

冉洪流. 2009. 潜在震源区震级上限不确定性研究. 地震学报, 31(4): 396-402.

Ran Hongliu. 2009. Research on uncertainty of upper limit earthquake magnitude in potential seismic source zone. *Acta Seismologica Sinica*, 31(4): 396-402.

潜在震源区震级上限不确定性研究^{*}

冉洪流[†]

(中国北京 100029 中国地震局地质研究所)

摘要 潜在震源区的震级上限(M_u)是指在该潜在震源区内可能发生的最大地震的震级. 预期未来发生超过该震级地震的概率趋于 0. 本文运用误差分析及逻辑树等方法, 并结合发震模型的数值模拟得到的大震合成目录等结果, 系统分析并最终得到了不同途径给出的不同类型潜在震源区震级上限的不确定性. 该结果可直接应用于包括地震区划在内的工程地震以及活动断裂危险性评价等工作中.

关键词 潜在震源区 震级上限 不确定性 逻辑树

文章编号: 0253-3782(2009)04-0396-07

中图分类号: P315.3⁺2

文献标识码: A

Research on uncertainty of upper limit earthquake magnitude in potential seismic source zone

Ran Hongliu[†]

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

Abstract: The upper limit earthquake magnitude (M_u) means the maximum magnitude of earthquakes occurred in the potential seismic source zone. The expected probability of the earthquake with the magnitude exceeding the upper limit tends to zero. Using error and logic-tree analysis, this paper analyzed in detail and finally presented the uncertainty of upper limit magnitude given in various ways for potential seismic sources of various types.

Key words: potential seismic source zone; upper limit earthquake magnitude; uncertainty; logic-tree

引言

潜在震源区的震级上限(M_u)是指在该潜在震源区内可能发生的最大地震的震级. 预期未来发生超过该震级地震的概率趋于 0. M_u 是地震危险性概率分析中的重要参数之一, 其强度和空间分布, 对地震区划图的图象和需要评价地震危险性的工程场地都具有重要的影响.

^{*} **基金项目** 国家“十五”科技支撑计划项目子专题(2006BAC13B01-0105)和中国地震局行业专项(200808018)资助.

收稿日期 2008-07-29 收到初稿, 2008-11-24 决定采用修改稿.

[†] **通讯作者** e-mail: ranhongliu@sina.com

潜在震源区的震级上限，主要通过对该潜在震源区本身的地震活动情况和地震构造特征分析确定。具体说来可以通过以下几种途径获得：

1) 对于已经发生过破坏性地震的潜在震源区，通常根据历史地震及仪器记录地震确定的震级进行评价。如果区域地震资料比较丰富，历史地震记录的时间已超过几个地震活动期，而且记载到的地震震级在 7 级以上，则可以认为有史以来记载到的最大地震震级可以代表该潜在震源区的震级上限。这样的例子很多，主要分布在华北地震区(表 1)。例如临沂潜在震源区历史上发生过郯城 $8\frac{1}{2}$ 级地震，故其震级上限定为 8.5 级，类似的潜在震源区还有三河、银川等。此外，应结合地震构造类比，对已发生地震的震级(一般 $M<7.5$)进行评估，判断已有的最大震级能否代表震级上限？如不能，则可根据具体的地震活动特点适当加大。如怀来潜在震源区历史上最大地震震级为 $6\frac{3}{4}$ 级，但震级上限定为 7.5 级(表 2)。

表 1 潜在震源区震级上限取值与最大历史地震震级相同

Table 1 The cases with upper limit magnitude being equal to maximum magnitude of historical earthquakes

潜在震源区名称	最大历史地震震级	震级上限
临沂	$8\frac{1}{2}$	8.5
三河	8	8.0
银川	8	8.0
安丘西南	$7\frac{1}{2}$	7.5
磁县西南	$7\frac{1}{2}$	7.5
固县	7	7.0

表 2 潜在震源区震级上限取值据最大历史地震震级适当加大

Table 2 Appropriately enlarged upper limit magnitudes based on historical earthquake data

潜在震源区名称	最大历史地震震级	震级上限
唐山	7.8	8.0
怀来	$6\frac{3}{4}$	7.5
大同	$6\frac{1}{2}$	7.5
临潼	$6\frac{3}{4}$	7.5
北京	$6\frac{1}{2}$	7.0
蔚县	6	7.0

2) 对于尚未记载到破坏性地震的震源区，其震级上限一般通过对该潜在震源区地震构造特点与地震带内或相邻地区进行详细比较研究后确定。比较的条目很多，包括：新构造活动的程度和方式，活动断层的时代、规模、强度、方式、分段性，构造应力场，以及深部构造和地球物理场特征等。例如新乡和兰考北潜在震源区内过去未曾发生过破坏性地震，但其构造条件与磁县西南区类同，故震级上限定为 7.5 级。在有古地震遗迹的地区，其震级上限可以根据已经确定的最大古地震震级来确定。例如，阿尔金断裂带的索尔库里段，那里的古地震造成的地表破裂长度超过 200 km，推断的古地震震级可能达到 $8\frac{1}{2}$ 级，因此将索尔库里潜在震源区的震级上限定为 8.5 级。内蒙大青山断裂带的土默特右旗段，目前虽未记录到破坏性地震，但那里有多次古地震的遗迹，推测公元 849 年震级为 $7-7\frac{1}{2}$ 地震即发生在该段，故该潜在震源区的震级上限定为 8 级。又如，新疆特克斯潜在震源区，沿特克斯断裂发现 8 级地震的古破裂带，因此其震级上限定为 8 级。

3) 另一种确定潜在震源区震级上限的途径是，根据潜在震源区内断层活动段的长度、位错量、位移速率等数据与地震震级经验关系的统计分析结果，作为该潜在震源区震级上限的参考依据(胡聿贤等，1999)。

上述潜在震源区震级上限得到的途径不同，其不确定性亦不相同。不确定性包括两

种：一种是事物本身内在的不确定性(aleatory uncertainty)；另一种是我们人类认识上的不确定性(epistemic uncertainty)。由于测量手段和精度的限制，所带来的在确定潜在震源区内震级或断层活动段的长度、位错量、位移速率等数据的误差属于前者，本文根据误差分析理论进行评估；而由学者经验和认识上的不同产生的结果，如构造类比等方法得到的潜在震源区震级上限，其差异属于后者，这里采用逻辑树方法给出。

1 不同方法得到的潜在震源区震级上限不确定性评价

1.1 潜在震源区震级上限取值与最大现代地震或历史地震震级相同

震级上限取值与最大现代地震或历史地震震级相同的潜在震源区内，均存在控制该潜在震源区分布范围及震级上限的主干断裂，如海原潜在震源区内的海原断裂带、炉霍潜在震源区内的鲜水河断裂等。因此，研究潜在震源区震级上限的不确定性可从研究该潜在震源区内的主干断裂入手。

Ward (2000)首次建立一个物理发震模型，模拟旧金山湾地区(San Francisco Bay Region)各主要断层 1906 年旧金山大地震后未来 3000 a 的强震序列。该模型从地震发生的物理过程入手，考虑相邻断层(段)的相互作用，以历史地震沿断层上的位错分布得到断层面上的凹凸体(asperity)的展布，亦即控制断层面上各部位的破裂强度，最终得到足够时间尺度内旧金山湾地区大震合成目录(synthetic catalog)，给出完整清晰的大震活动图象(Ward, 2000, 图 8)。从该图中可以看出，圣安德列斯断裂带未来 3000 a 发生像 1906 年 $M_w 7.9$ (Ward, 2000, 图 8 中第一行第二列)那样的全带破裂共有 7 次，且震级均为 $M_w 7.8$ 。

在 Ward 给出的模拟结果中，圣安德列斯断裂带未来 3000 a 发生像 1906 年 $M_w = 7.9$ (Ward, 2000, 图 8 中第一行第二列)那样的全带破裂事件的震级均为 $M_w 7.8$ ，小于 1906 年旧金山大地震 $M_w 7.9$ 。这主要与其所采用的物理模型有关。断层面上各个凹凸体的分布及破裂强度的确定至今仍是未解决的难题。在 Ward 的物理模型中，以 1906 年旧金山 $M_w 7.9$ 大地震沿断层上的位错分布得到圣安德列斯断裂带断层面上的凹凸体(asperity)分布，亦即控制了断层面上各部位的破裂强度。这就意味着，未来同样规模的全带破裂事件，其断层面上各点的破裂强度均不大于相应的最初给定值，亦即其释放的地震矩即矩震级不大于 1906 年旧金山大地震的 $M_w 7.9$ 。

虽然 Ward 模型存在着某些局限，但仍可看出，对于同一断裂带(段)发生同样破裂规模的不同地震震级相差很小，约为 0.1 震级单位，这里将其取为 0.1。考虑到矩震级相差 0.1 震级单位，其释放的地震矩将相差 40% 以上，因此不难理解上述所得的结论。

震级是地震强弱的量度。在我国，根据地震发生的年代将其划分为历史地震(公元 1900 年以前)和现代地震。历史地震由于资料精度的限制，其震级的最小间隔为 $1/4$ 震级单位，现代地震则为 0.1 震级单位。因此，根据误差分析理论(林纪曾, 1983)，历史地震的误差为 $1/4$ 震级单位；现代地震则为 0.1 震级单位。

由于同一断裂带(段)发生同样破裂规模的不同地震震级的差别(0.1 震级单位)与地震震级确定的误差相互独立，因此根据误差传播理论(林纪曾, 1983)有

$$\sigma_M = \sqrt{\sigma_{M_1}^2 + \sigma_{M_2}^2} \quad (1)$$

这里， σ_M 为同一断裂带(段)发生某一规模地震震级的不确定性； σ_{M_1} 为同一断裂带(段)发生同一规模的不同地震震级的不确定性； σ_{M_2} 为震级本身确定的不确定性。由式(1)得到：同一断裂带(段)发生某一规模历史地震震级的不确定性为 0.27 震级单位；发生现代地震震级的不确定性为 0.14 震级单位。

1.2 类比方法确定的潜在震源区震级上限

如前所述，类比方法确定的潜在震源区震级上限有 3 种情况：一是根据潜在震源区内具体的地震活动特点适当加大(这里定义为类型 1，后同)；二是对于尚未记载到破坏性地震的震源区，其震级上限一般通过对该潜在震源区地震构造特点与地震带内或相邻地区进行详细比较研究后确定(类型 2)；三是在有古地震遗迹的地区，其震级上限可以根据已经确定的最大古地震震级来确定(类型 3)。其共同特点是专家通过以往的经验 and 认识主观确定，因而所得震级上限的不确定性属于认识上的，这里采用逻辑树方法给出。

通过向多位资深专家咨询，得到专家们对上述 3 种情况震级上限不确定性的意见(图 1)。对这些意见进行加权(这里为等权)计算，得到了这 3 种情况震级上限不确定性的结果(表 5)。

1.3 由断层活动性定量数据与震级经验关系确定的潜在震源区震级上限

根据潜在震源区内主干断层活动段的长度、位错量、位移速率等定量数据与地震震级经验关系的统计分析结果，作为该潜在震源区震级上限的参考依据。这类经验关系很多，每个经验关系一般均给出了相应的标准差，可以得到所得震级不同水平的置信区间。

对于由综合不同经验关系

$$M_i = f(x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_n}) \pm s_i \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{2}$$

所给出的结果

$$\overline{M} = \frac{w_1 M_1 + w_2 M_2 + \dots + w_n M_n}{w_1 + w_2 + \dots + w_n} \tag{3}$$

其中， w_i 为权系数，可由人为给定，亦可是误差平方的倒数 $w_i = 1/s_i^2$ 。这就是以权系数来计算加权平均值的一般公式。根据误差传递理论，其不确定性有

$$S = \left[\frac{w_1}{(\sum w_i)^2} s_1^2 + \frac{w_2}{(\sum w_i)^2} s_2^2 + \dots + \frac{w_n}{(\sum w_i)^2} s_n^2 \right]^{1/2} \tag{4}$$

下面以山西交城断裂带北中段晋祠—柴村段为例。山西交城断裂带北中段晋祠—柴村段长度为 50 km，为右旋走滑正断层。其走滑分量与倾滑分量大体相当(江娃利等，2004)。根据该断裂段所在地区地壳结构(嘉世旭，张先康，2005)，大地热流资料(胡圣标等，2001)，以及小地震精确定位的结果^①，将该断裂段的断层面简化，即垂直深度取 12 km，

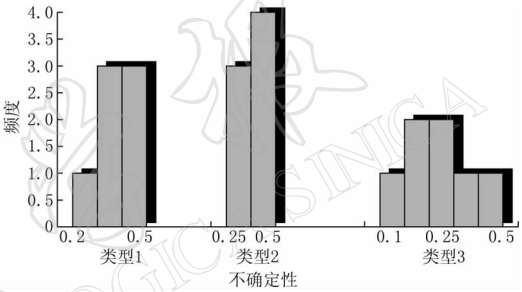


图 1 不同类型潜在震源区震级上限不确定性专家意见结果
Fig. 1 Expert opinions on uncertainty of upper limit magnitudes in various type of potential seismic source zones

① 朱爱兰，2007. 私人通讯.

倾角取 90°.

美国学者 Wells 和 Coppersmith(1994)基于大量样本数,建立了全球不同类型地震断层的地表破裂长度(surface rupture length, 简称为 SRL)及破裂面积(rupture area, 简称为 RA)等与矩震级 M_w 的经验关系式,简称为 WC 经验关系.

对于走滑断层有

$$M_w = 5.16 + 1.12 \lg(SRL) \quad \sigma = 0.28 \tag{5}$$

$$M_w = 3.98 + 1.02 \lg(RA) \quad \sigma = 0.23 \tag{6}$$

对于正断层有

$$M_w = 4.86 + 1.32 \lg(SRL) \quad \sigma = 0.34 \tag{7}$$

$$M_w = 3.93 + 1.02 \lg(RA) \quad \sigma = 0.25 \tag{8}$$

式中, σ 为标准差. 由这些经验关系可分别得到该断裂(段)最大潜在地震的矩震级 M_w (表 3).

表 3 WC 经验关系得到的交城断裂带晋祠—柴村段潜在地震最大震级及标准差

Table 3 The maximum potential earthquake magnitude and its standard deviation of Jinci-Chaicun segment in Jiaocheng fault zone obtained by WC empirical relations

方 法	滑动 类型	美国 WC 结果		中国大陆面波震级		综合结果	
		M_w	标准差	M_s	标准差	M	标准差
WC 地表破裂长度与 矩震级经验关系	走滑	7.06	0.28	7.38	0.301	7.2	0.279
	正断	7.10	0.34	7.41	0.357		
WC 破裂面积与 矩震级经验关系	走滑	6.81	0.23	7.17	0.255		
	正断	6.76	0.25	7.12	0.273		

在应用譬如像 WC 等经验关系时,经常会遇到矩震级 M_w 与面波震级 M_s 之间的转换问题. 在 Wells 和 Coppersmith(1994)的工作中,统计结果为 M_s 在 5.7—8.0 级之间时, M_w 与 M_s 之间没有系统的差异,即认为 $M_w \approx M_s$ (Wells, Coppersmith, 1994).

实际上,在 Wells 和 Coppersmith(1994)的工作中,当 $M_w < 6.5$ 时, $M_w > M_s$; 而当 $M_w > 6.5$ 时, $M_w < M_s$ (Wells, Coppersmith, 1994, 图 1). 此外,由于所采用的震级测定方法和所用的台站资料存在差异, Wells 和 Coppersmith 提及的 M_s 为美国面波震级,与我国大陆的面波震级之间并不完全相同. 据刘瑞丰等(2006)的研究,对于 7 级以上震级,我国大陆面波震级较美国系统偏大 0.1 震级单位. 因此,为了将 WC 经验关系中所得的矩震级 M_w 转换为中国大陆的面波震级 M_s ,我们根据 Wells 和 Coppersmith(1994)及美国 CMT 目录给出的中国大陆 1973—2008 年 M_s 6.9—8.0 的矩震级 M_w 数据(表 4),统计得到这两种震级的关系式为

$$M_s = 1.412 + 0.845M_w \quad \sigma = 0.11 \tag{9}$$

式中,相关系数为 0.96,可以通过 $\alpha=0.01$ 相关水平检验.

由上述 WC 经验关系(式 5—8)得到的交城断裂带晋祠—柴村段由不同经验关系给出的最大潜在地震的矩震级,进而根据式(9),最终得到该危险段最大潜在地震的中国大陆面波震级列于表 3 中. 其中,根据误差传播理论(林纪曾, 1983),所得结果的标准差的一阶近似为: $\sigma \approx \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$. 式中, σ_1 为 WC 经验关系式的标准差, σ_2 为式(9)的标准差. 这

表 4 Wells 和 Coppersmith 及 CMT 目录中给出的有关中国大陆矩震级数据
Table 4 Earthquake magnitude data digested from Wells & Coppersmith's
research and Harvard CMT catalogue

地震的年份及地点	M_W	中国大陆面波震级 M_S	资 料 来 源
1973 年炉霍	7.47	7.6	Wells 和 Coppersmith(1994)
1975 年海城	6.99	7.3	Wells 和 Coppersmith(1994)
1976 年唐山	7.46	7.8	Wells 和 Coppersmith(1994)
1976 年松潘	6.71	7.2	Wells 和 Coppersmith(1994)
1981 年道孚	6.64	6.9	Wells 和 Coppersmith(1994)
1988 年澜沧—耿马	7.13	7.6	CMT of Harvard
2001 年可可西里	7.8	8.1	CMT of Harvard
2008 年新疆于田	7.1	7.3	CMT of Harvard
2008 年汶川	7.9	8.0	CMT of Harvard

里，假定震级遵从高斯分布，根据得到的交城断裂带晋祠—柴村段各最大潜在地震的中国大陆面波震级及其标准差，应用式(3)和式(4)得到该断裂段最大潜在地震震级及标准差的综合结果(表 3、图 2)。

2 讨论与结论

前面已对不同途径得到的潜在震源区震级上限，通过采用不同的方法，最终得到了各自的不确定性结果(表 5)。

应当指出的是，表 5 中有断层定量活动数据的潜在震源区，根据误差理论，可直接得到其震级上限不确定性结果为 1σ ，即其震级上限 $\pm 1\sigma$ 的范围为 68% 置信区间；对于其它类型的潜在震源区，根据误差理论，这里给出的震级上限不确定性结果为 1.65σ ，即其震级上限 $\pm 1.65\sigma$ 的范围为 90% 置信区间。应用这些结果的研究者可根据自己的需要，选择适当的置信区间。

此外，还应特别指出的是，本文给出的不同途径得到的潜在震源区震级上限的不确定性只是“人为给定”的震级上限的不确定性。或许我们几乎不可能得到真实的潜在震源区震级上限的绝对大小，但是我们过去、现在及将来的工作都是在努力缩小这两者间的距离，而潜在震源区震级上限不确定性研究有助于这一进程的推进。

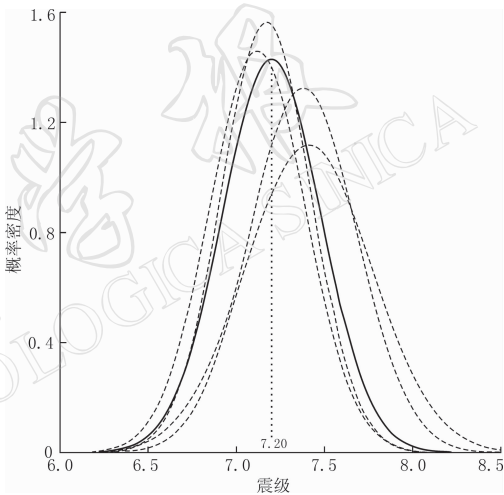


图 2 交城断裂带晋祠—柴村段潜在地震最大震级分布

图中虚线从左至右分别表示 WC 破裂面积与矩震级经验关系得到的正断层、走滑断层结果以及由 WC 地表破裂长度与矩震级经验关系得到的走滑断层、正断层结果；实线为加权计算的综合结果

Fig. 2 Distribution of the maximum potential earthquake magnitude for Jinci-Chaicun segment of Jiaocheng fault zone

The 4 thin broken lines from left to right are probability density function of magnitude. The former 2 lines are derived from the relations between rupture area and moment magnitude for normal and strike-slip faults, respectively, and the later 2 lines are obtained from the relations between surface rupture length and moment magnitude for normal and strike-slip faults, respectively. The black line is the weighted computation result

表 5 不同途径得到的潜在震源区震级上限不确定性结果
Table 5 Upper limit magnitude uncertainty for various type seismic source zones

潜在震源区类型	震级上限确定方式	震级上限不确定性(标准差)	确定方法
已经发生过破坏性地震	震级上限取值与历史地震震级相同	0.27(1.65 σ)	误差分析
	震级上限取值与最大现代地震地震震级相同	0.14(1.65 σ)	误差分析
	根据潜在震源区具体的地震活动特点适当加大	0.35(1.65 σ)	逻辑树
未记载到破坏性地震	地震构造类比	0.38(1.65 σ)	逻辑树
	根据古地震遗迹	0.31(1.65 σ)	逻辑树
有断层定量活动数据	单一经验关系	该经验关系标准差(1 σ)	误差分析
	多个经验关系	综合结果(1 σ)	误差分析

潜在震源区震级上限的不确定性在包括地震区划工作在内的工程地震研究与实践中越来越受到广泛的重视. 最新公布的美国地震危险图较为充分地考虑了震级上限的不确定性, 并将其列为该次危险图编制工作的重大改进(Petersen *et al.*, 2008).

囿于人们对地震孕育、成核以及破裂等过程研究和认识的限制, 单一的未考虑不确定性的震级上限难以反映潜在震源区真实的发震能力. 包括汶川大地震在内, 近年来我国特别是中、东部发生的一系列地震, 其震级很多都超越了所处潜在震源区的震级上限. 因此, 在工程地震等工作中充分考虑潜在震源区震级上限的不确定性, 对于提高地震危险性分析的水平, 减少地震对社会、对人民生命财产的损失, 无疑具有积极的意义.

参 考 文 献

胡圣标, 何丽娟, 汪集旻. 2001. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版)[J]. 地球物理学报, **44**(5): 611-626.
胡聿贤. 1999. 地震安全性评价技术教程[M]. 北京: 地震出版社: 147-149.
嘉世旭, 张先康. 2005. 华北不同构造块体地壳结构及其对比研究[J]. 地球物理学报, **48**(3): 611-620.
江娃利, 谢新生, 王瑞, 王焕生, 冯西英. 2004. 山西断陷系交城断裂全新世古地震初步研究[J]. 地震研究, **27**(2): 184-190.
林纪曾. 1983. 观测数据的数学处理[M]. 北京: 地震出版社: 39-69.
刘瑞丰, 陈运泰, Peter Bormann, 任泉, 侯建民, 邹立晔, 杨辉. 2006. 中国地震台网与美国地震台网测定震级的对比(II): 面波震级[J]. 地震学报, **28**(1): 1-7.
Petersen M D, Frankel A D, Harmsen S C, Mueller C S, Haller K M, Wheeler R L, Wesson R L, Zeng Y, Boyd O S, Perkins D M, Luco N, Field E H, Wills C J, Rukstales K S. 2008. Documentation for the 2008 update of the United States National Seismic Hazard Maps[R]. *USGS Open-File Rept*, 2008-1128, 10-11.
Ward Steven N. 2000. San Francisco Bay area earthquake simulations: A step toward a standard physical earthquake model[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **90**: 370-386.
Wells D L, Coppersmith K J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **84**: 974-1002.