

中国大陆活动地块边界带 强震趋势研究*

张浪平¹, 李志雄¹, 邵志刚¹, 尹祥础^{1,2}

(1. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036; 2. 中国科学院力学
研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100190)

摘要: 已有研究表明, 中国大陆活动地块边界带是我国大陆强震的主体带和集中区, 因此有必要对各边界带开展强震危险性的跟踪分析。本文分别从加卸载响应比时序演化特征、基于对数正态分布的概率方法和 b 值变化特征 3 个方面对各边界带未来强震趋势进行了分析; 并分别根据加卸载响应比时序演化特征、综合累积概率与条件概率、 b 值下降判断了各边界带未来发生强震的危险程度。最后, 根据 3 种方法的分析结果, 探讨了中国大陆未来 5 年发生强震的可能区域。

关键词: 活动地块边界带; 加卸载响应比; 对数正态分布; b 值; 强震趋势; 中国大陆

中图分类号: P315.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-3274(2010)03-0053-11

引言

活动地块是被形成于晚新生代、晚第四纪(10 万~12 万年)至现今强烈活动的构造带所分割和围限, 具有相对统一运动方式的地质单元^[1, 2]。活动地块相对完整并有相对统一的运动方式, 而各活动地块之间的边界带(亦称活动边界)是活动地块之间差异运动和相互作用的局部化带和集中带。已有研究指出^[3], 中国大陆强震绝大部分分布在活动地块边界带上, 其中 8 级以上的巨大地震全部发生在活动地块边界带上, 86% 的 7.0~7.9 级大震发生在活动地块边界带上; 同时活动地块边界带的总面积只占中国大陆面积的 16%。由此看出, 活动边界带是我国大陆强震的主体带和集中区, 研究中国大陆活动地块边界带的强震趋势显得尤为重要。

张国民等^[3]揭示了边界带的构造形变对我国强震的控制作用, 并在分析各边界带地震应变释放基础上得到了一些中国大陆地震活动规律。在此基础上, 马宏生等^[4]由边界带地震活动参数推算出强震活动强度和复发周期, 探讨了各边界带的地震活动水平及其危险程

* 收稿日期: 2009-11-30; 修改回日期: 2010-02-23

基金项目: 中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(02092425)

作者简介: 张浪平(1982), 男, 湖南涟源人, 助理研究员, 2009 年获博士学位, 主要从事地震力学和地震预测等研究。

度, 并讨论了各边界带的强震危险程度及其分期分区活动特征, 从而揭示了中国大陆活动边界带上强震活动的差异及其动力源。邵志刚等^[5]通过计算中国大陆 26 条活动地块边界带地震过程的变异系数分析了各边界带的地震活动类型, 并基于对数正态分布函数计算了各边界带当时地震发生的累计概率以及未来 5 年内地震发生的条件概率, 探讨了各活动地块边界带的危险程度。

本文首先对各边界带进行加卸载响应比时序演化分析, 然后根据各边界带加卸载响应比的时序演化特征判断各边界带未来 3 年的强震趋势。其次采用对数正态分布分析各边界带目前的累积概率和未来 5 年的条件概率, 并综合累积概率和条件概率判断各边界带的危险程度。最后计算各边界带的 b 值, 分析各边界带 b 值变化来判断各边界带的强震趋势。最后根据 3 种方法的分析结果, 探讨了各边界带未来 5 年的强震趋势。

1 中国大陆活动地块边界带

张培震等^[2]对中国大陆及其邻区给出了活动地块的两级划分, 其中包括 6 个 I 级活动地块区和 22 个 II 级活动地块。张国民等^[3]根据活动地块的划分结果, 勾画出了不同级别活动地块的 26 条边界带(图 1), 其中第 25 号、26 号边界带是华北平原 II 级块体所含的 II 级块体边界。文献[3~ 5]均给出了这 26 条活动地块边界带的基本信息, 包括活动边界带的编号、活动边界带名称、边界带两侧的活动块体、活动边界带范围(参考经、纬度)、边界带长度等。图 1 还给出了中国大陆及周边地区 1900 年以来 $M_s \geq 6.0$ 地震震中分布。文中采用的地震资料: 1911 年前的资料取自《中国历史地震目录》^[6], 1912—1990 年的资料取自《中国近代地震目录》^[7], 1991 年之后的资料取自中国地震局监测预报司《地震目录汇编》以及中国数字地震台网中心地震目录。

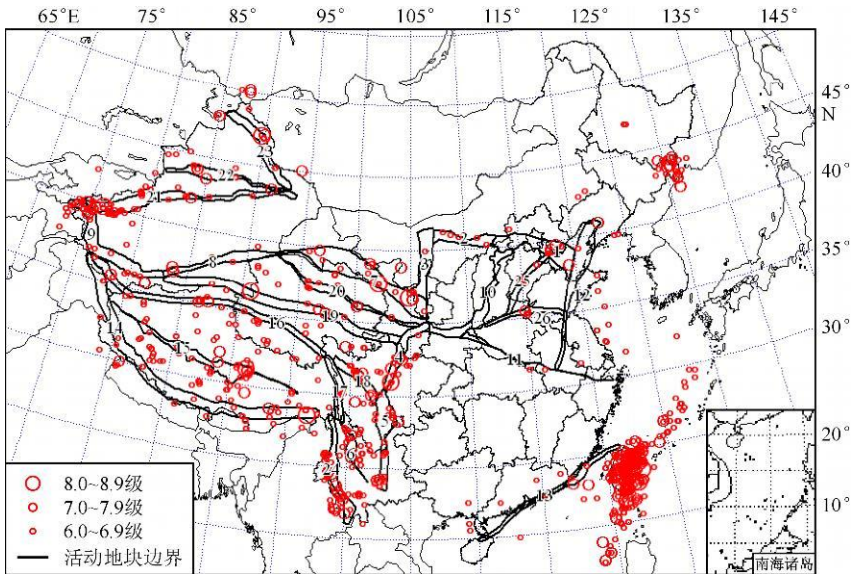


图 1 中国大陆活动地块边界带与中国大陆及周边地区 1900 年以来 $M_s \geq 6.0$ 地震震中分布
(1~ 26 为活动地块边界带编号, 对应名称见表 1)

2 活动地块边界带的加卸载响应比分析

尹祥础等^[8, 9]在震害力学、损伤力学和非线性科学等学科的基础上提出了加卸载响应比理论(Load/Unload Response Ratio, 简称 LURR), 其主要思路是把加载响应与卸载响应的比值定义为加卸载响应比, 用来定量刻画介质的损伤程度, 也即地震孕育过程中地震迫近发生的指标。经过多年的地震预测实践, 加卸载响应比方法得到了比较广泛的应用, 并不断取得新的进展^[10~15]。除了在地震预测领域以外, 加卸载响应比方法在边坡稳定性^[16, 17]和滑坡^[18, 19]等研究领域都有了比较广泛的应用。

在实际地震预测中取地震能量作为响应, 加卸载响应比 Y 可定义为^[8, 9]

$$Y = \frac{\left(\sum_{i=1}^{N^+} E_i^m \right)_+}{\left(\sum_{i=1}^{N^-} E_i^m \right)_-} \quad (1)$$

式中, E 为地震的能量, “+”代表加载, “-”代表卸载; m 可以取为 0、1/3、1/2、2/3 或 1。当 $m = 1$ 时, E^m 表示能量; 当 m 为 1/3 和 2/3 时, E^m 表示孕震区域的线尺度和面尺度; 当 $m = 1/2$ 时, E^m 表示 Benioff 应变; 当 $m = 0$ 时, Y 值相当于 N^+ / N^- , 而 N^+ 和 N^- 分别代表加载和卸载过程中出现的地震数量。在本文中, m 取为 1/2, 即用 Benioff 应变作为响应量。

在地震等灾变事件发生之前, 加卸载响应比时间序列通常会出现峰值回落的异常变化, 这一现象可用来做为地震等灾变发生的重要前兆。尹祥础等^[10~12]进行了中强地震前加卸载响应比演化规律的大量震例检验, 震例研究表明, 在地震平静期, 加卸载响应比值在 1.0 附近波动, 而在大地震前夕, 加卸载响应比明显升高至大于 1.0 的峰值, 峰值之后出现急剧回落, 大地震随之发生。加卸载响应比时间序列出现峰值到地震发生的时间称为加卸载响应比峰值特征时间, 记为 T_2 。张晖辉等^[20]收集了 1970 年以来中国大陆地区部分 5.0 级以上地震资料, 通过震例研究, 得出了峰值特征时间(T_2)与发震震级(M)具有如下关系:

$$T_2 = 60(1 - 2.3 \times 10^{-0.08M}) \quad (2)$$

同时, 陈棋福等^[21]在研究加卸载响应比自然概率分布的过程中发现, 加卸载响应比值出现 $Y \geq 2.0$ 的自然概率在 20% 以下, $Y \geq 4.0$ 的自然概率不超过 5%, 其异常高值可能携带着孕震系统趋于失稳的前兆信息。因此, 如要根据各活动地块边界带的加卸载响应比时序演化特征判断未来地震趋势, 必须考察最近峰值的出现时间、峰值的大小以及峰值过后的发震情况。故可给定如下标准, 最近峰值出现的时间晚于 2006 年, 峰值超过 2.0 且呈下降趋势, 峰值后未发生 6.0 级以上强震的边界带视为危险边界带; 峰值小于 2.0 且未发生 6.0 级以上强震的边界带视为关注边界带; 其他情况视为安全边界带。

采用 3 年为计算时间窗, 半年为滑移步长, 震级范围取 0~5.0 级, 对各边界带进行加卸载响应比时序分析。由澜沧江带的加卸载响应比时序演化曲线可见(图 2a), 1983 年出现峰值, 之后于 1988 年 11 月 6 日在云南澜沧发生了 7.4 级地震, 耿马发生了 7.2 级地震; 1998—1999 年出现的峰值没有发生 7 级以上强震与之对应, 但于 2001 年 3~6 月在云南施甸、澜沧连续发生多个 5.0 级地震, 以 4 月 12 日发生在云南施甸的 5.9 级地震为最高。到

2008 年又出现了一个峰值, 这个峰值都大于 2.0, 这表明该边界带未来发生 6 级以上强震的可能性很高, 因此判断具有这类加卸载响应比时序演化特征的边界带为危险边界带。由阴山带的加卸载响应比时序演化曲线可见(图 2b), 1975 年年底出现第一个峰值, 之后分别于 1976 年 4 月 6 日发生了内蒙古和林格尔东南的 6.0 级地震和 1979 年 8 月 25 日内蒙古五原附近的 6.0 级地震; 在 1984 年和 1988 年又出现两次峰值, 紧接着在 1989 年 10 月 18~19 日山西阳高发生了 3 次 5.0 级地震, 震级分别为 5.7 级、5.9 级、5.5 级。在 1996—1997 年出现的峰值有 1996 年 5 月 3 日内蒙古包头—固阳 6.4 级地震和 1998 年 1 月 10 日河北尚义 6.2 级地震与之对应。图 2(b) 中的最后一个峰值出现于 2006 年, 而该边界带区域到目前为止还没有发生 6 级以上强震, 其峰值只有 1.5 左右, 所以该边界带未来发生 6 级以上强震的可能性较大, 是值得关注的边界带。因此, 具有此类加卸载响应比时序特征的边界带可视为关注边界带。第三类边界带比如汾渭带, 其加卸载响应比时序演化曲线见图 2(c), 第一个峰值出现在 1977—1978 年, 之后于 1979 年 6 月 19 日发生了山西介休的 5.2 级地震; 第二个峰值出现在 1986 年前后, 该边界带区域分别在之后的 1989 年 10 月 19 日发生了大同一阳高 5.9 级地震和 1991 年 3 月 26 日大同 5.8 级地震。从此该边界带的加卸载响应比值都保持在一个比较低的状态, 虽然呈现上升的趋势但没有超过 1.0, 因此定义有着此类加卸载响应比时序演化特征的边界带为相对安全边界带。

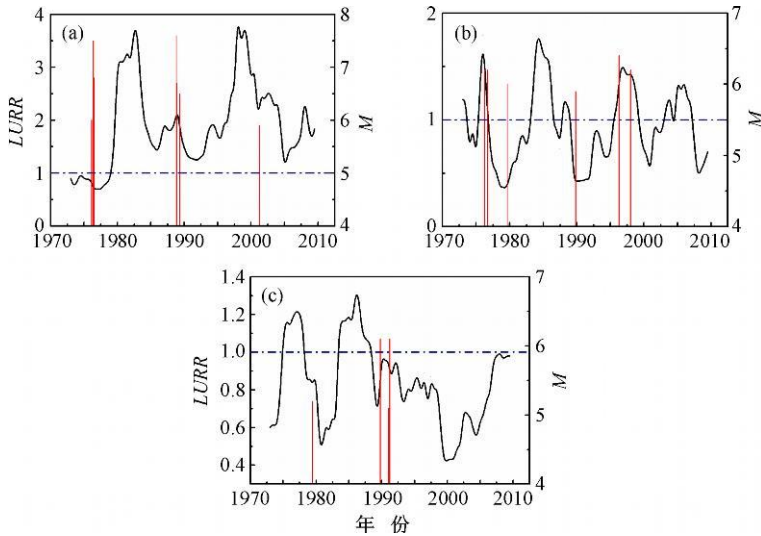


图 2 根据加卸载响应比时序演化特征判断未来危险程度的三类典型边界带
(a) 澜沧江带; (b) 阴山带; (c) 汾渭带

根据各边界带的加卸载响应比时序特征, 以及判断强震趋势的 3 个参考指标, 即最近峰值的出现时间、峰值的大小以及峰值过后的发震情况, 依次对 26 个边界带进行分析, 各边界带最近峰值出现的时间、峰值的大小、目前呈现的趋势以及峰值后的发震情况见表 2; 根据前文给定的标准, 对各边界带的未来 3 年的强震趋势做出判断, 判断结果见表 2, 图 3 给出了相应判断结果的空间分布情况。

根据式(2)以及文献[20]可知, 对于一个 8.0 级地震, 峰值特征时间 T_2 最大可到 3 年, 所以根据加卸载响应比时序演化特征判断未来强震趋势的有效时间尺度应为 3 年。以

表 1 中国活动地块边界带的加卸载响应比时序演化特征信息及未来趋势判断

编号	名称	面积 ^[3] /km ²	震级范围 0~ 5.0 级				趋势 判断
			最近峰值时间/a	峰值大小	呈现趋势	峰值后强震数	
1	燕山—渤海带	76910	1973.0	1.0~ 2.0	上升	3	安全
2	阴山带	36160	2006.0	1.0~ 2.0	上升	0	关注
3	贺兰山带	48450	2007.5	1.0~ 2.0	上升	0	关注
4	岷江—龙门山带	36850	2006.0	1.0~ 2.0	上升	2	安全
5	安宁河—小江带	62270	2006.0	1.0~ 2.0	上升	0	关注
6	红河带	14440	2007.5	2.0~ 3.0	下降	1	安全
7	海原—祁连带	139300	2003.5	1.0~ 2.0	上升	1	安全
8	阿尔金带	47380	1993.0	1.0~ 2.0	上升	0	关注
9	西昆仑带	81650	2004.5	1.0~ 2.0	上升	2	安全
10	汾渭带	53830	1986.0	1.0~ 2.0	上升	2	安全
11	秦岭—大别山带	7806	2003.0	1.0~ 2.0	上升	0	安全
12	郯庐带	75820	1998.0	1.0~ 2.0	上升	0	关注
13	东南沿海带	49270	1998.0	1.0~ 2.0	下降	0	关注
14	喜马拉雅带	198600	2004.5	> 2.0	下降	5	安全
15	喀喇昆仑—嘉黎带	64300	2008.5	> 2.0	下降	2	安全
16	玛尼玉树带	90280	2005.5	1.0~ 2.0	下降	3	安全
17	三江带	31700	2006.0	> 2.0	下降	0	危险
18	鲜水河带	39050	2008.0	1.0~ 2.0	下降	0	危险
19	东昆仑带	125900	2007.0	1.0~ 2.0	上升	0	关注
20	西秦岭—德令哈带	21780	2007.0	1.0~ 2.0	上升	1	安全
21	南天山带	86900	2003.5	1.0~ 2.0	上升	2	安全
22	北天山带	38830	2001.0	1.0~ 2.0	下降	0	关注
23	富蕴带	46480	2006.5	1.0~ 2.0	下降	0	关注
24	澜沧江带	46050	2008.0	> 2.0	上升	0	危险
25	河北平原带	22850	2005.5	1.0~ 2.0	下降	0	关注
26	安阳—菏泽—临沂带	21850	2008.5	> 2.0	下降	0	危险

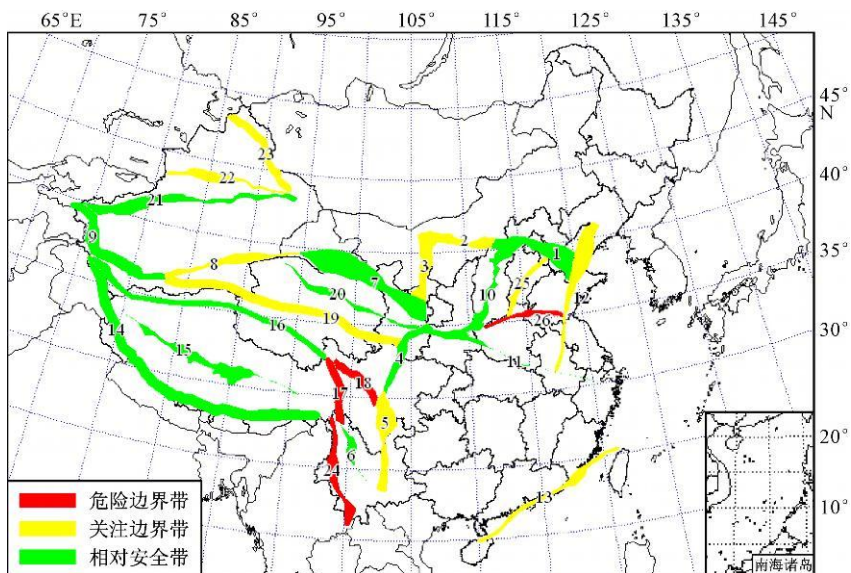


图 3 根据加卸载响应比时序演化特征判断的各边界带危险程度的空间分布

上分析结果是未来 3 年的强震活动趋势。

3 概率预测方法分析

对数正态分布过程已被广泛地应用到国内外地震复发规律研究当中^[22-24]。Nishenko 等^[22]在广泛收集全球 53 个地区实际地震资料的基础上,认为对数正态分布能更好地拟合世界范围内的地震累计概率分布。Rikitake^[23]对日本地区开展了类似的研究,其研究同样说明与其他分布相比,对数正态分布能更准确地描述地震累积概率分布。另外,由分布函数可知,对数正态分布不仅与平均复发周期与上次地震逝去时间有关,还取决于实际地震间隔与平均间隔的偏差程度,所以本文将采用对数正态分布来分析中国大陆各个边界带的地震活动性。

对数正态分布的概率密度函数为

$$p(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y t} \exp\left[-\frac{(\ln t - \bar{y})^2}{2\sigma_y^2}\right] \quad (3)$$

式中, t 为地震复发周期; \bar{y} 、 σ_y 分别为等效正态分布的均值和标准偏差。所对应数正态累计分布函数为

$$P(t) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left[\frac{\ln t - \bar{y}}{\sqrt{2}\sigma_y} \right] \right] \quad (4)$$

式中, $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy$ 为误差函数。

边界带上现今距离上次地震发生时间为 t , 地震还没有再次发生, 以此为条件, 在未来 Δt 时间段 $[t, t + \Delta t]$ 内, 地震再次发生的可能性可由条件概率来表示。条件概率分布函数为^[24]

$$P(\Delta t, t) = \frac{\int_t^{t+\Delta t} p(t) dt}{\int_t^{\infty} p(t) dt} = \frac{P(t+\Delta t) - P(t)}{1.0 - P(t)} \quad (4)$$

本文针对各边界带分别计算了当前地震发生的累积概率以及未来 5 年内地震发生的条件概率, 大致按照震级西 7 东 6 的原则来统计地震复发的平均周期以及标准偏差, 并依次计算至少发生 1 次地震的累积概率和条件概率, 结果见表 2。

根据文献^[24]给出的标准: 累积概率大于 0.6, 条件概率大于 0.5; 或者累积概率大于 0.9, 条件概率大于 0.15 的边界带判为危险边界带, 即未来发生强震概率较高的边界带。累积概率大于 0.5, 条件概率大于 0.15 视为需要关注的边界带, 即为关注边界带, 也就是需要关注该边界带未来发生强震的可能性。其他边界带视为相对安全的边界带。基于此标准, 综合考察各边界带的累积概率与条件概率判断结果见表 2。

4 b 值分析

1941 年, 古登堡(Gutenberg)与里克特(Richter)提出了地震震级与频度间统计关系公式为^[25]

$$\lg(N) = a - bM \quad (6)$$

式中, M 为地震震级, N 为地震累积频度。

表2 中国活动地块边界带的累积概率和未来5年的累积概率及未来强震趋势判断

编号	平均周期/a	\bar{y}	q_y	$\Delta t/a$	累积概率	条件概率	趋势判断
1	32.66	2.78	1.34	17.76	0.53	0.155	关注
2	16.83	2.35	1.15	12.66	0.566	0.252	关注
3	88.71	4.19	1.15	269.99	0.891	0.027	安全
4	32.22	3.38	0.51	0.63	0	0.001	安全
5	26.35	2.82	1.08	34.64	0.749	0.152	关注
6	70.89	-	-	12.91	0.166	0.068	安全
7	11.05	2.21	0.73	54.88	0.993	0.288	危险
8	34.62	3.16	1.32	15.24	0.371	0.132	安全
9	18.79	2.75	0.69	0.78	0	0.075	安全
10	35.71	2.97	1.23	110.27	0.922	0.066	安全
11	92.39	4.27	0.89	29.48	0.161	0.055	安全
12	47.74	3.31	1.3	30.62	0.535	0.099	安全
13	32.05	1.84	1.59	87.78	0.951	0.07	安全
14	17.02	2.53	0.99	12.11	0.486	0.268	关注
15	8.84	1.27	2.21	56.37	0.895	0.065	安全
16	12.16	2.46	0.38	11.14	0.444	0.643	危险
17	25.89	-	-	112.84	0.987	0.176	危险
18	12.49	2.25	0.83	27.93	0.904	0.308	危险
19	19.81	2.48	1.43	7.13	0.358	0.227	关注
20	56.97	3.63	0.96	5.7	0.024	0.072	安全
21	12.56	2.2	0.95	5.85	0.324	0.375	关注
22	18.61	2.71	0.96	64.81	0.936	0.143	危险
23	58.84	-	-	18.55	0.27	0.081	安全
24	15.83	2.65	0.56	20.15	0.733	0.419	危险
25	133.41	3.46	2.31	27.14	0.472	0.055	安全
26	120.26	4.39	0.98	25.15	0.116	0.045	安全

注: 第6号、17号、23号边界带由于符合要求的样本较少, 故采用泊松分布计算。

Scholz 研究^[26]表明, b 值大小能反映应力水平, 而且 b 值与应力成反比关系, b 值越小应力水平越高, b 值越大则应力水平越低。因此, b 值下降就意味着应力水平升高。本文将对各边界带进行 b 值分析, 在 b 值分析之前首先对各边界带选取的地震目录进行完整性分析^[27], 再用 G-K 方法^[28] 进行余震删除, 然后对各边界带进行 b 值分析。本文计算的目录取自中国地震台网中心。因此, 针对每条边界带, 先用 1970 年 1 月 1 日至 2009 年 7 月 31 日的地震目录计算出一个背景 b 值, 再用 2004 年 1 月 1 日至 2009 年 7 月 31 日的地震目录计算出一个当前 b 值, 当前 b 值与背景 b 值相比, 若呈上升趋势则意味着边界带的应力水平降低, 若下降则意味着边界带的应力水平升高, 未来发生强震的可能性会增加。之所以选择用 2004 年 1 月至 2009 年 7 月 31 日的地震目录来计算当前 b 值是为了保证在计算当前 b 值的时候至少有 50 个地震^[29]。图 4 给出了各边界带当前 b 值相比于背景 b 值的变化。

5 结果与讨论

本文分别从加卸载响应比的时序演化特征、基于对数正态分布的概率、 b 值三个方面对中国活动地块边界带进行了分析, 并基于其相应的危险性判断标准, 对各边界带未来发生强震的危险程度进行了分析判断。3 种方法的判断结果分别见表 1、表 2 和图 4。表 1 和

表 2 最后 1 列分别是根据加卸载响应比时序演化特征和综合概率分析判断的结果, 图 4 给出的是各边界带 b 值变化的情况。

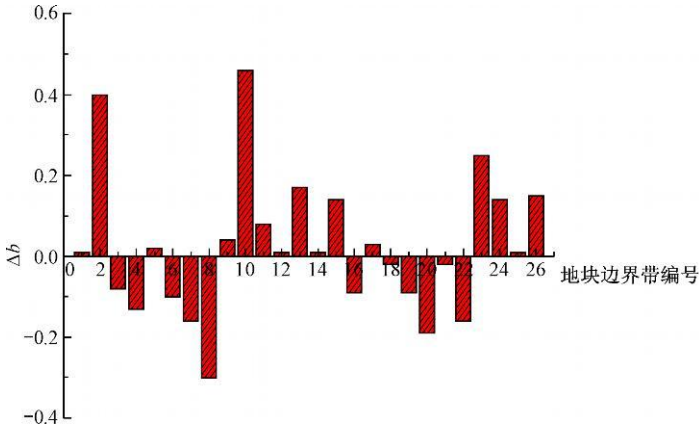


图 4 中国活动地块边界带 b 值变化情况

从分析结果中可以看出:

(1) 根据加卸载响应比判断安宁河—小江带、三江带、鲜水河带、澜沧江带未来发生强震的可能性都比较大, 综合概率判断安宁河—小江带、三江带、鲜水河带、澜沧江带未来发生强震的可能比较大; 同时, 红河带、鲜水河带的 b 值呈下降趋势, 因此这些边界带所在的地区, 也就是南北带的中南段未来发生 7 级以上强震的可能性比较大。

(2) 加卸载响应比演化特征判断北天山发生强震的概率值得关注, 综合概率分析南北天山带的强震可能性都比较大, 同时南北天山带 b 值都呈下降趋势, 因此需要密切关注这个地区发生强震的可能。

(3) 阴山带加卸载响应比时序演化特征和综合概率分析都显示该边界带值得关注, 因此需关注该地区发生 6 级以上强震的可能性。

(4) 南北带的北段, 即贺兰山带、海原—祁连带、西秦岭—德令哈带、东昆仑带东段, 加卸载响应比时序特征判断与概率综合判断贺兰山带、海原—祁连带的结果不尽相同, 因此还不能明确给出该地区的强震趋势。

(5) 从加卸载响应比时序特征判断结果来看(图 3), 还需要密切关注冀、鲁、豫交界与东南沿海地区。从加卸载响应比时序演化特征判断和综合概率判断这两个地区的结果不同, 其原因是加卸载响应比时序特征对应的是 5.0 级强震, 而概率分析的目标是西 7 东 6 (我国西部目标是 7 级, 东部是 6 级, 东西部以 107°E 为界), 所以这两个地区未来发生 6 级以上强震的可能性不大, 但需要关注发生 5~6 级地震的可能性。另外根据加卸载响应比时序特征与概率综合对各边界带的强震趋势判断并不完全相同, 这与两者的预测时间尺度和目标震级不同有关, 加卸载响应比时序特征判断的是未来 3 年发生 6 级地震的可能性, 而概率综合是判断未来 5 年西部发生 7 级、东部发生 6 级地震的可能性。

本文分别从加卸载响应比的时序演化特征、基于对数正态分布的概率分析、 b 值分析三个方面对中国活动地块边界带进行了分析, 并根据 3 种方法的判断结果对未来发生强震的可能区域进行了探讨。目前, 靠单一地震预测方法预测地震的发生具有很大的不确定性, 因此发展综合预测方法是一条必然的途径, 其中 Aki^[30] 依据 Bayes 原理发展了基于多

前兆的概率增益综合模型。本文正是基于综合预测的思想开展了上述研究, 但仍未完成基于多前兆的概率增益综合, 这将在今后的工作中逐步展开。

本研究得到了马宏生博士的帮助, 在目录完整性分析和余震删除方面得到了蒋长胜博士的程序支持, 在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 张国民, 张培震. “大陆强震机理与预测”中期学术进展[J]. 中国基础科学, 2000, (10): 4-10.
- [2] 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学, 2003, 33(增刊): 12-20.
- [3] 张国民, 马宏生, 王辉, 等. 中国大陆活动地块边界带与强震活动[J]. 地球物理学报, 2005, 48(3): 602-610.
- [4] 马宏生, 张国民, 刘杰, 等. 中国大陆活动地块边界带强震活动特征研究[J]. 地震地质, 2006, 28(1): 48-60.
- [5] 邵志刚, 张国民, 李志雄, 等. 中国大陆活动地块边界带地震活动过程及其趋势研究[J]. 地震, 2008, 28(3): 33-42.
- [6] 国家地震局震害防御司. 中国历史强震目录[M]. 北京: 地震出版社, 1995.
- [7] 中国地震局震害防御司. 中国近代地震目录[M]. 北京: 地震出版社, 1999.
- [8] 尹祥础. 地震预测新途径的探索[J]. 中国地震, 1987, 3: 1-7.
- [9] 尹祥础, 尹灿. 非线性系统的失稳前兆与地震预测[J]. 中国科学, 1991, (5): 512-518.
- [10] Yin X C, Chen X Z, Song Z P. The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory and its application to earthquake prediction[J]. Journal of Earthquake Prediction Research, 1994, 3(3): 325-333.
- [11] Yin X C, Chen X Z, Song Z P, et al. A new approach to earthquake prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory [J]. Pure and Applied Geophysics, 1995, 145(3): 701-715.
- [12] Yin X C, Wang Y C, Peng K Y, et al. Development of a new approach to earthquake prediction: Load/Unload Response Ratio (LURR) theory [J]. Pure and Applied Geophysics, 2000, 157(11-12): 2365-2383.
- [13] Yin X C, Mora P, Peng K, et al. Load Unload Response Ratio and Accelerating Moment/Energy Release Critical Region Scaling and Earthquake Prediction[J]. Pure and Applied Geophysics, 2002, 159(10): 2511-2523.
- [14] Yin X C, Zhang L P, Zhang H H, et al. LURR's Twenty Years and its Perspective[J]. Pure and Applied Geophysics, 2006, 163(11): 2317-2341.
- [15] Yin X C, Zhang L P, Zhang Y X, et al. The Newest Developments of Load Unload Response Ratio (LURR) [J]. Pure and Applied Geophysics, 2008, 165: 717-722.
- [16] 姜彤, 马莎, 许兵, 等. 边坡在地震作用下的加卸载响应规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3803-3807.
- [17] 姜彤, 马瑾, 许兵, 等. 基于加卸载响应比理论的边坡动力稳定分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 626-631.
- [18] Zhang W J, Chen Y M, Zhan L T. Loading/Unloading Response Ratio (LURR) theory applied in predicting deep seated landslides triggering[J]. Engineering Geology, 2006, 82: 234-240.
- [19] 贺可强, 周敦云, 王思敬. 降雨型堆积层滑坡的加卸载响应比特征及其预测作用与意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2665-2670.

- [20] 张晖辉, 尹祥础, 梁乃刚. 中国大陆地区中强地震前加卸载响应比异常时间尺度的统计研究[J]. 中国地震, 2005, 21(4): 486-495.
- [21] 陈棋福, 尹祥础, 马丽. 加卸载响应比的自然概率分布[J]. 中国地震, 1996, 12(3): 269-274.
- [22] Nishenko K, Buland R. A generic recurrence interval distribution for earthquake forecasting[J]. Bull Seismol Sol Am, 1987, 77: 1382-1399.
- [23] Rikitake T. Assessment of earthquake hazard in the Tokyo area, Japan[J]. Tectonophysics, 1991, 199: 121-131.
- [24] 时振梁, 汪良谋, 傅征祥, 等. 中国大陆中长期强震危险性预测方法研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1997.
- [25] Gutenberg B, Richter C F. Seismicity of the earth and associated phenomena[M]. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1954.
- [26] Scholz C H. The frequency magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes[J]. Bull Seismol Sol Am, 1968, 58(1): 399-415.
- [27] Wiemer S, Wyss M. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: example from Alaska, the Western United States, and Japan[J]. Bull Seismol Sol Am, 2000, 90(4): 859-869.
- [28] Gardner J, Knopoff L. Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershock removed, Poissonian[J]? Bull Seismol Sol Am, 1974, 64: 1363-1367.
- [29] Wiemer S. A software package to analyze seismicity: ZMAP[J]. Seism Res Let, 2001, 72(3): 373-382.
- [30] Aki K. A probabilistic synthesis of precursory phenomena[A]. In: Simpson D W, Richards P G. (eds.), Earthquake prediction: an international review [C]. A G U, Washington D C, 1981. 566-574.

Study of Strong Earthquake Trends on the Active Tectonic Boundaries in Chinese Mainland

ZHANG Lang-ping¹, LI Zhi-xiong¹, SHAO Zhi-gang¹, YIN Xiang-chu^{1,2}

(1. Institute of Earthquake Science, CEA, Beijing 100036, China;

2. LNM, Institute of Mechanics of CAS, Beijing 100190, China)

Abstract: Previous studies have shown that the active tectonic boundaries in Chinese mainland are the main bands and concentration areas of strong earthquakes occurred in Chinese mainland. It is essential to carry out follow-up analysis of strong earthquake risk on the active tectonic boundaries. In this paper, we carry out the analysis on the trends of strong earthquakes along each active tectonic boundary from three aspects respectively, including the characteristics of the Load/Unload Response Ratio time series evolution, probability method based on the log-normal distribution function, and b value variations. Strong earthquake criticality on each active tectonic boundary is also estimated in terms of the characteristics of the Load/Unload Response Ratio time series evolution, investigating both cumulative probabilities and conditional probabilities and the decrease of the b value. Finally, according to the results of the three aspects referred earlier, possible areas where strong earthquakes might occur in next five years in Chinese Mainland are discussed.

Key words: Active tectonic boundary; Load/Unload Response Ratio (LURR); Log-normal distribution function; b value; Strong earthquake tendency; Chinese mainland