

钱晓东, 贺素歌. 2024. 基于概率增益模型的强震概率预测研究[J]. 地震研究, 47(2): 223–232, doi: 10. 20015/j. cnki. ISSN1000–0666. 2024. 0015.

Qian X D, He S G. 2024. Research on strong earthquake probability prediction based on the probability gain model[J]. *Journal of Seismological Research*, 47(2): 223–232, doi: 10. 20015/j. cnki. ISSN1000–0666. 2024. 0015.

基于概率增益模型的强震概率预测研究^{*}

钱晓东^{1,2}, 贺素歌^{1,2,✉}

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 上海佘山地球物理国家野外科学观测研究站, 上海 200062)

摘要: 为提高云南地区及邻区强震中短期预测的准确度, 通过强震发生前不同地震前兆指标的对比研究, 发现仅用单项指标很难提高预测的准确度。挑选出能从不同侧面反映强震发生规律的6项指标, 采用概率增益模型对这些指标进行综合处理, 通过估算每种地震前兆的概率增益来定量判定地震发生的可能性, 最终得到可用来预测云南地区及邻区 $M \geq 6.0$ 地震未来中短期发生可能性大小的综合概率 P 指标。计算分析表明: ①使用综合概率 P 预测未来半年云南地区及邻区 $M \geq 6.0$ 强震, 能通过 R 值检验; ②取 P 异常阈值为20%、30%, 可对强震进行不同级别预警, P 值小于20%为安全, P 值为20%~30%为黄色预警, 为云南地区及邻区未来存在发生 $M \geq 6.0$ 地震的可能性; P 值大于30%为红色预警, 表示未来半年云南地区及邻区将发生 $M \geq 6.0$ 地震。

关键词: 概率增益模型; 综合概率; 中短期预测; 云南地区及邻区; $M \geq 6.0$ 地震

中图分类号: P315.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000–0666(2024)02–0223–10
doi:10. 20015/j. cnki. ISSN1000–0666. 2024. 0015

0 引言

概率增益模型最早是为综合各种前兆异常提出来的, 其基本思想是, 如果同时观测到几项相互独立的前兆异常, 地震发生的概率将比只有单个异常时高。概率增益模型可以综合多种前兆信息, 求出各前兆异常存在的条件下地震发生的概率, 给出客观定量的概率值, 从而对特定地区强震危险性进行定量预测。Utsu (1977) 首先提出多元前兆异常概率计算公式, Aki (1981) 采用贝叶斯理论也推导出了同样的公式, 提出了概率增益模型, 并以计算得到的概率为依据, 将地震监视区分成I~VI级报警级别, 按不同级别进行加强监视、短期预报、临震预报等级别报警。之

后, 国内外诸多地震科技工作者从不同方面进行了概率增益模型研究和应用 (Utsu, 1984; Aki, 1984; Kenji, Akio, 1990; 金学申等, 1997; 梅世蓉等, 1993; 张天中等, 1998, 1999; 王晓青等, 2000; 邱雪强, 沈繁奎, 2004; 蒋长胜等, 2017; 邓世广等, 2019; 王芃等, 2019; 马永等, 2021; 郑建常等, 2022; 郭文峰等, 2022)。目前, 概率增益模型研究常用于地震的中长期预测领域, 而在中短期预测方面的研究成果不多。张天中等 (1998, 1999) 用此方法进行了地震短期预测探索, 利用1998年1月10日张北 $M6.2$ 地震前出现的3项异常指标, 计算得到概率增益达32倍, 发震概率为58%, 给出的异常涵盖地震活动背景, 中期、短期异常发展过程, 并认为根据中短期异常来估算很高的发震概率是

^{*} 收稿日期: 2023–01–06.

基金项目: 上海佘山地球物理国家野外科学观测研究站开放基金 (SSOP202101).

第一作者简介: 钱晓东 (1965–), 副研究员, 主要从事地震预测预报工作. E-mail: qxd13@163.com.

✉通信作者简介: 贺素歌 (1987–), 工程师, 主要从事地震活动性和地震综合预测工作.
E-mail: 724198867@qq.com.

不现实的,重要的是要有足够的概率增益。云南是一个多震省份,具有较多的地震中短期预测实践和验证机会,在对地震时间、地点和震级三要素的预测中,目前还找不到一种能对三要素中任何单一要素进行有效预测的方法,结合长、中、短期指标的综合预测方法,是地震预测发展的基础。本文利用概率增益预测模型方法,尝试创建

基于时间概率增益的云南地区及邻区强震中短期预测综合预测方法。

1 概率增益预测模型

在多个独立地震前兆 $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ 同时存在时,该区一个震级大于等于 M 的地震发生的概率为 (Utsu, 1979):

$$P(M | A_1, A_2, A_3, \dots, A_n) = \frac{1}{1 + \left[\frac{1}{P(M | A_1)} - 1 \right] \left[\frac{1}{P(M | A_2)} - 1 \right] \left[\frac{1}{P(M | A_3)} - 1 \right] \dots \left[\frac{1}{P(E)} - 1 \right]^{1-n}} \quad (1)$$

式中: $P(M | A_1), P(M | A_2), P(M | A_3), \dots, P(M | A_n)$ 分别是地震前兆 $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ 出现时发生 M 级以上地震的条件概率; $P(E)$ 为同一地区发生 M 级以上地震的无条件概率,亦称发

震自然概率或背景概率。

Aki (1981) 采用贝叶斯理论也导出了式 (1), 并且提出当 $P(E)$ 及 $P(M | A_1), P(M | A_2), P(M | A_3), \dots, P(M | A_n)$ 很小时, 式 (1) 可简化为:

$$P(M | A_1, A_2, A_3, \dots, A_n) = P(E) \cdot \frac{P(M | A_1)}{P(E)} \cdot \frac{P(M | A_2)}{P(E)} \cdot \frac{P(M | A_3)}{P(E)} \dots \frac{P(M | A_n)}{P(E)} \quad (2)$$

或

$$P(M | A_1, A_2, A_3, \dots, A_n) = P(E) G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \dots G_n \quad (3)$$

$$G_n = \frac{P(M | A_n)}{P(E)} \quad (4)$$

式中: G_n 为各地震前兆 A_n 的概率增益, $P(M)$ 称作综合概率, 也称为量化增益概率。

在一定区域内出现某些地震前兆异常时, 可以求得各个地震前兆的条件概率 $P(M | A_1), P(M | A_2), P(M | A_3), \dots, P(M | A_n)$, 震级大于等于 M 的地震的无条件概率 $P(E)$ 可由该区历史地震资料估算, 进而可计算出概率增益 G_1, G_2, \dots, G_n , 再从式 (3) 求出该区在各地震前兆存在的条件下, 震级大于等于 M 的地震发生的条件概率, 以此来定量判定地震发生的可能性。

根据历史资料统计, 在足够长的时期内, 若地震前兆 A_1, A_2, \dots, A_n 分别出现 N_1, N_2, \dots, N_n 次, 各地震前兆出现时分别对应地震 r_i 次, 则各个地震前兆出现时发生地震的条件概率为:

$$P(M | A_i) = \frac{r_i}{N_i} \quad (5)$$

式中: i 为地震前兆数, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

从式 (5) 可看出, 各个地震前兆出现时发生

地震的条件概率 $P(M | A_i)$ 实际上是地震的对应率, 计算时, 要求每项地震前兆不能只有个别震例, 要有统计意义上的认识, 在没有考虑漏报的情况下, 对应率越高, $P(M | A_i)$ 越大; 虚报越低, $P(M | A_i)$ 也越大。这种减少虚报、容忍漏报的特征对于预报人员是适当的 (吴忠良, 1998)。

若地震发生为泊松过程, 地震平均发生率为 v , 背景概率可表示为 (钱晓东等, 2020):

$$P(E) = 1 - \exp(-v) \quad (6)$$

式中: 地震发生率 $v = N_0/T$; T 为研究时间长度; N_0 为在时间 T 内的地震总数。

在利用概率增益模型时, 尽可能要求各项地震前兆相互独立, 否则虽然可以估算地震前兆的概率增益, 但是可能出现综合概率大于 1 的情况, 使得对地震危险性的评估偏大, 增大虚报的概率。

2 应用

2.1 预测思路

云南地区及邻区 $M \geq 6.0$ 地震的发生时间分布是不均匀的, 具有明显的平静-丛集特征, 有约 42% 的地震其时间间隔小于 0.5 a, 地震丛集发生

后, 往往会出现长时间的平静, 如图1所示。当 $M \geq 6.0$ 地震平静时间较长时, 则发震的危险性较高, 但不能确切知道发震时间, 无法进行中短期预测, 需要其它手段来辅助, 例如若同时出现 $M \geq 5.0$ 地震平静异常, 则用 $M \geq 5.0$ 、 $M \geq 6.0$ 地震平静两项指标显然要比仅用 $M \geq 6.0$ 地震平静一项指标的预测信度要高。若在出现 $M \geq 5.0$ 、 $M \geq 6.0$ 地震平静异常后, 又出现中等地震频度增高、能量释放增加, 甚至在一些敏感点上出现窗口地震, 由于每一项异常对云南地区及邻区 $M \geq 6.0$ 地震的发生都有各自的预测意义和预测概率, 因此, 在这些异常同时出现后进行预测比仅用某项异常进行预测的信度要高, 即最终发生地震的概率是各分项概率的叠加, 这即是概率增益的思想, 也是本文的基本思路。

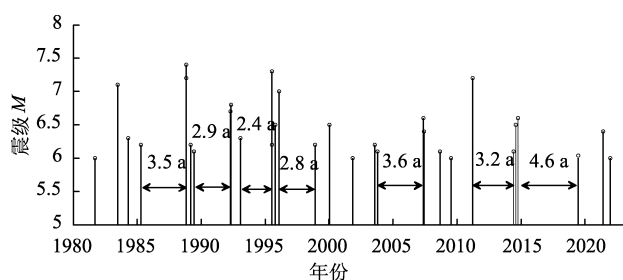


图1 1980—2022年云南地区及邻区 $M \geq 6.0$ 地震 $M-t$ 图

Fig. 1 $M-t$ plot of $M \geq 6.0$ earthquakes in Yunnan region during 1980–2022

2.2 指标选择

(1) 云南地区及邻区6级地震平静

1905—2022年, 云南地区及邻区发生 $M \geq 6.0$ 地震94次, 地震发生率 $v = 0.83$ 次/a, 将时间长度 T 换算为月, 代入式(6)可得 $P(M) = 0.069$, 地震的平均间隔时间为1.21 a, 如图2所示。当云南地区及邻区 $M \geq 6.0$ 地震时间间隔 Δt 达到2.0 a时, 认为6级地震出现平静异常, 可以作出黄色预警(苏有锦, 李忠华, 2011), 发震自然概率达到70%。统计不同时间间隔的地震数量可知, $\Delta t \geq 2.0$ a的地震共22次, 占地震总数的23%, 其中, $\Delta t \geq 2.5$ a的地震有11次。在6级地震平静达到2.0 a时对未来半年地震危险性作出预测, 条件概率为 $(22 - 11)/22 = 50\%$, 研究总时间为118 a, 预报占时为11 a, R 值为0.41, R_0 值为0.23, 由

于 $R > R_0$, 因此用云南地区及邻区6级地震平静对未来半年6级地震有预测意义。

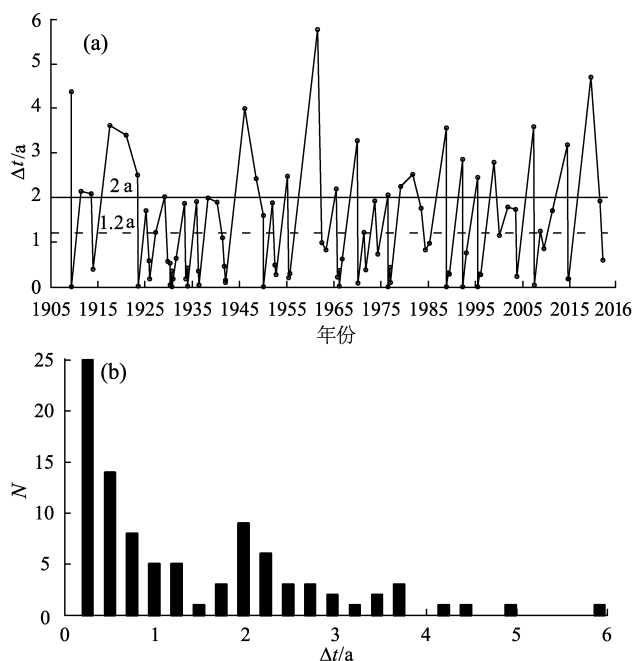


图2 1905—2015年云南地区及邻区 $M \geq 6.0$ 地震时间间隔 Δt (a) 及频次 N (b) 统计

Fig. 2 Time interval Δt (a) curve and frequency N (b) statistics of $M \geq 6.0$ earthquakes in Yunnan region during 1905–2015

(2) 云南地区及邻区5级地震平静

云南地区及邻区 $M \geq 5.0$ 地震平均年发生率 $v = 3$ 次/a, 地震的平均时间间隔 Δt 为0.33 a (或120 d), 当云南地区及邻区5级地震时间间隔达到200 d时, 认为5级地震出现平静异常, 可作出地震预警(钱晓东等, 2009)。由于 $\Delta t \geq 200$ d以后的打破地震85%为5级地震, 因此可以将5级打破地震的时间作为预测未来半年将发生6级地震的起始时间。图3给出了云南地区及邻区 $M \geq 5.0$ 地震时间间隔随时间变化及频次统计。分析可知, 1960—2022年的62 a间, 云南地区及邻区出现5级地震时间间隔 $\Delta t \geq 200$ d (约0.55 a) 的情况共31次, 平静打破后在半年内发生 $M \geq 6.0$ 地震共有13次, 对应率为 $13/31 = 0.42$, 研究总时间为62 a, 预报占时为15.5 a, R 值为0.18, R_0 值为0.17, 由于 $R > R_0$, 因此云南地区及邻区5级地震平静对未来6级地震具有预测意义。

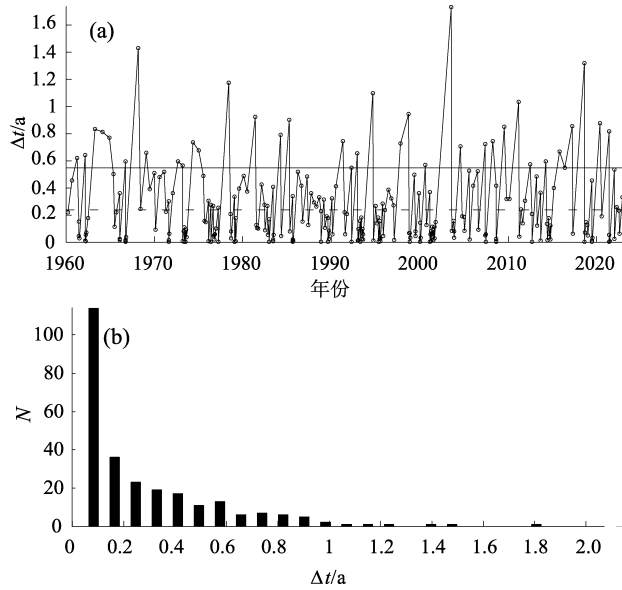


图3 1960—2020年云南地区及邻区 $M \geq 5.0$ 地震时间间隔 Δt (a) 及频次 N (b) 统计

Fig. 3 Statistics of time interval Δt (a) and frequency N (b) of $M \geq 5.0$ earthquakes in Yunnan region during 1960–2020

(3) 云南地区及邻区 4 级地震平静

云南地区及邻区平均每月约发生 2 次 $M_L \geq 4.0$ 地震, 若 4 级地震的时间间隔大于 90 d (约 0.25 a), 则认为出现 4 级地震平静异常, 图 4 给出了云南地区及邻区 $M_L \geq 4.0$ 地震时间间隔随时间变化及频次统计。分析可知, 1965 年来绝大多数 4 级地震平静由 4 级地震打破 ($27/32 = 84\%$), 打破平静后半年发生 6 级以上地震的震例占比为 $22/38 = 58\%$ 。1965 年以来云南地区及邻区共发生 $M \geq 6.0$ 地震 46 次, 报对 22 次, 漏报 24 次, 预报占时 19 a, 研究总时长 57 a, R 值为 $22/46 - 19/57 = 0.15$, R_0 值为 0.10, 能通过预报效能检验。

(4) 云南地区及邻区 4 级地震活跃

图 5 给出 2002—2022 年云南地区及邻区 $M_L \geq 4.0$ 地震半年频度随时间变化曲线。从图中可见, 当频次 ≥ 15 时, 云南地区及邻区 4 级地震活动开始活跃。1965—2022 年频次 ≥ 15 的情况共 29 次, 其中 18 次在其后半年发生 $M \geq 6.0$ 地震, 对应率为 62%。期间云南地区及邻区共发生 $M \geq 6.0$ 地震 37 次, 漏报 19 次, 预报占时为 14.5 a, 研究总时长为 57 a, R 值为 0.23, R_0 值为 0.16, 通过预报效能检验。

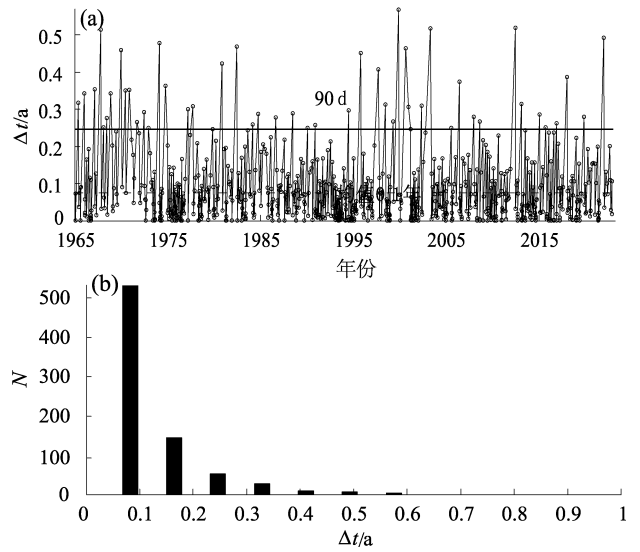


图4 1965—2020年云南地区及邻区 $M_L \geq 4.0$ 地震时间间隔 Δt (a) 及频次 N (b) 统计

Fig. 4 Statistics of time interval Δt (a) and frequency N (b) of $M_L \geq 4.0$ earthquakes in Yunnan region during 1965–2020

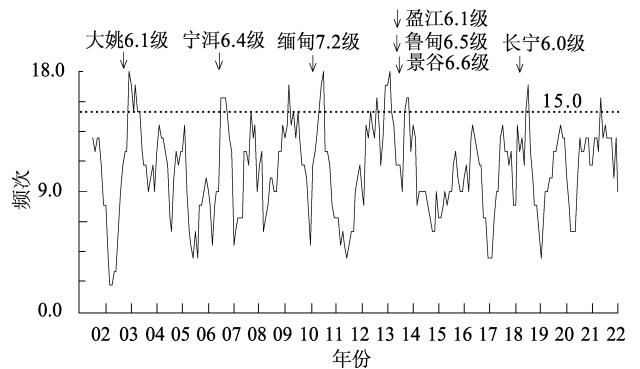


图5 2002—2022年云南地区及邻区 $M_L \geq 4.0$ 地震频次随时间变化 (窗长: 6 个月, 步长: 1 天)

Fig. 5 Frequency of $M_L \geq 4.0$ earthquakes varying with time in Yunnan region during 1965–2022 (window length: 6 months, step length: 1 day)

(5) 云南地区及邻区 3 级地震活跃

图 6 给出了 1997—2022 年云南地区及邻区 $M_L \geq 3.0$ 地震 3 个月频度与 $M \geq 6.0$ 地震的关系。从图中可以看到, 云南地区及邻区 $M_L \geq 3.0$ 地震频度 $N \geq 60$ 的情况共出现过 14 次, 其中有 9 次在地震频度出现异常后 3 个月内发生了 $M \geq 6.0$ 地震, 对应率为 0.64。图中仅标出报对地震, 未标出漏报地震 (6 次), 预报占时 3.5 a, 研究时长 25 a, R 值为 0.50, R_0 值为 0.27, 可见云南地区

及邻区3级地震频度对未来3个月短期6级地震具有预报意义。

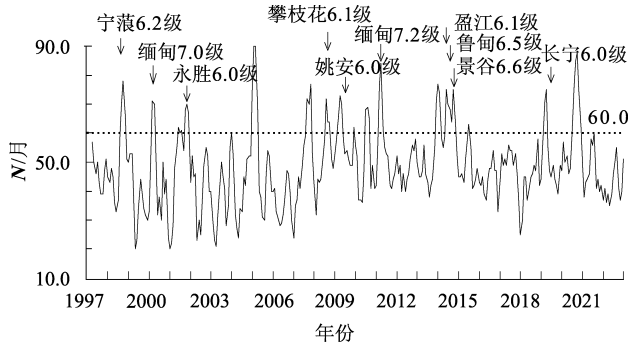


图6 1997—2022年云南地区及邻区 $M_L \geq 3.0$ 地震频次随时间变化(窗长:3个月,步长:1个月)

Fig. 6 Frequency of $M_L \geq 3.0$ earthquakes varying with time in Yunnan region during 1997 – 2022 (window length: 3 months, step length: 1 month)

(6) 地震活动度

地震活动度是描述地震活动性强弱的定量指标,它综合考虑了地震频次、平均震级或平均释放能量、最大震级以及地震空间分布的集中度及其记忆效应。谷继成和魏富成(1987)应用模糊数学概念,在只考虑地震频次、平均释放能量和最大震级3个因素时,给出地震活动度的计算公式为:

$$S = 1.17 \lg(N + 1) + 0.29 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{1.5M_i} + 0.15M_{\max} \quad (7)$$

式中: N 为地震总数; M 为震级; M_{\max} 为最大震级。

图7给出了1997—2022年云南地区及邻区中小地震活动度 S 随时间的变化,步长为1d,震级 $M_L \geq 2.5$,图中曲线为原始地震活动度 S 值经小波

分析后的结果,图中标出了该期间发生在云南地区及邻区的所有 $M \geq 6.0$ 地震。地震活动度是地震频度和地震释放能量的综合反映,能更客观地反映一定地区的地震活动水平。从图7中可以明显看到地震活动度 S 的高低起伏现象明显,强震不会发生于谷底,共出现高值异常14次,报对9次,半年对应率为64%,在此期间云南地区及邻区共发生 $M \geq 6.0$ 地震16次,报对12次,漏报4次,预报占时为7a,研究总时长为25a, R 值为0.47, R_0 值为0.27,能通过预报效能检验。

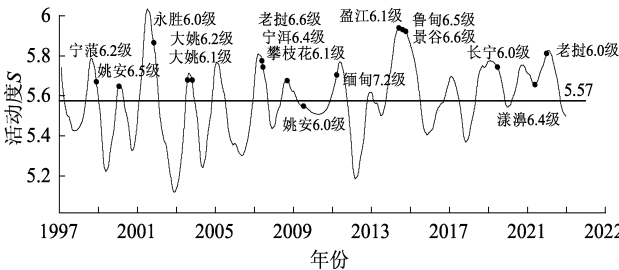


图7 1997—2022年云南地区及邻区地震活动度 S 时间分布

Fig. 7 Active degree S of $M \geq 6.0$ earthquakes varying with time in Yunnan region during 1997 – 2022

表1为云南地区及邻区6级地震指标所用资料参数及预测效果,从预测判据来看,主要监测地震活动平静和活跃两种异常状态,分别使用平静时间和频次参数。主要预测云南地区及邻区半年内发生 $M \geq 6.0$ 地震三要素。从预测效果来看,所用6个指标对应率绝大部分大于0.5,指标均能通过 R 值检验。

表1 云南地区及邻区6级地震指标参数

Tab. 1 Indexes of the $M6$ earthquakes in Yunnan region

编号	指标	研究时段	异常判据	预测地点、时间、强度	对应率	预报效能
1	6级地震平静	1905—2022年	$\Delta t \geq 2.0$ a后	云南地区及邻区、半年、 $M \geq 6.0$	0.50	$R = 0.41$; $R_0 = 0.23$
2	5级地震平静	1960—2022年	$\Delta t \geq 200$ d, 平静打破后	同上	0.42	$R = 0.18$; $R_0 = 0.17$
3	4级地震平静	1965—2022年	$\Delta t \geq 90$ d, 打破平静后	同上	0.58	$R = 0.15$; $R_0 = 0.10$
4	4级地震活跃	1965—2022年	半年频度 $N \geq 15$ 次	同上	0.62	$R = 0.23$; $R_0 = 0.16$
5	3级地震活跃	1997—2022年	3个月频度 $N \geq 60$ 次	云南地区及邻区、3个月、 $M \geq 6.0$	0.64	$R = 0.50$; $R_0 = 0.27$
6	地震活动度	1997—2022年	峰值	云南地区及邻区、半年、 $M \geq 6.0$	0.64	$R = 0.47$; $R_0 = 0.27$

2.3 云南地区及邻区强震发生的概率

概率增益: 从对6个单项指标的分析可知,云南地区及邻区6级地震月背景发震概率 $P(E) =$

0.069。对于6级地震平静指标,在 $\Delta t \geq 2.0$ a的条件下,未来半年发震的条件概率为 $P(M) = 43\%$,由于不能确定在6个月当中哪个月发生地震,可将

发震的可能性平均到每月, $P(M)/6 = 0.072$, 据式(4)得到概率增益 $G_1 = 1.04$ 。同理可得云南地区及邻区 5 级地震平静的概率增益为 1.01。

对于云南地区及邻区 4 级地震平静指标, 1905—2022 年云南省内共发生 $M \geq 6.0$ 地震 61 次, 地震发生率 $v = 0.55$ 次/a, 地震的平均间隔时间为 1.87 a, 即云南省内 6 级地震月背景概率 $P(E)$ 为 0.046, 每月的条件概率为 $0.58/6 = 0.097$, 计算得到概率增益为 2.1。对于云南地区及邻区 4 级地震活跃指标, 月背景概率为 0.069, 月条件概率为 $0.62/6 = 0.103$, 概率增益为 1.5。对于云南地区及邻区 3 级地震活跃指标, 6 级地震的月背景概率为 0.069, 指标月条件概率为 $0.64/3 = 0.213$, 概率增益为 3.09。对于云南地区及邻区地震活动度指标, 6 级地震的月背景概率为 0.069, 月条件概率为 $0.64/6 = 0.107$, 概率增益为 1.6。

表 2 给出了各个单项指标的预报效能 ΔR 和概率增益。从预报效能来看, 只要 $\Delta R > 0$ 即认为该项指标有预报意义, 且 ΔR 越大预报效果越好。由表 2 可见 (表中 $\Delta R = R - R_0$), 3 级地震活跃指标、地震活动度和 6 级地震平静指标这 3 项指标预报效果较好, 4 级地震活跃指标要好于 4 级地震平静指标。从概率增益来看, 作为 6 级强震的中短期预测, 5 级、6 级地震平静指标的概率增益并不高 (均小于 1.5), 3 级地震活跃指标概率增益最高 ($G_3 = 3.09$), 4 级地震平静、4 级地震活跃和地震活动度 S 概率增益介于 1.5 ~ 2.1。据式 (3) 可知, 当 $G_n > 1.0$ 时, $P(M)$ 大于背景发震概率, 单项 G_n 越大则 $P(M)$ 越高, 因此, 在实际工作中

表 2 云南地区及邻区 ΔR 6 个单项指标的概率增益

Tab. 2 Probability gain of 6 individual indicators

编号	指标	预报效能 ΔR	6 级地震月 背景概率	6 级地震月 条件概率	概率 增益 G_n
1	6 级地震平静	0.18	0.069	0.083	1.21
2	5 级地震平静	0.01	0.069	0.070	1.01
3	4 级地震平静	0.05	0.046	0.097	2.10
4	4 级地震活跃	0.07	0.069	0.101	1.50
5	3 级地震活跃	0.23	0.069	0.213	3.09
6	地震活动度	0.20	0.069	0.11	1.55

应该寻找条件概率较高的单项指标。

综合概率: 将整个研究时间段 t 划分为 n 段, 考察每小段时间内异常出现情况。由于已知每个单项指标异常出现的时间, 可根据式 (3) 计算每小段各分项指标的综合概率 P_i , 综合概率 P 为各分项指标概率 P_i 的叠加, 以一定步长滑动可求出整个时间段 t 的 P 值。图 8 给出了 1997—2022 年云南地区及邻区综合概率 P 随时间变化曲线, 红、黄、绿分别表示红色预警、黄色预警和安全。 P 异常阈值取 20%、30%, P 值小于 20% 为安全; P 值为 20% ~ 30% 黄色预警, 表示云南地区及邻区未来存在发生 $M \geq 6.0$ 地震的可能; P 值大于 30% 为红色预警, 预测未来半年云南地区及邻区将发生 $M \geq 6.0$ 地震。图 9 给出了云南地区及邻区 $M \geq 6.0$ 地震 P 值在不同预测时间的预报效能检验 R 值及相应的 R_0 值, 可以看到, 预测时间大于 0.43 a (约 157 d) 以后, R 值大于 R_0 值, 因此本文综合概率指标具有预报意义。

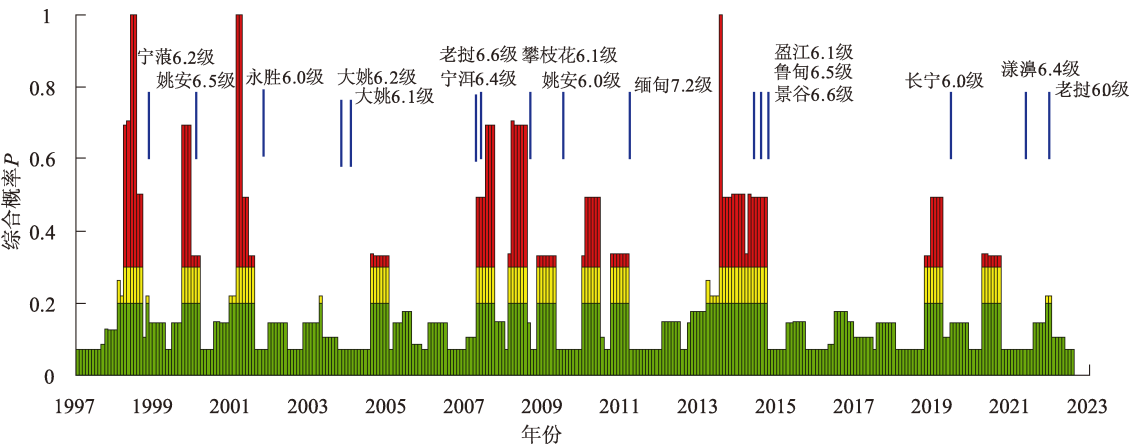


图 8 1997—2022 年云南地区及邻区地震综合概率 P 值随时间变化

Fig. 8 Synthetic probability P - value of earthquakes varying with time in Yunnan during 1997 - 2022

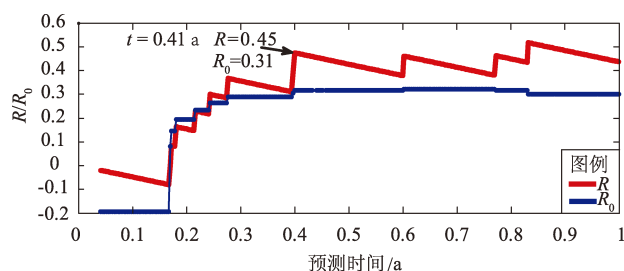


图9 云南地区及邻区 $M \geq 6.0$ 地震综合概率 P 值的预报效能 R 值检验

Fig. 9 R -value test of prediction efficiency of synthetic probability P -value of earthquakes in Yunnan region

从本文所选取的云南地区及邻区6项6级地震预测指标的预报效能来看(表2), R 值均大于 R_0 值, 表明这些指标均具有预报意义, 把这些指标与综合概率 P 得到的预报效能进行对比分析发现, 综合概率指标的 R 值为0.45, 大于6项单项指标中的4项, 即综合指标的预报效能比大多数(4/6=67%)单项指标要好。由于各单项指标主要表示的是平静或活跃某单一方面的地震活动状态, 而强震发生前地震活动平静或活跃均会出现, 如何选用指标不容易把握, 而综合概率 P 能有效地将地震活动平静和活跃进行融合, 其预报效能比单一指标要高。

3 讨论

(1) 单项指标的选择。综合概率 P 即增益概率是各个单项对背景概率的贡献和增益的综合反映, 其结果与单项指标的选择直接有关。选择单项指标需要注意两个方面, 一是要认真研究每个单项指标的条件概率, 即当指标出现后发生地震的概率, 不能只有个别震例。还要对每条曲线原始资料进行可信度分析, 对测震观测目录资料要统一震级标度、去除余震, 对前兆观测资料要去除环境干扰。单项资料要有明确的物理意义, 预测效能的提高、干扰的排除和异常判定标准的制定等都依赖于对预测方法的物理意义的理解程度。另一方面, 对各单项指标要进行独立性分析, 但地震前兆的独立性判定有时是困难的, 当地震前兆的独立性不完全清楚时, 可以从曲线参数的公

式来源和曲线趋势的相似性来考察(程万正, 1999)。单项资料不宜过多, 更不能是参数的罗列, 要以预测思想为基础。

(2) 加大强震短期指标研究力度。目前已总结的云南地区及邻区强震(尤其是6、7级强震)预测指标中, 大多数预测时间在半年以上, 具有统计意义的3个月及其以内的指标较少, 并且随着预测区域的缩小, 短期预测指标更少, 在震前想要同时找到多种地震前兆异常是比较困难的, 因此要加大强震短期指标研究力度并进行持续跟踪, 尤其是小区域指标研发。只有在强震短期指标研究达到一定水平以后, 才能制定出跨越长、中、短期不同时间尺度一体化的综合预测方案。

(3) 预测地震类型。大量岩石破裂实验表明(余怀忠等, 2004; 蒋海昆等, 2009), 岩石破裂前应变能会出现加速释过程, 这种现象与地震前出现的能量加速释放、中小地震活跃现象相似。此外, 大地震前还会出现能量释放减速或匀速、中小地震平静的现象。钱晓东等(2015)对云南地区及邻区强震前中小地震活动特征的研究表明, 强震前中小地震活动具有加速特征的约占70%, 减速或匀速特征占30%, 可见云南地区及邻区震前中小地震活跃的情况占大多数, 此为本文选择地震发生模式为平静-活跃的原因。另外, 大震前中小地震活跃模型在预测上具有不唯一性, 目前大量震例研究认为强震前中小地震活动会普遍出现加速现象, 但是, 是否只要出现中小地震活动加速就一定会发生大地震(即是否具有唯一性), 这方面的研究进展相对较慢, 对其进行深入研究探索也是我们今后长期要面临的研究课题。

(4) 综合概率 P 的阈值。综合概率 P 值需要达到多大才能发布预警信息? 综合概率 P 的大小与所预测地震的时、空、强有关。从时间预测来看, 假设预测未来1a发生1次强震的概率为1, 是一次高概率预测结果, 对于1次在1a内必定要发生的事件, 由于无法判定会在哪一个月发生, 根据最大熵原理(钱晓东等, 2009), 事件发生的概率必然满足等概率才能使熵最大, 因此认为一年内的每个月发生的可能性是相同的, 即为 $1/12=0.08$, 可见一次中长期预测的高概率事件转换为短期预测就变为低概率事件。对于云南地区及邻

区强震短期预测来说,由于背景概率较低,震前对应率高且相互独立的地震前兆中短期异常同时出现的项数不会太多,因而综合概率 P 的阈值不会太高。

(5) 建立各预测方法的预警概率水平。对各种地震预测方法进行较为严格的统计检验,依靠某地区相对较长时间的地震前兆资料,对多个目标地震进行检验分析以说明异常与地震之间存在某种关系,对所采取的各种方法要持续跟踪检验,在不断的预测实践中调整异常判定准则,完善预测方法,建立适合当地实际的各级预警指标体系。美国加州帕克菲尔德地震预报实验场把向公众发布预警的水平定为 3 天 A、B、C、D 4 个级别 (Bakun, Lindh, 1985), 3 天的发震概率阈值分别为 37%、11%、2.8%、0.68%, 根据不同预警级别制定相应对策。2005 年 5 月 18 日,美国地质调查局 (USGS) 宣布,开放了一个可显示加州地区未来 24 h 内发生地震概率的公共网站,以地图的形式向人们展示地震发生概率的变化,这项研究成果主要得益于该地区较好的实时地震监测台网和对这一地区地震发生率有较为深入的研究 (Hanna *et al.*, 2005)。可见,地震预报面向社会公共服务概率预测是重要手段,近年来我国在这方面进行了有益的探索 (苏有锦, 李忠华, 2011; 陈丽丽等, 2019; 邬方梅, 2021)。

4 结论

本文基于概率增益模型的基本原理,结合对云南地区及邻区 $M \geq 6.0$ 地震发生规律的认识,给出了强震中短期预测思路和单项预测指标方法的选择。选用总结出的 6 种地震学预测方法,分别计算了每一种地震前兆异常出现时发生地震的条件概率,在此基础上给出 1997—2022 年云南地区及邻区 $M \geq 6.0$ 地震未来中短期发震的综合概率指标,结果表明综合概率 P 对预测未来半年云南地区及邻区 $M \geq 6.0$ 强震能通过 R 值检验;取 P 异常阈值为 20%、30%,可对强震进行不同级别预警, P 值小于 20% 为安全, P 值为 20% ~ 30% 为黄色预警,表示云南地区及邻区未来存在发生 $M \geq 6.0$ 地震的可能性; P 值大于 30% 为红色预警,表示未来半年云南地区及邻区将发生 $M \geq 6.0$ 地震。

参考文献:

- 陈丽丽,邱剑锋,张恩立. 2019. 华东地区 5 级以上地震时间分布特征及预测预警模型研究[J]. 防灾减灾学报,35(3):40-45.
- Chen L L, Qiu J F, Zhang E L. 2019. Time distribution characteristics and prediction model of $M \geq 5.0$ Earthquakes in East China[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 35(3):40-45. (in Chinese)
- 程万正. 1999. 地震活动性参数的数理基础、相关性及筛选[J]. 地震学报,21(2):166-174.
- Cheng W Z. 1999. Mathematical basis, correlation, and sifting of the seismic parameters[J]. Acta Seismologica Sinica, 21(2):166-174. (in Chinese)
- 邓世广,周龙泉,马亚伟,等. 2019. 基于贝叶斯定理的地震危险性概率预测研究[J]. 中国地震,35(1):1-13.
- Deng S G, Zhou L Q, Ma Y W, *et al.* 2019. Research on probability prediction of earthquake risk based on Bayesian Theorem[J]. Earthquake Research in China, 35(1):1-13. (in Chinese)
- 谷继成,魏富胜. 1987. 论地震活动性的定量化;地震活动度[J]. 中国地震,13(S1):20-27.
- Gu J C, Wei F S. 1987. The quantification of seismic activity; seismicity[J]. Earthquake Research in China, 13(S1):20-27. (in Chinese)
- 郭文峰,刘瑞春,王霞,等. 2022. 山西地区地震综合概率预测模型及回溯性检验[J]. 地震地磁观测与研究,43(3):1-9.
- Guo W F, Liu R C, Wang X, *et al.* 2022. Comprehensive probability prediction model and retrospective test of earthquakes in Shanxi region[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 43(3):1-9. (in Chinese)
- 蒋长胜,庄建仓,吴忠良,等. 2017. 两种短期概率预测模型在 2017 年九寨沟 7.0 级地震中的应用和比较研究[J]. 地球物理学报,60(10):4132-4144.
- Jiang C S, Zhuang J C, Wu Z L, *et al.* 2017. Application and comparison of two short-term probabilistic forecasting models for the 2017 Jiuzhaigou, Sichuan, $M_s 7.0$ earthquake[J]. Chinese J Geophys, 60(10):4132-4144. (in Chinese)
- 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.
- Jiang H K, Wu Q, Dong X, *et al.* 2009. Behaviors of AE strain release under the different temperature and pressure condition; Discussion on the physical meanings of ASR model parameter[J]. Chinese J Geophys, 52(8):2064-2073. (in Chinese)
- 金学申,戴英华,马桂华,等. 1996. 一种应用于地震长期预报中的概率增益模型[J]. 地震地质,18(1):45-51.
- Jin X S, Dai Y H, Ma G H, *et al.* 1996. A Probability increasing model applied to long-term earthquake prediction[J]. Seismology and Geology, 18(1):45-51. (in Chinese)
- Hanna S, Gerstenberger M, Shindle W, *et al.* 2005. 新的加利福尼亚地震动日常概率地图[J]. 国际地震动态, (6):1-2.
- Hanna S, Gerstenberger M, Shindle W, *et al.* 2005. New daily probability of ground motion in California[J]. Recent Developments in World

- Seismology, (6):1-2. (in Chinese)
- 马永, 毕金孟, 宋程, 等. 2021. 利用混合概率预测模型分析华北地区地震活动特征[J]. 地震研究, 44(4):572-582.
- Ma Y, Bi J M, Song C, *et al.* 2021. Analysis of the seismicity in North China using hybrid probability forecasting model[J]. Journal of Seismological Research, 44(4):572-582. (in Chinese)
- 梅世蓉, 冯德益, 张国民, 等. 1993. 中国地震预报概论[M]. 北京: 地震出版社, 498.
- Mei S R, Feng D Y, Zhang G M, *et al.* 1993. Introduction to earthquake prediction in China[M]. Beijing: Seismological Press, 498. (in Chinese)
- 钱晓东, 李琼, 洪敏. 2015. 云南地区中强地震前应变释放特征[J]. 地震学报, 37(3):386-401.
- Qian X D, Li Q, Hong M. Characteristics of strain release before moderate-strong earthquakes in Yunnan region[J]. Acta Seimologica Sinica, 37(3):386-401. (in Chinese)
- 钱晓东, 彭关灵, 贺素歌. 2020. 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[J]. 地震研究, 43(1):45-56.
- Qian X D, Peng G L, He S G. 2020. Probabilistic earthquake prediction of Yunnan region by using non-stationary Poisson model[J]. Journal of Seismological Research, 43(1):45-56. (in Chinese)
- 钱晓东, 秦嘉政, 李琼. 2009. 最大熵原理在地震时间间隔和震级分布中的应用[J]. 地震地磁观测与研究, 30(5):5-13.
- Qian X D, Qin J Z, Li Q. 2009. The application of the maximum entropy principle in distribution of interval time and magnitude of earthquakes[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 30(5):5-13. (in Chinese)
- 邱雪强, 沈黎鑫. 2004. 概率增益方法及其应用[J]. 华南地震, 24(2):6-10.
- Qiu X Q, Shen F L. 2004. Method of probability gain and its application in the seismic prediction[J]. South China Journal of Seismology, 24(2):6-10. (in Chinese)
- 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.
- Su Y J, Li Z H. 2011. Interval distribution and probability model of the strong earthquakes with M6.0 in Yunnan[J]. Journal of Seismological Research, 34(1):1-7. (in Chinese)
- 王芃, 邵志刚, 刘琦, 等. 2019. 基于多学科物理观测的地震概率预测方法在川滇地区的应用[J]. 地球物理学报, 62(9):3448-3463.
- Wang P, Shao Z G, Liu Q, *et al.* 2019. Probabilistic forecasting of earthquakes based on multidisciplinary physical observations and its application in Sichuan and Yunnan[J]. Chinese Journal of Geophysics, 62(9):3448-3463. (in Chinese)
- 王晓青, 傅征祥, 张立人, 等. 2000. 中长期时空增益综合预测模型及其初步应用[J]. 地震学报, 22(1):45-53.
- Wang X Q, Fu Z X, Zhang L R, *et al.* 2000. Model of spatial and temporal synthetic probability gains for median and long-term earthquake forecast and its preliminary application[J]. Acta Seimologica Sinica, 22(1):45-53. (in Chinese)
- 郭方梅. 2021. 基于统计分布的地震概率预测预警的模型选择[D]. 重庆: 重庆大学.
- Wu F M. 2021. Model selections of earthquake probability prediction and early warning based on statistical distribution [D]. Chongqing: Chongqing University. (in Chinese)
- 吴忠良. 1998. 地震预测研究中的“现实主义”: 对地震预测研究中的两个基本概念的讨论[J]. 国际地震动态, (1):3-7.
- Wu Z L. 1998. “Realism” in earthquake prediction; discussion of two basic concepts in the research of earthquake prediction[J]. Recent Developments in World Seismology, (1):3-7. (in Chinese)
- 余怀忠, 尹祥础, 夏蒙梦, 等. 2004. 地震临界点理论的实验研究[J]. 地震学报, 26(S1):122-130.
- Yu H Z, Yin X C, Xia M F, *et al.* 2004. Experimental research on critical point hypothesis[J]. Acta Seimologica Sinica, 26(S1):122-130. (in Chinese)
- 张天中, 王林瑛, 刘庆芳, 等. 1998. 地震短期预测的概率方法浅议[J]. 国际地震动态, (7):1-5.
- Zhang T Z, Wang L Y, Liu Q F, *et al.* 1998. Elementary discussion on the probabilistic method of short term earthquake prediction[J]. Recent Developments in World Seismology, (7):1-5. (in Chinese)
- 张天中, 王林瑛, 刘庆芳, 等. 1999. 概率方法应用于地震短期预测的探索[J]. 地震, 19(2):153-141.
- Zhang T Z, Wang L Y, Liu Q F, *et al.* 1999. An application of probability method to the short-term earthquake prediction[J]. Earthquake, 19(2):153-141. (in Chinese)
- 郑建常, 冀东普, 李冬梅, 等. 2022. 山东地区中小地震概率预测实践[J]. 地震地磁观测与研究. 43(1):1-7.
- Zheng J C, Ji D P, Li D M, *et al.* 2022. Probabilistic prediction practice for middle and small earthquakes in Shandong area[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 43(1):1-7. (in Chinese)
- Aki K. 1981. A probabilistic synthesis of precursory phenomena [C]//Simpson D W, Richards P G. Earthquake prediction - an international review. Washington D C: AGU, 566-574.
- Aki K. 1984. The use of physical model of fault mechanics for earthquake prediction [C]//The organizing committee of ISCESP. A collection of papers of international symposium on continental seismicity and earthquake prediction. Beijing: Seismological Press, 653-659.
- Bakun W H, Lindh A G. 1985. The Parkfield California earthquake prediction experiment[J]. Science, 229:619-624.
- Kenji M, Akio Y. 1990. A probabilistic estimation of earthquake occurrence on the basis of the appearance times of multiple precursory phenomena[J]. J Phys Earth, 3816:38431-38444.
- Utsu T. 1977. Probabilities in earthquake prediction [J]. Zisin Ser, 30(2):179-185.
- Utsu T. 1979. Calculation of the probability of success of an earthquake prediction (in the case of Lzu-Oshima-Kinkai earthquake of 1978) [J]. Rep Coord Cpmom Earthq Predict, 85:164-166.
- Utsu T. 1984. Long-and short-term seismic risk estimation from seismicity and precursors [C]//The organizing committee of ISC ESP. A collection of papers of international symposium on continental seismicity and earthquake prediction. Beijing: Seismological Press, 818-827.

Research on Strong Earthquake Probability Prediction Based on the Probability Gain Model

QIAN Xiaodong^{1,2}, HE Suge^{1,2}

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

(2. Shanghai Sheshan National Geophysical Observatory, Shanghai 200062, China)

Abstract

In order to improve the accuracy of short- and medium-term prediction of strong earthquakes in Yunnan and its adjacent area, through the comparative study of different earthquake precursor indexes before strong earthquake, we find that using only one single indicator is difficult to improve the accuracy of prediction. We select 6 indexes which all reflect the occurrence law of strong earthquakes from different aspects. We use the probability gain model to synthetically process these indicators by estimating the probability gain of each earthquake precursor to quantitatively determine the possibility of the earthquake. Finally, we obtain a synthetic probability P index to predict the probability of short- and medium-term occurrence of 6-magnitude earthquakes or above in Yunnan and its adjacent area in future. The results show that: ①The comprehensive probability P can pass the R -value test for predicting 6-magnitude earthquakes or above in Yunnan and its adjacent area in the next six months. ②Taking P abnormal threshold as 20% and 30%, different levels of strong earthquake warning can be carried out, a P -value less than 20% indicates “safety”; a P -value greater than 20% indicates that a “yellow warning” is necessary, indicating that there is a possibility of a 6-magnitude earthquake or higher may occur in Yunnan in future; a P -value greater than 30% indicates the need for a “red warning”, indicating that a 6-magnitude earthquake or above will occur in Yunnan and its adjacent area in the next six months.

Keywords: probability gain; synthetic probability; short- and medium-term earthquake prediction; Yunnan and its adjacent area; 6-magnitude earthquakes or above