

混合地震模型的建立及其科学意义

董瑞树, 冉洪流, 任国强

(中国地震局地质研究所, 北京 100029)

摘要: 利用中国西部古地震和历史地震资料建立了特征地震模型并与分档泊松模型结合组成混合地震模型. 研究了青藏高原东南缘的重要地震带鲜水河-小江断裂地区的地震危险性, 并与 1990 年出版的中国地震区划图结果进行了比较, 表明在 1786 年曾经发生过 $7\frac{3}{4}$ 级地震的康定地区 (离逝时间为 213 a, 地震复发周期为 320 a) 的发震概率大于后者, VIII 度区面积同样是前者大于后者. 这说明地震离逝时间与地震复发周期关系对地震危险性计算是有影响的, 特征地震与混合地震模型的引入解决了泊松模型无记忆性的缺陷, 使计算的结果更科学、合理.

主题词: 特征地震; 地震复发周期; 青藏高原; 混合地震模型

中图分类号: P315.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2000)04-0390-07

0 序言

“地震是由于不清楚的原因, 在不清楚的地方发生了不清楚的作用而产生的.”^[1] 至今地震的成因仍是需要不断探索和进一步研究的问题. 同样, 大地震的预测也需不断地研究和探索. 统计数学的方法可以从大量的现象和数据中排除干扰, 提取信息, 预测地震危险性. 统计数学方法在地震研究中的应用包括数据预处理、地震活动统计检验、建立数学模型以及对预测效果检验等. 其中数学模型是通过利用一些公式拟合、模拟、逼近预测目标来表达各种释量之间的关系的. 70 和 80 年代, 最小二乘法、极值分析、马尔科夫过程、非均匀泊松、双泊松模型等都已用到地震预测中.

80 年代随着断层活动性的深入研究, 在活动断层分段和古地震等研究基础上提出了特征地震的概念. 所谓特征地震是指在某一断层段内能发生的最大震级尺度并可原地重复发生的地震, 它具有准周期性特点. 随之各种概率模型相继被提出, 例如研究大地震特征间隔的半马尔科夫模型、大地震重复的时间可预报模型和震级可预报模型以及描述特征地震复发时间间隔原地复发的 NB 模型等^[2~13]. 60 年代后期美国工程师 Cornell 提出了用概率表示地震危险性的地震危险性分析方法^[14], 该方法也被国际上广泛应用. 1990 年出版的中国地震区划图 (文中简称第 3 代区划图) 也用概率来表示, 但对 Cornell 方法作了改进, 采用了分震级档的泊松模型. 由于泊松模型一般只适用于中强地震, 而且它的无记忆性会过高估计近期发生大地震地区地震危险性, 对早期发生过地震地区的危险性估计不足. 特征地震模型可以解决泊松

收稿日期: 2000-07-19

基金项目: 地震科学联合基金资助项目.

作者简介: 董瑞树 (1942-), 女 (汉族), 副研究员, 从事工程地震、地震区划和地震中长期预报研究.

模型对大震预测的缺陷.

一个地区可能只发生特征地震, 但大多地区是既可能发生大或特大地震也可能发生较小地震, 正如图 1 所示. 小江断裂巧家至通海一段, 在 18 世纪时曾发生过东川 $7\frac{3}{4}$ 级地震和一系列 6~7 级地震, 1833 年在一系列 6~7 级地震的震中区发生了 8 级地震, 它的震源区包含了上述一系列地震的震源区, 这符合 Schwartz 所提出的可变滑动模型和均一滑动模型^[15], 而真正意义的特征地震模型在中国大陆上还是比较少的. 地震危险性分析中的计算单元是潜在震源区, 即在未来可能发生不同震级上限以内的各级地震的潜在危险区, 它与可变滑动或均一滑动模型相符, 所以运用单一特征地震模型或单一模拟中强震的模型都不能客观地估计真实的地震危险性. 寻找一个既能反映大地震, 又能表现中强地震的模型来计算一个地区的地震危险性是非常必要的.

本文首先简述了利用中国西部古地震与历史地震资料建立的特征地震模型, 进一步论述了与分档泊松模型联合组成的混合地震模型, 并计算了鲜水河-小江断裂带地区 50 a 超越概率为 10% 的地震区划图和各潜源的发震概率.

1 混合地震模型的建立

1.1 特征地震模型的建立

近 10 a 中国活动断裂和古地震研究积累了大量古地震资料. 本文选取了中国西部地区阿尔金、祁连山以及鲜水河、安宁河、则木河等断裂上发生的 65 个古地震和现代地震的重复时间间隔, 经变换成为无量纲的量 $\tau = (T_{ik} / T_{av, k})$ 作为统计样本量, 绘于图 2 中.

本文采用正态分布、Weibull 分布以及对数正态分布分别对样本 τ 进行拟合, 结果正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 的置信水平小于 85%, Weibull 分布 $W(m, k)$ 置信水平小于 80%, 对数正态分布 $\ln(\mu, \sigma)$ 置信水平为 93%. 表明对数正态分布拟合效果最佳, 所以中国西部特征地震原地复发间隔的经验概率分布应选用对数正态分布(简称 NB 模型), 其概率密度可记为

$$f(T) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi} T} \exp \left[-\frac{(\ln T / T - \mu)^2}{2\sigma^2} \right]$$

(1)

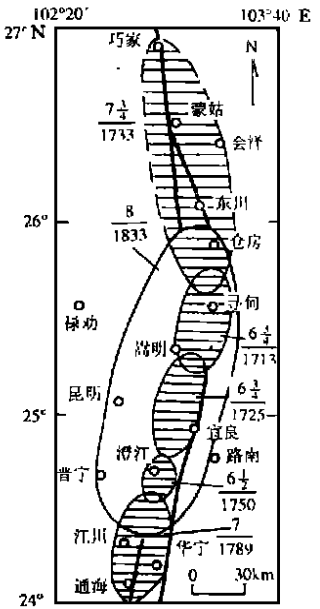
标准差为

$$\sigma = \sqrt{\sigma_D^2 + \sigma_p^2}$$

它的均值 $\mu = -0.008$, 误差 $\sigma = 0.315$. 式中 T 为地震复发间隔, T 为平均复发间隔, σ_D 、 σ_p 分别为内在不确定性误差和参数不确定性误差. 特征地震模型适用于有复发行为的大地震, 但不适合中、强地震, 而中国大陆很多地区在发生大地震的同一地区也可能发生中强地震, 所以选用混合地震模型是非常必要的.

1.2 混合地震模型的建立

在地震危险性分析中大地震选用特征地震的条件概率, 记为



阴影区为 18 世纪发生地震的震源范围; 实线围空区为 19 世纪发生的 8 级地震震源范围
图 1 小江断裂 18 世纪至 19 世纪地震震源投影图(据闻学泽改编)
Fig. 1 Hypocentres of the earthquakes along the Xiaojiang fault in the 18th and 19th centuries.

$$P(A/B)=\frac{P(A\cap B)}{P(B)}=\frac{\int_0^{T_e+\Delta T}f(T)dT-\int_0^{T_e}f(T)dT}{1-\int_0^{T_e}f(T)dT}\tag{2}$$

式中： ΔT 为预测地震时段， T_e 为离逝时间， $f(T)$ 为对数正态概率密度函数。

潜在震源区内的中强地震可用分档泊松模型表示，利用对数正态分布条件概率的混合地震模型可表示为

$$P(T)=\begin{cases} 1-e^{-\lambda\Delta T} & m_0\leqslant m<m_c \\ \frac{\int_0^{T_e+\Delta T}f(T)dT-\int_0^{T_e}f(T)dT}{1-\int_0^{T_e}f(T)dT} & m_c\leqslant m<m_u \end{cases}\tag{3}$$

式中： m_c 为特征地震的起算震级， m_u 为上限震级， m_0 为起算震级， λ 为地震年发生率。

基于特征地震的混合地震模型建模完毕。

2 混合地震模型的应用

2.1 研究区的选择

本文选择地震活动强烈且研究水平比较高的鲜水河-小江断裂带为研究区。它位于西藏高原的东侧川西滇东地区，是青藏高原边缘的重要地震构造带之一。该带呈折线状分布，由 3 个自然段组成，其北段为鲜水河断裂，中段是近南北向的安宁河断裂，南段为小江断裂，总体呈北东突出的弧形。该带是一条重要的大地构造单元的分界线，地槽与地台的转换带，也是古板块或断块的俯冲带或接触带(图 3a)^[16~18]。

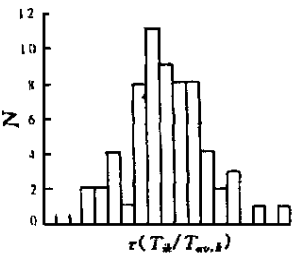
研究区是强震发生带，其地震强度大，频率高。据历史资料记载，自公元 1500 年以来，共发生 6 级以上地震 61 次，其中 7½级以上地震 9 次，地震活动分布极不均一，北段和南段的活动强度和频度都高于中段且某些地区有强震重复发生的现象(图 3a)。由于本研究区地震活动强烈，断层活动性研究与断层分段工作比较深入，所以在本研究区内应用混合地震模型是合理的，可行的。

2.2 基本计算单元

本文是以地震潜在震源区作为基本计算单元，区内上限震级为 8 级的潜在震源区共有 8 个，它们分别是康定、道孚、炉霍(北段)，西昌南，西昌北(中段)，宜良、嵩明、东川(南段)。上述潜源的基本特点列于表 1。

2.3 参数的确定方法

大地震的重复间隔是特征地震模型中的重要参数，它可以直接利用一条断层或断层段(例如鲜水河断裂和安宁河断裂北段)的古地震资料，在缺少古地震的地区也可以用平均滑动速率法，即用位移模式等估算断裂的强震复发周期，具体方法如下：



T_{ik} 为第 k 号震源区，
第 i 次复发的时间间隔，
 $T_{av,k}$ 为第 k 号震源区，
 N_k 次地震复发期平均值

图 2 $\tau(T_{ik}/T_{av,k})$
频次图

Fig. 2 The N - τ relation.

表 1 研究区 8 级地震潜在震源区特点

潜在震源区	构造位置	构造活动特点	地震情况	滑动速率 $v_s/[mm \cdot a^{-1}]$
宜良	小江东支断裂	左阶斜列, 左旋走滑, 第四纪活动	活动强烈, 1500 年以来 $M \geq 6$ 地震 6 次, 最大为 1500 年 $7 \frac{1}{2}$ 级地震	平均水平位移速率为 6.25
东川	小江断裂带北部		1733 年 $7 \frac{3}{4}$ 级地震	晚更新世晚期平均走滑速率为 6.67
嵩明	小江西支断裂	强烈左旋走滑, 阶区形成拉分构造	1500 年至今共发生 5 级以上地震 5 次, 最大为 1833 年嵩明 8 级地震	全新世平均滑动速率为 5.78
西昌南	则木河断裂	川滇菱形地块东侧边缘, 向东突出的一个拐角, 构造复杂	地震活动强烈, 1850 年发生 $7 \frac{1}{2}$ 级地震	1500 年以来滑动速率为 4.9
西昌北	安宁河断裂带	深切地壳	1536 年发生 $7 \frac{1}{2}$ 级地震	平均滑动速率为 2
炉霍	鲜水河断裂西段	高角度逆冲断裂倾向多变, 并与较小规模的北东向和近南北向断裂相交	地震活动强烈, 发生 2 次 $M \geq 7 \frac{1}{2}$ 地震	平均滑动速率为 15
道孚	鲜水河断裂中段	活动以北西为主, 兼有北东向以及断块差异升降运动	多次发生 $M \geq 6$ 地震, 最大为 $7 \frac{1}{2}$ 级	水平滑动速率为 4.5
康定	鲜水河断裂东南段	除左旋错动, 还有明显的垂直位移和以走滑为主的斜滑运动	最大地震为 1786 年的 $7 \frac{3}{4}$ 级地震, 还多次发生破坏性地震	平均滑动速率为 6, 最大为 10

(1) 大地震的重复间隔与断层段平均滑动速度成反比, 与大地震位错成正比, 即可表示为

$$T_m = D_m / \bar{v}_s \tag{4}$$

式中: T_m 为 m 级地震重复发生间隔, D_m 为 m 级地震的平均位错量, v_s 为断裂段上的平均滑动速度.

考虑本研究区各段存在有蠕滑分量, 所以实际滑动速率应减去蠕滑速率 v_c , 上式可记为

$$T_m = D_m / (\bar{v}_s - v_c) \tag{5}$$

地震滑动速率法符合弹性位错积累原理, 物理机制是明确的.

(2) 用位移模式估算断裂强震复发间隔

$$T_{XM} = \frac{\sum_{i=1}^{T_X} LD}{L_{\max} v} \tag{6}$$

式中: T_{XM} 为最大地震原地复发期, $\sum_{i=1}^{T_X} LD$ 为最大强震发生段上一个地震活动期所有地震位移长度与位错乘积, $L_{\max}$ 为断裂段上最大地震断裂长度, v 为断裂段断层滑动速率.

2.4 计算与结果

在区内 8 级地震潜在震源区中的 $M \geq 7.5$ 地震档选用特征地震 NB 模型 ($\sigma = 0.315$, $\mu = -0.008$); 将特征地震 ($M \geq 7.5$) 参数代入式(1)和式(2), 得到各潜在震源未来 50 a 发震概率列于表 2, 表中还给出用第 3 代区划图方法计算的各潜源发震概率.

表 2 鲜水河—小江地区 8 级潜源未来 50 a $M \geq 7.5$ 地震概率对比

潜在震源区	复发周期 T/a	$M \geq 7.5$ 地震发震概率		地震离逝时间 t/a
		第 3 代图	NB 模型	
宜良	1 329	0.072	3.4×10^{-5}	497
嵩明	1 680	0.231	1.02×10^{-19}	164
东川	1 000	0.064	0.0068	264
西昌南	957	0.096	7.6×10^{-4}	147
康定	320	0.099	0.178	211
道孚	697	0.120	0.001	104
炉霍	156	0.082	0.072	27

从表 2 可以看出, NB 模型的计算结果除康定潜源比第 3 代图高, 炉霍潜源与第 3 代图的结果相近外, 其它潜源都远远小于第 3 代图的结果.

本文还用 NB 模型条件概率的混合地震模型对研究区作了地震危险性计算, 得到了Ⅷ度区(50 a 超越概率 10%)的分布(图 3b). 为了与第 3 代区划图进行对比, 图 3b 还给出了第 3 代区划图的结果.

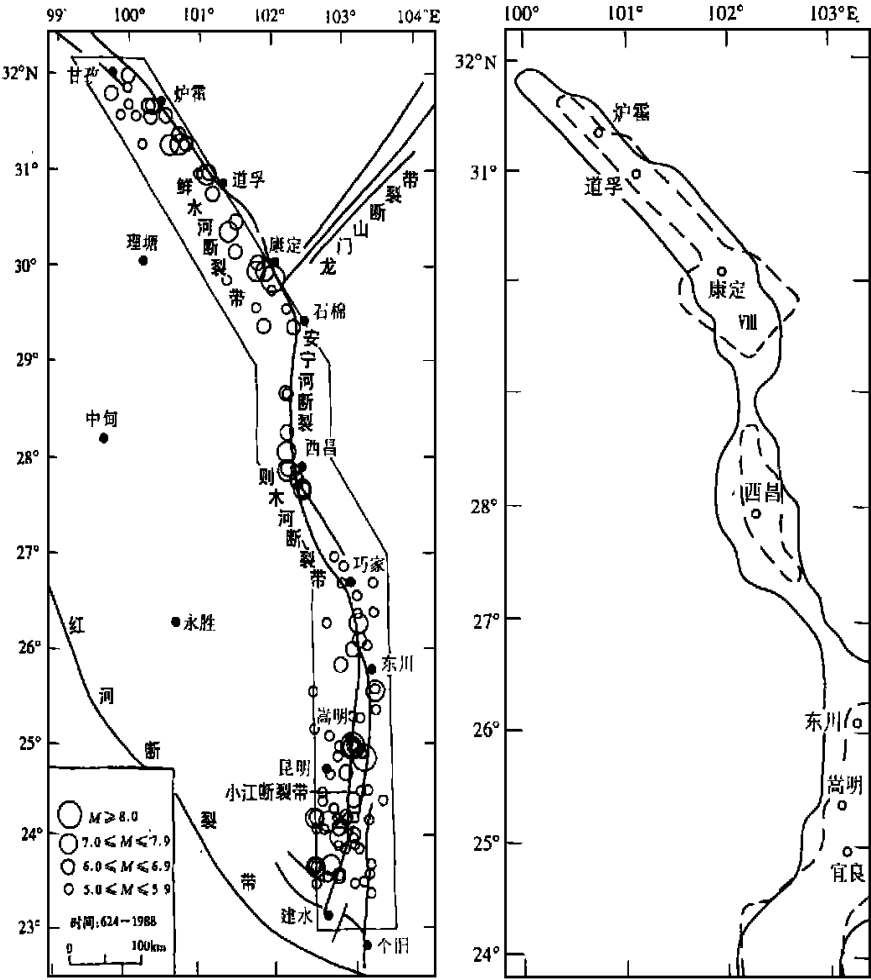
从图 3b 可以看出结果与表 2 相近, 即仅在康定附近混合地震模型计算的Ⅷ度区的面积大于第 3 代图的结果, 其它大多数地区都小于第 3 代图的结果. 说明与第 3 代图相比除了康定地区地震危险性增大, 其它地区地震危险性减小了.

3 科学意义的探讨

在中国现行的地震危险性分析方法中, 地震潜在震源区的地震活动性参数是在确定地震区(带)地震活动性参数的基础上, 又考虑了各有关地震危险性差异的因素, 且形成空间分布函数而确定的, 但这些因素掺杂进了一些主观因素, 使预测与实际地震水平可能会不一致. 特别对中国的西部地区地震活动强烈、地震类型复杂、地震记载时间短, 不能认识在地震的复发行为, 从而更增加了大地震预测的难度. 古地震开挖和特征地震的研究, 延长了大震级地震历史, 大地震的复发行为为进一步确定大地震的危险性提供了有用的依据. 中国西部地区特征地震概率模型的建立^①弥补了中国西部特征地震研究的缺陷. 建模过程中很好地解决了不同时期古地震平均复发周期和古地震本身年龄误差及误差传递问题.

根据中国西部多数地震发生区既会发生巨大或大地震也会发生中强地震的特点, 本文所研究的基于特征地震的混合地震模型在鲜水河—小江断裂的应用显示了它的优越性, 同时认识了大地震的离逝时间与大地震复发周期的关系对结果影响较大, 例如有的潜在震源区, 尽管其离逝时间较长(如宜良区为 497 a, 西昌北区为 461 a), 但其大震的复发周期也长, 分别为 1 329 a 和 1 223 a, 计算得到的潜在震源发震概率小, 分别为 3.4×10^{-5} 和 1.6×10^{-3} ; 康定、炉霍区, 大地震的离逝时间分别为 211 a 和 27 a. 由于大地震复发周期短, 它们未来 50 a 的地震危险性并不低, 特别是康定地区 50 a 超越概率为 10% 的Ⅷ区比仅用分档泊松模型计算的结果大. 说明基于特征地震的混合地震模型克服了泊松模型的无记忆性缺陷, 能较好地反映大地震的危

① 任国强. 基于特征地震的混合地震模型及其在地震区划中的应用. 硕士研究生毕业论文.



(a) 研究区范围及区内地震活动; (b) 第 3 代区划图结果(实线)与混合地震模型计算结果(虚线)

图 3 研究区范围及计算结果

Fig. 3 Range of the studied region and results obtained by calculation.

险性.

由于中国大陆地震多数具有可变滑动型和均一滑动型的特点, 所以根据大地震用特征地震模型与中强地震使用分档泊松模型组成的混合地震模型计算地震的危险性是符合中国大陆地震活动特点的, 是合理的. 基于特征地震的混合地震模型的应用克服了泊松模型的缺陷, 很好地解决了地震参数确定中掺杂主观因素的问题, 使结果更科学、更实用.

[参考文献]

[1] 徐道一. 我国地震统计预报学概况[A]. 见: 地震统计预报论文集[C]. 北京: 地震出版社, 1982. 1—7.

[2] Kameda H Ozaki. Arenual process moden foruse in seismic risk analysis[J]. Mem Faculty of Eng (Kyoto unic), 1999, VXLII, 11—35.

[3] 董瑞树, 谷德贵, 冉洪流. 更新过程与概率分配模式在潜在震源区发震概率计算中的应用[J]. 地震地质, 1993, 15(3): 239—246.

- [4] 董瑞树, 冉洪流, 高维安. 双泊松过程在地震危险性估计中的作用[J]. 中国地震, 12(增刊): 52—56.
- [5] Anagnos T, Kiremidija A S. Temporal dependence in earthquake occurrence[A]. In Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering Prentice Hall[C]. Englewood Cliffs N J, 255—262.
- [6] Patwardhan A S, Kulkarni R B, Tocher D. A semimarkov model for characterizing recurrence of great earthquakes[J]. Bull Seism Soc Amer, 1980 70: 323—347.
- [7] Shimazaki K, Nakata T. Time-predictable recurrence model for large earthquakes[J]. Geophys Res Lett., 1980, 7: 279—282.
- [8] Working Group on California. Seismic hazards in southern California; probable earthquakes, 1994 50 2024[J]. Bull Seism Soc Amer, 1995, 85(2): 379—439.
- [9] 董瑞树, 冉洪流, 任国强. 地震区划中混合地震模型研究——以祁连山为例[J]. 地震地质, 1999, 21(1): 37—46.
- [10] 闻学泽. 活动断裂地震潜势的定量评估[M]. 北京: 地震出版社, 1995.
- [11] Working Group on California. Earthquake probabilities[A]. Probabilities of large earthquakes in the San Francisco Bay Region, California, U S[C]. Geol Surv Circ, 1990, 1053: 55.
- [12] Nishenko S P, Buland R. A generic recurrence interval distribution for earthquake forecasting[J]. Bull Seis Soc Amer, 1987, 77: 1382—1399.
- [13] Yonnges R R, Coppersmith K J. Implication of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates[J]. Bull Seism Soc Amer, 1985, 75: 939—964.
- [14] Cornell C A. Engineering seismic risk analysis[J]. Bull Seism Soc Amer, 1968, 58(5): 1583—1606.
- [15] Schwartz D P, Coppersmith K J. Fault behavior and characteristic earthquake; examples from the wasatch and San Andreas Faults[J]. J Geophys Res, 1984, 89: 5681—5698.
- [16] 闻学泽. 鲜水河断裂未来 30 年内地震复发条件概率[J]. 中国地震, 1990, 6(4): 8—16.
- [17] 闻学泽. 小江断裂带的破裂分段与地震潜势概率估计[J]. 地震学报, 1993, 15(3): 322—330.
- [18] 唐荣昌, 韩渭宾. 四川活动断裂与地震[M]. 北京: 地震出版社, 1993.

ESTABLISHMENT OF THE MIXED SEISMIC MODEL AND ITS SCIENTIFIC SIGNIFICANCE

DONG Rui-shu, RAN Hong-liu, REN Guo-qiang
(*Institute of Geology, CSB, Beijing 100029, China*)

Abstract: The characteristic earthquake model is set up by using paleoseismic and historical earthquake data of the West China. The seismic hazard of Xianshuihe-Xiaojiang fault zone located on eastern margin of Qinghai-Tibet Plateau was estimated based on the mixed seismic model composed by characteristic earthquake model and magnitude-apart Poisson model. Having compared with the seismic zonation map of China published in 1990, it is shown that both seismogenic probability and area of the region with $I=8$ obtained from the mixed model are larger than those on the seismic zonation map. That is to say, the leaving time and recurrence period influence on seismic hazard assessment. Therefore, the nonreliability of Poisson model could be solved by using characteristic earthquake and the mixed model, and scientific and reasonable results could be obtained.

Key words: Characteristic earthquake; Earthquake recurrence period; Qinghai-Xizang Plateau; Mixed seismic model