

龙门山地区地震活动性广义极值模型构建^{*}

任梦依

(中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要:以龙门山地区为研究区, 利用 1931 年至 2010 年历史地震数据, 时限取 80 年, 时间间隔取 10 年, 构建地震活动性广义极值模型, 估计龙门山地区震级上限和强震重现水平。结果表明龙门山地区地震活动性广义极值模型服从具有有限上界的 Weibull 分布, 震级上限为 8.3, 未来 20 年、50 年、100 年龙门山地区的强震重现水平分别为 7.9、8.1、8.1。起始年由 1930 年至 1933 年逐年平移, 时间间隔不变, 震级上限及强震重现水平的计算结果相差不到 0.2 级, 表明本文构建的龙门山地区广义极值模型具有一定程度的稳定性, 可为地震区划以及地震危险性分析研究提供参考。

关键词:地震危险性; 震级上限; 强震重现水平; 广义极值分布; 龙门山地区

中图分类号: P315.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3274(2018)02-0157-10

引言

地震研究中通常用地震活动性模型描述潜源区地震的时空分布、强度分布、频度分布等地震活动特征^[1], 潜源区地震活动性模型的构建方法研究可为地震区划和地震危险性分析提供重要的技术支撑。因此, 地震区划和地震危险性分析中地震活动性模型的改进研究, 一直是地震学家关注的一个重点。概率方法是当前构建地震活动性模型中经常使用的分析方法^[2], 包括基于截断 G-R 关系模型的方法^[3]以及在此基础上提出的改进方法^[4]。美国现行的地震区划图以及中国第五代地震区划图中均主要采用这类方法构建地震活动性模型^[5, 6], 用于估计与一定重现周期相关联的强震重现水平。但是, 使用基于截断 G-R 关系的方法, 需要先验地选取起算震级和设定震级上限。而且用 G-R 关系模型检验地震震级分布情况时, 在线性的两端常常出现“掉头”现象^[7]。

近年来, 由极值模型发展而来的广义极值模型逐渐被应用于潜源区地震活动性模型构建^[8~12]。这类方法利用的是一定时限内潜源区的大震震级数据, 不仅无需像基于截断 G-R 关系的方法那样, 先验地选定震级下限和震级上限, 而且便于充分利用大震级区段的信息构建潜源区强震活动模型, 适合历史地震记录时间长但低震级地震记录缺失的地区。Pisarenko 等^[8~10]提出基于广义极值理论的震级上限和强震重现水平的估计方法, 钱小仕

^{*} 收稿日期: 2017-07-31; 修改回日期: 2017-11-01

基金项目: 中国地震局地球物理研究所基本科研业务费专项(DQJB17B07)资助

作者简介: 任梦依(1988-), 女, 山东青岛人, 助理研究员, 主要从事地震活动性分析、地质建模等方面的研究。

等^[11]将该方法用于中国台湾地区的地震危险性分析相关研究,任晴晴等^[12]据此方法讨论了中国大陆活动地块边界带最大震级分布特征。现阶段主要着眼于基于历史地震记录利用统计方法构建研究区地震活动性模型。然而,在构建广义极值模型前,充分分析潜源区地震地质信息,划分潜源区边界范围,对于地震样本的选取是十分重要的;而且从时限以及时间间隔两方面探讨广义极值模型的稳定性也是需要的。在利用广义极值分布构建模型时,若仅以半年或一年作为时间间隔,所构成的地震样本难以排除前震和余震的影响,无法满足事件相互独立的条件。

因此,本文选择地震活动较为频繁的龙门山地区为研究区,在深入分析地震地质背景以及地震活动特征的基础上,利用1931年至2010年间震级较大的历史地震数据,以10年为时间间隔,构建了龙门山地区地震活动性广义极值模型,用于估计该区震级上限和强震重现水平,逐年平移统计的起始年,并分析其计算结果,探讨所构建的广义极值模型的稳定性。

1 广义极值模型构建方法

1.1 广义极值分布

设 X_1, X_2, \dots, X_n 是独立同分布的随机变量列,记为 $M_n = \max(X_1, X_2, \dots, X_n)$, 若存在 $\{a_n > 0, b_n \in R\}$ 和非退化分布函数 $G(x)$, 使

$$\Pr \left\{ \left(\frac{M_n - b_n}{a_n} \leq x \right) \right\} \rightarrow G(x), \quad n \rightarrow \infty \quad (1)$$

则称 G 为极值分布。Fisher 和 Tippett^[13]证明了极值分布的3大类型定理,指出 G 必属于 Gumbel 分布、Frechet 分布、Weibull 分布三种类型之一。广义极值理论将三种分布类型统一为一个分布类型,由位置参数 μ 、尺度参数 σ 、形状参数 ξ 三个参数来表示,如式(2)。

$$G(x) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\}, \quad 1 + \frac{\xi(x - \mu)}{\sigma} > 0 \quad (2)$$

式中,当 $\xi=0$ 时, G 属于 Gumbel 极值分布;当 $\xi>0$ 时, G 属于 Frechet 极值分布;当 $\xi<0$ 时, G 属于 Weibull 极值分布^[14, 15]。

1.2 地震危险性估计的相关公式

收集一定时限内的历史地震记录,依据地震活动特征确定时间间隔,取每段时间间隔内地震震级的最大值作为样本值,形成震级极值样本 $M_n = \max(X_1, X_2, \dots, X_n)$, 根据广义极值理论,该极值样本符合广义极值分布。

根据式(2),令 $G(x_p) = 1 - p$, 广义极值分布分位数可表达为式(3)。

$$x_p = \begin{cases} \mu - \frac{\sigma}{\xi} [1 - \{-\log(1-p)\}^{-\xi}], & \xi \neq 0 \\ \mu - \sigma \log\{-\log(1-p)\}, & \xi = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\frac{1}{p}$ 表示重现期, x_p 表示重现期为 $\frac{1}{p}$ 时的最大震级的重现水平, p 则表示重现期为 $\frac{1}{p}$ 时发生地震震级 $M > x_p$ 的年发生率,当 $p \rightarrow 0$ 时, $x_p = G^{-1}(1-p)$, 即为所求潜源区的震级上限。

令 $y_p = -\log(1-p)$, 则式(3)可变为

$$x_p = \begin{cases} \mu - \frac{\sigma}{\xi} [1 - y_p^{-\xi}], & \xi \neq 0 \\ \mu - \sigma \log y_p, & \xi = 0 \end{cases} \quad (4)$$

利用最大似然估计方法, 建立广义极值分布的对数似然函数, 如式(5)。

$$\ln L(x_i; \mu, \delta, \xi) = -n \log \sigma - \sum_{i=1}^n \left(1 + \xi \frac{x_i - \mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}} - \left(1 + \frac{1}{\xi}\right) \sum_{i=1}^n \log \left(1 + \xi \frac{x_i - \mu}{\sigma}\right) \quad (5)$$

其中, $1 + \frac{\xi(x_i - \mu)}{\sigma} > 0 (i=1, \dots, n)$

根据式(5)可以得到参数 σ, μ, ξ 的最大对数似然估计值 $(\hat{\mu}, \hat{\sigma}, \hat{\xi})$, 代入式(4), 获得分位数 \hat{x}_p 的最大似然估计值, 如式(6)。

$$\hat{x}_p = \begin{cases} \hat{\mu} - \frac{\hat{\sigma}}{\hat{\xi}} [1 - y_p^{-\hat{\xi}}], & \hat{\xi} \neq 0 \\ \hat{\mu} - \hat{\sigma} \log y_p, & \hat{\xi} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

当 $\hat{\xi} < 0$ 时, 依据广义极值理论属于 Weibull 分布存在上限, 令重现周期 $\frac{1}{p} \rightarrow \infty$, 即 $p=0$, $y_p=0$, 从而获得震级上限的最大似然估计值为

$$\hat{x} = \hat{\mu} - \hat{\sigma} / \hat{\xi} \quad (7)$$

式中的 \hat{x} 即为所求潜源区的震级上限的最大似然估计值。

根据 Delta 定理知, 三个参数的最大似然估计值近似符合正态分布; 因此, 根据方差协方差矩阵可以获得置信水平为 $1-\alpha$ 的强震级重现水平的置信区间。

$$\hat{x}_p \pm Z_{1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\text{Var}(\hat{x}_p)} \quad (8)$$

其中, $\text{Var}(\hat{x}_p) \approx \nabla x_p^T \mathbf{V} \nabla x_p$, \mathbf{V} 是 $(\hat{\mu}, \hat{\sigma}, \hat{\xi})$ 的协方差矩阵, ∇x_p^T 为 $(\frac{\partial x_p}{\partial \mu}, \frac{\partial x_p}{\partial \sigma}, \frac{\partial x_p}{\partial \xi})$ 在 $(\hat{\mu}, \hat{\sigma}, \hat{\xi})$ 处的值, $Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ 为标准正态分布 $1-\frac{\alpha}{2}$ 的分位数, 当 $p=0$ 时所获得的结果即为所估计震级上限的置信区间。

2 龙门山地区地震地质背景

龙门山地区主要包括了岷山断块和龙门山断裂带的范围(图 1), 为巴颜喀拉地块东边界, 该边界不仅是强烈的活动构造带, 也是中国南北地震带中段的一部分。中国第五代地震区划图中将该区域划分为地震构造区, 区内的地震活动具有相似的地震构造环境和发震构造模型。该地震构造区的块体滑移方向为南南东, 区域主压应力呈北西西—南西西向的水平挤压。GPS 测量反映跨越该带在东—西方向上的水平缩短速率约为 4~6 mm/a, 平行该带的右旋剪切变形速率约为 2~6 mm/a, 具有发生强震与大地震的构造与动力学环境^[16~20]。

2.1 岷山断块

岷山断块东、西边界分别为虎牙断裂和岷江断裂。南、北界分别被龙门山断裂带和东昆仑断裂截接, 呈东西宽约 50~60 km、南北延绵 150 km 的南北向新隆起。从深部构造背景来看, 岷山断块正处于中国东西部地壳厚度陡变带上, 构成了中国西部强隆区和东部弱

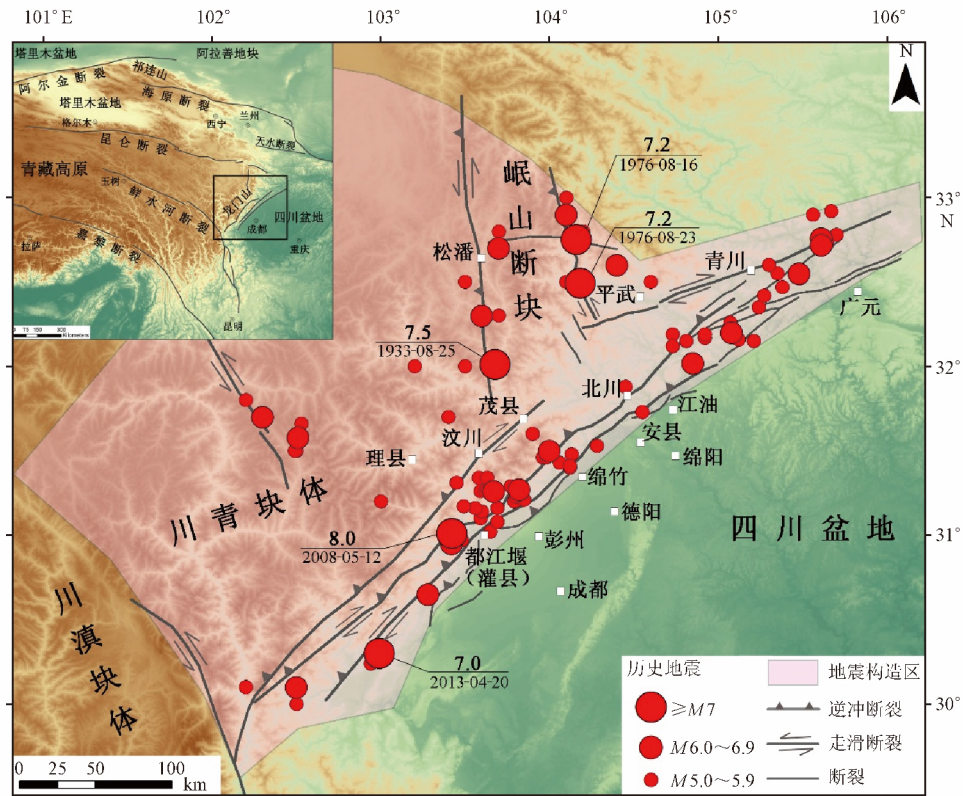


图1 龙门山地区大地构造位置与5级以上地震震中分布
(据高孟潭^[16], 邓起东^[21], 李海兵等^[22]修改)

升区两个一级新构造单元分界和南北地震带的中段。虎牙断裂是岷山断块的东边界，呈北北西向延伸，晚第四纪以来平均垂直滑动速率在 0.5 mm/a 左右，平均水平滑动速率为 1.4 mm/a 左右，表现为逆一走滑运动性质，且以水平走滑运动为主。岷江断裂是岷山断块的西边界，划分西部川青块体和东部岷山断块，晚更新世以来的平均垂直滑动速率 $\geq 0.37 \text{ mm/a}$ ，平均垂直滑动速率 $< 0.53 \text{ mm/a}$ ，显示为逆一走滑运动性质，且水平位错量与垂直位错量大致相当。岷山断块可能是岷江断裂和虎牙断裂由西向东逆冲导致的差异运动而形成的，与川青块体向南东东方向的滑移有关。川青块体向南东东方向的滑移过程现今仍在继续，导致了岷山断块区强烈的近代地震活动^[23~25]。

2.2 龙门山断裂带

龙门山断裂带是青藏高原东缘边界山脉，北起广元，南至天全，长约 500 km ，宽约 30 km ，呈北东—南西向展布，北东与大巴山相交，南西被鲜水河断裂相截^[26]。龙门山不仅是中国东部和西部地形地貌的界限，还属于中国南北地震带的中段，地震活动频度高、强度大，是青藏高原北部地震亚区主要强震活动带之一^[27]。按照板块构造理论的观点，龙门山构造带位于扬子板块的西北部，其西部为松潘甘孜褶皱带，北为秦岭板块俯冲碰撞造山带，西南为康滇地轴，属于松潘—甘孜造山带前缘逆冲带^[28]。龙门山构造带主要由一系列大致平行的北东—南西向的逆冲断裂组成，由西向东分别为汶川—茂县断裂、映秀—北川断裂和安县—灌县断裂。这三条主干断裂都向北西向倾伏，其中汶川—茂县断裂是龙门

山构造带西北侧的边界断裂, 分割了川藏块体和龙门山构造带; 北川—映秀断裂是龙门山构造带的主断裂, 又称中央断裂, 在龙门山构造带几条主干断裂中显示出最强的活动性; 安县—灌县断裂是龙门山构造带东南侧的边界断裂^[26, 29]。

热年代学研究表明, 龙门山经历了 35~30 Ma 和 15~10 Ma 的两个快速隆升阶段^[30], 汶川—茂县和映秀—北川断裂是控制龙门山快速隆升的重要断裂。龙门山及邻区均衡重力异常计算表明龙门山地区地壳尚未达到均衡, 近年的形变资料表明, 龙门山仍以 0.3~0.4 mm/a 的速度持续上升^[31~33]。龙门山断裂带的运动性质为走滑—逆冲型, 自晚三叠世至古近纪时期, 以逆冲—左旋走滑作用为特征, 而中生代以来均显示由北西向南东的逆冲运动, 并具有显著的右旋走滑分量^[18, 25, 26]。汶川地震前的 GPS 观测表明, 横跨整个龙门山断裂带的滑动速率不超过 2 mm/a, 单条断裂平均垂直滑动速率均在 1 mm/a 左右, 水平位错量与垂直位错量大致相当^[34]。龙门山断裂带具有长期活动性, 其活动断裂带沿袭了晚三叠世以来的断裂^[22]。

3 龙门山地区地震活动特征

龙门山地区 1920 年至今发生过 5 次 $M \geq 7$ 的强震, 其中龙门山断裂带发生过 2 次, 分别是 2008 年汶川 8.0 级地震和 2013 年芦山 7.0 级地震; 北部岷山地区发生过 3 次, 分别是 1933 年叠溪 7.5 级地震和 1976 年松潘两次 7.2 级地震。黄玮琼等^[35]对中国大陆大部分地区的历史地震资料作了较详细的分析与研究, 显示龙门山区域 $M_s \geq 4.75$ 的地震资料在 1931 年之后基本完整。本文数据来源主要为国家地震科学数据共享中心 (<http://data.earthquake.cn>) 的中国历史地震目录数据库以及国家地震台网地震目录数据库, 收集了龙门山地区 ($102^\circ \sim 106^\circ \text{E}$, $29.5^\circ \sim 33.5^\circ \text{N}$) 1920—2016 年间震级大于 4.5 级的历史地震目录, 共记录到地震 230 次。根据收集到的地震资料显示, 龙门山地区以浅源地震为主, 其中 $M \geq 7$ 地震 5 次, $6 \leq M < 7$ 地震 17 次, $5 \leq M < 6$ 地震 70 次。地震主要沿断裂带分布 (图 1), 其震中分布位置与断裂带的展布形态密切相关。依据地震目录资料绘制了 1920—2016 年 $M \geq 4.5$ 的 $M-t$ 图 (图 2)。龙门山地区的地震活动平静期与活跃期相互间隔, 平静时段与活跃时段的长度在 10 年左右。1990 年至 2008 年汶川地震发生前无强震发生, 2008 年汶川地震发生后, 龙门山断裂带上地震活动密集, 余震较多。

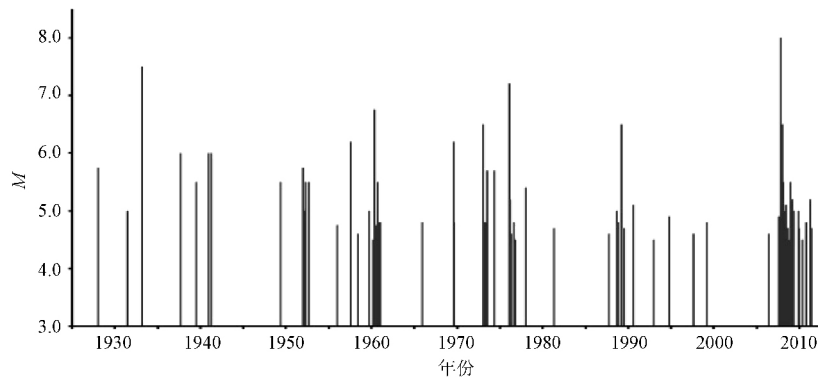


图 2 1920—2016 年龙门山地区地震活动 $M-t$ 图 ($M \geq 4.5$)

4 龙门山地区强震危险性估计

依据 $M-t$ 图并结合已有研究资料, 确定以 1931 年为起始年, 10 年为时间间隔统计 1931—2010 年间震级最大值, 得到龙门山地区每 10 年地震最大震级数据, 形成震级极值样本, 如表 1 所示。

表 1 龙门山地区最大震级数据(1931—2010 年)

M_{\max}	7.5	6.0	6.8	6.2	7.2	6.5	5.1	8.0
------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

利用最大似然估计方法, 建立龙门山地区强震序列广义极值分布的似然函数, 并获得位置参数 μ 、尺度参数 σ 以及形状参数 ξ 三个参数的最大似然估计值为 $(\hat{\mu}, \hat{\sigma}, \hat{\xi}) = (6.448, 0.929, -0.489)$, 其中形状参数 ξ 估计值的标准差为 0.350, 其 80% 的置信区间为 $[-0.938, -0.040]$ 。 ξ 的最大似然估计与置信区间都显示为负值, 表明龙门山地区在研究时间尺度范围内最大震级服从 Weibull 极值分布, 具有上限值, 这也与潜在震源区一定具有震级上限的认识相符。

通过概率图、分位数图、重现水平图以及概率密度图可以对所拟合的模型进行检验, 当数据符合理论假设分布时, 概率图与分位数图应近似为直线。重现水平图可作为模型检验的诊断工具, 当 $\xi=0$ 时为直线, 当 $\xi<0$ 时为凸曲线, 当 $\xi>0$ 时为凹曲线。模型诊断如图 3 所示。

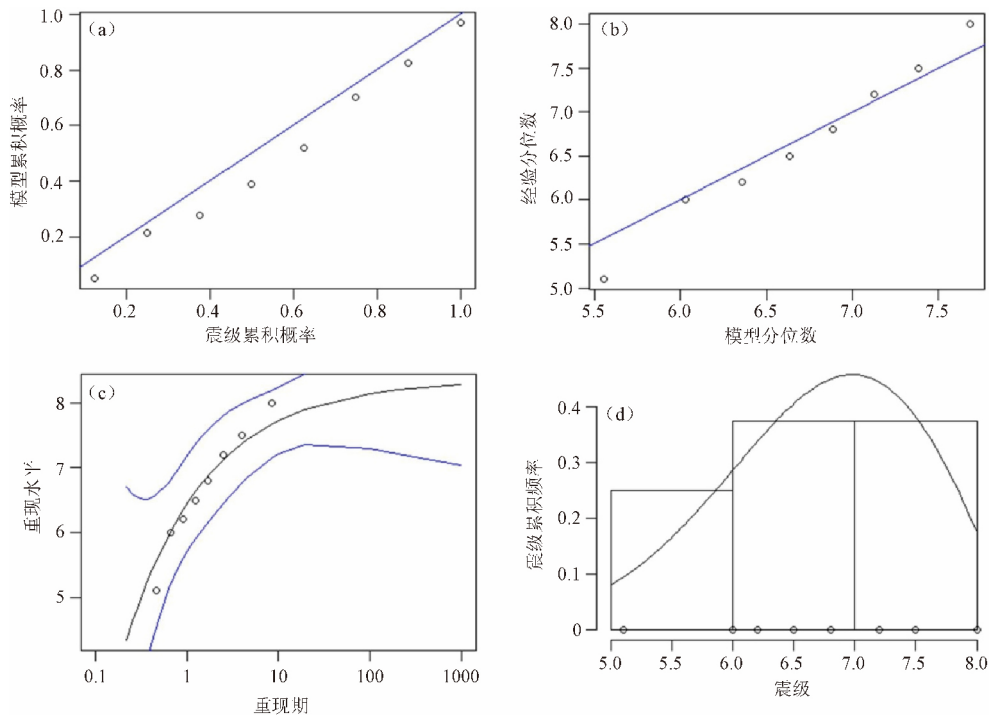


图 3 广义极值分布拟合诊断

(a) 概率; (b) 分位数; (c) 重现水平; (d) 概率密度

图 3(a)是概率图, 横坐标表示实际数据的累积概率, 纵坐标表示选用极值模型的累积概率; 图 3(b)是分位数图, 横坐标表示的是所选分布模型的分位数, 纵坐标表示的是实际数据的分位数。从图 3(a)和图 3(b)可看出, 所有点几乎均沿直线分布, 因此不能否认所拟合的模型。由于 ξ 的估计值为负, 因此相应分布存在有限上界, 故重现水平图中的曲线为 1 条凸曲线, 渐近地趋于某个有限值(图 3c)。概率密度图中的密度曲线估计与直方图也显示一定的拟合(图 3d)。因此, 4 个诊断图均支持拟合的广义极值分布模型。

将 μ 、 σ 、 ξ 三个参数的估计值带入式(6), 计算龙门山地区自 2010 年起未来 20 年、50 年和 100 年内强震重现水平。由于重现水平的估计存在一定误差, 对重现水平的误差进行分析首先要计算得到参数估计的协方差矩阵:

$$V = \begin{Bmatrix} 0.141268686 & -0.008998479 & -0.06272206 \\ -0.008998479 & 0.092444374 & -0.07586664 \\ -0.062722058 & -0.075866635 & 0.12291155 \end{Bmatrix}$$

将其代入式(8)可得到对应于各重现水平的置信度为 95% 的置信区间, 所得结果如表 2 所示。

表 2 强震重现水平及其置信区间

强震重现周期	20 年	50 年	100 年
重现水平	7.91	8.07	8.15
标准差	0.27	0.36	0.44
95% 置信区间	[7.38, 8.44]	[7.37, 8.77]	[7.30, 9.00]

当重现概率趋近于 0 时, 即可获得震级上限的估计值。利用式(7)带入 μ 、 σ 、 ξ 三个参数的估计值可得到龙门山地区的震级上限为 8.3。同理, 将协方差矩阵代入式(8), 得到震级上限的标准差为 0.8。由于 95% 置信区间上边界范围超过 10 级, 现今全球还未监测到 10 级以上的地震事件, 为了令取值范围更合理, 震级上限取置信度为 80% 的置信区间。由上限估计值和标准差可知震级上限置信度为 80% 的置信区间为 [7.3, 9.4]。

为了验证所拟合的广义极值模型的稳定性, 将起始年由 1930 年至 1933 年逐年平移, 仍以 10 年为时间间隔分别进行区组最大值统计, 计算广义极值模型三个参数的最大似然估计值, 获得龙门山地区的震级上限以及未来 20 年、50 年和 100 年的强震重现水平, 具体的统计值如表 3 所示, 计算结果如表 4 和表 5 所示。

表 3 不同起始年的最大震级数据统计

$M_{\max}(1930)$	7.5	6.0	6.2	6.8	7.2	6.5	5.1	8.0
$M_{\max}(1931)$	7.5	6.0	6.8	6.2	7.2	6.5	5.1	8.0
$M_{\max}(1932)$	7.5	5.5	6.8	6.2	7.2	6.5	4.9	8.0
$M_{\max}(1933)$	7.5	5.8	6.8	6.2	7.2	6.5	4.9	8.0

注: $M_{\max}(1930)$ 指起始年为 1930 年, 时间间隔为 10 年的震级最大值统计

由表 4 和表 5 可见, 虽然初始时间的变化导致震级极值序列发生了较小的变化, 但震级上限及强震重现水平的计算结果相差不到 0.2 级, 表明龙门山地区广义极值模型的计算结果是比较稳定可靠的。

表 4 不同起始年的强震重现水平及其置信区间

起始年	20 年重现水平	95%置信区间	50 年重现水平	95%置信区间	100 年重现水平	95%置信区间
1930	7.91	[7.38, 8.44]	8.07	[7.37, 8.77]	8.15	[7.30, 9.00]
1931	7.91	[7.38, 8.44]	8.07	[7.37, 8.77]	8.15	[7.30, 9.00]
1932	7.89	[7.44, 8.34]	8.03	[7.47, 8.59]	8.09	[7.41, 8.77]
1933	7.91	[7.45, 8.37]	8.05	[7.46, 8.64]	8.12	[7.41, 8.83]

表 5 不同起始年的震级上限及其置信区间

起始年	震级上限	标准差	80%置信区间
1930	8.35	0.81	[7.32, 9.38]
1931	8.35	0.81	[7.32, 9.38]
1932	8.21	0.57	[7.48, 8.94]
1933	8.26	0.61	[7.48, 9.04]

5 结论和讨论

本文建立了龙门山地区地震活动性广义极值模型,利用最大似然估计方法,获得位置参数、尺度参数以及形状参数的估计值分别为 6.448、0.929、-0.489。对龙门山地区强震危险性进行分析,计算得到龙门山地区的震级上限为 8.3,置信度为 80%的置信区间为 [7.3, 9.4]。未来 100 年、50 年、20 年龙门山地区的强震重现水平分别为 8.1、8.1、7.9,置信度为 95%的置信区间分别为 [7.3, 9.0]、[7.4, 8.8]、[7.4, 8.4]。

分别以 1930 年、1931 年、1932 年、1933 年作为起始年,以 10 年为时间间隔分别进行区组最大值统计,虽然初始时间的变化导致震级极值序列发生了较小的变动,但震级上限及强震重现水平的计算结果相差不到 0.2 级,表明龙门山地区广义极值模型的计算结果是比较稳定可靠的。

针对龙门山地区最大震级分布的广义极值建模,拟合结果可以看出震级分布服从具有有限上界的 Weibull 分布。这类方法具有两方面优势,首先,广义极值模型通过形状参数 ξ 判断极值分布的类型,而无需先验地确定极值分布的类型;其次,该方法利用的是一定时限内的大震数据,无需先验地选定震级上下限,在小震资料不充足的情况下也可利用大震级区段信息构建潜源区的强震活动模型。

本文参考中国第五代地震区划图,选定龙门山地区为案例研究区,该区域属于潜源区划分中的地震构造区,统计所选用的震级样本具有相似的地震构造环境和发震构造模型,满足构建广义极值模型时样本属于同分布的条件。另外,本文以 10 年为时间间隔进行震级最大值统计,这与采用半年或一年的时间间隔相比而言,所构成的地震样本相对地减少了前震和余震的影响,更符合每次地震事件相互独立的条件。本文利用广义极值分布计算出的震级上限为 8.3,高于中国第五代地震区划图中龙门山构造区的震级上限 8.0。广义极值理论在小震级历史地震资料受限的情况下具有优势,其研究结果可为地震区划以及地震危险性分析研究工作提供参考。

感谢中国地震局地球物理研究所蒋长胜研究员、边银菊研究员在本文成文过程中给予的指导与帮助。

参考文献:

- [1] 蒋溥, 戴丽思. 工程地震学概论[M]. 北京: 地震出版社, 1993.
- [2] 胥广银. 潜在震源三维空间模型及其在地震危险性概率分析中的应用研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2003.
- [3] Cornell C A. Engineering seismic risk analysis[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968, 58(5): 1583-1606.
- [4] 徐伟进, 高孟潭. 根据截断的 G-R 模型计算东北地震区震级上限[J]. 地球物理学报, 2012, 55(5): 1710-1717.
- [5] 潘华, 高孟潭, 李金臣. 新版美国地震区划图源及其参数模型的分析与评述[J]. 震灾防御技术, 2009, 4(2): 131-140.
- [6] 潘华, 李金臣. 新一代地震区划图的地震活动性模型[J]. 城市与减灾, 2016, 108(3): 28-33.
- [7] 胡聿贤. 地震安全性评价技术教程[M]. 北京: 地震出版社, 1999.
- [8] Pisarenko V F, Sornette A, Sornette D, et al. New Approach to the Characterization of M_{max} and of the Tail of the Distribution of Earthquake Magnitudes[J]. Pure and Applied Geophysics, 2008, 165(5): 847-888.
- [9] Pisarenko V F, Sornette A, Sornette D, et al. Characterization of the Tail of the Distribution of Earthquake Magnitudes by Combining the GEV and GPD Descriptions of Extreme Value Theory[J]. Pure and Applied Geophysics, 2014, 171(8): 1599-1624.
- [10] Pisarenko V F, Sornette A, Sornette D, et al. Reply to: "Comment on Pisarenko et al. 'Characterization of the Tail of the Distribution of Earthquake Magnitudes by Combining the GEV and GPD Descriptions of Extreme Value Theory'" by Mathias Raschke in Pure Appl Geophys (2015) [J]. Pure and Applied Geophysics, 2016, 173(2): 709-713.
- [11] 钱小仕, 王福昌, 曹桂荣, 等. 广义极值分布在地震危险性分析中的应用[J]. 地震研究, 2012, 35(1): 73-78.
- [12] 任晴晴, 钱小仕, 赵玲玲, 等. 中国大陆活动地块边界带最大震级分布特征研究[J]. 地震, 2013, 33(3): 67-76.
- [13] Fisher R, Tippett L H. 1928. Limiting forms of the frequency distributions of the largest or smallest member of a sample[J]. Proc Camb PhilSoc, 24(2): 180-190.
- [14] Coles S. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values[M]. Springer-Verlag, 2001.
- [15] 史道济. 实用极值统计方法[M]. 天津: 科学技术出版社, 2006.
- [16] 高孟潭. GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》宣贯教材[M]. 北京: 中国质检出版社, 2015.
- [17] 孔军, 周荣军. 龙门山和成都地震构造区的划分[J]. 震灾防御技术, 2014, 9(1): 64-73.
- [18] Densmore A L, Ellis M A, Li Y, et al. Active tectonics of the Beichuan and Pengguan faults at the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Tectonics, 2007, 26(4): TC4005.
- [19] 闻学泽, 杜方, 张培震, 等. 巴颜喀拉块体北和东边界大地震序列的关联性与 2008 年汶川地震[J]. 地球物理学报, 2011, 54(3): 706-716.
- [20] 易桂喜, 闻学泽, 辛华, 等. 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震前龙门山—岷山构造带的地震活动性参数与地震视应力分布[J]. 地球物理学报, 2011, 54(6): 1490-1500.
- [21] 邓起东. 中国活动构造图(1:400 万)[M]. 北京: 地震出版社, 2007.
- [22] 李海兵, 司家亮, 付小方, 等. 2008 年汶川地震同震滑移特征、最大滑移量及构造意义[J]. 第四纪研究, 2009, 29(3): 387-402.
- [23] 陈智梁, 刘宇平, 赵济湘, 等. 青藏高原东部地壳运动的 GPS 测量[J]. 中国地质, 1998(5): 32-35.

- [24] Chen Z, Burchfiel B C, Liu Y, et al. Global Positioning System measurements from eastern Tibet and their implications for India/Eurasia intercontinental deformation[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2000, 105(B7): 16 215-16 227.
- [25] 周荣军, 李勇, Alexander, 等. 青藏高原东缘活动构造[J]. *矿物岩石*, 2006, 26(2): 40-51.
- [26] 李勇, 周荣军, Densmore A L, 等. 青藏高原东缘龙门山晚新生代走滑-逆冲作用的地貌标志[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(1): 40-51.
- [27] 邓起东, 陈社发, 赵小麟. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学[J]. *地震地质*, 1994, 16(dz): 389-403.
- [28] 许志琴. 中国松潘—甘孜造山带的造山过程[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- [29] 王二七, 孟庆任. 对龙门山中生代和新生代构造演化的讨论[J]. *中国科学*, 2008, 38(10): 1221-1233.
- [30] Wang E, Kirby E, Furlong K P, et al. Two-phase growth of high topography in eastern Tibet during the Cenozoic[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(9): 640-645.
- [31] 刘树根. 龙门山冲断带与川西前陆盆地的形成演化[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1993.
- [32] 李勇, 曾允孚, 伊海生. 龙门山前陆盆地沉积及构造演化[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1995.
- [33] 李勇, 徐公达, 周荣军, 等. 龙门山均衡重力异常及其对青藏高原东缘山脉地壳隆升的约束[J]. *地质通报*, 2005, 24(12): 1162-1168.
- [34] 张培震, 徐锡伟, 闻学泽, 等. 2008年汶川8.0级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(4): 1066-1073.
- [35] 黄玮琼, 李文香, 曹学锋. 中国大陆地震资料完整性研究之二: 分区地震资料基本完整的起始年分布图像[J]. *地震学报*, 1994, 16(4): 423-432.

Generalized Extreme Value Model of Seismicity for the Longmenshan Region

REN Meng-yi

(Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China)

Abstract: Choosing the Longmenshan region as the study area, making use of the historical earthquake data from the year 1931 to 2010, taking 10 years as the time interval, this paper establishes a generalized extreme value model of seismicity, and it estimates the magnitude upper bound and the strong earthquake return level associated with the Longmenshan region. The results indicate that the model follows the Weibull distribution with a finite upper bound; the magnitude upper bound is 8.3; and the strong earthquake return level in 20, 50, 100 future years are 7.9, 8.1, 8.1, respectively. Moving the starting year from 1930 to 1933 year by year, remaining the time interval constantly, we find that the difference of the results of the maximal magnitude and of the strong earthquake return level are less than 0.2, which means that the generalized extreme value model for the Longmenshan region has some degree of stability; moreover, the results can be a reference for earthquake zoning and seismic hazard analysis research.

Key words: Seismic hazard; Magnitude upper bound; Strong earthquake return level; The Longmenshan Region