

文章编号: 1004-4353(2022)04-0370-05

吉林地区 $M \geq 4.0$ 的地震预警模型研究

关宇桐, 李春景, 朱卫红

(延边大学 地理与海洋科学学院, 吉林 延吉 133002)

摘要: 利用复发间隔公式和地震发生概率模型计算了吉林地区 2006—2022 年 4.0 级以上 ($M \geq 4.0$) 地震的相关数据,得到了研究区内 4 个震级档的平均复发间隔和发生概率,并以此建立了吉林地区 $M \geq 4.0$ 地震的 4 级预警模型. 利用吉林地区的地震数据对目前吉林地区 4 个震级档所处的地震预警级别进行预测显示: $M \geq 4.0$ 的地震目前不在预警范围内, $M \geq 4.5$ 和 $M \geq 5.5$ 的地震处于 C 级黄色预警级别, $M \geq 5.0$ 的地震处于 D 级蓝色预警级别. 该研究结果可为吉林地区的地震预警工作提供参考.

关键词: 吉林地区; 地震预警模型; 地震发生概率; Poisson 分布模型; 复发间隔

中图分类号: K903

文献标识码: A

Research on earthquake early warning model of $M \geq 4.0$ in Jilin area

GUAN Yutong, LI Chunjing, ZHU Weihong

(College of Geography and Ocean Science, Yanbian University, Yanji 133002, China)

Abstract: The recurrence interval formula and the model of probability earthquake occurrence were used to calculate the relevant data of earthquakes above magnitude 4.0 ($M \geq 4.0$) in Jilin area from 2006 to 2022, and the 4-level prediction and early warning model of the $M \geq 4.0$ earthquake in Jilin was established by using the relevant data of $M \geq 4.0$ earthquakes in Jilin area from 2006 to 2022. Using the seismic data in the study area to predict the current earthquake warning level of the four magnitude bands in Jilin area, it is shown that the earthquake of $M \geq 4.0$ is not within the early warning range at present, the earthquakes of $M \geq 4.5$ and $M \geq 5.5$ are at theyellow warning level of C, and the earthquakes of $M \geq 5.0$ are at the blue warning level of D. The results of this research can provide a reference for earthquake early warning in Jilin area.

Keywords: Jilin area; earthquake early warning model; probability of earthquake occurrence; Poisson distribution model; recurrence interval

0 引言

地震因具有不可抗力性与突发性,因此是目前最为严重的自然灾害之一^[1]. 21 世纪以来,吉林地区地震活动频发(中国地震局的地震目录中共记录有 95 次 2.0 级以上地震),其中以松原地

区的浅源地震和延边地区的深源地震最为典型. 目前,学者们对吉林地区的地震灾害研究主要以震后灾害评估为主,包括地震应急流动监测^[2]、热红外异常研究^[3]、地磁异常分析^[4]等,但对于震灾预测的研究较少. 由于地震预测能够有效减少地

收稿日期: 2022-08-13

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41830643)

第一作者: 关宇桐(2000—),女(满族),本科生,研究方向为自然地理.

通信作者: 李春景(1966—),女(朝鲜族),博士,副教授,研究方向为自然地理.

震所造成的损失,因此研究地震预测具有十分重要的现实意义。

在地震预测的相关研究中,学者们通常采用的方法是对地震活动进行概率分析,即通过验证研究区内的地震数据分布(符合哪一概率模型)来进行预测^[5]。目前常用的概率模型为 Weibull 分布模型和 Poisson 分布模型。Dinesh 等利用 Weibull 分布模型预测了印度地震发生的概率^[6]。钱晓东等利用非稳态 Poisson 分布模型预测了我国云南地区的地震发生概率^[7]。李俏等利用 Poisson 分布模型预测了辽宁地区发生 5.0 级以上地震的概率,并给出了该地区的地震预警指标^[8]。由于 Poisson 分布是一种离散型概率分布,更适用于在一定时间或空间上对地震活动的发生概率进行预测,因此本文采用 Poisson 分布模型对吉林地区的地震发生概率进行计算,并以此构建了吉林地区 4.0 级以上(含 4.0 级地震,即 $M \geq 4.0$)的地震预警模型。

1 数据选取与分析

吉林地区位于 $40^{\circ}52' \sim 46^{\circ}18'N$, $121^{\circ}38' \sim 131^{\circ}19'E$ 。本文选取的绘图和计算数据主要是来自于吉林地区的 DEM 高程数据和 $M \geq 4.0$ 的地震目录(由于 $M \geq 4.0$ 的地震通常会引起重大灾害,因此本文选取该等级地震进行研究)。其中:DEM 高程数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),分辨率为 90 m;地震目录来源于中国地震局(<https://www.cea.gov.cn/>)。

本文的研究时间范围是 2006 年 3 月 31 日—2022 年 3 月 31 日。在此期间,共发生 $M \geq 4.0$ 地震 33 次。其中:4.0~4.4 级地震 14 次;4.5~4.9 级地震 8 次;5.0~5.4 级地震 7 次;5.5~5.9 级地震 4 次。吉林地区的地震震中分布图见图 1。

对上述吉林地区 $M \geq 4.0$ 的地震数据进行分析可知,研究区内以中强震($4.5 \leq M < 6$)为主,有感地震(本文为 $4 \leq M < 4.5$)次之。由此可知,研究区内的震级分布满足 G-R(Gutenberg-Richter)关系^[9],即满足震级-频度关系。为了分析震级 M 与 $\lg N$ 之间的相关性,分别以 4.5 级、5 级和 5.5 级

为分界,将研究区的地震数据划分为 4 个震级档,

并利用公式($r = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}}$)

对震级 M 与 $\lg N$ 之间的相关性进行计算。结果显示, $r = 0.987$ 。该结果表明 M 与 $\lg N$ 具有较强的相关性,且满足线性关系。

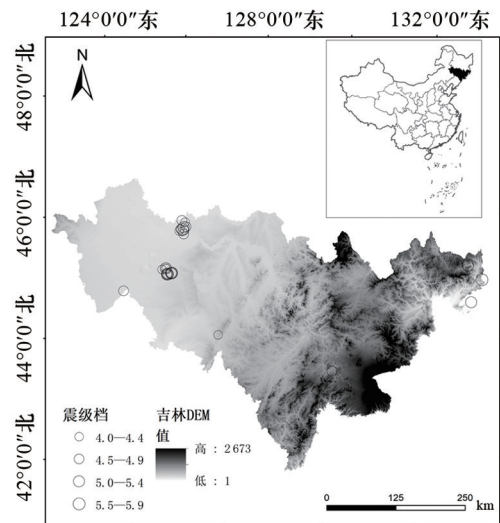


图1 吉林地区的地震震中分布图

为了确保本文所选取的地震数据具有完整性,本文根据 G-R 关系公式对资料进行了完整性分析。G-R 关系的计算公式^[10]为:

$$\lg N(M) = a - bM, \quad (1)$$

式中 M 为震级, N 是震级区间 $[M, M \pm \Delta M]$ 在研究时间内发生地震的次数(本文根据研究区的地震震级的数值分布,取 $\Delta M = 1/2$)。将上述取值代入式(1)中后分别对不同震级档的震级 M 及 $\lg N$ 进行最小二乘线性拟合得: $\lg N(M) = 3.948 - 0.597M$, $R^2 = 0.974$ 。拟合曲线如图 2 所示。

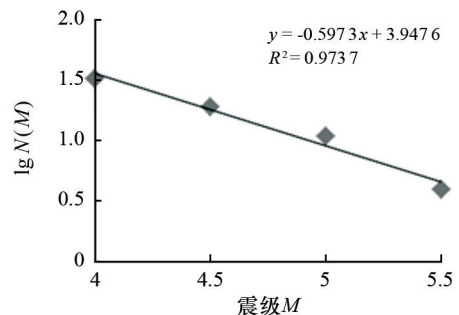


图2 吉林地区 $M \geq 4.0$ 地震的拟合曲线

上述拟合结果表明, M 与 $\lg N$ 的线性关系与实际震级数据点具有较高的拟合度, 由此说明本文所研究的地震数据具有较高的完整性, 可用于地震复发间隔和发生概率的计算.

2 地震复发间隔的计算及分布

由于地震预警模型的确立要以地震复发间隔和发生概率为依据, 因此需建立吉林地区 $M \geq 4.0$ 地震的年发生率 λ 与震级 M 之间的关系, 以此求出 4 个震级档的 λ 值. λ 与 M 的关系式^[11] 为:

$$\lg \lambda(M) = a_t - bM, \quad (2)$$

其中 $a_t = a - \lg(t)$, a 由式(1) 计算所得, t 为地震数据的时间长度(依据研究时间 t 取 16 a). 将上述数值代入 $a_t = a - \lg(t)$ 中计算出 a_t 后, 再利用式(2) 计算得 λ 与 M 的关系为 $\lg \lambda(M) = 2.744 - 0.597M$. 将 4.0、4.5、5.0 和 5.5 这 4 个震级数值分别代入上式中即可求出其对应的 $\lg(M)$ 的数值和地震年发生率对数与震级间的关系, 如图 3 所示. 由图 3 可以看出, 吉林地区地震的震级高低与年发生率呈反比.

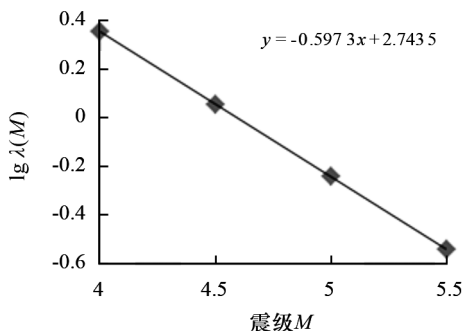


图 3 地震年发生率对数与震级的关系

利用式(2) 分别计算出地震年发生率 λ 的数值后, 即可依据地震复发间隔与年发生率之间的关系计算出 4 个震级档的地震复发间隔 T . T 的计算公式^[12] 为:

$$T = \frac{1}{\lambda}. \quad (3)$$

将 4 个震级档的 λ 值分别代入式(3) 中进行计算得: 吉林地区 4 个震级档的复发间隔分别为 0.44、0.88、1.75 a 和 3.48 a. 为了划分 4 个震级档的间隔时间, 计算了 4 个震级档的均方差以及其

0.5 倍、1.0 倍、1.5 倍方差的数值. 结果显示: 4 个震级档的均方差分别为 1.20、1.21、1.05 a 和 0.46 a; 4 个震级档的 0.5 倍方差分别为 2.41、2.89、3.50 a 和 4.25 a; 4 个震级档的 1.0 倍方差分别为 3.01、3.49、4.02 a 和 4.48 a; 4 个震级档的 1.5 倍方差分别为 3.61、4.10、4.55 a 和 4.71 a. 根据上述的计算结果即可确定 4 个震级档所对应的间隔时间, 同时可知当研究区某一震级档发生地震的间隔时间超过该震级档 1.5 倍方差的数值时(其他数值同理), 就需特别注意研究区内发生该等级地震的危险性.

将式(3) 计算得出的所有震级的复发间隔按照时间顺序排列后得到的吉林地区 $M \geq 4.0$ 地震的复发间隔分布图如图 4 所示. 利用图 4 中的数据对平均复发间隔时间内的地震发生概率进行计算显示, 4 个震级档发生地震的概率分别为 75.8%、63.2%、63.6%、50.0%.

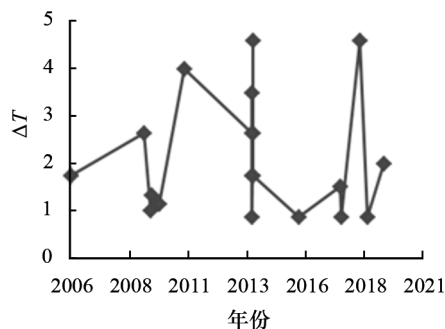


图 4 吉林地区 $M \geq 4.0$ 地震的复发间隔分布图

3 地震发生概率的预测及预警模型的建立

3.1 地震发生概率的预测

计算 4 个震级档地震发生概率的公式^[8] 为:

$$P(t) = 1 - e^{-tN(M)}, \quad (4)$$

其中 t 为进行预测的年数(本文分别取 t 为 1~25 a); $N(M)$ 为不同震级的年发生率, 由下式计算获得:

$$N(M) = \frac{e^{\mu M} - e^{\mu M_{\max}}}{e^{\mu M_{\min}} - e^{\mu M_{\max}}}. \quad (5)$$

式(5) 中的参数 μ 可由下式求得:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{M_{\min} e^{-\mu M_{\min}} - M_{\max} e^{-\mu M_{\max}}}{e^{-\mu M_{\min}} - e^{-\mu M_{\max}}} = \bar{M}. \quad (6)$$

式(6) 中, \bar{M} 为研究区地震活动的平均震级, M_{\min} 为起算震级, M_{\max} 为最大震级. 本文根据吉林地

区的地震数据取 M_{\min} 和 M_{\max} 的值,分别为 4.0 和 5.8. 利用式(6) 计算得 \bar{M} 为 4.67, 参数 μ 为 0.210. 将上述数值代入式(5) 中计算出 $N(M)$ 后,再利用式(4) 即可分别计算出 4 个震级档的地震活动随时间变化的概率,如图 5 所示. 由图 5 可以看出,随着时间的增加,吉林地区发生 $M \geq 4.0$ 地震的概率随着时间的增加而增大.

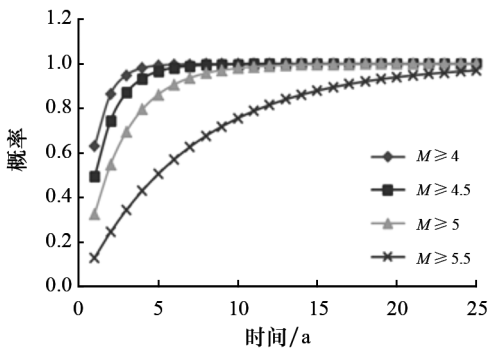


图 5 吉林地区发生 $M \geq 4.0$ 地震的概率预测模型

3.2 地震 4 级预警模型的建立

研究表明,发生相应等级地震的危险性随间隔时间的增加而增大^[5]. 基于此,本文将 4 个震级档的 0.5 倍方差、1.0 倍方差、1.5 倍方差以及平均复发间隔的近似值设定为每个震级档的 4 个间隔时间,并以此划分了各间隔时间所对应的 4 个预警等级(分别为 A(红)、B(橙)、C(黄)、D(蓝)). 根据上述划分的 4 个震级档的间隔时间以及计算得出的地震发生的概率水平,本文建立了如表 1 所示的吉林地区 $M \geq 4.0$ 地震的 4 级预警模型.

由表 1 可得:当间隔时间 $\Delta T \geq 2.0$ a 时,发生 $M \geq 4.0$ 地震的概率水平为 ≥ 0.865 ,处于 D 级蓝色预警级别. $\Delta T \geq 2.5$ a 时,发生 $M \geq 4.0$ 和 $M \geq 4.5$ 地震的概率水平分别为 ≥ 0.918 和 ≥ 0.819 ,分别处于 C 级黄色预警和 D 级蓝色预警级别. $\Delta T \geq 3.0$ a 时,发生 $M \geq 4.0$ 、 $M \geq 4.5$ 和 $M \geq 5.0$ 地震的概率水平分别为 ≥ 0.950 、 ≥ 0.871 和 ≥ 0.697 ,分别处于 B 级橙色预警、C 级黄色预警和 D 级蓝色预警级别. $\Delta T \geq 3.5$ a 时,发生 $M \geq 4.0$ 、 $M \geq 4.5$ 和 $M \geq 5.0$ 地震的概率水平分别为 ≥ 0.970 、 ≥ 0.909 和 ≥ 0.752 ,分别处于 A 级红色预警、B 级橙色预警和 C 级黄色预警级别. $\Delta T \geq$

4.0 a 时,发生 $M \geq 4.5$ 、 $M \geq 5.0$ 和 $M \geq 5.5$ 地震的概率水平分别为 ≥ 0.935 、 ≥ 0.797 和 ≥ 0.432 ,分别处于 A 级红色预警、B 级橙色预警和 D 级蓝色预警级别. $\Delta T \geq 4.3$ a 时,发生 $M \geq 5.5$ 地震的概率水平为 ≥ 0.456 ,处于 C 级黄色预警级别. $\Delta T \geq 4.5$ a 时,发生 $M \geq 5.0$ 和 $M \geq 5.5$ 地震的概率水平分别为 ≥ 0.833 和 ≥ 0.471 ,分别处于 A 级红色预警和 B 级橙色预警级别. $\Delta T \geq 5.0$ a 时,发生 $M \geq 5.5$ 地震的概率水平为 ≥ 0.507 ,处于 A 级红色预警级别.

表 1 吉林地区 $M \geq 4.0$ 地震的 4 级预警模型

震级 M	间隔时间/a	概率水平	预警级别
$M \geq 4.0$	$\Delta T \geq 2.0$	≥ 0.865	D
	$\Delta T \geq 2.5$	≥ 0.918	C
	$\Delta T \geq 3.0$	≥ 0.950	B
	$\Delta T \geq 3.5$	≥ 0.970	A
$M \geq 4.5$	$\Delta T \geq 2.5$	≥ 0.819	D
	$\Delta T \geq 3.0$	≥ 0.871	C
	$\Delta T \geq 3.5$	≥ 0.909	B
	$\Delta T \geq 4.0$	≥ 0.935	A
$M \geq 5.0$	$\Delta T \geq 3.0$	≥ 0.697	D
	$\Delta T \geq 3.5$	≥ 0.752	C
	$\Delta T \geq 4.0$	≥ 0.797	B
	$\Delta T \geq 4.5$	≥ 0.833	A
$M \geq 5.5$	$\Delta T \geq 4.0$	≥ 0.432	D
	$\Delta T \geq 4.3$	≥ 0.456	C
	$\Delta T \geq 4.5$	≥ 0.471	B
	$\Delta T \geq 5.0$	≥ 0.507	A

为了预测吉林地区目前所处的地震预警级别,利用研究区内的地震数据计算了 4 个震级档中距今最近一次发生相应等级地震的间隔时间,并将计算结果代入地震预警模型中进行了预测. 预测结果显示:发生 $M \geq 4.0$ 地震(自 2022 年 3 月 16 日至今)的间隔时间不足 1.0 a(最小间隔时间为 2.0 a),因此该地震等级目前不在预警范围内;发生 $M \geq 4.5$ 和 $M \geq 5.0$ 地震(自 2019 年 5 月 18 日至今)的间隔时间均超过 3.0 a(不足 3.5 a),发生地震的概率水平分别为 ≥ 0.871 和 ≥ 0.697 ,因此目前 $M \geq 4.5$ 和 $M \geq 5.0$ 地震的预警级别分别为 C 级黄色预警($M \geq 4.5$)和 D 级蓝色预警($M \geq 5.0$);发生 $M \geq 5.5$ 地震(自 2018 年 5 月 28 日至今)的间隔时间超过 4.3 a(不足 4.5 a),

发生地震的概率水平为 ≥ 0.456 , 因此目前 $M \geq 5.5$ 地震的预警级别为 C 级黄色预警.

4 结论

本文依据吉林地区 2006—2022 年间 $M \geq 4.0$ 的地震数据, 对区域内地震的复发间隔及发生概率进行了计算, 并在此基础上建立了吉林地区 $M \geq 4.0$ 地震的 4 级预警指标. 本文研究得出的主要结论如下:

1) 吉林地区 4 个震级档的复发间隔分别为 0.44、0.88、1.75、3.48 a; 4 个震级档的均方差分别为 1.20、1.21、1.05、0.464 a, 且 4 个震级档中分别有 75.8%、63.2%、63.6%、50.0% 的地震发生在其平均复发间隔的时间范围内.

2) 吉林地区发生 $M \geq 4.0$ 地震的间隔时间不足 1.0 a (最小间隔时间为 2.0 a), 因此该地震级别目前不在预警范围内; 发生 $M \geq 4.5$ 和 $M \geq 5.0$ 地震的间隔时间均超过 3.0 a (不足 3.5 a), 分别处于 C 级黄色预警 ($M \geq 4.5$) 和 D 级蓝色预警 ($M \geq 5.0$) 级别; 发生 $M \geq 5.5$ 地震的间隔时间超过 4.3 a (不足 4.5 a), 处于 C 级黄色预警级别.

3) 计算显示, 吉林地区有 63.6% 的 (在平均复发间隔时间内发生地震的概率均值) 地震活动发生在其平均复发间隔的时间范围内, 这表明本文所确立的 4 级预警指标无法适用于全部的地震活动. 另外, 由于影响地震发生的因素较为复杂, 因此本文的预测结果还有待实际验证.

参考文献:

- [1] 魏美璇. 地震灾害预评估软件应用的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [2] 李晴晴, 吕晗, 郑国栋, 等. VPN 技术在吉林九台非天然地震监测中的应用[J]. 防灾减灾学报, 2022, 38(1): 74-80.
- [3] 李梦莹, 张志宏, 黄明威, 等. 2017 年 7 月 23 日吉林松原 Ms4.9 地震热红外异常研究[J]. 地震地磁观测与研究, 2021, 42(S1): 148-150.
- [4] 张志宏, 郭安宁, 李梦莹, 等. 2018 年吉林松原 Ms5.7 地震地磁异常分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(29): 12406-12414.
- [5] 陈丽丽, 邱剑锋, 张恩立. 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, 2019, 35(3): 40-45.
- [6] MADAN D K, KUMARI A, SINGH P. Weibull's distribution to predict the next seismic event[J]. Journal of Statistics and Management Systems, 2019, 22(6): 1199-1206.
- [7] 钱晓东, 彭关灵, 贺素歌. 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, 2020, 43(1): 45-56.
- [8] 李俏, 逯绍锋. 辽宁地区 5 级以上地震复发间隔及地震概率预测模型研究[J]. 防灾减灾学报, 2012, 28(2): 29-33.
- [9] JANG S H, OH K D, OH J H, et al. Prediction of magnitudes and recurrence intervals of the Korean earthquakes based on the Gutenberg-Richter magnitude-frequency relation [J]. Crisisonomy, 2017, 13(3): 83-92.
- [10] 郑确, 刘财, 田有, 等. 地震活动性中震级-频度关系研究进展与再认识[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(5): 1879-1889.
- [11] 陈宇坤, 刘芳, 袁盾, 等. 天津地区隐伏断裂地震危险性定量评价[J]. 地震地质, 2010, 32(1): 138-149.
- [12] 程佳. 川滇地区地震危险性预测模型[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2017.