

• 应用 / APPLICATION •

加卸载响应比与量纲分析相结合 ——地震预测的新探索

尹祥础^{1,2}, 刘月², 聂宁明³, 袁帅², 张浪平¹, 唐兰兰⁴

1. 中国地震局 地震预测研究所, 北京 100036
2. 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
3. 中国科学院计算机网络信息中心 超级计算中心, 北京 100190
4. 新疆维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011

摘要: 加卸载响应比 (LURR) 的精髓在于通过能够刻画震源区介质损伤程度的物理参数, 来反映地震孕育的进程, 从而预测地震。近 30 年来, 人们对加卸载响应比做了大量研究, 取得了一系列进展, 在地震预测实践中也取得了一定的效果, 尤其是加卸载响应比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, 其原因主要是: 在实际预测中对当地的地球物理情况考虑得不够。我们想到了加卸载响应比与量纲分析相结合的方法, 综合考虑当地的地球物理情况, 例如剪应变率和平均地震耗散能量等因素的影响。文中选取发生在中国大陆的 34 个震例资料, 通过分析选取与发震震级和时间相关的无量纲量 π_1 和 π_3 , 根据对实际数据的拟合, π_1 和 π_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, 再根据 LURR 时空扫描结果得到 I_{pp} , T_{pp} 和 π_1 和 π_3 , 通过 π_1 确定震级 M , 再由 π_3 确定发震时间 T_p , 从而形成了系统地预测地震三要素 (震源位置, 震级和发震时间) 的思路。由于该项新方法的数值模拟对于计算提出了更高的要求, 因此并行计算的引入非常必需, 从而为地震预测工作提供了更强有力的工具。

关键词: 量纲分析; 加卸载响应比; 地震预测; 超级计算

Dimension Analysis Combined with Load/Unload Response Ratio (LURR) —— A New Exploration for Earthquake Prediction

Yin Xiangchu^{1,2}, Liu Yue², Nie Ningming³, Yuan Shuai², Zhang Langping¹, Tang Lanlan⁴

基金项目: 国家自然科学基金 (10721202); 中国科学院“十一五”信息化专项 (INFO-115-B01)

1. Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China
2. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
3. Supercomputing Center of Computer Network Information Center, Chinese Academy Sciences, Beijing 100190, China
4. Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi, Xinjiang 830011, China

Abstract: The essence of Load/Unload Response Ratio (LURR) is to find a physical parameter, with which the preparation process of earthquake through depicting the damage of seismogenic zone can be reflected, and then to predict earthquake. In recent about thirty years since LURR has been put forward, many people have conducted a series researches 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 zone from LURR's space-time scanning. But the result is not as well 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, we obtain two dimensionless quantities related with magnitude and the earthquake occurrence time π_1 and π_3 . Through the process of data fitting, the relationships between π_1 and magnitude and between π_3 and magnitude 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 determining the geophysical parameters of the specific seismogenic, we can get the magnitude and the occurrence time for the future earthquake through π_1 and π_3 separately.

Keywords: Load/Unload Response Ratio (LURR); Dimensional analysis; Earthquake prediction; Super-computing

1. 引言

地震的发生过程非常短暂, 突如其来, 一座大城市在几分钟内变为废墟, 令人猝不及防。这也正是地震灾害的惨烈和可怕之处。但地震的孕育过程却是很漫长的, 长达几年、几十年甚至上千年的尺度。地震的物理机制是震源区介质的快速剪切断裂, 而地震孕育过程则是震源区介质逐步损伤, 从而导致最后的断裂的量变到质变的过程。

加卸载响应比 (LURR)^[1-4]的基本思路是希望能够通过刻画震源区介质的损伤程度, 来反映地震孕育的进程, 从而预测地震。它自上世纪八十年代提出, 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^[5-9]。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^[10-12], 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 ($M = 5$) 的函数关系式^[13], 在新疆地区应用此结果却发现, 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。

要综合考虑诸多因素对地震的影响, 我们想到了量纲分析。力学界的老前辈钱学森、钱伟长、郑哲敏等一再强调: 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^[14-16]。本文中我们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。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, 讨论如何对未来地震发生的地点、强度和时进行判断。

2. 量纲分析

地震预测必须预测未来地震发生的时、地点和强度, 即所谓地震预测三要素, 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方法, 预测未来地震发生的时、地点和强度。首先是判断地震发生的地点。

2.1 预测未来地震发生的地点

二十年来, 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 95% 落在 LURR 的异常区内^[12]。所以, 可以根据 LURR 异常区, 预测未来地震发生的地点。在选定异常区后, 根据该地区的地球物理参数, 通过量纲分析与 LURR 的结合, 对地震强度和发生时间做进一步的预测。

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多之又多, 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 $J / (km^2 \cdot s)$ 。从能量平衡的角度看, 它也和该地区长时间里, 由于构造运

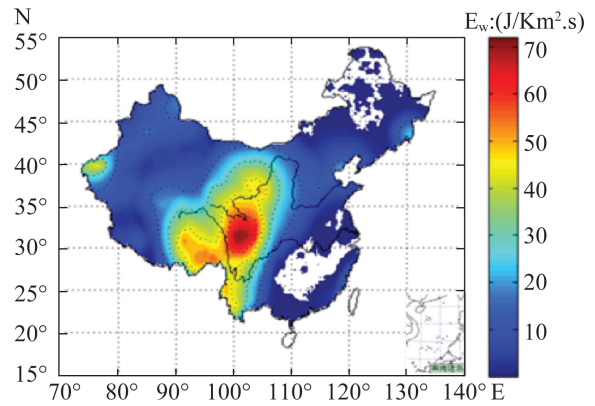


图 1 中国大陆各地平均地震波能量 E_w 的分布图

动积累的能量 (应变能) 有关。我们用 1900 - 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_0 为:

$$I_0 = \iint_{Y \geq 1} Y dx dy = \bar{Y} \times A \quad (1)$$

I_0 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, 称之为孕震积分, 单位 km^2 。

I_{pp} 是 I_0 的最大值。图 2 是汶川地震 (2008 年) 异常区的 I_0 变化和地震时序图 (地震界通常称为 M-T 图)。

$\dot{\gamma}$: 某一地区的剪切应变率, 单位是 10^{-9} rad/年 。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^[17]用 GPS 测量得到的结果, 同

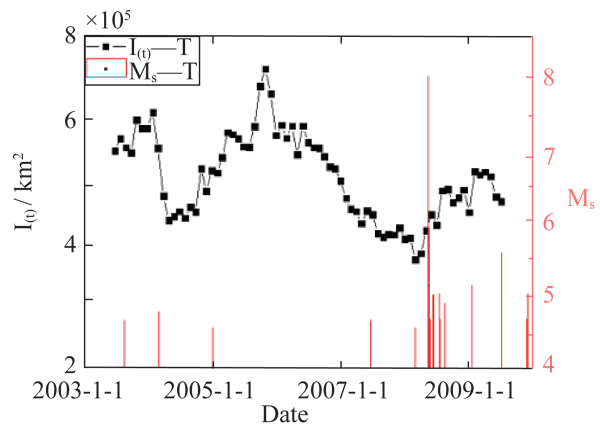


图 2 汶川地震 (2008 年) 异常区的 I_0 和地震时序

时参照江在森和顾国华^[18]的结果。

h: 孕震区的厚度, 单位 km。令 $V = A \times h$, 可以将 V 看做孕震区的体积。

根据以上参数做量纲分析如下:

$$[E_s] = [E_w]^{\alpha_1} \cdot [I_{pp}]^{\alpha_2} \cdot [h]^{\alpha_3} \cdot [\dot{\gamma}]^{\alpha_4} \quad (2)$$

式中 α_1 、 α_2 、 α_3 和 α_4 为待求常数。

本文选取时间 (T), 长度 (L) 和力 (F) 作为基本量纲, 按照量纲分析中的习惯, 方括号 [X] 表示 X 的量纲。例如 E_s 的量纲是能量, 所以

$$[E_s] = [F \cdot L]$$

$$[E_w] = [F \cdot L \cdot T^{-1}]$$

$$[I_{pp}] = [L^2]$$

$$[h] = [L]$$

$$[\dot{\gamma}] = [T^{-1}]$$

把 (2) 式写成量纲的形式为:

$$[F \cdot L] = [F \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}]^{\alpha_1} \cdot [L^2]^{\alpha_2} \cdot [L]^{\alpha_3} \cdot [T^{-1}]^{\alpha_4} \quad (3)$$

令 $\beta = h / \sqrt{A}$, 最后得出:

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

由 (4) 式可以得到:

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

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

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

$$\pi_1 = \frac{E_s}{E_d} \quad (8)$$

π_1 是震级的函数, 即 $\pi_1 = f(M)$, 通过 excel 拟合曲线见图 3。

最后 excel 软件给出拟合的数学关系式为:

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

其中 R 为相关系数, $R^2 = 0.96$ 说明拟合情况很好。

由上式反推出的震级记为 M_{s1} ,

$$M_{s1} = 5.14 \lg E_d - 112.08 \quad (10)$$

把经过数据处理后的结果记为 M_{sp} (P 是 prediction 的第一个字母, 表示预测的意思):

$$M_{sp} = M_{s1} \pm 0.08 \times M_{s1} \quad (11)$$

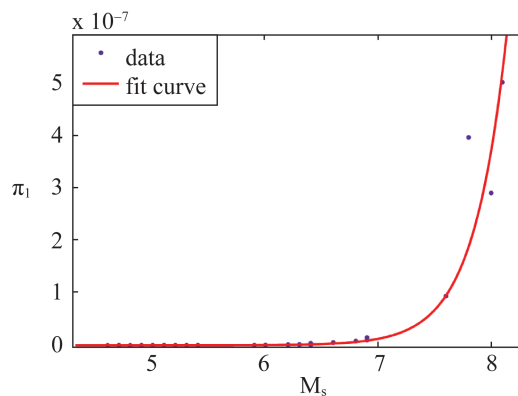


图 3 π_1 与震级的关系

上式中误差项的系数 $0.08^{[15]}$ 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 未来地震发震时间的预测

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 $\dot{\gamma}$ 。通过量纲分析得到无量纲量

$$\pi_2 = T_2 \times \dot{\gamma} \quad (12)$$

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 π_1 与 π_2 相乘可以得到无量纲量

$$\pi_3 = \pi_1 \times \pi_2 \quad (13)$$

π_3 是 π_1 和 π_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 π_3 与震级的关系, 见图 4。

π_3 与震级的数学关系式为:

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

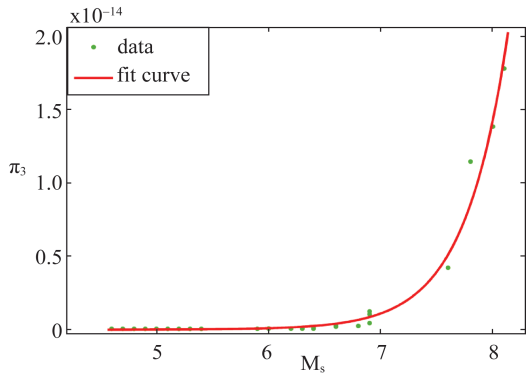
由上式反推出的特征时间记为 T_{21} :

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

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, $b = 0.1^{[15]}$; 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发震时间 T_p 与峰值点时间 T_{pp} 的时间间隔。

图4 π_3 与震级之间的关系

3. 震例验证

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年) 和河南周口地震 (2010年) 为例说明。

3.1 汶川地震 (2008年)

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 $I_{(0)}$ 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 ± 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 T_p 为 2008 年 2 月 (± 9 个月), 实际

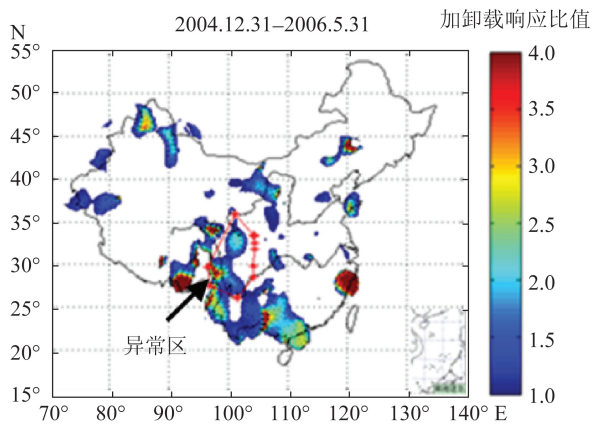


图5 2004 年 12 月–2006 年 5 月中国大陆加卸载响应比异常分布图, 红色线包围的区域代表汶川地震 (2008 年) 的异常区

地震发生于 2008 年 5 月, 在“预测”的时段内。

3.2 周口地震 (2010年)

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如图 6, 此区域内 $I_{(0)}$ 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} 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。2010 年 10 月 24 日河南周口发生 $M_s = 4.7$ ($M_L = 5$) 的地震, 震中 (北纬 34.1, 东经 114.6)。时、空、强三要素均在“预测”范围内。

周口地震的震级不大, 但却颇受关注, 因为该地区地震活动性历来较低, $M_s = 4.7$ ($M_L = 5$) 的地震已是该地区有地震记录 (从 1970 年起) 以来, 直

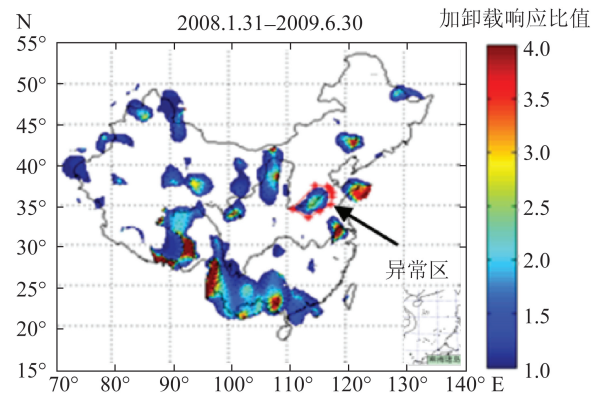
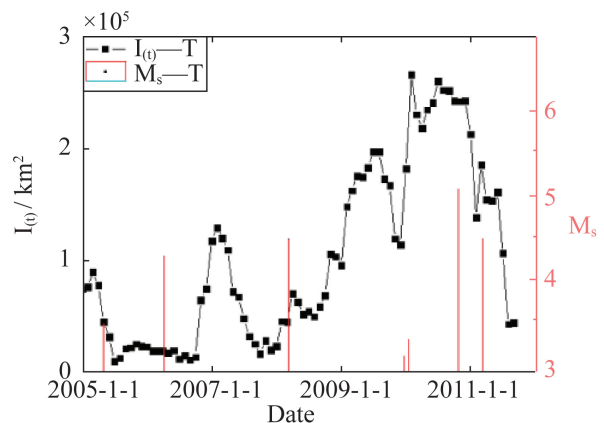


图6 2008 年 1 月–2009 年 6 月中国大陆加卸载响应比异常分布图, 红色线包围的区域代表河南周口地震的异常区

图7 周口地震异常区的 $I_{(0)}$ 变化及地震时序

径 200 km 范围里的最大的地震。正因为如此, 我们预测该地区将可能发生中强地震时, 不少人表示怀疑。2010 年 10 月 24 日在河南周口发生的 4.7 级地震, 是河南 30 年来发生的最大地震。对于平静了很长时间的大华北地区, 这个地震会不会是该地区地震活动性转换的事件? 此外, 该地震离郟卢断裂带不远, 历史上发生过大地震的郟卢断裂带在沉寂了很久以后, 近来有复活的迹象, 周口地震的发生, 该如何解读? 有待进一步研究。

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。

4.1 新疆哈密地区

根据目前 LURR 的时空扫描结果, 作者在新疆哈密地区选取异常区 (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 $I_{(0)}$ 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 ± 2 (月)。 T_{2p} 所处的时间为 2010 年 12 月, 由此可以得出未来地震发生的时间为 2012 年 3-7 月。

4.2 西南超大地震

加卸载响应比的时空扫描表明: 在我国西南存在一大片异常区, 这一异常区已出现好几年。这说明该地区正在孕育一个超大地震 (震级可能达 8, 甚至更大)。由于现在还没有确定达到峰值点, 所以其震级和发震时间目前还不能确定。我们正在密切追踪和研究其发展进程。

5. 新方法对超级计算的需求

本工作基于加卸载响应比与量纲分析的结合, 其基础工作是研究地区的长时间的加卸载响应比时空扫

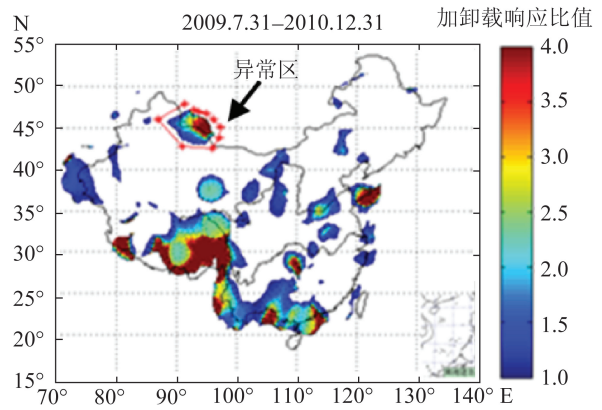


图 8 2009 年 7 月-2010 年 12 月中国大陆加卸载响应比异常分布图, 红色线包围的区域代表哈密地震的异常区

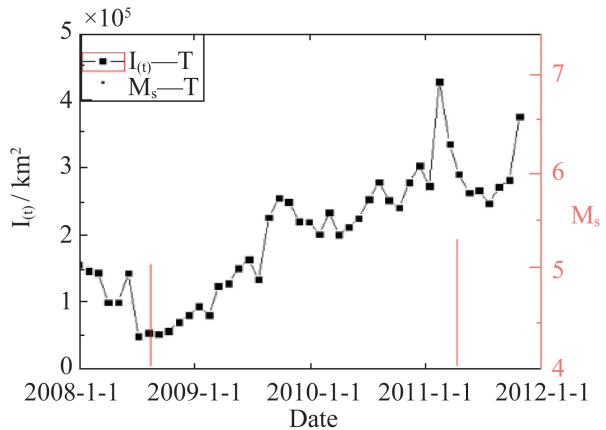


图 9 哈密异常区内 $I_{(0)}$ 变化及地震时序

描。我们应用链网模型^[21,22]对脆性介质试件的损伤演化和 LURR 的时空演化进行数值模拟。随着预测空间的增加、时间的增长和经度和纬度的细化, 以及参数的多样化, 该程序的计算量以及数据量都会变得非常大, 仅使用串行程序依靠单个 CPU 是无法完成这项工作的。尤其是地震预测要求实时处理大量数据, 就必须要求计算在较短的时间内完成, 超算的作用就更突出。

目前, 在中国科学院计算机网络信息中心超级计算中心的支持下, 我们对大尺度链网模型计算程序进行了并行优化。原有程序的关键计算步骤是在每一次的循环中, 根据各项参数生成稀疏的总体刚度矩阵, 然后再根据求解总刚度阵得到的数据更新各项参数。原有程序为串行程序, 对于大规模地震模拟的要求, 程序的计算效率很低, 无法满足现有的科研需求, 因此采用并行计算是势在必行的。

现有链网模型并行程序基于 MPI (Message Passing Interface) 并行。一方面, 在存储上, 将原有数据存储格式改进为 CRS 压缩存储, 大大节省了计算时的数据存储以及计算量。另一方面, 针对原有串行程序特点, 采用基于 MPI 的多前点大规模并行稀疏直接解法器 (MUMPS) 对计算中占用时间最多的总刚阵计算进行并行求解, 从而大幅减少了原程序的计算时间, 增大了程序的可计算规模, 并对更多的算例进行了科学计算。我们在深腾 7000 上进行了大规模的并行计算测试, 其加速比和 CPU 数之间的关系如表 1 和图 10^[20]。

为了更醒目, 将表 1 中的数据绘成曲线图 (图 10)。

表 1 和图 10 说明, 直到 CPU 个数为 1 024 时, 其加速比仍然比较高。所以, 将 LURR 用于地震预测, 并利用采用并行算法的超级计算是有效的和必不可少的。

在研究和应用 LURR 的过程中, 不断发现和解决新问题。对于大地震和超大地震, 其孕震区面积很大, 达到几十万 km^2 (参照图 8), 因而不同点的参数 E_w 和 $\dot{\gamma}$ 的差别可能很大。为此需要更确切地预测其起裂点 (未来的震中), 这就要更深入地研究 LURR 的时空演化和地震的内在规律。由于地震孕育过程是一个多尺度、多物理问题, 所以研究大地震的孕育必须采用大尺度链网模型, 其单元数要求达到千万量级, 与之对应的总刚阵规模也要达到了千万级别以上, 计算量以及数据量都会十分巨大。因此, 根

表 1 加速比与 CPU 个数之间的关系

CPU 个数	总时间	单个 CPU 时间	加速比
1	20024	20024	1
2	40882	20441	0.9796
4	79513	19878.25	1.007332
8	68637	8579.625	2.333902
16	110416	6901	2.901608
32	147391	4605.969	4.347402
64	282512	4414.25	4.536218
128	528679	4130.305	4.848068
256	912100	3562.891	5.620156
512	1833136	3580.344	5.592759
1024	5056706	4938.189	4.054927
2048	21257824	10379.8	1.929132

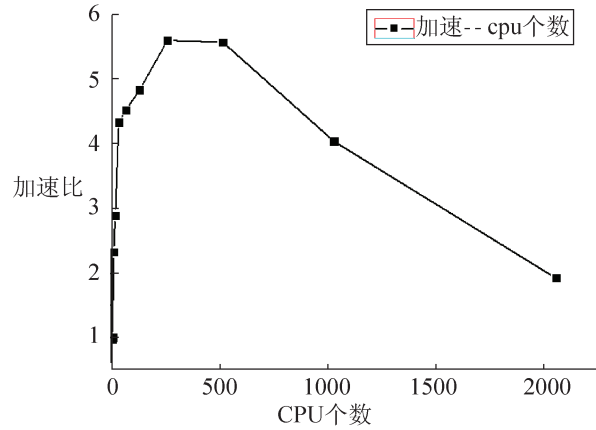


图 10 加速比与 CPU 个数之间的关系

据链网程序本身特点, 发展基于 MPI 的分布式计算的并行算法来进一步优化现有并行链网程序, 并借助中科院超级计算中心的超算资源以实现更大规模的地震预测计算, 是我们下一步急需进行的重要工作。

6. 小结与讨论

本文将量纲分析与加卸载响应比结合应用于地震预测, 得到了与震级成指数关系的无量纲数 π_1 和 π_3 , 此结果对已经发生的地震有较好的验证性, 从而构成系统预测未来地震发生的地点、强度和时间的新思路: 首先根据 LURR 时空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) 算出未来地震的震级 M_{sp} ; 最后由公式 (15) 和 (16) 算出特征时间 T_{2p} , 以确定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, 由于地下结构无法深入, 目前我们能得到的参数又很有限。这就对选用数据有很大限制。

例如剪切应变率 $\dot{\gamma}$ 的选取, 由于各种限制, 本文使用的是 1991–2000 年的结果^[17-18], 若能使用孕震时段的数据则更为合理。本文对不同地区, 不同时间段和震级段选用了 34 个地震, 数量上还不够多, 今后将力争增加更多震例。

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, 还需要不断的摸索。

7. 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, 地震目录来自中国地震台网中心及文献^[19]。本文中的大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。本课题得到国家自然科学基金委“材料强度及灾变的跨尺度力学研究”创新群体项目(资助号为: 10721202)、中国科学院“十一五”信息化专项“超级计算环境建设与应用”(项目编号: INFO-115 -B01)和中国地震局监测预报司和科技司的资助。

(后记: 本文于2012年1月23日向《科研信息化技术与应用》投送此稿。其中唯一的预测是对新疆哈密地区: “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 ± 2 (月)。 T_{pp} 所处的时间为2010年12月, 由此可以得出未来地震发生的时间为2012年3月-7月”。实际上, 2012年2月10日在该地区发生了 $M_s = 5.3$ 级地震, 预测的地点、震级完全正确, 预测)的发震时间差1个月, 更准确的说19天。)

参考文献

- [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*, 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 化学 生命科学 地学), 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)*, 1991, 21(5): 512-518.
- [3] 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.
- [4] 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 Applies Geophysics*, 1995, 145(3/4): 701-715.
- [5] 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. The numerical simulation of oad/unload response ratio (LURR) theory. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 1999, 42(5): 669-676.
- [6] 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 Applies Geophysics*, 2000, 157(11-12): 2365-2383.
- [7] YIN X C, MORA P, PENG K Y, et al. Load-unload response ratio and accelerating moment/energy release critical region scaling and earthquakae prediction. *Pure and Applied Geophysics*, 2002, 159(10): 2511-2523.
- [8] 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.
- [9] 余怀忠, 尹祥础, 夏蒙芬等. 加卸载响应比(LURR)理论的实验研究. 中国地震, 2003, 19(1): 58-66 YU H Z, YIN X C, XIA M F, et al. Experimental Study of the load/unload resonsratio(LURR) theory. *Earthquake Research in China*, 2003, 19(1): 58-66.
- [10] 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 temporak rariation of LURR in Kanto and other regions in Japan and its application to the earthquake prediction. *Earthquake Research in China*, 1996, 12(3): 331-334.
- [11] 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 befor strong earthquakes in California of America and its predicting implication. *Acta Seismological Sinica*, 2000, 22(6): 588-595.
- [12] 中国地震局地震预测研究所. 中国大陆强震趋势预测研究(2009年度). 北京: 《地震》编辑部, 2008 Institute of Earthquake Science Chiana Earthquake Administration. The researches on prediction of the strong earthquake tendency for Chinese mainland in 2009. Beijing: Seismological Press, 2008.
- [13] 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 abnoramal temporal acale befor moderately strongearthquakeson the Chinese mainland,

Earthquake Research in China, 2005, 21(4): 486–495.

- [14] 谢多夫, 力学中的相似方法与量纲理论, 沈青译, 科学出版社, 1982. I. Sedov. Similarity and dimensional methods in mechanics(in Chinese). Translated by SHEN Q, Trans. Beijing: Science Press, 1980.
- [15] 钱伟长, 应用数学, 安徽: 科学技术出版社, 1993. QIAN W. C. Applied Mathematics. Anhui: Science and Technology Press, 1993.
- [16] Qing-Ming Tan, Dimensional analysis-With case studies in mechanics, Springer, 2011.
- [17] 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*, 2003, 10 (special): 93–100.
- [18] GU G H, SHEN XH, WANG M, et al. General characteristics of the recent horizontal crustal movement in Chinese mainland. *Acta Seismologica Sinica*, 2001, 23(4): 362–369.
- [19] 宋治平、张国民、刘杰等, 全球地震目录, 北京, 地震出版社, 2011.
- [20] 冯仰德, 迟学斌, 尹祥础, 2008, 地震预报加卸载响应比方法的并行计算, 科研信息化技术与应用, 2008, No 2, 15–21.
- [21] Liang, N, Liu, Q, Li, J. and Song, H., (1996) A Chains network Model Simulating Meso-mechanics Behavior and Micro damage Evolution of in Situ Reinforced Ceramics, in *Advanced in Engineering Plasticity & Its Applications*, (eds Abe, T and Tsuta, T) (Pergamon, Amsterdam, 1996), pp 141–146.
- [22] Liu, H.Q., Liang, N.G., Xia M.F., Modelling and Mesoscopic Damage Constitutive Relation of Brittle Short-fiber-Reinforced composites, *SCIENCES IN CHINA* (Series

E), Vol.43, No.5, Oct., 1999, p530–540.

收稿日期: 2012年1月23日

尹祥础: 中国地震局地震预测研究所, 研究员, 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室特邀客座研究员, 博士生导师, 主要研究方向是地震力学和地震预测。E-mail: xcyin2012@163.com

刘月: 中国科学院力学研究所, 博士研究生, 主要从事固体力学和地震预测方面的研究。E-mail: liuye126liuye@126.com

聂宁明: 中国科学院计算机网络信息中心超级计算中心, 助理研究员, 博士, 主要研究方向是高性能计算。E-mail: nienm@sccas.cn

袁帅: 中国科学院力学研究所, 硕士研究生, 主要研究方向为地震预测, 固体力学。E-mail: yuans@lnm.imech.ac.cn

张浪平: 中国地震局地震预测研究所, 副研究员, 理学博士, 主要从事固体力学与地震力学方向的研究。E-mail: zlp@seis.ac.cn

唐兰兰: 新疆地震局, 副研究员, 主要从事地震预测与地震活动性方面的研究。E-mail: tllfeg1981@163.com