中国大陆 $M_S \geqslant 7.8$ 大震的余震活动差异性特征及其成因研究*

张国民[1]，钮凤林[2,1]，邵志刚[1]，汪素云[3]
(1. 中国地震局地震预测研究所，北京 100036；2. Department of Earth Science, Rice University, Texas 77005, USA；3. 中国地震局地球物理研究所，北京 100081)

摘要：文章以20世纪60年代以来中国大陆发生的4次 $M_S \geqslant 7.8$ 大震，即1970年云南通海7.8级、1976年河北唐山7.8级、2001年青海昆仑山口西8.1级和2008年四川汶川8.0级地震为研究对象，探讨了8级左右巨大地震的余震活动及分类，并以流变模型讨论了序列类型差异性的物理力学成因。初步给出：① 4次大震的余震序列可归为两种类型，即低活动序列类型和高活动序列类型；② 余震的差异性特征与主震孕育过程密切相联，理论模型和实际震例资料均给出，余震活动持续时间长短与大震孕震时间长短之间呈正相关变化；③ 根据对汶川8.0级大震的研究，孕震区介质流变性和构造变形速率的高低可能是造成大地震余震序列差异性特征的重要原因。

关键词：余震序列；地震机理；中国大陆
中图分类号：P315.7 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-3274(2010)04-0001-12

引言

$M_S \geqslant 7.8$ 的地震被归为8级左右的大地震行列。自20世纪60年代中国开展大规模地震监测预报研究以来，在中国陆区先后发生1970年云南通海7.8级，1976年河北唐山7.8级，2001年青海昆仑山口西8.1级和2008年四川汶川8.0级共4次7.8级以上大震。这4次大震所造成的地震灾害占同期地震灾害总数的95%以上，而这些大地震以后的余震活动所造成的社会影响与灾害损失亦十分重大。因此，研究8级左右巨大地震的余震序列特点及其物理力学成因具有重要的科学价值和实用意义。

本文以20世纪60年代以来中国陆区上述4次 $M_S \geqslant 7.8$ 大震为研究对象，探讨8级左右巨大地震的余震活动特征、分类及其物理力学成因。

1 $M_S \geqslant 7.8$ 大震余震活动的基本情况及特征分类

1.1 基础资料

在4次 $M_S \geqslant 7.8$ 大震的余震序列资料(截止于2009年12月)中，1970年1月5日云南

* **收稿日期**：2010-05-04；**修改回日期**：2010-06-09
基金项目：国家重点基础研究发展计划项目(2008CB425704)
作者简介：张国民(1942-)，男，上海市人，研究员，博士生导师，主要从事大陆强震机理与预测等研究。

通海7.8级大震和1976年7月28日河北唐山7.8级大震的余震序列目录引自《中国近代地震目录(1912—1990)》[1]，2001年11月14日青海昆仑山口西8.1级地震的余震目录和2008年5月12日四川汶川8.0级地震的余震目录均来自中国地震台网中心资料。4次大震的余震资料均非常丰富，为突出重点和讨论方便，并考虑到4次大震余震资料的均一化和完整性，本文仅取$M_S \geqslant 5.0$余震进行研究。历次大震的$M_S \geqslant 5.0$地震序列目录分别列于表1至表4中，图1至图4分别给出了这4次大震的M-t图。

表1 1970年1月5日云南通海7.8级大震地震序列

序号	年-月-日-时:分:秒	纬度/(°)	经度/(°)	深度/km	震级
1	1970-01-05-01:00:37	24.20	102.68	13	7.8
2	1970-01-05-01:32:40.1	24.20	102.50		5.2
3	1970-01-05-05:44:33.2	24.25	102.53		5.5
4	1970-01-05-19:49:8.8	24.07	103.08	20	5.9
5	1970-01-05-22:21:30.8	24.08	102.68	15	5.3
6	1970-01-09-18:31:42.1	24.12	102.98	15	5.0
7	1970-01-14-18:14:17.1	24.30	102.75	14	5.4
8	1970-02-05-11:39:59.7	24.28	102.37	15	5.7
9	1970-03-11-09:37:19.7	23.93	103.08		5.2
10	1970-03-13-02:09:53.4	24.02	102.95		5.9

表2 1976年7月28日河北唐山7.8级地震序列

序号	年-月-日-时:分:秒	纬度/(°)	经度/(°)	深度/km	震级
1	1976-07-28-03:42:54.2	39.40	118.00	22	7.8
2	1976-07-28-05:04	39.80	117.80		5.0
3	1976-07-28-07:03:18.0	39.42	117.78	25	5.2
4	1976-07-28-07:17:29.0	39.20	117.80	19	6.2
5	1976-07-28-08:58:46.0	39.27	117.73	12	5.2
6	1976-07-28-09:21:37.0	39.62	118.45	11	5.0
7	1976-07-28-09:45:36.1	39.00	117.90	21	5.5
8	1976-07-28-15:14:54.0	39.53	118.20	16	5.0
9	1976-07-28-17:48:20.0	39.50	118.10		5.0
10	1976-07-28-18:45:34.3	39.70	118.50	22	7.1
11	1976-07-28-18:45:34.3	39.70	118.50		5.1
12	1976-07-28-18:45:34.3	39.70	118.50		5.0
13	1976-07-28-18:58:35.0	39.70	118.60		5.5
14	1976-07-28-23:35:57.8	39.70	118.80	24	5.5
15	1976-07-31-05:23:14.5	39.70	118.40		5.0
16	1976-08-09-06:41:33.0	39.95	118.82	14	5.3
17	1976-08-31-11:25:27.0	39.80	118.70		5.6
18	1976-08-31-11:27:20.0	39.88	118.88	10	5.3
19	1976-09-25-19:50:25.0	39.72	118.40	7	5.0
20	1976-11-12-02:13:39.0	39.90	118.82	5	5.0
21	1976-11-15-21:53:0.7	39.40	117.70	17	6.9
22	1977-03-07-08:28:41.0	39.90	118.87	18	5.7
23	1977-05-12-19:17:52.2	39.20	117.70	19	6.2
24	1977-11-27-06:46:48.9	39.40	118.00	16	5.1
25	1979-09-02-11:22:32.8	39.70	118.30		5.0
26	1991-05-30-07:06:56.0	39.66	118.38	24	5.0

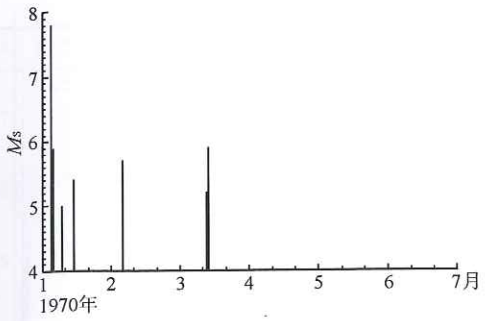

图 1　1970 年 1 月 5 日云南通海 7.8 级大震 M-t 图

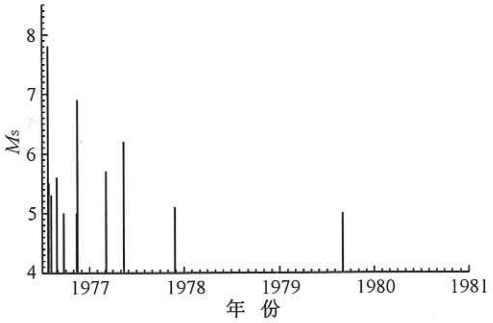

图 2　1976 年 7 月 28 日河北唐山 7.8 级大震 M-t 图(未标出 1981 年以后的强余震)

表 3　2001 年 11 月 14 日青海昆仑山口西 8.1 级地震序列

序号	年-月-日-时:分:秒	纬度/(°)	经度/(°)	深度/km	震级
1	2001-11-14-17:26:9.8	35.92	90.53	11	8.1
2	2001-11-14-18:58:11.9	35.77	93.93	8	5.4
3	2001-11-14-19:40:24.2	35.81	94.12	9	5.1
4	2001-11-15-07:05:26.7	35.73	94.53	7	5.4
5	2001-11-19-05:59:50.7	35.82	93.72	9	5.8
6	2001-11-20-01:45:21.7	35.75	93.66	9	5.6
7	2001-11-30-18:43:12.7	36.08	91.03	11	5.0
8	2001-12-08-12:12:47.9	35.83	92.90	10	5.3
9	2002-10-27-04:28:46	35.19	95.96	31	5.5
10	2004-06-29-16:11:28.6	35.83	92.59	11	5.4

表 4　2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震序列

序号	年-月-日-时:分:秒	纬度/(°)	经度/(°)	深度/km	震级
1	2008-05-12-14:28	31.00	103.40	19	8.0
2	2008-05-12-14:43	31.00	103.50		6.0
3	2008-05-12-15:34	31.00	103.50	10	5.0
4	2008-05-12-16:21	31.30	104.10		5.2
5	2008-05-12-17:07	31.30	103.80		5.0
6	2008-05-12-17:23	32.30	104.80	10	5.1
7	2008-05-12-17:42	31.40	104.00		5.2
8	2008-05-12-19:10	31.40	103.60		6.0
9	2008-05-12-21:40	31.00	103.50		5.1
10	2008-05-12-22:46	32.70	105.50		5.1
11	2008-05-12-23:05	31.30	103.60	17	5.0
12	2008-05-12-23:05	31.30	103.50		5.2
13	2008-05-12-23:28	31.00	103.50		5.0
14	2008-05-13-01:54	31.30	103.40	19	5.0
15	2008-05-13-04:08	31.40	104.00		5.7
16	2008-05-13-04:45	31.70	104.50		5.2
17	2008-05-13-07:46	31.20	103.40		5.3
18	2008-05-13-07:54	31.30	103.60		5.1
19	2008-05-13-15:07	30.90	103.40		6.1

续表 4

序号	年-月-日-时:分:秒	纬度/(°)	经度/(°)	深度/km	震级
20	2008-05-14-10:54	31.30	103.40		5.6
21	2008-05-14-17:26	31.40	104.00		5.1
22	2008-05-15-05:01	31.60	104.20		5.0
23	2008-05-16-13:25	31.40	103.20		5.9
24	2008-05-17-00:14	31.20	103.50		5.1
25	2008-05-17-04:16	31.30	103.50		5.0
26	2008-05-18-01:08	32.10	105.00		6.0
27	2008-05-19-14:06	32.50	105.30		5.4
28	2008-05-20-01:52	32.30	104.90		5.0
29	2008-05-25-16:21	32.60	105.40		6.4
30	2008-05-27-16:03	32.70	105.60		5.4
31	2008-05-27-16:37	32.80	105.60		5.7
32	2008-06-05-12:41	32.30	105.00		5.0
33	2008-06-09-15:28	31.40	103.80		5.0
34	2008-06-11-06:23	30.90	103.40		5.0
35	2008-07-15-17:26	31.60	104.00	15	5.0
36	2008-07-24-03:54	32.80	105.60	10	5.6
37	2008-07-24-15:09	32.80	105.50	10	6.0
38	2008-08-01-16:32	32.10	104.70	20	6.1
39	2008-08-05-17:49	32.80	105.50	10	6.1
40	2008-08-07-16:15	32.10	104.70	10	5.0
41	2008-09-12-01:38	32.90	105.60	6	5.5
42	2008-11-16-06:59	32.20	104.70	22	5.1
43	2008-12-10-02:53	32.6	105.4	15	5.0
44	2009-01-15-02:23	31.30	103.30	22	5.1
45	2009-06-30-02:03	31.4	104.1	20	5.6
46	2009-06-30-15:22	31.5	104.0	20	5.0
47	2009-09-19-16:54	32.8	105.6	7	5.1
48	2009-11-28-00:04	31.3	103.9	21	5.0

1.2 序列分析及其特征分类

由表 1 至表 4 中可见，这 4 次 $M_S \geqslant 7.8$ 大震的余震均十分丰富，仅就 $M_S \geqslant 5.0$ 的强余震而言，少则 10 来次，如通海 7.8 级及昆仑山口西 8.1 级地震均为 9 次；多则数十次，如唐山 7.8 级地震为 25 次，汶川 8.0 级地震为 47 次。需要说明的是，对于汶川地震，本文采用速报目录，震级可能会有稍许变动，但不会改变强余震多达数十次的基本状况。

这 4 次大震均可归属于主震—余震型序列。主震震级(M_m)与最大余震震级(M_{am})之差均小于 2.5 级，即 $M_m - M_{am} < 2.5$。在余震活动时间分布上，均具有频度和强度随时间衰减的特征，在总体衰减背景上强余震的起伏活动特征，以及强余震活动在对数时间轴上的准周期活动等共性特征。

然而，除了这些基本的共性特征外，这 4 次 $M_S \geqslant 7.8$ 大震的余震序列也显现出明显的差别。表 5 列出了大震序列的 5 级以上余震频度(N_5)，最大余震震级(M_{am})，最大余震与主震的震级差($M_m - M_{am}$)，5 级以上余震的连续活动时间 ΔT(本文规定两次相邻 5 级余震间隔小于 10 个月为连续活动时间)，$M_S \geqslant 6$ 余震的频次 N_6 等项统计参数，作为对 4 个大震序列对比研究的基础性资料。

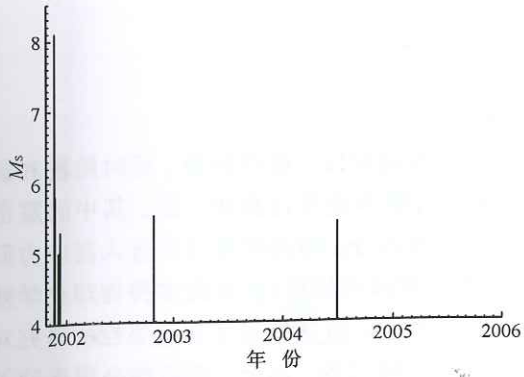

图 3　2001 年 11 月 14 日青海昆仑山口西 8.1 级大震 M-t 图

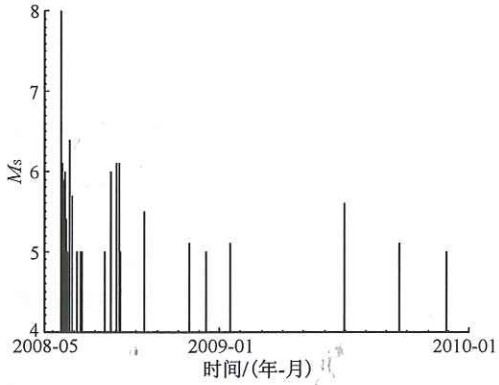

图 4　2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级大震 M-t 图

表 5　4 次大震地震序列资料的统计结果

序列名称	N_5	N_6	M_{am}	$M_m - M_{am}$	ΔT/月
通海 7.8 级序列	9	0	5.9	1.9	2
唐山 7.8 级序列	25	4	7.1	0.7	16
昆仑山 8.1 级序列	9	0	5.8	2.3	1
汶川 8.0 级序列	47	8	6.4	1.6	20

由表 5 可见，4 次大震序列具有各自的特性，在 5 级以上余震频度、最大余震震级、最大余震与主震的震级差、5 级以上余震的连续活动时间、以及 6 级以上强余震的频次等方面均呈现出显著的差异。这种差异大致可以归为两类：低频次类型(如通海 7.8 级及昆仑山口西 8.1 级大震的 5 级以上强余震均为 9 次，6 级以上强余震为零次)；高频次类型(唐山 7.8 级与汶川 8.0 级地震的 5 级以上强余震分别为 25 次和 47 次，6 级以上强余震分别为 4 次和 8 次)。从最大余震震级看，通海 7.8 级及昆仑山口西 8.1 级地震的最大强余震均在 6 级之下，分别为 5.9 级和 5.8 级；而唐山 7.8 级与汶川 8.0 级地震的最大强余震在 6 级以上，分别为 7.1 级和 6.4 级，相应的最大余震与主震的震级差，通海 7.8 级及昆仑山口西 8.1 级地震分别为 1.9 级和 2.3 级，即最大余震与主震的震级差接近 2 级或 2 级以上；而唐山 7.8 级与汶川 8.0 级地震最大余震与主震的震级差分别为 0.7 级和 1.6 级，即近于 1.5 级或 1.5 级以下。从 5 级以上余震的连续活动时间上看，通海 7.8 级及昆仑山口西 8.1 级地震序列 5 级以上余震仅持续活动了 1、2 个月；而唐山 7.8 级与汶川 8.0 级地震序列 5 级以上余震持续活动了 10 个月以上。

综上所述，通海 7.8 级及昆仑山口西 8.1 级地震的低频次类型所呈现的特征是：5 级以上余震频度低，最大余震震级小于 6 级，最大余震与主震的震级差接近和大于 2 级，余震持续活动时间仅为 1～2 月；而唐山 7.8 级与汶川 8.0 级地震的高频次类型所呈现的特征是：5 级以上余震频度高，6 级以上强余震丰富，最大余震与主震的震级差近于 1.5 级及以下，余震持续活动时间达到 10 个月以上。

为以下分析方便，我们将以通海 7.8 级及昆仑山口西 8.1 级地震所反映的余震低频次活动类型的地震序列称为 A 类序列，即低活动序列，将以唐山 7.8 级与汶川 8.0 级地震所

反映的余震高频次活动类型的地震序列称为B类序列，即高活动序列。

2 大震序列类型差异的物理力学成因分析

2.1 余震序列活动与主震孕育过程间的相互联系

日本学者笠原庆一[2]将地震过程分为4个阶段：震间阶段、震前阶段、震时阶段和震后阶段，与通常所说的强震孕育、发展、发生和震后的整体性全过程相一致。其中的震前阶段实际上是震间阶段(亦即孕震全过程)中的一个特殊部分，即是孕震过程进入高应力阶段，震源区介质发生非线性体积应变(微裂隙发育发展和体积膨胀)并导致多种物理化学效应，进而引发多种前兆异常现象的特殊阶段，是地震预报中最具代表性和重要性的研究对象。而震后阶段则被理解为大震后应力调整与余震活动的过程。因此，震后的余震活动过程与震前的孕震过程都是大震孕育发生整体性全过程中的一部分，因而震后的余震序列活动过程与大震前的孕震过程应有紧密相联的内在联系。

傅征祥[3]曾发现，大地震的强余震活动持续时间与大地震的重复发生时间呈对数线性相关。其中大震的重复发生时间即为震间阶段的时长，而强余震活动持续时间即为本文表5中的5级以上余震的连续活动时间 ΔT。由表5可见，ΔT 是序列特征分类中的代表性参数。ΔT 仅为1～2个月的通海7.8级及昆仑山口西8.1级地震序列呈现为5级以上余震频度低、无6级以上强余震，最大余震震级小等余震序列的低活动特性；而 ΔT 为10个月以上的唐山7.8级与汶川8.0级地震序列则呈现为5级以上余震频度高、6级以上余震丰富，最大余震震级高等余震序列的高活动特性。因此，在本文研究中，将5级以上余震的连续活动时间 ΔT 作为余震序列类型的代表性指标，即 ΔT 小为A型(低活动)序列，ΔT 大为B型(高活动)序列。

2.2 孕震简化模型的建立

张国民等[4]曾根据我国陆区7级以上强震，尤其是8级左右巨大地震的深部孕震环境，包括孕震的深浅部构造特征，壳幔速度结构与震源深度分布，建立了地震孕育的流变学模型。即大陆强震受活动地块控制，发生在活动地块的边界带，即晚第四纪以来的大型活动构造带上，孕震区的深部结构呈现为上部地壳为高速扰动的弹性应变层，下部地壳与上地幔顶部呈低速扰动的流动变形层，地震发生在弹性变形的上部地壳中，震源深度终止于下部地壳流动变形层的顶部，孕育过程设定为在构造变形的动力作用下下部地壳流动变形和上部地壳震源区应力、应变和应变能的积累。

孕震过程的模型简化为图5。之后，张国民等[5]又根据龙门山推复构造带的深浅构造特性和壳幔结构特性，进一步研究了汶川8.0级地震的构造动力成因。龙门山断裂带是逆冲型推复构造，其动力作用主要为巴彦喀拉块体向东运动对其的推挤。刘启元等[6]还给出了汶川地震震源区的壳幔速度结构，其20 km以上为高速扰动的弹性应变层，20 km以下的下部地壳为低速层。据此，张国民等[5]建立了汶川8.0级地震的震源孕震模型。模型结构与其他走滑型构造的地震模型一致，但动力作用则与走滑型地震的定常剪切应变(或应力)加载不同，为挤压型的定常应变(或定常应力)加载类型。

在前述工作的基础上，本文采用如图6所示的孕震模型。模型主要包括两大部分，即孕震过程的动力作用与震源结构模型。孕震过程的动力作用如图中箭头所示的构造变形对震源区的加载作用(σ)，及其所导致的震源区应力、应变和应变能的积累和增长。震源结构

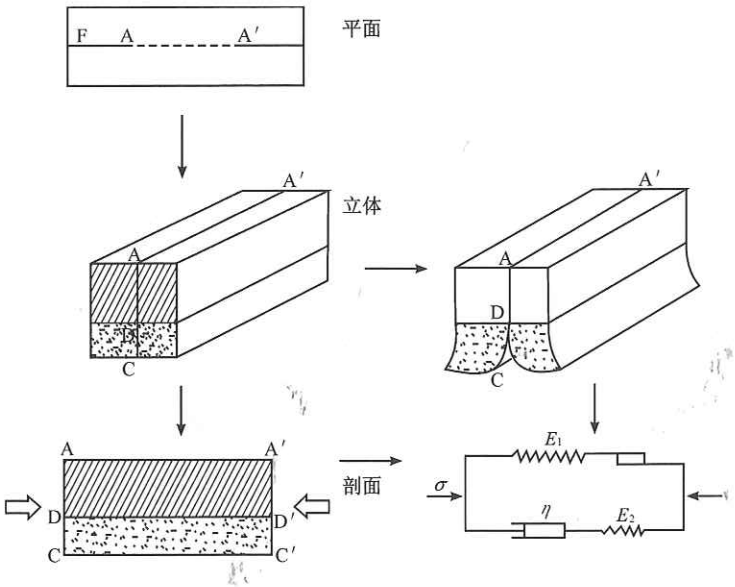

图 5　孕震过程的简化模型[4]

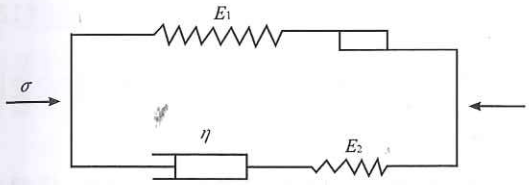

图 6　地震孕育的简化模型

模型如图 6 所示的力学元件组合而成。其包含上、下两臂，上臂为弹簧、滑块串连，弹簧(E_1)代表震源区上部地壳的弹性变形体。滑块代表震源区的闭锁特性，滑块的摩擦强度代表震源的构造强度，即闭锁强度。一旦震源区应力增长(即 E_1 中的应力)突破震源的闭锁强度(即模型中的滑块摩擦强度)，滑块将突然滑动，E_1 中应力快速释放，以此模拟地震的发生。震源结构模型中的下臂为弹簧(E_2)与活塞(阻尼器 η)组合的麦克斯韦尔体，代表震源区下部地壳的粘性流动变形。

在图 6 中所示的孕震模型中，孕震过程表现为在构造变形动力作用下震源区(E_1 中)应力增长，同时还包括在构造变形过程中，震源区下部地壳粘性流动变形对震源区(E_1)应力增长的作用。图 6 中箭头所示的孕震过程中的构造变形动力作用可由多种方式来模拟，本文采用稳定的区域构造应力作为震源孕育的动力作用条件。

2.3　地震孕育、发生、震后全过程的解析分析

2.3.1　孕震过程的解析解分析

对图 6 所示的震源模型可建立如下方程组

$$\begin{cases} \sigma(t) = \sigma_1(t) + \sigma_2(t) & (1) \\ \sigma_1(t) = E_1\varepsilon_1(t) & (2) \\ \sigma_2(t) = E_2\varepsilon_2(t) & (3) \\ \varepsilon(t) = \varepsilon_1(t) & (4) \\ \varepsilon_1(t) = \varepsilon_2(t) + \varepsilon_\eta & (5) \\ E_2\varepsilon_2(t) = \eta\dfrac{\mathrm{d}\varepsilon_\eta}{\mathrm{d}t} & (6) \end{cases}$$

上述方程组中，$\sigma(t)$、$\varepsilon(t)$ 为孕震系统总应力与总应变；$\sigma_1(t)$、$\varepsilon_1(t)$ 为震源闭锁区，亦即发震构造 E_1 的应力与应变；$\sigma_2(t)$ 为下部流变层（震源体下层）E_2 与 η 元件中的应力；$\varepsilon_2(t)$ 与 $\varepsilon_\eta(t)$ 为 E_2 与 η 元件中的应变。

对于孕震过程中的构造变形的动力作用，本文采用稳定的区域构造应力作为震源孕育的动力作用条件，即

$$\sigma(t) = \sigma_1(t) + \sigma_2(t) = \sigma_0 \tag{7}$$

式中，σ_0 为常数。

由(1)至(7)式各解得孕震过程中震源系统各部分应力/应变随时间变化的表达式

$$\begin{cases} \sigma_1(t) = \left(1 - \dfrac{E_2}{E_1 + E_2} e^{-\frac{t}{\tau}}\right)\sigma_0 & (8) \\ \varepsilon_1(t) = \left(1 - \dfrac{E_2}{E_1 + E_2} e^{-\frac{t}{\tau}}\right)\dfrac{\sigma_0}{E_1} & (9) \\ \sigma_2(t) = \dfrac{E_2}{E_1 + E_2} e^{-\frac{t}{\tau}}\sigma_0 & (10) \\ \varepsilon_2(t) = \dfrac{1}{E_1 + E_2} e^{-\frac{t}{\tau}}\sigma_0 & (11) \\ \varepsilon_\eta(t) = \dfrac{\sigma_0}{E_1}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) & (12) \end{cases}$$

式中，$\tau = \dfrac{(E_1 + E_2)\eta}{E_1 E_2}$，其中震源闭锁区，亦即发震构造 E_1 的应力 $\sigma_1(t)$ 与震源下部流变区中的应力 $\sigma_2(t)$ 随时间变化的表达式见式(8) 与式(10)。

由于孕震过程被视为震源闭锁区应力 $\sigma_1(t)$ 随时间增长，突破其构造闭锁强度（模型中滑块摩擦强度 σ_c）而导致震源破裂失稳过程，因而设定在时间 T 时刻 σ_1 达到 σ_c，即

$$\sigma_1(T) = \left(1 - \frac{E_2}{E_1 + E_2} e^{-\frac{T}{\tau}}\right)\sigma_0 = \sigma_c \tag{13}$$

由式(13) 可得 $T = \left[\ln\left(\dfrac{E_2\sigma_0}{(E_1 + E_2)(\sigma_0 - \sigma_c)}\right)\right]\tau$，即 $T \propto \tau$，上式中的 T 即为孕震过程的时长，亦为笠原庆一所定义的震间阶段时长，也就是通常所说的大震复发时间，由上述结果可以看到，孕震过程的时长，亦即大震复发时间与震源区介质的弛豫时间 τ 成正比，由于弛豫时间 τ 取决于介质的流变特性，所以，大震复发时间往往与孕震区介质的流变性相关。

2.3.2 震时的应力、应变释放

根据上述对孕震过程的分析，在 $t=T$ 时刻震源区应力达到其闭锁强度而发生地震，伴随震源闭锁区的解体，整个系统产生应力突降，在不考虑动摩擦的情况下，应力降为

$$\Delta\sigma = \sigma_1(T) = \left(1 - \frac{E_2}{E_1 + E_2} e^{-\frac{T}{\tau}}\right)\sigma_0 = \sigma_c \tag{14}$$

式中，σ_c 为震源体闭锁强度。与其相应的震源区应变释放为

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_1(T) = \left(1 - \frac{E_2}{E_1 + E_2} e^{-\frac{T}{\tau}}\right)\frac{\sigma_0}{E_1} \tag{15}$$

式(14)、(15)即为在简化条件下震时的应力、应变释放。

2.3.3 震后应力调整与应变释放(余震活动)

2.3.3.1 震后震源系统的力学状态分析

由于发震时震源区应力释放了 $\Delta\sigma$，故应力突降后还存在的剩余应力 σ_s 为

$$\sigma_s = \sigma_0 - \Delta\sigma = \sigma_0 - \sigma_1(T) = \sigma_2(T) \tag{16}$$

由式(10)可得

$$\sigma_2(T) = \frac{E_2\sigma_0}{E_1 + E_2}\mathrm{e}^{-\frac{T}{\tau}} \tag{17}$$

由式(16)、(17)可见，主震后震源系统的剩余应力实际上正好是图 6 所示震源模型中由 E_2、η 组成的麦克斯韦尔体(即震源区下层拈性流动变形层)中的应力。

2.3.3.2 震后应力、应变释放

谷继成等[2]、张国民等[8]将余震活动视作主震后震源系统在剩余应力作用下的应变释放。在本文的研究中，余震活动被视为是由孕震系统下层的粘性流动变形层(图 6 中的下臂麦克斯韦尔体)向震源闭锁区(主震时已解体)的残连部分调整应力，使其积累应力、应变和应变能并导致一个个残连点(主破裂后震源体内残留的弱小闭锁点)逐一破裂的结果。而且可以设想，在主震发生强固体解体之后，留下的残连点的强度将远小于主震的破裂强度。

为演算和分析方便，将时间坐标平移 T。即令主震发生时刻 T 为新时间坐标中的 $t=0$ 的初始时间点，并在新时间坐标里讨论余震活动。于是在 $t=0$ 时，$\sigma_1(0)=0$，$\sigma_2(0)=\sigma_s=$ 常数。整个系统的约束条件为 $\sigma(T)=\sigma_s$。

由于余震活动和通过余震活动的震后应变释放过程是拟按粘性流变层(σ_2)向闭锁区残连点作应力调整导致残连点破裂及其所伴随的应变释放，从而意味着余震活动的应变能是由粘性流变层(元件 E_2)提供的，所以，整体性的应变释放水平取决于 E_2 中的应力、应变和应变能的水平。应用方程(1)至(7)式的本构关系及震后的约束条件和初始条件，可解得震后(余震活动期间)E_2 的应力应变为

$$\sigma_2(t) = \frac{E_2\sigma_s}{E_1 + E_2}\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} \tag{18}$$

$$\varepsilon_2(t) = \frac{\sigma_s}{E_1 + E_2}\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} \tag{19}$$

由式(18)、(19)可见，震后 E_2 的应力、应变呈指数型衰减，这意味着大震后整个余震活动水平也将呈指数型衰减规律。设震后余震应变释放为 $\varepsilon_a(t)$，则根据上述分析和谷继成等[7]的研究结果，有

$$\varepsilon_a(t) \propto \varepsilon_2(t)$$

将此关系写成

$$\varepsilon_a(t) = K\varepsilon_2(t) = \frac{K\sigma_s}{E_1 + E_2}\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} = A\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} \tag{20}$$

式中，$A = \dfrac{K\sigma_s}{E_1 + E_2}$，$0 < K \leqslant 1$。式(20)即为震后余震应变释放的表达式。由式(20)可见，大震后余震活动整体水平随时间呈指数型衰减。设余震应变释放 $\varepsilon_a(t)$ 在某时段 ΔT 衰减至余震终止活动水平 ε_m，则

$$\varepsilon_a(\Delta T) = Ae^{-\frac{\Delta T}{\tau}} = \varepsilon_m = 常数 \tag{21}$$

式中，ΔT 即为余震持续活动的时间。并有

$$\Delta T = \ln\left(\frac{A}{\varepsilon_m}\right)\tau \tag{22}$$

2.4 大地震孕育过程与余震活动关系

上面已在震源简化模型(图 6)下对地震孕育、发生和震后全过程作了分析。其中，孕震过程震源闭锁区应力、应变的变化过程已由式(8)、(9)给出，其孕震过程的时间长度(亦即震间阶段时长或大震重复时间)T 为

$$T = \ln\left(\frac{E_2\sigma_0}{(E_1+E_2)(\sigma_0-\sigma_c)}\right)\tau$$

震后的余震活动过程已由式(20)给出，其余震持续活动时间 ΔT 为

$$\Delta T = \ln\left(\frac{A}{\varepsilon_m}\right)\tau$$

在上述推导中 E_1，E_2，σ_0，σ_c，A，ε_m 均为常数，τ 则为震源区介质的弛豫时间。由于孕震过程的时间 T 与余震活动持续时间 ΔT 均正比于 τ，因而可容易地得到

$$\Delta T = \alpha T \tag{23}$$

其中，$\alpha = \ln\frac{A}{\varepsilon_m}/\ln\frac{E_2\sigma_0}{(E_1+E_2)(\sigma_0-\sigma_c)}$ 为常数。式(23) 显示余震序列持续活动时间 ΔT 正比于主震的孕育时间(即大震重复时间)T。

2.5 大地震余震活动差异性特征的成因分析

表 5 已给出了我国陆区 4 次 $M_S \geqslant 7.8$ 大震余震活动的差异性，并将其归纳以唐山 7.8 级与汶川 8.0 级地震为一类的高活动余震序列和以通海 7.8 级及昆仑山口西 8.1 级地震为一类的低活动余震序列。而两类余震序列差异中最具典型性的代表性因子是 5 级以上强余震的持续活动时间 ΔT。唐山和汶川大震持续时间达 10 几个月，而通海和昆仑山口西大震的持续时间仅 1、2 个月。公式(23)给出了由简化震源模型得到的余震持续活动时间 ΔT 与大震孕育时间(大震重复时间)间的正比关系。此关系式与傅征祥[3]应用我国陆区 $M_S \geqslant 6.9$ 地震实际资料统计所得的大震重复时间 T 与余震持续活动时间 ΔT 的关系式 $\lg(\Delta T) = -0.873 + 0.866\lg(T)$ 相一致。从而说明，无论是理论模型还是实际资料，都一致给出余震持续活动时间与大震孕震期之间的正相关性。

大震的孕育是震源区应力、应变与应变能积累、增长直至突破震源区构造强度的过程，这一过程与震源孕育的深部地体环境有关，如深浅部地质构造、壳幔结构、地壳热状态、介质粘弹性以及构造形变状态等。其中相对比较集中地反映在构造变形动力作用特性和震源区介质的弹性、粘弹性特性等因子上。张国民等[5]在分析龙门山断裂带深浅部构造特性、上、下地壳与上地幔速度结构特性、龙门山推复构造的变形特性和 GPS 给出的变形速率等资料的基础上，研究了汶川 8.0 级地震的构造动力成因问题，给出了大震孕震期(即大震重复期)T 与构造变形速率呈反变化的结果，即孕震区构造变形速率越高，大震孕育过程越短，即 T 越小。反之，孕震区构造变形速率越低，孕震过程越慢，大震重复期就越长，即 T 越大。

由于本文及前人研究给出的大震余震持续活动时间 ΔT 与大震孕震期 T 之间的正相关关系，因而，大震的余震持续活动时间应与大震孕震时长一致，与孕震过程的构造变形

速率成反变化。

在本文研究的 4 次 $M_S \geqslant 7.8$ 的大震中，唐山 7.8 级与汶川 8.0 级地震发生在构造活动速率低的地区，根据 1990 年代以来 GPS 测量的结果，这两个地震区的构造变形速率为 1～2 mm/a，因而是低构造变形区。而通海 7.8 级及昆仑山口西 8.1 级大震发生在构造活动速率很高的地区，地震地质的构造活动调查和现今 GPS 测量的结果，均给出这两个地震区的构造变形速率达 10 mm/a 以上。由此似可以推断，本文研究的 4 次 $M_S \geqslant 7.8$ 大震的两种余震活动类型，可能与各地震区构造变形状态有关。高构造变形区的大震可能呈现为低余震活动特征，而低构造变形区的大震呈现为高余震活动特征，也就是说，大震孕育的构造变形速率的差异是导致大震余震活动差异性的重要原因。

3　结果与讨论

对大地震余震活动特性的研究是对地震过程研究中震后阶段研究的一个重要领域，具有重要的理论意义。同时，大地震的余震活动研究，对于震后余震活动趋势的预测、震后灾区民众正常生产、生活秩序的恢复、抗震救灾及震后重建等对策安排都有非常重要的实际应用价值。本文应用我国陆区最近半个世纪以来发生的 4 次 $M_S \geqslant 7.8$ 大地震，探索了巨大地震余震活动的差异性特征及其可能的成因，取得了一些初步的结果。

(1) 4 次 $M_S \geqslant 7.8$ 大震的余震活动性状有显著差别，通海 7.8 级及昆仑山口西 8.1 级大震的 5 级以上余震频次低，无 6 级以上强余震，5 级以上余震的持续活动时间短，仅为 1 至 2 个月。唐山 7.8 级与汶川 8.0 级大震的 5 级以上余震频次高，6 级以上强余震丰富，5 级以上余震的持续活动时间长，达 10 个月以上。因此，4 次大震的余震活动特性可归为两种类型：即前者为低活动类型，后者为高活动类型。

(2) 余震的差异性特征与其主震的孕育过程密切相联，由理论模型和实际震例资料均给出，余震活动持续时间 ΔT 与大震孕育时间 T 呈正比关系，即大震孕震期越长，余震活动持续时间亦越长，余震呈高活动类型。反之，大震孕震过程越快，其重复时间越短，则余震活动持续时间亦越短，余震呈低活动特征。

(3) 根据对汶川 8.0 级大震的研究，决定大震孕育过程快慢的一个重要因素是构造活动的强度，即构造变形速率的高低，孕震过程的时长与构造变形速率成反比，高构造活动区大震孕育过程快，其孕震期短，而低构造活动区的大震孕育过程慢，其孕震期长。由于余震活动持续时间与大震孕震期成正比关系，所以构造活动速率低的地区大震的余震活动持续时间长，活动水平高，而构造活动速率高的地区大震的余震活动持续时间短，活动水平低。因而可推断，大震区变形速率的高低可能是造成大地震余震活动的差异性特性的一个重要原因。

本文研究过程中曾与傅征祥教授多次研讨，薛艳副研究员为本文提供了序列资料，一并致以谢忱。

参考文献：

[1]　中国地震局震害防御司. 中国近代地震目录(公元 1912—1990 年)[M]. 北京：中国科学技术出版社，1999.

[2] Kasahara K. Earthquake Mechanics[M]. London: Cambridge University Press, 1981.
[3] 傅征祥. 大地震的强余震活动持续时间和重复时间[J]. 地震地质, 1990, 11(4): 15-20.
[4] 张国民, 李丽. 地壳介质的流变性与孕震模型[J]. 地震地质, 2003, 25(1): 1-10.
[5] 张国民, 邵志刚, 刘桂萍, 等. 汶川8.0级地震构造动力成因分析[J]. 地震, 2009, 29(1): 164-173.
[6] 刘启元, 陈九辉, 李顺成, 等. 汶川 M_S8.0地震: 川西流动地震台阵观测数据的初步分析[J]. 地震地质, 2008, 30(3): 584-596.
[7] 谷继成, 谢小碧, 赵莉. 强余震的时空分布规律及其理论解释[J]. 地球物理学报, 1979, 22(2): 32-46.
[8] 张国民, 傅征祥. 华北强震的时间分布及物理解释[J]. 地球物理学报, 1985, 28(6): 569-577.

Difference of Aftershock Activity and its Causes for $M_S \geqslant 7.8$ Earthquakes in China Continent

ZHANG Guo-min[1], NIU Feng-lin[2,1], SHAO Zhi-gang[1], WANG Su-yun[3]
(1. Institute of Earthquake Science, CEA, Beijing 100036, China; 2. Department of Earth Science, Rice University, Texas 77005, USA; 3. Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China)

Abstract: In this paper, by taking four $M_S \geqslant 7.8$ earthquakes in China continent since the 1960s as research object, namely the 1970 Tonghai M_S7.8 earthquake of Yunnan, the 1976 Tangshan M_S7.8 earthquake of Hebei, the 2001 Kunlunshan Pass M_S8.1 earthquake of Qinghai and the 2008 Wenchuan M_S8.0 earthquake of Sichuan, we investigated the aftershock activity and its classification of great earthquakes around M_S8.0, the physico-mechanical causes of the differentiated features among the types of aftershock sequences are also discussed based on the rheology model. Some preliminary conclusions are drawn: ① the types of aftershock sequences of the four large earthquakes can be divided into two categories, i.e. low activity sequence type and high activity sequence type; ② the differentiated features of aftershock sequences are closely related to the process of the main shock preparation, the theoretical model and actual earthquake data both demonstrate that there is a positive correlation between the duration of aftershock activity and that of great shock preparation; ③ in terms of the research on Wenchuan M_S8.0 earthquake, the rheological property of media in seismogenic zone and the high or low velocity of tectonic deformation may be the important causes of the differentiated features among aftershock sequences of large earthquakes.

Key words: Aftershock sequence; Earthquake mechanism; China Continent