

地震过程中某些非线性现象及初步分析

张晓东

(青海省地震局, 西宁 810001)

摘要 本文应用非线性动力学中的一些观点, 如对初始条件的敏感性、分形分维、分岔、混沌的预报尺度等观点对小震调制、共维时间、共维面积以及嵌套调制等现象进行了分析研究, 同时对共和地震的一些现象进行了分析。本文的分析对人们认识前兆现象的复杂性有一定的参考价值。

主题词: 非线性理论 分数维 混沌理论 强震

1 前言

众所周知, 孕震体同外界有着物质和能量的交换, 它是一个远离平衡态的复杂大系统。它有确定性的一面, 也有随机性的一面, 是二者的对立统一。这样它表现出了许多单纯用确定性或随机性都不能完美解释的现象, 诸如前兆复杂性、地震时空分布的复杂性等等。以水氧趋势异常为例, 上升、下降、速率加大、突跳等都有可能是地震的异常, 然而, 在距震中不远处的水氧测点却无异常变化。地倾斜异常及其它一些前兆手段有时也有此类现象发生。有学者认为, 前兆变化的复杂性增大, 才是一种可靠的判别异常的方法^[1]。问题的关键在于, 如何从复杂的异常中提取震前异常, 从而对地震作出预报。目前人们发展了许多预报地震的方法, 这些方法只是在一定程度上和一定条件下才能对地震的预测有效, 因此人们很难肯定或否定某一种方法。本文应用有关控制论、系统论、信息论、耗散论、协同论、突变论的某些结果于地震前兆复杂性的研究中, 并以共和地震为例进行了具体分析。

2 非线性系统对外界条件的敏感性

非线性系统对外界条件敏感是有条件的, 即系统进入奇异吸引子后才对外界条件敏感。这时, 在吸引子周边上两个几乎接近的点到吸引子内部呈分离状态, 其分离的程度可用李雅普诺夫指数来衡量^[2]。对于一维非线性映象, 一般用下述公式来分析^[2]:

$$\begin{aligned}x_{n+1} &= \mu x_n (1 - x_n) & x &\in [0, 1] \\ \mu &\in [0, 4]\end{aligned}\quad (1)$$

这里 x_n 代表第 n 代的虫口数, x_{n+1} 代表第 $n+1$ 代的虫口数。这个迭代式表面上十分简单, 实际上它的迭代结果却很复杂。表 1 是对不同的初始值 ($x=0.5, x=0.501$) 以及控制参数 μ 进行迭代, 去除暂态效应的结果。表 1 表明, 当 $0 < \mu < 3.57$ 时不论取什么样的初值 (x_0), 除去暂态效应的结果, 只同 μ 有关而与 x_0 无关, 即 $0 < \mu < 1, x_n \rightarrow 0; 1 \leq \mu < 3, x_n \rightarrow 1 - 1/\mu; 3 \leq \mu < 3.57$ 时进入多点周期。总之, 对于 $0 < \mu < 3.57, x_n$ 与 x_0 无关, 可表示为 $x_n \rightarrow f(\mu)$; 当 $\mu > 3.57$ 时, x_n 不仅与 μ 相关, 与 x_0 也密切相关, x_0 变化 2%, x_n 可变化 100%, 即 $x_n \rightarrow f(\mu, x_0)$ 。

表 1 一维非线性映象迭代结果(去除暂态效应)

$x_{n+1}=\mu x_n(1-x_n)$ 一维非线性映象											
$\begin{matrix} x_n \\ \mu \\ n \end{matrix}$		3.50	3.51	3.52	3.53	3.54	3.55	3.56	3.57	3.58	3.59
5001	0.5	0.874	0.877	0.879	0.881	0.883	0.887	0.889	0.890	0.885	0.874
	0.501	0.874	0.877	0.879	0.881	0.883	0.887	0.889	0.890	0.886	0.895
5002	0.5	0.382	0.377	0.373	0.368	0.364	0.354	0.348	0.348	0.363	0.384
	0.501	0.382	0.377	0.373	0.368	0.364	0.354	0.348	0.348	0.359	0.334
5003	0.5	0.826	0.825	0.823	0.821	0.820	0.812	0.808	0.810	0.828	0.849
	0.501	0.826	0.825	0.823	0.821	0.820	0.812	0.808	0.810	0.824	0.799
5004	0.5	0.500	0.506	0.512	0.517	0.521	0.540	0.550	0.548	0.508	0.459
	0.501	0.500	0.506	0.512	0.517	0.521	0.540	0.550	0.548	0.518	0.575
5005	0.5	0.874	0.877	0.879	0.881	0.883	0.881	0.880	0.884	0.894	0.891
	0.501	0.874	0.877	0.879	0.881	0.883	0.881	0.880	0.884	0.893	0.877
5006	0.5	0.382	0.377	0.373	0.368	0.364	0.370	0.373	0.365	0.337	0.347
	0.501	0.382	0.377	0.373	0.368	0.364	0.370	0.373	0.365	0.339	0.386
5007	0.5	0.826	0.825	0.823	0.821	0.820	0.827	0.833	0.828	0.800	0.813
	0.501	0.826	0.825	0.823	0.821	0.820	0.827	0.833	0.827	0.803	0.851
5008	0.5	0.500	0.506	0.512	0.517	0.521	0.506	0.494	0.507	0.572	0.544
	0.501	0.500	0.506	0.512	0.517	0.521	0.506	0.494	0.508	0.565	0.454
5009	0.5	0.874	0.877	0.879	0.881	0.883	0.887	0.889	0.892	0.876	0.890
	0.501	0.874	0.877	0.879	0.881	0.883	0.887	0.889	0.892	0.879	0.889
5010	0.5	0.382	0.377	0.373	0.368	0.364	0.354	0.348	0.343	0.388	0.350
	0.501	0.382	0.377	0.373	0.368	0.364	0.354	0.348	0.343	0.379	0.351
备注		4 点周期 $x_n(\mu=0.5)=x_n(\mu=0.501)$					8 点周期		混沌		
							$x_n(\mu=0.5)$ $=x_n(\mu=0.501)$		有准周期现象		

从上面的分析可知, $0<\mu<3.57$, x_n 最终的结果是可预知的, 不论外界是否有扰动, 最终的 x_0 与这样的干扰无关, 它是一种内稳态的机制; 当 $\mu>3.57$ 时系统进入混沌状态, 对初始条件以及外界的极小扰动都十分敏感, 其混沌的程度随着 μ 的增大而增加. 从准周期运动一直到整个无序的运动. 这时的解从某种意义上讲是随机的, 更严格的说是伪随机的, (1) 式的迭代值是按固定顺序出现的, 抛硬币以及布朗运动都不存在上述的重现性.

3 孕震系统的非线性^[1]

考虑一孕震体 Ω , ω_0 是外部向单位体积孕震体长时间的平均输入功率; ω_c 是单位孕震

体在地震时释放的平均功率; ϵ 为孕震体介质的应变能密度; ϵ_m 为介质所能储存的最大能量密度。由能量平衡得:

$$\Omega \cdot \Delta \epsilon = (\omega_0 - \omega_c) \cdot \Delta t \cdot \Omega \quad (2)$$

式中 $\Delta \epsilon$ 为介质应变能密度的变化, $(\omega_0 - \omega_c) \cdot \Delta t$ 为在 Δt 时间内单位孕震体释放的能量密度。 Ω 为孕震体的体积。介质应变能密度越大,储存的能量越接近于最大能量密度 ϵ_m ,其 ω_c 就越大,这时有:

$$\omega_c = K \epsilon \frac{\epsilon}{\epsilon_m} = K \epsilon^2 / \epsilon_m \quad (3)$$

其中 K 为比例常数,将(3)式代入(2)式整理得:

$$\frac{\Delta \epsilon}{\Delta t} = \omega_0 - K \epsilon^2 / \epsilon_m \quad (4)$$

取 $\Delta t=1$ 为单位时间,即 $\Delta t=n+1-n$,则 $\Delta \epsilon$ 可表示为 $\Delta \epsilon = \epsilon_{n+1} - \epsilon_n$,代入(4)式整理得:

$$\epsilon_{n+1} = \omega_0 + \epsilon_n - K \epsilon_n^2 / \epsilon_m \quad (5)$$

将(5)式化为标准形式得:

$$x_{n+1} = \mu x_n (1 - x_n) \quad (6)$$

其中

$$x_n = (K / \epsilon_m) \cdot (\epsilon_n + \sqrt{\omega_0 \epsilon_m / K}) / (1 + 2 \sqrt{\omega_0 K / \epsilon_m})$$

$$\mu = 1 + 2 \sqrt{\omega_0 K / \epsilon_m}$$

ϵ_n 代表第 n 次地震前介质的应变能密度, $\epsilon_n - \epsilon_{n+1}$ 表示第 n 次地震前后介质应变能密度的变化。它是一个一维非线性映象的动力学方程。类似于(1)式的讨论,很容易得到上述各式的分岔点如下:

当 $\epsilon_m > K \omega_0$, $\epsilon_n \rightarrow \sqrt{\omega_0 \epsilon_m / K}$,为定常吸引子;

当 $K \omega_0 \geq \epsilon_m > 0.61 K \omega_0$, ϵ_n 进入多点周期,为周期吸引子;

当 $\epsilon_m \leq 0.61 K \omega_0$, ϵ_n 进入无穷点周期,即为混沌(奇异)吸引子。

根据上面的结果可以认为, $\epsilon_m = 0.61 K \omega_0$ 是周期吸引子与混沌吸引子的分界点; $\epsilon_m = K \omega_0$ 是定常吸引子与周期吸引子的分界点。当孕震系统进入混沌吸引子后,对外界的扰动十分敏感,易受外界因素的调制和触发。需要注意的是,0.61是(0,1)之间的黄金分割数,郭增建提出的黄金分割数的意义在这里又重现了^[3]。

为了进一步研究地震的调制和触发现象,我们更全面地建立了一个孕震体孕震、发震的动力学方程。设孕震体 Ω 在孕震初始时间 t_0 所具有的能量为 E_0 ,在初始以后外部对孕震体输入的功率为 P ,孕震体释放的功率为 ω ,此时孕震体开始积累和释放能量,到孕震体解体后具有的能量为 E_0 , e 为孕震体单位时间所储存的应变能。由能量守恒定律得:

$$E_0 + \int_{t_0}^t e dt + \int_{t_0}^t \omega dt - \int_{t_0}^t p dt = E_0$$

整理得:

$$\int_{t_0}^t e dt = \int_{t_0}^t p dt - \int_{t_0}^t \omega dt$$

令 $\Delta t = t - t_0$,经过简单的整理、推导得:

$$\frac{\epsilon(t) - \epsilon(t_0)}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^t p dt - \omega_c$$

即

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^t p dt - \omega_c \quad (7)$$

一般情况下 $\omega_0 = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^t p dt$, (7) 式成为 (2) 式。但是, 当外部的输入功率偏离一个方向时 (如受到日、月等天体的作用), 可认为 $P = \bar{P} + \delta$, $\bar{P}$ 为孕震体过去长时间的平均输入功率, 它等于 ω_0 , 这时 (7) 式为:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} = \omega_0 + \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^t \delta dt - \omega_c$$

如果偏离的均值为 0, 上式为 (2) 式, 当受一个方向的偏离作用时, $\bar{\delta} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^t \delta dt$ 不为 0, 令 $\bar{\delta} = \Delta \omega_0$, $\omega_0' = \omega_0 + \Delta \omega_0$, 上式可化为:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} = \omega_0' - \omega_c$$

这时

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} = \omega_0' - K \varepsilon^2 / \varepsilon_m \quad (8)$$

$$\varepsilon_{n+1} = \omega_0' + \varepsilon_n - K \varepsilon_n^2 / \varepsilon_m \quad (9)$$

同样可得:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_m > K \omega_0' & \text{ 为定常吸引子} \\ K \omega_0' > \varepsilon_m > 0.61 K \omega_0' & \text{ 为周期吸引子} \\ \varepsilon_m \leq 0.61 K \omega_0' & \text{ 为混沌吸引子} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

3 小震调制和大震发生时间的分析

固体潮调制小震法是秦保燕在 1982 年提出的。其物理基础是基于地震孕育的组合模式, 即应力调整单元和应力积累单元组合而成为震源。应力调整单元具有岩石强度较低、介质比较脆弱、易于变形等特征。容易积累和释放能量 (也就是上节提到的 ε_m 较小), 如断裂带、破碎带或岩石密度较小的地区。当固体潮作用于应力调整单元时就容易触发小震, 其发震时间表现为与固体潮同步的特征。在应力积累单元, 由于岩石强度较高, 均匀程度较好 (即 ε_m 较大) 小震的发生主要取决于该区域的应力水平、岩石局部的不均匀性和小震能量的释放条件, 固体潮对小震的触发较为困难, 其小震发生的时间与固体潮也不同步。因此把与固体潮相关性好的地震称为调制小震, 反之称非调制小震。当调制比增长到超过自然概率 $P = 0.27$ 时就可以认为震源及其外围地区处于不稳定的状态了, 大的地震可能要临近。地球表面介质近于弹塑性, 对引潮力的响应可能有滞后, 究竟取哪个时段来表示固体潮引潮力最大作用时段, 还要通过实际的统计分析才能确定。作者拟用一维非线性映象的观点解释上述现象。由 (10) 式

$$\varepsilon_m \leq 0.61 K \omega_0' \quad (\text{参考 } \varepsilon_m \leq 0.61 K \omega_0)$$

对于应力调整单元 ε_m 较小, 对于应力积累单元 ε_m 较大, 如果在同一输入功率作用下 (ω_0' 为常量), 一般情况下 K 为常量, 这样首先满足上式的是应力调整单元, 对于应力积累单元来说上式比较难满足, 即应力调整单元先进入混沌吸引子状态。当受到固体潮作用时 $\Delta \omega_0 > 0$,

$\omega_0' > \omega_0$, (10)式更易满足。调整单元进入混沌状态后,对外界的环境条件变化极为敏感,又因为固体潮对孕震体的应变能密度也有扰动,所以小震活动此时极易受固体潮的调制,可以说调整单元进入混沌状态的一个外部表象就是调制小震增加。

调整单元进入混沌状态后,积累单元也会逐渐的进入混沌状态,当积累单元进入混沌状态以后,也会响应外因的某种或几种周期的调制,这样大震临近时往往受天文、气象等因素的作用,从而发生在节气日、塑望日、奇异日等等也就不足为奇了^[4]。

4 混沌与共维时间和共维面积之关系

共维时间、共维面积是指震源孕育过程进入非线性状态后,其分维数的时间、空间分布各为常量的现象^[5]。

当非线性系统临近混沌状态时,涨落的延续时间越来越大,可预测的时间尺度放得越大,预测精度越低,但是非线性系统在混沌状态时的分维数是不变的。正因为它对初始条件敏感,它的一些统计量并不因初始条件的变化而变化。参考(6)式,当 $\mu \rightarrow \mu_\infty = 3.57$ 时,涨落的延续时间 τ 可表为^{[2][6-9]}

$$\tau \propto |\mu - \mu_\infty|^{-\alpha} \quad (11)$$

其中 $\alpha = \log 2 / \log \delta$, $\delta = 4.66920$ 为费肯鲍姆常数。对于 $\mu = \mu_\infty$, 不论初始条件如何变化,其分维数 $D = 0.538$ 。由于上述的临界慢化现象,在 μ 接近和等于 μ_∞ 时,其分维数是不变的,共维时间也正是反映的这种情形。在空间上将孕震体分成多个子孕震元,当系统临近混沌和进入混沌的初期,类似上面的讨论,每个子孕震元的分维数都是相同的,对于本文的一维非线性映象, $D = 0.538$, 可见只要有共维时间存在,必有共维面积伴随。

5 层次调制、混沌的预报尺度

当孕震系统进入混沌吸引子后,它易受外界因素的干扰,特别是当混沌吸引子的一些内在的周期(或准周期)同外界干扰或调制的周期一致时,会产生诸如共振吸收的现象,这时系统响应外界的调制能力会很强。

外界因素作用于孕震体的强度和周期不一样,因此孕震系统对它们的响应程度包括响应的幅度、响应时间、响应的位置也不一样(表2)。也就是说,外界的作用是分层次的,系统对它们的响应也是分层次的,而且有些作用是相互的,有反馈作用存在。如孕震过程中,孕震体周围的温度会升高,地温也可能升高,由于温度的升高使孕震体周围的介质弱化,更有利于发震,这是一种正反馈作用。

一般情况下,大震的孕震时间长($\log T = aM + b$),其进入混沌状态的时间也就越长(M 正比于进入非线性状态的时间 ΔT ^[5]),这样一来,孕震体就会先受大尺度外界因素的作用,如太阳黑子的作用。当孕震体进入混沌状态时,它又会受较小时间尺度外界因素的调制,同时也还受着较大时间尺度因素的作用。如大震发生在7月、8月的比例相当大,这两个月正是一年中日长变化最大的时段,它受地球公转和自转的影响^[10]。总之外界因素对震源体的作用不是等同的。一个孕震体可能对某些周期的外界因素的作用响应很强,对另一些周期或非周期的外界因素的作用响应较弱,见表2。

假定孕震系统是一个 d 维相空间内的系统(即系统内慢变量的个数为 d ^[11]),它的可预

测的时间尺度,就是该系统内 d 个方向的正的李雅普诺夫指数之和的倒数。这些正的李雅普诺夫指数之和越大,可预测的时间尺度越短,预测的精度越高。对于 d 维相空间中的每一个方向,设 $L(0)$ 是 $t=0$ 时初始状态的偏离, $L(t)$ 是 t 时刻后其相轨道的偏离,则李雅普诺夫 (Lyapunov) 指数 λ 定义为

$$\begin{cases} L(t)=L(0)e^{\lambda t} \\ \lambda=\frac{1}{t}\log\frac{L(t)}{L(0)} \end{cases}$$

它代表时间 t 内某一方向的平均相轨道的发散率^[12]。

特别需要指出的是,当孕震体(系统)演进到混沌状态后,当控制参数演进到一定的值时系统会出现阵发性的混沌,表现在时间行为上是忽而周期,忽而混沌,系统随机地在二者间跳跃。一般人们只注意系统经过倍周期分岔进入混沌状态,然而阵发性混沌与倍周期分岔是孪生现象^[2]。原则上讲,凡是能有倍周期分岔的系统,均应有阵发性的混沌。反映到孕震系统中就出现前兆震群、小震活动、前兆手段异常等复杂变化,这就可能是孕震系统进入阵发性混沌状态所产生的现象。对于调制小震,此时也可能出现调制比忽强忽弱的现象。对于(6)式,当 $\mu=\mu_c=3.898$ 时,系统出现阵发性的混沌(intermittent chaos)。

表 2 孕震体响应外界因素一览表

外界因素	响应强度	响应时间	响应地点	响应特征
地球公转	较强	数年—数 10 年	已进入非线性阶段的孕震区域	持续作用于孕震体、反馈调制、触发
太阳黑子		14 年左右		
地球自转		数年—数 10 年		
其它一些天文因素	不清	不清	同上	不清
固体潮	较强	1 月内	同上	调制、触发
地温	较强	不清	同上	反馈作用
干旱	一般	不清	同上	反馈作用
降雨	一般(部分区域明显)	几年	同上	反馈作用
气温	一般	几年	同上	反馈作用
气压	明显	几天—几月	同上	反馈、触发
大风	一般(部分区域明显)	几天	同上	反馈、触发
其它一些未知因素	不清	不清	同上	不清

总之,系统进入混沌状态或阵发性混沌状态后,对其进行预测是相当困难的,单纯地从系统自身的演化来预测是很不实际的,此时应从外界因素的调制和触发再配合混沌的预测尺度来进行。下面以 1990 年 4 月 26 日共和 7.0 级地震前距震中 160 km 的佐署水位的变化过程来说明。

该次地震前,佐署水位的变化过程见表 3。其水位异常的发展可分为 3 个阶段:第一个阶段是在平静的变化背景中于 1990 年 4 月 1 日出现了波动,之后平静;第二阶段从 4 月 8 日开始出现了高频脉动,并一直持续到 4 月 17 日;第三阶段从 4 月 17 日开始出现波动和高

频脉动的迭加,并且忽强忽弱。4 月 26 日发生了该次地震。可以说从 1990 年 4 月 1 日开始孕震系统已进入了非线性混沌阶段,这时对发震时间的预测是很困难的。仔细分析水位的变化情况发现其异常发展中的 3 个阶段直至 4 月 26 日地震的发生,其间隔时间皆是倍九的。这是由于孕震系统进入混沌状态后受外因的调制,同外因的倍九周期共振,这样就出现了倍九现象。

另外,共和地震的强余震的发震时间也存在倍九现象:

- (1)1990 年 5 月 7 日 5.5 级地震同 1990 年 5 月 16 日 5.3 级地震间隔 9 天。
- (2)1994 年 1 月 3 日 6.0 级地震同 1994 年 2 月 16 日 5.8 级地震间隔 45 天。
- (3)1994 年 9 月 4 日 5.2 级地震同 1994 年 10 月 10 日 5.3 级地震间隔 36 天。
- (4)1994 年 9 月 24 日 5.5 级地震同 1994 年 10 月 12 日 4.8 级地震间隔 18 天。
- (5)1994 年 10 月 10 日共和 5.3 级地震同 1994 年 11 月 24 日共和 4.8 级地震间隔 45 天。

这种多次地震的严格倍九现象在国内还是比较少见的。

表 3

异常时间	4 月 1 日	4 月 8 日	4 月 17 日	4 月 26 日
异常形态	正常变化中出现幅度变化	出现高频脉动	出现高频脉动与幅度变化	变化加剧地震发生
距震前时间	26 天 (27—1 天)	18 天	9 天	0 天

另一个引人注目的倍九现象是共和发生 5 级以上地震前 8—9 天,距共和 40—50 km 的龙羊峡电厂电磁波大都出现异常(这样的震例已有 4 次),由此可以认为,共和地震的前兆和余震确实存在一种呈倍九的周期因素在调制、触发它。

位于震中区的塘格木农场深井地温(深 20 米),在 1994 年 9—10 月份的 3 次 5 级以上地震前均出现了显著的降温异常(图 1—3),降温过程十分类似,降温幅度大致相等($\Delta T=0.05^{\circ}\text{C}$),降到温度最低值所用的时间大致相等($\Delta t=8$ 小时)。降温过程中所遵循的规律一致,即

$$T=a-b\ln(t-t_0) \tag{11}$$

其中 T 为温度,t 为时间,t₀ 为降温初始时间,a、b 为常数。其拟合精度很高,r>0.99(图 4)。从过去的一些震例来看,震前降温异常位于震中区的居多。

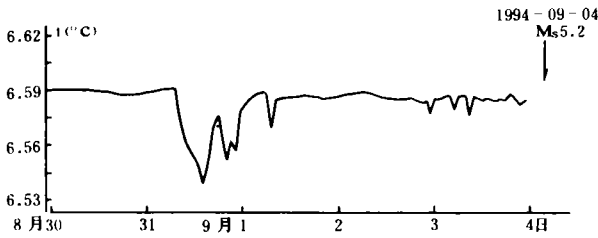


图 1 1994 年 9 月 4 日 5.2 级地震前塘格木农场深井地温异常变化曲线

Fig. 1 Anomaly change curve of deep well geotemperature in Tanggemu farm before the Ms 5.2 earthquake on Sep. 4, 1994.

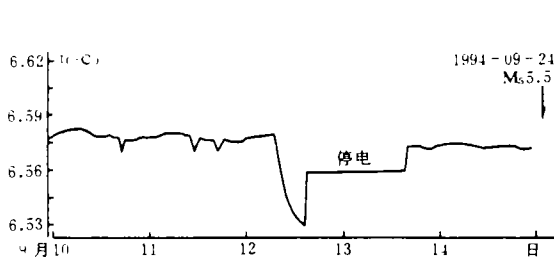


图 2 1994 年 9 月 24 日 5.5 级地震前塘格木农场深井地温异常变化曲线

Fig. 2 Anomaly change curve of deep well geotemperature in Tanggemu farm before the Ms 5.5 earthquake on Sep. 24, 1994

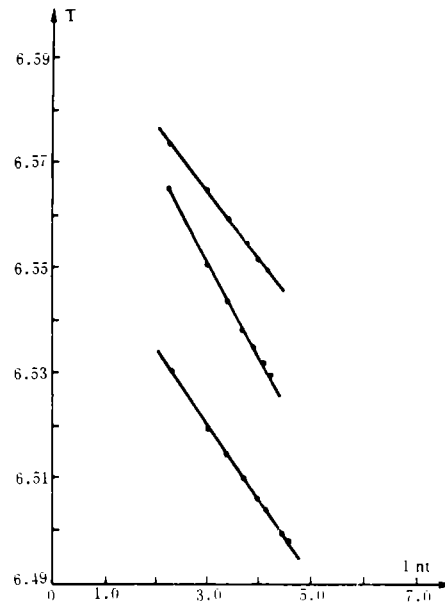


图 4 三次显著的降温过程 T(温度) -ln t(小时)分布图 ($t' = t \times 10$, t 为异常小时数)

Fig. 4 T(°C)-ln t(hour) curves during three times obvious temperature drop processes.

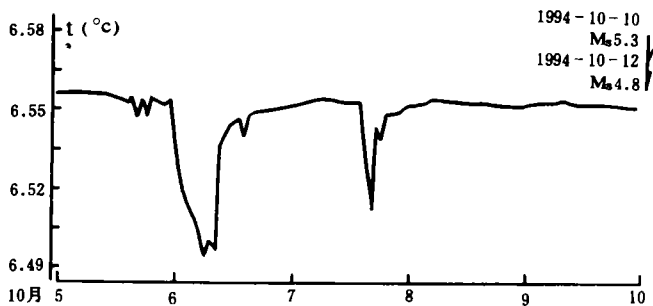


图 3 1994 年 10 月 10 日 5.3 和 10 月 12 日 4.8 级地震前塘格木农场地温异常变化曲线

Fig. 3 Anomaly change curve of deep well geotemperature in Tanggemu farm before the Ms 5.3 and Ms 4.8 earthquakes on Oct. 10 and 12, 1994.

对(11)式求导,整理可得:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{b}{(t_0 - t)} \quad (12)$$

(12)式表明,地温下降速率同降温所需的时间成反比。它可能是由于震源区临震前的断层蠕滑所致,一旦蠕滑发生,震源区的应力状态会马上松弛,然后快速增长,在应力松弛的一段时间内,震源区的温度会显著下降,遵守(11)、(12)式的规律,这可能

反映了应力积累单元进入非线性临震状态后的一次最大的涨落加剧,也是临震的异常反应。

(本文 1994 年 3 月 2 日收到)

参考文献

- 1 陈颢,等. 分形和混沌在地球科学中的应用. 北京:学术书刊出版社,1989. 85—112
- 2 郝柏林. 分岔、混沌、奇怪吸引子、湍流及其它. 物理学进展,1983,3(3):1—45
- 3 郭增建. 黄金分割数在灾害科学中的意义. 西北地震学报,1986,9(4):85—86
- 4 秦保燕,等. 西海固地区小震调制特征. 西北地震学报,1983,(海原 5.5 级地震专辑)
- 5 秦保燕,郭增建. 大震前地震参数多维时空域与地震强度相关性初探. 高原地震,1990,2(4):8—16

- 6 Wolf A. Determining Lypunov exponents from a time series. *Physica*, 1985,(160):285--317
- 7 刘式达. 地球系统模拟和混沌时间序列. *地球物理学报*, 1990, 33(2):144--153
- 8 尼科里斯, 普里高津. 探索复杂性. 成都: 四川教育出版社, 1986. 188—202
- 9 郭增建, 等. 临界慢化与地震预报. *西北地震学报*, 1988, 11(1):68—69
- 10 郑大伟, 叶民权. 地球自转运动与新疆灾害性地震. *科学通报*, 1990, 35(8):619—620
- 11 汪秉宏. 混沌动力学. 北京: 地震出版社, 1992. 129—138
- 12 高安秀树. (沈步明等译). 分数维. 北京: 地震出版社, 1989. 79—81, 175—176

PRELIMINARY ANALYSIS AND STUDY ON SOME NON-LINEAR PHENOMENA IN EARTHQUAKE PROCESS

Zhang Xiaodong

(*Seismological Bureau of Qinghai Province, Xining 810001*)

Abstract

In this paper, by using some view points of non-linear dynamics, for example, sensitivity to original condition, fractal dimension, bifurcation, chaos prediction size of earthquake process, and so on, we discussed the modulation triggering, common dimension time and area and inlay modulating of small earthquakes. Author also analyzes some anomaly phenomena of the Gonghe earthquake in Qinghai province in 1990. The analysis has certain reference value to understanding precursory complexity of earthquake.

Key words: Nonlinear theory, fractal, Chaos theory, Strong earthquake