 值统计,考虑到 1985 年以前研究地区地震活动水平相对较弱,而 1985 年以后地震活动水平较高,因此以 1985 年为界在时间轴上划分为两个阶段分别讨论。从表中的结果不难看出各窗口 R 值均大于 $R_{97.5\%}$ 置信度水平,通过了检验。

表 1 各地震窗口异常预报地震效能 R 值评分

地震窗口	资料起止 时间 / 年	异常总数	有震报 准 n_{11}	漏报 n_{01}	虚报 n_{10}	预报占用 时间 / 月	研究资料 时间 / 月	$R_{97.5\%}$	R
古浪窗	1970~1985	32	27	4	5	96	192	0.170	0.37
	1986~2001	38	35	10	3	114	192	0.150	0.19
肃南窗	1970~1985	31	26	5	5	93	192	0.175	0.35
	1986~2001	40	36	9	4	120	192	0.149	0.18
玛曲窗	1970~1985	31	23	8	8	93	192	0.184	0.26
	1986~2001	46	42	3	4	138	192	0.127	0.22
中卫窗	1970~1985	36	30	1	6	108	192	0.161	0.41
	1986~2001	35	34	11	1	105	192	0.121	0.21

5 结论和讨论

根据三个地震窗口的时空异常特征确定了青藏高原北部地区地震窗方法短临跟踪预报的判据指标。即:将窗口出现异常的中心时间点向后推 1~6 个月作为预测的发震时间;异常出现的先后顺序与未来的发震地点之间没有明显的对应关系;异常幅度与未来震级之间没有明显的对应关系。异常幅度除与地震强度有关外还受窗口本身所处的构造位置及其地震活动特征影响,所以对未来震级的确定也不能忽视这些因素,而应综合考虑。窗口在空间上的分布与地震的对应关系不仅与距离相关,还与区域构造条件有关,在构造上有内在联系的窗口和地震对应的距离较远,当窗口与未来地震处于同一构造条件时出现的异常可以对应较远的中强地震,相反若不在同一构造单元时即使距离较近也没有异常显示。对于 7 级以上大地震,古浪窗的显著异常主要对应边界水平剪切走滑活动断裂上发生的地震;舟曲窗和乌海窗的显著异常主要对应活动块体内部挤压逆冲断裂上发生的地震。而 5~6 级的中等地震没有明显的规律。可见考虑了中强地震发震力学机制与不同地震窗口的对应关系对于发震地点的确定有一定的指示意义。

地震窗口方法自提出以来得到了较为广泛的应用,特别在华北地区、新疆地区和川滇地区已经取得了较好的具有减灾实效的中短期和短临预报。研究结果表明该方法作为单项指标对未来中强震作出中短期乃至短期预报是行之有效的,同时也存在一定的不足之处,其主要原因是区域构造复杂、区域台网分布不均,导致窗口的异常频度偏低,使得该方法在拓展应用方面受到了一定的局限,在实际应用中应当结合其它地震活动性指标进行综合分析。随着区域数字化台网的建立,测震精度将会有较大的提高,今后可能对

研究青藏高原北部地区的地震窗口提供更精确的弱震活动资料.

[参考文献]

- [1] 敖雪明,王桂岭,周仕勇,等. 新疆地震窗口网在强震短临跟踪预报中的应用研究[J]. 地震学报,1994,16(增刊):56—66.
- [2] 姜秀娥,单锦芬. 华北强地震余震震群应力场“窗口”效应[J]. 西北地震学报,1982,4(4):41—46.
- [3] 程万正. 前兆地震活动“窗口”或敏感部位的寻找及有效性估计[J]. 地震研究,1984,7(6):657—666.
- [4] 敖雪明,王桂岭,吴小玲,等. 姑咱地震窗异常与地震的关系[J]. 华南地震,1996,16(4):34—39.
- [5] 苏鸾声. “博山震情窗口”预报效能的研究,华北地震科学[J]. 1997,15(3):40—44.

CHARACTERISTICS OF SEISMIC WINDOWS ANOMALY AND PREDICTION SIGNIFICANCE IN NORTH AREAS OF QINGHAI—XIZANG PLATEAU

LIU Xiao-feng, MEI Xiu-ping, ZHANG Xiao-mei

(Lanzhou Institute of Seismology, CBS, Gansu Lanzhou 730000, China)

Abstract: Three seismic windows with mid—short period prediction effectiveness are selected through a study on seismicity in North areas of Qinghai—Xizang plateau. The anomalous feature in the seismic windows before strong earthquake ($M_s > 5.0$) is analyzed and the half—quantity prediction criteria for midshort period are attained. The result shows that 80% anomalous occur 1 to 6 months before strong earthquake, so we consider 1~6 months as strong event time after some anomalous occur in the mid—point of seismic windows. There is no intimate relationship between the anomalous amplitude and the following earthquake. The Gulang seismic window is corresponding with the earthquake in large and shear strike—slip fault, The main anomalous in Zhouqu and Wuhai windows is corresponding with the earthquake in constrain thrust fault in the internal plateau. But there is no apparently relationship between the earthquake ($5.0 < M_s < 6.0$) and anomalous in seismic windows.

Key words: Seismic windows; North areas of Qinghai—xizang plateau; Mid—short earthquake prediction