

引用格式: 周汉杨, 杜建军, 张舒婷, 2023. 非线性混合模型的优越性及其在中国典型地震强活动区的应用 [J]. 地质力学学报, 29 (2): 264–275. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022038

Citation: ZHOU H Y, DU J J, ZHANG S T, et al., 2023. The advantage of the nonlinear mixed model and its application in typical seismically active areas in China [J]. Journal of Geomechanics, 29 (2): 264–275. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022038

非线性混合模型的优越性及其在中国典型地震强活动区的应用

周汉杨^{1,2,3}, 杜建军^{1,2,3}, 张舒婷⁴

ZHOU Hanyang^{1,2,3}, DU Jianjun^{1,2,3}, ZHANG Shuting⁴

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
2. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081;
3. 中国地质调查局新构造与地壳稳定性研究中心, 北京 100081;
4. 自然资源部油气资源战略研究中心, 北京 100037

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*
2. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety of Natural Resources, Beijing 100081, China;*
3. *Research Center of Neotectonism and Crustal Stability, China Geological Survey, Beijing 100081, China;*
4. *Oil and Gas Resources Strategic Research Center of the Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Beijing 100037, China*

The advantage of the nonlinear mixed model and its application in typical seismically active areas in China

Abstract: As an essential parameter in earthquake prediction and risk assessment research, the b -value has received extensive attention and discussion. In this study, we chose a nonlinear mixed model to fit the earthquake magnitude–frequency distribution to the China Earthquake Catalog database. The b -values calculated by this method were used to analyze and evaluate the seismic activity. This paper takes 27 seismic belts in China as the research area, collects earthquake data of magnitude 4.7 and above from 1920 to 2019 as a complete earthquake catalog, performs mixed model fitting and G–R model fitting for these 27 seismic belts, and compares the fitting effects. Taking Tibet as the test area, the earthquake catalog data from 1920 to 2019 were selected, and the nonlinear mixed model was applied to fitting the earthquake magnitude–frequency model in Tibet at 10-year intervals. Firstly, the earthquake data screened in the study area was classified and counted by magnitude and time; Secondly, the relevant variables in the nonlinear mixed model were calculated using the moment magnitude and seismic moment conversion formula. Finally, a nonlinear hybrid model was used to perform nonlinear regression analysis on the seismic data. The results show that: When low values of b occur, earthquakes occur around the corresponding periods. When b -values are low, earthquakes of large magnitude and low frequency occur. When b -values are relatively high, earthquakes of small magnitude and high frequency occur. Applying the nonlinear mixed model to the complete seismic data in China and neighboring regions enables a more comprehensive analysis of the data and overcomes the limitations of the traditional modeling method in analyzing earthquakes of high magnitude. The b -value will be calculated by rational analysis, which enhances the analysis and evaluation of seismic catalog data.

Keywords: nonlinear mixed model; b -value; magnitude–frequency distribution of earthquakes

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20221644)

This research is financially supported by the Geological Survey Project of the China Geological Survey (Grant DD20221644).

第一作者: 周汉杨 (1996—), 男, 在读硕士, 从事地震数据研究。E-mail: z_hanyang@126.com

通讯作者: 杜建军 (1976—), 男, 教授级高工, 从事构造地质研究。E-mail: djwyf@sina.com

收稿日期: 2022-10-05; 修回日期: 2023-01-02; 责任编辑: 范二平

摘要: b 值作为地震预报与危险性评价研究中的重要参数,受到广泛关注与讨论。通过非线性混合模型对中国地震目录数据库开展地震震级-频数分布拟合,并利用该方法计算得到的 b 值对地震活动进行分析评价。文章首先以中国 26 个地震带为研究区,收集 1920—2019 年的 4.7 级以上地震数据为完整地震目录,分别通过非线性混合模型与传统 G-R 模型进行拟合,并对比其效果;进一步以西藏地区为具体试验区,选择 1920—2019 年的地震目录数据,以 10 年为间隔,将非线性混合模型应用于西藏地区地震震级-频数模型的拟合。其次,利用矩震级与地震矩转换公式计算出非线性混合模型中的相关变量。最后,利用非线性混合模型对地震数据进行非线性回归分析。结果显示:当 b 值出现低值时,对应时间段前后有地震发生, b 值较低时,发生的地震震级大、频次低; b 值相对较高时,地震震级小、频次高。将非线性混合模型应用到中国及邻区完整地震数据中,能够对数据进行更加全面的分析,克服了传统模型方法对高震级和地震数据分析中的局限性,合理分析计算 b 值,进而增强对地震目录数据的分析和评价。

关键词: 非线性混合模型; b 值; 地震震级-频率分布

中图分类号: P315 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2023) 02-0264-12

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022038

0 引言

地震活动伴随着巨大能量释放,常发生在较短时空范围内,严重威胁了生命和财产安全,对地震的预测与危险性评价研究工作具有重要的科学意义。研究者常通过地震震级-频率分布模型来研究地震活动的规律及特征,以期能够在对已有地震观测记录系统分析理解的基础上,对未来将要发生的地震活动进行有效的分析评价,进而科学布置预防措施,合理避险。

Gutenberg and Richter (1944) 首次提出了研究地震震级-频率分布间关系的定量分析模型——G-R 关系式。作为一种线性关系式,分析地震目录数据时,拟合曲线会出现“两头掉”的情况,目录中一低震级和高震数据难以通过 G-R 关系式进行有效度量(陈时军,2004)。由于在实际地震资料的分析中出现偏离,无法充分表现所有数据特征,尤其是高震阶段的偏差,影响了 G-R 模型对地震危险性分析结果的可信度,最终导致地震预测评价出现较大偏差。

国内外学者对 G-R 关系式相继开展了针对性研究,改进模型主要包括指数分布(Cosentino et al., 1977)、双曲线分布(Qin, 2006)、伽玛分布(Berrill and Davis, 1980; Main and Burton, 1984, 1986; Kagan, 1997)、韦布尔分布(王伟等, 1994)等。其中,指数函数使高震阶段的拟合值变小,从而在高震阶段使得累计频数偏低,很好地拟合震级-频率分布曲线在高值阶段的翻转,除

此之外,指数函数的系数越小(负值),曲线向下翻转就越严重;而负指数函数与之作用类似,系数为负值,在低震级阶段很好地拟合了曲线在低震级范围曲线向下的翻转。中震级阶段震级-频率分布服从幂律分布,所以运用幂律函数、指数函数的混合分布模型拟合震级-频率分布更精确(Cheng, 2008);对地震目录较完备的地区,震级-频率分布服从 Gamma 分布。针对以上问题,研究者又建立了包含高斯函数、指数函数、负指数函数和幂函数等 5 参数的混合模型(Cheng, 2012, 2014),并且把此混合模型应用到全球地震目录中,取得了优于传统 G-R 模型的模拟结果(孙红云, 2016)。

研究中国地震时空分布特征,是分析认识国内地震活动与构造关系、开展地震危险性评价的一项重要工作(孟秋等, 2021)。文章主要利用非线性混合模型对中国地震目录数据进行分析评价,并与传统 G-R 模型进行对比。结合西藏地区已发生地震事件,验证应用结果的准确性和合理性。研究成果以期能够对地震活动的危险性进行合理的评价,为地震预测相关工作提供有益的参考。

1 中国地震时间和空间分布

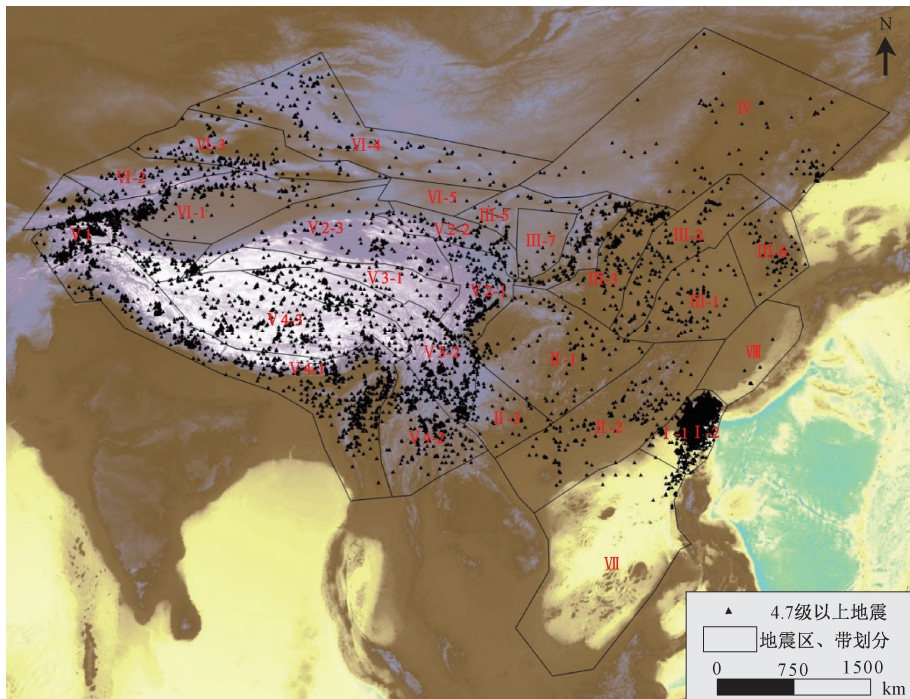
中国地震活动受复杂区域地质背景影响,其时空分布不均匀,在空间上呈条带状或连片分布;在时间上具有强弱和频次交相变化的特点。(Flinn and Engdahl, 1965; Flinn et al., 1974; Evernden, 1970; Chen et al., 1998; 陈时军, 2004)。

1.1 中国地震空间分布特征

中国所在的欧亚大陆由于受到太平洋板块、菲律宾海板块以及印度板块的挤压，地质构造环境复杂，活动断裂发育，地震活动频繁，是地震灾害破坏较为严重的国家。环太平洋和欧亚地震带作为世界上两个巨大地震活动带在中国及邻区都有分布。

中国地震活动十分广泛，在平面分布上，具有西多东少的特征（图 1；周本刚等，2013）。绝大多数强震主要分布在东经 107°以西的中国西部广大地区，而东部地区相对很少（张培震等，

2013）。中国地震活动的区域分布是不均匀的，不同地震区和地震带之间活动水平具有较大差异。根据收集地震目录资料显示，除浙江、贵州两省外，其他各省（自治区、直辖市）都发生过 6 级以上强震，其中 18 个省（自治区、直辖市）均发生过 7 级以上大震。受欧亚地震带影响，中国的地震活动主要分布在青藏高原、新疆及华北地区，而东北、华东、华南等地区分布较少；沿海地区受环太平洋地震带影响，地震活动主要分布在中国台湾地区（刘子璇，2020）。



I—台湾地震区（I-1—台湾西部地震带；I-2—台湾东部地震带）；II—华南地震区（II-1—长江中游地震带；II-2—华南沿海地震带；II-3—右江地震带）；III—华北地震区（III-1—长江下游—南黄海地震带；III-2—郑庐地震带；III-3—华北平原地震带；III-4—汾渭地震带；III-5—银川—河套地震带；III-6—朝鲜地震带；III-7—鄂尔多斯地震带）；IV—东北地震区（IV—东北地震带）；V—青藏高原地震区（V-1—西昆仑—帕米尔地震带；V2-1—龙门山地震带；V2-2—六盘山—祁连山地震带；V2-3—柴达木—阿尔金地震带；V3-1—巴颜喀拉山地震带；V3-2—鲜水河—滇东地震带；V4-1—喜马拉雅地震带；V4-2—滇西南地震带；V4-3—藏中地震带）；VI—天山—阿尔泰山地震区（VI-1—南天山地震带；VI-2—中天山地震带；VI-3—北天山地震带；VI-4—阿尔泰山地震带；VI-5—塔里木—阿拉善地震带）；VII—南海地震区；VIII—东海地震区

图 1 中国地震区、带划分图和 1920—2019 年 4.7 级以上地震分布位置（《中国地震动参数区划图》（GB 18306-2015））

Fig.1 Map of China's seismic zones and belts, and the location of earthquakes of magnitude 4.7 or above from 1920 to 2019 (Zoning Map of Earthquake Parameters in China (GB 18306-2015))

I-Taiwan seismic zone (I-1-western Taiwan seismic zone; I-2-eastern Taiwan seismic zone); II-South China seismic zone (II-1-middle Yangtze River seismic zone; II-2-South China Coastal Seismic Zone; II-3-Youjiang seismic zone); III-North China seismic zone (III-1-the lower reaches of the Yangtze River-the South Yellow Sea seismic zone; III-2-the Tanlu seismic zone; III-3-the North China Plain seismic zone; III-4-the Fenwei seismic zone; III-5-the Yinchuan-Hetao seismic zone; III-6-the Korean seismic zone; III-7-the Ordos seismic zone); IV-Northeast seismic zone (IV-Northeast Seismic Zone); V-Qinghai-Tibet Plateau seismic zone (V-1-West Kunlun-Pamir seismic zone; V2-1-Longmen Mountain seismic zone; V2-2-Liupan Mountain-Qilian Mountain seismic zone; V2-3-Qaidam-Altun seismic zone; V3-1-Bayan Kara Mountain seismic zone; V3-2-Xianshui River-eastern Yunnan seismic zone; V4-1-Himalayan seismic zone; V4-2-southwestern Yunnan seismic zone; V4-3-central Tibet seismic zone); VI-Tianshan-Altai seismic zone (VI-1-southern Tianshan seismic zone; VI-2-middle Tianshan seismic zone; VI-3-northern Tianshan seismic zone; VI-4-Altai seismic zone; VI-5-Tarim-Alashan seismic zone); VII-South China Sea seismic zone; VIII-East China Sea seismic zone

在震源深度上,中国地震大多数都属于浅源地震。但在不同地震区划带,震源深度存在明显差异(蒋锋云等,2021)。中国东部的华北和华南地区的震源深度一般在30 km之内;青藏高原及其周边的西部地区在50~60 km之内;而中源地震分布地区较小,中国新疆西部的帕米尔地区震源深度达100~160 km,台湾附近的震源深度最深可达120 km;深源地震最少,只发生在中国东北地区的吉林和黑龙江东部的边境地带。

依据《中国地震动参数区划图》(GB 18306-2015),中国的地震活动区被分为8个大的地震区和27个地震带。此次研究正是基于这种分区方式,探讨不同区带的 b 值变化特征。

1.2 中国地震时间分布特征

中国地震活动十分频繁,不仅地震频次高,而且地震强度极大。中国地震分布不但在区域上存在明显的西强东弱特征,在时间尺度上也是不均匀分布的。依据历史地震统计,平均每年发生5级以上地震30余次,6级以上强震6次,7级以上大震1次。

由于1920年以前的地震数据记录不够完备,研究采用了国家地震科学数据中心(<https://data.earthquake.cn/>)的中国地震台网正式目录和中国历史地震目录(马瑾,2015)中的地震目录数据。根据中国4.7级以上地震时间分布统计数据(1920—2019年)可以发现,强震发生在不同时间,频次也会出现差异(图2)。地震事件在时间尺度上的不连续、不均匀分布,体现出高、低潮交替的规律(梅世蓉,1960)。地震频次在时间上的变化规律揭示了地震的孕震过程,地震学家也把单次强震在时间尺度上的孕震周期划分为4个阶段:①应力积累阶段,随构造应变增强积累;②孕震阶段,常出现微、小地震活动;③能量释放阶段,即主地震活动阶段,发生频次和释放能量最多;④余量释放阶段,以余震等形式释放。根据地震活动的周期性特征,实际研究中也常通过 b 值所表现出的规律性变化特征来预测评价地震危险性和活动趋势(孟昭彤等,2021)。

2 传统的G-R模型和非线性混合模型算法

2.1 传统的G-R模型

传统地震震级-频数关系式为 $\log N = a - bM$ (G-R)

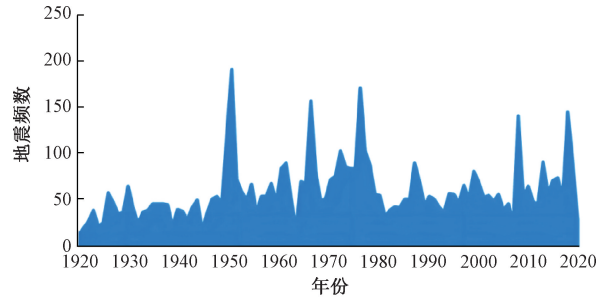


图2 中国1920—2019年4.7级以上地震时间分布(地震数据源自于国家地震科学数据中心; <https://data.earthquake.cn/>)

Fig. 2 Frequency of earthquakes over magnitude 4.7 from 1920 to 2019 in China

(Gutenberg and Richter, 1944, 1954, 1956a, 1956b),其中, M 为地震震级, N 为震级大于 M 的累计地震发生次数, a 和 b 为参数。自提出后,被广泛应用于全球各尺度地震带或构造单元的地震预测与危险性评价研究中。随着研究的深入,地震作为一种具有非线性特征的奇异性地质事件,在处理震级较高或震级较低的两部分数据时,采用传统线性模型将出现拟合效果不显著的问题(Cheng et al., 1994; Cheng, 1999, 2008, 2012, 2014; 孙红云, 2016)。例如:作为一种线性关系式,分析地震目录数据时,拟合曲线会出现“两头掉”的情况(图3),目录中—低震级和高震数据难以通过G-R关系式进行有效度量。由于在实际地震资料的分析中出现偏离,无法充分表现所有数据特征,尤其是高震阶段的偏差,影响了G-R模型对地震危险性分析结果的可信度,最终导致地震预测评价出现较大偏差。

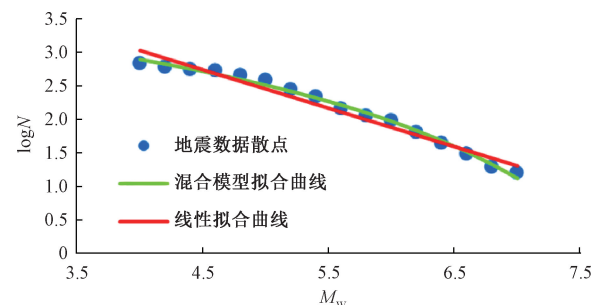


图3 中国四川地区4级以上地震G-R关系式与非线性混合模型拟合曲线对比图(1920—2019年)

Fig. 3 Comparison of the G-R relationship and the combined nonlinear mixed model for earthquakes over magnitude 4 in Sichuan, China

2.2 非线性混合模型

针对传统G-R模型表现出的问题, Lomnitz-

Adler and Lomnitz (1979) 根据地震矩与断层的关系, 推导了地震震级-频率的双重指数分布模型。Main and Burton (1984) 从信息学和统计物理学原理出发推导了地震震级-频数的伽玛分布, 通过数值模拟和迭代可以得到地震震级-频率分布模型。Cheng (2012) 提出了由高斯函数、指数函数、负指数函数和幂率函数组成的 5 参数混合模型——非线性混合模型, 当系数取不同值时, 具有不同的形式, 可以适用于多种复杂系统 (Cheng, 2014; 孙红云, 2016)。

非线性混合模型其推算步骤如下:

对于一般的地震区域, 若大于地震矩 M_0 的累计地震频数与地震矩呈线性关系, 则有:

$$\frac{dN(M_0)}{dM_0} = -\lambda N(M_0) \quad (1)$$

其中 λ 为常数, M_0 为地震矩, $N(M_0)$ 为地震矩大于等于 M_0 的地震数量, 即累计地震频数。

然而在大部分地震活动中, 地震矩累计地震频数与地震矩呈非线性关系 (孙红云, 2016), 累计频数的衰减速度随地震矩变化, 具有非线性函数关系:

$$\frac{dN(M_0)}{dM_0} = -\frac{1}{\lambda(M_0)} N(M_0) \quad (2)$$

对 $\lambda(M_0)$ 进行泰勒展开, 得到公式 (3):

$$\frac{1}{\lambda(M_0)} = \lambda_{-1} M_0 + \lambda_0 + \lambda_1 \frac{1}{M_0} + \lambda_2 \frac{1}{M_0^2} + o\left(\frac{1}{M_0^2}\right) \quad (3)$$

当地震矩 M_0 值较大时, 剩余项的值接近于 0, 将公式 (3) 代入公式 (2) 中, 可得公式 (4) 和公式 (5):

$$\frac{dN(M_0)}{dM_0} = -\left(\lambda_{-1} M_0 + \lambda_0 + \lambda_1 \frac{1}{M_0} + \lambda_2 \frac{1}{M_0^2}\right) N(M_0) \quad (4)$$

$$\log N(M_0) = a_0 + a_1 M_0^{-1} - a_2 M_0^2 - a_3 M_0 - a_4 \log M_0 \quad (5)$$

地震矩 M_0 与矩震级 M_w 的转换关系式为:

$$M_w = \frac{2}{3}(\log M_0 - 9.1) \quad (6)$$

最终得到:

$$\log N(M_0) = a - b M_w + a_1 M_0^{-1} - a_2 M_0^2 - a_3 M_0 \quad (7)$$

其中 a 、 b 、 a_1 、 a_2 、 a_3 为参数。

3 非线性混合模型应用

3.1 地震目录数据分析

中国地震局根据地理位置、地质构造以及地震属性等, 将地震带划分为 27 个区域 (图 1)。收集中国地震台网中每个区域中公元 1920 年到 2019 年间发生过的 4.7 级以上地震 (完整地震目录需要计算出临界震级, 文中通过最大曲率法求得中国及邻区该时间范围内临界震级处于 4.5~4.8 级之间, 4.7 级被认为是会对人类及建筑物造成一定损害的震级, 故文中最终完整地震目录临界震级被定为 4.7 级, 建立 26 个区域的独立地震目录。以 0.2 为间隔, 依次统计各研究区 4.7 到 7.3 级以上的地震频数, 分别计算对应震级的相关参数 M_w 、 M_0 、 M_0^{-1} 、 M_0^2 (表 1)。

表 1 相关参数 M_w 、 M_0 、 M_0^{-1} 、 M_0^2 对应表

| M_w | M_0 | M_0^{-1} | M_0^2 |
|-------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 4.7 | 1.32396×e ¹² | 7.55308×e ⁻¹³ | 1.75288×e ²⁴ |
| 4.9 | 1.58884×e ¹² | 6.29389×e ⁻¹³ | 2.52442×e ²⁴ |
| 5.1 | 1.90050×e ¹² | 5.26178×e ⁻¹³ | 3.61189×e ²⁴ |
| 5.3 | 2.26613×e ¹² | 4.41281×e ⁻¹³ | 5.13534×e ²⁴ |
| 5.5 | 2.69389×e ¹² | 3.71210×e ⁻¹³ | 7.25706×e ²⁴ |
| 5.7 | 3.19301×e ¹² | 3.13184×e ⁻¹³ | 1.01953×e ²⁵ |
| 5.9 | 3.77386×e ¹² | 2.64981×e ⁻¹³ | 1.42420×e ²⁵ |
| 6.1 | 4.44814×e ¹² | 2.24813×e ⁻¹³ | 1.97859×e ²⁵ |
| 6.3 | 5.22897×e ¹² | 1.91242×e ⁻¹³ | 2.73421×e ²⁵ |
| 6.5 | 6.13107×e ¹² | 1.63104×e ⁻¹³ | 3.75900×e ²⁵ |
| 6.7 | 7.17089×e ¹² | 1.39453×e ⁻¹³ | 5.14217×e ²⁵ |
| 6.9 | 8.36683×e ¹² | 1.19520×e ⁻¹³ | 7.00038×e ²⁵ |
| 7.1 | 9.76245×e ¹² | 1.11577×e ⁻¹³ | 8.03255×e ²⁵ |
| 7.3 | 9.79301×e ¹² | 1.02114×e ⁻¹³ | 9.59030×e ²⁵ |

将各研究区域震级、地震矩等数据代入非线性混合模型, 得到参数 a 、 b 、 a_1 、 a_2 、 a_3 (表 2)。计算并汇总收集各区域相关参数后, 分别建立非线性混合模型, 绘制混合模型与传统线性模型拟合曲线的对比图 (图 4—6), 对比其拟合效果。各研究区非线性混合模型的拟合优度 (R^2) 均高于线性传统模型, 拟合效果较好 (图 4—6, 表 3), 表明得到的 b 值准确更能反映目录数据的规律, 具有参考价值。

3.2 非线性混合模型应用案例

从中国地震高发地区中, 选取西藏地区为例, 将 1920—2019 年期间的地震目录数据以 10 年为间

表 2 各区域参数值表

Table 2 Table of parameter value for each area

| 区域 | a | b | a_1 | a_2 | a_3 |
|-------|--------|-------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| I-1 | 10.446 | 1.561 | -1.26×10^{12} | 1.98×10^{-26} | -3.45×10^{-13} |
| I-2 | 10.484 | 1.349 | -1.29×10^{12} | 1.98×10^{-27} | -8.79×10^{-14} |
| II-1 | 5.319 | 0.569 | — | -4.13×10^{-26} | 4.95×10^{-13} |
| II-2 | 4.874 | 0.582 | — | 1.73×10^{-27} | 6.03×10^{-15} |
| II-3 | 10.776 | 2.002 | — | — | -3.48×10^{-13} |
| III-1 | 5.473 | 0.967 | 5.45×10^{13} | -6.84×10^{-27} | 1.82×10^{-13} |
| III-2 | 8.840 | 1.300 | -1.07×10^{12} | -2.58×10^{-27} | -1.06×10^{-13} |
| III-3 | 6.856 | 0.988 | -9.46×10^{10} | 9.96×10^{-27} | -1.82×10^{-13} |
| III-4 | 5.423 | 0.797 | 3.13×10^{11} | 1.87×10^{-26} | -2.77×10^{-13} |
| III-5 | 5.533 | 0.666 | -8.22×10^{11} | -5.84×10^{-27} | 1.22×10^{-13} |
| III-6 | 3.843 | 0.341 | — | — | 1.96×10^{-13} |
| III-7 | 12.194 | 2.643 | — | — | -1.12×10^{-12} |
| IV | 11.368 | 1.839 | -1.72×10^{12} | 1.58×10^{-26} | -4.18×10^{-13} |
| V-1 | 11.863 | 1.769 | -1.35×10^{12} | 4.21×10^{-27} | -2.07×10^{-13} |
| V2-1 | 9.317 | 1.401 | -9.47×10^{11} | 1.20×10^{-26} | -2.89×10^{-13} |
| V2-2 | 7.617 | 1.128 | -6.00×10^{11} | 5.58×10^{-27} | -1.98×10^{-13} |
| V2-3 | 12.348 | 2.125 | -9.94×10^{11} | 2.67×10^{-26} | -5.89×10^{-13} |
| V3-1 | 6.950 | 0.858 | -9.84×10^{11} | -1.83×10^{-26} | 1.92×10^{-13} |
| V3-2 | 10.604 | 1.532 | -1.22×10^{12} | 9.47×10^{-27} | -2.75×10^{-13} |
| V4-1 | 7.600 | 0.876 | -5.68×10^{11} | -6.57×10^{-27} | 4.51×10^{-14} |
| V4-2 | 2.570 | 0.103 | 7.60×10^{11} | 4.95×10^{-27} | 6.31×10^{-14} |
| V4-3 | 5.402 | 0.714 | 4.59×10^{11} | 2.21×10^{-26} | -2.30×10^{-13} |
| VI-1 | 4.853 | 0.616 | 5.98×10^{11} | 2.71×10^{-26} | -2.21×10^{-13} |
| VI-2 | 7.534 | 1.059 | -9.93×10^{11} | -1.38×10^{-27} | -8.67×10^{-14} |
| VI-3 | 6.141 | 0.858 | -1.40×10^{11} | -3.72×10^{-27} | -1.60×10^{-14} |
| VI-4 | 6.630 | 0.859 | -6.29×10^{11} | -4.38×10^{-27} | -1.93×10^{-14} |

注: I-1—台湾西部地震带; I-2—台湾东部地震带; II-1—长江中游地震带; II-2—华南沿海地震带; II-3—右江地震带; III-1—长江下游-南黄海地震带; III-2—鄱庐地震带; III-3—华北平原地震带; III-4—汾渭地震带; III-5—银川-河套地震带; III-6—朝鲜地震带; III-7—鄂尔多斯地震带; IV—东北地震带; V-1—西昆仑-帕米尔地震带; V2-1—龙门山地震带; V2-2—六盘山-祁连山地震带; V2-3—柴达木-阿尔金地震带; V3-1—巴颜喀拉山地震带; V3-2—鲜水河-滇东地震带; V4-1—喜马拉雅地震带; V4-2—滇西南地震带; V4-3—藏中地震带; VI-1—南天山地震带; VI-2—中天山地震带; VI-3—北天山地震带; VI-4—阿尔泰山地震带; 由于公元 1920—2019 年 VI-5 塔里木-阿拉善地震带仅有 1 条地震数据, 故文中在 27 个地震带中共建立 26 个完整地震目录

隔划分为 10 组, 按照上文所述步骤分别计算出其传统的 G-R 模型 b 值和非线性混合模型 b 值 (表 4)。根据计算得到的数据 b 值, 绘制该区两个不同方法得到的 b 值-时间曲线图。结果显示, 非线性混合模型 b 值明显小于传统的 G-R 模型 b 值, 在数值上这种偏小具体意义还不清楚, 但是 b 值随时间变化强弱交替现象都呈现出一定的规律性特征, 并且非线性混合模型 b 值变化特征明显强于传统的 G-R 模型 b 值变化。

b 值的低值点分别位于 1940—1949 年、1980—1989 年和 2000—2009 年 3 个时间段 (图 7)。与区内实际发生的地震事件对比, 发现西藏朗县 7.7 级 (1947)、西藏察隅 8.6 级 (1950)、西藏当雄 8.0 级 (1951)、西藏日土 6.2 级 (1987)、西藏改则 6.9 级 (2008) 5 起西藏特大地震发生时间均在 b 值极低值出现之后。这个阶段非

线性混合模型 b 值变化特征和传统的 G-R 模型 b 值的变化特征基本相似, 这个可能是由于 1949 年以前缺乏对区域小级别地震资料的记录, 二者表现的规律都不详细所致。1949 年之后, 随着中国地震台网的建设, 使得地震数据有了更加详细、更加精确的记录。在第 3 个 b 值低值对应的时间区间内发生了一百余次 4~6 级中、小震级地震。这个阶段的非线性混合模型 b 值变化特征明显强于传统的 G-R 模型 b 值的变化特征, 显示出较强的规律性。在线性模型拟合曲线中, 西藏日土 6.2 级地震 (1987) 和西藏改则 6.9 级地震 (2008) 点位于 b 值极低值右侧, 且均未到达下一个极高值。

西藏朗县 7.7 级 (1947)、西藏察隅 8.6 级 (1950)、西藏当雄 8.0 级 (1951) 3 次大于 7 级的大震都发生在 b 值较低的阶段, 这时候的地震活动表现为地震震级较高, 但频次较低。在第 3 个 b 值

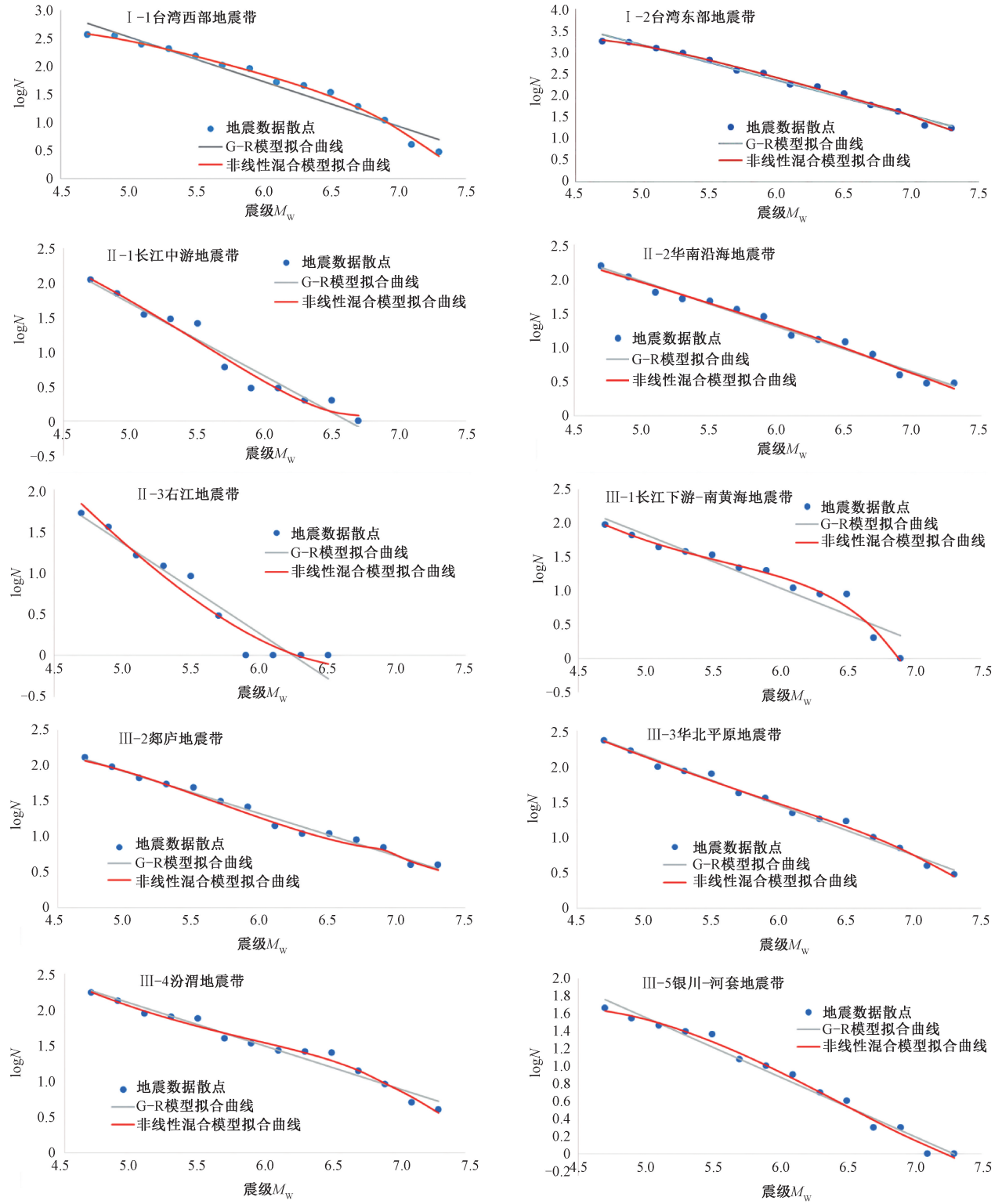


图 4 中国地震带非线性混合模型与 G-R 模型拟合曲线对比图 (一)

Fig. 4 Comparison chart of the fitting curves between the nonlinear mixed model and the G-R model for each seismic zone in China (Part I)

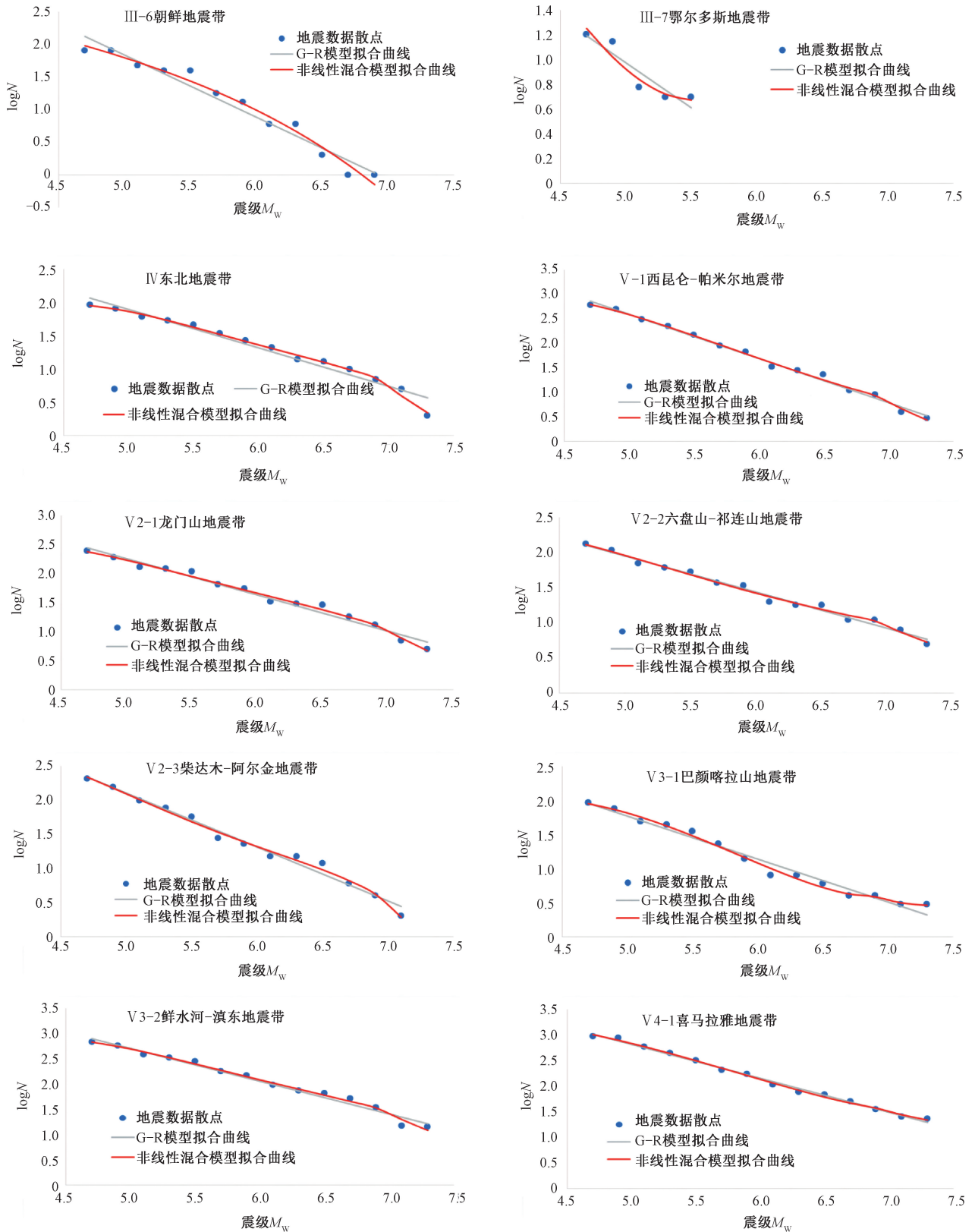


图 5 中国各地震带非线性混合模型与 G-R 模型拟合曲线对比图 (二)

Fig. 5 Comparison chart of the fitting curves between the nonlinear mixed model and the G-R model for each seismic zones in China (Part II)

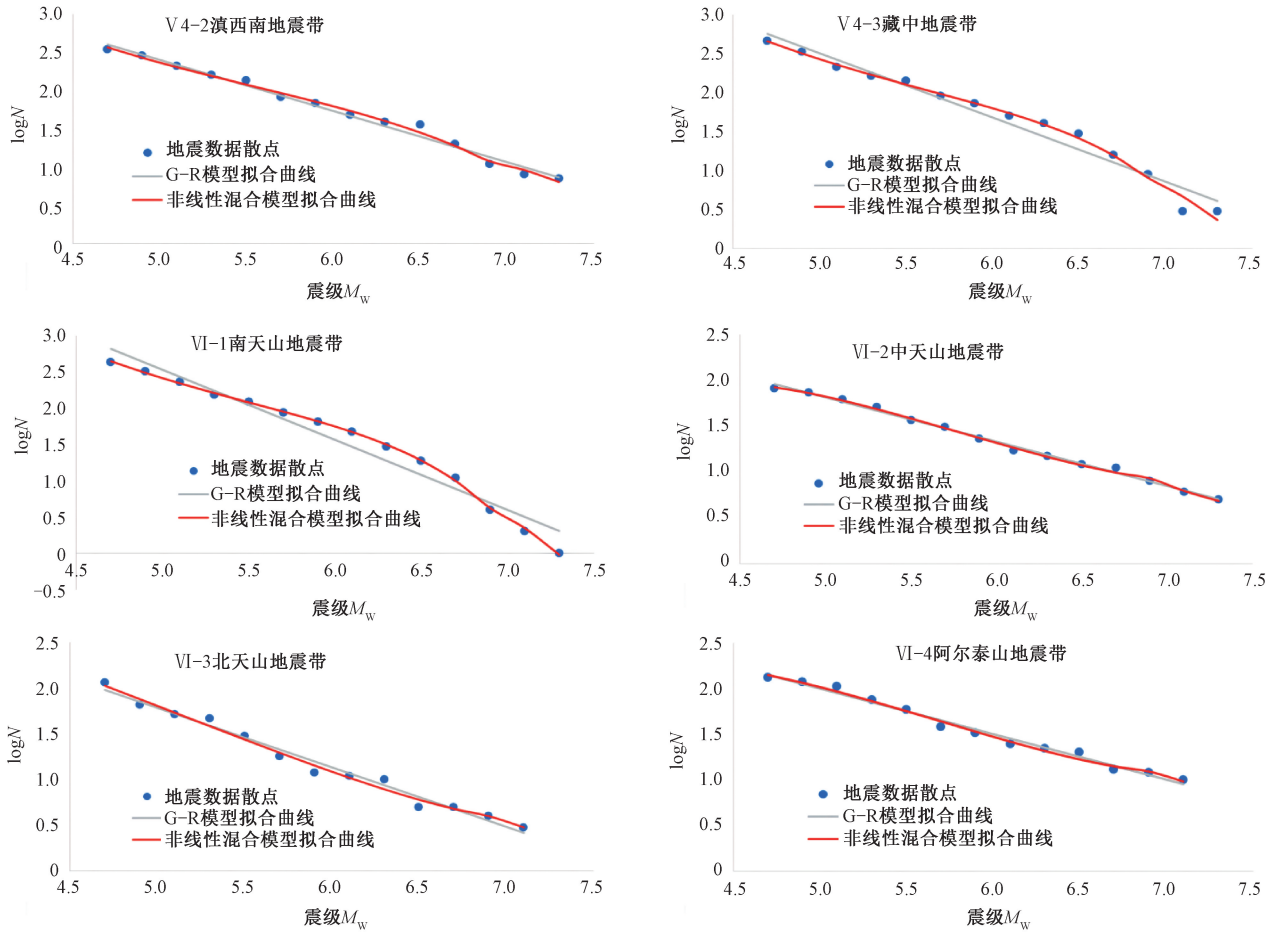


图6 中国各地震带非线性混合模型与G-R模型拟合曲线对比图(三)

Fig. 6 Comparison chart of the fitting curves between the nonlinear mixed model and the G-R model for each seismic zone in China (Part III)

表3 各研究区非线性混合模型拟合度与G-R模型拟合度对比表

Table 3 Comparison table of the fitting degree of the nonlinear mixed model and the G-R model in each study area

| 区域 | 非线性拟合度 R^2 | G-R拟合度 R^2 | 区域 | 非线性拟合度 R^2 | G-R拟合度 R^2 | 区域 | 非线性拟合度 R^2 | G-R拟合度 R^2 |
|-------|--------------|--------------|-------|--------------|--------------|------|--------------|--------------|
| I-1 | 0.994 | 0.955 | III-5 | 0.990 | 0.980 | V3-2 | 0.992 | 0.983 |
| I-2 | 0.995 | 0.986 | III-6 | 0.977 | 0.957 | V4-1 | 0.997 | 0.995 |
| II-1 | 0.965 | 0.955 | III-7 | 0.965 | 0.943 | V4-2 | 0.993 | 0.986 |
| II-2 | 0.986 | 0.984 | IV | 0.994 | 0.963 | V4-3 | 0.990 | 0.963 |
| II-3 | 0.954 | 0.931 | V-1 | 0.996 | 0.993 | VI-1 | 0.999 | 0.957 |
| III-1 | 0.980 | 0.912 | V2-1 | 0.991 | 0.979 | VI-2 | 0.997 | 0.995 |
| III-2 | 0.989 | 0.986 | V2-2 | 0.989 | 0.987 | VI-3 | 0.987 | 0.982 |
| III-3 | 0.993 | 0.989 | V2-3 | 0.992 | 0.984 | VI-4 | 0.991 | 0.987 |
| III-4 | 0.986 | 0.967 | V3-1 | 0.993 | 0.976 | | | |

注: I-1—台湾西部地震带; I-2—台湾东部地震带; II-1—长江中游地震带; II-2—华南沿海地震带; II-3—右江地震带; III-1—长江下游-南黄海地震带; III-2—鄱庐地震带; III-3—华北平原地震带; III-4—汾渭地震带; III-5—银川-河套地震带; III-6—朝鲜地震带; III-7—鄂尔多斯地震带; IV—东北地震带; V-1—西昆仑-帕米尔地震带; V2-1—龙门山地震带; V2-2—六盘山-祁连山地震带; V2-3—柴达木-阿尔金地震带; V3-1—巴颜喀拉山地震带; V3-2—鲜水河-滇东地震带; V4-1—喜马拉雅地震带; V4-2—滇西南地震带; V4-3—藏中地震带; VI-1—南天山地震带; VI-2—中天山地震带; VI-3—北天山地震带; VI-4—阿尔泰山地震带

低值对应的的时间区间内发生了百余次4~6级中、小震级地震,这时候的大震活动震级相对较小,

未达到7级,该区间内发生地震的震级较低,但频次较高。因此可以根据b值曲线表现出的情况总结

表 4 西藏地区 1920—2019 年 10 年间隔 G-R 模型和混合模型 b 值对比表

Table 4 Comparison table of the b -values of the G-R model and the nonlinear mixed model for 10-year intervals from 1920 to 2019 in Tibet

| 组别 | 时间/年 | b 值 (传统 G-R 模型) | b 值 (非线性混合模型) |
|----|-----------|----------------------|--------------------|
| 1 | 1920—1929 | 0.598 | 0.228 |
| 2 | 1930—1939 | 0.576 | 0.166 |
| 3 | 1940—1949 | 0.646 | 0.312 |
| 4 | 1950—1959 | 0.870 | 0.565 |
| 5 | 1960—1969 | 0.951 | 1.008 |
| 6 | 1970—1979 | 0.861 | 0.807 |
| 7 | 1980—1989 | 0.690 | 0.312 |
| 8 | 1990—1999 | 0.691 | 0.955 |
| 9 | 2000—2009 | 0.681 | 0.742 |
| 10 | 2010—2019 | 0.746 | 1.201 |

出以下规律: 在一定的时间区间内, 当 b 值处于相对较低值, 则该时间段后一段时间内可能会有较高震级地震出现; b 值在曲线上低值位置越低, 一般发生的地震震级可能越高, 频次相对越低; 相反地, b 值在曲线上低值位置相对偏高, 则该区间内发生地震震级越低, 频次越高; 并且非线性混合模型曲线对于 b 值相对低值与相对高值的趋势比线性模型曲线表现出的趋势更加明显。

4 结论

文章将非线性混合模型和线性模型分别应用于中国及邻区 26 个地震带的地震目录数据中, 并选择地震活动比较频繁的位于青藏高原的西藏地

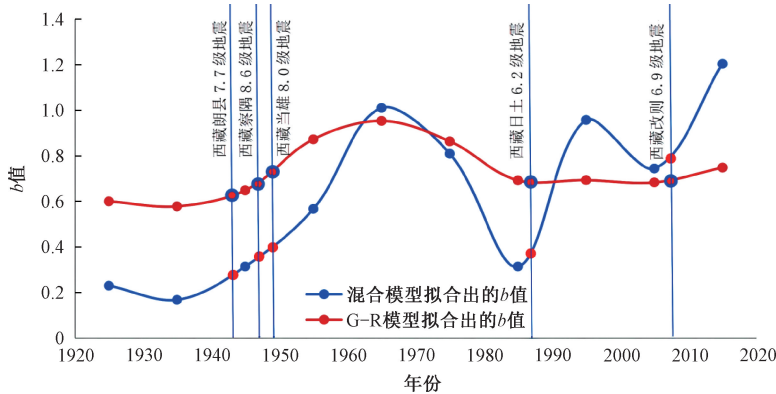


图 7 西藏地区间隔 10 年地震数据 b 值变化图

Fig. 7 Trend map of the b -values of the seismic data in Tibet with 10-year intervals

区为例, 通过非线性混合模型绘制了该地区 100 年间的 b 值变化趋势图, 与实际地震情况对比, 结合 b 值的指示意义, 总结得出以下认识:

- (1) b 值极低值数值较低时, 该时间点之后会发生少频次大震级地震;
- (2) b 值极低值数值较高时, 则该时间点前后会发生高频次中小震级地震;
- (3) 相较传统线性模型, 非线性混合模型是 5 参数混合模型, 对数据具有更强的适用性。

总之, 混合模型对于地震目录数据的拟合优度更高, 计算出的 b 值更加合理。该方法可以在今后对 b 值的计算、统计过程中对今后的地震活动起到更精确的预测作用。

References

BERRILL J B, DAVIS R O, 1980. Maximum entropy and the magnitude distribution [J]. Bulletin of the Seismological Society of America,

70 (5): 1823-1831.
 CHEN S J, WANG Z C, TAO J Q, 1998. Nonlinear magnitude frequency relation and two types of seismicity systems [J]. Acta Seismologica Sinica, 11 (2): 207-218.
 CHEN S J, 2004. Clustering characteristics of spatial-temporal distribution of earthquakes in different tectonic regions [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration. (in Chinese with English abstract)
 CHENG Q M, AGTERBERG F P, BALLANTYNE S B, 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods [J]. Journal of Geochemical Exploration, 51 (2): 109-130.
 CHENG Q M, 1999. Multifractality and spatial statistics [J]. Computers & Geosciences, 25 (9): 949-961.
 CHENG Q M, 2008. A combined power-law and exponential model for streamflow recessions [J]. Journal of Hydrology, 352 (1-2): 157-167.
 CHENG Q M, 2012. Singularity theory and methods for mapping

- geochemical anomalies caused by buried sources and for predicting undiscovered mineral deposits in covered areas [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 122: 55-70.
- CHENG Q M, 2014. Vertical distribution of elements in regolith over mineral deposits and implications for mapping geochemical weak anomalies in covered areas [J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 14 (3): 277-289.
- COSENTINO P, FICARRA V, LUZIO D, 1977. Truncated exponential frequency-magnitude relationship in earthquake statistics [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 67 (6): 1615-1623.
- EVERNDEN J F, 1970. Study of regional seismicity and associated problems [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 60 (2): 393-446.
- FLINN E A, ENGDAHL E R, 1965. A proposed basis for geographical and seismic regionalization [J]. *Reviews of Geophysics*, 3 (1): 123-149.
- FLINN E A, ENGDAHL E R, HILL A R, 1974. Seismic and geographical regionalization [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64 (3-2): 771-992.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration, 2016 Seismic Parameter Zoning Map of China: GB 18306-2015 [S] Beijing: China Standards Publishing House. (in Chinese)
- GUTENBERG B, RICHTER C F, 1944. Frequency of earthquakes in California [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34 (4): 185-188.
- GUTENBERG B, RICHTER C F, 1954. Seismicity of the Earth and Related Phenomena [M]. 2nd ed. Princeton: Princeton University Press.
- GUTENBERG B, RICHTER C F, 1956a. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration: (second paper) [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 46 (2): 105-145.
- GUTENBERG B, RICHTER C F, 1956b. Magnitude and energy of earthquakes [J]. *Annals of Geophysics*, 9 (1): 1-15.
- JIANG F Y, JI L Y, ZHAO Q, 2021. Numerical simulation of the present seismic risk of the Haiyuan-Liupanshan fault zone [J]. *Journal of Geomechanics*, 2021, 27 (2): 230-240. (in Chinese with English abstract)
- KAGAN Y Y, 1997. Seismic moment-frequency relation for shallow earthquakes: regional comparison [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102 (B2): 2835-2852.
- LIU Z X, 2020. Study on the pre-earthquake anomaly characteristics of *b*-value in the north-south seismic belt [D]. Lanzhou: China Earthquake Administration Lanzhou Institute of Seismology. (in Chinese with English abstract)
- LOMNITZ-ADLER J, LOMNITZ C, 1979. A modified form of the Gutenberg-Richter magnitude-frequency relation [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 69 (4): 1209-1214.
- MA J, 2015. Seismic catalogue of east China (2300 BC-2500 AD) [Z]. A Big Earth Data Platform for Three Poles. (in Chinese)
- MAIN I G, BURTON P W, 1984. Information theory and the earthquake frequency-magnitude distribution [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74 (4): 1409-1426.
- MAIN I G, BURTON P W, 1986. Long-term earthquake recurrence constrained by tectonic seismic moment release rates [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 76 (1): 297-304.
- MEI S R, 1960. Seismicity in China [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 9 (1): 1-19. (in Chinese)
- MENG Q, GAO K, CHEN Q Z, et al., 2021. Seismogenic, coseismic and postseismic deformation and stress evolution of the 2008 Wenchuan earthquake: numerical simulation analysis [J]. *Journal of Geomechanics*, 27 (4): 614-627. (in Chinese with English abstract)
- MENG Z T, LIU J W, XIE Z J, et al., 2021. Analysis of the correlation between the temporal-spatial distribution of *b*-value and seismic hazard: a review [J]. *Progress in Geophysics*, 36 (1): 30-38. (in Chinese with English abstract)
- QIN C Y, 2006. Nonlinear analysis of the frequency-magnitude relationship in the western Circum-Pacific region [J]. ZHANG R F, Li J S, trans. *Translated World Seismology* (4): 27-37. (in Chinese)
- SUN H Y, 2016. A combined non-linear model for earthquake magnitude-frequency distribution characterization [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- WANG W, DAI W L, HUANG B S, 1994. Statistical distribution of earthquake magnitude and the anomalous change of earthquake magnitude factor M_f value before mid-strong earthquakes occurred in North China [J]. *Earthquake Research in China*, 10 (S): 95-110. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG P Z, DENG Q D, ZHANG Z Q, et al., 2013. Active faults, earthquake hazards and associated geodynamic processes in continental China [J]. *Science China Earth Sciences*, 43 (10): 1607-1620. (in Chinese)
- ZHOU B G, CHEN G X, GAO Z W, et al., 2013. The technical highlights in identifying the potential seismic sources for the update of national seismic zoning map of China [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 8 (2): 113-124. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈时军, 2004. 不同构造环境的地震活动丛集特征研究 [D]. 北京: 中国地震局地质研究所.

- 蒋锋云, 季灵运, 赵强, 2021. 海原-六盘山断裂带现今地震危险性的数值模拟分析 [J]. 地质力学学报, 2021, 27 (2): 230-240.
- 刘子璇, 2020. 南北地震带 b 值震前异常特征研究 [D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所.
- 马瑾, 2015. 中国地震目录 (公元前 2300 年-2005 年) [Z]. 时空三极环境大数据平台.
- 梅世蓉, 1960. 中国的地震活动性 [J]. 地球物理学报, 9 (1): 1-19.
- 孟秋, 高宽, 陈启志, 等, 2021. 2008 年汶川大地震孕震、同震及震后变形和应力演化全过程的数值模拟 [J]. 地质力学学报, 27 (4): 614-627.
- 孟昭彤, 刘静伟, 谢卓娟, 等, 2021. b 值的时空分布特征与地震危险性的关联分析 [J]. 地球物理学进展, 36 (1): 30-38.
- QIN C Y, 2006. 环西太平洋地区的频度-震级关系非线性分析 [J]. 张瑞芳, 李俊拴, 译. 世界地震译丛 (4): 27-37.
- 孙红云, 2016. 非线性混合模型在地震震级-频率分布研究中的应用 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京).
- 王伟, 戴维乐, 黄冰树, 1994. 地震震级的统计分布及其地震强度因子 M_f 值在华北中强以上地震前的异常变化 [J]. 中国地震, 10 (S): 95-110.
- 张培震, 邓起东, 张竹琪, 等, 2013. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程 [J]. 中国科学: 地球科学, 43 (10): 1607-1620.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2016. 中国地震动参数区划图 (GB 18306-2015) [S]. 北京: 中国标准出版社.
- 周本刚, 陈国星, 高战武, 等, 2013. 新地震区划图潜在震源区划分的主要技术特色 [J]. 震灾防御技术, 8 (2): 113-124.