

利用非稳态泊松模型对云南地区地震危险性 进行概率预测^{*}

钱晓东, 彭关灵, 贺素歌

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 针对强震中长期概率预测问题, 提出基于非稳态泊松过程的概率计算方法, 通过稳态与非稳态模型对比研究, 发现非稳态泊松模型随时间而变化的地震发生率能更好地描述强震发生规律。利用非稳态泊松模型计算了地震发生的理论概率, 发现理论概率受到预测精度、平静时间、最近地震大小等诸多因素影响, 利用权重集成法计算了强震发生的综合概率。结果表明: ①地震发生的累积频度随时间的非线性变化可用幂指数函数来描述; ②基于非稳态泊松模型的地震发生率随时间而变化, 与地震发生率恒定不变的稳态模型相比, 前者对地震活跃—平静韵律状态更加敏感; ③云南地区9个地震带强震发生的综合概率计算结果显示: 以2019年12月31日为截止时间, 小江地震带和通海—石屏地震带综合概率较高, 大于0.6; 其次为中甸—大理地震带、楚雄—南华地震带和澜沧—耿马地震带, 综合概率范围为0.5~0.59, 其它地震带综合概率均小于0.5。

关键词: 非稳态泊松模型; 地震发生率; 综合概率; 云南地区

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2020)01-0045-12

0 引言

在地震发生随时间变化的统计模型中, 稳态泊松过程在中长期地震预测和地震危险性分析中得到广泛应用 (Cornell, 1968; Der, Ang, 1977; 张永庆等, 2007; 苏有锦, 李忠华, 2011)。在稳态的泊松过程中, 地震事件的平均发生率 λ 是一个常数, 实际上地震的发生在时间分布上极不均匀, 往往表现出间歇—成簇状发生, 具有平静—活跃特征, λ 会出现较大的变化。有的学者提出双泊松模型 (Bender, 1984), 分别计算地震平静期和活跃期平均发生率 λ 来模拟地震发生过程, 这种方法仍然未能解决地震发生率 λ 是一个随时间而变化的量的事实, 因为地震的发生具有自相似性, 即使在活跃期或平静期中, 地震的发生仍然具有与整个序列相似的平静—活跃特征。

为了更加真实地描述区域地震活动, Hong 和 Guo (1995) 提出一种非稳态泊松过程, 当地震事

件以非稳态泊松过程发生时, 事件的发生率是一个随时间而变化的函数 $\lambda(t)$, 他们采用 U 形函数的发生率来模拟强震或强震群后的地震活动减弱—平静—增强过程。国内一些学者也采用指数函数的发生率来模拟强震活动过程 (傅征祥等, 1998; 刘杰等, 1998; 李冬梅, 2000; 刘英等, 2003), 由于不同区域强震活动不同, 他们使用的指数函数具体形式存在差异, 如单指数、双指数形式等。在目前地震预测预报从经验向定量化发展的过程中, 用定量的方法衡量一个地区地震活动的强弱已越来越引起广大学者的重视, 本文对比稳态与非稳态泊松模型的差异, 寻找并建立适合云南地区强震活动的地震发生率函数 $\lambda(t)$, 并对云南不同地震带进行定量化强震概率预测。

1 稳态和非稳态泊松过程

在随机过程理论中将随机过程划分为平稳 (稳态) 随机过程和非平稳 (非稳态) 随机过程,

^{*} 收稿日期: 2019-08-12.

基金项目: 重点地震危险区及构造带数字地震学研究项目资助.

如果过程的统计特性（均值、方差等）不随时间的推移而变化，则为平稳随机过程，平稳过程的所有样本曲线都会围绕一条水平直线上下波动，而非平稳随机过程的统计特性则随着时间的推移而变化（数学手册编写组，1979）。在地震领域中，地震概率预测模型中比较常用的概率密度函数有泊松分布模型、对数正态分布模型、韦伯尔分布模型、布朗流逝时间分布模型、伽玛分布模型等，其中泊松分布模型在实际工作中应用最广泛（Kagan, Jackson, 1999; Matthews *et al*, 2002）。

泊松过程模型分为稳态和非稳态模型。非稳态泊松过程是一个独立增量假定的计数过程，在时间间隔 $[t_1, t_2]$ 内，泊松事件发生的数目是 $n = N(t_2) - N(t_1)$ 的概率为（Hong, Guo, 1995）：

$$P[N(t_2) - N(t_1) = n] = \frac{\left[\int_{t_1}^{t_2} v(\tau) d\tau \right]^n}{n!} \times \exp \left[- \int_{t_1}^{t_2} v(\tau) d\tau \right] \quad (1)$$

式中： $n=0, 1, 2, \dots$ ； $v(\tau)$ 是瞬时平均发生率； τ 是距离最后一次地震的逝去（经历）时间。当事件以非稳态泊松过程发生时，事件重复发生的时间（复发时间） T 也是一个随机变量，与该随机变量有关的概率，可由累积分布函数描述，非稳态泊松过程复发时间 T 的累积分布函数为（Hong, Guo, 1995）：

$$F_T(t) = 1 - \exp \left[- \int_0^t v(\tau) d\tau \right] \quad (2)$$

当瞬时平均发生率为常数，即 $v(\tau) = v$ 时，称为稳态泊松过程，从式（1）可得稳态泊松过程在时间 t 内发生 n 次地震的概率为：

$$P(n) = \frac{(vt)^n e^{-vt}}{n!} \quad (3)$$

从式（2）可得稳态泊松过程累积分布函数为：

$$F_T(t) = 1 - \exp(-vt) \quad (4)$$

式（4）也可理解为在时间 t 内至少发生一次地震的概率。对于稳态泊松过程恒定平均发生率

v_c ，可由下式求出：

$$v_c = \frac{N}{T} \quad (5)$$

式中： T 为研究时间段的长度； N 为在 T 内的地震总数。

2 稳态和非稳态的平均发生率

2.1 模型选择

许多学者利用不同模型对强震的平均发生率进行了有益的研究和探索，研究主要集中在强震的累积地震次数随时间变化模型的探讨上，张国民和傅征祥（1985）通过对华北强震时间分布特征研究，认为大地震的累积频度曲线随时间的变化呈指数函数形式；秦嘉政等（2009）对云南强震活动时间间隔研究认为，地震的累积频次随震时间呈幂函数变化；傅征祥等（1998）和刘杰等（1998）利用一个假想的泊松分布时间序列，分别采用双指数和指数模型对强震发生率进行了研究，本文将采用相同的时间序列系统地对事件累积次数随时间的变化规律进行研究。

假设地震事件序列相邻地震间隔时间为：1, 3, 4, 5, 10, 30, 40, 50。考虑 3 种典型排列方式：时间间隔递减、时间间隔递增和时间间隔不规则，分别表示地震活动的加速、减速和线性变化。采用 Matlab 语言非线性回归模型方法进行参数估计（陈桂明等，2002），对 3 种排列方式下幂函数、指数函数和双指数函数模型进行非线性拟合参数计算，结果表明幂函数方法直接拟合效果最佳。图 1 作为例子给出幂函数模型非线性拟合曲线，可以看到，累积曲线的变化趋势与实际累积频次符合程度较好。

2.2 地震发生率

假设地震事件为泊松过程，地震累积频度 $N(t)$ 是一种呈幂指数的增长过程：

$$N(t) = at^b + c \quad (6)$$

式中： a 、 b 和 c 是常数，根据非线性回归模型方法可对参数进行估计。

对于稳态泊松过程，地震事件的平均发生率 v_c

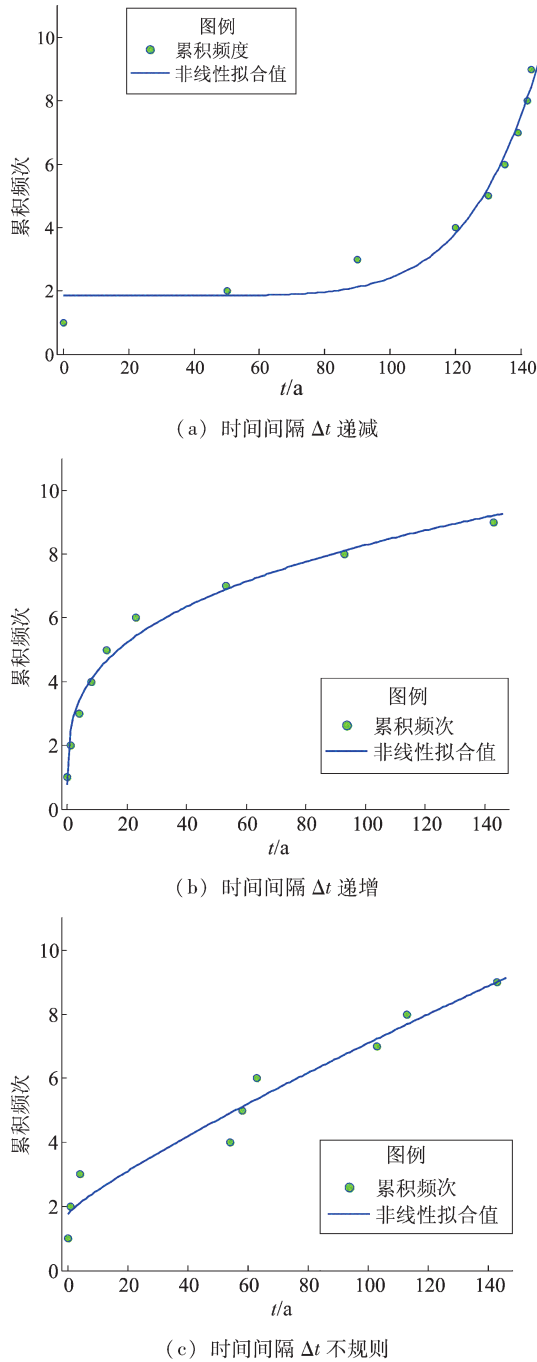


图1 累积频次与发生时间幂函数模型非线性拟合曲线

Fig. 1 Nonlinear fitting curve of power function model of cumulative frequency with occurrence time

为常数, 由式(5)计算得到 $v_c = 0.06$ 次/年。而对于非稳态泊松过程, 地震事件的瞬时发生率 $v(t)$ 为:

$$v(t) = \frac{dN(t)}{dt} \quad (7)$$

式中: $v(t)$ 为包含 a, b 2 个参数的 t 时刻的瞬时发生率。图2作为例子给出假想地震事件时间间隔逐渐减小情况下累积频次和发生率。由图2a可见, 对于稳态泊松过程, 累积频次 N 随时间 t 呈线性增长, 发生率 v_c 为直线的斜率。对于非稳态泊松过程, 累积频次 N 随时间 t 呈非线性增长, 随着时间的增长单位时间发生的地震越多。图2b显示, 对于稳态泊松过程, 发生率 v_c 为水平直线, 在整个过程中恒定不变。对于非稳态泊松过程, 根据式(7)计算的各个时刻的瞬时发生率 $v(t)$ 呈非线性变化。

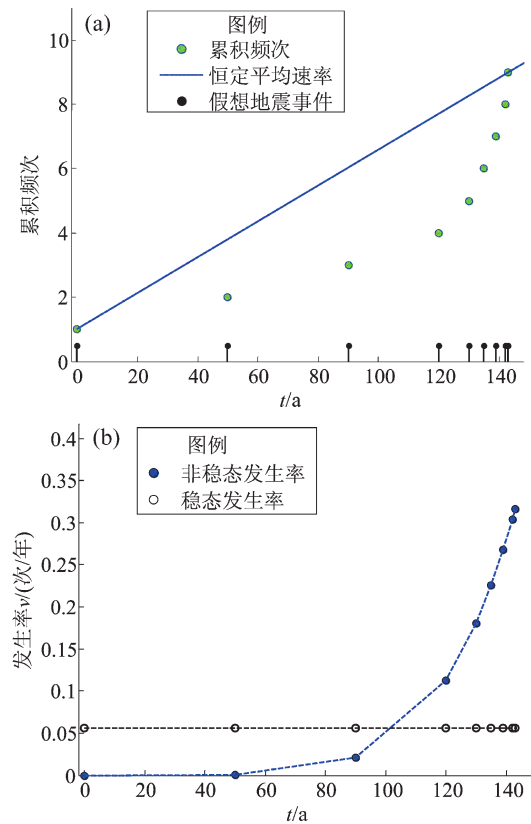


图2 地震事件时间间隔逐渐减小情况下累积频次(a)和地震发生率(b)

Fig. 2 Cumulative frequency and earthquake occurrence rate with decreasing time interval of earthquake events

2.3 地震发生概率

对于稳态泊松过程, 根据式(4)和(5)可得(未来)时间 t 内至少发生一次地震的概率为:

$$P = 1 - \exp(-v_c t) = 1 - \exp(-\frac{N}{T}t) \quad (8)$$

式中: T 为研究时间段的长度; N 为在 T 内的地震

总数。

对于非稳态泊松过程, 根据式 (2) 和 (7), 假定 t_0 时刻发生一次地震, 则在 $[t_0, t_0 + t]$ 时段内至少发生一次地震的概率为:

$$P = 1 - \exp \left[- \int_{t_0}^{t_0+t} v(\tau) d\tau \right] \quad (9)$$

图 3 给出假想地震序列时间间隔逐渐减小情况下累积频度拟合预测及概率, 在图 3a 中, 空心圆表示根据非线性拟合曲线给出的当最后一次地震后 $t = 10$ a 时刻的预测值。在图 3b 中, 水平虚线表示不论事件发生在什么时间, 其后 $t = 10$ a 的事件

发生的概率都是相同的, 为 $P = 0.43$ 。在非稳态泊松过程中, 地震发生呈非线性加速增加, 间隔时间越来越短, 越到后面越容易发生地震, 如图 3b 所示, 在最初的时间间隔 Δt 较长的 3 个点发震概率 P 较低, 低于水平直线稳态泊松过程, 从第四个点开始发震概率 P 急剧增加。

稳态泊松过程模型表示的是地震序列整体的平均状态, 不考虑序列地震的活跃、平静过程, 得到的发震概率 P 在整个研究时间段内都是相同的。而在非稳态泊松过程模型中, 随着地震的活跃、平静状态不同, 模型得到的发震概率 P 也不相同, 更能真实地反映不同时间段发生地震的危险程度。

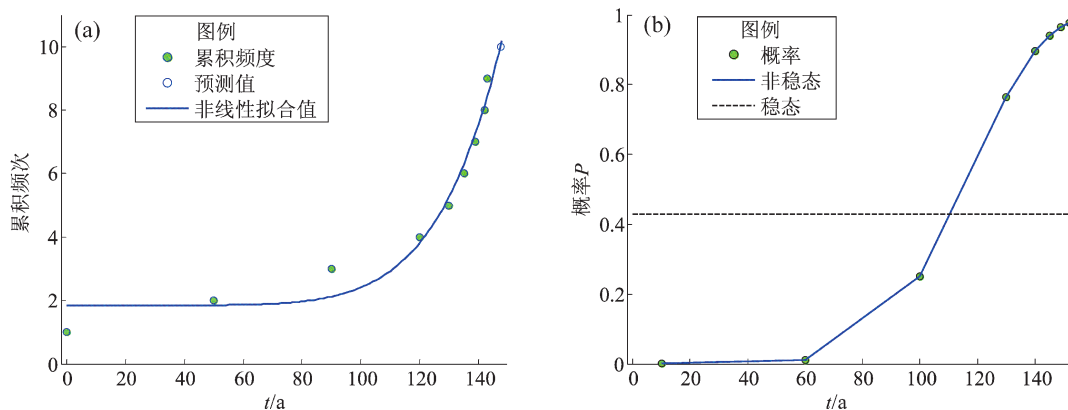


图 3 地震事件时间间隔逐渐减小情况下累积频次 (a) 和概率 (b)

Fig. 3 Cumulative frequency and probability with decreasing time interval of earthquake events

3 云南地区地震发生概率

3.1 研究资料

云南地区 ($20.5^{\circ} \sim 29.3^{\circ}N$, $97.2^{\circ} \sim 106^{\circ}E$) $M \geq 6.0$ 地震在空间分布上极不均匀, 主要沿活动断裂展布, 尤其是沿有较强活动水平的深大断裂分布。根据云南地区 $M \geq 6.0$ 地震的地震活动重复性、地震类型特征与地质构造关系, 皇甫岗等 (2010) 将 $M \geq 6.0$ 地震划分为 9 个主要地震带 (区), 如图 4 所示。1900—2019 年, 云南地区共发生 $M \geq 6.0$ 地震 95 次, 9 个地震带内有地震 78 次, 占 82%。若按云南省界统计, 云南省内共有地震 61 次, 仅有 4 次地震位于地震带外, 即云南省内 93% 的 $M \geq 6.0$ 地震均处于这 9 个地震带内。

3.2 地震带地震危险性初判

取各个地震带 $M \geq 6.0$ 地震, 若地震带内地震

活动相对较弱, 可适当降低起始震级, 如宁蒗—盐源地震带。根据式 (6), 对各地震带地震序列进行非线性拟合, 从拟合方程可以计算下一次地震应该发生时间 t , 如果 t 小于目前时间, 表明理论计算的地震在过去就应该发生, 但实际上却未发生, 表明地震发生的危险性较大。反之, 如果计算得到的 t 值大于目前时间, 表明理论计算的地震应该在将来发生, 意味着地震发生的危险性相对较小。因此, 通过计算一次地震的发震时间可以对地震危险性进行初步判断。

表 1 给出云南 9 个地震带参数及危险性概率结果, 图 5 给出云南各地震带历史地震 $M-t$ 图和累积频度 $N-t$ 图及其非线性拟合曲线。假设截止时间一律为 2019 年 12 月 31 日, 在图 5 的 $M-t$ 图中用红色虚竖线表示, 在 $N-t$ 图中, 分别给出了稳态和非稳态计算结果, 红色空心圆表示按非线性拟合得到的方程计算的下一次地震应该发生的时

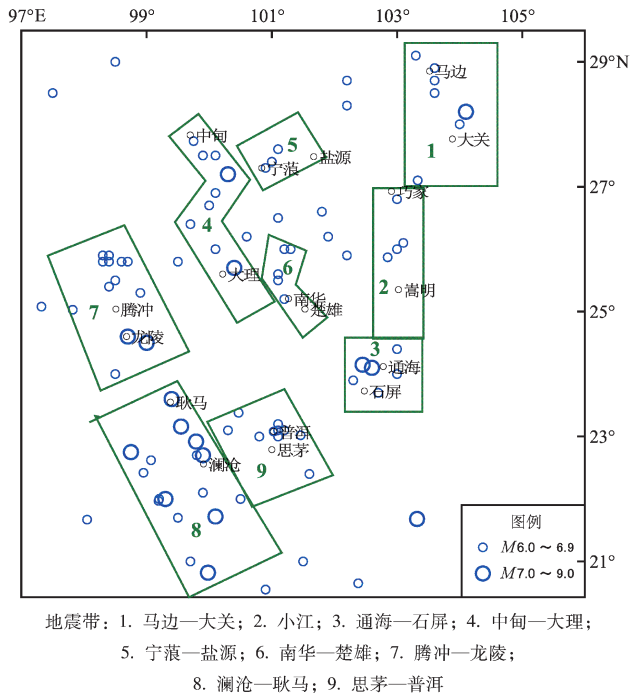


图4 云南地区 $M \geq 6.0$ 地震及地震带划分 (1900—2019)

Fig. 4 $M \geq 6.0$ earthquake and seismic zone division in Yunnan (1900—2019)

间，表1给出了具体计算参数。

马边—大关地震带发生 $M \geq 6.0$ 地震7次，最后一次地震是2014年8月3日鲁甸 $M6.5$ 地震，预测的下次地震应该发生在2039年，目前时间远远未到理论应发震时间，初步判断该地震带目前发生地震的危险性较小。

小江地震带发生 $M \geq 6.0$ 地震5次，最后一次地震是1985年4月18日禄劝 $M6.2$ 地震，预测的下次地震应该发生在2000年，目前时间远远超过理论应发震时间，初步判断该地震带目前发生地震的危险性较大。

通海—石屏地震带发生 $M \geq 6.0$ 地震7次，最后一次地震是1970年1月5日通海 $M7.8$ 地震，预测的下次地震应该发生在1988年，目前时间远远超过理论应发震时间，初步判断该地震带目前发生地震的危险性较大。

中甸—大理地震带发生 $M \geq 6.0$ 地震9次，最后一次地震是1996年2月3日丽江 $M7.0$ 地震，预测的下次地震应该发生在2008年，目前时间超过理论应发震时间，初步判断该地震带目前发生地震的危险性较大。

宁蒗—盐源地震带发生 $M \geq 5.5$ 地震8次，其

中6.0~6.9级地震3次，由于该地震带6级以上地震较少，因此将该地震带起始震级适当下降为5.5级，该地震带最后一次地震是2012年6月24日宁蒗 $M5.7$ 地震，预测的下次地震应该发生在2032年，目前时间远远未到理论应发震时间，初步判断该地震带目前发生地震的危险性较小。

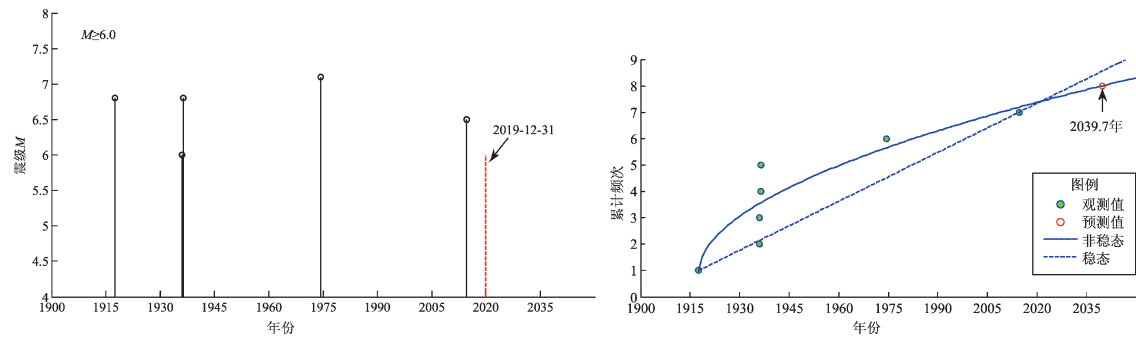
楚雄—南华地震带发生 $M \geq 6.0$ 地震5次，最后一次地震是2009年7月9日姚安 $M6.0$ 地震，预测的下次地震应该发生在2014年，目前时间超过理论应发震时间，初步判断该地震带目前发生地震的危险性较大。

腾冲—龙陵地震带发生 $M \geq 6.0$ 地震14次，最后一次地震是2014年5月30日盈江 $M6.1$ 地震，预测的下次地震应该发生在2028年，目前时间未到理论应发震时间，初步判断该地震带目前发生地震的危险性较小。

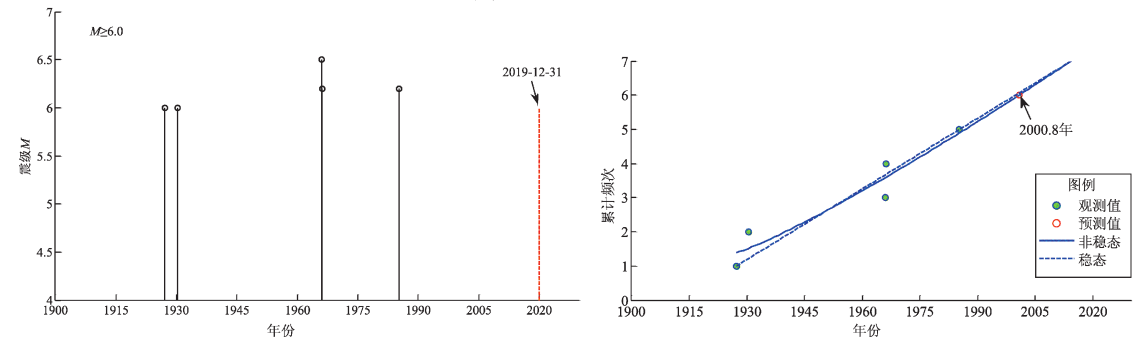
澜沧—耿马地震带发生 $M \geq 6.0$ 地震17次，其中7级以上地震多达8次，是云南地区7级以上大地震最容易发生的地震带，该地震带最后一次地震是2011年3月24日中缅交界 $M7.2$ 地震，预测的下次地震应该发生在2018年，目前时间略超过理论应发震时间，初步判断该地震带目前存在发生地震的危险性。

思茅—普洱地震带发生 $M \geq 6.0$ 地震11次，无7级以上地震，该地震带是云南地区6级地震最集中的地震带，最后一次地震是2014年10月7日景谷 $M6.6$ 地震，预测下次地震应该发生在2022年，目前时间未达到理论应发震时间，初步判断该地震带目前发生地震的危险性小。

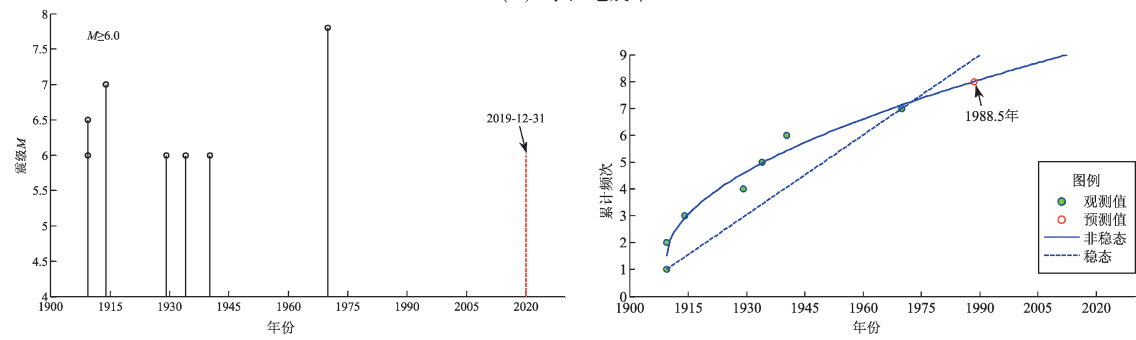
从以上分析可以得知，假定未来地震的发展趋势遵循历史演化规律，则可以用计算的下次地震发生时间的方法对未来地震进行定性判定，但无法进行定量描述，只能对地震危险性进行初步判断。从表1还可以看到，计算的下次地震发生时间的误差还是较大的，误差最大达26年，大多数误差在8年以内，误差偏大的主要原因是样本的时间跨度长而样本数又不多。如果简单按照计算得到的下次地震理论计算时间从小到大排序，可初步将云南地震带地震危险性的危险程度从高到低排列如下：通海—石屏地震带、小江地震带、中甸—大理地震带、楚雄—南华地震带、澜沧—耿马地震带、宁蒗—盐源地震带、思茅—普洱地震带、马边—大关地震带。



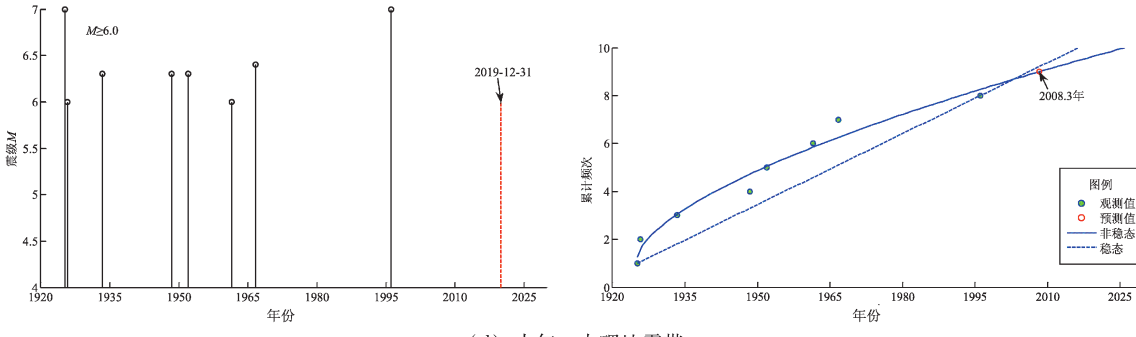
(a) 马边—大关地震带



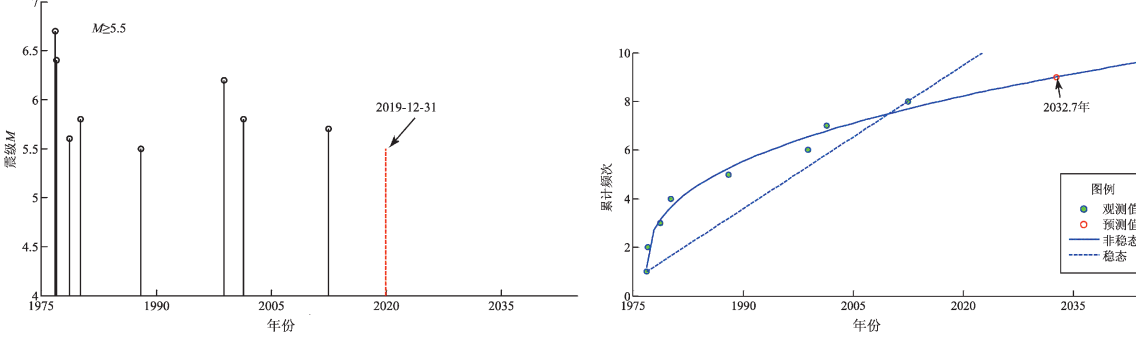
(b) 小江地震带



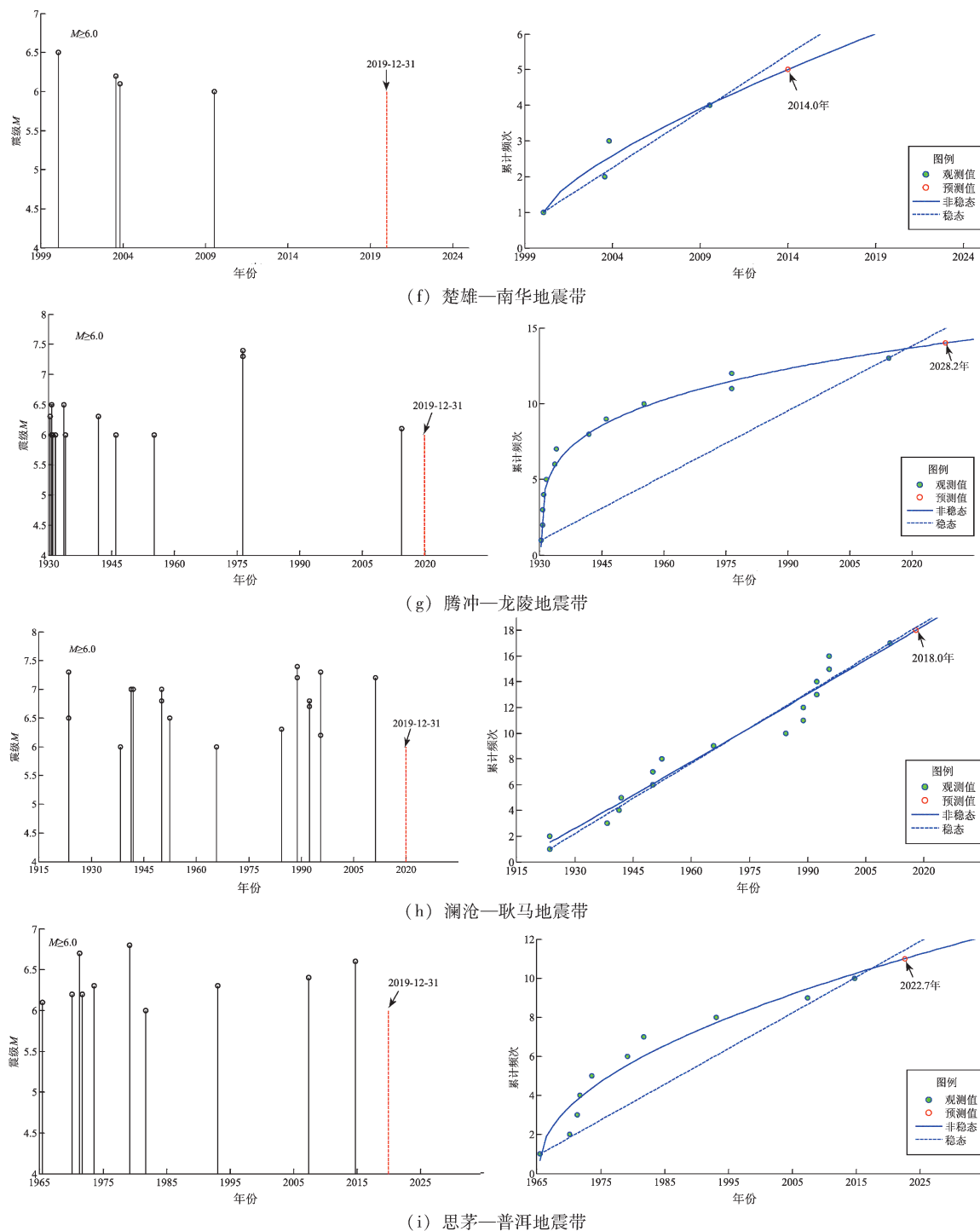
(c) 通海—石屏地震带



(d) 中甸—大理地震带



(e) 宁蒗—盐源地震带

图 5 云南地区地震带 $M-t$ 图和 $N-t$ 图Fig. 5 $M-t$ and $N-t$ diagrams of the seismic zone in Yunnan

3.3 地震带理论概率

利用基于非稳态泊松分布的概率模型来对地震带地震危险性进行定量判定。假定 t_0 时刻发生一次地震，则在 $[t_0, t_0 + t]$ 时段内至少发生一次地震的概率可以用式 (9) 计算，在本文的研究中，统一取 2019 年 12 月 31 日为截止时间，以式 (9)

计算 2019 年 12 月 31 日以后 $t_p = 1$ 年各地震带至少发生 1 次地震的概率， t_p 为预测时间，因此，式 (9) 中时间 t 为最后一次地震到 2019 年 12 月 31 日的时间与预测时间 t_p 之和，引入截止时间能使要计算的地震的时间概念清楚。对各个地震带的预测统一为相同时间 $t_p = 1$ 年，否则若以 t_0 为基准，

表 1 云南地震带地震发生的理论概率
Tab. 1 Theoretical probability of earthquake occurrence in Yunnan seismic belt

地震带	起始震级	最后一次地震			预测地震 时间/年	非稳态		稳态	
		日期	地名	震级		瞬时发生率/ (次·年 ⁻¹)	概率	恒定发生率/ (次·年 ⁻¹)	概率
马边—大关地震带	6.0	2014-08-03	鲁甸	6.5	2039.72	0.03	0.19	0.06	0.33
小江地震带	6.0	1985-04-18	禄劝	6.2	2000.79	0.07	0.93	0.07	0.91
通海—石屏地震带	6.0	1970-01-05	通海	7.8	1988.54	0.16	0.99	0.10	0.99
中甸—大理地震带	6.0	1996-02-03	丽江	7.0	2008.34	0.06	0.77	0.10	0.91
宁蒗—盐源地震带	5.5	2012-06-24	宁蒗	5.7	2032.74	0.07	0.45	0.20	0.81
楚雄—南华地震带	6.0	2009-07-09	姚安	6.0	2014.00	0.23	0.91	0.32	0.97
腾冲—龙陵地震带	6.0	2014-05-30	盈江	6.1	2028.15	0.04	0.24	0.14	0.61
澜沧—耿马地震带	6.0	2011-03-24	缅甸	7.2	2018.00	0.18	0.82	0.18	0.83
思茅—普洱地震带	6.0	2014-10-07	景谷	6.6	2022.68	0.10	0.46	0.18	0.68

由于各地震带有不同 t_0 ，计算的未来地震发生的时间就不相同。

根据上述规定，从表 1 及图 5 可见，云南各个地震带的强震序列，以时间间隔逐渐增长和时间间隔无规律 2 种过程居多，未发现序列时间间隔逐渐减小过程，小江地震带累积频度随时间呈非线性增长，但增长幅度不大（图 5b），在这种情况下非稳态概率大于稳态概率；澜沧—耿马地震带累积频度随时间呈线性增长（图 5h），非稳态概率与稳态概率大致相同；大部分地震带累积频度随时间呈非线性减小，非稳态概率小于稳态

概率。从图 5 还可以看到，曲线向下弯曲越多非稳态概率和稳态概率相差越大，如宁蒗—盐源、腾冲—龙陵、思茅—普洱地震带。

图 6a 给出云南各地震带非稳态泊松分布的概率模型预测未来 $t_p = 1$ 年地震发生理论概率，从图中可以看到，理论概率最高的地震带为通海—石屏地震带、小江地震带和楚雄—南华地震带，中甸—大理地震带和澜沧—耿马地震带次之，其它地震带理论概率较小，这个结果与本文根据计算下次地震发震时间做出的初步危险性判定结果一致。

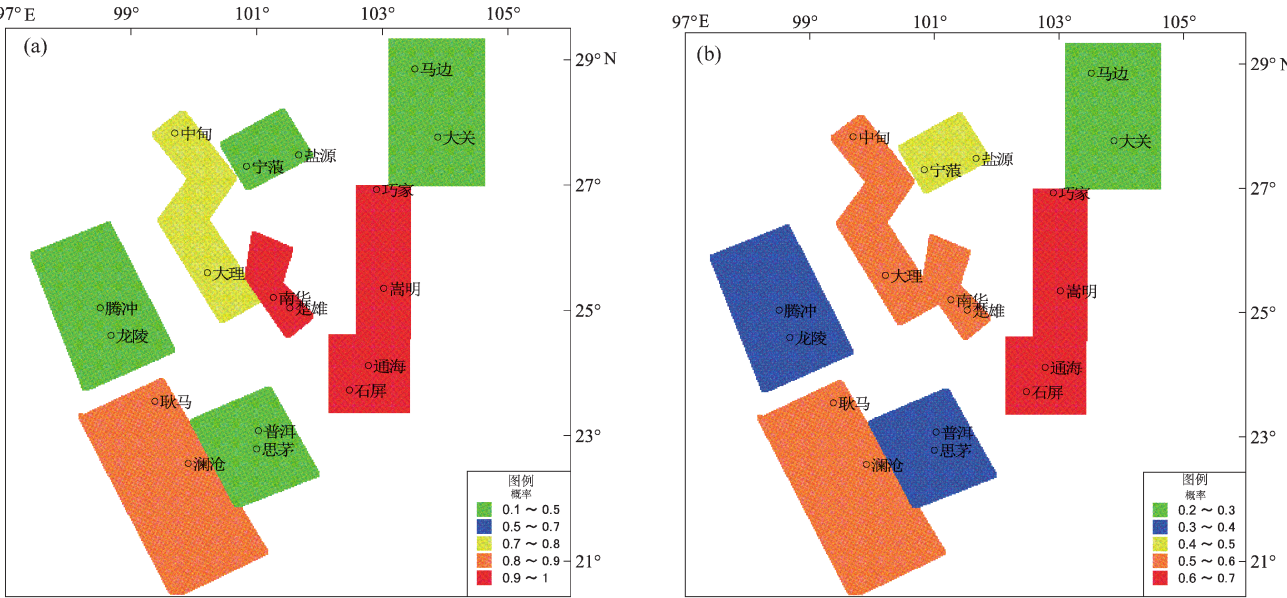


图 6 云南地震带理论概率 (a) 和综合概率 (b)
Fig. 6 Theoretical probability and synthetical probability of Yunnan seismic belt

3.4 地震带综合概率

表 1 仅给出根据非稳态泊松分布的概率模型计算的理论概率值, 一些因素对预测结果存在影响, 需要在理论计算的基础上进行综合考虑。从表 1 可以看出, 一些地震带地震的预测时间比目前时间早, 即按理论计算地震应该已经发生, 但实际上还未发生, 表 2 给出目前至预测地震的时间间隔 (Y_3) 参数, 当 Y_3 为正数时表示预测时间提前, 这种情况涉及到小江地震带、通海—石屏地震带、中甸—大理地震带、楚雄—南华地震带和澜沧—耿马地震带, 其中小江地震带、通海—石屏地震带和中甸—大理地震带预测提前的时间较多。整体来看, 以下一些因素可能对地震预测造成影响:

(1) 时间间隔。这是单纯利用平静时间来预测地震的危险程度, 平静时间越长发震的可能性就越大, 表 2 给出目前至预测地震的时间间隔 (Y_3) 参数, Y_3 越大平静时间越长, 在综合考虑预测结果时, 对时间间隔这一因素, 认为 Y_3 越大, 对综合概率 P 的贡献越大。

(2) 预测精度。从图 5 看到, 实际值与理论预测值的误差越小, 预测的信度越高, 使用平均绝对百分比误差 $MAPE$ 来衡量预测精度:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (10)$$

式中: y_i , \hat{y}_i 分别为预测对象的实际值和预测值。

表 2 中给出了各地震带的 $MAPE$ 值 (Y_2), 绝大多数在 15% 以内, 马边—大关地震带、小江地震带和思茅—普洱地震带误差偏大。因此, 在综合考虑预测结果时, 对预测精度这一因素, 认为 $MAPE$ 值越小, 对综合概率 P 的贡献越大。

(3) 最后地震的震级。某地区发生较大地震后再次发生地震的时间一般比相对较小地震后平静的时间要长, 即大地震后能量释放较为彻底, 需要更长的时间来进行能量积累。上文提到一些地震带理论计算的地震早应该发生, 但实际却没有发生, 从这些地震带的最后地震震级来看, 目前至预测地震的时间间隔 (Y_3) 较长的地震带为小江地震带、通海—石屏地震带和中甸—大理地震带, 后 2 个地震带最后地震震级均大于等于 7 级, 地震后实际平静时间超出理论值可以用能量积累需要更长时间来解释。表 2 给出各地震带最后地震震级 (Y_4), 在综合考虑预测结果时, 对最后地震震级这一因素, 认为震级 M 越小, 对综合概率 P 的贡献越大。

(4) 资料长度。从图 5 可以看到, 由于各地震带地震活动水平和历史地震记录完整性不同, 资料的使用时间长度是不同的, 资料的时间越长越能较全面反映该地区地震活动状态, 预测信度也越高, 表 2 给出各地震带资料长度 (Y_5), 在综合考虑预测结果时, 对资料长度这一因素, 认为资料越长, 对综合概率 P 的贡献越大。

表 2 云南地震带综合概率

Tab. 2 Synthetical probability of earthquake occurrence in Yunnan seismic belt

编号	地震带	理论概率 Y_1	平均绝对百分比误差 Y_2	目前至预测地震的时间间隔 Y_3 /年	最后地震的震级 Y_4	资料长度 Y_5/a	综合概率 P
1	马边—大关地震带	0.19	0.21	-19.72	6.5	120	0.29
2	小江地震带	0.93	0.19	19.21	6.2	120	0.66
3	通海—石屏地震带	0.99	0.15	31.46	7.8	120	0.63
4	中甸—大理地震带	0.77	0.10	11.66	7.0	100	0.59
5	宁蒗—盐源地震带	0.45	0.08	-12.74	5.7	45	0.49
6	楚雄—南华地震带	0.91	0.10	6.00	6.0	21	0.57
7	腾冲—龙陵地震带	0.24	0.14	-8.15	6.1	90	0.37
8	澜沧—耿马地震带	0.82	0.14	2.00	7.2	105	0.52
9	思茅—普洱地震带	0.46	0.18	-2.68	6.6	55	0.33

由于目标是考虑诸多因素对理论计算概率值的影响,假设各个因素(或单项)对综合概率 P 的总贡献(或权重 ω)为1,则理论概率(Y_1)的权重 ω_1 应大于 $Y_2 \sim Y_5$ 各单项权重, $Y_2 \sim Y_5$ 各项取等权重。因此,各权重可取为:

$$\omega_i = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5) = (0.3, 0.15, 0.15, 0.15, 0.15) \quad (11)$$

满足 $\sum_{i=1}^5 \omega_i = 1$ 。

对表2中 $Y_1 \sim Y_5$ 各列进行归一化处理(其中 Y_2, Y_4 先取倒数),利用权重集成法计算综合概率 P (陈立德,1993):

$$P = \sum_{i=1}^5 \omega_i Y_i = \omega_1 Y_1 + \omega_2 Y_2 + \omega_3 Y_3 + \omega_4 Y_4 + \omega_5 Y_5 \quad (12)$$

从表2的理论概率与综合概率的变化可以看到,小江地震带、通海—石屏地震带和楚雄—南华地震带理论概率较高,计算后综合概率均出现一定减小,小江地震带是由于误差(MAPE)较大,通海—石屏地震带是由于最后地震震级达7.8级,楚雄—南华地震带是由于资料时间较短。马边—大关地震带综合概率出现一定增大,是由于 Y_3, Y_5 贡献较多。从图6b可以看到,小江地震带和通海—石屏地震带综合概率相对较高,范围为0.60~0.69,中甸—大理地震带、楚雄—南华地震带和澜沧—耿马地震带综合概率次之,范围为0.50~0.59,其它地震带综合概率相对较小。

4 结论和讨论

针对强震危险性概率预测问题,提出基于非稳态泊松过程的概率计算方法,通过稳态与非稳态模型对比研究发现,非稳态泊松模型随时间而变化的地震发生率能更好地描述强震发生规律,利用非稳态泊松模型计算了地震发生的理论概率,发现理论概率受到预测精度、平静时间、最近地震大小等诸多因素影响,利用权重集成法计算了强震发生的综合概率。结果表明:①地震发生的

累积频度随时间的非线性变化能用幂指数函数模型来描述;②基于非稳态泊松模型的地震发生率随时间而变化,与地震发生率恒定不变的稳态模型相比,前者对地震活跃—平静韵律状态更加敏感;③对云南地区9个地震带强震发生的综合概率计算结果显示,若以2019年12月31日为截止时间,小江地震带和通海—石屏地震带综合概率较高大于0.6,其次为中甸—大理地震带、楚雄—南华地震带和澜沧—耿马地震带,综合概率范围为0.5~0.59,其它地震带综合概率均小于0.5。

(1)假设本轮回的地震活动可能重演上一轮回的活动,这是利用非稳态泊松模型进行预测的基础。如果一次地震发生后,无法判定地震活动轮回是否结束,则认为地震活动将延续之前活动过程。如果一次地震发生后能确定是轮回的结束,新的一个轮回即将开始,则将上一次轮回过程结束的时间作为下一次轮回的开始,因此作为轮回开始和轮回进行中得到的概率是不同的,在计算概率之前需要先对轮回过程进行判定。

(2)当地震序列呈现加速增长时,非稳态泊松过程序列初期的地震发生率要低于整个全过程平均发生率(即稳态泊松过程发生率),之后非稳态发生率将随时间增大,尤其是到后期增加较快。当地震序列随时间呈现大幅减小时,地震活动加速增长。反之,当地震序列时间间隔逐渐增加时,初期发震率较高,越到后期发震率越小。当地震序列呈线性均匀增长时,序列各个时期的地震发生率与整个全过程平均发生率相当。

(3)本文认为地震事件累积频度 N 随时间 t 呈幂指数增长,这种幂指数增长模式大量存在于自然现象中,蒋海昆等(2009)进行岩石破裂声发射实验时,发现岩石材料在受压破坏之前声发射的强度随时间呈幂指数增长(或减小)模式;秦嘉政和钱晓东(2004)研究了云南地区30次中强地震震前应变释放现象,发现地震应变能随时间呈幂指数增长(或减小)模式变化;蒋长胜和吴忠良(2009)对中国大陆109例 $M \geq 5.7$ 地震进行地震矩研究,也发现地震矩释放随时间呈幂指数增长(或减小)变化;本文得到的地震事件累积频次随时间呈幂指数增长现象,可能反映了地

震现象的某种规律。

(4) 式(6)中常数 b 是重要参数,它是地震发生快慢程度的反映,当 $b > 1$ 时,累积频度随时间曲线为加速形态,表示事件时间间隔 Δt 递减,随时间的增长地震事件发生愈多,发生率增大,事件发生概率增大。当 $b < 1$ 时,曲线为减速形态,表示事件的时间间隔 Δt 递增,随时间的增长地震事件发生愈少,事件发生率减小,发生概率减小,上述2种情况为非稳态泊松分布,适用于大量地震活动具有非均匀分布的地区。当 $b = 1$ 时,曲线为直线形态,表示事件时间间隔 Δt 呈无规则分布,随时间增长地震事件发生的数目不变,同时事件发生率和发震概率也不变,这种情况为稳态泊松分布,适用于一些地震活动相对均匀的地区。

(5) 统计结果与样本、区域、时段、方法密切相关,不同的统计对象会给出不同结果,尤其在作长时间历史地震统计分析时,一定要考虑历史地震可能存在的遗漏现象,尤其是7级以下地震,因此在具体分析预测中应注意到这些情况。

参考文献:

- 陈桂明,戚红雨,潘伟. 2002. MATLAB 数理统计[M]. 北京:科学出版社,184-187.
- 陈立德. 1993. 地震综合预报的权重集成法[J]. 地震研究,16(3): 267-271.
- 傅征祥,粟生平,王晓青. 1998. 地震发生非稳态泊松过程和中长期概率预测研究[J]. 地震,18(2):105-111.
- 皇甫岗,陈颢,秦嘉政,等. 2010. 云南地震活动性[M]. 昆明:云南科技出版社,75-78.
- 蒋长胜,吴忠良. 2009. 强震前“矩加速释放”(AMR)现象:对一个有争议的地震前兆的回溯性震例研究[J]. 地球物理学报,52(3): 691-702.
- 蒋海昆,吴琼,董祥,等. 2009. 不同温压条件下声发射应变能释放特

征——加速模型参数物理含义的初步讨论[J]. 地球物理学报, 52(8):2064-2073.

- 李冬梅. 2000. 华北西部地震复发规律及未来强震概率预测[J]. 山西地震,(1):22-26.
- 刘杰,傅征祥,孟桂萍,等. 1998. 地震发生中长期预测中的非稳态泊松模型[J]. 地震,18(3):219-225.
- 刘英,赵卫明,马文孝,等. 2003. 非稳态泊松模型预测西北地区地震带的应用[J]. 地震学报,25(6):661-666.
- 秦嘉政,钱晓东,刘丽芳. 2009. 云南强震活动间隔时间特征研究[J]. 地震研究,32(3):221-227.
- 秦嘉政,钱晓东. 2004. 利用前兆事件对云南地区地震进行中短期预测[J]. 地震学报,26(2):140-150.
- 数学手册编写组. 1979. 数学手册[M]. 北京:高等教育出版社,867-878.
- 苏有锦,李忠华. 2011. 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[J]. 地震研究,34(1):1-7.
- 张国民,傅征祥. 1985. 华北强震的时间分布及物理解释[J]. 地球物理学报,28(6):569-578.
- 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.
- Bender B. 1984. A two-state poisson model for seismic hazard estimation [J]. Bull Seism Soc Am,74(4):1463-1468.
- Cornell C. 1968. Engineering seismic risk analysis[J]. Bull Seism Soc Amer,58(5):1583-1606.
- Der Kiureghian A, Ang A. 1977. A fault-rupture model for seismic risk analysis[J]. Bull Seism Soc Am,67(2):1173-1194.
- Hong L L, Guo S W. 1995. Nonstationary Poisson model for earthquakes occurrences[J]. Bull Seism Soc Am,85(3):815-824.
- Kagan Y Y, Jackson D D. 1999. Worldwide doublets of large shallow earthquakes[J]. Bull Seism Soc Am,89(5):1147-1155.
- Kingman J F C. 1993. Poisson processes[M]. Ltd:John Wiley & Sons,1-9
- Matthews M Y, Ellsworth W L, Reasenberg P A. 2002. A brownian model for recurrent earthquakes [J]. Bull Seism Soc Am,92(6):2233-2250.

Probabilistic Earthquake Prediction of Yunnan Region by Using Non – stationary Poisson Model

QIAN Xiaodong, PENG Guanling, HE Suge

(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

For the medium-and long-term probabilistic prediction of strong earthquakes problem, we propose a probability calculation method based on the non-stationary Poisson process, through a comparative study on stationary and non-stationary models, we find that the time – dependent earthquake occurrence rate of the non – stationary Poisson model can better describe the occurrence law of strong earthquakes. Using the non – stationary Poisson model, we calculated the theoretical probability of earthquake occurrence, and the theoretical probability is affected by many factors such as prediction accuracy, quiet time, recent earthquake magnitude, etc. The synthetical probability of strong earthquakes was calculated by the weighted integration method. The result shows that, ①the nonlinear change of the cumulative frequency of earthquakes with time can be described by power exponential function. ②Compared to the stationary Poisson model with a constant earthquake rate, the non – stationary Poisson model with variable earthquake occurrence rate with time is more sensitive to the state of active – quiet rhythm. ③The synthetical probability Computed results of strong earthquakes in 9 seismic belts in Yunnan area show that, take December 31, 2019 as the current time, Xiaojiang seismic belt and Tonghai Shiping seismic belt have higher comprehensive probability, the value is greater than 0.6. And the next are Zhongdian Dali seismic belt, Chuxiong Nanhua seismic belt and Lancang Gengma seismic belt, the synthetical probability is in the range of 0.5 ~ 0.59. The synthetical probability of other seismic zones is less than 0.5.

Keywords: non – stationary Poisson model; earthquake occurrence rate; Yunnan region; synthetical; probability