

强震类型划分和后续强震 预测方法探索^{*}

陈海通 孙次昌 黎向东 梁 静

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

摘要 地震能量、振幅与周期的关系,由震源性质决定,因而其相关程度可作为强震类型划分的指标。初步将强震划分为主余震、双主震和强震群型 3 类。同类型强震在震源性质定量指标上有相似性,且有一定重复性。它们可为后续强震预测提供依据。从 1988~1997 年 50 多例 CDSN 宽频带(BPZ 波)强震记录中,分析得出的后续强震预测参考指标,对分型预测法应用有参考价值。

关键词 震源性质 强震类型 定量指标 分型预测法

引言

地震序列有孤立型(单一地震)、主震型和震群型(多震型)的区别(中国科学院地球物理研究所, 1976; 李善邦, 1981; 吴开统等, 1990)。本研究在地震序列研究的基础上,结合现代观测技术,应用 CDSN 宽频带强震(主震)记录,试图以定量指标区分强震类型,以达到早期识别地震序列类型的目标,获取地震序列的前兆信息。

1 震源性质的测定

1.1 地震波最大振幅与周期的相关性

众所周知,震源的能量释放与地面的地震烈度密切相关。李善邦(1981)提出烈度 I 由下式表达:

$$I = \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 A^2 v \rho \quad (1)$$

式中, A 为地面振动最大振幅, T 是相应周期, v 是地震波传播速度, ρ 是介质密度。若以

$$\langle W \rangle = \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 A^2 \rho$$

表示地震波的能量(马根源等, 1993), 则式(1)可写为

$$I = \langle W \rangle \cdot v \quad (2)$$

可见,地面烈度变化和地震波能量(W)的大小与振幅呈正比关系,与周期呈反比关系。

* 地震科学联合基金会(95-07-441)资助。中国地震局地球物理研究所论著 00AC1010。
1999-02-08 收到初稿, 1999-08-19 收到修改稿并决定采用。

1.2 体波震级与周期的相关性

Nortmann 和 Duda(1982)在 P, S 波振幅校正函数和体波震级研究中, 用曲线图描述了 1979 年 1 月 16 日伊朗地震的 P 波震级随周期的变化情况。图中表示由 G-R 校正函数 $Q(\Delta, h)$ 补偿的常用体波震级, 随着周期的增加而显著地加大。并且与单纯的几何扩散函数 $g(\Delta, h)$ 补偿的震级相一致。由几何扩散和滞弹性校正函数 $f(\Delta, h, T) = g(\Delta, h) + a(\Delta, h)/T_{rel}$ 。补偿的谱震级, 则随着周期的增加而显著地减小(图 1)。

我们仿效 Nortmann 和 Duda 的方法, 用 G-R 公式(1955)以及 Nortmann 和 Duda(1982)的公式(国家地震局震害防御司等, 1990; Nortmann, Duda, 1983; 陈海通等, 1994)

$$M_{(B)} = \lg(A/T) + Q(\Delta, h) \quad (3)$$

$$m_{(T)} = \lg(A/T) + g(\Delta, h) + a(\Delta, h)/T_{rel} \quad (4)$$

式中, T_{rel} 为滞弹性校正周期, $T_{rel} = T^{1-\alpha}$, 其校正因子 α 取 0.15。根据以上公式计算常用体波震级 $M_{(B)}$ 和谱震级 $m_{(T)}$, 并使它们与相应周期或周期对数值进行相关分析, 关系密切的如丽江地震, $r = -0.88$ 。表明它的震源介质对地震波能量吸收较少或周期放大作用较小。缩小周期 ($T_{rel} = T^{1-0.15}$) 的方法是有效的方法, 使大部分震级得到校正, $\lg T_r - m_{(T)}$ 相关分析结果呈现负相关性。

2 强震类型的划分

地震序列类型划分标准(吴开统等, 1990)通常为: ① 大震能量与全序列总能量比 E_m/E_Σ , 是 $\geq 90\%$ 还是 $< 90\%$; ② 大震与次大震的震级差 $\Delta M = M_m - M$, 是 ≥ 0.6 级还是 < 0.6 级; ③ 不同大小地震的频次关系。除考虑上述标准外, 本研究则探索依据地震波振幅-周期和震级-周期相关分析指标的相似性来划分。我们收集了 1988 ~ 1997 年 CDSN 记录的 50 多次强震, 将大陆地区强震划分为 3 类 7 型: 主余震 I 型、II 型和 III 型; 双主震 I 型和 II 型; 4 次强震群型和大于 4 次强震群型。岛弧地区强震划分为 3 类 4 型: 主余震型、双主震型、4 次强震群型和大于 4 次强震群型(表 1, 2)。

3 强震发生规律

3.1 地区性

对比大陆地区和岛弧地区的强震, 发现二者在上述相关分析定量指标上存在显著差别。例如振幅-周期相关分析定量指标, 岛弧地区普遍出现显著的正相关, 大陆地区仅在双主震 I 型中出现显著的正相关, 其它类型则出现低相关或无相关。特别是表 1 中所示的主要余震型强震, 在大陆地区有 3 种不同的次级类型, 反映出大陆地区地震波频率非常复杂。

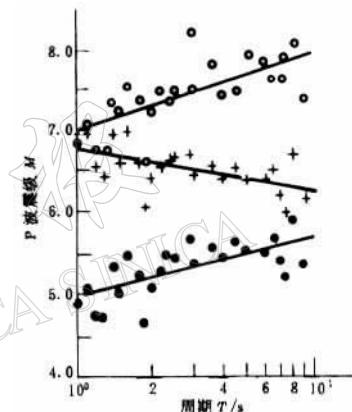


图 1 根据 3 种校正函数测定的震级(1979 年 1 月 16 日伊朗地震)
○表示根据古登堡-里克特(1955)校正函数计算的震级(图示减 1.0 级);
●表示仅补偿 $g(\Delta, h)$ —几何扩散的震级(图示加 1.0 级);
+ 表示补偿 $f(\Delta, h, T)$ —几何扩散和滞弹性衰减的震级

表 1 主余震型强震震源性质相关分析

强震类型	时间 年-月-日	地点	样本数 <i>n</i>	<i>r</i>								震级与周期				震源深度 <i>H/km</i>
				$T_d \cdot A_g$	$T_r \cdot A_g$	$\lg T_r \cdot A_g$	$\lg T_r \cdot \lg AF$	$\lg T_r \cdot m_{(D)}$	$\lg T_r \cdot M_{(B)}$	$m_{(T)} \cdot M_{(B)}$	$m_{(T)} \cdot M_{(D)}$	T_r	$M_{(B)}$	T_d		
大震型	1996-02-03	云南丽江	15	-0.54	0.46	0.47	-0.54	-0.57	-0.88	-0.30	0.61	8.21	1.03	7.85	1.86	$10^{(1)}$
	1996-09-24	云南丽江	21	0.32	0.31	0.28	-0.45	0.11	-0.77	-0.28	0.88	6.85	1.03	6.12	1.90	$23^{(1)}$
	1990-01-14	青海茫崖	24	0.47	0.47	0.45	0.42	0.24	-0.65	-0.01	0.65	7.51	1.10	7.00	2.81	$12^{(2)}$
	1990-06-14	新疆奇台	18	0.48	0.48	0.48	0.28	0.21	-0.67	0.26	0.46	7.24	1.17	6.80	2.41	$57^{(2)}$
	1993-01-26	云南普洱	18	0.67	0.67	0.64	0.15	0.15	-0.82	0.14	0.17	6.27	1.08	6.08	2.25	$32^{(2)}$
	1994-01-11	云南腾冲西	33	0.39	0.39	0.40	-0.12	-0.15	-0.67	0.12	0.31	6.94	1.23	6.75	2.35	$32^{(2)}$
	1994-11-21	云南腾冲西	21	0.37	0.38	0.41	0.18	0.08	-0.46	0.16	0.48	6.48	1.33	6.34	2.94	$25^{(2)}$
	1990-04-26	青海共和	18	0.55	0.55	0.61	-0.04	0.05	-0.56	-0.01	0.42	7.17	1.23	7.08	2.07	$9^{(3)}$
	00:37,11,1	青海共和	00:37,46,0													
	1990-04-26	青海共和	00:37,46,0													$10^{[3]}$
岛弧型	1993-10-02	新疆若羌	21	0.17	0.16	0.12	-0.18	-0.19	-0.30	0.09	0.86	6.95	1.03	6.45	2.39	$14^{(2)}$
	1995-10-23	云南武定	15	-0.11	-0.11	-0.07	-0.36	-0.20	-0.56	-0.19	0.88	7.33	1.05	7.25	1.96	$15^{(1)}$
	1995-12-18	青海鄂陵湖	15	-0.05	-0.05	-0.002	-0.49	-0.35	-0.79	-0.44	0.68	6.87	1.39	6.82	1.48	$29^{(1)}$
	1996-05-03	内蒙古包头	30	-0.03	-0.02	-0.001	-0.26	-0.37	-0.50	-0.17	0.89	7.24	1.24	7.09	2.16	$28^{(1)}$
	1993-07-12	日本海东部	21	0.73	0.73	0.72	0.43	0.56	-0.45	0.34	0.59	7.88	1.55	7.45	3.83	$16^{(2)}$
	1995-01-16	日本阪神	21	0.72	0.72	0.69	0.60	0.65	-0.06	0.60	0.46	7.39	2.06	7.30	4.31	$17^{(2)}$
	1995-02-23	台湾花莲东北	24	0.58	0.35	0.57	0.43	-0.04	-0.17	0.63	0.38	6.61	1.60	6.59	3.44	$45^{(2)}$
	1996-03-05	台湾花莲东北	33	0.41	0.40	0.36	0.27	0.24	-0.34	0.41	0.61	7.32	1.57	7.02	3.10	$16^{(1)}$
	1993-01-15	日本北海道	15	0.73	0.75	0.18	0.29	-0.66	0.31	0.45	8.18	1.13	7.56	2.80	113 ^[2]	
	11:06,01,1	日本北海道	15	0.74	0.74	0.76	0.22	0.33	-0.66	0.36	0.42	8.20	1.03	7.55	3.20	$101^{[2]}$
	1993-01-15	日本北海道	11:06,04,8													

注：震源深度栏中（1）据中国地震台临时报告；（2）据中国台网观测报告；（3）据 ISC 报告；加方括号表示二次破裂。

表2 后续强震预测参考指标

分析项目	大陆地区综合指标										>4次型			
	主余震			Ⅲ型			Ⅰ型			双主震				
	Ⅰ型	Ⅱ型	6	4	6	6	4	6	4	3	7	5	6	
样本数 n	2	5	6	4	6	6	4	6	4	3	7	5	6	
$T_d A_g$	0.48±0.14 -0.34	0.49±0.12 -0.34	-0.01±0.15	0.79±0.15	0.56±0.17	0.42±0.10 -0.58	0.40±0.09 -0.91	0.41±0.08	0.40±0.09 -0.91	0.41±0.08	0.40±0.09 -0.91	0.41±0.08	0.05±0.18 -0.07±0.17	
$T_r A_g$	0.48±0.13 -0.36	0.49±0.12 -0.36	-0.01±0.14	0.79±0.15	0.56±0.16	0.43±0.10 -0.51	0.40±0.09 -0.94	0.42±0.07	0.40±0.09 -0.94	0.42±0.07	0.40±0.09 -0.94	0.42±0.07	-0.07±0.16	
$\lg T_r A_g$	0.48±0.11 0.46	0.50±0.11 0.46	0.01±0.10	0.76±0.14	0.57±0.17	0.43±0.04 -0.94	0.43±0.09 -0.91	0.43±0.05 -0.38	0.43±0.05 -0.91	0.43±0.05 -0.38	0.43±0.05 -0.91	0.43±0.05 -0.38	0.10±0.15	
$\lg T_r AF$	0.18±0.23	0.15±0.22	-0.32±0.16	0.63±0.16	0.00±0.21	0.20±0.06 -0.37	0.05±0.05 -0.37	0.14±0.10 -0.37	0.05±0.05 -0.37	0.14±0.10 -0.37	0.05±0.05 -0.37	0.14±0.10 -0.37	-0.31±0.01	
$\lg T_r \lg AF$	0.11±0.18	0.10±0.16	-0.28±0.12	0.65±0.18	0.04±0.29	0.28±0.03 -0.42	0.09±0.20 -0.42	0.20±0.14 -0.42	0.09±0.20 -0.42	0.20±0.14 -0.42	0.09±0.20 -0.42	0.20±0.14 -0.42	-0.32	
$\lg T_r m_{(T)}$	-0.65±0.15	0.64±0.14	-0.55±0.25	-0.36±0.11	-0.59±0.22	-0.16±0.19 -0.86	0.06±0.14 -0.86	-0.07±0.19 -0.59	0.06±0.14 -0.59	-0.07±0.19 -0.59	0.06±0.14 -0.59	-0.07±0.19 -0.59	-0.75±0.06	
$\lg T_r M_{(B)}$	0.13±0.11	0.11±0.12	-0.18±0.27	0.53±0.16	0.15±0.22	0.23±0.08 -0.95	0.08±0.08 -0.95	0.16±0.10 -0.95	0.08±0.08 -0.95	0.16±0.10 -0.95	0.08±0.08 -0.95	0.16±0.10 -0.95	-0.05±0.22	
$m_{(T)} M_{(B)}$	0.41±0.21 0.75	0.41±0.18 0.73	0.83±0.12 0.76	0.40±0.13 0.74	0.42±0.34 0.80	0.77±0.10 -0.33	0.67±0.20 -0.59	0.73±0.13 -0.59	0.67±0.20 -0.59	0.73±0.13 -0.59	0.67±0.20 -0.59	0.73±0.13 -0.59	-0.31	
相关震级	8.21, 6.85	6.89±0.60	6.94±0.53	7.10±0.27	7.03±0.69	6.75±0.44 -0.70	6.89±0.18 -0.70	6.58±0.05 -0.70	6.76±0.22 -0.70	6.76±0.22 -0.70	6.76±0.22 -0.70	6.76±0.22 -0.70	7.49±0.28	
$m_{(T)}$	详见表1	详见表1	详见表1	详见表1	详见表1	详见表1	详见表1	详见表1	详见表1	详见表1	详见表1	详见表1	详见表1	
资料说明	地震<3 次无综 合指标, 详见表1	详见表1	详见表1	详见表1	详见表1	详见表1	详见表1	详见表1	详见表1	详见表1	详见表1	详见表1	详见表1	

含阿图什
(1996-03-15)
和大同3次
强震
18:20)

04-11 和

04-15)

伽师1997-03-01; 04-

05, 04-06;

04-11 和

04-15)

含阿图什
(1996-03-15)

续表 2

分析项目	岛弧地区综合指标									
	双主震			4 次型			强震群			>4 次型
样本数 n	4	6	2	3	3	4	7	7	10	
$T_d A_g$	0.61±0.18 0.42	0.65±0.15 0.61	0.61±0.21	0.72±0.02 0.72±0.02	0.80±0.06 0.96	0.75±0.10 -0.33	0.77±0.07	0.76±0.07	0.76±0.07	
$T_r A_g$	0.55±0.25 0.80	0.61±0.21 0.84	0.64±0.17 0.63	0.68±0.05 -0.99	0.74±0.18 0.97	0.75±0.10 -0.31	0.78±0.08	0.76±0.07	0.76±0.07	
$\lg T_r A_g$	0.59±0.20 0.37	0.64±0.17 0.63	0.63±0.18 -0.54	0.68±0.05 0.32±0.35	0.74±0.18 0.56±0.21	0.74±0.07 0.51±0.16	0.74±0.10 0.57±0.14	0.72±0.08	0.72±0.08	
$\lg T_r \lg AF$	0.43±0.17 0.84	0.36±0.18 0.34±0.28	0.36±0.18 0.48	0.48±0.32 0.99	0.65±0.15 0.65±0.14	0.53±0.14 -0.02±0.70	0.53±0.14 0.13±0.62	0.49±0.21 0.46	0.49±0.21	
$\lg T_r m_{(T)}$	-0.26±0.21 -0.84	-0.39±0.28 -0.84	-0.39±0.28 0.44±0.15	-0.36±0.54 0.49±0.36	-0.46±0.36 0.59±0.06	-0.37±0.36 0.49±0.27	-0.41±0.29 0.53±0.18	-0.40±0.03 0.52±0.19	-0.40±0.03 0.51	
$\lg T_r M_{(B)}$	0.50±0.17 -0.79	0.44±0.15 -0.86	0.44±0.15 0.49±0.10	0.49±0.36 0.28±0.25	0.59±0.06 0.23±0.16	0.49±0.27 0.26±0.15	0.34	0.52±0.19 0.64	0.52±0.19 0.64	
$m_{(T)} - M_{(B)}$	0.51±0.13 0.78	0.49±0.10 7.60±0.67	0.49±0.10 6.91, 6.44	0.28±0.25 6.49±0.57	0.23±0.16 6.67±0.38	0.26±0.15 6.43±0.27	0.25±0.12 6.53±0.28	0.26±0.13 6.52±0.30	0.26±0.13 6.52±0.30	
相关震级 $\bar{m}_{(T)}$	7.31±0.62	7.60±0.67	6.91, 6.44	6.49±0.57	6.67±0.38	6.43±0.27	6.53±0.28	6.52±0.30	6.52±0.30	

资料说明	日本海东部 (1993-07-12); 日本 本-神 (1995-01-16); 台湾花莲 东北 (1995-02-25 和 1996-03-05)	含日本北海道 (1993-01-15T11: 06; 01, 1 和 11; 01-16); 台湾花莲 东北 (1995-02-25 和 1996-03-05)	台湾花莲东南 (1992-04-19 和 09-01)。 06: 04, 8 两次破 裂)	台湾花莲东 (1994-05-23T05: 30; 06-24, 05- 24T04, 00)	台湾花莲东南 (1991-1-18T01:06)	台湾花莲东南 (1990-12-13T03:01; 12-19T03:20; 12-25T14:21 和 1991-1-18T01:06)	台湾花莲东 (1990-12-13T03:01; 19:50; 23-18, 23-28; 含台湾花莲东 次和花莲东南 次强震)
------	--	---	---	--	-----------------------------	--	---

表 3 强震源性质相关分析

时间 年-月-日	地点	样品数 n	$T_d A_g$ r	$T_r A_g$ r	$\lg T_r \lg AF$ r	$\lg T_r A_g$ r	$\lg T_r m_{(T)}$ r	震级与周期			震源深度 H/km
								$m_{(T)} - M_{(B)}$ r	T_r	$M_{(B)}$	
1998-1-10 1999-3	张北 张北	24 21	0.24 -0.17	0.24 -0.17	0.25 -0.17	-0.23 -0.49	-0.03 -0.71	-0.50 -0.05	7.41 1.05	7.23 2.04	15 (10)
								0.76 0.85	7.18 1.00	6.55 1.73	属主余震 Ⅲ型

3.2 相似性

相似性系指同一强震类型中强震之间震源性质相关分析定量指标相近似。例如 1996 年 3 月 19 日~1997 年 4 月 15 日, 发生于新疆阿图什-伽师地区 6 次强震群, 它们的振幅-周期相关分析定量指标中, 除个别分析项目出现低相关外, 绝大部分项目都为无相关。在震级-周期相关分析中, 除 $\lg T_r - M_{(B)}$ 定量指标为无相关—低相关之间变化外, 其它均在显著相关—密切相关之间变化。虽然该强震群强震震级差 $\Delta m_{(T)}$ 较大, 约为 $0.15 \sim 0.67$, 震中间距最大达 102 km, 延续时间长达 1 年有余, 但它们的定量指标却很接近。

4 后续强震预测举例

表 2 综合了同类强震震源性质相关分析的相关系数。这些相关系数的平均值, 和相关系数与相应谱震级 $m_{(T)}$ 建立的关系式, 可作为该类型后续强震震级强度的估算依据。

例如丽江地震, 属大陆地区主余震 I 型, 具有独特的震源性质, 其 $\lg T_r - m_{(T)}$ 相关系数指标与主余震 II 型兼容, 组合型相关系数 $r_0 = -0.69 \pm 0.16$ 。它的强余震估算式

$$\begin{aligned} m_{(T)} &= 5.6466 - 2.1158r_0 \\ n &= 6 \quad r = 0.44 \end{aligned} \quad (5)$$

式中, r_0 为 $\lg T_r - m_{(T)}$ 相关分析指标的变量。一般认为主震与最大余震在强度上相差 ≥ 0.6 级, 依据丽江主震的 $\lg T_r - m_{(T)}$ 相关系数, 求最大余震震级, 若将 $r_0 = -0.85$ 和 $r_0 = -0.57$ 代入式(5), 估算出强余震 $m_{(T)} = 6.85 \sim 7.45$ 。1996 年 9 月 24 日发生强震 $m_{(T)} = 6.85$, 在预测范围之内。

又如表 2 双主震 II 型给出的相关系数 $r_0 = -0.59 \pm 0.22$, 后续强震强度估算关系式

$$\begin{aligned} m_{(T)} &= 7.7598 + 1.7039r_0 \\ n &= 6 \quad r = 0.86 \end{aligned} \quad (6)$$

1995 年 7 月 9 日云南孟连南发生 $m_{(T)} = 7.01$ 地震, 震源性质相关分析定量指标确定为双主震 II 型, $\lg T_r - m_{(T)}$ 相关系数 $r_0 = -0.65$, 该类型后续强震比前一强震约大 0.20 级。若将 $r_0 = -0.44$ 和 $r_0 = -0.33$ 代入式(6), 估算得后续强震 $m_{(T)} = 7.20$, 比实测后续强震约小 0.02 级。

鉴于阿图什地震测定为大于 4 次型强震群之主震, $\lg T_r - m_{(T)}$ 相关系数为 -0.63 。该类型该项相关系数变量 $r_0 = -0.75 \pm 0.08$, 预测后续强震关系式

$$\begin{aligned} m_{(T)} &= 9.0441 + 2.0767r_0 \\ n &= 6 \quad r = 0.57 \end{aligned} \quad (7)$$

通常大陆地区强震群后续强震强度等于或小于强主震强度, 故将 $r_0 = -0.85$ 和 -0.63 代入式(7), 算得 $m_{(T)} = 7.32 \sim 7.74$ 。1997 年 3 月 1 日~4 月 15 日伽师 5 次强震群, 有 4 次地震强度在其范围之内。

5 结论

(1) 强震类型的划分, 以振幅-周期和震级-周期两个方面相关分析定量指标为主要依据。同类型强震震源性质定量指标相似, 反之亦然。这些定量指标为今后用计算机早期识别地震序列类型提供了判据。

(2) 强震的发生按照震源性质, 遵循相似性、重复性和地区性 3 种自然规律。它们为

后续强震预测奠定理论基础。正确识别强震类型主震可以得到后续强震次数的前兆信息。如主余震型，属单发性，后续强震强度比主震强度 <0.6 级；双主震型，属连发性，其后续强震与主震强度相近；强震群型，属多发性，后续强震次数通常 ≥ 3 次，震级差 $\Delta M < 1.0$ 。

(3) 后续强震强度估算，取决于同类型强震震源性质相关分析综合指标和误差波动值，以及它们与相应谱震级建立的关系式。通过对主余震(I, II)型、双主震II型和大陆地区大于4次强震群的强震强度估算，它们的误差在0.3级以内，证明估算方法可行。这种方法称为分型预测法。

(4) 最近处理了1998年1月10日和1999年3月11日发生于河北张北地区CDSN宽频带(BPZ波)2次强震记录，分析得出它们的常用震级差 $\Delta M_{(B)} > 0.6$ ，震源性质定量指标与主余震III型参考指标基本相似。由此得到的震源信息：该地区未来地震不会超过这两次地震的强度(表2, 3)。从而验证了后续强震预测参考指标有其实际应用的价值。

(5) 本研究使用近10年50多例CDSN宽频带(BPZ)记录的强震，定量划分强震类型，但由于震源性质复杂，类型众多，故有的类型实例很少。如大陆地区主余震I型和岛弧地区双主震型都仅有1例，其它类型也只有数例，这是本文存在的不足之处。上述结论只是初步研究成果，尚待资料的进一步积累和完善。

衷心感谢岳明生、李裕微、吴建春、吴建平、李强、刘瑞丰、周公威、张德存、牟维莉、张天中和王林瑛的帮助。

参 考 文 献

- 陈海通, 吴建平, 孙次昌. 1994. 由CDSN数据测定IPZ分量谱震级初探. 地震地磁观测与研究, **15**(6): 43~49
国家地震局震害防御司, 时振梁, 张少泉, 等编著. 1990. 地震工作手册. 北京: 地震出版社, 92~114
李善邦. 1981. 中国地震. 北京: 地震出版社, 19~39, 137~162
马根源, 王松立, 金庆华, 等. 1993. 物理学(上). 天津: 南开大学出版社, 349~374
吴开统, 焦远碧, 吕培苓, 等. 1990. 地震序列概论. 北京: 北京大学出版社, 96~123
中国科学院地球物理研究所编著. 1976. 地震学基础. 北京: 科学出版社, 205~284
Nortmann R, Duda S J. 1982. The amplitude spectra of P and S-waves and the body wave magnitude of earthquakes. *Tectonophysics*, **84**: 17~32
Nortmann R, Duda S J. 1983. Determination of spectral properties of earthquakes from their magnitudes. *Tectonophysics*, **93**: 251~275