

# 云南地区6级以上强震时间分布特征 及其概率预测模型研究\*

苏有锦, 李忠华

(云南省地震局, 昆明 650224)

**摘要:** 系统分析了云南地区  $M \geq 6.0$ 、 $M \geq 6.5$  和  $M \geq 7.0$  地震的间隔时间分布特征; 运用  $M \geq 5.0$  地震目录, 基于 G—R 关系的年发生率和泊松分布模型, 构建了云南地区  $M \geq 6.0$ 、 $M \geq 6.5$  和  $M \geq 7.0$  地震的概率预测模型; 结合间隔时间分布统计特征和概率预测模型, 对云南地区  $M \geq 6.0$ 、 $M \geq 6.5$  和  $M \geq 7.0$  地震, 建立了具有概率水平的三级预测预警指标: C (黄)、B (橙)、A (红)。

**关键词:** 6级以上强震; 间隔时间; 分布特征; 概率预测模型; 预测预警指标; 云南地区

**中图分类号:** P315.75

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2011)01-0001-07

## 0 引言

地震重复(或间隔)时间(Recurrence Time)及其分布特征是地震活动性分析及地震危险性预测研究的一项主要内容。根据弹性回跳理论, 一次大地震释放了地壳应变能, 地壳应变在持续构造力的作用下重新积累, 最终又形成另一次大地震。一般认为, 一个区域、一个地震带上的地震(尤其是大地震)是按一定规律的时间间隔重复发生的。

基于某个震级限以上地震的间隔时间分布特征, 选用概率密度函数(Probability Density Functions), 构建一个地区或区域的地震概率预测模型, 进行地震危险性的概率评估或预测, 这种方法在国内外均有较多研究(Sun, Pan, 1995; Matthews *et al*, 2002; Field, 2007; 易桂喜等, 2002; 任俊杰, 陈虹, 2004; 张永庆等, 2007)。在地震概率预测模型研究中比较常用的概率密度函数有泊松(指数)分布模型(Poisson or Exponential Model), 对数正态分布模型(Log-normal Model), 韦伯尔分布模型(Weibull Model), 布朗流逝时间分布模型(Brownian Passage-Time Model), 伽玛分布模型(Gamma Model)等, 其中泊松(指数)分布模型在实际工作中应用最广泛(Kagan, Jackson, 1999; Matthews *et al*, 2002)。从1988年以来, 美

国加州地震概率研究组(Working Group on California Earthquake Probabilities, 简称WGCEP)就一直在研究加州地区的地震概率预测模型, 已先后发展了WGCEP-1988模型、WGCEP-1990模型、WGCEP-1995模型和WGCEP-2002模型(Field, 2007), 他们的研究工作比较有影响力和代表性。

从1996年2月3日丽江7.0级地震发生至2010年6月, 云南地区7级以上地震平静已达14.41 a; 从2000年1月15日姚安6.5级地震发生至2010年6月, 云南地区6.5级以上地震平静已10.46 a, 该平静时间已超过1900年以来的历史极限。从统计上分析, 经过这么长的平静时间, 发生相应量级地震的危险性已很大, 但它的危险性概率水平有多高? 仅从统计上不能给出一个定量的危险性概率水平评估值。本文试图对这一问题进行研究。首先系统分析了云南地区  $M \geq 6.0$ 、 $M \geq 6.5$ 、 $M \geq 7.0$  地震的间隔时间分布特征, 进而用  $M \geq 5.0$  地震目录, 基于 G—R 关系的年发生率和泊松分布模型构建了云南地区  $M \geq 6.0$ 、 $M \geq 6.5$ 、 $M \geq 7.0$  地震的概率预测模型, 并结合  $M \geq 6.0$ 、 $M \geq 6.5$ 、 $M \geq 7.0$  地震间隔时间统计特征, 研究了具有概率水平的强震预测预警指标。

## 1 数据分析

本研究使用的地震目录是《中国历史强震目

\* 收稿日期: 2010-07-08.

基金项目: 云南省地震预报研究专项(JCYB-20080601-1)和中国地震局地震行业科研专项(200708038)联合资助.

录》(公元前 23 世纪—公元 1911 年)(国家地震局震害防御司, 1995) 和《中国近代地震目录》(公元 1912—1990 年)(国家地震局震害防御司, 1999); 1990~2009 年的地震目录则使用中国地震台网中心测定的中国及邻区  $M \geq 5.0$  地震目录。从这些目录中选取 1900~2009 年云南地区 ( $21^\circ \sim 29^\circ\text{N}$ ,  $97^\circ \sim 106^\circ\text{E}$ )  $M \geq 5.0$  地震目录, 并进行余震删除处理。余震删除的原则是参照 C—S 余震时间窗, 作如下定义: 6.0~6.9 级地震, 震后 3 个月内的余震被删除; 7.0~7.9 级地震, 震后 6 个月内的余震被删除。经余震删除处理后, 1900~2009 年云南地区  $M \geq 5.0$  地震共有 324 次, 其中 5.0~5.9 级地震 243 次, 6.0~6.9 级地震 68 次,  $M \geq 7.0$  地震 13 次。相关研究认为, 1929 年以来云南地区  $M \geq 5.0$  地震目录才基本完整(黄玮琼等, 1994; 苏有锦等, 2001)。20 世纪早期云南地区地震漏记较严重, 滇西南是主要的漏记地区, 20 世纪 30 年代以后该地区 5 级以上地震记录才较为完整(皇甫岗, 李忠华, 2010)。

图 1 给出了 1900~2009 年云南地区  $M \geq 5.0$  地震的震中分布和间隔时间分布, 在该研究区域内, 实际上包括了四川省和中缅交界地区的部分地震。由图 1b 可见, 大致在 1930 年前后,  $M \geq 5.0$  地震间隔时间分布有显著差别, 1930 年以后处于另一种分布状态, 且较稳定。这进一步说明云南地区 1930 年以后的 5 级以上地震目录是基本完整的。

统计 1930~2009 年云南地区  $M \geq 5.0$  地震的间隔时间, 共有 277 个样本, 平均间隔时间为 0.29 a, 均方差为 0.32 a, 按 0.25 a 的步长进行统计。图 2 给出了间隔时间概率密度分布和用泊松(指数)分布模型和对数正态分布模型的拟合情况。泊松(指数)分布模型为  $f(t, u) = \exp(-\eta \mu t)$  (Matthews *et al*, 2002); 对数正态分布模型为  $f(t, \bar{y}, \sigma_y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi t \sigma_y}} \exp(-\frac{(\lg t - \bar{y})^2}{2\sigma_y})$  (Zöller, Hainzl, 2007), 其中  $\sigma_y = \sqrt{\lg(1 + \frac{\sigma}{\mu})^2}$ ,  $\bar{y} = \lg \mu - \frac{\sigma_y^2}{2}$ 。

$\mu$  和  $\sigma$  是被拟合数据的平均值和标准差。1930~2009 年云南地区  $M \geq 5.0$  地震间隔数据, 平均值  $\mu = 0.29$  a, 均方差  $\sigma = 0.32$  a。

由图 2 可见, 实际统计分布(点实线)与这两个模型均比较接近, 泊松(指数)分布模型还

更好一些。因此, 对于云南地区  $M \geq 5.0$  地震间隔时间分布, 本研究采用了泊松(指数)分布模型。

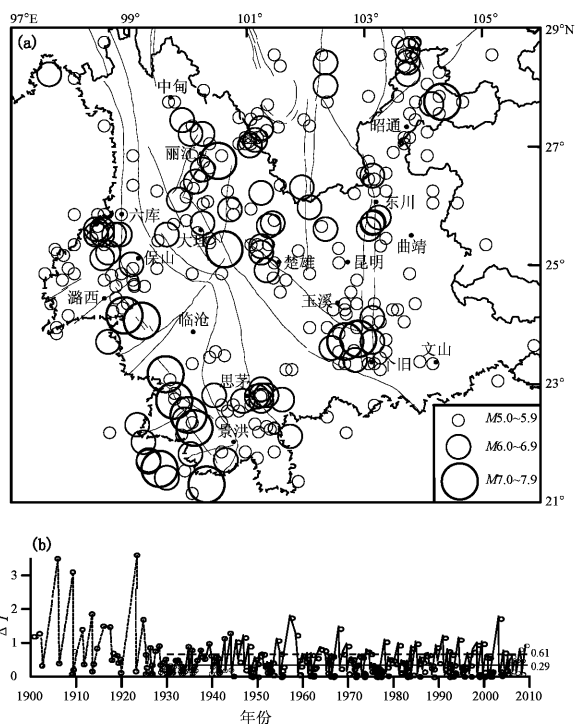


图 1 1900~2009 年云南地区  $M \geq 5.0$  地震震中分布图 (a) 和间隔时间分布图 (b)

Fig. 1 Epicenter distribution (a) and the interval distribution (b) for  $M \geq 5.0$  earthquakes in Yunnan region from 1900 to 2009

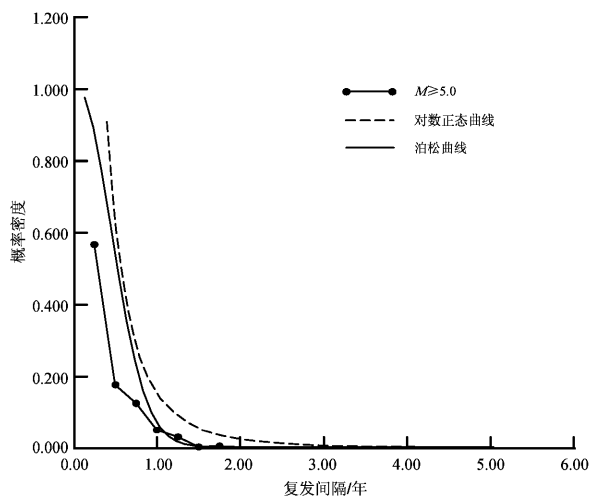


图 2 1930~2009 年云南地区  $M \geq 5.0$  地震间隔时间概率密度分布函数

Fig. 2 Probability density functions of the interval distribution for  $M \geq 5.0$  earthquakes in Yunnan region from 1930 to 2009

## 2 $M \geq 6.0$ 、 $M \geq 6.5$ 、 $M \geq 7.0$ 地震间隔时间分布特征

### 2.1 $M \geq 6.0$ 地震间隔时间分布特征

图 3a 给出了 1900 ~ 2009 年云南地区  $M \geq 6.0$  强震的间隔时间分布。从 1900 年至 1909 年 5 月 9 年多的时间内，仅在 1901 年有过 1 次  $M \geq 6.0$  地震，其间出现了长达 8 年多的间隔。分析认为，云南地区  $M \geq 6.0$  地震目录资料，在 1909 年以前可能存在遗漏，1909 年以后才基本完整。因此，本文仅对 1909 年以后的资料进行分析。1909 ~ 2009 年云南地区共发生  $M \geq 6.0$  地震 80 次，有 79 个间隔时间样本，统计得到平均间隔时间为 1.27 a，均方差  $\sigma$  为 1.31 a；0.5 $\sigma$  方差线为 1.93 a，1 $\sigma$  方差线为 2.58 a。统计表明，实际间隔时间大于平均间隔时间（1.27 a）的情况出现过 30 次，约占总样本数的 38%，也就是说，约 62% 的  $M \geq 6.0$  地震的间隔时间在 1.27 a 内；大于 0.5 $\sigma$  方差线（1.93 a）的有 21 次，约占 27%；大于 1 $\sigma$  方差线（2.58 a）的有 9 次，约占 11%。

下面进一步分析间隔时间大于 1 $\sigma$  方差线（2.58 a）的情况。由图 3a 可见，9 次地震中有 8 次的间隔均在 3 a 以上，分别是 3.61 a、5.92 a、3.99 a、5.76 a、3.27 a、3.55 a、3.46 a、3.63 a。从后续地震情况看，有 5 次直接对应了 6.5 级以上地震，其中 2 次为 7 级以上地震（1970 年通海 7.8 级、1988 年澜沧—耿马 7.6、7.2 级地震）。因此，若 6 级以上地震出现较长平静时间（3 a 以上），就要特别警惕发生 6.5 级以上甚至 7 级以上地震的危险性。

### 2.2 $M \geq 6.5$ 地震间隔时间分布特征

1900 ~ 2009 年云南地区共发生  $M \geq 6.5$  地震 37 次，有 36 个间隔时间样本。 $M \geq 6.5$  地震的平均间隔时间为 2.75 a，均方差为 2.77 a；0.5 $\sigma$  方差线为 4.13 a，1 $\sigma$  方差线为 5.52 a（图 3b）。大于平均间隔时间（2.75 a）的情况出现过 14 次，约占总样本数的 39%，即约 61% 的  $M \geq 6.5$  地震的间隔时间在 2.75 a 内；大于 0.5 $\sigma$  方差线（4.13 a）的有 6 次，约占 17%；大于 1 $\sigma$  方差线（5.52 a）的有 5 次，约占 14%。

间隔时间大于 1 $\sigma$  方差线（5.52 a）的有 5 次，分别是 8.24 a、5.92 a、8.01 a、10.37 a、9.64 a，

其中有 2 次直接对应了 7 级以上地震（1950 年勐海 7.0 级、1988 年澜沧—耿马 7.6、7.2 级地震）。由图 3b 可见，从 2000 年 1 月 15 日姚安 6.5 级地震发生至 2010 年 6 月，云南地区 6.5 级以上地震平静已达 10.46 a，为 1900 年以来最长的一次，这可能预示着发生 6.5 级以上地震或 7 级以上地震的危险性已经很大。

### 2.3 $M \geq 7.0$ 地震间隔时间分布特征

1900 ~ 2009 年云南地区共发生  $M \geq 7.0$  地震 11 次（组）（1976 年龙陵 7.3、7.4 级双震和 1988 年澜沧—耿马 7.6、7.2 级双震各计为 1 次（组）），有 10 个间隔时间样本。 $M \geq 7.0$  地震平均间隔时间为 8.21 a，均方差为 6.66 a；0.5 $\sigma$  方差线为 11.54 a，1 $\sigma$  方差线为 14.87 a（图 3c）。实际间隔时间大于平均间隔时间（8.21 a）的情况出现过 4 次，约占总样本数的 36%；大于 0.5 $\sigma$  方差线（11.54 a）3 次，约占 27%；大于 1 $\sigma$  方差线（14.87 a）2 次，约占 18%。

1941 年澜沧 7.0 级地震前，7 级地震平静时间为 16.17 a；1970 年通海 7.8 级地震前，7 级地震平静时间为 19.92 a；1988 年澜沧—耿马 7.6、7.2 级地震前，平静时间为 12.44 a。目前，云南地区 7 级以上地震平静时间已达 14.41 a，已接近 1 $\sigma$  方差线，这可能预示着发生 7 级以上地震的危险性已经很大。

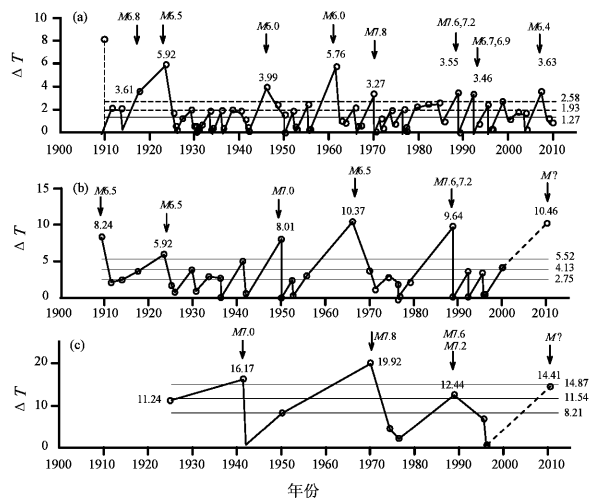


图 3 1900 ~ 2009 年云南地区  $M \geq 6.0$ (a)、 $M \geq 6.5$ (b) 和  $M \geq 7.0$ (c) 地震间隔时间分布图

Fig. 3 Interval distribution of earthquakes with  $M \geq 6.0$ (a),  $M \geq 6.5$ (b) and  $M \geq 7.0$ (c) in Yunnan region from 1900 to 2009

### 3 泊松概率模型

#### 3.1 地震年发生率和泊松概率

若考虑存在震级上限  $M_{\max}$ , Dong 等 (1984)、Sun 和 Pan (1995) 给出了基于 G—R 关系的地震年发生率

$$N(m) = \frac{e^{-\lambda m} - e^{-\lambda M_{\max}}}{e^{-\lambda M_{\min}} - e^{-\lambda M_{\max}}} N(M_{\min})$$

$$(M_{\min} \leq m \leq M_{\max}). \quad (1)$$

$\lambda$  由下式确定:

$$\frac{1}{\lambda} + \frac{M_{\min} e^{-\lambda M_{\min}} - M_{\max} e^{-\lambda M_{\max}}}{e^{-\lambda M_{\min}} - e^{-\lambda M_{\max}}} = \bar{M}. \quad (2)$$

式中  $M_{\max}$  为研究区最大的可能地震,  $M_{\min}$  是统计震级下限,  $\bar{M}$  是统计样本的平均震级。

如果地震重复时间 (间隔时间) 分布符合泊松 (指数) 分布模型, 则可由下式计算危险性概率 (Sun, Pan, 1995):

$$P(t) = 1 - e^{-tN(m)}. \quad (3)$$

式中,  $P(t)$  为在未来  $t$  年发生震级大于等于  $m$  的概率;  $N(m)$  是震级大于等于  $m$  地震的年发生率, 由 (1) 式计算。

对 1930 ~ 2009 年云南地区  $M \geq 5.0$  地震目录 (即数据模型), 取震级上、下限分别为  $M_{\min} = 5.0$ ,  $M_{\max} = 8.0$ , 统计计算得到  $N(M_{\min}) = 3.475$  (即 1930 ~ 2009 年发生  $M \geq 5.0$  地震 278 次,  $T = 80$  a, 则  $278/80 = 3.475$ ), 由 (2) 式计算得到  $\lambda = 1.628$ 。

用该模型参数 ( $M_{\min} = 5.0$ ,  $M_{\max} = 8.0$ ,  $N(M_{\min}) = 3.475$ ,  $\lambda = 1.628$ ), 由 (1) 式可计算得到  $M \geq 6.0$ 、 $M \geq 6.5$ 、 $M \geq 7.0$  地震的年发生率。图 4 给出了直接统计计算的年发生率 (由实际统计的地震次数除以统计时段的时间长度得到) 与由模型计算的年发生率 (式 (1)) 的比较。由图 4 可见, 对于云南地区的  $M \geq 6.0$ 、 $M \geq 6.5$ 、 $M \geq 7.0$  地震, 由模型计算给出的年发生率均比统计结果偏低 20% 左右。由于地震活动时间分布上的非均匀性, 用不同时段资料进行统计, 其年发生率存在较明显差异; 而通过模型式 (1) 计算, 如果地震目录资料是完整的, 这种差异就不大, 可近似忽略。

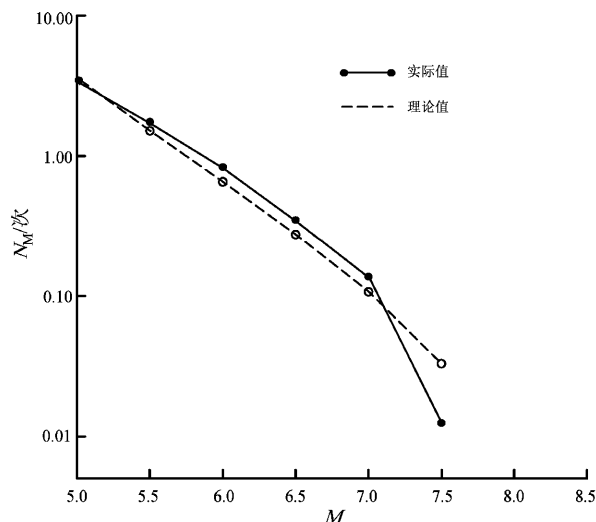


图 4 统计计算的年发生率与模型计算的年发生率比较

Fig. 4 Comparison between the annual rate from the statistics and the one from the model

#### 3.2 $M \geq 6.0$ 、 $M \geq 6.5$ 、 $M \geq 7.0$ 地震的概率模型

前文讨论了用 1930 ~ 2009 年云南地区  $M \geq 5.0$  地震目录, 基于 G—R 关系的年发生率和泊松分布模型构建云南地区  $M \geq 6.0$ 、 $M \geq 6.5$ 、 $M \geq 7.0$  强震的概率预测模型。

笔者用上述模型参数, 由式 (3) 分别计算给出了云南地区  $M \geq 6.0$ 、 $M \geq 6.5$ 、 $M \geq 7.0$  地震随间隔时间的概率增长变化曲线 (步长为 0.5 a) (图 5)。应

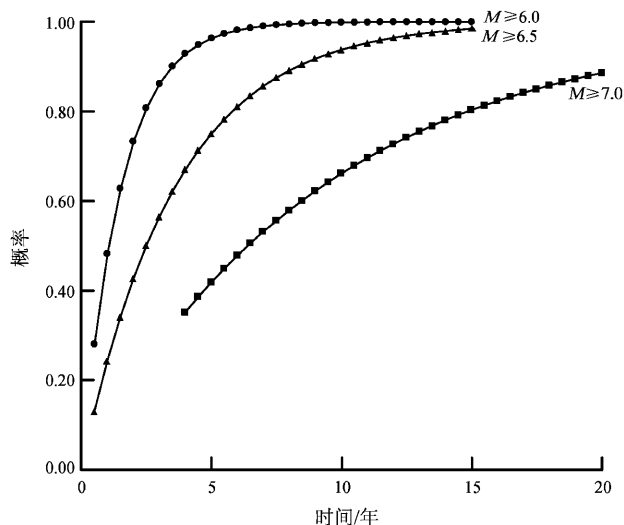


图 5 云南地区  $M \geq 6.0$ 、 $M \geq 6.5$ 、 $M \geq 7.0$  地震概率模型

Fig. 5 Probability model for the  $M \geq 6.0$ ,  $M \geq 6.5$ , and  $M \geq 7.0$  earthquakes in Yunnan

用该模型，可以根据  $M \geq 6.0$ 、 $M \geq 6.5$ 、 $M \geq 7.0$  地震的平静时间（间隔时间），给出各震级档地震的危险性的概率水平。例如，从 2000 年 1 月 15 日姚安 6.5 级地震发生至 2010 年 6 月，云南地区  $M \geq 6.5$  地震的平静时间为 10.46 a，由该模型给出的  $M \geq 6.5$  地震的危险性概率水平为 0.95（95%）；从 1996 年 2 月 3 日丽江 7.0 级地震发生至 2010 年 6 月， $M \geq 7.0$  地震的平静时间为 14.41 a，由该模型给出的  $M \geq 7.0$  地震的危险性概率水平为 0.79（79%）。

3.3 预测预警指标研究

根据前面的分析， $M \geq 6.0$  地震的平均间隔时间为 1.27 a， $0.5\sigma$  方差线为 1.93 a， $1.0\sigma$  方差线为 2.58 a，为了便于表示，分别近似取 1.5 a、2.0 a、2.5 a 3 个特征时间； $M \geq 6.5$  地震的平均间隔时间为 2.75 a， $0.5\sigma$  方差线为 4.13 a， $1.0\sigma$  方差线为 5.52 a，分别近似取 3.0 a、4.0 a、5.5 a 3 个特征时间； $M \geq 7.0$  地震的平均间隔时间为 8.21 a， $0.5\sigma$  方差线为 11.54 a， $1.0\sigma$  方差线为 14.87 a，分别近似取 8.0 a、11.5 a、15.0 a 3 个特征时间。表 1 给出了这些统计特征时间及相应的概率水平。由此，笔者根据云南地区  $M \geq 6.0$ 、 $M \geq 6.5$ 、 $M \geq 7.0$ 地震间隔时间分布统计特征及概率模型，建立具有概率水平的三级预测预警指标：C（黄）、B（橙）、A（红）（表 1）。

（1） $M \geq 6.0$  地震预测预警指标：当  $M \geq 6.0$

地震的间隔时间（或平静时间） $\Delta T \geq$  平均间隔时间（1.5 a）时，发布  $M \geq 6.0$  地震黄色预警（C 级），概率水平  $\geq 0.63$ ；当间隔时间  $\Delta T \geq 0.5\sigma$ （2.0 a）时，发布  $M \geq 6.0$  地震橙色预警（B 级），概率水平  $\geq 0.73$ ；当间隔时间  $\Delta T \geq 1\sigma$ （2.5 a）时，发布  $M \geq 6.0$  地震红色预警（A 级），概率水平  $\geq 0.81$ 。

（2） $M \geq 6.5$  地震预测预警指标：当  $M \geq 6.5$  地震的间隔时间  $\Delta T \geq$  平均间隔时间（3.0 a）时，发布  $M \geq 6.5$  地震黄色预警（C 级），概率水平  $\geq 0.56$ ；当间隔时间  $\Delta T \geq 0.5\sigma$ （4.0 a）时，发布  $M \geq 6.5$  地震橙色预警（B 级），概率水平  $\geq 0.67$ ；当间隔时间  $\Delta T \geq 1\sigma$ （5.5 a）时，发布  $M \geq 6.5$  地震红色预警（A 级），概率水平  $\geq 0.78$ 。

（3） $M \geq 7.0$  地震预测预警指标：当  $M \geq 7.0$  地震间隔时间  $\Delta T \geq$  平均间隔时间（8.0 a）时，发布  $M \geq 7.0$  地震黄色预警（C 级），概率水平  $\geq 0.58$ ；当间隔时间  $\Delta T \geq 0.5\sigma$ （11.5 a）时，发布  $M \geq 7.0$  地震橙色预警（B 级），概率水平  $\geq 0.71$ ；当间隔时间  $\Delta T \geq 1\sigma$ （15.0 a）时，发布  $M \geq 7.0$  地震红色预警（A 级），概率水平  $\geq 0.80$ 。

按上述预测预警指标，目前云南地区  $M \geq 6.5$  地震平静时间为 10.46 a，已处于红色预警（A 级）阶段； $M \geq 7.0$  地震平静时间为 14.41 a，还处于橙色预警（B 级）阶段，但到 2011 年 2 月，将进入红色预警（A 级）阶段。

表 1  $M \geq 6.0$ 、 $M \geq 6.5$  和  $M \geq 7.0$  地震三级预测预警指标：C（黄）、B（橙）、A（红）  
Tab. 1 Three-level prediction-warning indexes（C（yellow），B（orange），A（red））  
for the  $M \geq 6.0$ ， $M \geq 6.5$ ，and  $M \geq 7.0$  earthquakes

| 震级和<br>间隔时间 | $M \geq 6.0$                 |                              |                              | $M \geq 6.5$                 |                              |                              | $M \geq 7.0$                 |                               |                               |
|-------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|             | $\Delta T \geq 1.5\text{ a}$ | $\Delta T \geq 2.0\text{ a}$ | $\Delta T \geq 2.5\text{ a}$ | $\Delta T \geq 3.0\text{ a}$ | $\Delta T \geq 4.0\text{ a}$ | $\Delta T \geq 5.5\text{ a}$ | $\Delta T \geq 8.0\text{ a}$ | $\Delta T \geq 11.5\text{ a}$ | $\Delta T \geq 15.0\text{ a}$ |
| 概率水平        | $\geq 0.63$                  | $\geq 0.73$                  | $\geq 0.81$                  | $\geq 0.56$                  | $\geq 0.67$                  | $\geq 0.78$                  | $\geq 0.58$                  | $\geq 0.71$                   | $\geq 0.80$                   |
| 预测预警级别      | C                            | B                            | A                            | C                            | B                            | A                            | C                            | B                             | A                             |

4 讨论和结论

本文给出了云南地区  $M \geq 6.0$ 、 $M \geq 6.5$ 、 $M \geq 7.0$  地震的间隔时间分布统计特征。结果表明， $M \geq 6.0$  地震的平均间隔时间约为 1.27 a，均方差（ $\sigma$ ）为 1.31 a，实际间隔时间大于等于平均间隔时间、 $0.5\sigma$  方差线和  $1.0\sigma$  方差线的比例分别为

38%、27% 和 11%； $M \geq 6.5$  地震的平均间隔时间约为 2.75 a，均方差为 2.77 a，实际间隔时间大于等于平均间隔时间、 $0.5\sigma$  方差线和  $1.0\sigma$  方差线的比例分别为 39%、17% 和 14%； $M \geq 7.0$  级地震的平均间隔时间约为 8.21 a，均方差 6.66 a，实际间隔时间大于等于平均间隔时间、 $0.5\sigma$  方差线和  $1.0\sigma$  方差线的比例分别为 36%、27% 和 18%。由此可见，对于这 3 个震级档，60% 以上的地震均发

生在平均间隔时间内。这些统计特征对于认识云南地区 6 级以上地震的活动性及其预测研究是很有意义的,有助于我们对一次 6 级以上地震发生后,下一次 6 级以上地震发生的可能时间有一个基本的判断。间隔时间越长,发震的危险性越大,这是一个基本的统计概念。尤其是当间隔时间超  $0.5\sigma$  方差线或  $1.0\sigma$  方差线时,虽然这类情况出现的比例不高(3 个震级档的比例分别为 27%, 17%, 27% 或 11%, 14%, 18%),但其更具有显著性,能引起特别的注意。因此,对这部份地震的分析预测可能更具有指标意义。

用 1930~2009 年云南地区  $M \geq 5.0$  地震目录,基于 G—R 关系的年发生率和泊松分布模型,构建了云南地区  $M \geq 6.0$ 、 $M \geq 6.5$ 、 $M \geq 7.0$  共 3 个震级档地震的泊松概率预测模型。应用该模型,根据  $M \geq 6.0$ 、 $M \geq 6.5$ 、 $M \geq 7.0$  地震的平静时间(即间隔时间),就可以得到其危险性的概率水平。事实上,对一个地区而言,只要所研究震级地震的年发生率((3)式)没有变化,这就是一个“固定不变”的或者说与时间无关的模型。唯一的变化参量是间隔时间,间隔时间增加,危险性概率就非线性增加(图 5)。前面提到,由模型计算得到的年发生率比直接统计计算得到的年发生率低(图 4),由其计算所得的概率也低。

本研究中把云南地区  $M \geq 6.0$ 、 $M \geq 6.5$ 、 $M \geq 7.0$  地震的间隔时间分布统计特征与概率模型结合起来,分别用  $M \geq 6.0$ 、 $M \geq 6.5$ 、 $M \geq 7.0$  的 3 个统计特征时间(平均间隔时间、 $0.5\sigma$  方差线和  $1.0\sigma$  方差线),建立了具有概率水平的三级预测预警指标: C (黄)、B (橙)、A (红)。将其应用于云南地区当前的地震危险性预测,可以得到  $M \geq 6.5$  地震的平静时间为 10.46 a, 已处于红色预警(A 级)阶段;  $M \geq 7.0$  地震的平静时间为 14.41 a, 处于橙色预警(B 级)阶段,但到 2011 年 2 月,将进入红色预警(A 级)阶段。可见,云南地区

当前或未来一段时间内,发生 6.5 级以上或 7 级以上地震的危险性概率水平分别  $\geq 0.95$  或  $\geq 0.79$ 。从以上统计分析可知,该套指标只适用于约 40% 的  $M \geq 6.0$ 、 $M \geq 6.5$ 、 $M \geq 7.0$  地震,因为约 60% 以上的地震均发生在平均间隔时间内。换言之,只有当 3 个震级档的地震间隔时间大于平均间隔时间,才能用该套指标进行分析和判定。

## 参考文献:

- 国家地震局震害防御司. 1995. 中国历史强震目录(公元前 23 世纪—公元 1911 年)[M]. 北京:地震出版社.
- 国家地震局震害防御司. 1999. 中国近代地震目录(公元 1912 年—1990 年)[M]. 北京:地震出版社.
- 黄玮琼,李文香,曹学峰. 1994. 中国大陆地震资料完整性研究(之二)[J]. 地震学报,16(4):423—432.
- 皇甫岗,李忠华. 2010. 20 世纪云南地区地震记录完全性评价[J]. 地震研究,33(1):1—6.
- 任俊杰,陈虹. 2004. 东昆仑断裂带地震复发周期与发震概率研究[J]. 大地测量与地球动力学,24(3):51—56.
- 苏有锦,李忠华,刘祖荫,等. 2001. 20 世纪云南地区  $M \geq 5.0$  级地震活动的基本特征[J]. 地震研究,24(1):1—8.
- 易桂喜,闻学泽,徐锡伟. 2002. 川滇地区若干活动断裂带整体的强地震复发特征研究[J]. 中国地震,18(3):267—296.
- 张永庆,谢富仁,王峰. 2007. 乌鲁木齐地区活动断裂强震复发概率模型研究[J]. 地震地质,29(4):776—786.
- Dong W M, Bao A B, Shah H C. 1984. Use of maximum entropy principle in earthquake recurrence relationships [J]. BSSA, 74 (2): 725—737.
- Field E H. 2007. A summary of previous working groups on California earthquake probabilities[J]. BSSA, 97(4):1033—1053.
- Kagan Y Y, Jackson D D. 1999. Worldwide doublets of large shallow earthquakes[J]. BSSA, 89:1147—1155.
- Matthews M V, Ellsworth W L, Reasenber P A. 2002. A brownian model for recurrent earthquakes[J]. BSSA, 92(6):2233—2250.
- Sun J C, Pan T C. 1995. The Probability of very large earthquakes in Sumatra[J]. BSSA, 85(4):1226—1231.
- Zöller G, Hainzl S. 2007. Recurrence time distributions of large earthquakes in a stochastic model for coupled fault systems: The roles of fault interaction[J]. BSSA, 97(5):1679—1687.

**Interval Distribution and Probability Model of the Strong Earthquakes with  $M \geq 6.0$  in Yunnan**

SU You-jin, LI Zhong-hua

(*Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China*)

**Abstract**

The interval distribution features of the earthquakes with  $M \geq 6.0$ ,  $M \geq 6.5$  and  $M \geq 7.0$  occurred from 1900 to 2009 in Yunnan region are systematically analyzed in this paper. Based on the G-R relation and Poisson model, the probability model of the earthquakes with  $M \geq 6.0$ ,  $M \geq 6.5$  and  $M \geq 7.0$  are built by using the  $M \geq 5.0$  earthquake catalogs. Then, the three-grade, prediction-warning indexes (C (yellow), B (orange), A (red)) for the earthquakes with  $M \geq 6.0$ ,  $M \geq 6.5$  and  $M \geq 7.0$  are developed on the basis of the interval features and the probability model.

**Key words:**  $M \geq 6.0$  strong earthquakes; interval distribution features; probability model; prediction-warning index; Yunnan region