

新疆天山地区中强地震前 中小地震活动特征的定量研究

王琼, 曲延军

(新疆维吾尔自治区地震局, 新疆乌鲁木齐 830011)

摘要:应用地震活动统计量 β_n 定量分析了新疆天山地震带不同分区中小地震活动状态以及中强地震前中小地震活动速率的异常特征,并提取了中强震前 β_n 值的中期预测指标。结果表明,当 β_n 值满足各研究区的异常指标时,北天山和南天山东段1年左右可能发生5~6级地震;巴楚—阿图什和喀什—乌恰地区1年左右可能发生5.5~7.0级的地震。从发震时间来看,乌鲁木齐、乌苏—石河子和喀什—乌恰地区中强地震基本发生在 β_n 值异常结束后;拜城—库车地区和巴楚—阿图什地区部分中强震发生在 β_n 值处于异常状态过程中。各研究区中强震前1年左右中小地震活动具有区域特征:乌鲁木齐地区呈现增强;乌苏—石河子地区和喀什—乌恰地区既有增强也有平静;巴楚—阿图什地区以平静为主;南天山东段和阿克苏—巴楚地区异常特征不明显。

关键词:地震活动统计量 β_n ; 中小地震活动; 定量研究; 新疆; 天山地区

中图分类号: P315.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2008)04-0385-07

Quantitative Study on Seismicity Character of Small-medium Events before Moderate-strong Earthquakes in Tianshan Mountain Region, Xinjiang

WANG Qiong, QU Yan-jun

(Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Xinjiang Urumqi 830011, China)

Abstract: The abnormal characters of seismic active state and rate for small-medium earthquakes before moderate-strong earthquakes in different regions of Tianshan seismic belt, in Xinjiang region, with the seismicity statistical parameter value β_n are analyzed quantitatively, and the middle-term prediction index of β_n values before moderate-strong earthquake are refined. The result shows that when β_n value is satisfied with abnormal index in different region, there may occur $M_s 5 \sim 6$ earthquake within about one year in the northern Tianshan mountain and the east part of southern Tianshan mountain; $M_s 5.5 \sim 7.0$ earthquake within about one year in the Bachu—Atushi region and Kashi—Wuqia region. In the aspect of earthquake occurring time, moderate-strong earthquakes in Urumqi, Wusu—Shihezi and Kashi—Wuqia region occur nearly after β_n value anomaly ends; some moderate-strong earthquakes in Baichen—Kuche and Bachu—Atushi occur when β_n value is in the state of anomaly. Small-medium earthquakes in different regions about one year before moderate-strong earthquake have regional character: small-medium earthquake activity increases in Urumqi region; increases and quiescent in the Wusu—Shihezi and Kashi—Wuqia region; quiescent in the Bachu—Atushi region; but are not obvious in the east of southern Tianshan and Akesu—Bachu region.

Key words: Seismicity statistical parameter value β_n ; Small-medium earthquake activity; Quantitative study; Xinjiang; Tianshan mountain region

收稿日期: 2008-02-26

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAC01B03-04-02)

作者简介: 王琼(1973-), 女(汉族), 山东淄博人, 副研究员, 主要从事地震预报、地震应力触发等研究。

0 引言

目前关于中强震前中小地震活动异常特征国内外学者已经提出了数种研究方法,但其中多数是基于地震活动的时空演化特征,主要是定性分析中小地震活动特征。Matthews 等^[1]提出用地震活动统计量 β_n 描述地震活动速率随时间的变化,从而定量研究中地震活动异常变化特征。宋俊高等^[2-3]应用该统计量 β_n 定量判定了中国东部 14 次中强震前中短期平静特征。

中强地震前普遍存在中小地震活动增强与平静的现象^[4-7]。由于区域构造特征的差异性和应力场所处的应力状态不同,中强震前中小地震活动呈现出增强和平静不同的异常特征。本文通过计算地震活动统计量 β_n 值,定量分析了新疆境内天山地震带不同分区中小地震活动状态以及中强地震前中小地震活动速率异常特征,提取了中强震前 β_n 值的中期预测指标,从而为各区域地震趋势分析提供参考依据。

1 研究方法

1.1 地震活动统计量 β_n ^[2]

对于给定的地震目录,设 $S(t)$ 为观测时段 $[0, T]$ 内 t 时刻的累计地震数,则原始过程 $S(t)$ 是由基本背景过程 $N(t)$ 与高度丛集的相关时间过程 $D(t)$ 组成的: $S(t) = N(t) + D(t)$ 。

通过某种算法去掉 $S(t)$ 中的丛集部分,而将过程 $N(t)$ 分离出来,Matthews^[1]指出包含异常活动速率子区间的地震序列全过程,可以看作是强度函数 $\lambda(t)$ 的非齐次泊松过程,给定 $[0, T]$ 区间的点过程 $N(t)$,设 A 为 $[0, T]$ 上的任一子区间,则有

$$\lambda(t) = \begin{cases} \rho^\beta, & \text{如果 } t \in A \\ \beta, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

β 为背景活动率,由强度均匀的泊松过程组成; ρ 为异常活动率对背景活动率的比值。 β 和 ρ 为正常数,若 $\rho < 1$,子区间 A 地震活动平静; $\rho > 1$,则子区间 A 地震活动增强; $\rho = 1$,子区间的状态是强度均匀的泊松过程。引入统计量 β_n 表述非齐次泊松过程中子区间 $[t - \delta, t]$ 和过程的其余部分之间地震活动速率的差异程度, t 为子区间结束时间, δ 为子区间时间长度,则 $\beta_n(t, \delta)$ 描述了该子区间的地震活动速率变化程度,即

$$\beta_n(t, \delta) = \frac{M(t, \delta) - n\delta}{\sqrt{n\delta(1 - \delta)}} \quad (2)$$

$M(t, \delta)$ 为子区间 $[t - \delta, t]$ 中的地震数; n 为区间中的地震总次数。将区间 $[0, T]$ 归一化为 $[0, 1]$,则 $\delta \leq 1$ 。如果 $\delta = 1$,则定义 $\beta_n = 0, \beta_n > 0$ 和 $\beta_n < 0$ 分别表示子区间与背景区间相比,地震活动速率的增加和减小。一般说来, $\beta_n > 2.0$ 为地震活动速率显著增加, $\beta_n < -2.0$ 为地震活动速率显著减小,不同区域由于背景活动速率不同, β_n 的阈值可能不同。

1.2 预测检验方法^[8]

为检验预测效能,本研究使用综合考虑漏报率和虚报率的 R 值。其计算公式为:

$$R = 1 - \frac{\text{虚报次数}}{\text{发出预测总次数}} - \frac{\text{漏报次数}}{\text{应预报总次数}}$$

式中, R 值预测评分最好为 1,即漏报率为 0、虚报率为 0,最差为 1,即漏报率为 1、虚报率为 1。

异常指标达到后的发震条件概率为: $P = (n + 1)/(N + 2)$; n 为异常出现后发生地震的次数, N 为异常出现的总次数。

2 研究区和资料的选取

本研究根据区域构造特征和历史地震活动特点,将新疆境内天山地震带划分为乌鲁木齐地区(1)、乌苏—石河子地区(2)、库尔勒地区(3)、拜城—库车地区(4)、阿克苏—巴楚地区(5)、巴楚—阿图什地区(6)和喀什—乌恰地区(7)7 个区域作为研究区(图 1)。

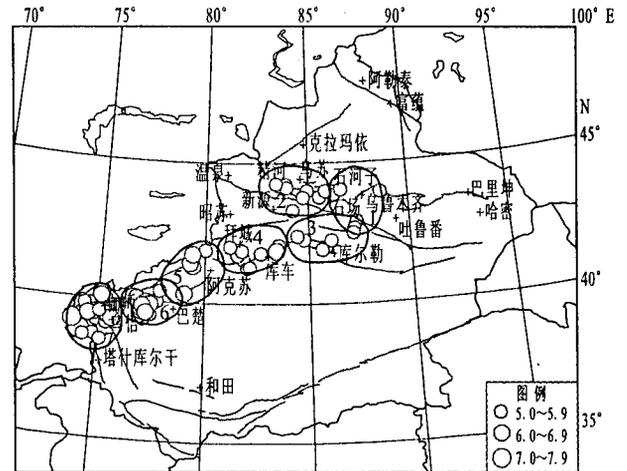


图 1 研究区范围及目标地震震中分布

Fig. 1 Distribution of the research areas and the target earthquake epicenters.

采用 1970 年以来新疆区域台网得到的地震目录,依据不同研究区内地震目录的完备性,选择不同的震级下限。目标地震则依据不同研究区历史地震活动特征确定:乌鲁木齐地区、乌苏—石河子地区、

拜城—库车地区和库尔勒地区的目标震级为 $M_s \geq 5.0$;阿克苏—巴楚地区、巴楚—阿图什地区和喀什—乌恰地区的目标震级为 $M_s \geq 5.5$ 。

3 计算结果分析

通过分析不同研究区地震活动统计量 β_n 的时序变化特征,定量提取中强震前中小地震活动速率的异常信息。研究中分别选取不同的时间窗长和步长以及震级下限计算 β_n 值,通过对比分析中强地震前地震活动统计量 β_n 的异常特征,确定最佳预测时间窗长、步长以及震级下限。

3.1 乌鲁木齐地区

图2(a)是乌鲁木齐地区(1区)1970年以来以24个月为窗长、1个月为步长计算的 $M_s 2.5 \sim 4.9$ 地震的 β_n 值时序变化曲线。该区5组5级以上地震中4组震前中小地震出现增强活动过程, $\beta_n \geq 1.8$;1组震前中小地震呈现出平静特征, $\beta_n \leq -1.8$ 。由表1可见,乌鲁木齐地区中强以上地震前14个月内中小地震普遍处于高速率活动状态。

当出现 $\beta_n \geq 1.8$ 或 $\beta_n \leq -1.8$ 异常结束或转折变化后,预测14个月内该区的发震概率为 $P = 0.60, R = 0.57$ 。

3.2 乌苏—石河子地区

图2(b)是乌苏—石河子(2区)1970年以来以12个月为窗长、1个月为步长计算的 $M_s 2.5 \sim 4.9$ 地震的 β_n 值时序变化曲线。该区7组5级以上地震中4组震前中小地震出现增强活动特征, $\beta_n \geq 1.5$;3组震前 $M_s \geq 2.5$ 地震出现平静特征, $\beta_n \leq -1.5$ 。由表1可见,中强以上地震前14个月中小地震活动速率出现明显的异常状态。不同地点中强地震前中小地震活动特征不同,精河—乌苏地区和石河子以东地区的中强地震前中小地震活动表现为活跃特征,而乌苏—石河子地区中强地震前中小地震活动则表现为平静特征。

当出现 $\beta_n \geq 1.5$ 或 $\beta_n \leq -1.5$ 异常结束或转折变化后,预测14个月内该区的发震概率为 $P = 0.80, R = 0.75$ 。

3.3 库尔勒地区

图2(c)是库尔勒地区(3区)1970年以来以24个月为窗长、2个月为步长计算的 $M_s 2.5 \sim 4.9$ 地震的 β_n 值时序变化曲线。该区6组5级以上地震中1组震前中小地震出现增强活动特征, $\beta_n \geq 1.4$;2组震前 $M_s \geq 2.5$ 地震出现平静特征, $\beta_n \leq -1.4$;3组震前中小地震活动速率未出现明显的异常特征。由

表1可见,中强以上地震前1年中小地震活动速率异常特征不显著。

当出现 $\beta_n \geq 1.4$ 或 $\beta_n \leq -1.4$ 异常结束或转折变化后,预测1年内该区的发震概率为 $P = 0.57, R = 0.1, \beta_n$ 值在该区的预测效能不高。

3.4 拜城—库车地区

图2(d)是拜城—库车地区(4区)1970年以来以24个月为窗长、1个月为步长计算的 $M_s 3.0 \sim 4.9$ 地震的 β_n 值时序变化曲线。该区6组5级以上地震中2组震前中小地震出现增强活动特征, $\beta_n \geq 1.6$;2组震前中小地震出现平静特征, $\beta_n \leq -1.6$;2组震前中小地震活动速率未出现明显的异常特征。由表1可见,拜城—库车地区多数中强以上地震前1年内中小地震活动速率存在增强或平静的异常状态。

当出现 $\beta_n \geq 1.6$ 或 $\beta_n \leq -1.6$ 异常结束或转折变化后,预测1年内该区的发震概率为 $P = 0.63, R = 0.33$ 。

3.5 阿克苏—巴楚地区

图2(e)是阿克苏—巴楚地区(5区)1970年以来以24个月为窗长、1个月为步长计算的 $M_s 3.0 \sim 4.9$ 地震的 β_n 值时序变化曲线。该区4组5.5级以上地震前1年内中小地震活动速率未出现明显的异常变化。

3.6 巴楚—阿图什地区

图2(f)是巴楚—阿图什地区(6区)1970年以来以24个月为窗长、2个月为步长计算的 $M_s 3.0 \sim 4.9$ 地震的 β_n 值时序变化曲线。该区7组5级以上地震中2组震前中小地震出现增强活动特征, $\beta_n \geq 1.5$;4组震前中小地震出现平静特征, $\beta_n \leq -1.5$;1组震前中小地震活动速率未出现异常变化。由表1可见,巴楚—阿图什5.5级以上地震前15个月内中小地震活动速率存在明显的异常变化,中小地震活动以平静特征为主。

当出现 $\beta_n \geq 1.5$ 或 $\beta_n \leq -1.5$ 异常结束或转折变化后,预测1年内该区的发震概率为 $P = 0.86, R = 0.71$ 。

3.7 喀什—乌恰地区

图2(g)是喀什—乌恰地区(7区)1970年以来以24个月为窗长、2个月为步长计算的 $M_s 2.5 \sim 4.9$ 地震的 β_n 值时序变化曲线。该区7组5级以上地震中5组震前中小地震出现增强活动特征, $\beta_n \geq 1.5$;3组震前中小地震出现平静特征, $\beta_n \leq -1.5$ 。由表1可见,喀什—乌恰5.5级以上地震前1年内

表1 各研究区中强震前 β_n 值统计特征

研究区域	β_n 值异常指标	事件		β_n 值异常起止时段	β_{nMax}	异常结束至发震时间/月
		时间	震级			
乌鲁木齐地区	$\beta_n \geq 1.8$ 或 $\beta_n \leq -1.8$	1980-11-06	5.7	1978-08—1979-11	2.2	12
		1983-03-03	5.0			
		1983-06-01	5.0	1981-06—1981-12	2.0	14
		1983-12-15	5.0			
		1991-06-06	5.2	1988-09—1990-07	-2.4	11
		1995-03-19	5.0			
		1996-01-09	5.2	1994-01—1995-09	2.4	3
乌苏—石河子地区	$\beta_n \geq 1.5$ 或 $\beta_n \leq -1.5$	2003-02-14	5.4	2001-11—2002-07	2.4	6
		1973-06-03	6.0	1972-02—1972-08	2.8	9
		1980-11-06	5.7	1980-07—1980-10	2.2	1
		1983-03-03	5.0	1982-06—1982-09	1.7	5
		1990-10-25	5.2	1989-10—1990-09	-2.2	0
		1990-10-25	5.2			
		1995-05-02	5.8			
		1996-01-09	5.2	1994-01—1994-07	-2.5	9
		1997-06-04	5.0			
		2003-02-14	5.4	2001-09—2001-12	-1.7	14
库尔勒地区	$\beta_n \geq 1.4$ 或 $\beta_n \leq -1.4$	2006-11-23	5.1	2005-08—2006-09	3.6	2
		1978-04-22	5.4	/	/	/
		1983-12-15	5.0	1983-05—1983-11	-2.0	0
		1988-05-26	5.2	/	/	/
		1991-06-06	5.2	1990-07—1990-09	1.6	8
		1993-02-03	5.7			
		1995-03-19	5.0	/	/	/
		1999-09-23	5.1	1997-07—1999-03	-1.9	6
拜城—库车地区	$\beta_n \geq 1.6$ 或 $\beta_n \leq -1.6$	1973-05-17	5.1	1972-09—1973-04	2.5	0
		1976-01-10	5.8	1974-12—1975-12	2.5	0
		1977-07-23	5.4			
		1979-03-29	6.0	1977-07—1978-05	-1.8	10
		1987-01-06	5.9	/	/	/
		1987-08-05	5.0	/	/	/
		1995-09-26	5.1	/	/	/
		1998-07-28	5.4			
		1999-03-15	5.7	1995-11—1997-10	-2.7	10
		1999-06-17	5.0			
巴楚—阿图什地区	$\beta_n \geq 1.5$ 或 $\beta_n \leq -1.5$	1974-09-29	5.5	/	/	/
		1977-12-19	6.2	1975-05—1977-03	2.5	8
		1991-02-25	6.5	1989-03—1990-11	-2.5	15
		1993-12-01	6.2	1992-11—1993-11	-2.5	0
		1996-03-19	6.7	1994-07—1994-11	-2.0	3
		1997-01-21	6.0	1996-07—1996-12	-1.8	0
		2003-02-24	6.8	1998-07—2002-09	4.1	5
喀什—乌恰地区	$\beta_n \geq 1.5$ 或 $\beta_n \leq -1.5$	1974-08-11	7.3	1973-11—1974-07	2.3	1
		1978-10-08	6.0	1975-11—1978-07	-4.1	2
		1983-02-13	6.7	1980-03—1980-07	1.7	30
		1983-04-05	6.1			
		1985-08-23	7.1	1984-03—1984-07	-2.0	9
		1987-04-30	5.8			
		1988-03-27	5.5	1987-03—1988-01	-3.3	1
		1988-08-13	5.5			
		1990-04-17	6.4	1989-05—1990-03	3.0	0
		1990-05-17	5.7			
		1993-12-01	6.2	1992-09—1993-05	2.6	6
		1994-01-12	5.8			
		2002-12-25	5.7			
2003-09-02	5.6	2000-09—2002-01	1.6	11		

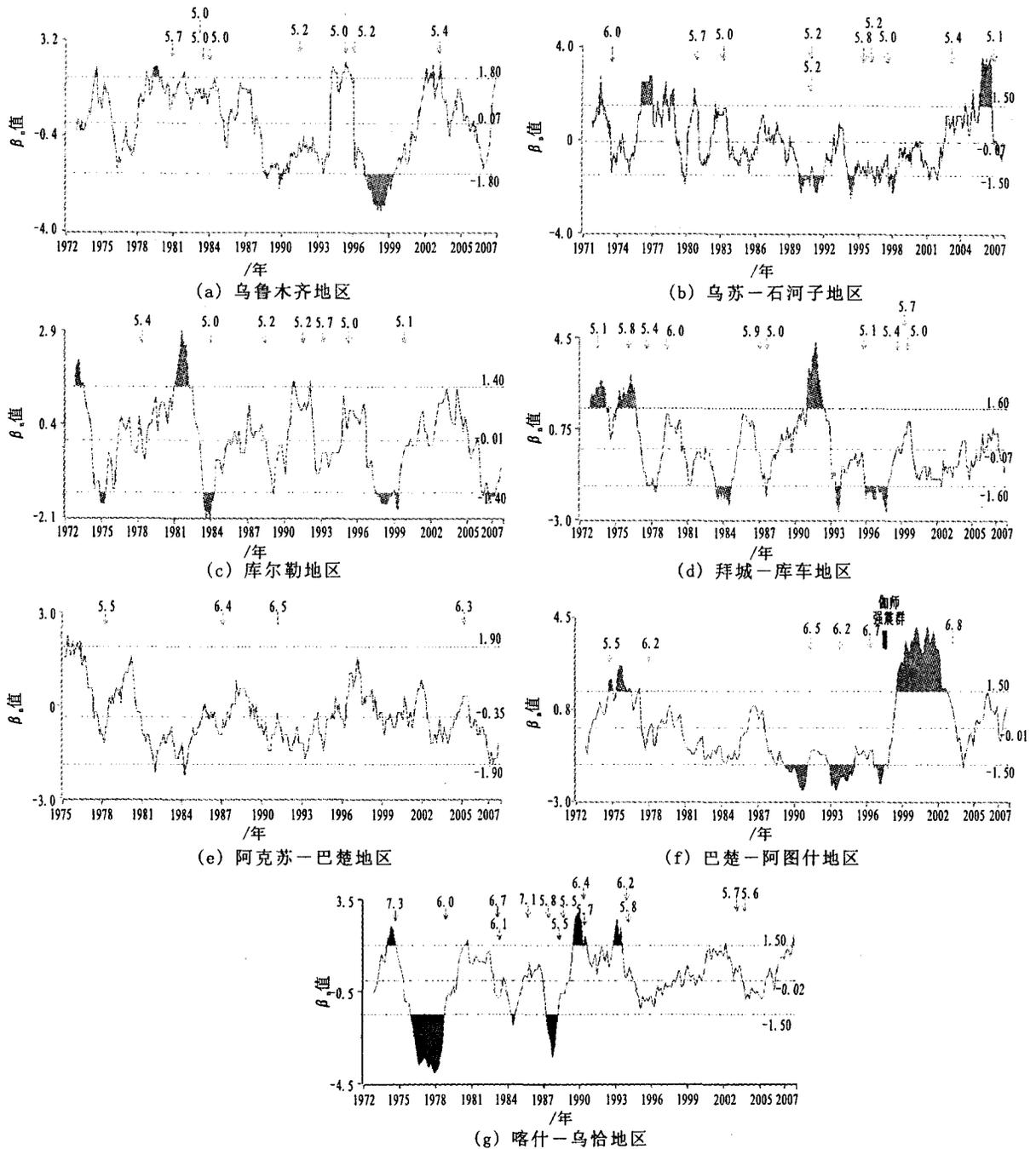


图 2 各研究区中强震前地震活动量 β_n 时序变化曲线

Fig. 2 Curves of the seismicity statistical value β_n before moderate-strong earthquakes in different regions.

中小地震活动速率普遍出现异常状态。不同地点中强地震前中小地震活动特征不同:乌恰北西-南东地区的中小地震活动表现为平静特征,其他地区中小地震活动主要表现为活跃特征。

当出现 $\beta_n \geq 1.5$ 或 $\beta_n \leq -1.5$ 异常结束或转折变化后,预测 1 年内该区的发震概率为 $P = 0.80$, $R = 0.64$ 。

上述各研究区 β_n 值的统计结果表明,不同区域中强震前地震活动统计量 β_n 异常特征具有区域性:

(1) 乌鲁木齐地区中强地震前 1 年左右 $M_s \geq 2.5$ 地震活动较为活跃,当 $\beta_n \geq 1.8$ 、持续时间在 7 ~ 17 个月范围内并且出现结束或转折时,可作为该区 1 年左右发生 5 级地震的异常指标;

(2) 乌苏-石河子地区中强地震前 1 年左右 $M_s \geq 2.5$ 地震活动速率出现异常状态,不同地点中小地震异常特征不同:精河-乌苏地区和石河子以东地区中小地震活动表现为活跃特征,乌苏-石河子地区则表现为平静特征,当 $\beta_n \geq 1.5$ 或 $\beta_n \leq$

-1.5、持续时间在4~14个月范围内并且出现结束或转折时,可作为该区1年左右发生5~6级地震的异常指标;

(3) 拜城—库车地区多数中强地震前 $M_s \geq 3.0$ 地震活动速率存在异常变化特征, $\beta_n \geq 1.6$ 或 $\beta_n \leq -1.6$ 、持续时间在8~24个月范围内并且出现结束或转折时,可作为该区1年内发生5~6级地震的异常指标;

(4) 巴楚—阿图什地区5.5级以上地震前 $M_s \geq 3.0$ 地震活动速率出现明显的异常状态,中小地震以平静特征为主, $\beta_n \leq -1.5$ 或 $\beta_n \geq 1.5$ 、持续时间在5~23个月范围内并且出现结束或转折时,可作为该区1年左右发生5.5~7.0级地震的异常指标;

(5) 喀什—乌恰地区中强地震前 $M_s \geq 2.5$ 地震活动速率处于明显的异常状态,中小地震以增强特征为主, $\beta_n \geq 1.5$ 或 $\beta_n \leq -1.5$ 、持续时间在5~17

个月范围内并且出现结束或转折时,可作为该区1年内发生5.5~7.0级地震的异常指标;

(6) 库尔勒地区和阿克苏—巴楚地区中强地震前1年左右中小地震活动速率异常特征不明显。

表2给出了不同研究区地震活动统计量 β_n 值的预测指标。不同区域中强震前 β_n 值的异常结束到发震时间特征不同,不同预测时段 R 值效能差异较大,总体来说 β_n 值的中期预测效能较好。乌鲁木齐地区、乌苏—石河子地区和喀什—乌恰交汇地区中强震基本发生在异常结束后,其中乌鲁木齐地区、乌苏—石河子地区多数中强震发生在异常结束后6~14个月,喀什—乌恰交汇地区多数中强震发生在异常结束后6个月内;拜城—库车地区和巴楚—阿图什地区部分中强震则发生在 β_n 值处于异常状态过程中,多数中强震发生在 β_n 值异常结束后的5~15个月内。

表2 各研究区基于 β_n 值的统计指标

研究区域	β_n 值异常指标	T /月	T_d /月	预测震级/ M	$Rt3$	$Rt6$	$Rt15$
乌鲁木齐	≤ -1.8 或 ≥ 1.8	7~17	0~14	5.0~6.0	0.29	0.43	0.57
乌苏—石河子	≤ -1.5 或 ≥ 1.5	4~14	0~14	5.0~6.0	0.25	0.38	0.75
库尔勒地区	≤ -1.4 或 ≥ 1.4	3~21	6~8	5.0~6.0	-0.3	-0.1	0.10
拜城—库车	≤ -1.6 或 ≥ 1.6	8~24	0~10	5.0~6.0	0	0	0.33
阿克苏—巴楚	≤ -1.9 或 ≥ 1.9	/	/	/	/	/	/
巴楚—阿图什	≤ -1.5 或 ≥ 1.5	5~23	0~15	5.5~7.0	-0.1	0.3	0.71
喀什—乌恰	≤ -1.5 或 ≥ 1.5	5~17	0~30	5.5~7.0	0.4	0.5	0.64

注: T : β_n 异常持续时间; T_d : 异常结束距主震时间间隔; $Rt3$: 异常结束距主震时间间隔小于3个月的 R 值;

$Rt6$: 异常结束距主震时间间隔小于6个月的 R 值; $Rt15$: 异常结束距主震时间间隔为15个月内的 R 值。

4 结论

本研究分析了新疆天山地震带7个分区地震活动统计量 β_n 时序变化特征,总结了各区中强震前中小地震活动速率异常特征,并提取了相应区域中强震前 β_n 值的中期预测指标。

(1) 本文应用中小地震的 β_n 值定量描述了各研究区中强地震前中小地震活动速率的异常特征,并由此确定了各研究区的中强震前 β_n 值的中期预测指标:当北天山地区 β_n 值达异常指标时,1年左右可能发生5~6级地震;南天山东段地区 β_n 值达异常指标时,1年左右可能发生5~6级地震;巴楚—阿图什地区 β_n 值达异常指标时,1年左右可能发生5.5~7.0级地震;喀什—乌恰交汇区的 β_n 值达异常指标时,1年内可能发生5.5~7.0级地震。

(2) 各研究区中强震前1年左右中小地震活动特征不同,即乌鲁木齐地区中小地震活动具有增强特征;乌苏—石河子地区和喀什—乌恰交汇地区中

小地震活动速率异常特征明显,中小地震增强区和平静区具有一定的区域特征;巴楚—阿图什地区中小地震活动以平静特征为主;南天山东段地区中强震前中小地震活动速率异常特征不显著,震前中小地震既有增强和平静异常特征,也有震前未出现异常特征;阿克苏—巴楚地区中强震前中小地震活动速率未出现明显的异常特征。

(3) 不同区域中强震前 β_n 值的异常结束到发震时间特征不同,乌鲁木齐地区、乌苏—石河子地区和喀什—乌恰交汇地区中强震基本发生在异常结束后;拜城—库车地区和巴楚—阿图什地区部分中强震发生在 β_n 值处于异常状态过程中,多数中强震发生在 β_n 值异常结束后。

(4) 各研究区的主要发震模式为增强—恢复(或转折)—发震和平静—恢复(或转折)—发震。一些中强震前中小地震活动并未出现明显的增强活动,而是在地震活动速率较低状态下或背景速率活

动状态下发生中强震,这与宋俊高^[2-3]关于东部中强震的研究结果并不完全一致(主震前地震活动出现速率增强,然后转为低活动速率),可能表明了区域地震活动的差异性。

[参考文献]

- [1] Matthews M V, Reasenber P A. Statistical method for investigating quiescence and other temporal seismicity pattern[J]. Pure and Applied Geophysics, 1988, 126(2-4): 357-372.
- [2] 宋俊高, 王炜, 潘坚云, 等. 地震异常平静用于短期预报的研究[J]. 地震, 1994, 14(1): 48-56.
- [3] 宋俊高, 王炜, 陆锦花. 前兆性地震平静在中期预报中的定量研究[J]. 西北地震学报, 1997, 19(3): 37-43.
- [4] 陆远忠, 陈章立, 王碧泉, 等. 地震预报的地震学方法[M]. 北京: 地震出版社, 1985: 86-94.
- [5] 沈繁鑫, 符干, 袁锡文, 等. 华南中强震前区域地震活动增强平静特征[J]. 华南地震, 2003, 23(3): 11-15.
- [6] 王化宇, 殷志刚. 晋北区中小地震活动与晋冀蒙交界区6级地震的关系[J]. 西北地震学报, 2005, 27(1): 80-84.
- [7] 罗灼礼, 李志雄, 王伟君. 地震活动"密集—平静"现象的混沌特性探讨[J]. 地震, 2007, 27(4): 1-17.
- [8] 王林瑛, 陈学忠, 朱传镇, 等. 地震活动性总体参量 R_t 及其在地震预测中的应用研究[J]. 地震, 2006, 26(2): 54-60.