

朱航, 2017, 南北地震带北段主要断层的分区强震危险性评估, 中国地震, 33(3), 374~384。

# 南北地震带北段主要断层的 分区强震危险性评估

朱航

四川省地震局, 成都市人民南路 3 段 29 号 610041

**摘要** 根据时间-震级可预测模式研究中国南北地震带北段断裂系统的地震复发规律, 利用历史地震记录和断层滑动速率资料计算出区域时间可预测统计模型和震级可预测统计模型, 并对 4 个主要潜在震源区在未来 10 年内的强震复发危险性进行概率评估。计算结果表明, 危险性最高为 S1 区(海原断裂带), 其综合危险率  $K$  值为 0.841, 预测下次主震为 6.9 级; 其次为 S2 区(天桥沟-黄羊川、香山-天景山、六盘山断裂带等),  $K$  值为 0.480, 预测下次主震为 6.4 级; S3 区(祁连山构造带)和 S4 区(西秦岭构造带)远低于 S1 和 S2 区。按照危险程度排序的前 2 位均位于东祁连山-六盘山构造带。

**关键词:** 时间-震级可预测模式 地震复发 南北地震带北段 潜在震源区

[文章编号] 1001-4683(2017)03-0374-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

受青藏高原物质在南北挤压下向东逸出的影响, 华南地块、鄂尔多斯地块、川滇地块和滇西地块均发生了不同性质的变形响应, 总体上形成一条由不同方向、不同性质的断裂和褶皱构成的、现今活动的近 SN 向复杂构造带和地震活动带, 被称为南北地震带(张家声等, 2003)。南北地震带北段位于青藏高原东北缘, 是青藏高原与阿拉善地块、鄂尔多斯地块的交汇部位。由于相邻地块之间的相互作用, 形成了一系列巨大的活动断裂带, 如六盘山断裂带、海原-祁连山断裂带、西秦岭北缘断裂带和黄河断裂带等。

南北地震带北段构造活动剧烈, 导致强震多发。最近 400 年来, 该区域曾发生 1654 年天水南 8.0 级、1739 年银川-平罗 8.0 级、1879 年武都 8.0 级、1920 年海原 8.5 级和 1927 年古浪 8.0 级等特大地震, 这些地震均发生在活动地块之间的边界断裂带上。

南北地震带北段强震活动的规律及其发展趋势是地震活动性研究的重点领域之一。研究者们使用的思路和方法包括: 应用地震活动图像分析方法研究该地震带大地震活动的同步性、主体活动区的有序转移、大地震之间的多次相关迁移与重复等特征(黄圣睦等, 2006);

[收稿日期] 2016-09-11; [修定日期] 2017-04-17

[项目类别] 地震行业科研专项课题(20140823-N81)资助

[作者简介] 朱航, 男, 1966 年生, 正研级高级工程师, 主要从事地震预测研究。E-mail: zhuhang1234@163.com

使用库仑应力理论研究区域强震触发现象,了解断裂间相互作用特点、揭示地震丛集发生规律以及预测未来地震危险区(韩竹军等,2008);利用区域水准、跨断层短测线及 GPS、流动重力等监测资料,归纳强震中期预测的指标判据(王双绪等,2012)。2008 年南北地震带中段发生汶川 8.0 级地震后,武艳强等(2012)利用 GPS 速度场、应变率场、断层滑动速率和 GPS 速度剖面等数据,识别出汶川 8.0 级南北地震带北段主要断裂带及其邻近地区的显著变形差异;邵志刚等(2013)基于强震前孕震区中强地震活动特征讨论了汶川 8.0 级地震后南北地震带北段发生 7 级地震的危险性;王静等(2015)利用 GPS 速度场、跨断层速度剖面以及基准站基线时间序列数据,分析了汶川 8.0 级地震后南北地震带北段地壳运动的动态特征。

时间-震级可预测模式由 Papazachos(1992)在研究爱琴海及其周围浅源强震活动特征关系的基础上提出,并在其后的研究加以改进(Papazachos et al,1993)。他们认为在一个既包含有较大规模的主断裂,也可能包含有次级断裂的地区,地震的复发既有类似于时间可预测的特点,也有类似于震级可预测的行为,在此基础上给出了地震复发长期预测的统计模型和计算方法。在全球主要地震活跃区应用时间-震级可预测模式开展分析,可以进行长期地震预测,或者估算各潜在震源区在某一时间段内强震复发的概率。已开展研究的区域包括:爱琴海地区、日本地区、阿尔卑斯-喜马拉雅地区(Papazachos,1992;Papazachos et al,1994,1997),中美洲和南美洲西海岸(Papadimitriou,1993),伊朗地区(Karakaisis,1994),中美洲和加勒比海地区(Panagiotopoulos,1995),喜马拉雅中部地区(Paudyal et al,2009),喜马拉雅克什米尔地区(Yadav et al,2010),华北及西南地区(邵辉成等,1999),南北地震带(易桂喜等,2000),以及川滇地块边界区域(朱航,2015)。

南北地震带北段是由大规模的主断裂及其次级断裂所组成的活动断裂系统,符合应用地震复发的时间-震级可预测模式的基本构造条件。本研究将根据历史地震记录和断层滑动速率资料,应用时间-震级可预测模式对南北地震带北段主要断层的未来强震复发危险性进行概率评估。

## 1 研究方法

Papazachos 等(Papazachos,1992;Papazachos 等,1993)在对爱琴海地区浅源强震之间时间间隔关系研究的基础上,提出了区域时间-震级可预测模式的表达式

$$\lg T_i = bM_{\min} + cM_p + d\lg m_0 + t \quad (1)$$

$$M_i = BM_{\min} + CM_p + D\lg m_0 + m \quad (2)$$

式(1)~(2)是 2 个多元回归方程。其中, $T_i$  为强震时间间隔; $M_p$  和  $M_i$  分别为上次和下次主震的震级; $M_{\min}$  为统计中所用的最小震级; $m_0$  为该震源区的地震矩年变化率; $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $t$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  和  $m$  为回归常数。式(1)~(2)显示,在一个震源区中,2 次主震之间的时间间隔及下次主震的震级为震源区起算震级以及上次主震震级的某种线性叠加。

另外,在式(1)、(2)中, $m_0$  作为地震活动水平的量度,表征震源区的应力积累状态。该模型与其它强震复发模型的主要差别在于将强震重复性与应力积累状态联系起来,因此,具有明确的物理意义。

Papazachos 等(1993)在计算地震矩年变化率  $m_0$  时,采用 Molnar(1979)在 G-R 关系的基础上建立的计算公式

$$m_0 = \frac{G}{1-E} \times M_{0,\max}^{(1-E)} \quad (3)$$

式中,  $G = 10^{(a+bk/r)}$ ,  $E = b/r$ ,  $M_{0,\max}$  是一个震源区最大震级地震所释放的地震矩,  $a$ 、 $b$  为震级-频度关系式  $\lg N = a - bM$  中的常数,  $r$ 、 $k$  为地震矩  $M_0$  与震级  $M$  经验关系式  $\lg M_0 = rM + k$  中的常数。

确定一个震源区的  $a$ 、 $b$  参数值时, 需要长时间、宽震级范围的地震记录资料, 而本文的研究区内仅积累了半个世纪的中小地震观测资料。在已有的研究结果中, 普遍存在用较短时间的地震资料反推过去较长时间内地震活动的情况, 这可能会导致仅仅使用了部分平静期或活跃期的资料而掩盖了长期地震活动的真实情况, 从而使所求得的地震矩速率与实际可能不相符(易桂喜, 1998)。

为了解决这一问题, 朱航(2015)提出使用断层长期平均滑动速率计算地震矩年变化率的方法。1 次地震释放的地震矩的表达式为

$$M_0 = \mu DS \quad (4)$$

式中,  $\mu$  为断层物质之刚性系数, 一般为  $30 \times 10^9 \text{ Pa}$ ;  $D$  为断层之平均滑动量;  $S$  为断层破裂面积。

如果已知 1 个断层段的年平均滑动速率  $V$ , 那么, 该断层段的地震矩年变化率为

$$m_0 = \mu VS = \mu VLW \quad (5)$$

式中,  $L$  为该段断层的长度;  $W$  为断层面宽度, 一般取  $15 \text{ km}$ 。在时间-震级可预测模式中, 地震矩年变化率  $m_0$  是断层段地震活动水平的量度, 是单位时间、单位断层长度释放的地震矩, 它与断层段的年平均滑动速率  $V$  正相关, 因此, 本研究对于各潜在震源区, 均将  $L$  值取为单位长度。

将式(5)代入式(1)、(2), 可改写为

$$\lg T_t = bM_{\min} + cM_p + d \lg V + t' \quad (6)$$

$$M_f = BM_{\min} + CM_p + D \lg V + m' \quad (7)$$

式中,  $t' = t + d \lg(\mu LW)$ ,  $m' = m + D \lg(\mu LW)$ ; 由于  $t$ 、 $m$ 、 $d$ 、 $D$ 、 $\mu$ 、 $L$ 、 $W$  为回归常数或取值固定, 因此,  $t'$  和  $m'$  是常数。

## 2 南北带北段主要潜在震源区及数据资料

本文取  $34^\circ \sim 40^\circ \text{ N}$ 、 $100^\circ \sim 108^\circ \text{ E}$  的矩形范围为研究区域(图 1), 研究区包含了南北地震带北段主要的断裂带。

根据 M7 专项工作组(2012)的划分, 研究区内存在下列主要的、具有不同构造特征的区域:

(1) 银川-吉兰泰断陷带。主要的活动断裂有贺兰山东麓断裂、银川-平罗隐伏断裂、黄河断裂等, 主要表现出张-剪性正断裂、走滑-正断层活动。

(2) 东祁连山-六盘山构造带。属于青藏高原 I 级活动地块区东北隅的分界断裂带, 其中央主断裂为左旋走滑的海原-祁连山活动断裂带, 北东侧的天桥沟-黄羊川、香山-天景山、烟筒山、牛首山等次级断裂构成一组向 NE 方向弯凸的弧形逆走滑活动断裂系统, 在该断裂系统南东段的六盘山区域(固原-陇县之间), 断裂活动转为以逆冲为主。

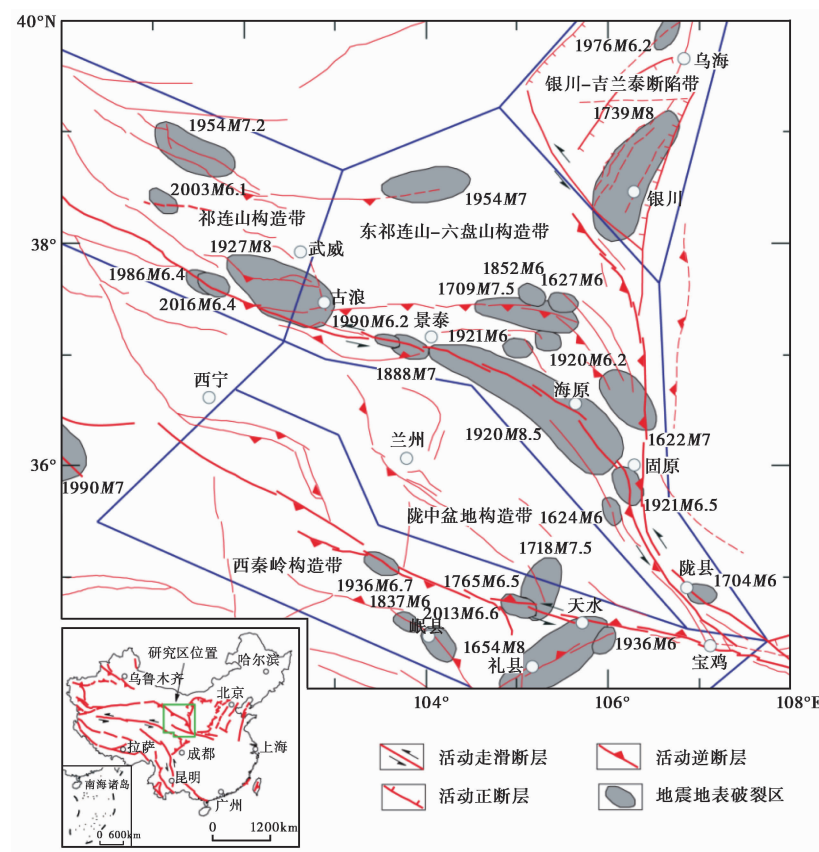


图 1 南北地震带北段构造带划分及 1604 年以来  $M \geq 6$  地震震源区分布  
震源区引自 M7 专项工作组(2012), 其沿断层的延伸经验上与震源破裂尺度相当(Wen et al,2008);  
断层底图由杜方根据徐锡伟主编的最新版全国地震构造图绘制

- (3) 祁连山构造带。包含昌马-俄博、祁连山北缘、冷龙岭断裂带等,为左旋逆走滑断裂。
- (4) 陇中盆地构造带。介于海原-祁连山断裂带与西秦岭北缘断裂带之间,主要有马衔山、会宁-义刚、庄浪河及通渭-清水等活动断裂带。
- (5) 西秦岭构造带。主要包括 NWW 向的西秦岭北缘断裂带及其以南的临潭-宕昌断裂等,以左旋逆走滑为主。

据史料记载,研究区内曾发生多次强震,但一般来说,时间越早,地震记录也相应少,地震史料存在缺失现象。黄玮琼等(1994)对中国大陆地震资料的完整性的研究认为,南北地震带北段自 1604 年以来 6 级以上地震记录基本完整,因此本研究震级下限取 6 级,时间始于 1604 年。

根据《中国强地震目录》<sup>①</sup>,研究区自 1604 年以来共发生  $M \geq 6$  地震 36 次。图 1 显示了自 1604 年以来  $M \geq 6$  地震的震源区分布情况,可以看出,绝大多数地震分布于前述 5 个构造带区域内。

<sup>①</sup> 中国地震局监测预报司预报管理处,2010,中国地震目录(公元前 23 世纪~2010 年 5 月)

因此在本研究中,按照构造带范围划分潜在震源区。在研究时段内,银川-吉兰泰断陷带仅有 2 次地震,陇中盆地构造带无地震,这 2 个构造带因样本不足而不适合加入计算。在东祁连山-六盘山构造带内,存在 2 组不同运动方式的断裂带,包括左旋走滑的海原断裂带以及以逆冲为主的天桥沟-黄羊川、香山-天景山、六盘山断裂带等,本研究将其划分为 2 个潜在震源区,分别为 S1 和 S2 区。祁连山构造带和西秦岭构造带分别为 S3 和 S4 区(图 2)。

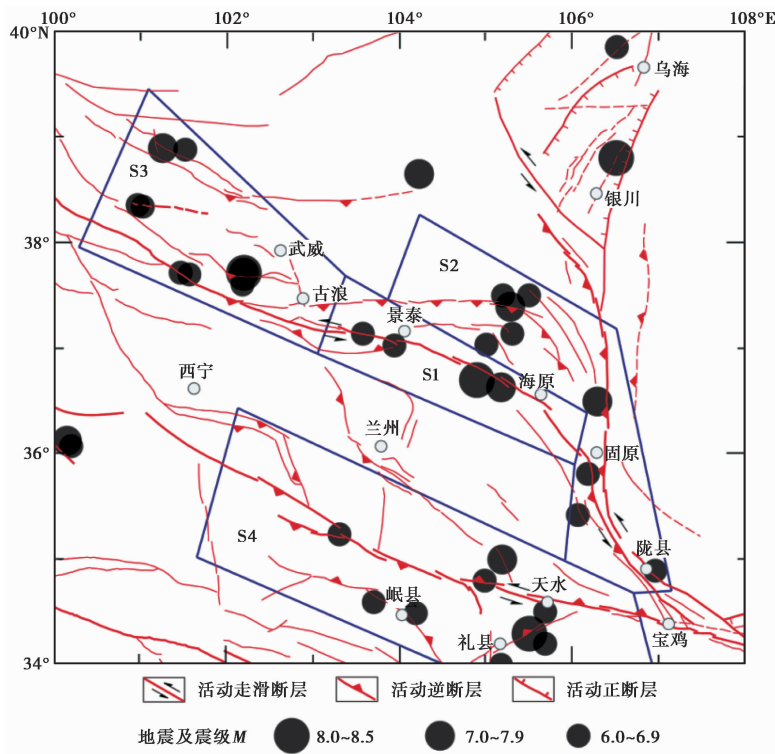


图 2 南北地震带北段  $M \geq 6$  地震分布及潜在震源区划分  
断层底图由杜方根据徐锡伟主编的最新版全国地震构造图绘制

另外,在时间-震级可预测模式的计算中仅涉及主震,在剔除余震后,上述 4 个潜在震源区内的地震共 24 次,见表 1。

刘百箴等(2008)在分析整理多位研究者的南北带北段及附近活动断裂定量结果的基础上,给出南北带北段及其附近主要断层的滑动速率数据。本研究采用这些数据,并综合潜在震源区内各断层的数值,得到潜在震源区 S1~S4 的滑动速率数据,它们分别为 6.0、2.0、3.5 和 2.5 mm/a。

### 3 南北带北段时间-震级可预测统计模型

表 2 是用于多元回归计算的数据。对于每一潜在震源区,计算不同震级以上相邻地震间的时间间隔  $T_i$ 、 $M_p$  和  $M_i$ 。

Panagiotopoulos(1995)在计算中美洲和加勒比海地区的时间-震级可预测统计模型时,在回归计算中去除一些残差过大的数据组,以增大多元回归的相关系数;本研究沿用其处理



表 1 南北地震带北段各潜在震源区内  $M \geq 6$  地震

潜在震源区	发震时间 /年-月-日	震中位置		震级	参考地名
		$\phi_N / (^\circ)$	$\lambda_E / (^\circ)$		
S1	1888-11-02	37.10	104.20	6.2	甘肃景泰
	1920-12-16	36.70	104.90	8.5	宁夏海原
	1990-10-20	37.12	103.60	6.2	甘肃天祝、景泰间
S2	1622-10-25	36.50	106.30	7.0	宁夏固原
	1624-07-04	35.40	105.90	6.0	甘肃庄浪
	1627-02-16	37.50	105.50	6.0	宁夏中卫
	1704-09-28	34.90	107.00	6.0	陕西陇县
	1709-10-14	37.40	105.30	7.5	宁夏中卫
	1852-05-26	37.40	105.10	6.0	宁夏中卫
	1921-04-12	35.80	106.20	6.5	宁夏固原
S3	1927-05-23	37.70	102.20	8.0	甘肃古浪
	1954-02-11	39.00	101.30	7.2	内蒙古阿拉善右旗
	1986-08-26	37.70	101.50	6.4	甘肃肃南
	2003-10-25	38.40	101.20	6.1	甘肃山丹
	2016-01-21	37.68	101.62	6.4	青海门源
S4	1634-01-14	34.00	105.20	6.0	甘肃西和
	1654-07-21	34.30	105.50	8.0	甘肃天水南
	1718-06-19	35.00	105.20	7.5	甘肃通渭
	1765-09-02	34.80	105.00	6.5	甘肃武山
	1837-09	34.60	103.70	6.0	甘肃临潭、岷县间
	1885-01-14	34.50	105.70	6.0	甘肃天水
	1936-02-07	35.40	103.40	6.7	甘肃康乐西南
	1936-08-01	34.20	105.70	6.0	甘肃天水南
	2013-07-22	34.50	104.20	6.6	甘肃岷县、漳县交界

方法,表 2 列出了最终参加计算的 32 组数据。

我们得到的南北地震带北段的回归方程为

$$\lg T_i = - 0.04M_{\min} + 0.10M_p - 1.41\lg V + 1.80 \tag{8}$$

$$M_f = 0.93M_{\min} + 0.08M_p + 0.55\lg V + 0.16 \tag{9}$$

式(8)为研究区的时间可预测统计模型,其回归残差标准差和相关系数分别为 0.20 和 0.66。式(8)中,  $T_i$  与  $M_p$  之间为正相关,表明上一次地震震级越大,则至下一次地震发生时间的间隔越长;  $T_i$  与  $V$  之间为负相关,表明断层滑动速率越高,则至下一次地震发生时间的间隔越短。式(9)为研究区的震级可预测统计模型,其回归残差标准差和相关系数分别为 0.56 和 0.50,由式(8)、(9)可以看出,上一次地震震级越大,则下一次地震震级越大,但权重系数较小;断层滑动速率越高,则下一次地震震级越大。这 2 个方程符合基本常识,说明南北地震带北段断层的时间-震级可预测统计模型是成立的。对回归残差标准差和相关系数进行比较可知,南北地震带北段的时间可预测统计模型优于震级可预测统计模型。

表 2 用于多元回归计算的数据

潜在震源区	$V/\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$	$M_{\min}$	$M_p$	$M_l$	$T_l/\text{a}$	$t_p/\text{a}$	$t_l/\text{a}$
S1	6.0	6.2	6.2	8.5	32.12	1888	1920
		6.2	8.5	6.2	69.17	1920	1990
		6.0	6.0	6.0	77.62	1627	1704
		6.0	7.5	6.0	142.62	1709	1852
S2	2.0	6.0	6.0	6.5	68.88	1852	1921
		6.5	7.0	7.5	86.97	1622	1709
		7.0	7.0	7.5	86.97	1622	1709
		6.0	8.0	7.2	26.72	1927	1954
		6.0	7.2	6.4	32.54	1954	1986
		6.0	6.4	6.1	17.16	1986	2003
		6.0	6.1	6.4	12.75	2003	2016
S3	3.5	6.1	8	7.2	26.72	1927	1954
		6.1	7.2	6.4	32.54	1954	1986
		6.1	6.4	6.1	17.16	1986	2003
		6.1	6.1	6.4	12.75	2003	2016
		6.4	8	7.2	26.72	1927	1954
		6.4	7.2	6.4	32.54	1954	1986
		6.4	6.4	6.4	29.50	1986	2016
		7.2	8.0	7.2	26.72	1927	1954
		6.0	8.0	7.5	63.91	1654	1718
		6.0	7.5	6.5	47.20	1718	1765
		6.0	6.5	6.0	72.00	1765	1837
		6.0	6.0	6.0	47.37	1837	1885
S4	2.5	6.0	6.0	6.7	51.06	1885	1936
		6.0	6.0	6.6	76.97	1936	2013
		6.5	6.0	8.0	20.52	1634	1654
		6.5	8.0	7.5	63.91	1654	1718
		6.5	7.5	6.5	47.20	1718	1765
		6.5	6.7	6.6	77.46	1936	2013
		6.6	8.0	7.5	63.91	1654	1718
		6.6	6.7	6.6	77.46	1936	2013
		6.7	8.0	7.5	63.91	1654	1718

图 3(a)为实际复发时间间隔的对数  $\lg T$  与由式(8)得到的理论值  $\lg T_l$  之间的残差分布情况。由图 3(a)可见,其回归残差分布的离散性较小。图 3(b)为实际事件震级  $M$  与由式(9)得到的理论值  $M_l$  间的残差分布。由图 3(b)可见,其离散性相对较大。

4 南北带北段时间相依的概率地震危险性

上述时间可预测统计模型回归方程预测的平均复发间隔与实际情形间仍然存在不确定

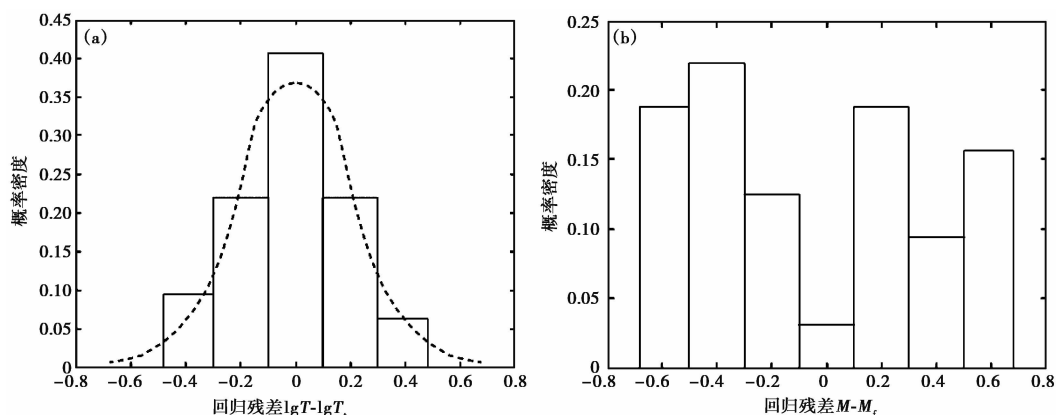


图3 回归计算的残差分布

图(a)为实际复发时间间隔的对数  $\lg T$  与由式(8)得到的估计值  $\lg T_i$  的残差分布直方图(曲线代表均值为 0, 方差  $=\sigma^2(0.04)$  的正态分布密度函数);图(b)为实际事件震级  $M$  与由式(9)得到的估计值  $M_i$  的残差分布直方图

性,本文采用易桂喜等(2000)给出的“时间相依的危险性”概率分析方法来估计地震发生概率。

时间相依的危险性是指在特定时段内地震复发的可能性随上一次地震离逝时间的增加而增加(闻学泽,1995),这种可能性可用概率表示:设某震源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  $P_e$  为

$$P_e(T_e \leq T \leq T_e + \Delta T) = \frac{F(T_e + \Delta T) - F(T_e)}{1 - F(T_e)} \quad (10)$$

式中,  $\Delta T$  为预测时段长度,  $F(T_e)$  和  $F(T_e + \Delta T)$  分别表示从上一次地震以来经过  $T_e$  或  $T_e + \Delta T$  时长时的累积概率,即

$$F(u) = \int_0^u f(T) dT \quad (11)$$

式中,  $f(T)$  为地震复发间隔的概率密度函数。由于式(8)的残差,亦即变量  $\lg T_i$  的残差近似服从于方差为  $\sigma^2$ , 均值为 0 的正态分布,因此,对于给定最小震级  $M_{\min,i}$ 、上次事件的震级  $M_{p,i}$  以及断层段年平均滑动速率  $V$  的对数  $\lg V_i$  的潜在震源区来说,至下次事件复发间隔的对数  $\lg T_i$  应近似服从正态分布(易桂喜等,2000),因为在概率统计上,一个变量残差的概率分布形式,就是该变量的概率分布形式(方开泰等,1987)。

对于给定震源区,考虑“内在的”与“数据的”2种不确定性,用于预测的至下次事件复发间隔的概率密度为一条件密度,即

$$f(\lg T_i | M_{\min,i}; M_{p,i}; \lg V_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times \sigma_{m,i}} \exp \left[ -\frac{(\lg T - \mu_i)^2}{2\sigma_{m,i}^2} \right] \quad (12)$$

式中,  $\mu_i$  为条件期望;  $\sigma_{m,i}$  为预测分布的总体不确定性,由“内在的”与“数据的”2种不确定性相叠加(闻学泽,1995)

$$\sigma_{m,i}^2 = \sigma^2 + \sigma_{p,i}^2 \quad (13)$$

南北带北段各个潜在震源区中的地震复发间隔(对数)的内在不确定性  $\sigma = 0.20$



(图 3(a)),已由式(8)回归残差的标准差得到; $\sigma_{p,i}$ 为数据不确定性,由下式估算得到(易桂喜等,2000)

$$\sigma_{p,i} = \sigma \left[ \frac{1}{n} + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \rho_{ij} (X_{0i} - X_i)(X_{0j} - X_j) \right] \tag{14}$$

式中, $n(=32)$ 为样本数; $X_{0i}$ 、 $X_i$ 分别为式(8)的自变量及相应的平均值; $\rho_{ij}$ 为式(8)系数的逆矩阵  $\rho$  的对应元素。

本文利用上述方法,对南北地震带北段 4 个潜在震源区未来 10 年内(2017~2026 年)地震复发的条件概率  $P_c$  及累积概率  $F$  进行了估算(表 3)。条件概率  $P_c$  是指已知上次地震后经过  $T_c$  时段地震仍未复发,而在给定的未来时段内复发的可能性;累积概率  $F$  反映的是自上次地震以来至所关注时刻的累积地震潜势。另外,为了反映各潜在震源区的综合危险程度,本研究沿用经验性加权综合危险率  $K$ (易桂喜等,2000)对危险程度进行排序(表 3)

$$K = 0.65P_c + 0.35F \tag{15}$$

表 3 南北地震带北段潜在震源区未来 10 年内的地震复发概率及危险性

潜在震源区 编号	最晚事件		条件概率 $P_c$ (2017~2026 年)	累积概率 $F$ (2017~2026 年)	综合 危险率 $K$	危险程度 排序	下次主震 震级 $M_f$
	年份	$M_p$					
S1	1990	6.2	0.76	0.99	0.841	1	6.9
S2	1921	6.5	0.27	0.87	0.480	2	6.4
S3	2016	6.4	0.03	0.03	0.030	3	6.6
S4	2013	6.6	0.01	0.01	0.010	4	6.5

5 结论

本研究根据 Papazachos(1992)提出的时间-震级可预测模式研究中国南北地震带北段断裂系统的地震复发规律,并利用断层长期平均滑动速率计算震源区地震矩年变化率,得到南北地震带北段区域地震复发的时间可预测统计模型及震级可预测统计模型。这 2 个方程基本符合常识,说明该区域时间-震级可预测统计模型是成立的。

基于时间-震级可预测统计模型对南北地震带北段的 4 个潜在震源区未来 10 年内的时间相依的概率危险性计算结果表明,综合危险率  $K$  值最高为 S1 区(海原断裂带),其累积概率  $F$  达到 0.99,条件概率  $P_c$  为 0.76,预测下次主震震级为 6.9 级;其次为 S2 区(天桥沟-黄羊川、香山-天景山、六盘山断裂带等),其累积概率  $F$  为 0.87,条件概率  $P_c$  为 0.27,预测下次主震震级为 6.4 级;S3 区(祁连山构造带)和 S4 区(西秦岭构造带)列第 3、4 位,其中 S3 区  $F$  和  $P_c$  值均为 0.03,S4 区  $F$  和  $P_c$  值均为 0.01,远低于 S1 和 S2 区。

在南北地震带北段的 4 个潜在震源区中,按照危险程度排序的前 2 位均位于东祁连山-六盘山构造带,表明该构造带在未来 10 年内发生强震的危险性高于南北地震带北段其它构造带。

致谢: 闻学泽研究员为本研究提供了其编写的计算程序并对本文提出了修改意见,杜方研究员提供了其绘制的 ai 格式的区域活断层底图,匿名审稿人对论文的修改提出了细致中肯的建议,在此一并表示感谢。

## 参考文献

- 方开泰、许建伦,1987,统计分布,北京:科学出版社。
- 韩竹军、董绍鹏、谢富仁等,2008,南北地震带北部 5 次(1561~1920 年) $M \geq 7$  级地震触发关系研究,地球物理学报, **51**(6),1776~1784。
- 黄圣睦、董瑞英、张永久,2006,东亚南北地震带大震活动性研究,地震研究, **29**(3),304~311。
- 黄玮琼、李文香、曹学锋,1994,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象,地震学报, **16**(4),423~432。
- 刘百箴、曹娟娟、袁道阳等,2008,青藏高原北部活动地块内部的活断层定量资料,地震地质, **30**(1),161~175。
- M7 专项工作组,2012,中国大陆大地震中-长期危险性研究,北京:地震出版社。
- 邵辉成、金学申,1999,区域时间和地震级可预报模型在华北及西南地区的应用,地震学报, **21**(3),291~296。
- 邵志刚、张浪平,2013,南北地震带北段近期强震趋势研究,中国地震, **29**(1),26~36。
- 王静、柴炽章、马禾青等,2015,近年来南北地震带北段地壳运动特征,地震地质, **37**(4),1043~1054。
- 王双绪、张希、祝意青等,2012,南北地震带北段强震形变异常特征与预测指标研究,西北地震学报, **34**(2),105~113。
- 闻学泽,1995,活动断裂地震潜势的定量评估,北京:地震出版社。
- 武艳强、江在森、杨国华等,2012,南北地震带北段近期地壳变形特征研究,武汉大学学报:信息科学, **37**(9),1045~1048。
- 易桂喜,1998,时间-震级可预测模式及其应用研究进展,国际地震动态, (11),8~13。
- 易桂喜、闻学泽,2000,时间-震级可预报模式在南北地震带分段危险性评估中的应用,地震, **20**(1),71~79。
- 张家生、李燕、韩竹均,2003,青藏高原向东挤出的变形响应及南北地震带构造组成,地学前缘, **10**(增刊 I),168~175。
- 朱航,2015,使用时间-震级可预报模式评估川滇地块边界的分段强震危险性,地震研究, **38**(2),221~228。
- Karakaisi G F,1994,Long-term earthquake prediction in Iran based on the time- and magnitude-predictable model,Phys Earth Planet In, **83**(2),129~145。
- Molnar P,1979,Earthquake recurrence intervals and plate tectonics,BSSA, **69**(1),115~133。
- Panagiotopoulos D G,1995,Long-term earthquake prediction in central America and Caribbean Sea based on the time- and magnitude-predictable model,BSSA, **85**(4),1190~1201。
- Papadimitriou E E,1993,Long-term earthquake prediction along the western coast of south and central America based on a time predictable model,Pure Appl Geophys, **140**(2),301~316。
- Papazachos B C,1992,A time and magnitude predictable model for generation of shallow earthquakes in the aegean area,Pure Appl Geophys, **138**(2),87~308。
- Papazachos B C,Papaioannou C A,1993,Long-term earthquake prediction in the aegean area based on a time- and magnitude predictable model,Pure Appl Geophys, **140**(4),593~612。
- Papazachos B C,Papadimitriou E E,1994,An application of the time- and magnitude-predictable model for the long-term prediction of strong shallow earthquakes in the Japan Area,BSSA, **84**(2),426~437。
- Papazachos B C,Karakaisi G F,Papadimitriou E E,et al,1997,The regional time- and magnitude predictable model and its application to the Alpine-Himalayan Belt,Tectonophysics, **271**(3~4),295~323。
- Paudyal H,Shanker D,Singh H N,et al,2009,Application of time- and magnitude-predictable model in the central Himalaya and vicinity for estimation of seismic hazard,Acta Geod Geophys Hu, **44**(2),213~226。
- Wen X Z,Ma S L,Xu X W,et al,2008,Historical pattern and behavior of earthquake ruptures along the eastern boundary of the Sichuan-Yunnan faulted-block,southwestern China,Phys Earth Planet In, **168**(1~2),16~36。
- Yadav R B S,Shanker D,Chopra S,et al,2010,An application of regional time and magnitude predictable model for long-term earthquake prediction in the vicinity of October 8,2005 kashmir Himalaya Earthquake,Natural Hazards, **54**(3),985~1014。

## Strong earthquake risk evaluations on major fault subzones in northern section of the North-South Seismic Belt based on the time- and magnitude-predictable model

*Zhu Hang*

Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

**Abstract** The law of earthquake recurrence in the northern section of North-South Seismic Belt fault system is studied based on the time- and magnitude-predictable model, and the corresponding time- and magnitude-predictable statistical formulae have been obtained by using the historical earthquake records and the fault slip rate data, then the strong earthquake recurrence probabilities of 4 major potential seismogenic subzones within the next 10 years are assessed. The calculation results show that the highest risk is in the Haiyuan fault belt (S1 subzone) with the integrated risk rate  $K=0.841$ , and its forecasted next main earthquake is  $M6.9$ . The second is the S2 subzone (the Tianqiaogou-Huangyangchuan fault belt, Xiangshan-Tianjingshan fault belt, Liupanshan fault belt, etc.) with  $K=0.480$ , and the forecasted next main earthquake is  $M6.4$ . The  $K$  values in the S3 (Qilianshan tectonic belt) and the S4 subzones (West Qinling tectonic belt) are far lower than those in the S1 and the S2 subzones. The top 2 risky subzones are all located in the east of Qilianshan-Liupanshan tectonic belt.

**Key words:** The time- and magnitude-predictable model; Earthquake recurrence; Northern section of North-South Seismic Belt; Potential seismogenic subzone