

龙门山断裂带茂汶—汶川段的长期强震潜势

白兰香 闻学泽

(四川省地震局)

摘要

茂汶—汶川断裂段是龙门山断裂带中历史地震活动强度最大的一段，自1657年8度地震以来，已有337年未发生过 $M \geq 6$ 级的强震。为了分析该段未来的长期地震潜势，本文较系统地分析了那里的破坏性地震及有感地震资料，并进一步应用中国大陆特征地震轮回模式及其复发时间概率模型估算了该断裂段当前特征地震轮回的平均时间间隔，以及从1995年起未来百年内复发强震的概率；同时分析了以概率表征的地震复发危险性随时间推移的变化过程。结果表明未来50—100年内该断裂段复发强震的危险性为中等及中—高水平，但近几年内发震的可能性较小。

关键词 历史地震 断裂段 特征地震 $i-f-j$ 模式 发震概率

一、引言

龙门山断裂带主体由三条走向北东、总体北西倾的活动断裂组成，它们分别称为龙门山、后山断裂、龙门山主中央断裂及龙门山主边界断裂，相互间近于平行展布（图1）。

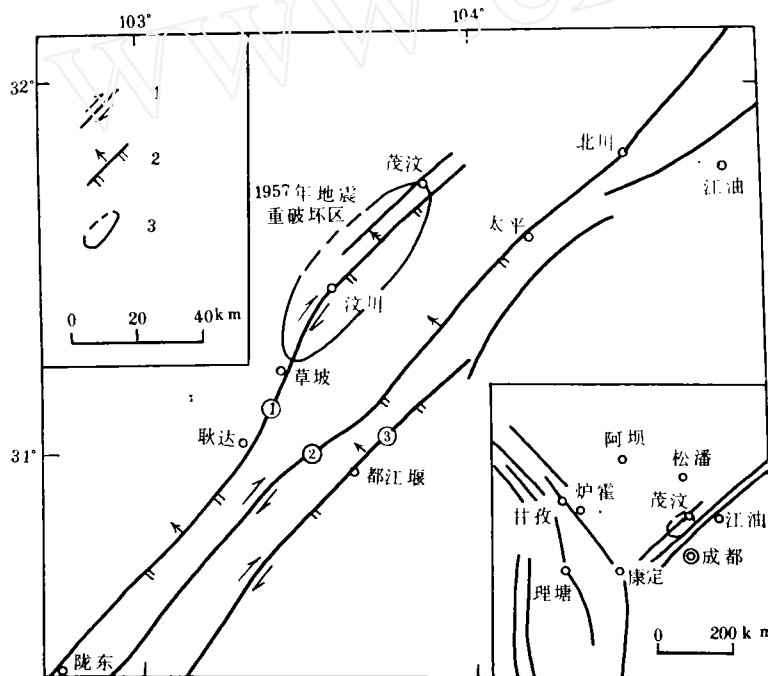


图1 龙门山断裂带及1657年强震重破坏区位置图。

- ①龙门山后山断裂；②龙门山主中央断裂；③龙门山主边界断裂。
- 1. 逆一走滑断裂；2. 逆冲断裂；3. 1657年地震的重破坏区范围

后山断裂是龙门山构造带最西边的一条断裂,也是三条断裂中生成时间最早、活动最强烈、切割深度最大的断裂,它已切穿岩石圈,为岩石圈断裂。根据活动程度的强弱差异,龙门山后山断裂大致可分为两段,即茂汶—汶川段和耿达—陇东段。

茂汶—汶川断裂段北东起于茂汶县神溪沟,向西南经茂汶、至汶川南,长约70千米;断面倾北西,地表倾角 50° — 70° ,地下3千米处倾角变为 20° ,属逆掩断层。该断层段的晚第四纪活动性在地貌特征及现代地壳形变等方面都有反映;在汶川南,穿越断层的水系被扭错成“S”型,反映了新活动方式明显兼有右旋走滑分量;但目前尚未获得该断裂段可靠的滑动速率数据。

茂汶—汶川断裂段上曾于公元1657年发生过一次强烈地震,从那时起至今300多年里一直没有再复发过 $M \geq 6$ 级的地震。科学地评估该断裂段未来较长时期内强震复发的危险性,不仅对于开发当地岷江流域的水利资源、评价那里各种水利设施和交通设施的地震安全性,而且对于当地的经济建设等,均有十分重要的意义。本文拟就茂汶—汶川断裂段的长期地震潜势进行初步的分析。

二、两次历史地震参数的分析与修订

1. 1657年地震的震级

现有的正式地震目录中均将公元1657年4月21日茂汶—汶川地震的震级定为 $6\frac{1}{2}$ 级,震中烈度定为Ⅷ度。本文认为这次地震的震级有可能比 $6\frac{1}{2}$ 略大,主要理由如下:

(1) 震害严重、重破坏区长轴长。据记载^[1],此次地震时,现今的汶川、茂汶、绵虬等处“地震有声、昼夜不断……山石崩裂、(岷)江水皆沸,房屋城垣多倾,压死男妇无数……”。从有震害记载的茂汶至绵虬,全长有近60千米。上述震害记载虽不够详尽,但仍可看出地震烈度在Ⅷ度或略高。对比现代地震的宏观调查结果,在长约60千米的Ⅷ度区中,应存在有Ⅸ度区,亦即这次地震的震中烈度有可能为Ⅸ度。

(2) 有感范围较大:据记载,这次地震的有感地点南到四川兴文、珙县、筠连一带,北东可达陕西宝鸡一带,有感半径最远可达450千米,对比有感半径与震级的经验关系表(汪素云,1978),震级当在7级左右。

(3) 龙门山断裂带上的现今地震资料表明,在相同震级下,该带地震的震中烈度比更大区域内的略偏低。例如,1958年和1970年分别发生在龙门山断裂带上的北川6.2级地震和大邑6.2级地震,震中烈度均为Ⅷ度。由此推论,1657年的茂汶—汶川地震震级应比地震目录中所确定的 $6\frac{1}{2}$ 级要高。

综上所述,在未获得更加有说服力的证据的情况下,按较保守的原则考虑,将1657年地震震级定为 $6\frac{3}{4}$ 级可能更加合适。

2. 1748年 $5\frac{1}{2}$ 级地震的震中位置

据现行地震目录,1748年2月23日汶川一带发生过一次 $5\frac{1}{2}$ 级地震(震中位置为北纬 31.3° ,东经 103.5°)。因这次地震震中是否位于茂汶—汶川断裂段内,对本文后续分析有重要影响,所以这里先对其震中位置作如下分析:

据史料记载,这次地震的震害如下:“……汶川(今汶川县绵虬)、保县(现汶川,一说在理县薛城)县境内,桥梁道各多有震损者,现在上紧修整,粮运无阻……”;“……惟茂州

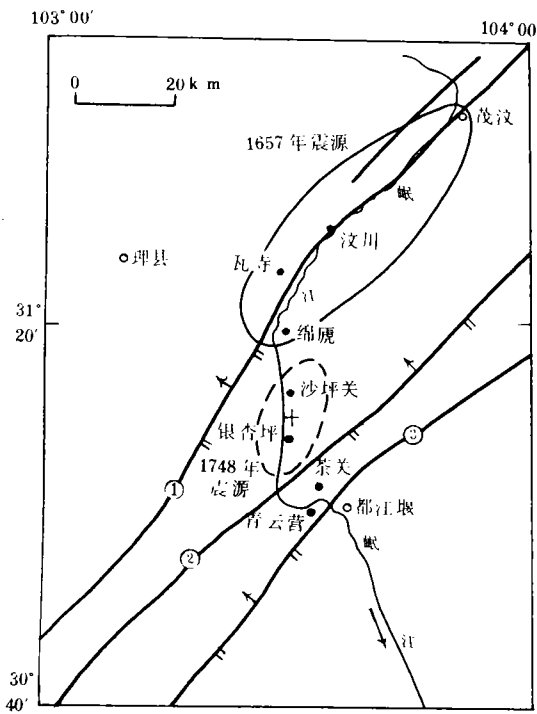


图2 1748年 $5\frac{1}{2}$ 与
1657年 $6\frac{3}{4}$ 级地震震源位置图据文献〔1〕

汶川县属之沙坪关、银杏坪一带道路偏桥多被滚石打坏，暨灌县属之青云营衙署、兵房摇塌瓦片，并桥梁道路间有倾圮者。又被山石滚下打毙运粮背夫三名，打伤背夫三十名……茶关原非城垣，系关口堵墙倒塌十余丈……”〔4〕。由上述描述可知，保县道路有损，但不影响交通；茶关、青云营房屋掉瓦，道路损坏较少；沙坪关、银杏坪道路多有损坏。由此分析，沙坪关、银杏坪一带烈度较高，应为震中区，故震中定为北纬 $31^{\circ}10'$ ，东经 $103^{\circ}30'$ 较为合适。

图2给出了各地点的具体位置，表明1748年地震并非发生在1657年地震的震源区内，（图中的黑圆点表示1748年地震有记载可查的地点。其余图例如图1）该次地震的震中更靠近龙门断裂带的主中央断裂，而主中央断裂为倾向北西的逆掩断层，该地震震中位于该断裂的上盘上，很可能是主中央断裂发震。由此可见，1748年 $5\frac{1}{2}$ 级地震并非发生在本文研究的茂汶—汶川段上。

三、茂汶—汶川断裂段的地震活动

首先确定茂汶—汶川断裂段可否作为一个独立断裂段（或震源区的范围）。不同的研究者根据各自掌握的资料和处理方法的不同，对同一地震的震源区的大小在圈划时会有较大的差别。

本文考虑到1657年地震的Ⅷ度区长轴长度和茂汶—汶川断裂段的长度相当，同时考虑到一般历史地震烈度区范围确定时的误差，大致将1657年地震的Ⅷ度区作为一个可复发特征地震的独立断裂段看待。

图3是按上述范围挑选地震目录后作出的茂汶—汶川段的地震活动M—T图。从该图看出，该段落最早的有感地震（ $M \geq 4$ ）记载始于公元1478年。在1657年 $6\frac{3}{4}$ 级强震之前的1488年和1597年，同一断裂段内曾发生过两次 $5\frac{1}{2}$ 级中等破坏性地震。1657年 $6\frac{3}{4}$ 级强震之后，该断裂段有200多年未发生破坏性地震。我们的初步分析认为：茂汶、汶川一带的历史有感地震记载较早，在1657年地震后至1933年的276年间不可能漏记 $M \geq 4.7$ 级的破坏性地震，但 $M < 4.7$ 级的有感地震一方面可能漏记，另一方面在这276年期间发生得也不多。这样，我们将该断裂段上 $M < 4.7$ 级的有感地震称为“背景地震”，将 $4.7 \leq M < 6$ 的地震称为“中强震”，而将该断裂段发生的最大地震，例如类似于1657年 $6\frac{3}{4}$ 级地震大小的地震称为那里的“特征地震”。

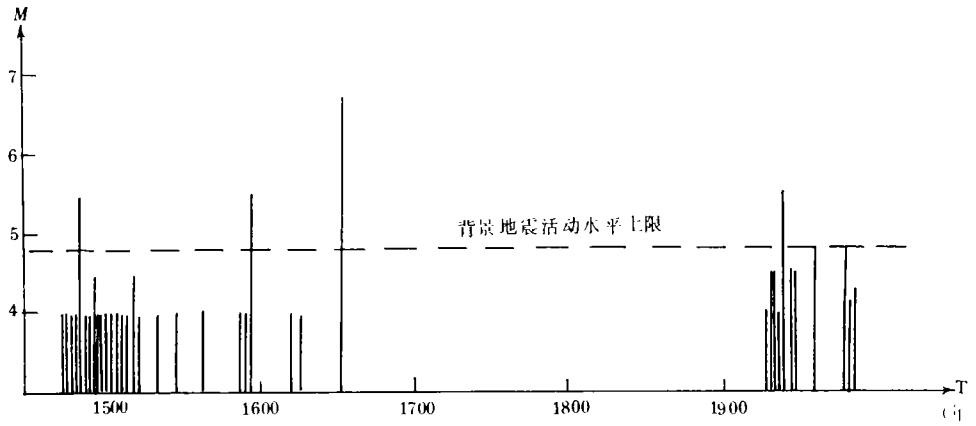


图3 茂汶—汶川断裂段自1450年以来地震活动的M-T图。

M≥4.7级地震资料取自《西南地震简目》，M<4.7级的地震资料取自文献[5]，并补充1970—1993年资料

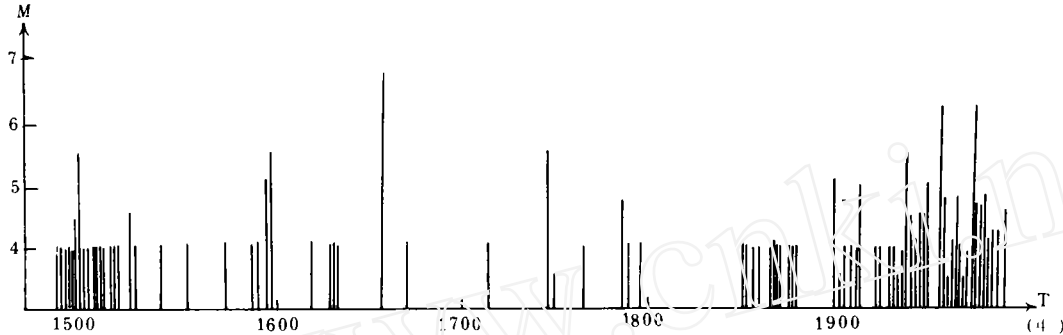


图4 龙门山断裂带过去约500年的地震活动M-T图(资料来源同图3)

为了分析图3中自1657—1930年间缺少中等地震是否由于历史“漏记”的原因所引起，我们将茂汶—汶川断裂段的M—T图(图3)与整个龙门山断裂带的M—T图(图4)作比较。从图4看出，整个龙门山断裂带从公元1500年以来就不太可能漏记M≥5级的中等以上地震，且在1500年前后就有较详尽的有感地震记载。在17世纪后半期至19世纪早期的约200年中，整个断裂带地震活动明显减弱，表现为有感及中等地震频度明显减少。因此，图3所示的茂汶—汶川段在1657—1930年间缺少中等地震不完全是“漏记”引起的。我们认为在此期间茂汶—汶川段有感地震可能有漏记，但不可能漏记M≥4.7级的破坏性地震。图4中的1748年5½级地震尽管发生在茂汶—汶川段以南地区，但汶川当地仍有记载即是一个很好的证例。

四、未来强震复发潜势的概率评估

1. 方法

根据对中国大陆完整特征地震轮回震级—时间序列的研究，闻学泽等^[2,3]总结出大陆完整特征地震活动轮回的一般特征，即i—f—j模式，并在此模式的基础上提出了估计特征地震当前轮回平均复发时间的方法，以及进一步建立了能近似描述复发时间不确定性的概率分布。本文采用这一模式及其方法来评估茂汶—汶川断裂段未来的发震概率。

i 和 j 分别代表一个完整轮回中的两次特征地震事件, i 为第一次, j 为第二次。在事件 i 到事件 j 之间的完整轮回时段的后 $\frac{1}{2}-\frac{1}{3}$, 普遍有中强地震出现, 将其中第一次中强地震称为“首次填隙式中强震”, 用 f_1 表示。 f_1 事件发生在与事件 i 相同的震源或断裂段上, 震级明显大于那里的背景地震震级, 且不小于特征事件 i 的震级减 2, 故 f_1 事件一般较易于被识别。

一个完整轮回中特征事件 i 和 j 发生的时间分别记为 t_i 和 t_j , 首次填隙式中强震 f_1 发生的时间记为 t_{f_1} , 则该轮回的实际时间为:

$$T = t_j - t_i \quad (1)$$

事件 i 至事件 f_1 的时间差为:

$$T_{if} = t_{f_1} - t_i \quad (2)$$

根据中国大陆 24 个完整特征地震轮回的 T 与 T_{if} 数据得到的回归方程为:

$$\ln T = 0.715 + 0.934 \ln T_{if} + \epsilon \quad (\text{相关系数} = 0.9733) \quad (3)$$

式中 ϵ 是 $\ln T$ 的随机误差, 其标准差 σ 的估值为 0.226。当考虑抽样误差时, $\ln T$ 均值的标准差为:

$$S = \sigma \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(\ln T_{if} - 4.8875)^2}{23.2583}} \quad (4)$$

式中 4.8875 是 $\ln T_{if}$ 样本的算术平均值, 23.2583 是 $\ln T_{if}$ 样本的离差平方和。因此, 在任一特征地震震源或断裂段上, 当已知特征事件 i 与首次填隙式中强震 f_1 的发生时间 t_i 和 t_{f_1} , 或者已知 $T_{if, p}$ 时 (p 代表当前轮回), 平均复发时间的 $(100-\alpha)\%$ 区间为:

$$\{\exp(\ln \hat{T}_p - t_{(\alpha/2)(n-2)} \times S), \exp(\ln \hat{T}_p + t_{(\alpha/2)(n-2)} \times S)\} \quad (5)$$

其中 t 是自由度为 $n-2$ 的 t 检验双侧临界值。

闻学泽等^[3]的进一步分析表明: 由回归方程 (3) 得到的 $\ln T$ 近似的服从于均值为 μ_p ($\mu_p = 0.715 + 0.934 \ln T_{if}$)、标准差为 σ 的正态分布。根据正态分布与对数正态分布的关系可知, 复发轮回时间 T 近似的服从于均值为 μ_p 标准差为 σ 的对数正态分布。至此, 所研究的当前轮回 T_p 的概率密度函数为:

$$f(T_p | \ln T_{if, p}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} T_p \sigma} \exp\left[-\frac{(\ln T_p - \mu_p)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (6)$$

式中 $\mu_p \approx \ln \hat{T}_p$, $\sigma = 0.226$ 。

针对一个已发生了 i 事件和 f_1 事件的震源区, 可以应用上述方法估计当前轮回的平均时间间隔 T 的区间, 也可以依据下式计算在已知上一次特征地震(事件 i)以来已经过长度为 T_c 的平静时段, 下一次特征地震(事件 j)仍未发生, 而在 $T_c + \Delta T$ 时段内发生的概率(条件概率):

$$P_c = \frac{\int_0^{T_c + \Delta T} f(T) dT - \int_0^{T_c} f(T) dT}{1 - \int_0^{T_c} f(T) dT} \quad (7)$$

式中 ΔT 是给定的预测时段, T_c 是事件 i 至今的平静时段, $f(T)$ 是对数正态密度函数 $f(T_p |$

$\ln T_{i,f_1,p}$)的简洁记法。

该方法在研究特征地震复发时间时,仅和事件*i*和*f₁*的时间差有关,而不管复发行为是否为准周期行为,同时仅要求能获得一个震源区或断裂段的*i*、*f₁*资料,因此具有较强的实用性。

2. 未来发震概率计算及其分析

本文第三节分析已表明 1657 年 6 $\frac{1}{3}$ 级地震是茂汶—汶川断裂段的一次特征性地震,同时,该断裂段上的背景地震活动强度上限约为 4 $\frac{1}{4}$ 级。从图 3 看到:自从 1657 年 6 $\frac{1}{3}$ 级地震发生以来,当地 $M > 4\frac{1}{4}$ 级的中强地震只有 1940 年的 5 $\frac{1}{2}$ 级地震,它与 1657 年地震相隔 283 年,故不是 1657 年地震的特晚期强余震,而应当属于当地自从 1657 年强震后,应变重新积累到达距下一次特征地震的极限应变不太远的背景下发生的,故理所应当属于那里当前(尚未完成的)特征地震轮回中的首次填隙式中强震(即事件 *f₁*)。有趣的是:当地的上一个特征地震轮回(即以 1657 年事件作为 *j* 事件的轮回)在临近 1657 年特征地震发生的时段,也有两次填隙式中强震发生,它们分别为 1488 年茂汶 5 $\frac{1}{2}$ 级地震和 1597 年茂汶—汶川间 5 $\frac{1}{2}$ 级地震(参见图 3),尽管因早期历史地震漏记的原因,上一轮回的特征事件 *i* 不知发生在何年代,但从图 3 仍可清楚地看出茂汶—汶川断裂段的强震原地复发轮回的震级—时间序列结构,较明显地与闻学泽等^[2]提出的 *i—f—j* 模式相一致。因此,前面所介绍的 *i—f—j* 模式的原理及概率预测方法,可应用于茂汶—汶川断裂段。

根据前述,茂汶—汶川断裂段当前轮回的特征事件 *i* 是 1657 年 6 $\frac{1}{3}$ 级地震,首次填隙式强震 *f₁* 事件是 1940 年 5 $\frac{1}{2}$ 级地震,两者的时间差 $T_{i,f_1} = 283$ 年,由回归方程(3)(忽略 ϵ 项)估得 $\ln T$ 为 5.988,该数值也是当前轮回复发时间间隔对数正态分布的均值参数 μ_p 的估值。另由(5)式计算得到当前轮回时间间隔均值的 95%置信区间为 369—430 年。

进一步由(7)式计算该断裂段未来发震条件概率。这里的条件是指:已知自 1657 年 6 $\frac{1}{3}$ 级地震后直到 1995 年 1 月 1 日,特征事件 *j* 仍未发生。预测时段 ΔT 分别取 10, 11, ..., 100 年。发震条件概率计算结果在图 5 中预测时段 ΔT 的长度变化的曲线表示。同时,图中也给出了自从 1657 年地震以来,随消逝时间增长的发震累积概率曲线。累积概率的计算公式为:

$$F = \int_0^{T_i + \Delta T} f(T) dT \tag{8}$$

积分下限“0”表示累积概率从当地的 1657 年地震后即开始累积。

下表列出了从 2005 年起,每增加 10 年的发震条件概率和累积概率

表 1 茂汶—汶川段未来的发震概率

发震条件概率 p_c			发震累积概率 F		发震条件概率 p_c			发震累积概率 F	
预测时段	ΔT	p_c	累积时段	F	预测时段	ΔT	p_c	累积时段	F
1995—2005	10	0.05	1657—2005	0.27	1995—2055	60	0.35	1657—2055	0.50
1995—2015	20	0.11	1657—2015	0.32	1995—2065	70	0.40	1657—2065	0.54
1995—2025	30	0.17	1657—2025	0.36	1995—2075	80	0.46	1657—2075	0.58
1995—2035	40	0.23	1657—2035	0.41	1995—2085	90	0.51	1657—2085	0.62
1995—2045	50	0.29	1657—2045	0.45	1995—2095	100	0.56	1657—2095	0.66

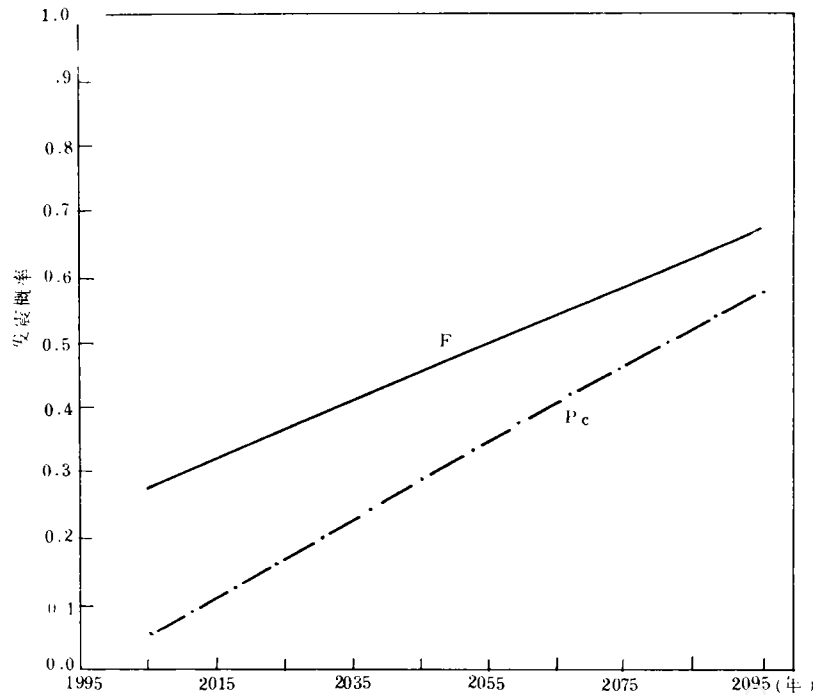


图5 龙门山断裂带茂汶—汶川段强震发生概率随时间的变化曲线

加点虚线的纵座标值表示从1995年起, 预测时段 ΔT 自10年起,

增加到100年的发震条件概率 P_c 。实线表示自1657年以来, 随消逝时间增长的发震累积概率 F

从表1及图5看出: 茂汶—汶川断裂段未来50年内发震的条件概率和累积概率分别为0.29和0.45, 已接近中等危险程度, 而未来100年内, 条件概率和累积概率分别为0.56和0.66, 已属中—高危险程度。该结果可为这一地区工程地震安全评价提供参考。

另外, 该断裂段未来10年内(1995—2005)发震概率较低, 故可暂不考虑作为中期预测尺度(近年内)的强震危险区。当然, 这一看法不包括与茂汶—汶川断裂段相邻或邻近的龙门山断裂带其它段落, 而仅仅指图1所示的本文研究的断裂段。

参 考 文 献

- 1 国家地震局地球物理研究所、复旦大学中国历史地理研究所主编. 清时期中国历史地震图集. 北京: 中国地图出版社, 1990
- 2 闻学泽, 罗灼礼, 陈 农, 胡先明. 中国大陆的特征地震活动及其中一长期预测研究(一). 中国地震, 1994, 10(1)
- 3 闻学泽, 罗灼礼, 陈 农, 胡先明. 中国大陆的特征性地震活动及其中一长期预测研究(二). 中国地震, 1994, 10(2)
- 4 四川地震资料汇编编辑组. 四川地震资料汇编(第一卷). 成都: 四川人民出版社, 1980
- 5 云南、四川、西藏地震局. 云贵川藏历史有感地震简目($M=3.5-4.6$). 成都: 成都科技大学出版社, 1993

Seismic Potential of Long-term Strong Shock On The Maowen—Wenchuan Segment Of The Longmenshan Fault Zone

Bai Lanxiang Wen Xueze
(Seismological Bureau Of Sichuan Province)

Abstract

The Maowen—Wenchuan fault segment is the north—east segment of the Longmenshan fault zone in west of Sichuan on which the historical seismicity strength is larger. $M \geq 6$ strong earthquakes have not occurred since 1657 IX degree earthquake. For analysing the seismic potential on the segment for the future, we systematically analysed the information of destructive and felt earthquakes. We evaluated the average time interval of characteristic earthquake recurrence on the fault in recent ness, the probability of repetition strong earthquake in hundred years from 1995 to future using the rotation model of characteristic earthquake in China continent and the probability model of repetition time. Moreover, we analysed the variation process of earthquake repetition risk of probability expression with the passage of time. The results indicate that the repetition risk of strong earthquake is middle or middle and high level, but the possibility of earthquake occurrence is smaller in recent years.

Key words: historical earthquake; segment of fault; $i-f-j$ -characteristic earthquake;
 $i-f-j$ model; seismogenic probability