

时间相依模型与泊松模型计算结果的对比分析 ——以道孚及炉霍潜源为例

冉洪流

(中国地震局地质研究所, 北京 100029)

摘要 运用时间相依的布朗过程时间模型和泊松模型, 分别计算了炉霍潜源和道孚潜源 $7.0 \leq M < 7.5$ 和 $7.5 \leq M < 8.0$ 震级档未来 50a 的发震概率, 并将其与根据中国地震动参数区划图(2001)潜在震源区划分综合方案且运用分档泊松模型所得的计算结果进行对比分析。结果表明: ①应用地震矩率方法得到的各断裂段特征化地震复发间隔, 无论是 BPT 模型或泊松模型所得到的炉霍和道孚潜源在 $7.0 \leq M < 7.5$ 震级档的发震概率计算结果, 均远大于根据中国地震动参数区划图(2001)潜在震源区划分综合方案所得的计算结果; ②对于使用同样的由地震矩率方法得到的各断裂段特征化地震复发间隔数据, BPT 模型和泊松模型所得的计算结果也不相同。

关键词: 时间相依 BPT 模型 泊松模型

引言

时间相依的 (time-dependent) 发震概率评估方法亦可称为地震复发危险的“实时”(real-time) 概率评估方法。这种方法假定强震或大震原地复发遵从有关物理模型 (特征地震模型、准周期模型及时间可预报模型等), 而这些地震复发模型均以“弹性回跳”及“地震轮回”(Reid, 1910) 理论为基础。因此, 基于现阶段对地震原地复发物理机制的认识, 时间相依的地震危险性概率评估思想与人们对地震复发机理的普遍理解相一致, 故已受到越来越多的广泛重视。如 2003 年美国加州概率工作组 WG02 (Working Group on California Earthquake Probabilities) 运用布朗过程时间模型 (Brownian Passage Time model, 以下简称 BPT 模型) 及时间可预测模型 (Time-Predictable model) 等时间相依概率模型, 计算了旧金山湾地区 (San Francisco Bay Region) 未来 30 年 (2002—2031 年) $M \geq 6.7$ 级地震的发震概率, 并将其应用到该地区的地震区划、地震保险、结构加固及规范制定等工作中 (Working Group on California Earthquake Probabilities, 2003)。

本文以位于鲜水河断裂带北西段的炉霍和道孚潜在震源区为例, 根据该地区的活断层运

[收稿日期] 2006-06-13

[作者简介] 冉洪流, 男, 生于 1965 年。1988 年毕业于中国科学技术大学地球物理专业, 副研究员。目前主要从事活动断裂地震危险性评价研究。E-mail: ranhl@tom.com

动、地震及地球物理场资料所得到的各断裂段特征化地震的复发间隔(冉洪流等, 2006), 运用时间相依的 BPT 模型分别计算了炉霍潜源和道孚潜源 $7.0 \leq M < 7.5$ 和 $7.5 \leq M < 8.0$ 震级档未来 50a 的发震概率, 并将其与根据中国地震动参数区划图(2001)潜在震源区划分综合方案且运用分档泊松模型所得的计算结果进行对比分析。

1 鲜水河断裂带北西段的分段活动性

本文选定的潜在震源区位于四川西部鲜水河断裂带的北西段, 全长约 230km(图 1)。鲜水河断裂带西北起自四川侏倭西北, 向南东经炉霍、道孚、乾宁和康定后与安宁河断裂带相接。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(李天昭等, 1997)。它与西北侧的甘孜-玉树断裂带一起, 构成了青藏高原东部的侧向滑移构造系统(Tapponnier, et al., 1982)和川滇活动地块的北边界、羌塘地块的东北边界(张培震等, 2003; 张国民等, 2005)。

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(Schwartz, et al., 1984)。鲜水河断裂北西段由炉霍、道孚和乾宁 3 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(李天昭等, 1997)。根据断裂几何形态、地貌和活性以及历史地震等资料可以将北西段分为 4 段(闻学则, 2000), 它们分别为炉霍段、倡促段、道孚段和松林口-乾宁段(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。炉霍潜源包括炉霍段和倡促段, 道孚潜源包括道孚段和松林口-乾宁段。

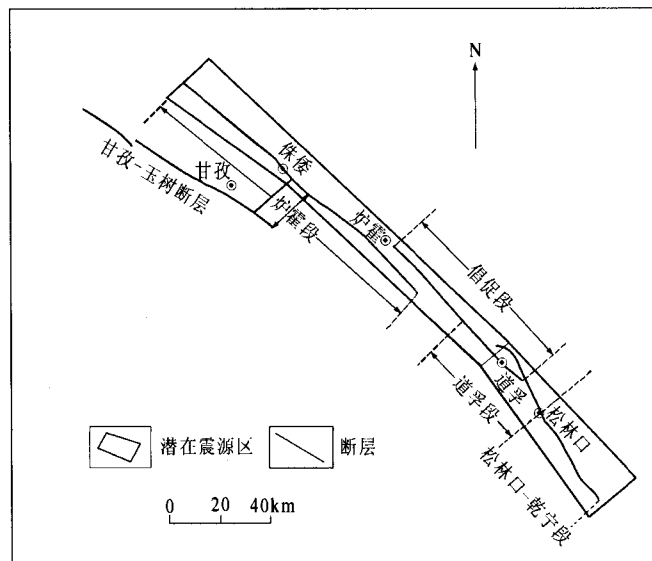


图 1 鲜水河断裂带北西段几何结构和分段

Fig. 1 Geometrical structure and segmentation of the northwestern segment of Xianshuihe fault zone

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° 西左右, 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°—50°西, 倾角 60°—85°, 历史上 1923 年曾发生过 7¼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 44km, 总体走向、倾角与倡促段大体一致, 历史上曾发生过 1792 年 6¾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被贯通。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 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, 故仍将其划分为单独段落。

松林口-乾宁段全长 45km, 断裂总体走向北 35°—45°西, 倾角在 60°—80°之间, 历史上曾发生过 1793 年 ≥6½级和 1893 年 7¼级地震。

2 概率模型

对于某个潜在震源区若有 N 条发震断裂, 且第 n 条断裂震级为 $m_j \pm 1/2 \Delta m$ 的发震概率以 $P_n(m_j)$ 表示, 则该潜源震级为 $m_j \pm 1/2 \Delta m$ 总的发震概率表示为:

$$P(m_j) = 1 - \prod_n (1 - P_n(m_j)) \quad (1)$$

2.1 时间相依模型

这里选用反映活动断裂上强震孕育与发生内在物理机制的模型——布朗过程时间模型 (Ellsworth, 1999; Matthews, 2002), 描述潜源内各段未来强震发生的危险性, 即

$$f(t) = \sqrt{\frac{\mu}{2\pi\alpha^2 t^3}} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\alpha^2 \mu t}\right] \quad (2)$$

式中, μ 为活动断裂强震复发间隔的中值; α 为强震复发间隔的变异系数。

设某活动断裂段自上一次地震以来经过的离逝时间为 t_e , 若已知直到 t_e 时刻地震仍未发生, 则在 t_e 至 $t_e + \Delta t$ 之间发震的条件概率 P_c 为:

$$P_c(t_e \leq t \leq t_e + \Delta t) = \frac{F(t_e + \Delta t) - F(t_e)}{1 - F(t_e)} \quad (3)$$

式中, Δt 为预测时段长度; $F(t_e)$ 和 $F(t_e + \Delta t)$ 分别表示自上一次地震以来经过 t_e 或 $t_e + \Delta t$ 时间长度的累积概率, 即

$$F(u) = \int_0^u f(t) dt \quad (4)$$

式中, $f(t)$ 是地震复发间隔的概率密度函数。

当上一次地震的发震时刻未知时, BPT 模型蜕化为泊松模型 (Matthews, 2002)。

2.2 分档泊松模型

采用中国地震动参数区划图 (2001) 的技术思路, 即假定地震带的地震活动时间过程符合分段泊松过程, 年平均发生率为 ν , 则 t 年内第 l 个潜在震源区在震级为 $m_j \pm 1/2 \Delta m$ 的地震发生概率 P_{l,m_j} 为:

$$P_{l,m_j} = 1 - e^{-\nu f_{l,m_j} t} \quad (5)$$

式中, f_{l,m_j} 为地震空间分布函数, 其含意是一次震级为 $m_j \pm 1/2 \Delta m$ 的地震落在第 l 个潜在震源区内的概率。

3 参数及计算结果

根据冉洪流等人(2006)的研究, 鲜水河断裂带北西段各段的特征化震级、复发间隔及不确定性和离逝时间等列于表 1。

表 1 各断裂段震级大小、复发间隔及其不确定性

Table 1 Magnitudes, recurrence intervals and their uncertainties and elapse time along different faults

破裂源	震 级			复发间隔 (a)			离逝时间 (a)
	中值	2.5%	97.5%	中值	2.5%	97.5%	
炉霍	7.53	7.27	7.71	157	64	293	33
倡促	7.21	6.90	7.39	141	48	262	83
道孚	6.97	6.70	7.26	101	42	274	25
松林口—乾宁	7.30	7.10	7.46	120	60	208	113
炉霍+倡促	7.70	7.52	7.84	5678	3049	9209	—
倡促+道孚	7.49	7.33	7.63	600	345	973	—
道孚+松林口—乾宁	7.54	7.40	7.66	—	—	—	—
炉霍+倡促+道孚	7.81	7.67	7.93	19208	11843	29073	—
倡促+道孚+松林口—乾宁	7.71	7.59	7.81	—	—	—	—
炉霍+倡促+道孚+松林口—乾宁	7.93	7.81	8.03	22687	14989	32047	—

运用 BPT 模型对表 1 中各断裂段每一种可能的破裂组合未来 50 年的发震概率进行计算, 同时考虑每一种可能的破裂组合的震级分布。炉霍和道孚潜源计算的是 $7.0 \leq M < 7.5$ 和 $7.5 \leq M < 8.0$ 震级档的发震概率, 计算结果列于表 2。

对于泊松模型, 根据表 1 及中国地震动参数区划图(2001)潜在震源区划分综合方案的结果, 依据(5)式给出了炉霍和道孚潜源计算的是 $7.0 \leq M < 7.5$ 和 $7.5 \leq M < 8.0$ 震级档的发震概率, 计算结果亦分别列于表 2。

表 2 泊松模型和 BPT 模型计算得到的各断裂段未来 50a 特征化地震发震概率

Table 2 Characterized earthquake probabilities derived from BPT and Poisson models respectively along faults in future 50a

潜源	破裂源	BPT 模型		泊松模型 ^a		泊松模型 ^b	
		7.0—7.4	7.5—8.0	7.0—7.4	7.5—8.0	7.0—7.4	7.5—8.0
炉霍	炉霍	0.099	0.154	0.107	0.166	—	—
	倡促	0.387	0.019	0.284	0.002	—	—
	炉霍+倡促	0.0	0.0	0.0	0.009	—	—
	倡促+道孚	0.006	0.005	0.033	0.024	—	—
	炉霍+倡促+道孚	0.0	0.0	0.0	0.003	—	—

续表

潜源	破裂源	BPT 模型		泊松模型 ^a		泊松模型 ^b	
		7.0—7.4	7.5—8.0	7.0—7.4	7.5—8.0	7.0—7.4	7.5—8.0
炉霍	倡促+道孚+松林口-乾宁	—	—	—	—	—	—
	炉霍+倡促+道孚+松林口-乾宁	0.0	0.0	0.0	0.002	—	—
	全概率	0.451	0.174	0.382	0.199	0.050	0.067
道孚	道孚	0.183	0.0	0.162	0.0	—	—
	松林口-乾宁	0.461	0.006	0.336	0.004	—	—
	倡促+道孚	0.003	0.002	0.011	0.012	—	—
	道孚+松林口-乾宁	—	—	—	—	—	—
	炉霍+倡促+道孚	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—
	倡促+道孚+松林口-乾宁	—	—	—	—	—	—
	炉霍+倡促+道孚+松林口-乾宁	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—
	全概率	0.561	0.008	0.450	0.016	0.045	0.058

注: 泊松模型^a为运用表 1 中的计算参数所得结果; 泊松模型^b为运用中国地震动参数区划图(2001)潜在震源区综合方案的计算参数所得结果。

4 分析及讨论

从表 2 所列由 BPT 模型和泊松模型所得计算结果表明:

(1) 应用地震矩率方法得到的各断裂段特征化地震复发间隔, 无论是 BPT 模型或泊松模型所得到的炉霍和道孚潜源在 $7.0 \leq M < 7.5$ 震级档的发震概率计算结果, 均远大于根据中国地震动参数区划图(2001)潜在震源区划分综合方案所得的计算结果。从这两个潜源所在各断裂段的历史地震、古地震及滑动速率等方面分析, 中国地震动参数区划图(2001)潜在震源区划分综合方案低估了这些断裂的活动性。其主要原因是, 中国地震动参数区划图(2001)潜在震源区划分综合方案中确定空间分布函数的诸因子没有定量地考虑断裂的活动性, 仅由一些与断裂活动性关系模糊的因素(如: 条带、小地震活动性等)间接得到潜源的大震复发间隔, 因而难以正确反映断裂的真实活动特点。

(2) 对于使用同样的由地震矩率方法得到的各断裂段特征化地震复发间隔数据, BPT 模型和泊松模型所得的计算结果也不相同。BPT 模型和泊松模型对断裂危险性评价的适宜性较为复杂。一般而言, 对于刚刚发生大震的断裂, 泊松模型的计算结果是当前所有活动断裂地震危险性评价模型中最高的; 当离逝时间(距上一次地震的时间)接近或远大于断裂段上特征化地震的复发间隔时, 时间相依模型的结果显著高于泊松模型的结果。因此, 时间相依模型和泊松模型对地震危险性评价的适宜性还需仔细研究。

此外, 在中国地震动参数区划图(2001)潜在震源区划分综合方案中, 道孚潜源的震级上限为 8 级, 而根据由断裂发震面积与震级的关系所得到的结果(冉洪流等, 2006), 道孚潜源特征化地震的最大震级中值(松林口-乾宁段)为 7.30, 考虑到该震级的标准差(0.09)及缺乏道孚段和松林口-乾宁段发生联合破裂的依据等因素, 道孚潜源的震级上限定为 7.5 级可能较为适宜。

参考文献

- 李天昭, 杜其方, 游泽李等, 1997. 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, 1—230.
- 冉洪流, 何宏林, 2006. 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, **49** (1): 153—161.
- 闻学泽, 2000. 四川西部鲜水河—安宁河—则木河断裂带的地震破裂分段特征. 地震地质, **22** (3): 239—249.
- 张国民, 马宏生, 王辉等, 2005. 中国大陆活动地块边界带与强震活动. 地球物理学报, **48** (3): 602—610.
- 张培震, 邓起东, 张国民等, 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学, D 辑, **33** (增刊): 12—20.
- Ellsworth W.L., 1999. A physically based earthquake recurrence model for estimation of long-term earthquake probabilities. U.S.Geol. Surv. Open-File Rept., 99—552.
- Matthews M.V., Ellsworth W.L. and Reasenber P.A., 2002. A Brownian model for recurrent earthquakes. Bull. Seism. Soc. Am., **92**: 2233—2250.
- Reid H.F., 1910. The mechanics of the earthquake, in the California Earthquake of April 18, 1906, (Lawsom, A.C., Chairman), Report of the State Earthquake Investigation Commission (Reprinted 1969) (Carnegie Institution of Washington Publication 87, v.2, 1910), 192pp.
- Schwartz D.P. and Coppersmith K.J., 1984. Fault behavior and characteristic earthquakes: examples from the Wasatch and San Andreas Fault Zones. J. Geophys. Res., **89**: 5681—5698.
- Tapponnier P., Peltzer G., LeDain A.Y. et al., 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine. Geology, **10** (12): 611—616.
- Working Group on California Earthquake Probabilities, 2003. Earthquake probabilities in the San Francisco Bay Region: 2000 to 2030. USGS Open-File Rept, 3—214.

Comparison of Computational Results Derived from Time-Dependent and Possion Models Respectively

Ran Hongliu

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

Abstract The earthquake probabilities of Luhuo and Daofu seismic zones with magnitudes range from $7.0 \leq M < 7.5$ and $7.5 \leq M < 8.0$ in future 50a were calculated by applying Brownian Passage Time and Possion models. The comparison with the results calculated by applying Possion model according to synthetical seismic zone delineation of the Zonation Map of Seimic Ground Motion Parameter suggests the follows: 1) the computation results of earthquake probabilities of the two sources with magnitude ranging between 7.0 and 7.5, by using both BPT and Possion models that employed the recurrence intervals of faults obtained by applying moment rate method, are more larger than that obtained from synthetical seismic zone delineation of the Zonation Map of Seimic Ground Motion Parameter; 2) the computation results derived from the earthquake moment rate method are quite different from BPT model and Possion model respectively under the condition of using the same data of recurrence intervals.

Key words: Time dependent; Brownian Passage-Time model; Possion model