

冉洪流,何宏林. 鲜水河断裂带北西段不同破裂源强震震级($M \geq 6.7$)及复发间隔研究. 地球物理学报, 2006, 49(1): 153~161
Ran H L, He H L. Research on the magnitude and recurrence interval of characterized earthquakes with Magnitude ≥ 6.7 along the northwestern portion of the Xianshuihe fault zone in western Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(1): 153~161

鲜水河断裂带北西段不同破裂源强震震级 ($M \geq 6.7$)及复发间隔研究

冉洪流,何宏林

中国地震局地质研究所,北京 100029

摘 要 鲜水河断裂带是四川西部一条晚第四纪强烈左旋走滑活动的构造带,历史上发生多次强震.它与西北侧的甘孜—玉树断裂带一起,构成青藏高原东部的侧向滑移构造系统中的川滇活动地块的北边界——羌塘地块的东北边界.鲜水河断裂带北西段可以分成 4 个段落,每一段落均可作为一个独立的基本破裂单元而发生地震破裂,亦有可能发生不同尺度的多段联合破裂.对鲜水河断裂带北西段不同尺度破裂的震级及复发间隔进行研究.根据该地区的地质、地球物理、测量及地震等方面的资料,结合我国强震复发的特点,分析了拉分盆地内部的滑动速率分布,以确定各段落的等效长度和倾向宽度,从而建立适合我国大陆走滑断裂的面波震级与断裂发震面积的关系式;进而运用地震矩方法,考虑断层之间的相互作用,结合专家意见建立了该段的矩平衡断裂破裂模型;最后,给出了鲜水河断裂带北西段各破裂源特征化地震的复发间隔、震级大小和不确定性,以及他与中小地震的联合震级分布.结果表明,鲜水河断裂带北西段较易发生单段破裂,复发间隔在 100~150 年左右.

关键词 鲜水河断裂带,破裂源,特征化地震,地震矩,复发间隔

文章编号 0001-5733(2006)01-0153-09

中图分类号 P315

收稿日期 2005-03-21, 2005-08-25 收修定稿

Research on the magnitude and recurrence interval of characterized earthquakes with Magnitude ≥ 6.7 along the northwestern portion of the Xianshuihe fault zone in western Sichuan, China

RAN Hong-Liu, HE Hong-Lin

Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Abstract The Xianshuihe fault in Sichuan Province, southwestern China is one of the major left-lateral strike-slip faults which emanate from Tibet and seem to play a key role in accommodation of India's penetration into Eurasia. In the northwestern portion of the Xianshuihe fault zone, sixteen earthquakes of $M \geq 6.5$ occurred since 1700. The northwestern portion of the Xianshuihe fault zone can be divided into four segments based on field investigation of recent earthquake ruptures, studies on time-space distribution and recurrence behaviors of historical ruptures, geometry and structure of fault zones, geophysical background, and recent seismicity. Each segment of the fault is a unit that has produced historical ruptures and able to produce future ruptures independently. To evaluate the magnitude distribution and recurrence interval of the characterized earthquakes along the northwestern portion of the Xianshuihe fault zone, we develop a framework by taking into account new geologic, seismologic and geodetic information, extending the previous analysis through a keener appreciation of the "stress shadow" cast by historical events and the influence, and further developing a moment-balanced model. The result shows that all the recurrence intervals of single-segment ruptures are about 100 to 150 years,

基金项目 地震科学联合基金项目(103034)和中国地震局“十五”重点科研项目“地震安全性评价研究”共同资助.

作者简介 冉洪流,男,1965年生,副研究员,1988年毕业于中国科学技术大学,主要从事活动断裂地震危险性研究. E-mail: ranhl@tom.com

which are much shorter than the recurrence intervals of cascade ruptures and the entire fault rupture.

Key words Xianshuihe fault zone, Rupture source, Characterized earthquake, Seismic moment, Recurrence interval

1 引言

1910年 Reid^[1]在总结1906年加利福尼亚地震的机制时,提出了著名的“弹性回跳理论”,依据这一理论,当活动断裂的应力积累达到一个固定上限时地震发生,随即断裂的应力降低至一个固定的极低水平,并开始下一个循环.这一理论自提出到现今,已为越来越多的地质及地震学家所接受.

1984年,Aki及Schwartz et al.^[2,3]以该理论作为基本物理假定,提出了:原地复发大小相近的、位移及破裂尺度也大致相同的“特征地震”(characteristic earthquake)概念.特征地震概念是一种较早的破裂分段思想,他强调分段研究应注重于寻找断裂带上的“持久性”障碍体,进而对破裂尺度的预测也以“特征破裂尺度”为基础.但随后的研究及越来越多的证据显示,沿同一断裂部位地震重复破裂的尺度存在可变性.例如,1906年加州旧金山8.3级地震时沿圣安德列斯主断裂发生了约450km的破裂,但在同一断裂段上,1989年复发7.1级地震时,破裂长度仅35~40km^[4];又如,Thatcher的研究也初步揭示板缘断裂相同部位地震重复破裂尺度的可变性^[5].

基于这种重复破裂尺度的可变特征,加州地震概率工作组(WGCEP95)1995年针对走滑断裂带提出“级联”(cascade)破裂模式^[6],即强调某一断裂部位既可在一次地震中单独破裂,也可与其相连的断裂部位在某次更大的地震中同时破裂.与原先的特征地震分段模式相比,级联模式的重要性是能够准确地描述地震重复破裂尺度的可变性.1999年,加州地震概率工作组(WGCEP99)进一步完善了这一概念,即认为对于一个包含多个基本破裂单元的断裂部位或断裂带,既可能发生单一单元破裂的“单元特征地震”,亦有可能发生由两个或两个以上相连单元同时破裂的更高“级别”的“级联特征地震”,每一种可能的破裂组合(单段、多段)均称为一个破裂源(rupture source),并将这些不同级别的地震通称为“特征化地震”(characterized earthquake)^[7].

按照Reid的观点,强震的复发具有周期性^[1].特征化地震的复发间隔是指在一给定单个单元或组合单元上后继发生大小相近破坏的时间间隔,也就

是加载旋回的周期.地震的复发间隔是活动断裂地震危险性估计所采用的各种概率复发模型计算时所需的最重要的参数.目前,可用于活动断裂地震危险性估计的概率模型很多,如泊松模型(Poisson model)、经验模型(Empirical model)、布朗过程时间模型(Brownian Passage Time model)及时间可预测模型(Time-Predictable model)等,几乎所有这些概率模型在计算时都必须输入地震的复发间隔,因而他是活动断裂地震危险性估计的重要基础.

自Reid提出“弹性回跳理论”以来,地质学家和地震学家一直尝试运用包括地质、地震以及测量等多学科的综合资料和手段,进行地震复发间隔的研究,并认为地震复发间隔主要是强震复发间隔,最具代表性的例子是美国加州概率工作组近年来的工作.概率工作组(简称WG88、WG90、WG95、WG99、WG02)均吸收和利用了当时最新的资料和方法,将前人的工作推进了一大步^[4,6,7-9].WG88和WG90运用地质方法得到的长期滑动速率计算了加州圣安德列斯等断裂的强震复发间隔^[4,8];WG95建立了一个适合加州地区的级联模型,将地质和测量方法得到的滑动速率相结合,得到了多段破裂的地震复发间隔估计结果^[6];WG99和WG02通过构建矩平衡断裂破裂模型(moment-balanced fault rupture model),给出了不同尺度破裂特征化地震的复发间隔及其不确定性^[7,9].

准确评估活动断裂或某一区域,乃至全球未来所面临的地震危险有重要意义.地震复发间隔特别是强震复发间隔的研究有助于我们描绘活动断裂带未来强震的活动图像,准确估计未来的地震危险.本文以四川西部鲜水河断裂带北西段为研究对象,运用该地区的地质、地球物理、测量及地震等方面的资料,研究该断裂段不同破裂尺度的特征化强震震级分布、复发间隔及其不确定性.

2 鲜水河断裂带北西段的分段活动习性

研究区为四川西部鲜水河地区,区内鲜水河断裂带呈西北向,起自四川侏倭西北,向南东经炉霍、道孚、乾宁和康定后与安宁河断裂带相接.本文研

究该断裂带的北西段侏倭 - 乾宁部分,全长约为 230km(图 1)。已有的研究均表明:该断裂带是一条晚第四纪强烈活动的左旋走滑断裂,历史上发生多次强震^[10]。它与西北侧的甘孜 - 玉树断裂带一起,构成青藏高原东部的侧向滑移构造系统^[11]中川滇活动地块的北边界 - 羌塘地块的东北边界^[12,13]。

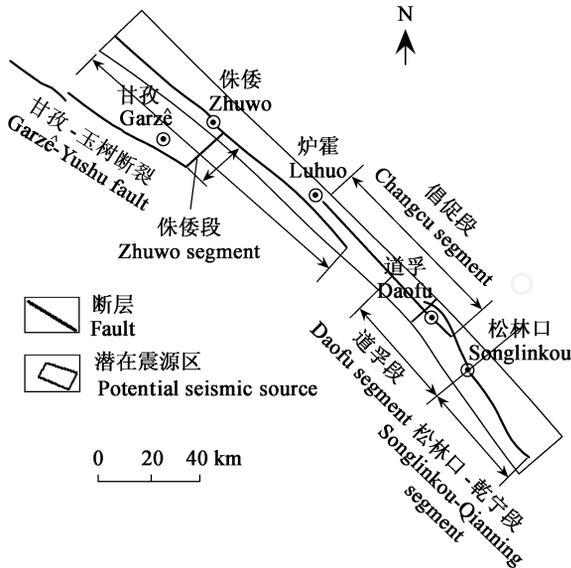


图 1 鲜水河断裂带北西段几何结构和分段

Fig. 1 Geometry structure and segmentation of the northwestern part of the Xianshuihe fault zone

断裂的分段活动性是指一条大的活动断裂带往往可以分成若干个大的段落,每一段落均可作为一个独立的基本破裂单元而发生地震破裂^[3]。鲜水河断裂北西段由炉霍、道孚断和乾宁三条次级剪切断裂组成,几何形态和内部结构都比较单一,拉分阶区内有虾拉沱、道孚两个盆地^[10]。根据断裂几何形态、地貌和活动习性以及历史地震等资料可以将北西段分为 4 段,分别为炉霍段、倡促段、道孚段和松林口 - 乾宁段^[14](图 1)。各段落之间的边界都是非持久性的,此外,炉霍段与倡促段、倡促段与道孚段的破裂均具有一定的重复部分^[14]。

侏倭段是甘孜 - 玉树断裂带和鲜水河断裂带之间甘孜拉分盆地的东南边界,走向北东,倾向北西,倾角 $55^\circ \sim 65^\circ$,为长约 20km 的正断层,历史上曾发生过 1811 年 $6 \frac{3}{4}$ 级和 1967 年 6.8 级地震。

炉霍段是鲜水河断裂带西北端的一条次级剪切断裂,长 140km,走向北 45° 左右,倾角 75° ,历史上曾发生过 1816 年 $7 \frac{1}{2}$ 级地震和 1973 年 7.6 级地震。

该断裂段与其北西面的甘孜 - 玉树断裂带左阶羽列,重叠部分长达 65km,在阶列区形成宽 22 ~ 35km 的甘孜拉分区。

倡促段长 85km,走向北 $35^\circ \sim 50^\circ$ 西,倾角在 $60^\circ \sim 85^\circ$,1923 年曾发生过 $7 \frac{1}{4}$ 级地震。该段的北西端与南西侧的炉霍段呈左旋左阶斜列,相距 1 ~ 2.5km,重叠部分长达 23km,两者相接阶区处为虾拉沱盆地。

道孚段全长为 44km,总体走向、倾角与倡促段大体一致,历史上曾发生过 1792 年 $6 \frac{3}{4}$ 级、1904 年 7 级和 1981 年 6.9 级地震。1981 年道孚 6.9 级地震的地表破裂资料表明,该段与倡促段历史上形成的道孚拉分盆地可能已经贯通。因此,该段大部分实际上为倡促段的南东部分,重合部分占到该段总长的 $\frac{3}{4}$,达 32km,但是考虑到这一部分历史上频繁发生 7 级左右的地震,故仍将其划分为一单独段落。

松林口 - 乾宁段全长 45km,断裂总体走向北 $35^\circ \sim 45^\circ$ 西,倾角在 $60^\circ \sim 80^\circ$ 之间,历史上曾发生过 1793 年 $6 \frac{1}{2}$ 级和 1893 年 $7 \frac{1}{4}$ 级地震。

3 鲜水河断裂带北西段不同尺度破裂震级大小的确定

一个地震的大小直接与断裂破裂的规模有关。根据 Wells et al.^[15] 的研究,将断裂破裂的规模用断裂的发震面积 A 表示:

$$A = LW, \quad (1)$$

其中, L 为断裂段的长度; W 为断裂段的倾向宽度。

(1) 式中,断裂段上各处的滑动速率应为一,但是,甘孜 - 玉树断裂与炉霍段、炉霍段与倡促段之间,由于分别存在甘孜和虾拉沱拉分区,实际上这 3 个断裂段上有些部位的滑动速率并不一致。图 2 是一个与甘孜和虾拉沱拉分区运动方式完全一致的拉分区滑动速率变化示意图。图 2 中,在 AA 的西北面和 BB 的南东面, F_1 和 F_2 均为南西和北东两盘分别以绝对滑动速率 20mm/a 和 10mm/a 向南东运动,相对滑动速率为 10mm/a 的视左旋活动走滑断裂,这两条活动断裂在 AA - BB 段之间形成拉分盆地。拉分盆地内,由于受北西方向的推挤和南东方向的牵引,绝对滑动速率从 AA 处 10mm/a 逐渐增大至 BB 处 20mm/a,但其与 F_1 断裂的南西盘和 F_2 断裂的北

东盘的相对滑动速率之和仍为 10mm/a. 因此,需对炉霍段、倡促段和道孚段进行断裂段上各处滑动速率的一致性等效转换,定义转换后的断裂段长度为“等效长度”. 以图 2 中 F_1 断裂为例,经等效转换后的断裂等效长度为

$$L_E = \frac{V_{AB}}{V} L_{AB} + L_{CA}, \quad (2)$$

式中, L_E 为转换后的等效长度; V_{AB} 为 AB 段的平均相对滑动速率; V 为拉分区外非重叠部分的相对滑动速率; L_{AB} 和 L_{CA} 分别为 AB 段和 CA 段的长度.

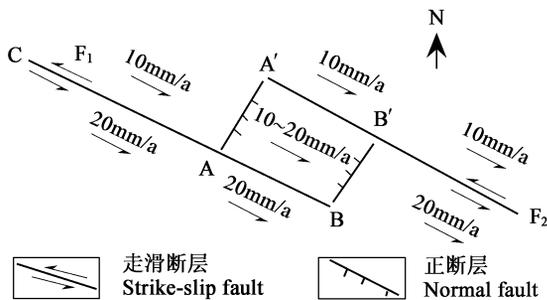


图 2 拉分区滑动速率变化示意图
Fig. 2 Sketch map of slip rate variations in the pull-apart area

根据甘孜和虾拉沱拉分区的几何结构和滑动速率资料,对于炉霍段本文取甘孜和虾拉沱拉分区内部分的滑动速率与拉分区外部分的比值分别为 0.4 和 0.8;对于倡促段,虾拉沱拉分区部分的比值为 0.2. 对于倡促段与道孚段相互重合的部分,处理方法与前述方法类似,根据这两段发生地震的大小和频次等因素,倡促段与道孚段相应的比值分别为 0.25 和 0.75.

鲜水河断裂带北西段震源深度呈北西向东南逐渐变深的趋势^[10]. 近期发生的如 1967 年侏倭 6.8 级、1973 年炉霍 7.6 级和 1981 年道孚 6.9 级地震,震源深度分别为 8, 11 和 12km. 因此可以认为,鲜水河断裂及其邻近地区的强烈地震发生在 10km 左右深度的层位内^[16].

综合鲜水河断裂带北西段所在地区地质^[10,13]、地球物理^[10,16,17]及地震精定位^[18]等方面的资料,结合图 2 所示的方法,得到这 4 个断裂段的等效断裂长度、倾向宽度等数据及其不确定性列于表 1 中.

依据 Wells et al.^[15] 的研究,运用 $M - \lg A$ 的关系得到特征化地震的震级中值. 其中, M 为面波震级; A 为发震面积,单位 km^2 . 回归数据取自加州概率工作组报告^[19],对其中有关我国的数据部分进行

表 1 4 个断裂段等效长度、倾向宽度及其不确定性
Table 1 Equivalent length, dip width and their uncertainties of four segments of the fault zone

断裂段	等效长度 (km)			宽度 (km)	
	首选值	最小	最大	首选值	90%置信区间
炉霍段	96	86	106	11	9~13
倡促段	43	38	48	12	10~14
道孚段	36	31	41	13	11~15
松林口-乾宁段	45	40	50	14	12~16

了适当修正,并在回归过程中适当增加了该部分的权重. 由于 $A < 500 \text{ km}^2$ 的数据部分离散性较大,故回归中,对 $A > 500 \text{ km}^2$ 和 $A < 500 \text{ km}^2$ 的数据分别进行回归. 其中, $A > 500 \text{ km}^2$ 有 20 个数据、 $A < 500 \text{ km}^2$ 有 15 个数据,由此得到面波震级与走滑断裂发震面积的统计关系式为

$$M = 4.5 + \lg A \quad A > 500 \text{ km}^2, \quad (3a)$$

$$M = 4.3 + \lg A \quad A < 500 \text{ km}^2, \quad (3b)$$

其中,对于式(3a)有:相关系数 $r = 0.83$,标准差 $\sigma_M = 0.21$,可通过 $\alpha = 0.01$ 相关水平检验;对于式(3b)有: $r = 0.48$, $\sigma_M = 0.27$,可通过 $\alpha = 0.05$ 相关水平检验.

每一种可能的基本破裂单元组合都是一个破裂源,对于一条具有 n 个基本破裂单元的断裂,可能产生的不同尺度的破裂源数目 m 为 $m = n(n+1)/2$ ^[6]. 因此,对于可分成 4 个段落的鲜水河断裂带北西段共有 10 个具有不同尺度的破裂源. 根据上述给出的方法、以及误差传播理论,我国特征化地震的复发特点和 4 个段落的等效长度和宽度数据,得到 10 个破裂源的发震面积、震级大小及其不确定性(95%置信区间),列于表 2 中.

4 各破裂源特征化地震的复发间隔及震级分布

由于缺乏历史地震和古地震资料,有关强震复发间隔的信息非常有限. 但是,由滑动速率资料可以得到各特征化断裂段上地震矩 M_0 的释放情况. 地震矩 M_0 具有明确的物理意义,他是震源的等效双力偶中的一个力偶的力偶矩,单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$,最新研究表明其表达式为^[20]

$$M_0 = \mu^* AS, \quad (4)$$

式中 S 为震源断裂发震面积上的平均位错量,当 S 为断裂的滑动速率时,上式所得结果为该断裂的地震矩年累计率 \dot{M} ; μ^* 为有效剪切模量,对于一个非均匀介质的断层有

表 2 各破裂源发震面积、震级大小及其不确定性

Table 2 Seismogenic areas, magnitudes and their uncertainties of rupture sources

破裂源	发震面积 (km ²)			震级		
	中值	2.5 %	97.5 %	中值	2.5 %	97.5 %
炉霍	1056	798	1314	7.53	7.27	7.71
倡促	516	396	636	7.21	6.90	7.39
道孚	468	358	578	6.97	6.70	7.26
松林口 - 乾宁	630	500	760	7.30	7.10	7.46
炉霍 + 倡促	1572	1287	1857	7.70	7.52	7.84
倡促 + 道孚	984	821	1147	7.49	7.33	7.63
道孚 + 松林口 - 乾宁	1098	928	1268	7.54	7.40	7.66
炉霍 + 倡促 + 道孚	2040	1735	2345	7.81	7.67	7.93
倡促 + 道孚 + 松林口 - 乾宁	1614	1406	1822	7.71	7.59	7.81
炉霍 + 倡促 + 道孚 + 松林口 - 乾宁	2670	2338	3002	7.93	7.81	8.03

$$\mu^* = \bar{\mu} \left[1 - \left(\frac{\mu}{2\bar{\mu}} \right)^2 \right], \quad (5)$$

式中, $\bar{\mu}$ 为平均剪切模量, μ 为剪切模量波动的大小. 综合考虑鲜水河断裂带所处的地区、滑动速率及断裂带结构等, 本文中 μ^* 取 $3.3 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$. 根据徐锡伟等^[21] 的研究, 鲜水河断裂带北西段的左旋滑动速率为 $14 \pm 2 \text{ mm/a}$. 在使用滑动速率计算各断裂段的地震矩率时, 需扣除蠕滑分量. 据李天祜等^[10] 的研究, 鲜水河断裂带的蠕滑速率很小, 一般不超过 1 mm/a . 因此, 这里取鲜水河断裂带北西段黏滑速率为 $13 \pm 2 \text{ mm/a}$. 根据 Geller^[22] 的研究有

$$\lg M_0 = M_s + 18.89 \quad M < 6.76, \quad (6a)$$

$$\lg M_0 = 1.5 M_s + 15.51 \quad 6.76 < M < 8.12, \quad (6b)$$

根据表 2 所给出的各破裂源的特征化震级大小, 由 (6) 式可以得到各破裂源发生特征化地震所释放的地震矩. 如果能够得到特征化破裂源用于发生特征化地震的地震矩累积率, 则该破裂源发生的特征化地震的复发间隔为

$$T_i = \frac{1}{\dot{M}_i} = \frac{\bar{M}_{0i}}{\dot{M}_{0i}}, \quad (7)$$

式中, T_i 为第 i 个特征化破裂源的特征化地震复发间隔; \dot{M}_i 为第 i 个特征化破裂源的特征化地震的年发生率; \bar{M}_{0i} 为第 i 个特征化破裂源发生特征化地震所释放的地震矩; \dot{M}_{0i} 为第 i 个特征化破裂源用于发生特征化地震的地震矩累积率.

鲜水河断裂带北西段 10 个不同尺度破裂源所产生的特征化地震复发间隔的计算流程如图 3

所示.

具体计算过程如下:

(1) 各断裂段的地震矩年平均累积率和各破裂源特征化地震释放的地震矩

由前述鲜水河断裂带北西段的黏滑速率 $13 \pm 2 \text{ mm/a}$ 、4 个断裂段的发震面积 (表 2) 和公式 (4), 得到各断裂段的地震矩年平均累积率, 其中, 炉霍段为 $4.53 \times 10^{17} \text{ (N} \cdot \text{m/a)}$; 道孚段为 $2.0 \times 10^{17} \text{ (N} \cdot \text{m/a)}$. 由表 2 中给出的 10 个破裂源的特征化震级数据和公式 (6a, 6b), 得到各破裂源发生特征化地震所释放的地震矩. 其中, 炉霍段为 $6.38 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$; 道孚段为 $9.23 \times 10^{18} \text{ N} \cdot \text{m}$.

(2) 各断裂段余震和小地震地震矩年平均释放率

扣除蠕滑速率后断裂段上累积的地震矩, 以特征化地震、中强地震 ($4.7 < M < 6.7$)、余震和小地震的形式释放. 根据断裂段的震源深度、倾向和倾角, 确定断裂的发震面在地表的投影范围, 用以计算该断裂段的余震和小地震的地震矩年平均释放率. 本文以中国地震动参数区划图潜在震源区划分综合方案中的炉霍和道孚潜在震源区为统计范围^[23], 计算这 4 个断裂段的余震和小地震的地震矩年平均释放率. 计算表明, 道孚段的中强地震、余震和小地震的地震年平均释放率约占该断裂段地震矩年平均累积率的 30% 左右, 松林口 - 乾宁段为 10% 左右, 炉霍和道孚段约为 4% ~ 6%. 由于资料的限制, 这一结果的不确定性较大. 因此, 在下面的计算中, 道孚段余震和中、小地震的地震矩年平均释放率占该断裂

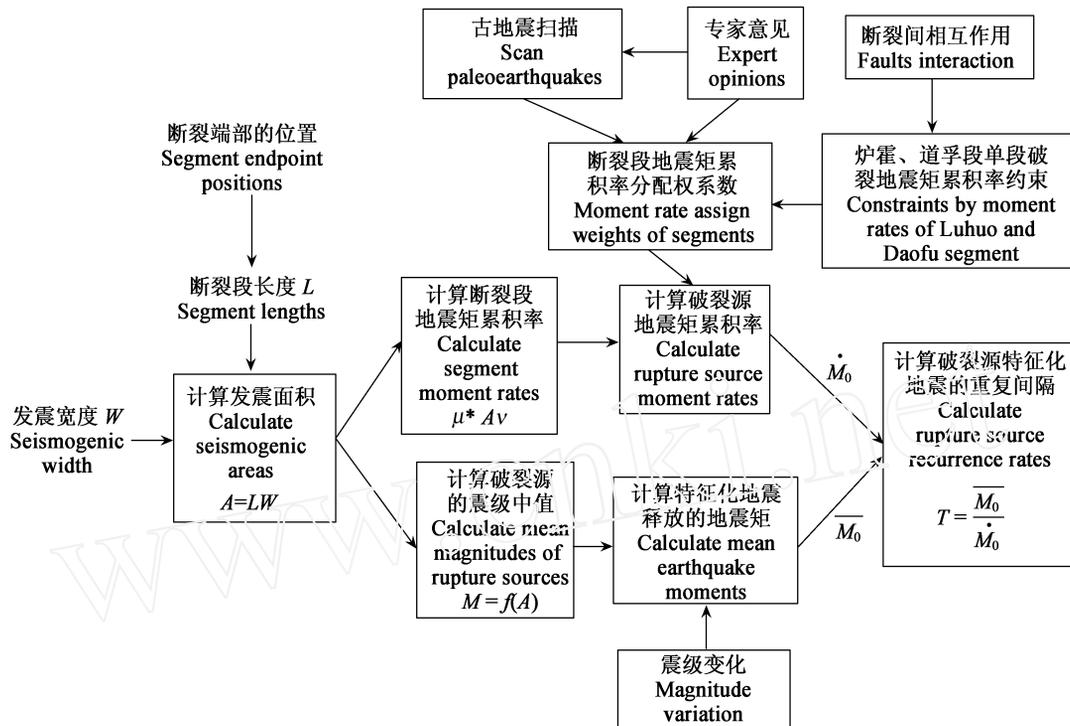


图 3 破裂源特征化地震复发间隔计算步骤流程

Fig. 3 Schematic flow-chart illustrating the steps taken to calculate long-term average rupture source rates

段地震矩年平均累积率的百分比取为 30%，松林口 - 乾宁段为 10%，炉霍和道孚段均为 5%。

(3) 恰叫地震与侏倭地震诱发的 Coulomb 静应力对炉霍段和道孚段的影响

鲜水河断裂带强震频繁，断裂段之间相接或相互重叠。因此，应考虑各大地震诱发的 Coulomb 静应力场变化对后续地震发生时间的影响。

对于炉霍段，自上一次 1816 年 7 1/2 级地震至最近 1973 年 7.6 级地震的 157 年间，在其临近的倡促段和侏倭段上分别发生过 1923 年恰叫 7 1/4 级和 1967 年侏倭 6.8 级地震。对于道孚段，自上一次 1904 年 7 级地震至最近 1981 年 6.9 级地震的 77 年间，在其临近的倡促段和炉霍段上分别发生过 1923

年恰叫 7 1/4 级和 1973 年炉霍 7.6 级地震。这些地震的震源参数^[16,24]列于表 3 中。

依据弹性半空间地震位错理论，运用 Toda S 编写的 Coulomb 2.5 程序^[25]，计算了侏倭、恰叫和炉霍地震位错所产生的 Coulomb 静应力场变化。计算表明，在炉霍左旋走滑断裂上，由恰叫和侏倭地震诱发的静应力共增加了 0.35MPa；在道孚断裂上，由恰叫和炉霍地震诱发的静应力共增加了 0.05MPa。由此，通过计算^[26]，1973 年炉霍地震和 1981 年道孚地震分别被提前了 43 年和 2 年。进而得到炉霍段发生震级为 7.6 级的单段破裂复发间隔为 200 年；道孚段发生震级为 6.9 级的单段破裂复发间隔为 79 年。

(4) 含道孚段破裂源特征化地震复发间隔的

表 3 恰叫、炉霍以及侏倭地震震源参数

Table 3 Seismic source parameters of the Qajiao, Luhuo and Zhuwo earthquakes

地震	震中		深度 (km)	走向 (°)	倾角 (°)	位移 (m)	
	北纬 (°)	东经 (°)				水平	垂直
恰叫	31.300	100.800	12	116	90	3.0	0
炉霍	31.500	100.240	11	306	84	4.0	0
侏倭	31.630	102.232	8	245	45	0.64	0.23

确定

道孚断裂段历史上曾于 1792 年、1904 年和 1981 年发生过单段破裂,震级分别为 $6\frac{3}{4}$ 级、7 级和 6.9 级,间隔分别为 112 年、77 年。将仪器记录得到的较为精确的道孚段 1981 年发生的地震震级 6.9 代入 (4) 式,所得结果为 $7.24 \times 10^{18} \text{ N} \cdot \text{m}$,再除以前述得到的 6.9 级地震的时间间隔 79 年,即得到了道孚段发生单段破裂特征化地震的地震矩年平均释放率为 $9.16 \times 10^{16} \text{ N} \cdot \text{m}$ 。结果表明,该断裂段单段破裂特征化地震的地震矩释放率占该段地震矩年累积率的比例为 46%。

将某一断裂段的地震矩年累积率分配到该断裂段所参与的所有不同尺度的破裂源,应遵循“矩率平衡”的原则^[9]。“矩率平衡”的原则之一为:对于某一断裂段,分配到含该断裂段的所有破裂源的地震矩率与该断裂段小地震和余震的地震矩释放率之和,应等于该断裂段的地震矩年累积率。显然,道孚段扣除中强地震、余震和小地震的地震矩释放率 (30%)、单段破裂所释放的地震矩率 (46%) 后,剩余 24% 的地震矩累积率可供其他破裂源分配。

除单段破裂外,其他含道孚断裂段的不同级联破裂源还有 5 个 (表 4)。炉霍段与倡促段之间的岩桥区-虾拉沱盆地的东南端宽度仅有约 1km;道孚盆地则可能在 1981 年的道孚地震中已被贯通^[10]。

表 4 各破裂源地震矩率分配权系数一览表

Table 4 Assigned weights to moment rates for rupture sources

破裂源	地震矩率分配权系数 (%)			
	炉霍段	倡促段	道孚段	松林口-乾宁段
炉霍	90			
倡促		68		
道孚			46	
松林口-乾宁				89
炉霍+倡促	3	3		
倡促+道孚		22	22*	
道孚+松林口-乾宁			0*	0
炉霍+倡促+道孚	1	1	1*	
倡促+道孚+松林口-乾宁		0	0*	0
炉霍+倡促+道孚+松林口-乾宁	1	1	1*	1
中强地震+余震+小地震	5	5	30	10
合计	100	100	100	100

注: * 为根据专家意见给出的结果。

因此,鲜水河断裂带北西段的各次级断裂存在发生联合破裂的可能。但是,由于缺乏断裂精细结构的研究和完整的历史地震、古地震资料,将道孚段剩余的 24% 地震矩累积率合理地分配到这 5 个不同的破裂源上十分困难。为解决这一问题,本文采用“专家意见”的方法,即综合数个地质学家根据这 4 个断裂段的古地震图像、端部构造类型等特征给出的意见,经加权计算得到道孚段剩余的 24% 地震矩累积率分配到这 5 个不同破裂源的权重 (见表 4)。

(5) 炉霍段、倡促段及松林口-乾宁段相关破裂源特征化地震复发间隔的确定

炉霍段历史上曾于 1816 年、1973 年发生过单段破裂,震级分别为 $7\frac{1}{2}$ 级、7.6 级,间隔 157 年。依照前述道孚段的做法,得到该断裂段单段破裂特征化地震的地震矩释放率占该段地震矩年累积率的比例为 90%。

“矩率平衡”的原则之二^[9]为同一破裂源中各断裂段的地震矩率分配权系数相同。依据这条原则及前述得到的道孚段的结果,可知破裂源倡促+道孚、炉霍+倡促+道孚以及炉霍+倡促+道孚+松林口-乾宁中其他各段的权系数。最后,通过简单的推算即可以得到剩余的破裂源即倡促、松林口-乾宁以及炉霍+倡促中各段的结果,见表 5。

根据上述得到的各破裂源中各断裂段地震矩累积率分配权系数及公式 (7),得到各破裂源特征化地震的复发间隔或年发生率,同时由误差理论给出复发间隔或年发生率的不确定性。

如果假定表 2 中所有不同破裂源的特征化地震震级分布均符合均值为 0 的正态分布,即

$$f_i(M) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(M - M_i)^2}{2\sigma_i^2}\right], \quad (8)$$

其中, $f_i(M)$ 为第 i 个破裂源的特征化地震长期震级分布; M_i 为第 i 个破裂源的特征化地震的震级中值; σ_i 为第 i 个破裂源的特征化地震震级分布的剩余标准差。那么,根据表 5 中给出的各破裂源特征化地震的年发生率、中国地震动参数区划图潜在震源区划分综合方案给出的炉霍和道孚潜源的地震活动性参数,可以得到鲜水河断裂带北西段中小地震 ($4.0 \leq M < 6.7$)、特征化地震的震级累计频度的联合分布,见图 4。

5 问题与讨论

(1) 确定活动断裂不同破裂源特征化地震的复

表 5 各破裂源特征化地震长期发生率和复发间隔

Table 5 Long-term occurrence rates and recurrence intervals of rupture sources

破裂源	发生率 (a^{-1})			复发间隔 (a)		
	中值	2.5 %	97.5 %	中值	2.5 %	97.5 %
炉霍	0.0064	0.0034	0.0156	157	64	293
倡促	0.0071	0.0038	0.0208	141	48	262
道孚	0.0099	0.0036	0.0238	101	42	274
松林口 - 乾宁	0.0083	0.0048	0.0167	120	60	208
炉霍 + 倡促	0.00018	0.00011	0.00033	5678	3049	9209
倡促 + 道孚	0.0017	0.0010	0.0029	600	345	973
道孚 + 松林口 - 乾宁	-	-	-	-	-	-
炉霍 + 倡促 + 道孚	0.00005	0.00003	0.00008	19208	11843	29073
倡促 + 道孚 + 松林口 - 乾宁	-	-	-	-	-	-
炉霍 + 倡促 + 道孚 + 松林口 - 乾宁	0.00004	0.00003	0.00007	22687	14989	32047

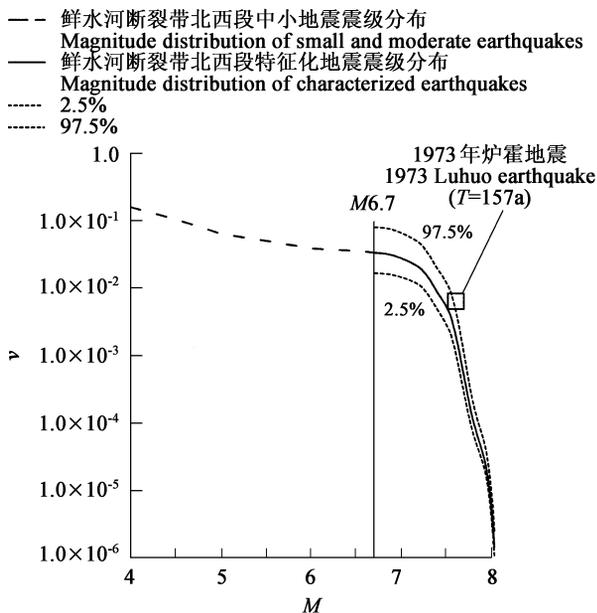


图 4 鲜水河断裂带北西段中小地震与特征化地震震级联合分布

Fig. 4 Coalescence magnitude distribution of small, moderate and characterized earthquakes on the northwestern section of the Xianshuihe fault zone

发间隔,最为关键和困难的问题是如何确定各断裂段的地震矩累积率分配到各破裂源的比例。由于缺乏历史地震资料,美国加州概率工作组(WG02)的做法是完全依赖专家意见^[9]。

与美国不同,我国拥有世界上最为悠久和完整的历史地震记录。以炉霍段为例,本文运用几乎无

误差的历史地震资料(发震时间),考虑断裂段之间的相互作用,较为准确地得到该断裂段单段破裂释放的地震矩率占该段地震矩累积率的比例(90%),再扣除中小地震和余震的地震矩释放率(5%)后,依赖专家意见进行分配的地震矩累积率仅为5%,这样就大大减少了人为因素导致的不确定性,提高了所得结果的准确性。

今后,这一问题的解决取决于包括古地震、断裂强度和断裂端部结构等方面在内的断裂活动性研究的深入。

(2) 限于资料和研究程度的限制,本文仅给出了鲜水河断裂带北西段强震震级及复发间隔的初步结果。鲜水河断裂带北西段仅有各次级断裂单段破裂的历史记录。因此,若要像日本西南地区 Nankai 断裂^[27]那样精确描述该带未来某一时段(100a、500a)的强震活动图像,需确定其他可能的破裂源最近一次的发震时间,以及全面考虑各破裂源地震位错对其他破裂源的影响,包括静应力、动应力及黏弹性松弛等。

致谢 本研究使用了 Toda S 编写的 Coulomb 2.5 程序,成文过程中与闻学泽、周本刚、韩竹军、闵伟和周荣军等教授进行了有益的探讨,审者对本文提供了参考资料和修改意见。在此一并致谢!

参考文献 (References)

- [1] Reid H F. On mass-movements in tectonic earthquakes. In: The California Earthquake of April 18, 1906: Report of the State Earthquake Investigation Commission. Washington D C: Carnegie

- Institution of Washington, 1910
- [2] Aki K. Asperities, barriers, characteristic earthquakes and strong motion prediction. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**: 5867 ~ 5892
- [3] Schwartz D P, Coppersmith K J. Fault behavior and characteristic earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas Fault Zones. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**: 5681 ~ 5698
- [4] Working Group on California Earthquake Probabilities. Probabilities of Large Earthquakes in the San Francisco Bay Region, California. U. S. Geological Survey Circular 1053, 1990. 51
- [5] Thatcher W. Order and diversity in the modes of Circumpacific earthquake recurrence. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**: 2609 ~ 2623
- [6] Working Group on California Earthquake Probabilities. Seismic hazards in Southern California: probable earthquakes, 1995 - 2024. *Bull. Seis. Soc. Amer.*, 1995, **85**: 379 ~ 439
- [7] Working Group on California Earthquake Probabilities. Earthquake probabilities in the San Francisco Bay Region: 2000 to 2030. USGS Open-File Rept, 1999, 99 ~ 517
- [8] Working Group on California Earthquake Probabilities. Probabilities of large earthquakes occurring in California on the San Andreas fault, U. S. Geological Survey Open-File Report, 1988, 88 ~ 398
- [9] Working Group on California Earthquake Probabilities. Earthquake probabilities in the San Francisco Bay Region: 2002 to 2031. USGS Open-File Rept, 2003, 03 ~ 214
- [10] 李天祚, 杜其方, 游泽李等. 鲜水河活动断裂带及强震危险性评估. 成都: 成都地图出版社, 1997. 1 ~ 230
Li T S, Du Q F, You Z L, et al. Xianshuihe Active Fault Zone and Its Seismic Hazard Assessment (in Chinese). Chengdu: Chengdu Map Press, 1997. 1 ~ 230
- [11] Tapponnier P, Peltzer G, LeDain A Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 1982, **10**(12): 611 ~ 616
- [12] 张培震, 邓起东, 张国民等. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学(D 辑), 2003, **33**(增刊): 12 ~ 20
Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, et al. The strong earthquake and active block in the mainland of China. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2003, **33**(Suppl.): 12 ~ 20
- [13] 张国民, 马宏生, 王辉等. 中国大陆活动地块边界带与强震活动. 地球物理学报, 2005, **48**(3): 602 ~ 610
Zhang G M, Ma H S, Wang H, et al. Boundaries between active-tectonic blocks and strong earthquakes in the China mainland. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(3): 602 ~ 610
- [14] 闻学泽. 四川西部鲜水河-安江河-则木河断裂带的地震破裂分段特征. 地震地质, 2000, **22**(3): 239 ~ 249
Wen X Z. Character of rupture segmentation of the Xianshuihe-Anninghe-Zemuhe fault zone. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2000, **22**(3): 239 ~ 249
- [15] Wells D L, Coppersmith K J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seis. Soc. Amer.*, 1994, **84**(4): 974 ~ 1002
- [16] 王椿镛, 韩渭宾, 吴建平等. 松潘-甘孜造山带地壳速度结构. 地震学报, 2003, **25**(3): 229 ~ 241
Wang C Y, Han W B, Wu J P, et al. Crustal structure beneath the Songpan-Ganzi orogenic belt. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2003, **25**(3): 229 ~ 241
- [17] 高星, 王为民, 姚振兴. 中国及临近地区地壳结构. 地球物理学报, 2005, **48**(3): 591 ~ 601
Gao X, Wang W M, Yao Z X. Crustal structure of China mainland and its adjacent regions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(3): 591 ~ 601
- [18] 朱艾斓, 徐锡伟, 周永胜等. 川西地区小震重新定位及其活动构造意义. 地球物理学报, 2005, **48**(3): 629 ~ 636
Zhu A L, Xu X W, Zhou Y S, et al. Relocation of small earthquakes in western Sichuan, China and its implications for active tectonics. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(3): 629 ~ 636
- [19] Working Group on California Earthquake Probabilities. Earthquake probabilities in the San Francisco Bay Region: 2002 to 2031. USGS Open-File Rept, Appendices 2003, 3 ~ 214
- [20] Wu Z L, Chen Y T. Definition of seismic moment at a discontinuity interface. *Bull. Seis. Soc. Amer.*, 2003, **93**(4): 1832 ~ 1834
- [21] 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章等. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源. 中国科学(D 辑), 2003, **33**(增刊): 151 ~ 162
Xu X W, Wen X Z, Zheng R Z, et al. The newest geologic movement pattern and dynamical origin of the active block of Chuan-dian region. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2003, **33**(Suppl.): 151 ~ 162
- [22] Geller R J. Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes. *Bull. Seis. Soc. Amer.*, 1976, **66**: 1501 ~ 1523
- [23] 胡聿贤, 高孟潭, 徐宗和等. 中国地震动参数区划图. 北京: 中国标准出版社, 2001. 1 ~ 2
Hu Y X, Gao M T, Xu Z H, et al. Seismic Ground Motion Parameter Zonation Map of China. Beijing: Criterion Press of China, 2001. 1 ~ 2
- [24] Papadimitriou E, Wen X Z, Karakostas V, et al. Earthquake triggering along the Xianshuihe fault zone of western Sichuan, China. *Pure Appl. Geophys.*, 2004, **161**: 1683 ~ 1707
- [25] Toda S, Stein R S. Response of the San Andreas fault to the 1983 Coalinga-Nunez earthquakes: An application of interaction-based probabilities for Parkfield. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(B4): 11029 ~ 11044
- [26] Toda S, Stein R S, Resenberg P A, et al. Stress transferred by the 1995 $M_w = 6.9$ Kobe, Japan, shock: Effect on aftershocks and future earthquake probabilities. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(B10): 24543 ~ 24565
- [27] Mitsui N, Hirahara K. Simple spring-mass model simulation of earthquake cycle along the Nankai Trough in Southwest Japan. *Pure Appl. Geophys.*, 2004, **161**: 2433 ~ 2450

(本文编辑 胡素芳)