# 震源系统小震调制比(r<sub>m</sub>)和异常面积(Sr<sub>m</sub>)起 伏加剧的时空特征与强震的中、短期预报

秦保燕 张晓东<sup>①</sup> 王裕仓 郭星全

(国家地震局兰州地震研究所,兰州 730000)

**摘要** 本文对强震前震源系统的调制比 rm 和调制比异常面积 Srm 随时间 变化的起伏加剧现象进行回顾性研究,得到下列研究结果:

(1)强震前近源区以及中强震前近源区大多出现调制比 rm的起伏加剧,并大 多在起伏频次达三次时有大震或中强震发生。

(2)大多数中、强地震前 rm 异常面积 Srm 围绕震源区呈现由小至大、由大至小的过程,因此引入最小异常面积 Srmin和最大异常面积 Srmax之比 Y 作为中、短期预报指标,根据统计得到异常指标[Y]如下式

$$\gamma = \frac{\mathrm{Sr}_{\min}}{\mathrm{Sr}_{\max}}, [\gamma] = 0.32 \pm 0.09$$

某些震例在震前出现异常面积 Srm 起伏的加剧过程,初步认为是震源区周围 调整单元调整能力较差导致的结果。

(3)rm、Srm 起伏加剧开始时间与震级有关,震级愈大,起伏加剧出现愈早。根据半年步长逐月滑动得到的 rm-T 图,起伏加剧开始至发震的时间与震级 M 的统计,得到如下关系(T 以月计)

M = 4.29 + 0.11T

(4)强震前场区异常一般呈现随机异常型、波动型和衰减型三种。若场区某统 计区出现 rm 的三次起伏加剧时,说明该统计区未来有强震发生。

(5)由自治系统和非自治系统原理初步解释了震前震源区周围调整区调制比 rm 及调制比异常面积 Srm 起伏现象的周期特征。

## 关键词:调制比 rm 调制比异常面积 Srm 起伏加剧 强震中、短期预报 自 治系统和非自治系统

1 前言

起伏加剧是衡量震源系统失稳的一个重要指标。本文试图应用调制比 rm<sup>[1]</sup>,调制比异常 面积 Srm 随时间的变化对强震前震源系统的起伏加剧现象进行回顾性总结,以便研究起伏 加剧的时空特征,为大震的中、短期预报提供判据。为了总结起伏加剧时空特征与震级的关 系,文中列举了某些中强震资料。

① 青海省地震局

2 rm 起伏加剧的时空特征

在强震发生前大多数 rm 随时间的异常变化并不是持续的,而是波动的,如果波动的幅度愈来愈大,我们就把这种波动称为起伏加剧<sup>[1]</sup>。本文共研究了 10 次中、强震前 rm 随时间的起伏加剧现象。其主要持点是:

(1)强震的近源区以及中强地震的近源区在震前出现明显的起伏加剧,且一般在第三个 峰值处和峰值后发震(图 1)。

(2)强震前场区(某些统计小区)出现 rm 异常 3 次起伏加剧,往往该区未来有强震发生(图 2)。

(3)中强地震前起伏加剧开始时间 t<sub>0</sub> 到主震发生时间 t<sub>x</sub> 这一时段的长短与震级有关,T 愈长,震级愈大,如表1所示。





Fig. 1The fluctuation intensification of rm-tin the near source region before The 1976 Tangshan earthquake.



图 2 1975 年海城大震前唐山地区(场区)rm-t 图的起伏加剧(场区异常, 38'-40'N,117'-119'E,其它震例略)

Fig. 2 The fluctuation intensification of rm-t in the field region

(Tangshanregion)before the 1975 Haicheng earthquake.

2

No	地震日期	<b>艇</b> 中位置	M,	T=t <sub>x</sub> -t <sub>o</sub> 月	t₅=t <sub>x</sub> −t <sub>s</sub>			
1	1974-05-11	28:12',104:46' 大关	7.1	26	4			
2	1975-02-04	40*39' -122*48' 海城	7.3	24	0			
3	1976-07-28	39 · 24 · 118 · 00 · 唐山	7.8	30	0			
4	1976-08-16	321541,1041241松潘	7.2	27	0			
5	1990-04-26	36.1.,100.1共和	7.0	34	10			
6	1973-12-31	38 * 24',116 * 48' 里坦	5.6	31	6			
7	1976-04-06	40114,112122和林格尔	6.3	25	2			
8	1986-08-26	37 7,101 5 门源	6.4	25	9			
9	1987-01-08	34 3 . 103 4 迭部	5.8	12	6			
10	1990—10—20	37 * 03' ,103 * 25' 景泰	6.2	21	7			
*	t <sub>x</sub> 发震时间,to 起伏加剧开始时间, t <sub>a</sub> 起伏加剧结束时间							

表1 中、强地震前 rm 起伏加剧开始和结束至发震的时间统计表

(4)中、强地震前 r<sub>m</sub>起伏加剧异常结束时间 t,至主震发生时间 t<sub>x</sub>一般在 0-7 月之内,大 多数地震前有一明显下降。少数强震发生在第 3 次峰值处,这种情况我们认为是与震源区附 近调整单元让位程度不够有关(图 3)。震源周围调整能力愈强,起伏加剧异常结束愈早;调 整能力愈差,异常结束临近主震。因此 t₀与震级大小无关。

应当指出,图1中r<sub>m</sub>-t图的起伏加剧现象并不是所有统计小区都共有的现象。只有某些近源区和源区有此现象,且一般近源区异常更加明显。

此外,里坦地震、共和地震前 r<sub>m</sub>的 3 次起伏异常之间时间间隔很大,它偏离了大多数地震的统计点。关于这个问题在后面还要讨论。

3 Srm起伏加剧的时间特征

Sr<sub>m</sub>是指小震调制比异常面积,Sr<sub>m</sub>为1时是指某一统计时段统计小区出现1次异常, 每个统计小区以1<sup>·</sup>×1<sup>·</sup>计。由数格子法可统计Sr<sub>m</sub>随时间的变化。表2表示了唐山、龙陵、 大关、松潘以及西北地区中、强地震前的Sr<sub>m</sub>-t图中的有关数据。由于中、强地震发生时间不 同,故可用大区域进行统计,这里仅列举西南统计区Sr<sub>m</sub>-t图(图3)。由图可见,1973年炉霍 地震前Sr<sub>m</sub>有明显收缩,而1976年龙陵地震前Sr<sub>m</sub>随时间起伏加剧,大震发生在峰值处。这



4

图 3 西南地区 Srm-t 图(21°-30°N 96°-107E°)

Fig. 3 The diagram of Srm-t in Southwest China.

是在我国大陆普遍存在的两种异常类型(其 它表例图略去)。表中  $\gamma$  为 Sr<sub>min</sub>/Sr<sub>max</sub>,  $\Box$ T 为 最大异常面积出现时间  $t_{smax}$ 到发震时间  $t_x$ 的 时段。

由图 3 和表 2 可以得到下列特点:

(1)绝大多数中、强地震前 Srm呈现由小 到大,由大再到小的异常过程。异常最早出现 在震源区附近,随着震源区附近应力、应变的 增大,调整单元不能及时调整应变,此时更多 的外围构造、弱介质区参与调整从而使 Srm 异常面积增大,当大范围调整运动完成后,应 力再向震源区附近集中,异常面积收缩,大震

随之发生。由表 2 中 Sr<sub>m</sub>与 Sr<sub>max</sub>的比值 Y 统计可得到发生主震的统计指标为

 $[\gamma] = 0.32 \pm 0.09$ 

此值我们称其为主震发生的临界指标,这一指标是由表 2 中 8 个数据统计得到的,其中武威 地震和共和地震均因后面有中强震,Sr<sub>m</sub>未降到最低值。这一点说明当在γ值较高时发震,往 往后面还有中强震发生。

N	地震日期	震中位置	<b>艧</b> 级	Sr, max	Sr, min	ts,max	tx	u	⊿T 月	T'a月
1	1974-05-11	28 12' 104 6' 大关	7.1	39	18	197311	1974-05	0.46	6	26
2	1976-05-29	24:30′,98:43′龙陵	7.4	22	20	1976-03 1976-04		0.90	1	28
3	1976-07-28	39:38',118:11' 唐山	7.8	13	3	1974-06	1976-02	0.23	21	
4	1976-08-16	32 * 54′ ,104 * 24′ 松潘	7.2	31	4	1976-05	1976-08	0.13	3	27
5	1984-01-06	37:54′,102:12′ 武威	5.3	51	34	1983-07	1983-11	0.67	5	
6	1984-02-17	37 * 48′ ,100 * 42′ 刚察	5.1	51	21	1983-07	1984-01	0. 41	6	
7	1986-08-26	37.71,101.51门源	6.4	54	15	1986-01	1986-05	0. 28	7	
8	1987-01-08	34.3 ,103.4 迭部	5.8	54	15	1986-01	1986-09	0. 28	12	
9	1988-11-22	38.61,99.8 肃南	5.4	38	17	1988-05	1988-09	0.45	5	
10	1990-04-26	36.1 ,100.1 共和	7.0	42	29	1989-11	1990-03	0.69	5	
1	1990-10-20	37 * 03′ ,103 * 25′ 景泰	6.2	42	12	1989-11	1990-07	0.29	11	

表 2 Srm有关数据表

(2)Srmax高值至发震以 5-6 个月居多

应当指出,当震源端部的调整单元的调整能力在临震前比较低时,则会出现 Srm的再次 增大。此时由于震源区的应力水平已很高,故在 Srm扩张过程中大震可能发生,如唐山大震 前5个月又开始短临阶段的 Srm起伏加剧,并在起伏加剧至第三个峰值时发震。震前 Srm再 度增大表明震源区端部的调整单元仍不能提供及时让位,由此还可预测唐山大震属主震强 <u>第3期</u> 余震型。

(3)Sr<sub>m</sub>-t 图呈现起伏加剧表现最明显的震例是 1976 年 5 月 29 日龙陵大震。众所周 知,龙陵大震发生在北东向龙陵-瑞丽大断层,北北西向怒江大断层和东西向的畹町大断层 所围限的三角形块体内。在近南北向的区域应力场作用下,围限断层内的三角形块体发生挤 压变形并积累了很大的应变能,然而三条围限断层调整应变的能力相对较低,从而使调整范 围扩大,因此震前 Sr<sub>m</sub>出现了多次起伏,随着震源区应力水平的增高,Sr<sub>m</sub>的起伏幅度增大, 并在高值区发震,如图 3 所示。此外,如前所述唐山大震临近发震前 Sr<sub>m</sub>再度扩张与震源区 附近调整单元调整能力不够这一物理机理也是相符的。反之当震前调整单元调整能力较高 时(如调整运动结束时),震前 Sr<sub>m</sub>异常面积收缩到最小甚至异常恢复,而此时震源区的应力 水平与破坏应力还存在一小的差值,这时就出现了大震发生的等待时间。对于调整运动结束 较早,即 Sr<sub>m</sub>在震前收缩明显的地震来说,其震后强余震一般不发育。例如中国西北部的中、 强地震一般均无较强的余震发生,其 Sr<sub>m</sub>均收缩较早。只有 1990 年共和地震例外,这可能与 后面有景泰 6.2 级地震发生有关。

(4)当两次强震或中强震之间的时间间隔较短时,其Sr<sub>m</sub>异常为二次主震异常的迭合。 在这种情况下,第一次主震前Sr<sub>m</sub>往往恢复较小,直到第二次主震前才降至较低值。

4 场区异常

中、强地震前场区异常比较复杂,根据对震前离震源区一定距离的场区 r<sub>m</sub>-t 图分析,场区异常有以下三种类型(图 4):

(1)随机型 中、强地震前只是随机出现短时间的异常,大多时段 rm-t 图表现平稳。

(2)波动型 中、强震前异常呈现波动,但无起伏的加剧特征,但波动出现的时间有时与 近源区异常呈同步现象。

(3)衰减型 中、强震前异常呈现波动且有随时间明显衰减的特征。其异常起伏时间也 往往与近源区异常呈同步现象,这说明场区与近源区调整运动的协同特征。



Fig. 4 The types of anomalies in the field region before the Haicheng and Tangshan earthquakes.

(1)

应当指出,有些统计小区与大震区有相当距离,但仍表现有近源区的异常特征-起伏加 剧,而这样的地区往往后面有大震发生。如前面图2是唐山震源区的rm-t图,在海城大震前 明显的表现3次起伏加剧,海城大震就发生在第三次起伏的峰值段,海城大震后rm-t图平 稳,直至唐山大震前rm再次出现异常,唐山地震发生。其余的震例还有:松潘震源区在大关 地震前(1974年5月11日,M7.1)出现rm-t的3次起伏加剧异常,在第三次起伏下降至最 低值附近发生大关地震。此后又出现了3次起伏加剧,在第三个峰值处发生松潘7.2级地 震。上述唐山震源区离海城大震区约400km。松潘震源区离大关震区也约400km。这种距 离已超过了大震区调整单元的距离范围,因此应属于场区。对于场区rm-t图呈现起伏加剧 这是该区未来可能有大震的一种预报指标。这说明该区的应力水平相当高,它对较远距离大 震前震源附近的调整运动有明显响应。同时也说明唐山和海城以及松潘和大关大震震源区 之间存在着某种关联性。

5 异常时间与震级 M 相关性统计

在前面我们列举了中、强地震前 rm-t 和 Srm-t 的起伏加剧现象。本节对异常时间与震级 之间的相关性进行统计。中、强地震前的 rm异常有多种类型,如持续性异常、起伏加剧等异 常类型。根据对比,不同类型异常时间大体具有一致性。因此根据表 1 和表 2 中的异常时间 和相应的震级可以作相关性统计,图 5a 是异常时间 T 与 M 的相关图。





a. 异常时间 t 与 M 相关图 1. rm(3 次起伏异常); 2. Srm(3 次起伏异常); 3. 异常时段过长的点 b. 起伏加剧异常时间与 M 的相关曲线(M=4.73+0.10(t,-t\_0) r=0.95) 1. 迭部; 2. 景泰; 3. 门源; 4. 海城; 5. 松潘; 6. 大关; 7. 共和; 8. 唐山 Fig. 5a The correlation of M with abnormal time; Fig. 5b the correlation of M with the modified fluctuation anomaly time t.

初略地得到异常时间 T 与 M 的相关公式为

M:

$$=4.29+0.11T\pm0.33$$

相关系数 r=0.82。式中 T 以月计,此式与文献[2]由中强震得到的震级与异常时间(持续异常)公式相近。

从图 5a 可以看到共和地震的异常时间很长,它偏离图 5a 中的相关直线较远。为此,我 们将共和震源区和近源区(门源区)的 rm异常进行对比后认为,共和地震前 rm异常从 1988 第3期

年元月起算更为合理,这样共和地震的异常时间为 27 个月,如按此值点在图 5 上,则与相关 直线接近。对于里坦地震,第一次起伏和第二次起伏的幅度小,持续时间短,其异常时间均在 2 个月左右,而无异常的时段达 7-8 个月。但是第三次异常不仅幅值高,而且异常时间达到 10 个月。因此我们可以把第一次和第二次起伏作为华北地区大范围调整运动的反映,而将 第三次出现的大幅度 rm异常视为里坦地震的前兆。将这个数据点在图 5b 中,它与图 5b 中 的相关直线也较吻合。增加了上述两个数据后,异常时间与 M 的相关直线方程可改写为下 式:

$$M = 4.52 + 0.096T \pm 0.29, \gamma = 0.87$$
 (2)

6 强震发生前近源区调整运动周期特征和物理成因的初步讨论

关于前兆异常的起伏现象,以往在短期前兆中已有所发现。但这种现象并不是每个观测 点普遍存在的。根据本文列举的震例,在近源区最易出现这种起伏异常,但也不是围绕震源 区所有的调整单元都出现这种异常。例如有的近源区在震前出现持续性异常。很显然这种 异常与起伏式的异常具有不同的性质。由于起伏3次后往往发生主震,因此研究起伏异常的 周期特征和其成因将是十分重要的。在这里我们试图引入自治系统和非自治系统来解释主 震震源区附近调整单元调整运动的周期特征。

#### 6.1 强震前调整单元的调整运动的周期特征

表 3 列出了本文列举的中、强震前 rm-t 和 Srm-t 的起伏周期数据。为了使周期的统计更 为准确,周期的量取一律采用峰一峰测量,这样如 3 次起伏则可量得 2 个周期,如考虑由第 二个峰值到发震这一时段,则可量得 3 个周期。

发震时间	地点(经一纬度)	震级 Ms	Tı	T <sub>2</sub>	<b>T</b> <sub>3</sub>	周期化	备注	大震时间预测
1974-05-11	大关 28 12 ,104 06	7.1	10	9	0	$\frac{1}{3}$ , 0. 57	倍周期	1974-01,1974-04
			14	21	7	$\frac{2}{3}, \frac{1}{3}$	倍周期	1974—05
1975-02-4	海城 42 * 38' +122 * 48'	7.3	10	10	0		等周期	1975-02.1975-08
1976 — 05 — 29	龙陵 24 <sup>·</sup> 30′ •98 · 43′	7.4	8	13	2	0. 65	黄金分 割周期	1976-03
1976 - 07 - 28	唐山 39・24',118:00'	7.8	7	17	0	0.41	黄金分 割周期	1976-05
976-08-16	松潘 32 54′,104 24′	7.2	10	10	2	1	等周期	1976-06
1990-04-26	共和 36.11,100.01	7.0	12	10	10	1	等周期	1990-04,1990-06
973-12-31	里坦 38 <sup>-54′</sup> ,116-48′	5,6	10	13	6	0. 77	其它, 倍周期	1973-11
976-04-06	和林格尔 40 * 4',112 * 12'	6.3	8	11	2	0. 72	其它	1976-02,1976-07
986-08-26	门源 37.7 ,101.5	6.4	6	8	9	$\frac{3}{4}, 0.09$	等周期	1986-07
1987 - 01 - 08	迭部 34.3 ,103.4 .	5.8	12	6	6	$\frac{1}{2}, 1$	倍周期	1987-01,1987-07
1990-10-20	景泰 37 * 03′ ,103 * 25′	6.2	4	5	10	$1, \frac{1}{2}$	倍周期	1990-05,1990-10

中强地震前调整区的振动周期统计表

由表 3 可以看出 11 次中、强地震中有 3 次地震前有等周期特征,有 5 次为倍周期特征, 有 2 次其周期之比具有黄金分割特征,有 1 次周期之比接近 3/4,这种周期特征有可能是在 定常力作用下,震源附近调整区产生的自治系统运动和非自治系统的后果。

### 6.2 调整区的周期振动和自治系统及非自治系统

将物理学中自治系统和非自治系统引入地震预报研究首先是由郭增建等提出和研究 的<sup>[3]</sup>,最近他们又进一步研究了在板块定常力作用下震源组合模式的自治系统现象<sup>[4]</sup>。对于 组合模式来说,调整单元在进入非线性阶段后有可能演变为自治系统和非自治系统。所谓自 治系统是指在定常区域力源作用下产生某种等周期性运动,其周期主要与调整单元的结构 有关。当调整单元受到周期力源作用时,调整单元将出现非自治系统的振动持征,其周期与 外供力源周期和调整单元本身结构都有关。此外,当外供力源的周期 T 与调整单元本身结 构的周期 T<sub>0</sub>相近时,或二者周期成某种比例时,如

$$\frac{T_0}{T} = \frac{m}{n}$$
 (m、n 均为正整数)

则调整单元的振动出现整步现象,即 T。恒等于 T,或 T。 $=\frac{m}{n}$ T。

调整单元调整运动的周期特征和整步现象,用自治系统和非自治系统的振动周期对中、 强地震进行时间预报是十分有利的,下面我们具体讨论调整单元的振动现象。

对于大震的中期预报来说,我们把形成震源端部应力集中的区域应力场作为组合模式 的定常外供力源,当此种力源作用到组合模式这一震源系统后,震源调整系统有振动输出。 如振动周期为常数,我们视其为自治系统;如有多个周期,我们视其为非自治系统。调整单元 产生非自治系统可能有两种情况,一种情况是外供力源是一种周期力,且作用范围很大。此 时震源附近凡进入非线性的调整区均应出现非自治系统的振动行为。另一种是在定常力作 用下,某一调整单元出现自治系统运动,这种运动再作用到附近的调整单元时,被作用的这 个单元发生非自治系统运动。这样我们就可以看到大震前震源附近不同调整单元的振动周 期的非一致性。此外震源附近的各调整单元在外力作用下并不一定都能振动起来,只有振动 起来的调整单元才能形成自治系统或非自治系统。

根据上述讨论,我们无需了解调整单元结构的细节,而只要了解调整单元的振动特征就 可以对调整单元的非线性行为和参与调整运动的尺度作出定性判断。例如,振动周期大小可 以考察参与调整运动的体积大小,当振动周期很大时,可以认为参与调整运动的体积较大。 当调整运动的周期较小时,说明参与调整的体积较小。根据表3中的值,大多数中、强地震前 其振动周期均较大,它们大多在10个月左右,说明不管地震大小在震前参与调整运动的区 域均比较大。其中,龙陵、唐山地震前周期更偏大,故推测参与调整运动的区域更大,这与前 面的 Srm-t 图(图 2)是相符的,即 Srm值愈大,振动周期愈长。振动的幅度可以考察震前调整 区的非线性程度,像前面列举的起伏加剧现象,均说明调整区调整运动的非线性程度很高。 (本文 1993 年 12 月 26 日收到)

#### 参考文献

- 1 秦保燕,刘江峰,甘肃省及邻区强震前调制小震异常指标研究.地震预报方法实用化研究文集(地震专辑).学术书刊 出版社,1989.
- 2 李如生.非平衡态热力学和耗散结构.北京:清华大学出版社,1986.
- 3 郭增建,秦保燕,李革平.未来灾害学.北京:地震出版社,1992.

4 郭增建,秦保燕,荣代路,自治系统、非自治系统和地震孕育的组合模式,西北地震学报,1993,15(4);7-11.

# THE TIME-SPACE CHARACTERISTICS OF r<sub>m</sub> AND Sr<sub>m</sub> FLUCTUATION INTENSIFICATION IN THE EARTHQUAKE SOURCE SYSTEM AND THE MID-SHORT-TERM STRONG EARTHQUAKE PREDICTION

Qin Baoyan, Zhang Xiaodong<sup>(1)</sup>, Wang Yucang and Guo Xingquan (Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, China)

#### Abstract

By studying the fluctuation intensification of the ratio of small earthquakes modulated  $(r_m)$  and the abnormal area of the ratio of small earthquakes modulated  $(Sr_m)$  in the earthquake source system before strong earthquakes. The following results are gained:

1. The fluctuation intensification of the ratio of small earthquakes modulated almost appears before strong earthquakes in the source and near source region or before medium earthquakes in near source region and when the fluctuated times are three, the strong earthquake or medium earthquake will happen.

2.  $r_m$  abnormal area (Sr<sub>m</sub>) around source region shows the process from small to large area and then, from large to small area before most moderate earthquakes, therefore, we take the ratio of the minimum area of  $r_m$  anomaly to the maximum area of  $r_m$  anomaly as an index of the mid-short term earthquake prediction, according to statistics, the anomaly index[ $\lambda$ ] is

$$\gamma = Sr_{min}/Sr_{max}, [\gamma] = 0.32 \pm 0.09$$

In some earthquakes, the  $Sr_m$  fluctuation intensification appears before earthquakes, this may be regarded as the result of weak adjusting ability of adjustment units around the source region.

3. The beginning time of  $r_m$  and  $Sr_m$  fluctuation intensification has a connection with magnitude of earthquake, the bigger the magnitudes are, the earlier the fluctuation intensification will appear. According to the statist.cs of the time(t) from the beginning of  $Sr_m$  fluctuation intensification to earthquake occurrence and magnitude(M), the following formula is obtained:

① Seismological Bureau of Qinghai Province.

## $M = 4.29 \pm 0.11t \pm 0.33$

4. There ordinarily appear three forms of  $r_m$  anomalies in the field region before strong earthquakes:random,fluctuating and declining. If there are three  $r_m$  fluctuation intensifications, the strong earthquake will happen in the field.

5. By using the principle of autonomous system and unautonomous system, the fluctuation of  $r_m$  and  $Sr_m$  adjustment region around the source before earthquake is explained briefly.

Key Words: Modulated ratio; Abnormal area of modulated ratio; Fluctuation

intensification; Strong earthquake; Mid-short prediction; Autonomous system; Unautonomous system