

刘月,尹祥础,袁帅等.量纲分析应用于地震预测的探索.地球物理学报,2012,55(9):3043-3050,doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.022.

Liu Y, Yin X C, Yuan S, et al. Exploration study of dimension analysis applying to earthquake prediction. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(9):3043-3050,doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.022.

## 量纲分析应用于地震预测的探索

刘月<sup>1</sup>,尹祥础<sup>1,2</sup>,袁帅<sup>1</sup>,张浪平<sup>2\*</sup>

1 中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室,北京 100190

2 中国地震局地震预测研究所,北京 100036

**摘 要** 加卸载响应比(LURR)的基本思路是希望能够通过刻画震源区介质的损伤程度,反映地震孕育的进程,从而预测地震.近 30 年来,很多人对加卸载响应比做了大量基础研究,取得了一系列新的进展.加卸载响应比在地震预测实践中也取得了一定的效果,异常区与地震发生的位置有较好的对应性,但是预测效果仍不够理想.究其原因主要是:在实际预测中对当地的地球物理情况考虑的不够.本文采用量纲分析与加卸载响应比结合的方法,综合考虑当地的地球物理情况,例如剪应变率和平均地震波能量等因素的影响.文中选取 1970 年以来发生在中国大陆的 34 个震例资料,通过分析得到了与发震震级和时间相关的无量纲量  $\pi_1$  和  $\pi_3$ ,根据对实际数据的拟合, $\pi_1$  和  $\pi_3$  均与震级成指数关系.在应用于地震预测实践时,首先根据 LURR 空间扫描结果选取异常区,然后确定异常区的地球物理参数,通过  $\pi_1$  确定震级  $M$ ,再由  $\pi_3$  确定发震时间  $T$ .

**关键词** 加卸载响应比,量纲分析,地震预测

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.022

中图分类号 P315

收稿日期 2011-10-31,2012-08-30 收修定稿

### Exploration study of dimension analysis applying to earthquake prediction

LIU Yue<sup>1</sup>, YIN Xiang-Chu<sup>1,2</sup>, YUAN Shuai<sup>1</sup>, ZHANG Lang-Ping<sup>2\*</sup>

1 State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2 Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

**Abstract** The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory is a new method in earthquake prediction. LURR is defined as the medium's response to loading divided by the response to unloading. For the earth medium, the earth tide provides a natural way to load and unload. Benioff strain is selected as the response quantity. Through space-time scanning in Chinese mainland as well as other regions, the abnormal region where an earthquake may occur can be got. Then we hope the LURR in the abnormal region can reflect the preparation process of earthquake through depicting the damage of seismogenic zone, and then predict earthquake. It's about thirty years since LURR was put forward. These years many people have done a series research on LURR, and have got some achievements. In practice of earthquake prediction, LURR has achieved success to some extent. Many earthquakes occurred in the abnormal zones

**基金项目** 国家自然科学基金“材料强度及灾变的跨尺度力学研究”创新群体项目(11021262);中国科学院“十一五”信息化专项“超级计算环境建设与应用(INFO-115-B01);中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(02092425)资助.

**作者简介** 刘月,女,1986年生,中国科学院力学研究所在读博士研究生,主要从事地震力学、地震预测等方面的研究.

E-mail: liuyue@lnm.imech.ac.cn

**\* 通讯作者** 张浪平,1982年生,博士,副研究员,2009年毕业于中国科学院力学研究所,主要从事脆性介质破坏前兆、地震力学与地震活动性方面的研究. E-mail: zlp@seis.ac.cn

from LURR's space-time scanning. But the result is not as good as we wished, the main reason is that we don't consider the geophysical condition enough. In this paper, we combine dimensional analysis with LURR method, considering the local geophysical condition, for example the shear strain rate and the average seismic wave energy etc. Using the data of 34 seismic cases which occurred in Chinese mainland since 1970, we obtain two dimensionless quantities  $\pi_1$  and  $\pi_3$  related with the earthquake magnitude and occurrence time. Through the process of data fitting, the relationships between  $\pi_1$  and magnitude and between  $\pi_3$  and occurrence time have been obtained. Applying the result to earthquake prediction, we should determine the seismogenic zone according to LURR's space-time scanning result at first; then after determining the geophysical parameters of the specific seismogenic zone, we can get the magnitude and the occurrence time for the future earthquake through  $\pi_1$  and  $\pi_3$  separately.

**Keywords** Load/Unload Response Ratio(LURR), Dimensional analysis, Earthquake prediction

## 1 引言

加卸载响应比理论(LURR)<sup>[1-6]</sup>是预测地震的新方法,把介质加载响应与卸载响应的比值定义为加卸载响应比.对于地球介质,日月运行产生的引潮力为它提供了天然的加卸载手段.我们以贝尼奥夫应变作为响应量确定孕震区的加卸载响应比演化过程,刻画震源区介质的损伤程度,反映地震孕育的进程,从而预测地震.它自20世纪80年代提出,至今已近30年,在这期间很多人对加卸载响应比做了大量基础研究,包括物理机制、实验研究和数值模拟,并取得了一系列新的进展<sup>[7-17]</sup>.在地震预测实践中加卸载响应比取得了一定的效果,异常区与地震发生的位置有较好的对应性<sup>[18-20]</sup>,但是总的来说,预测效果仍不尽如人意,究其原因主要在于,在实际预测中与当地的地球物理条件结合得不够.例如,本课题组通过统计研究得到了发震时间与震级( $M \geq 5$ )的函数关系式<sup>[21]</sup>.在新疆地区应用此结果发现,该地区的实际发震时间远小于根据公式算出的时间.导致这一结果的原因是新疆地区构造运动剧烈,剪切应变率较大.这说明特征时间不只是震级的函数,还与当地的地质构造有关,所以地震预测一定要与当地的实际情况结合.

量纲分析综合考虑诸多因素对地震的影响.而今,“量纲分析在科学和技术的各个分支的基础理论和实际问题中得到广泛的应用,它是分析和研究问题的有力手段和方法,是探讨科学规律,解决科学和工程问题的有效工具”<sup>[22-24]</sup>.本文尝试将量纲分析与加卸载响应比结合应用于地震预测.

地震预测是根据我们对地震规律的认识,预测

未来地震发生的地点、强度和时间.这三点也是地震预测面临的三大难题.文中采用量纲分析与加卸载响应比相结合的方法,选用自1970年以来发生在中国大陆的34个地震资料(见表1),讨论如何对未来地震发生的地点、强度和时间进行判断.

## 2 量纲分析过程

地震预测必须预测未来地震发生的时间、地点和强度,这三点也是地震预测的三要素,简称时、空、强.以下分别讨论.根据量纲分析与加卸载响应比相结合的分析过程,首先判断地震发生的地点.

### 2.1 预测未来地震发生的地点

20年来,我们连续对中国大陆进行LURR的近实时的时空扫描.结果表明,发生在资料较好地区的地震大都落在LURR的异常区内<sup>[12]</sup>.所以,可以根据LURR异常区预测未来地震发生的地点.为了规范加卸载响应比扫描时的参数,便于对不同时段、地区和研究者的结果进行比较,我们规范了加卸载响应比扫描的固定的扫描半径及对应的时间段,如扫描半径为200 km对应的时间段是18个月.文中使用的震例,根据加卸载响应比的演化结果选取孕震区,观察并选取对应地震异常区面积最大的区域.对于未发生地震,且资料充足地区,若某一异常区稳定存在,并呈现典型的演化规律(加卸载响应比由小变大,达到峰值后再变小),可以初步判定该地区有可能发生地震,并选取异常区面积最大的区域,根据该地区的地球物理参数,通过量纲分析与LURR的结合,对地震强度和发震时间做进一步的判断.

### 2.2 预测未来地震的强度

地震的强度通常用震级 $M$ 来表示,它是通过地

表 1 选用的地震

Table 1 The earthquakes used in the paper

地点	发震时间	东经(°)	北纬(°)	$M_s$
唐山	1976-07-28	118.18	39.63	7.8
巴音木仁	1976-09-23	106.35	40.08	6.2
格尔木	1977-01-19	95.8	37.1	6.3
新疆库车	1977-07-23	83.50	42.10	5.4
道孚	1981-01-24	101.17	31.00	6.9
四川甘孜	1982-06-16	99.85	31.83	6.0
云南禄劝	1985-04-18	102.85	25.87	6.3
昆仑山	1985-08-12	95.88	36.93	5.3
青海门源	1986-08-26	101.57	37.70	6.4
云南澜沧	1988-11-06	99.72	22.83	7.6
青海共和	1990-04-26	100.13	36.12	6.9
甘肃	1990-10-20	103.60	37.12	6.2
新疆拜城	1995-09-26	81.57	41.77	5.1
阿图什	1996-03-19	76.63	40.13	6.9
包头	1996-05-03	109.68	40.78	6.4
内蒙古	1996-07-17	120.42	42.07	4.6
山西	1998-07-11	110.63	34.95	4.6
西藏芒康	1999-06-01	98.5	29.00	5.0
昆仑山口	2001-11-74	90.53	36.93	8.1
甘肃玉门	2002-12-14	97.33	39.82	5.9
喀什	2003-02-24	77.27	39.62	6.8
德令哈	2003-04-17	96.57	37.65	6.6
甘肃玛曲	2004-03-04	100.97	34.08	4.8
福建	2007-03-13	117.73	26.72	4.7
新疆	2008-01-17	84.27	43.65	4.7
汶川	2008-05-12	103.40	31.00	8.0
阿勒泰	2008-08-06	93.12	45.10	4.9
西藏当雄	2008-10-06	90.30	29.80	6.6
青海海西	2008-11-10	95.90	37.60	6.3
新疆	2009-01-25	80.9	43.30	5.0
新疆柯坪	2009-02-20	78.70	40.70	5.2
阿图什	2009-04-22	77.40	40.10	5.0
云南姚安	2009-07-09	101.10	25.60	6.0
青海海西	2009-08-28	95.80	37.60	6.4

震释放的地震波能量  $E_s$  来衡量的. 影响地震能量释放的因素很多, 那么量纲分析中的变量该如何选取呢? 从能量平衡这一基本物理角度出发, 考虑到资料获得的可能性, 我们选取了如下变量:  $E_w$ ,  $I_{pp}$ ,  $\dot{\gamma}$ ,

$h$ , 认为它们和震级有关.

$E_w$ : 某一地区地震活动性的定量表征.  $E_w$  等于该地区长时期 ( $T$ ) 里所有地震辐射的地震波能量总和, 除以  $T$  和其面积, 单位是  $J/(km^2 \cdot s^{-1})$ . 从能量平衡的角度看, 它也和该地区长时间里由于构造运动积累的能量 (应变能) 有关. 我们用 1900 年到 2009 年这 110 年的地震目录, 计算了地震波辐射的总能量, 再除以时间和面积就得到中国大陆各地单位时间和面积释放的平均地震波能量  $E_w$ . 中国大陆各地  $E_w$  的分布见图 1.

$I_{pp}$ : 首先定义面积分  $I_t$  为:

$$I_t = \iint_{Y \geq 1} Y dx dy = \bar{Y} \times A, \quad (1)$$

$I_t$  是随时间变化的, 它是孕震区的面积  $A$  和 LURR 的平均值  $\bar{Y}$  的乘积, 综合地表征了孕震区的大小和程度, 单位  $km^2$ .

$I_{pp}$  是  $I_t$  的最大值. 图 2 是汶川地震 (2008) 异常区的  $I_t$  变化和地震时序 (通常称为  $M-T$  图).

$\dot{\gamma}$ : 某一地区的剪切应变率, 单位是  $10^{-9} rad/a$ . 某一地区的剪切应变率表征该地区的构造运动的剪应力加载率 (二者只差一个弹性常数, 但应变率便于测量). 本文主要采用沈正康等<sup>[25]</sup> 用 GPS 测量得到的结果, 同时参照顾国华<sup>[26]</sup> 的结果.

$h$ : 孕震区的厚度, 单位  $km$ . 令  $V = A \times h$ , 可以将  $V$  看作孕震区的体积.

根据以上参数做量纲分析如下:

$$[E_s] = [E_w]^{a_1} \cdot [I_{pp}]^{a_2} \cdot [h]^{a_3} \cdot [\dot{\gamma}]^{a_4}, \quad (2)$$

本文选取时间 ( $T$ ), 长度 ( $L$ ) 和力 ( $F$ ) 作为基本量纲, 把 (2) 式写成量纲的形式为:

$$[F \cdot L] = [F \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}]^{a_1} \cdot [L^2]^{a_2} \cdot [L]^{a_3} \cdot [T^{-1}]^{a_4}, \quad (3)$$

令  $\beta = h/\sqrt{A}$ , 最后得出:

$$E_s \propto \frac{E_w}{\dot{\gamma}} \cdot I_{pp}^{2/3} \cdot (\beta \cdot \sqrt{I_{pp}})^{2/3} = \beta^{2/3} \cdot \frac{E_w \cdot I_{pp}}{\dot{\gamma}}, \quad (4)$$

由 (4) 式可以得到:

$$\frac{E_s \cdot \dot{\gamma}}{E_w \cdot I_{pp}} \propto \beta^{2/3}, \quad (5)$$

显然 (5) 式左边和右边都是无量纲量, 由此得到无量纲数

$$\pi_1 = \frac{E_s \cdot \dot{\gamma}}{E_w \cdot I_{pp}}, \quad (6)$$

若令

$$E_d = \frac{E_w \cdot I_{pp}}{\dot{\gamma}}, \quad (7)$$

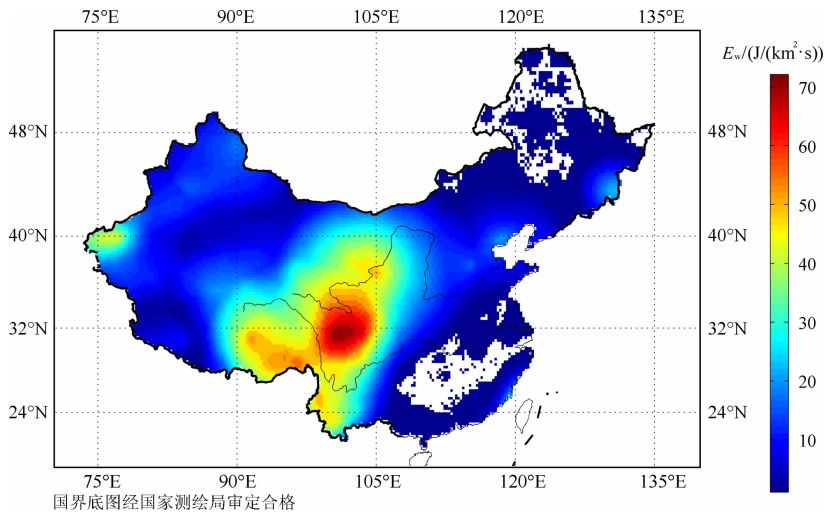


图 1 中国陆地各地平均地震波能量  $E_w$  的分布图

Fig. 1 The distribution of the average seismic wave energy in Chinese Mainland

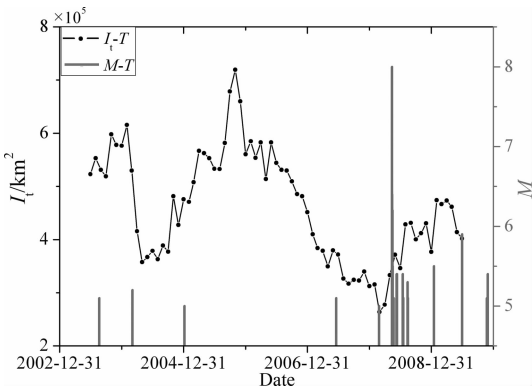


图 2 汶川地震(2008)异常区的  $I_t$  和地震时序

Fig. 2  $I_t$  and the earthquake sequence in the seismicogenic zone of Wenchuan earthquake in 2008

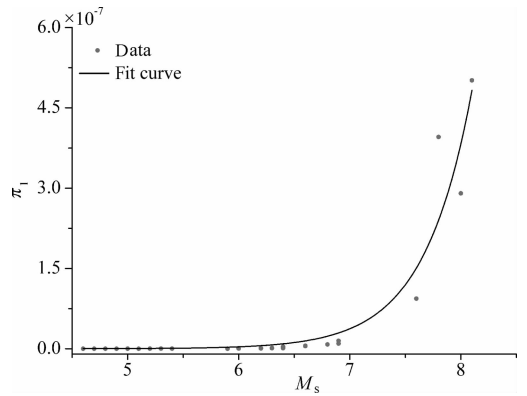


图 3  $\pi_1$  与震级的关系

Fig. 3 The relation between  $\pi_1$  and the magnitude of earthquake

则

$$\pi_1 = \frac{E_s}{E_d}, \tag{8}$$

$\pi_1$  是震级的函数, 即  $\pi_1 = f(M)$ , 通过 excel 拟合曲线,  $R^2 = 0.96$  ( $R^2$  是拟合曲线中自变量和因变量的相关系数, 越接近 1 说明自变量和因变量越相关, 曲线拟合得越好), 见图 3.

最后得到数学关系式:

$$\pi_1 = 1 \times 10^{-17} \times e^{3.006M_s} (R^2 = 0.96), \tag{9}$$

由上式反推出的震级记为  $M_{s1}$ ,

$$M_{s1} = 5.141gE_d - 112.08, \tag{10}$$

把经过数据处理后的结果记为  $M_{sp}$ :

$$M_{sp} = M_{s1} \pm 0.1 \times M_{s1}, \tag{11}$$

上式中误差项的系数 0.1<sup>[23]</sup> 是经过数据处理后确定的.  $M_{sp}$  即为预测未来发生地震的震级.

### 2.3 预测未来地震的发震时间

把  $I_t$  函数的峰值点  $I_{pp}$  所对应的时间记为  $T_{pp}$ , 峰值点过后地震发生,  $T_{pp}$  与地震发生的时间间隔记为  $T_2$ . 显然与时间相关的量是  $T_2$  和剪切应变率. 通过量纲分析得到无量纲数  $\pi_2$ :

$$\pi_2 = T_2 \times \dot{\gamma}, \tag{12}$$

特征时间  $T_2$  也与发震震级、当地的平均地震波能量和  $I_{pp}$  相关, 令  $\pi_1$  与  $\pi_2$  相乘可以得到无量纲数  $\pi_3$ :

$$\pi_3 = \pi_1 \times \pi_2, \tag{13}$$

$\pi_3$  是  $\pi_1$  和  $\pi_2$  的函数, 也是震级的函数, 即  $\pi_3 = f(\pi_1, \pi_2) = f(M)$ , 通过 excel 拟合曲线可以得到  $\pi_3$  与震级的关系,  $R^2 = 0.94$ , 见图 4.

$\pi_3$  与震级的数学关系式为:

$$\pi_3 = 7 \times 10^{-27} \times e^{3.524M_s} (R^2 = 0.94). \tag{14}$$

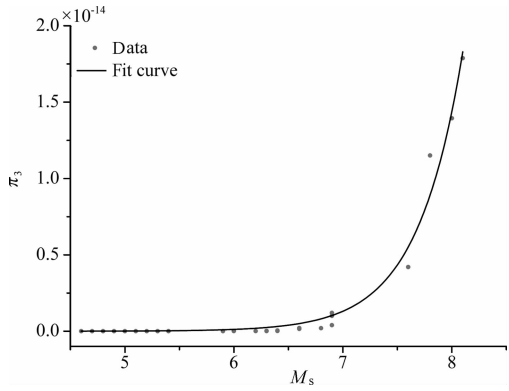


图 4  $\pi_3$  与震级之间的关系

Fig. 4 The relation between  $\pi_3$  and the magnitude

由上式反推出的特征时间记为  $T_{21}$  :

$$T_{21} = \frac{8.5 \times E_d \times 10^{0.03M_s} \times 10^{-30.8}}{\dot{\gamma}}, \quad (15)$$

把经过数据处理后的结果记为  $T_{2p}$  :

$$T_{2p} = T_{21} \pm b \times T_{21}, \quad (16)$$

$b$  是数据处理后的误差项系数,若预测未来地震发生的震级在 4.5~5.5 内, $b=0.1$ <sup>[15]</sup>;震级在 5.6~6.5 内, $b=0.27$ ;若震级大于等于 6.6,则  $b=0.3$ .  $T_{2p}$  的单位是月,代表预测未来地震的  $T_{pp}$  与地震发生的时间间隔.

### 3 分析结果对已有震例的验证

以上分析结果是通过文中选用的 34 个震例进行统计研究得到的.此结果对已发生的地震有较好的验证性.下面以汶川地震(2008)和河南周口地震(2010)为例说明.

#### 3.1 汶川地震(2008)

2008 年 5 月 12 日汶川发生 8.0 级地震,震中(北纬 31.0°,东经 103.4°).

首先根据 LURR 时空扫描选取异常区,见图 5 中红色线选中的区域,异常区内  $I_t$  值和地震时序见图 2.在异常区内确定地球物理参数并由量纲分析结果反推出震级  $M_{sp} = 7.9 \pm 0.8$ ,特征时间  $T_{2p}$  为  $28 \pm 9$ (月).  $T_{pp}$  所处的时间是 2005 年 10 月,所以“预测”地震发生的时间为 2008 年 2 月( $\pm 9$ 个月),实际地震发生于 2008 年 5 月,在“预测”的时段内.

#### 3.2 河南周口地震(2010)

2010 年 10 月 24 日河南周口发生 4.7 级地震,震中(北纬 34.1°,东经 114.6°).

选取异常区如红色线包围区域(见图 6),此区

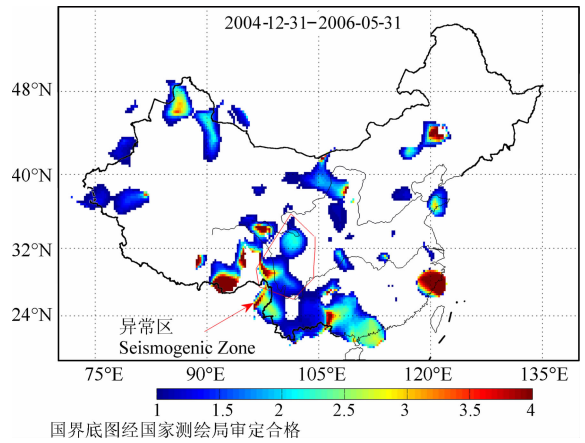


图 5 汶川地震(2008)加卸载响应比异常区(图中红色连线包围的区域)

Fig. 5 The seismicogenic zone of Wenchuan earthquake in 2008 (the zone encircled by red contour)

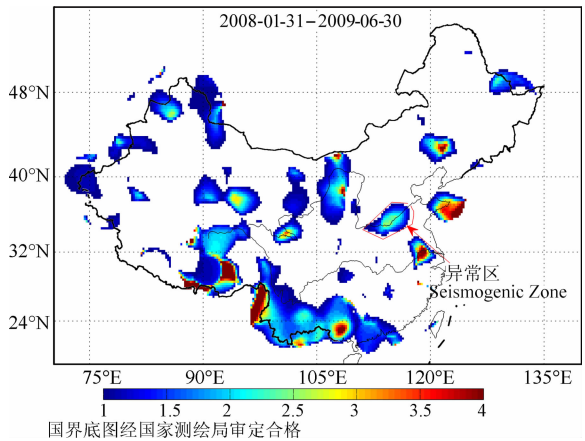


图 6 河南周口地震异常区(图中红色连线包围的区域)

Fig. 6 The seismicogenic zone of Zhoukou earthquake (the zone encircled by red contour)

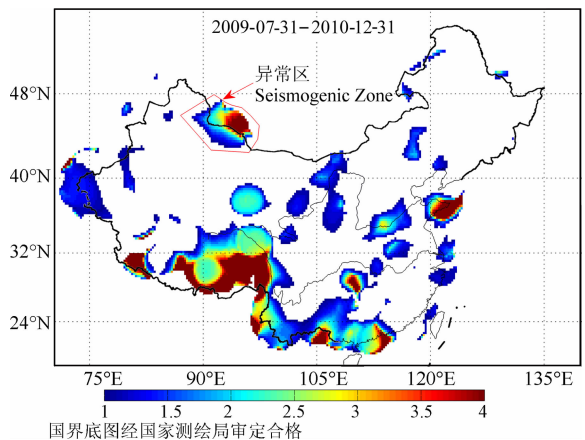


图 8 阿勒泰异常区选取(图中红色连线包围的区域)

Fig. 8 The seismicogenic zone of Altay (the zone encircled by red contour)

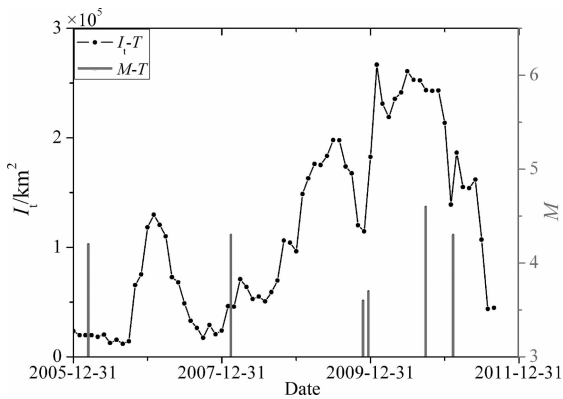


图7 周口地震异常区的  $I_t$  变化及地震时序

Fig. 7  $I_t$  and the earthquake sequence in the seismogenic zone of Zhoukou earthquake

域内  $I_t$  及地震时序见图7. 在异常区内确定地球物理参数并根据文中的分析结果得出  $M_{sp} = 4.4 \pm 0.5$ ,  $T_{2p} = 11 \pm 2$  (月).  $T_{pp}$  所处的时间是 2010 年 1 月, 所以“预测”地震发生的时间是 2010 年 10 月—2011 年 2 月, 在“预测”范围内.

## 4 预测未来发生的地震

通过量纲分析与加卸载响应比相结合的方法得出无量纲数是为了探索地震发生的规律, 最终目的是应用于地震预测实践. 根据 LURR 的时空扫描结果, 在新疆阿勒泰地区选取异常区 (见图 8), 尝试使用本文的分析结果预测未来地震发生的地点、强度和时间的.

异常区的  $I_t$  及近年来地震时序见图 9, 确定异常区的地球物理参数, 根据量纲分析结果得出未来发生地震的震级  $M_{sp} = 5.5 \pm 0.5$ , 特征时间  $T_{2p}$  为  $17 \pm 2$  (月).  $T_{pp}$  所处的时间为 2010 年 12 月, 由此可

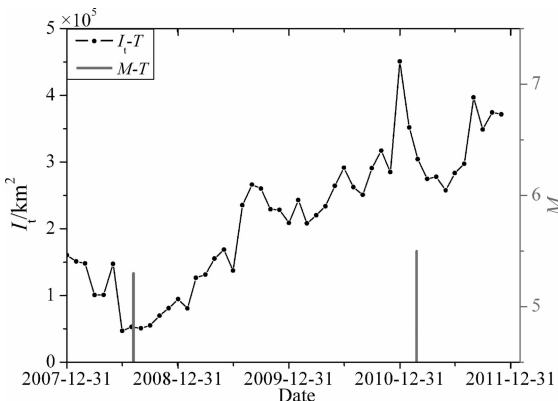


图9 阿勒泰地区异常区内  $I_t$  变化及地震时序

Fig. 9  $I_t$  and the earthquake sequence in the seismogenic zone in Altay

以得出未来地震发生的时间为 2012 年 3 月—7 月.

## 5 总结与讨论

本文把量纲分析与加卸载响应比结合应用于地震预测, 得到了均与震级成指数关系的无量纲数  $\pi_1$  和  $\pi_3$ , 此结果对已经发生的地震有较好的验证性, 而我们的最终目的是应用于地震预测. 在判断未来地震发生的地点、强度和时间的时, 首先要根据 LURR 扫描结果确定出孕震区域; 然后确定孕震区的地球物理参数  $E_w$ ,  $I_{pp}$  和  $\dot{\gamma}$ , 计算出  $E_d$ , 根据公式 (10) 和 (11) 得出未来地震的震级  $M_{sp}$ ; 最后由公式 (15) 和 (16) 得出特征时间  $T_{2p}$ ,  $T_{pp} + T_{2p}$  的结果就是未来地震发生的时间.

以上工作是基于基础科学框架而建立的. 分析过程中对参数的选用非常重要, 由于地球内部的不可深入性, 导致很多变量无法获得, 或重要变量获得的不完整. 例如岩石的强度、弹性模量和断裂韧度等, 都是非常重的变量, 一般通过实验来获得, 但是地下几十千米介质的这些参数我们难以得知; 而就广度而言, 不同地区介质的性质也不同, 应用起来非常困难. 考虑到资料的可获得性, 本文使用了  $E_w$ ,  $I_{pp}$ ,  $\dot{\gamma}$ ,  $h$ , 但是对选用数据的质量有了很大限制.

在质上, 例如剪切应变率的选取, 若能使用孕震时段的数据则更为合理, 由于各种限制, 本文使用了 1991—2000 年的结果<sup>[25-26]</sup>; 在量上, 对不同地区应该按时间顺序选用多个地震, 限于部分地区资料无法获得以及时间关系, 只选用了自 1970 年以来的 34 个地震数据, 数量上欠缺.

本文初步尝试把量纲分析应用于地球科学, 目前只是初步研究, 随着科技的进步, 变量获得的完整性与可使用性提高, 我们还会继续改进.

**致谢** 文中使用的形变数据由沈正康教授、江在森研究员和顾国华研究员提供, 地震目录来自于中国地震台网中心, 部分计算是在中国科学院超级计算中心完成的, 在此一并表示感谢.

## 参考文献 (References)

- [1] 尹祥础, 地震预测新途径的探索. 中国地震, 1987, 3(1): 1-7. Yin X C. The new approach of earthquake prediction. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 1987, 3(1): 1-7.
- [2] 尹祥础, 尹灿. 非线性系统失稳的前兆与地震预报——响应比理论及其应用. 中国科学 B 辑, 1991, 21(5): 512-518. Yin X C, Yin C. The precursor of instability for nonlinear system and earthquake prediction—load/unload response

- ratio theory and its application. *J. Science in China (Series B) (in Chinese)*, 1991, 21(5): 512-518.
- [3] 尹祥础, 陈学忠, 尹灿. 加卸载响应比——一个刻划构造运动稳定性的新参数及其在地质灾害预测中的应用. *地球物理学进展*, 1993, 8(4): 90-96.  
Yin X C, Chen X Z, Yin C. Loading and unloading response ratio—a new parameter determining the degree of stability of tectonic movement and its application to prediction of geological disasters. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 1993, 8(4): 90-96.
- [4] 尹祥础, 陈学忠, 宋治平等. 加卸载响应比——一种新的地震预报方法. *地球物理学报*, 1994, 37(6): 767-775.  
Yin X C, Chen X Z, Song Z P, et al. The load-unload response ratio theory: a new approach to earthquake prediction. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 1994, 37(6): 767-775.
- [5] Yin X C, Chen X Z, Song Z P. The load/unload response ratio (LURR) theory and its application to earthquake prediction. *Journal of Earthquake Prediction Research*, 1994, 3(3): 325-333.
- [6] Yin X C, Chen X Z, Song Z P, et al. A new approach to earthquake prediction—the load/unload response ratio (LURR) theory. *Pure Applied Geophysics*, 1995, 145(3-4): 701-715.
- [7] 施行觉, 许和明, 万永中等. 模拟引潮力作用下的岩石破裂特征——加卸载响应比理论的实验研究. *地球物理学报*, 1994, 37(5): 633-637.  
Shi X J, Xu H M, Wan Y Z, et al. The characteristic of rock fracture under simulated tide force—laboratory study on the theory of loading and unloading response ratio. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 1994, 37(5): 633-637.
- [8] 尹祥础, 陈学忠, 宋治平. 加卸载响应比理论及其在地震预测中的应用研究进展. *地球物理学报*, 1994, 37(S1): 223-230.  
Yin X C, Chen X Z, Song Z P. The development of load-unload response ratio theory and its application to earthquake prediction. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 1994, 37(S1): 223-230.
- [9] 施行觉, 卢振刚, 许和明. 岩石非线性破裂的衰减特征. *地球物理学报*, 1996, 39(S1): 231-237.  
Shi X J, Lu Z G, Xu H M. The attenuation characteristic of rock's non-linear fracture. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 1996, 39(S1): 231-237.
- [10] 王裕仓, 尹祥础, 彭克银等. 加卸载响应比的数值模拟. *地球物理学报*, 1999, 42(5): 669-676.  
Wang Y C, Yin X C, Peng K Y, et al. Numerical simulation on load/unload response ratio theory. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 1999, 42(5): 669-676.
- [11] Yin X C, Chen X Z, Wang Y C, et al. Development of a new approach to earthquake prediction—load/unload response ratio (LURR) theory. *Pure and Applied Geophysics*, 2000, 157(11-12): 2365-2383.
- [12] Yin X C, Mora P, Peng K Y, et al. Load-unload response ratio and accelerating moment/energy release critical region scaling and earthquake prediction. *Pure and Applied Geophysics*, 2002, 159(10): 2511-2523.
- [13] Yu H Z, Cheng J, Zhu Q Y, et al. Critical sensitivity of load/unload response ratio and stress accumulation before large earthquakes: example of the 2008  $M_w$ 7.9 Wenchuan earthquake. *Natural Hazards*, 2011, 58(1): 251-267.
- [14] Yu H Z, Zhu Q Y. A probabilistic approach for earthquake potential evaluation based on the Load/Unload Response ratio method. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2010, 22(12): 1520-1533.
- [15] Yin X C, Zhang L P, Zhang H H, et al. LURR's twenty years and its perspective. *Pure and Applied Geophysics*, 2006, 163(11-12): 2317-2341.
- [16] 张浪平, 余怀忠, 尹祥础等. 加卸载响应比方法在结构灾变预测中的应用. *工程力学*, 2010, 27(3): 228-235.  
Zhang L P, Yu H Z, Yin X C, et al. Application of the load/unload response ratio method in catastrophic failure prediction of structures. *Engineering Mechanics (in Chinese)*, 2010, 27(3): 228-235.
- [17] Zhang H H, Yin X C, Liang N G, et al. Acoustic emission experiments of rock failure under load simulating the hypocenter condition. *Pure and Applied Geophysics*, 2006, 163(11-12): 2389-2406.
- [18] 尹祥础, 陈学忠, 宋治平等. 关东等地区加卸载响应比的时间变化及其预测意义. *中国地震*, 1996, 12(3): 331-334.  
Yin X C, Chen X Z, Song Z P, et al. The temporal variation of LURR in Kanto and other regions in Japan and its application to the earthquake prediction. *Earthquake Research in China (in Chinese)*, 1996, 12(3): 331-334.
- [19] 宋治平, 尹祥础, 王裕仓等. 美国加州地区地震前加卸载响应比的时空演化特征及预测意义. *地震学报*, 2000, 22(6): 588-595.  
Song Z P, Yin X C, Wang Y C, et al. The tempo-spatial evolution characteristics of the load/unload response ratio before strong earthquakes in California of America and its predicting implications. *Acta Seismologica Sinica (in Chinese)*, 2000, 22(6): 588-595.
- [20] 尹祥础, 张浪平, 张永仙等. 大地震前 LURR 的大时空异常——预测中国大陆未来大地震的探讨. // 中国大陆强震趋势预测研究(2009 年度). 北京: 地震出版社, 2008: 144-150.  
Yin X C, Zhang L P, Zhang Y X, et al. LURR anomaly with great tempo-spatial scale before large Earthquake—Prediction of the upcoming great earthquake in the Chinese mainland. // The Researches on Prediction of the Strong Earthquake Tendency for Chinese Mainland in 2009 (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2008: 144-150.
- [21] 张晖辉, 尹祥础, 梁乃刚. 中国大陆地区中强地震前加卸载响应比异常时间尺度的统计研究. *中国地震*, 2005, 21(4): 486-495.  
Zhang H H, Yin X C, Liang N G. Statistic study of LURR

- anomaly temporal scale before moderately strong earthquakes on the Chinese mainland. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 2005, 21(4): 486-495.
- [22] Sedov L I. *Similarity and Dimensional Methods in Mechanics*. London: Academic Press, 1959.
- [23] 钱伟长. *应用数学*. 安徽: 科学技术出版社, 1993.  
Qian W C. *Applied Mathematics* (in Chinese). Anhui: Science and Technology Press, 1993.
- [24] 谈庆明. *量纲分析*. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.  
Tan Q M. *Dimensional analysis* (in Chinese). Hefei: University of Science and Technology of China, 2007.
- [25] 沈正康, 王敏, 甘卫军等. 中国大陆现今构造应变率场及其动力学成因研究. *地学前缘*, 2003, 10(特刊): 93-100.  
Shen Z K, Wang M, Gan W J, et al. Contemporary tectonic strain rate field of Chinese continent and its geodynamic implications. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2003, 10 (special): 93-100.
- [26] Gu G H, Shen X H, Wang M, et al. General characteristics of the recent horizontal crustal movement in Chinese mainland. *Acta Seismologica Sinica*, 2001, 23(4): 362-369.

(本文编辑 胡素芳)