

文章编号: 0253-3782(2002)06-0569-10

用应变积累释放模型研究中国大陆 地块分区地震活动*

马宏生 刘 杰 张国民 李 丽

(中国北京 100036 中国地震局分析预报中心)

摘要 依据活动地块假说及活动边界的划分, 对中国大陆地震活动进行分区. 在此基础上, 应用应变积累释放模型, 通过地震应变积累释放的计算, 研究了中国大陆各活动地块分区的地震活动性, 初步探讨了各地块的地震活动阶段划分. 此外, 还对应变积累释放模型的应用前提条件进行了必要的讨论, 并对模型结果中可能出现的问题给予一定分析.

关键词 应变积累释放 活动地块 地震活动性 地震活跃期

中图分类号: P315.72⁺7

文献标识码: A

引言

许多研究表明, 地震活动具有空间不均匀性和时间非平稳性, 前者表现为地震在空间上往往成带、区分布, 后者表现为地震活动在时间轴上具有活跃和平静(高潮和低潮)相交替的特性. 对我国地震活动分析表明, 在不同的时期, 强震分布显示了不同的空间分布图象. 根据应变释放曲线图, 可将强震活动划分为若干周期性起伏, 每一周期包括一个应变能释放高潮和低潮, 图象比较稳定, 有相对稳定的主体地区. 地震应变能积累与释放随时间的起伏变化, 决定了强震活动的周期.

邱竞男和高旭(1986)通过对本世纪以来中国大陆 6 级以上地震活动性参数(频率、能量、应变释放及 b 值等)较为系统地分析, 划分了中国大陆地震活动的阶段、探索了每一活动阶段强震活动主体地区变迁的特征, 并对今后中国地震大形势提出了初步看法. 黄忠贤和陈虹(1996)也曾利用应变积累释放曲线的方法, 讨论了中国各主要地震区带的平静—活跃现象及其与构造运动之间的联系. 本文依据活动地块假说及活动边界的划分, 对中国大陆地震活动进行分区. 在此基础上, 应用应变积累释放模型, 通过地震应变积累释放的计算, 研究了中国大陆各活动地块分区的地震活动, 比较了中国大陆各活动地块的地震活动性, 并探讨了未来各区的地震活动趋势.

1 模型的提出

一个地块中的应变是与构造应力、地震过程联系最密切的一个物理量, 在地震分期研

* 国家重点基础研究发展规划项目《大陆强震机理与预测》(G19980407)资助.
2001-07-13 收到初稿, 2002-03-25 收到修改稿, 2002-04-08 决定采用.

究中较为常用(夏浩明, 1987). 一次地震释放的应变能是根据 Gutenberg 和 Richter (1956) 及 Kanamori (1977) 的能量震级经验公式

$$\lg E = 1.5M_s + 4.8 \quad (1)$$

先计算能量再开平方得到的. 式中, E 为地震释放的能量(以 J 为单位), M_s 为面波震级.

在对某一地区作应变积累释放研究时, 我们必须考虑该地区地震资料的完整性. 这涉及到两个方面: 一是时间上的相对完整性, 即选取的地震资料是否包含了完整的地震活动轮回; 另一方面是空间上的相对完整, 即所用的地震资料在空间上应与孕震的构造块体(有时称地震区)相符. 从地震时间序列特征上分析, 地震活动在时间上呈相对平静与显著活跃相交替的特点, 因此, 在考察地震资料完整性时, 要充分考虑这个特点.

在资料比较完整的情况下, 我们提出对某一相对统一和完整的体系, 在一个或几个地震活动轮回中, 应变能的积累与释放应该是总体等量的. 在地壳运动过程中, 活动构造块体(相当于一个孕震系统)应变随时间在不断积累, 在达到岩石极限强度时, 以地震的形式将积累的应变释放出来, 以达到新的平衡. 地震平静阶段是应变的积累阶段, 其特点是积累远远大于释放; 而在活动阶段, 则是释放远远大于积累. 而在一个完整的地震轮回内, 总的积累量应该与总的释放大体一致. 根据上述特点, 我们在应变积累和释放曲线的基础上, 应用应变积累释放模型来讨论各地震分区的地震活动性.

把平静阶段作为一个周期的开始, 由于平静阶段强震少, 应变能得到积累, 当积累到一定程度后, 开始转向活动, 并逐渐达到高潮, 活动阶段释放的应变能在某种意义上与它在平静阶段积累的应变能多少有关. 因此, 一个地震活动周期以平静阶段作为开始更为合理(时振梁等, 1974).

由张国民等(1993, 1995)以及张国民和李丽(1997)研究的构造块体成组孕震模型, 给出了如图 1 所示的理论曲线. 其中包括孕震系统总体应变水平随时间的变化曲线(上图); 孕震系统地震活动时间分布 $M-t$ 图(下图, 此处, t 是指计算机模型模拟成组强震活动的实验时间). 图中以活动周期起始为起点, 至最后一个活动周期结束为终点, 统计整个过程的总时间段. 计算其总应变释放量 $\sum \sqrt{E_i}$, 某一时间间隔应变释放率

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sum \sqrt{E_i}}{T} \quad (2)$$

式中, T 为总时间段. 在包含数个活动轮回的总时间段 T 中, 应变的积累和释放总体上平衡. 需要指出的是, 用 \sqrt{E} 代表一个地块的应变释放量 ε (Benioff, 1951), 是一种近似表示方法. 实际上, $E_i \propto \mu \varepsilon_i^2 / 2$. 其中, μ 为弹性常数. 本研究设定同一个地块中 μ 为常数, 用 $\sqrt{E_i}$ 表示第 i 次地震的应变释放量, 仅是为了表征不同震级地震的应变释放相对大小、不同地块之间所得结果也有一定差异. 因此, 式(2)中的 $\dot{\varepsilon}$ 可视为应变积累的平均速率. 将时间段 t 中应变积累量 $\dot{\varepsilon}t$ 减去 t 时间段中实际应变释放量 $\sum_i \sqrt{E_i}$, 即

$$\varepsilon_{(t)} = \dot{\varepsilon}t - \sum_{i=1}^{N(t)} \sqrt{E_i} \quad (3)$$

就可求出反映当年应变水平的值 $\varepsilon(t)$ ，其中 $N(t)$ 表示 t 时刻前发生的地震次数。由式(2)和(3)可得到 $\varepsilon(t)$ 随 t 变化的曲线。该曲线与图 1a所示的理论曲线类似，可较为清楚地看出地震活动的周期性起伏。凡曲线总趋势上升，即应变能处在积累阶段，此时积累大于释放，我们认为是平静阶段；曲线下降段，即应变能处在释放阶段，此时释放大于积累，我们认为是地震活跃阶段。

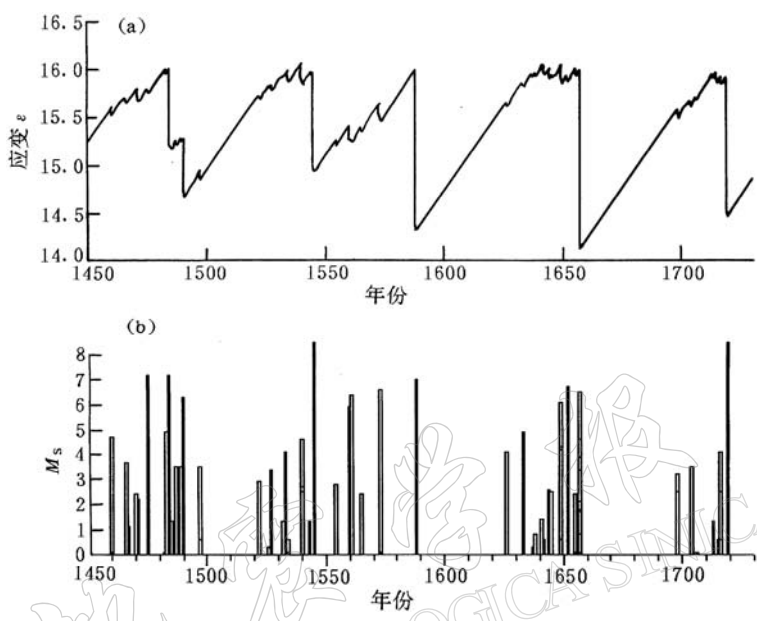


图 1 模型应变释放曲线及 $M-t$ 图
(a) 1450~1730 年应变释放; (b) 1450~1730 年 $M-t$ 图

2 中国大陆的活动地块及本研究地震区的划分

本研究所做的地震区划分是基于活动地块的研究。张国民和张培震(2000)将中国大陆划分为 5 个一级活动地块和 19 个二级活动地块。5 个一级活动地块分别是青藏高原、新疆、华北、华南和东北。一级活动地块所包含的二级活动地块分别为天山、准噶尔、阿尔泰、塔里木、祁连、柴达木、昆仑、羌塘、拉萨、喜马拉雅、川滇、阿拉善、鄂尔多斯、华北、燕山、东北、华南、胶东和东南沿海。

本研究以一级活动地块为基础，将中国大陆划分为 6 个地震区，即华北、新疆、东南沿海、川滇、西藏和西北地震区(图 2 中的粗线)。其中华北地震区、新疆地震区和东南沿海地震区与华北、新疆、华南 3 个一级活动地块基本对应。川滇地震区除包括川滇活动地块外，还包含云南的滇西南部分。由于这一地震区地震活动频繁、构造背景复杂，故我们将其视为一个整体。西藏地震区包括喜马拉雅块体的中国大陆部分、拉萨地块及羌塘地块。西北地震区则是由昆仑地块、柴达木地块、祁连地块和阿拉善地块构成。

这 6 个地震区基本涵盖了中国大陆 M_s6 以上所有浅源地震，但各区的应变能积累和释放在深部结构、变形过程和动力学等方面又互不相同，这也是我们分区研究中国大陆地震活动性的理论依据所在。

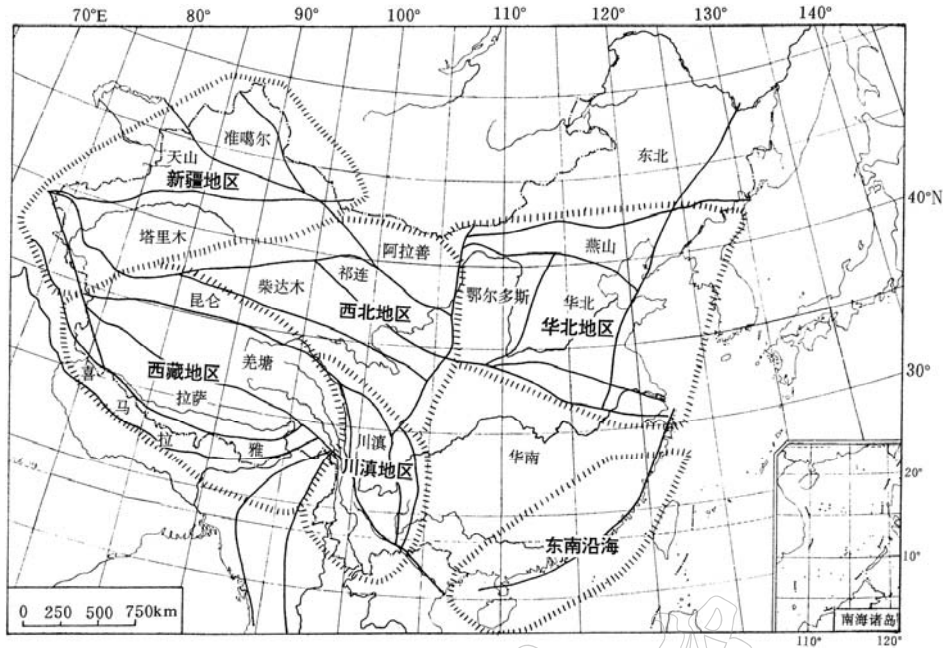


图 2 中国大陆地区地震活动分区图

3 中国大陆各地块地震活动性分析

由于不同区域有不同的地震孕育环境、不同的历史记载，考虑到地震资料的完整性，在计算分析时对不同区域选取了不同的起始时间。在此基础上，我们对每一地震区现在所处的地震活动阶段进行了讨论，同时，还应用各地震区的应变释放率 $\dot{\epsilon}$ 分析了各区的地震活动性。下面我们将分区进行分析。

1) 华北地区. 该区从 1480 年以后 6 级以上地震资料是比较完整的(黄玮琼等, 1994). 该区 1303 年有一次 8.0 级地震, 1556 年又有一次 8.3 级地震. 我们选取起始时间时, 考虑到应变的积累过程及大释放后的影响, 认为从 1400 年开始是比较合理的(图 3a). 图 3a 所显示的应变积累释放曲线大致反映了两个平静活跃周期, 这两个周期共计 600 年. 图中我们可以清楚看出, 前一周期, 在 1700 年前后应变能释放基本完成, 其应变值达到最低, 从积累到释放合计 300 年; 后一周期, 从 1700 年至今, 当前正处于这一周期的结束阶段. 有了这两个相对完整的记录, 我们可以用它们的平均应变释放率 $\dot{\epsilon}$ 与其它地区的 $\dot{\epsilon}$ 对比, 来考察华北地区地震活动的强弱. 计算得到的华北地区平均应变释放率 $\dot{\epsilon} = 5.9 \times 10^6 \text{ J}^{1/2}/\text{a}$, 相当于每年释放 0.7 次 6 级地震. 需要指出的是, 本文给出的 ϵ_0 是个相对值, 选取计算开始点应变量 $\epsilon_{(0)} = 0$.

2) 东南沿海地区. 地震资料显示, 该区 5 级以上地震从 1500 年开始是比较完整的, 同时, 由于 1300~1400 年历史地震纪录中从没有 $M_{\leq 5}$ 以上地震, 因此, 考虑到应变的积累时间, 我们在做应变积累释放曲线时, 选取 1400 年作为起始点(图 4). 该区地震资料比较完整, 两个大的周期也比较清晰, 尤其是后一周期, 应变能积累时间较长, 释放也比较彻

底. 近期地震活动较弱, 其平均应变释放率 $\dot{\varepsilon}=1.6\times10^6\text{ J}^{1/2}/\text{a}$, 相当于每年发生 0.2 次 6 级地震. 比较华北地区与东南沿海地区的年应变释放速率可以看出, 华北地区的应变积累比东南沿海地区略高, 地震活动性也稍强.

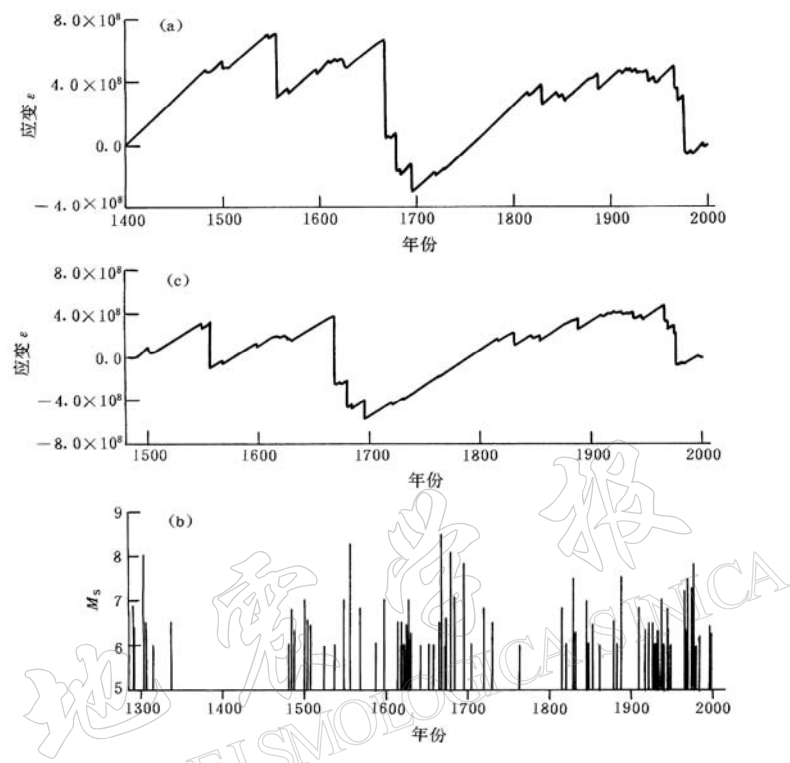


图 3 华北地区应变释放及 $M-t$ 图

(a) 1400~2000 年应变释放; (b) 1480~2000 年应变释放; (c) 1300~2000 年 $M-t$ 图

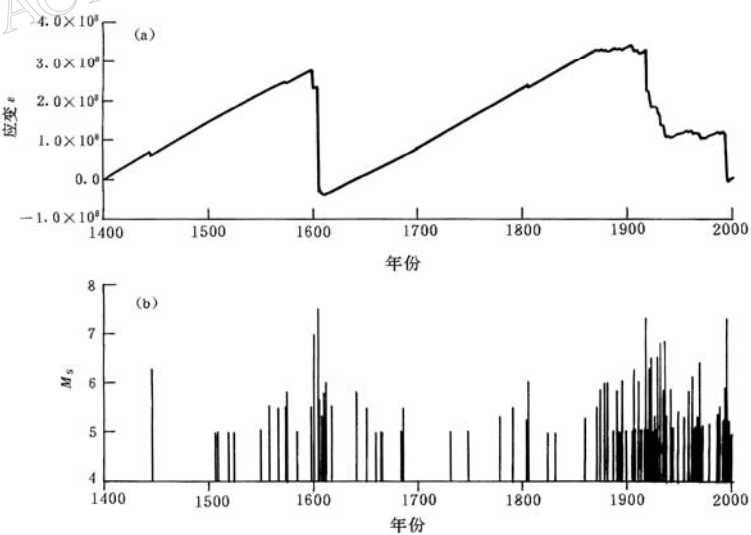


图 4 东南沿海地区应变释放及 $M-t$ 图

(a) 1400~1730 年应变释放; (b) 1400~2000 年 $M-t$ 图

3) 西北地区. 该区 1900 年以前的历史地震记录缺失严重, 考虑到 1920 年海原大地震的影响, 我们认为从 1800 年起始计算比较合理(图 5b). 另外, 为了验证 1800 年作为起始时间的合理性, 我们还选取了 1500 年作为起始年(图 5a). 图 5a 中, 可以看到 1500~1750 年这一平静活跃期与 1750~2000 年这一平静活跃期的曲线形态有明显差异, 说明前一个平静活跃期应变能没有完全释放出来. 这表明在资料严重缺失情况下计算时, 所得结果是不合理的. 这就证明了图 5b 中起始时间的选取是合理的. 从图 5b 可以看出, 西北地区目前这一活跃期已基本结束, 现在正处于应变积累阶段. 西北地区平均应变释放率 $\dot{\epsilon} = 1.33 \times 10^7 \text{ J}^{1/2}/\text{a}$, 相当于每年释放 1.68 次 6 级地震, 地震活动水平比华北地区和东南沿海地区都高.

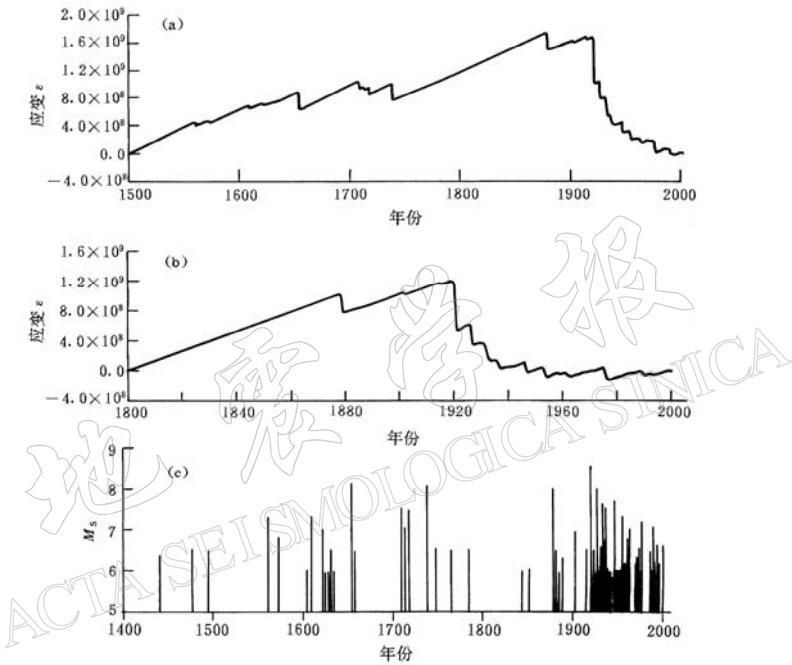


图 5 西北地区应变释放及 M_s - t 图

(a) 1500~2000 年应变释放; (b) 1800~2000 年应变释放; (c) 1400~2000 年 M_s - t 图

4) 新疆地区. 该区地震资料的完整记录是在 1900 年之后, 考虑到 1812 年及 1902 年两次 8 级以上大震的影响, 我们以 1890 年作为起始时间(图 6a). 该区目前地震活动较为频繁, 整个应变能积累处于较高阶段, 未来进入高潮释放的可能性较大. 该区平均应变释放率 $\dot{\epsilon} = 2.61 \times 10^7 \text{ J}^{1/2}/\text{a}$, 相当于每年释放 3.29 次 6 级地震, 其地震活动水平是相当高的.

5) 西藏地区. 考虑到 1833 年 8 级大震的影响, 选取该区地震资料时我们取 1900 年作为起始时间(图 7). 西藏地区前一活跃期于 1950 年前后结束, 目前, 其应变能处于积累阶段. 其平均应变释放率 $\dot{\epsilon} = 3.34 \times 10^7 \text{ J}^{1/2}/\text{a}$, 相当于每年释放 4.2 次 6 级地震, 其地震活动水平是中国大陆地区最高的.

6) 川滇地区. 我们分别以 1630 和 1900 年为起始点作图(图 8). 在图 8a 中, 我们看到由于前期地震记录不完整, 使得 1920 年以后地震密集, 造成应变能似乎是在近 50 年开

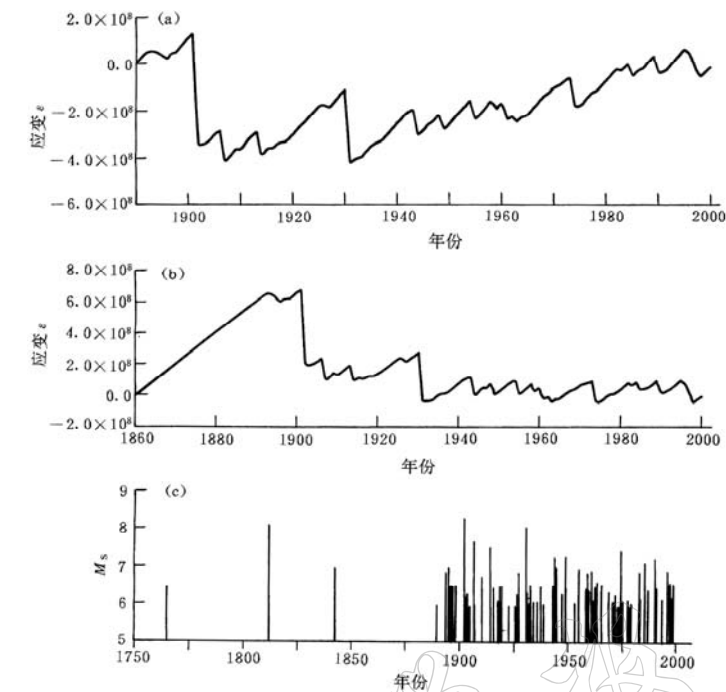


图6 新疆地区应变释放及 $M-t$ 图
(a) 1860~2000 年应变释放; (b) 1890~2000 年应变释放; (c) 1750~2000 年 $M-t$ 图

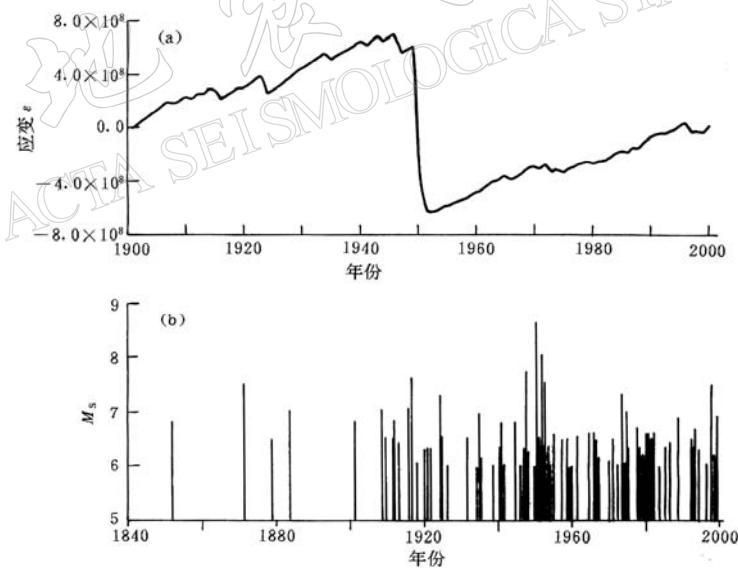


图7 西藏地区应变释放及 $M-t$ 图
(a) 1900~2000 年应变释放; (b) 1840~2000 年 $M-t$ 图

始大规模释放这一地震活跃的假象. 由图 8b 可以看出, 目前川滇地区地震高潮释放也已经结束, 总体应变能处于较低水平, 处于积累阶段. 但在积累过程中地震活动较为强烈. 川滇地区平均应变释放率 $\dot{\epsilon} = 2.69 \times 10^7 \text{ J}^{1/2}/\text{a}$, 相当于每年发生 3.4 次 6 级地震.

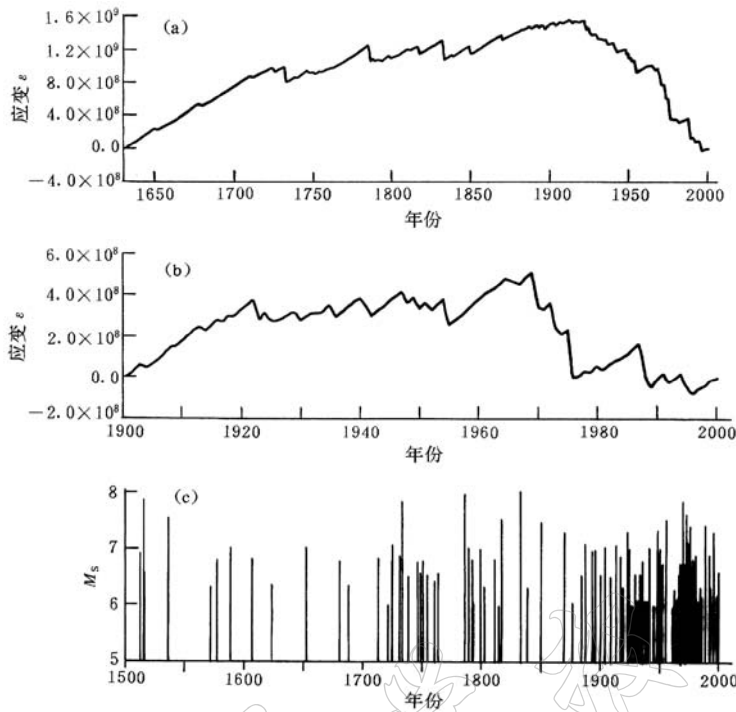


图 8 川滇地区应变释放及 $M-t$ 图

(a) 1630~2000 年应变释放; (b) 1900~2000 年应变释放; (c) 1500~2000 年 $M-t$ 图

根据以上结果，我们可以得出如下结论：

西藏地区构造活动最为强烈，地震活动频繁且地震应变能积累迅速，地震活动水平最高；其次是川滇地区，构造活动强烈，整个地区地震活动水平很高，积累和释放过程进行都很快；再者，新疆地区构造活动也很强烈，地震活动颇为频繁；西北地区构造活动则一般，但现阶段 6 级左右中强地震活动较多；华北及东南沿海地区，其构造活动较弱，尤其是东南地区，近期地震活动性非常低。

对比西藏和川滇地区的应变积累释放曲线，我们发现，西藏地区处于应变积累期，而川滇面临的是剩余释放期。对比东南沿海和华北地区的应变积累释放曲线，我们发现，东南沿海地区目前大约处于剩余释放期的尾声阶段，而华北地区目前可能处于剩余释放的晚期，在未来几十年中还会有一次中强地震的应变释放过程。西北地区应变能大规模释放已经结束，目前正处于应变积累阶段。新疆地区的应变能积累已进入较高阶段，未来发生大震的可能性很大，应引起充分注意。

4 讨论和结论

本研究着重于用应变积累释放模型分区讨论地震的平静—活跃期现象，探讨了中国大陆各地震区地震活动性的变化。这一模型考虑了地震活动的时空差异，将同一地区不同时间的不同震级折算成统一的应变变量，根据应变积累和释放的净效果，即地震区中构造应变的上升或下降来判断平静或活跃，在一定程度上减少了研究中的主观性。从以上研究结果可以看出，

该模型具有一定的实用价值. 由应变积累的平均速率 $\dot{\epsilon}$ 可以确定一个地块的平均地震活动水平, 但当前地震活动水平还取决于该地块地震的应变释放情况. 在包含数个平静活跃交替的地震轮回的情况下, 区域的应变积累和释放是大体一致的. 如果累计应变释放偏低于应变积累, 则未来会有较多或较大地震发生, 以消除这种偏离, 而其它参量则无这个关系.

在对地震区域进行划分时, 借鉴了活动地块假说的科学内涵, 对中国大陆进行了科学的区划, 其分区的合理性是经得住推敲的. 另外, 本研究对应用应变积累释放模型, 明确提出了前提条件, 即对于一个相对封闭体系中的一个或几个相对完整的地震活动轮回, 可以假定其应变的积累与释放相当. 但在实际应用中则需注意如下问题:

1) 起始时间的选取对应变积累释放曲线的影响. 我们在图 3a 中看到, 华北地区地震应变能释放第三周期明显比第四周期强, 即第三活跃期强而第四活跃期弱, 地震活动也证明了这一点(蒋铭, 马宗晋, 1985). 但在图 3b 中却看到第四活跃期应变水平比第三活跃期高, 而且至今还没有降下来. 这与实际地震活动情况是不符合的. 出现这种情况, 是由于没有考虑第三活跃期开始阶段的应变积累过程. 在这个阶段应变积累远大于释放, 造成得到的年应变释放速率大于实际地震应变释放速率, 使整个区域得到的应变与实际应变出现一个系统偏差, 造成应变随时间逐渐升高. 因此, 起始时间选取时, 不仅要考虑对地震活动进行分期, 还应当考虑应变积累阶段所占用的时间, 否则, 会造成所得应变速率偏大.

为进一步研究该问题, 对比图 6a 与图 6b 发现, 图 6a 中的曲线在 1902 年 8.3 级地震后有上升趋势, 但图 6b 中的曲线在 1902 年大地震后趋势比较平稳. 我们认为, 1902 年 8.3 级大震的影响是非常巨大的, 在计算积累速率时必须考虑到. 其前期是应变积累的时间, 由于目录不完整, 不容易确定起始时间. 本研究选取了不同起始时间进行计算, 由于新疆具有百年大震轮回周期, 现在新疆应处于较高应变状态, 所以认为, 从 1890 年开始得到的

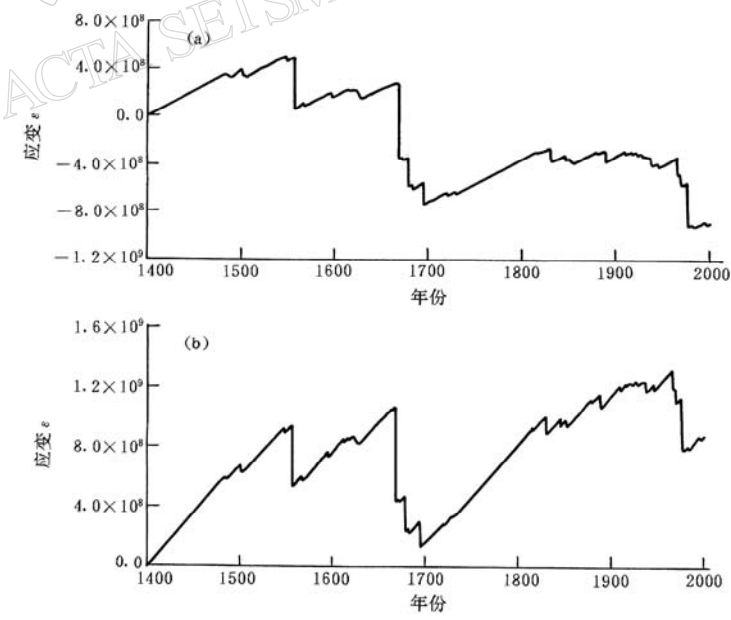


图9 改变华北地区应变释放率的实验结果
(a) 降低应变释放率; (b) 提高应变释放率

结果相对合理. 相反, 如果从 1860 年开始(图 6b), 由于应变积累速率较低, 计算得到的结果是现在应变处于较低状态, 其结果与实际情况不吻合.

因此, 起始时间的选取是应用本模型的关键. 选取时不仅要考虑目录的完整性, 从相对完整的目录开始计算, 而且还要合理地给出地震活跃前应变积累阶段所占用的时间.

2) 应变释放速率的变化对应变积累释放曲线的影响. 由于实际地震目录中, 常有历史地震缺失或历史地震震级标定偏高等问题, 可能会造成所得到的释放速率并不是真实的应变释放速率. 针对这一情况, 我们选取华北地区, 做改变应变释放速率的实验(图 9a). 我们发现, 在所有条件不变的情况下, 单纯降低应变释放速率不会影响整个曲线的形态. 但是, 这样得到的曲线相对我们模型得到的曲线, 其总体趋势呈下降走势. 在提高应变释放速率时(图 9b), 曲线形态同样没有变化, 其总体趋势呈上升走势.

参 考 文 献

- 黄玮琼, 李文香, 曹学锋. 1994. 中国地震资料完整性研究之二[J]. 地震学报, 16(4): 423~431
黄忠贤, 陈虹. 1996. 中国大陆地震分期活动及其与构造运动的关系[J]. 中国地震, 12(4): 403~410
蒋铭, 马宗晋. 1985. 华北第三、四地震活跃期对比[J]. 地震, (6): 5~11
邱竞男, 高旭. 1986. 关于本世纪我国地震活动阶段性的讨论[J]. 地震, (6): 41~47
时振梁, 环文玲, 曹新玲, 等. 1974. 中国地震活动的某些特征[J]. 地球物理学报, 17(1): 1~13
夏浩明. 1987. 大华北 $M \geq 4$ 地震阶段性分区特征及其意义[J]. 地球物理学报, 30(3): 281~291
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[J]. 中国地震, 9(1): 20~32
张国民, 耿鲁明, 张永仙, 等. 1995. 构造块体成组孕震模型和前兆场某些特征分析[J]. 地震学报, 17(1): 1~10
张国民, 李丽. 1997. 强震成组孕育、成组发生过程中相互间影响的研究[J]. 地震, 17(3): 221~231
张国民, 张培震. 2000. 《大陆强震机理与预测》中期学术进展[J]. 中国基础科学, (10): 4~10
Benioff H. 1951. Earthquakes and rock creep[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 41: 31~62
Gutenberg B, Richter C F. 1956. Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration(second paper)[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 46: 105~145
Kanamori H. 1977. The energy release in great earthquakes[J]. *J Geophys Res*, 82: 2 981~2 987

THE SEISMICITY RESEARCH IN THE SUBREGIONS OF CHINESE MAINLAND USING STRAIN ACCUMU- LATING AND RELEASING MODEL

Ma Hongsheng Liu Jie Zhang Guomin Li Li

(Center for Analysis and Prediction, China Seismological Bureau, Beijing 100036, China)

Abstract: The sub-regions are divided for the seismicity of the Chinese mainland based on the hypothesis of the active crustal blocks and the division of the active boundaries. On this result, the seismicity of each active crustal blocks are studied by calculating the accumulated and released strain of the earthquakes based on strain accumulating and releasing model, and the different seismicity stages of the sub-regions are discussed basically. Finally we have discussed the premise of the model application and the potential problems of the model results.

Key words: strain accumulation and release; active crustal block; seismicity; seismic active period