

马禾青,杨明芝,丁风和,等,2022. 中国大陆 7 级以上地震前地震活动的非线性分析. 中国地震,38(1):42~51.

# 中国大陆 7 级以上地震前 地震活动的非线性分析

马禾青<sup>1,2)</sup> 杨明芝<sup>1)</sup> 丁风和<sup>1,2)</sup> 罗国富<sup>1,2)</sup>

1) 宁夏回族自治区地震局,银川 750001

2) 宁夏土木工程防震减灾工程技术研究中心,银川 750021

**摘要** 本文旨在讨论大地震前地震活动频次的非线性增长现象。首先研究了地震活动的累计增长模型,得到在平稳状态下,小地震的发生近似服从泊松分布的规律,大地震前地震累计频次会出现非线性行为;然后使用中国地震台网中心提供的强震和弱震目录,给出了 1970 年以来中国大陆 15 次 7 级以上地震前地震累计次数呈现指数增长的震例,得到 7 级以上地震前小震累计次数存在数年尺度的非线性增长特性,部分 7 级以上地震前小震累计次数还存在几个月尺度的短期非线性特性,应当能够作为一种地震预测的中短期指标。

**关键词:** 地震活动 累计频次 指数增长

[文章编号] 1001-4683(2022)01-0042-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

地震发生具有随机性。地震活动的时空特征非常复杂,早在 20 世纪初,人们就认识到断层的空间不均匀性可以导致非周期现象(Scholz,1989),并认为地震周期并非那么简单。相对较小的区域(平均 60~300km 的尺度)10 年左右的地震活动服从泊松分布规律(Wyss,1990),即证实了地震活动的整体随机性(Wyss et al,2000)。吴忠良(1999)通过广义 Rydelek-Sacks 检验地震活动周期性和随机性,得到地震活动周期性不具有普遍意义。前人研究表明复杂的地震活动特征来自孕震系统的内在随机性(Kagan et al,1980),大型逆冲地震的发生具有随机性(Tormann et al,2015)。小山顺二等(1997)将地震作为一个复杂系统,研究了地震活动的随机性质,给出地震活动的随机标度和非线性标度律。陈棋福等(2001)还通过对地震活动内在随机性的研究得到地震预测成功率不会太高的推断。

同时,地震活动存在非线性现象。朱元清等(1991)通过构建非线性动力学模型研究了断层带的地震活动性。安镇文等(1992)根据非线性动力学观点,试图从大震发生前的地震活动和岩石声发射序列中研究可能存在的混沌过程,并且定量地探讨其各自的信息维和关联维,从而研究了 7 级以上地震孕育过程中的混沌特征。张国民等(1993)应用非线性动力学模型来模拟在统一构造应力场作用下含有多个活动地震带的地震构造块体的地震活动。

[收稿日期] 2020-04-23 [修定日期] 2021-03-26

[项目类别] 宁夏回族自治区重点研发计划重大(重点)项目(2018BFG02011)资助

[作者简介] 马禾青,女,1963 年生,正高级工程师,主要从事地震预测及相关研究。E-mail:mahq222@163.com

杨立明等(1995)应用非线性数学模型研究了地震活动的非线性行为。陈时军等(1998)在假定地震活动系统具有分形特征的前提下,利用推导出的震级-频度关系的非线性表达式研究了地震活动系统,并得到了中短期地震预报中与非线性有关的一对参数。罗葆荣(1998)研究了云南地震活跃期的大震非线性加速律并对未来 3 年的大震趋势进行预测。

罗灼礼等(2000)运用地震序列非线性关系和时间结构变异系数,对辽宁海城、岫岩 1975 年以来 4 次显著地震的地震序列进行了对比研究。顾瑾平(2000)将非线性震级-频次关系应用在时间项短临预测中。罗灼礼等(2002)给出了研究地震临界丛集现象的方法,即时间变异诊断方法,以此研究了丛集状态的自相似性及临界时间分支现象,进而对发震系统的内部时间给出了定义,并得到了地震丛集的非线性时间结构特征。更进一步地,罗灼礼等(2012)针对地震活动性等异常的群体特征,采用确定性和随机性相结合的思路,对地震活动性系统演变的时间和空间结构、“正常”与“异常”状态判定方法进行了探索性研究,进而对汶川 8.0 级大震及强余震的预测工作进行了总结和反思。

本文在地震发生是随机的这一基本前提下,讨论了地震发生累计次数的指数增长模型,并对震例进行了分析。

## 1 地震发生累计次数的指数增长

如果随机变量仅为时间变量的函数,则将其称为随机过程。在分析地震活动的过程中,大多情况下是将区域地震活动作为单一参量的时间点过程,即分析地震活动参量的时间变化,寻求大地震前可能出现的异常指标。但是,由于一些用于描述地震活动的参数的物理意义并不十分明确,或者对所使用的地震活动参数所蕴含的物理机制和前提条件理解不够,往往造成所得结果并不理想。

地震活动频次是描述地震活动最为重要的随机变量,能够反映地下介质的特性和区域构造应力水平。在平稳的状态下,可以认为小地震的发生近似服从泊松分布规律。故地震累计次数表示为

$$N(t) = \lambda_0 t \quad (1)$$

其中,  $\lambda_0$  为地震平稳发生率。事实上,地震活动是一种非常复杂的现象,所谓的平稳状态并不能够长久维持。如果将孕育和发生地震的构造区域近似看作开放系统,由于不可控因素的作用,如系统内部力学机制的涨落或外部环境源于各种不明原因的扰动,在系统演化过程中持续不断地发挥作用,使得系统运动变量出现随机性的涨落。按照线性稳定性的分析理论(哈肯,1988;林振山,2003),假设系统的时间演化过程(即系统动力学)服从如下非线性微分方程

$$\frac{dX}{dt} = F(X, \alpha) \quad (2)$$

其中,  $X$  为地震系统状态变量;  $F$  表示变化速度项,为作用于  $X$  被定义的空间的算符,一般为非线性;  $\alpha$  为控制参数。设在定态  $X_0$  附近出现一次小扰动  $x(t)$ , 即

$$X(t) = X_0 + x(t) \quad (3)$$

$$\left| \frac{x}{X_0} \right| \ll 1 \quad (4)$$

根据线性稳定性原理,式(2)在定态解  $X_0$  附近的线性化方程为

$$\frac{dX}{dt} = \left( \frac{\partial F}{\partial X} \right)_0 x \tag{5}$$

式(5)为一齐次方程,对于  $x=0$  成立。

在研究地震发生的时间分布问题时,假设稳定状态下发生的地震数  $N$  服从泊松分布,即

$$\frac{dN}{dt} = \lambda_0 \tag{6}$$

如果在平衡态附近出现一个小扰动  $f$ ,意味着对泊松分布的偏差。扰动的具体细节并不十分清楚,但可以将地震的发生用类似式(2)的形式描述。

当涨落引起地震有小的发生增量  $N(t) = N + dN$  时,则

$$\frac{d(N + dN)}{dt} = \lambda_0 + f(dN, \alpha) \tag{7}$$

将式(7)减式(6),令  $n = dN$ , 则

$$\frac{dn}{dt} = f(n, \alpha) \tag{8}$$

即为涨落引起的地震发生速率方程。

将式(8)进行泰勒展开,得到

$$\frac{dn}{dt} = \left( \frac{\partial f}{\partial n} \right)_0 n \tag{9}$$

由于地震系统为巨系统,设一个孕震区域潜在发生的地震总数为  $N_0$ ,将实际发生地震数除以  $N_0$ ,即  $p_n = \frac{n}{N_0}$  表示地震的发生几率,则将其代入式(9)写为

$$\frac{dn/dt}{N_0} = \frac{dp_n}{dt} = kp_n \tag{10}$$

表示地震发生几率的变化率。

将式(9)理解为由涨落引起的地震发生率发生变化的方程,即

$$\frac{dp_n}{dt} = kp_n \tag{11}$$

式(11)在平衡态附近的解为

$$p_n = c \exp(kt) \tag{12}$$

将式(12)乘以  $N_0$ ,得到在定态附近地震发生数  $n$  的解

$$n = A \exp(kt) \tag{13}$$

其中,  $k = \left( \frac{\partial f}{\partial n} \right)_0$ 。

由此可见,系统的演化趋势取决于参数  $k$ 。①当  $k < 0$  时,扰动将随时间趋于衰减,最终回到平衡运动状态式(6);②当  $k > 0$  时,扰动将随着时间指数增大,最终远离平衡状态。式(13)表示当  $k > 0$  时,地震持续性增加;当  $k < 0$  时,地震持续性减弱。

从地震研究的角度看,需要关注的不是系统演化发展的最终状态,而是在突变前的表现,因此要对非线性微分方程解的稳定性进行判断,系数  $k$  就提供了地震过程是否稳定的一

种判据。将式(13)改写成常用形式

$$n = n_0 10^{kt} \quad (14)$$

其中,当时间单位取年、月或天时, $k$ 值会随之不同。

大地震发生前,震源区及周围区域构造应力会出现非平衡变化,力学平衡受到破坏。在构造应力的作用下,非线性动力学或非平衡约束的出现将打破原来地震活动状态的平衡,偏离正常活动背景,并由早期的正常涨落逐渐趋于异常状态。

大地震前地震累计频次的非线性行为得到了来自岩石实验结果的支持(米亚奇金等,1979)。据岩石破裂实验的研究结果,在应力-应变曲线上,大于约 1/2 破裂强度时的非线性部分,为膨胀发生的区域,在膨胀区域中测到的微破裂事件的累计频度  $N$  与体应变的非线性部分成正比,在应力为破裂强度的 50%~95% 之间拟合效果很好。当应力为破裂强度的 95% 以上时,微破裂活动急速加剧,并导致最终破坏,该现象表明岩石在破裂前内部的微破裂数目出现了非线性增长。微破裂累计频次在一定程度上反映了岩石应力水平和非线性体的应变状态,与大地震发生前地震活动频次的非线性异常变化一致。一次大地震的孕育是在构造应力作用下,在较大空间范围内经历较长时间的过程,从缓慢变化逐渐进入非线性加速变化,同时震源体及周围区域应力状态和介质性质发生很大变化,地震活动累计频次的非线性增加正是这种变化的反映。

## 2 7 级以上地震前地震累计次数呈指数增长震例分析

本节将根据式(14)讨论地震累计次数在 7 级以上地震发生前的变化情况。

### 2.1 7 级以上地震前地震累计次数指数增长

本文使用的地震目录来自中国地震台网中心提供的强震目录 CH48 和弱震目录 China2。中国大陆的地震台网于 1970 年建成,因此 China2 自 1970 年给出弱震地震目录。中国大陆 1970 年以来共发生 7 级以上地震事件 23 次(双震仅讨论第 1 次地震事件),其中,15 次地震能够分析出震前地震累计次数指数增长现象,其余 8 次或由于地震台网记录时间太短,或由于地震发生在监测能力较弱区域,弱震记录不全,无法分析震前地震累计次数指数增长现象。这 8 次地震分别为 1970 年 1 月 5 日云南通海 7.8 级、1973 年 2 月 6 日四川炉霍 7.6 级、1973 年 7 月 14 日西藏亦基台错 7.3 级、1974 年 8 月 11 日新疆乌恰 7.3 级、1996 年 11 月 19 日新疆和田喀喇昆仑山口 7.1 级、1997 年 11 月 8 日西藏玛尼 7.5 级、2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 级、2008 年 3 月 21 日新疆于田 7.3 级和 2014 年 2 月 12 日新疆于田 7.3 级地震。

表 1 列出了 15 次 7 级以上地震的研究区域范围和研究时段。选择研究区域时应考虑能够涵盖发震构造及震源区的范围,研究时段应能够体现地震累计频次出现指数增长现象。空间范围一般在  $3^\circ \times 3^\circ$ ,并根据实际情况适当调整;时间尺度一般在数年。这些地震中,1974—1976 年的 5 次震例有观测资料的时段小于 10 年,2010 年 4 月 14 日青海玉树 7.1 级地震发生在监测能力较低地区,最小完整性震级为  $M_L 4.0$ 。本节分析的每个震例的研究时段均截至震前 1 天。表 1 中还同时列出所使用资料的地震总数  $N$ 、参数  $k$  和起始震级  $M_0$ , $k$  表示以年为时间单位的指数增长系数,由计算得到。图 1 为 15 次地震前  $M_0$  以上地震累计次数的指数增长曲线,可清楚地看出在 7 级以上地震发生前震中周围地震累计次数呈现指数增长。

表 1 15次7级以上地震的信息

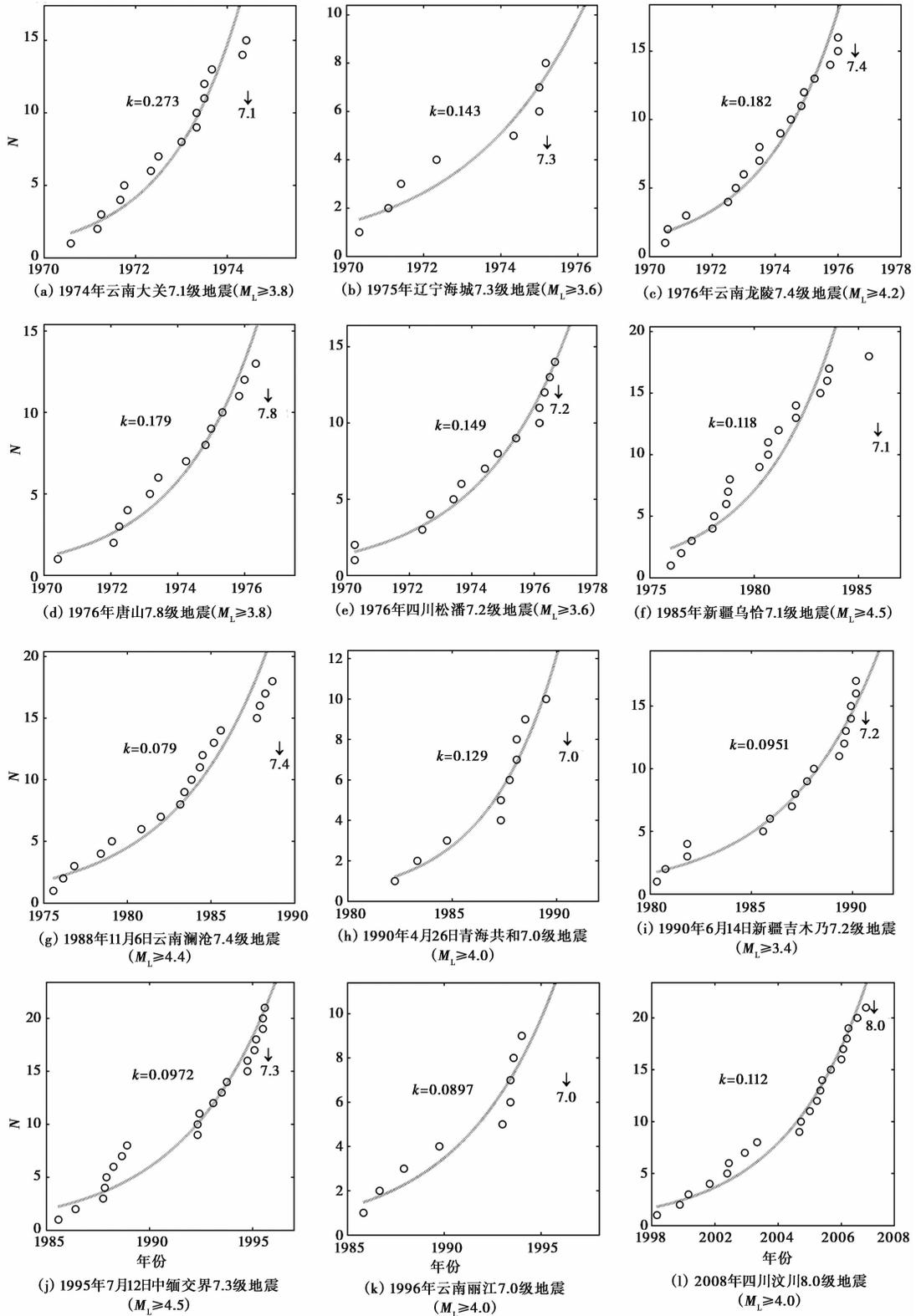
地震	研究区域范围	资料时段 (年-月-日—年-月-日)	$N$	$k$	$M_0$
1974年5月11日云南大关7.1级地震	26.5°~29.5°N, 102.5°~105.5°E	1970-01-01—1974-05-10	15	0.2734	3.8
1975年2月4日辽宁海城7.3级地震	39.0°~42.0°N, 121.0°~124.0°E	1970-01-01—1975-02-03	8	0.1427	3.6
1976年5月29日云南龙陵7.4级地震	23.0°~26.0°N, 97.5°~100.5°E	1970-01-01—1976-05-28	16	0.1816	4.2
1976年7月28日河北唐山7.8级地震	38.0°~42.0°N, 116.5°~119.0°E	1970-01-01—1976-07-27	13	0.1788	3.8
1976年8月23日四川松潘7.2级地震	31.0°~33.0°N, 102.5°~106.0°E	1970-01-01—1976-08-22	14	0.1489	3.6
1985年8月23日新疆乌恰7.1级地震	39.0°~41.5°N, 74.5°~77.5°E	1975-01-01—1985-08-22	18	0.1179	4.5
1988年11月6日云南澜沧7.4级地震	20.5°~23.5°N, 99.0°~101.0°E	1975-01-01—1988-11-05	18	0.0790	4.4
1990年4月26日青海共和7.0级地震	34.0°~37.5°N, 98.5°~101.5°E	1980-01-01—1990-04-25	10	0.1292	4.0
1990年6月14日新疆吉木乃7.2级地震	46.0°~49.0°N, 83.5°~86.5°E	1980-01-01—1990-06-13	17	0.0951	3.4
1995年7月12日中缅交界7.3级地震	21.0°~24.0°N, 98.5°~102.0°E	1985-01-01—1995-07-11	21	0.0972	4.5
1996年2月3日云南丽江7.0级地震	26.5°~29.5°N, 98.4°~100.9°E	1985-01-01—1996-02-02	9	0.0897	4.0
2008年5月12日四川汶川8.0级地震	30.0°~33.5°N, 101.5°~106.0°E	1998-01-01—2008-05-11	21	0.1120	4.0
2010年4月14日青海玉树7.1级地震	31.5°~34.5°N, 95.5°~98.5°E	2000-01-01—2010-04-13	14	0.0992	4.0
2013年4月20日四川芦山7.0级地震	29.5°~31.5°N, 102.5°~105.5°E	2011-01-01—2013-04-19	8	0.4701	4.2
2017年8月8日四川九寨沟7.0级地震	32.5°~35.5°N, 102.5°~105.5°E	2013-01-01—2017-08-07	11	0.3149	4.0

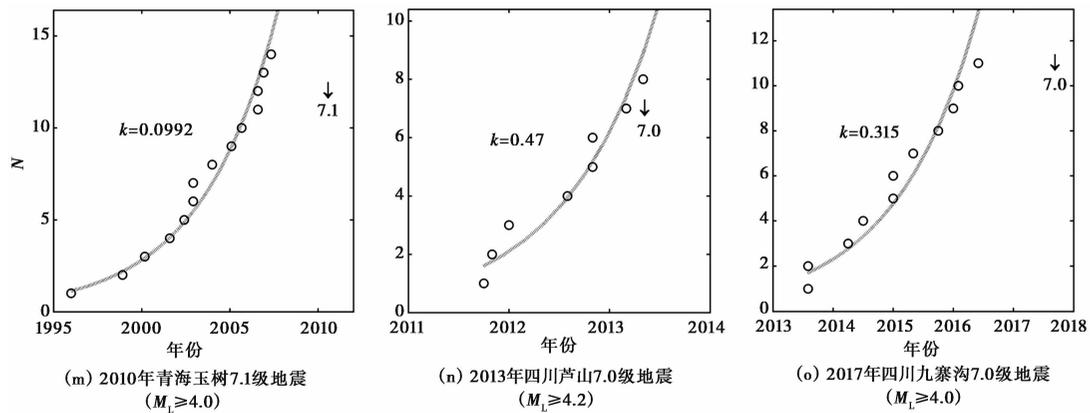
通过15次震例可以得出,7级以上地震发生前区域地震累计次数出现指数增长现象,表明震源区及周围地震活动状态出现了非平衡转变,非线性驱动作用支配地震活动的演化,使之偏离正常活动的背景,随之出现非线性变化。

分析发现,7级以上地震发生前仅大于起始震级  $M_0$  的地震才会表现出指数增长现象。各次地震的起始震级  $M_0$  并不相同,一般为  $M_L 4.0 \sim 4.5$ 。上述15次震例中,仅5次震例的起始震级小于  $M_L 4.0$ ,其他震例均大于  $M_L 4.0$ 。这是由于较小的地震( $M_L 2 \sim 3$ )主要反映了区域背景的活动,而  $M_L 4.0$  以上的地震受到孕震机制的控制更多。区域地震活动包含了正常的背景活动和在孕震过程作用下的异常活动,如果选取的起始震级过低,会导致背景活动掩盖了异常活动,使得异常显示不清楚,无法分析出指数增长现象。可见,由于各地构造应力环境等因素的不同,大震前地震活动产生非平衡转变的起始震级也不相同。为了突出显示异常变化,选择合适的起始震级非常重要。

## 2.2 部分7级以上地震前小地震累计次数的短期非线性增长特性

研究发现部分7级以上地震发生前,大于一定震级地震的累计次数存在几个月尺度的短期非线性特性。表2给出7次震例的研究区域范围(研究区域范围同表1)、研究时段和所使用资料的起始震级  $M_0$ ,图2为这7次震例前月时间尺度的  $M_0$  以上地震累计次数的指数增长曲线。表1给出的  $k$  值小于0.5,表2给出的  $k$  值普遍大于1,部分震例的  $k$  值大于2,如1995年7月12日中缅交界7.3级、2008年5月12日四川汶川8.0级和2013年4月20日四川芦山7.0级地震。由此可得,部分7级以上地震发生前地震累计次数的指数增长经历了2个阶段,第一阶段指数增长系数较小,而在临近地震发生前的几个月(即第二阶段)指数增长系数增大,系数  $k > 1$ ,同时起始震级  $M_0$  减小,表明孕震系统的不稳定性增强。因此,地震累





注：图中箭头指示地震发生时间

图1 15次7级以上地震累计次数的指数增长曲线 ( $M_L \geq M_0$ )

表2 7次震例研究区域和时段及起始震级

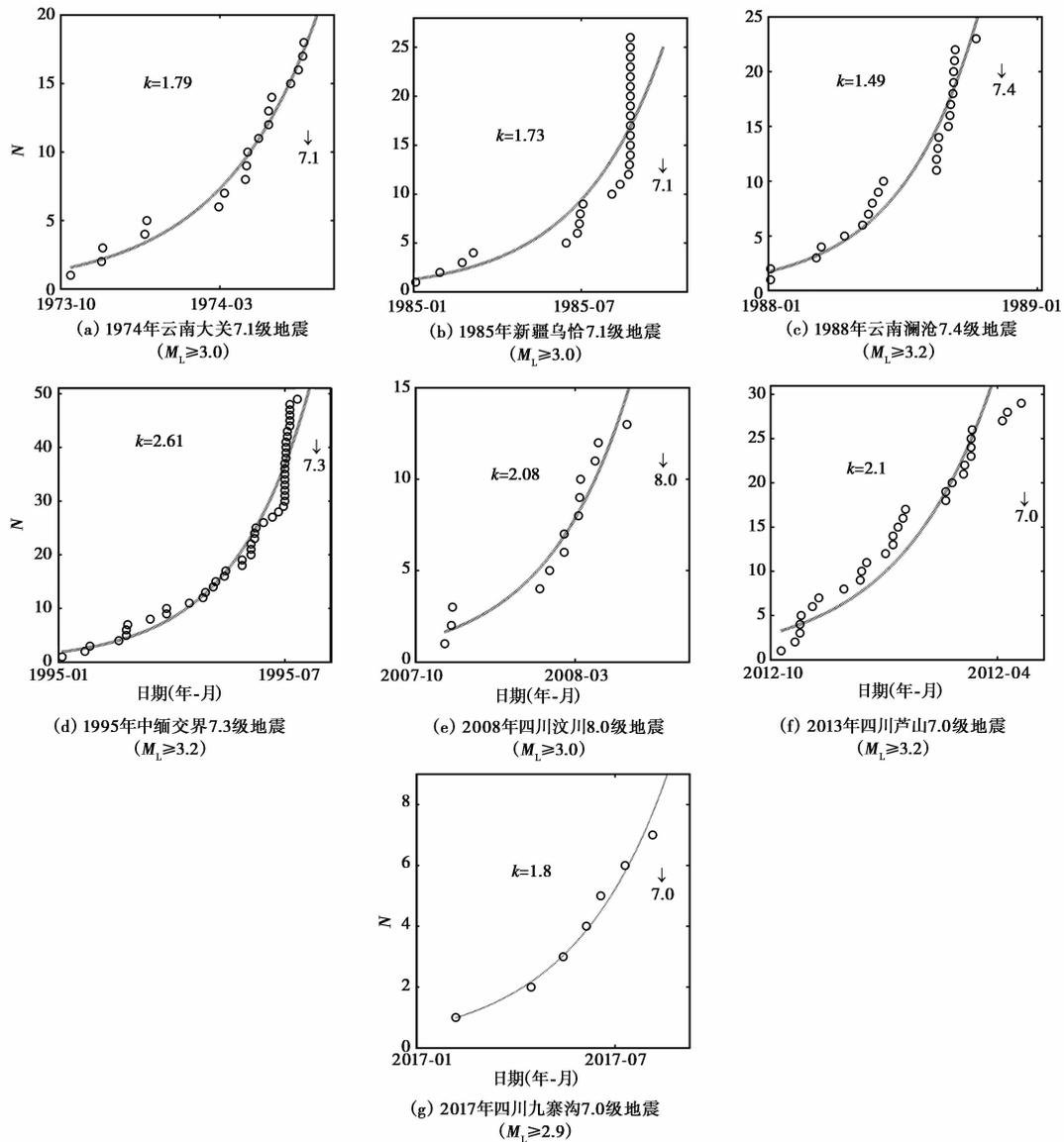
地震	研究区域范围	资料时段 (年-月-日—年-月-日)	N	K	$M_0$
1974年5月11日云南大关7.1级地震	26.5°~29.5°N, 102.5°~105.5°E	1973-10-01—1974-05-10	18	1.7860	3.0
1985年8月23日新疆乌恰7.1级地震	39.0°~41.5°N, 74.5°~77.5°E	1985-01-01—1985-08-22	13	1.4105	3.0
1988年11月6日云南澜沧7.4级地震	20.5°~23.5°N, 99.0°~101.0°E	1988-01-01—1988-11-5	23	1.4925	3.2
1995年7月12日中缅交界7.3级地震	21.0°~24.0°N, 98.5°~102.0°E	1995-01-01—1995-07-11	49	2.6086	3.2
2008年5月12日四川汶川8.0级地震	30.0°~33.5°N, 101.5°~106.0°E	2007-10-01—2008-05-11	13	2.0785	3.0
2013年4月20日四川芦山7.0级地震	29.5°~31.5°N, 102.5°~105.5°E	2012-10-01—2013-04-19	29	2.1020	3.2
2017年8月8日四川九寨沟7.0级地震	32.5°~35.5°N, 102.5°~105.5°E	2017-01-01—2017-08-07	7	1.8033	2.9

计次数的短期指数增长应当能够作为一种地震预测的中短期指标。然而,并非所有7级以上震例前都会出现地震累计次数的短期指数增长现象,本文研究的震例中出现地震累计次数的短期指数增长现象的比例为7/15。从地震累计次数指数增长的角度来看,寻找中短期预测指标的难度远远大于数年尺度的指标。

### 3 结论和讨论

(1) 本文首先讨论了地震活动的累计增长模型,得到在平稳状态下小地震发生近似服从泊松分布规律,大地震前地震累计频次将会出现非线性特性。在此基础上,给出15次7级以上地震前地震累计次数指数增长的震例,得到7级以上地震前小震累计次数存在数年尺度的非线性增长特性,发现部分7级以上地震前小震累计次数存在几个月尺度的中短期非线性特性。

(2) 选择研究区域时应能够涵盖发震构造以及震源区范围,并在此基础上适当调整。在本文的研究过程中,除2017年8月8日四川九寨沟7.0级地震外,选择其他震例的研究区域时均较为顺利。选择2017年四川九寨沟7.0级地震的研究区域时,由于要避开2008年四川汶川8.0级和2013年四川芦山7.0级地震的影响区域,是唯一选择较为困难的震例。



注：图中箭头指示地震发生时间

图 2 7 次震例地震累计次数的短期指数增长曲线 ( $M_1 \geq M_0$ )

(3) 研究 7 级以上地震前小震累计次数数年尺度的非线性增长特性时,期望能够得到非线性增长时间与震级之间的经验关系式,但并未得到令人满意的结果。究其原因,是由于震源区周围的构造应力环境非常复杂,7 级以上地震前小震累计次数数年尺度的非线性增长时间并非仅与震级有关。

(4) 地震累计次数的非线性指数增长应当是大震前的一种异常指标。在正常活动的背景下,起始震级  $M_0$  以上地震的累计次数符合泊松规律,这就说明地震活动在平稳状态下,累计次数曲线不具备非线性变化的特点,也说明图 1 中各震例的地震累计次数指数增长曲线

是大震前的一种异常变化。同时,部分7级以上地震前一定震级以上地震的累计次数存在几个月尺度的短期非线性特性,可以作为地震预测的中短期指标。

### 参考文献

- 安镇文,王林瑛,姚栋华,等,1992.大地震孕育过程中的浑沌特征.地震学报,14(4):393~399.
- 陈棋福,魏东平,2001.地震活动的内在随机性与地震预报.内陆地震,15(4):366~368.
- 陈时军,王志才,陶九庆,1998.非线性震级频度关系与两类地震活动系统.地震学报,20(2):174~184.
- 顾瑾平,2000.非线性震级频次关系在时间项短临预测中的应用.地震,20(增刊I):51~57.
- 哈肯 H,1988.信息与自组织:复杂系统的宏观方法.郭治安,译.成都:四川教育出版社.
- 林振山,2003.非线性科学及其在地质学中的应用.北京:气象出版社.
- 罗灼礼,孟国杰,2002.关于地震丛集特征、成因及临界状态的讨论.地震,22(3):2~14.
- 罗灼礼,王伟君,2012.地震活动性正常与异常的群体概率特征及其在地震预测中的应用——以汶川地震为例.地震,32(3):1~14.
- 罗灼礼,王伟君,陈凌,2000.海城、岫岩地震序列非线性结构特征及判定前震序列的时间结构变异诊断法.地震,20(增刊I):18~27.
- 罗葆荣,1998.云南地震活跃期的大震非线性加速律及对未来3年大震趋势预测.云南天文台台刊,(2):78~84.
- 米亚奇金 B И,布雷斯 W F,1979.地震理论与实验论文集.国家地震局地球物理研究所第三研究室,译.北京:地震出版社,199.
- 吴忠良,1999.鉴别地震活动周期性和随机性的广义 Rydelek-Sacks 检验.地震学报,21(5):487~494.
- 小山顺二,臧绍先,1997.地震活动的随机标度和非线性标度律.地球物理学报,40(1):56~65.
- 杨立明,石特临,郭大庆,1995.地震活动非线性行为的数学建模.地震学报,17(2):180~187.
- 张国民,耿鲁明,石耀霖,1993.中国大陆强震轮回活动的计算机模型研究.中国地震,9(1):20~32.
- 朱元清,石耀霖,1991.地震活动性研究中的非线性动力学模型.地球物理学报,34(1):20~31.
- Kagan Y Y,Knopoff L,1980. Spatial distribution of earthquakes; the two-point correlation function. Geophys J Int,62(2):303~320.
- Scholz C H,1989. Global perspectives of Chaos. Nature,338(6215):459~460.
- Tormann T,Enescu B,Woessner J,et al,2015. Randomness of mega thrust earthquakes implied by rapid stress recovery after the Japan earthquake. Nat Geosci,8(2):152~158.
- Wyss M,1990. Seismic cycle not so simple. Nature,345(6273):290.
- Wyss M,Toya Y,2000. Is background seismicity produced at a stationary Poissonian Rate. Bull Seismol Soc Amer,90(5):1174~1187.

## Nonlinear Analysis on Seismic Activity before $M \geq 7.0$ Earthquakes Occurred in Chinese Mainland

Ma Heqing<sup>1,2)</sup> Yang Mingzhi<sup>1)</sup> Ding Fenghe<sup>1,2)</sup> Luo Guofu<sup>1,2)</sup>

1) Earthquake Agency of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, China

2) Ningxia Center for Research on Earthquake Protection and Disaster Mitigation in Civil Engineering,  
Yinchuan 750021, China

**Abstract** In this paper we discussed the nonlinear increase feature of seismic activity frequency before large earthquakes. By applying the cumulative growth model of seismic activity we found that the occurrence of small earthquakes approximately obeys Poisson's distribution law in a steady state, in which the cumulative frequency of earthquakes shows non-linear behavior before large earthquakes. Then by using the earthquake catalogues of strong and weak earthquakes from China Earthquake Networks Center, we obtained the exponential growth examples of cumulative number of earthquakes before 15  $M \geq 7.0$  earthquakes occurred in Chinese Mainland from 1970. We found that there exists the nonlinear growth characteristic of annual-scale in cumulative number of small earthquakes before  $M \geq 7.0$  earthquakes. The short-term nonlinear characteristic of monthly-scale existed in cumulative number of small earthquakes before some  $M \geq 7.0$  earthquakes, which can be used as a short-medium-term indicator for earthquake prediction.

**Keywords:** Seismic activity; Cumulative frequency; Exponential growth