

地震影响空间危险度及危险区预测方法研究

平建军¹, 冯向东¹, 杨立明²

(1. 河北省地震局, 河北 石家庄 050021; 2. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000)

摘要:根据地震目录统计分析一次强震对外围地区所产生的地震影响空间危险度,在此基础上结合区域地震背景空间危险度及其先发生的若干次强震,通过对研究区域开展地震综合空间危险度空间扫描计算对未来地震危险区进行预测。华北和西南地区地震危险区的实例预测表明,该方法具有一定预测效果,对于分析判定地震危险区可能具有一定的实际意义。

关键词:地震影响; 危险度; 地震危险区; 预测

中图分类号: P315.75

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2010)02-0162-07

Study on Spatial Seismic Effect Risk Degree and Seismic Risk Region Predicating Method

PING Jian-jun¹, FENG Xiang-dong¹, YANG Li-ming²

(1. Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China;

2. Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the earthquake catalogs, the spatial seismic effect risk degree of a strong earthquake to external areas is calculated. Combined with the regional background spatial seismic effect risk degree and several pre-occurred earthquakes, the synthesis spatial seismic risk degree for the study area is calculated through scanning, which could be used to predicate potential seismic risk area. The seismic risk area predicating demonstrations in North China and Southwest China indicate that this method has a certain effects and may be of practical significance to seismic risk area predicating.

Key words: Seismic effect; Risk degree; Seismic risk area; Predicating

0 引言

一次地震的发生对所在区域造成的影响可能是深远的,对未来地震的预测不能不考虑过去曾发生的地震事件。其实地震在空间上的关联性问题已引起不少学者关注,张国民等^[1]曾注意到成串强震间的相互关系,指出一次强震发生之后,对其它孕震区的应力状态将产生增强影响;罗兰格^[2]在分析了现行测震学各种地震预测方法的基本思路后,认为空区、条带、 b 值、地震迁移、相关地震等等及其由此衍生出来的种种方法,都是根据已发生的一些地震对区域应力场的影响效应开展预测未来较强地震的;

陈绍绪等^[3]指出,随着大(强)震的发生,震源体所承担的荷载将转嫁到它的外围地区,使得外围地区特别是那些潜在震源区应力场突然增强,从而对外围这些潜在震源区地震危险性产生影响。本文拟从实际地震目录出发,通过统计分析区域强震在空间上所展示出的规律特征,研究一次强震对外围地区所产生的地震影响空间危险度;在此基础上结合区域地震背景空间危险度及其先发生的若干次强震,对研究区域进行地震综合空间危险度空间扫描计算,进而开展未来地震危险区预测方法研究。

1 研究思路和方法

收稿日期:2009-02-03

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划子专题(2006BAC01B03-04-05)

作者简介:平建军(1962-),男(汉族),河北高邑人,正研级高级工程师,主要从事地震综合预测与研究工作。

1.1 地震影响空间危险度

计算地震影响空间危险度的具体步骤如下:

(1) 首先确定选取研究区域先发生的强震样本震级统计下限 M_a , 再确定后发生的较强地震样本震级统计下限 M_b , 一般 $M_a > M_b$;

(2) 根据历史地震目录, 统计分析研究区域一次 M_a 以上强震发生后, 10 年内再次发生 M_b 以上较强地震的空间间距分布状况;

(3) 以 50 km 为单位, 将空间间距分布划分为若干等份, 统计每一等份内 M_b 以上地震样本数及其出现的频次, 以该频次的大小代表其地震危险程度, 由此得到一次 M_a 以上强震后 10 年内再次发生 M_b 以上地震的空间间距地震危险度分布, 简称该研究区域地震影响空间危险度分布。

1.2 地震背景空间危险度

《中国岩石圈动力学概论》一书关于“地震线”论述中, 根据地质结构、地震活动、地壳厚度、特别是现今动力学环境因子等情况, 对中国大陆划分出了一系列地震线, 涉及大华北地区的地震线有 37 条。37 条地震线交织的网络节点 75 处, 其中有 5 个节点处发生过 8 级地震; 有 8 个节点处发生过 7 级以上地震; 有 24 个节点处发生过 6 级以上地震; 有 19 个节点处发生过 5 级以上地震; 节点发震率为 67%^[4]。可见地震线的节点及其附近为中、强地震活动的主要地方。把这一对中、强震活动地点具有指示意义的信息融入到地震危险区预测研究中, 无疑将提高预测的科学性, 同时也使得预测结果富有动力学含义。

从文献[4]中摘取研究区域地震线节点, 确定每一节点的空间位置(经、纬度), 在此基础上根据研究区域 M_b 以上历史地震目录, 统计计算每一 M_b 以上地震与这些地震线节点间的最短距离, 由此得到研究区域 M_b 以上地震与地震线节点最短距离空间间距分布状况。

同样, 以 50 km 为单位, 将最短距离空间间距分布划分为若干等份, 统计每一等份内 M_b 以上地震样本数及其出现频次, 同样以该频次的大小代表其地震危险程度, 由此得到距地震线节点不同距离 M_b 以上地震危险度分布, 简称该研究区域地震背景空间危险度分布。

需要指出的是: 在研究区域地震背景空间危险度分布时无时效限制, 即研究区域内的每一 M_b 以上地震, 无论新老均作为样本参与统计计算。

1.3 地震危险区预测

假设研究区域内某时段已发生 n 次 M_a 以上强震, 据研究区域的地理范围, 选取一定的空间尺窗、一定的空间步长, 即可滑动扫描计算每一个尺窗的 M_b 以上地震综合空间危险度。根据某空间滑动扫描尺窗的中心点经、纬度, 计算与某个 M_a 以上强震的距离, 据这个距离查取得到该 M_a 以上强震对该空间滑动扫描尺窗的 M_b 以上地震影响空间危险度; 再根据该空间滑动扫描尺窗的中心点经、纬度, 计算与每一地震线节点距离, 并挑出其最短距离, 据这个最短距离查取得到该空间滑动扫描尺窗的 M_b 以上地震背景空间危险度。将研究区域发生的 n 次 M_a 以上强震以及地震线节点视为彼此独立存在的地震危险事件, 借鉴互独立事件概率乘法定则及相关研究公式^[5], 据下式即可计算得到该空间滑动扫描尺窗中心点的地震综合空间危险度:

$$p_{\text{窗}} = 1 - (1 - p_{\text{地}}) \prod_{i=1}^n (1 - p_i) \quad (1)$$

式中, $p_{\text{窗}}$ 为某空间滑动扫描尺窗中心点的地震综合空间危险度; n 为 M_a 以上强震个数; p_i 为某次 M_a 以上强震对该空间滑动扫描尺窗的 M_b 以上地震影响空间危险度; $p_{\text{地}}$ 为该空间滑动扫描尺窗的 M_b 以上地震背景空间危险度。

据计算得到的研究区域各空间滑动扫描尺窗的 $p_{\text{窗}}$ 值, 筛选出最大的 $p_{\text{窗}}$ 值, 并据其对研究区域各空间滑动扫描尺窗的 $p_{\text{窗}}$ 值进行归一化处理, 在此基础上选定勾画 $p_{\text{窗}}$ 等值线起始值, 绘制研究区域 M_b 以上地震综合空间危险度空间分布图, 其高危险度集中区即为未来地震危险区。具体预测参数如下:

(1) 时间预测: 从上述统计规则和式(1)可知, $p_{\text{窗}}$ 是由 $p_{\text{地}}$ 和各 p_i 共同计算得到的, 除 $p_{\text{地}}$ 外各 p_i 都是有预测时效的, 每个 p_i 的预测有效时段就是其相应的某 M_a 以上强震样本发震时间 + 10 年, 那么多个 p_i 的共同(重合)预测有效时段即为 M_a 以上强震最后一个样本的发震时间至 M_a 以上强震第一个样本的发震时间 + 10 年。本研究将这一重合预测有效时段作为 $p_{\text{窗}}$ 的时间预测时段, 亦即研究区域地震危险区的时间预测时段。

(2) 地点预测: 地震综合空间危险度高值集中区。

(3) 震级预测: M_b 以上地震。

另外, 由于 M_a 以上强震对 M_b 以上地震的影响空间危险度 p_i , 是以 M_a 以上强震为中心, 距其 50 km 为单位, 按圆或圆环范围统计的。因此在对研究区域 M_b 以上地震综合空间危险度进行空间滑动扫

描计算时,尽管考虑了由地震线节点统计的 M_b 以上地震背景空间危险度 $p_{地}$,但如果研究区域只有一个 M_a 以上强震样本,或者多个 M_a 以上强震样本的震中位于同一地点,那么由此得到的研究区域 M_b 以上地震综合空间危险度分布的 $p_{窗}$ 高值集中区就可能以圆或沿圆环分布形式出现,这样就导致地震危险区或者位于 M_a 以上强震样本震中周围,或者分布面积较大。要避免这种现象出现,只有通过增加 M_a 以上强震样本,使多个不同震中为中心的 p_i 圆或圆环成交叉重叠,从而达到缩小地震危险区范围的目的,同时也增加了危险区的可信性。为此本文约定,在对研究区域 M_a 以上地震综合空间危险度进行空间滑动扫描计算时,要求 M_a 以上强震样本至少为 2 个以上,且这些强震样本的震中不能位于同一地点。

2 研究结果

2.1 资料

从中国强地震目录^①和中国地震台网全国地震月报目录中,挑选公元 46 年至 2007 年 3 月发生在中国大陆的 $M_s \geq 5$ 地震,对其进行去掉前震和余震后,得到本文所用中国大陆 $M_s \geq 5$ 地震 2 587 条。以此为基础资料,根据不同的研究区域、不同的震级统计下限从中检索有关地震,开展地震影响空间危险度及危险区预测方法研究。

2.2 华北地区

对华北地区($N34^\circ \sim 43^\circ, E108^\circ \sim 122^\circ$)取先发的强震样本震级统计下限 M_a 为 6 级,后发的较强地震样本震级统计下限 M_b 为 5 级。据华北地区历史地震资料完整性研究结果^[6],本文取 1484 年至 2007 年 3 月 5 级以上地震样本进行统计计算,得到的华北地区一次 6 级以上地震后,10 年内再次发生 5 级以上地震影响空间危险度分布见图 1 和表 1。

图 1 和表 1 显示,华北地区地震影响空间危险度分布不是均匀的,当一个 6 级以上地震发生后,10 年内再次发生的 5 级以上地震,落在距该 6 级以上地震 350 ~ 400 km 处可能性较大,即 6 级以上地震对距其 350 ~ 400 km 处 5 级以上地震影响危险度较突出。

华北地区共有地震线节点 41 个(图 2),根据华北地区 1484 年至 2007 年 3 月 167 个 5 级以上地震,得到的 5 级以上地震背景空间危险度分布见图 3 和表 1。

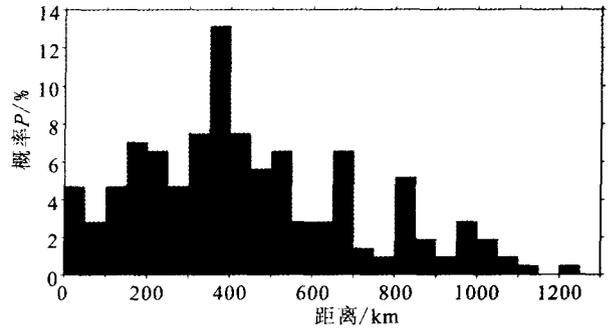


图 1 华北地区地震影响空间危险度分布图

Fig. 1 Distribution of the spatial seismic effect risk degrees in North China.

表 1 华北地区地震影响空间危险度与地震背景空间危险度分布

距离 L /km	地震影响空间 M_b /次	地震影响空间危险度	地震线节点空间 M_b /次	地震背景空间危险度
$0 \leq L < 50$	10	0.047	74	0.443
$50 \leq L < 100$	6	0.028	71	0.425
$100 \leq L < 150$	10	0.047	17	0.102
$150 \leq L < 200$	15	0.070	1	0.006
$200 \leq L < 250$	14	0.066	1	0.006
$250 \leq L < 300$	10	0.047	2	0.012
$300 \leq L < 350$	16	0.075	0	0.000
$350 \leq L < 400$	28	0.132	1	0.006
$400 \leq L < 450$	16	0.075		
$450 \leq L < 500$	12	0.056		
$500 \leq L < 550$	14	0.066		
$550 \leq L < 600$	6	0.028		
$600 \leq L < 650$	6	0.028		
$650 \leq L < 700$	14	0.066		
$700 \leq L < 750$	3	0.014		
$750 \leq L < 800$	2	0.009		
$800 \leq L < 850$	11	0.052		
$850 \leq L < 900$	4	0.019		
$900 \leq L < 950$	2	0.009		
$950 \leq L < 1 000$	6	0.028		
$1 000 \leq L < 1 050$	4	0.019		
$1 050 \leq L < 1 100$	2	0.009		
$1 100 \leq L < 1 150$	1	0.005		
$1 150 \leq L < 1 200$	0	0.000		
$1 200 \leq L < 1 250$	1	0.005		
合计	213		167	

图 3 和表 1 显示,167 个地震绝大多数发生在距地震线节点 150 km 以内,其中 $0 \leq L < 50$ km 的地震为 74 个,占总数的 44.3%; $50 \leq L < 100$ km 的地震为 71 个,占总数的 42.5%; $100 \leq L < 150$ km 的地震为 17 个,占总数的 10.2%; 150 km 以上的地震为 5 个,占总数的 3%。据此认为地震线节点处 150

① 中国地震局监测预报司预报管理处. 中国强地震目录. 1999.

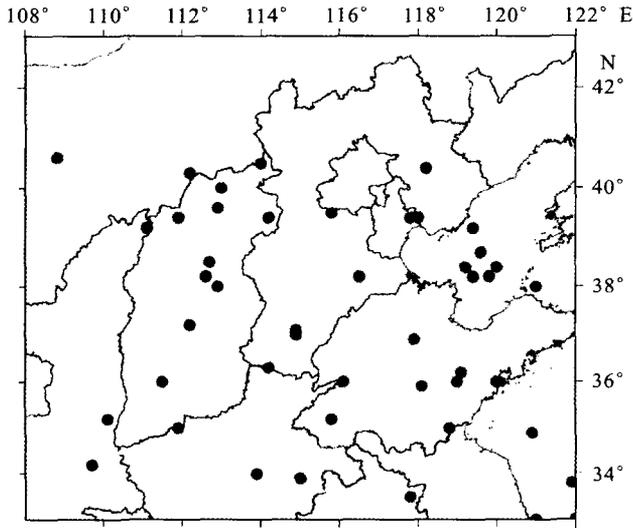


图2 华北地区地震线节点空间分布图
Fig.2 Distribution of seismic nodes in North China.

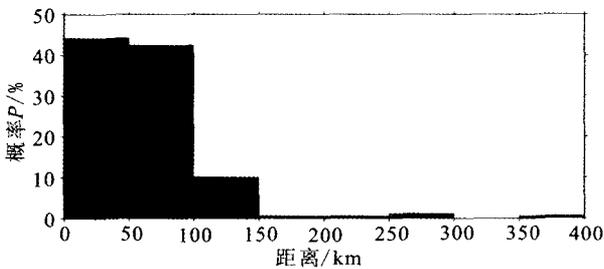


图3 华北地区地震背景空间危险度分布图
Fig.3 Distribution of the background spatial seismic risk degrees in North China.

km 以内特别是 100 km 以内具有发生 5 级以上地震危险,当 $0 \leq L < 50$ km 时,危险度 $p_{地} = 0.443$;当 $50 \leq L < 100$ km 时,危险度 $p_{地} = 0.425$;当 $100 \leq L < 150$ km 时,危险度 $p_{地} = 0.102$ 。

图4是1970年以来华北地区5级以上地震时序图。如果以相邻5级以上地震间隔时间大于3.5年视为地震平静时段,小于3.5年视为地震成组活动时段,则可以划出3个地震相对活动小时段:1973年12月至1985年11月,1989年10月至1992年1月和1995年9月至1999年11月。由于第2个活动小时段发生的2次6级以上地震(1989年10月19日山西大同6.1级和1991年3月26日山西大同6.1级地震)位于同一地点,没有达到预测危险区所需的6级以上地震样本数的要求,下面我们将只对第1和第3活动小时段的6级以上地震后的5级以上地震综合空间危险度进行空间扫描计算。

(1) 第1活动小时段:

由上述得到的华北地区地震影响空间危险度分

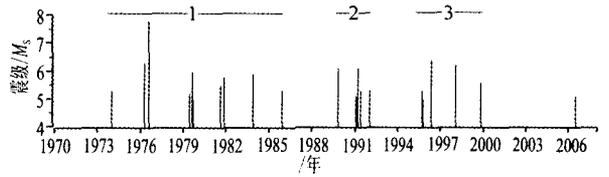
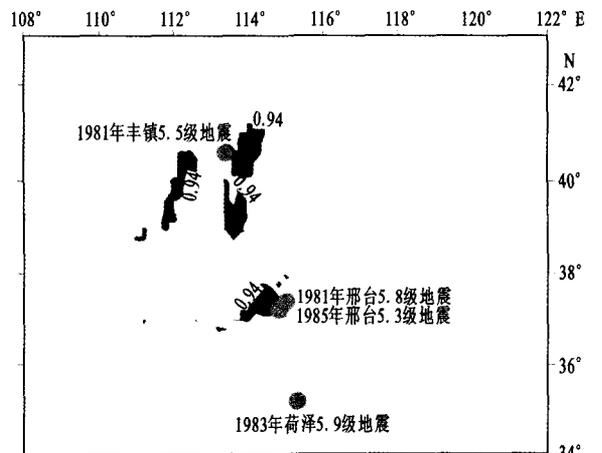
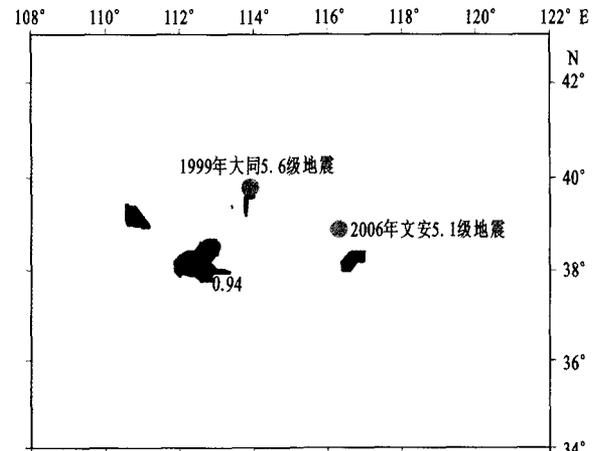


图4 华北地区5级以上地震时序图
Fig.4 M-T diagram of earthquake with $M_s \geq 5$ in North China.

布和地震背景空间危险度分布,再根据第1活动小时段发生的1976年4月6日内蒙和林格尔6.3级、1976年7月28日河北唐山7.8级、1979年8月25日内蒙五原6.0级等3次6级以上地震,按照地震危险区预测的方法步骤,扫描计算得到的1979年9月至1986年4月华北地区再次发生5级以上地震综合空间危险度分布如图5(a)所示,图中等值线起始值为0.94。



(a) 1979年9月-1986年4月



(b) 1998年2月-2006年5月

图5 华北地区5级以上地震综合空间危险度分布图

Fig.5 Distribution of synthesis spatial seismic risk degree with $M_s \geq 5.0$ in North China.

事实上,1979年9月至1986年4月华北地区先后发生了1981年8月13日内蒙丰镇5.5级、1981年11月9日河北邢台5.8级、1983年11月7日山东菏泽5.9级和1985年11月30日河北邢台5.3级共4次5级以上地震,除菏泽5.9级地震外,其余3次5级以上地震均发生在地震综合空间危险度高值区内或边缘。

(2) 第3活动小时段:

同理,根据华北地区第3活动小时段发生的1996年5月3日内蒙包头6.4级和1998年1月10日河北张北6.2级等2次6级以上地震,扫描计算得到的1998年2月至2006年5月华北地区再次发生5级以上地震综合空间危险度分布如图5(b)所示,图中等值线起始值亦为0.94。

事实上,1998年2月以后华北地区先后发生了1999年11月1日山西大同5.6级和2006年7月4日河北文安5.1级共2次5级以上地震,这2次地震发生在地震综合空间危险度高值区内或其附近地区,文安5.1级地震发震时间稍微超出预测时段。

通过1970年以来的震例研究,初步提炼得到华北地区5级以上地震危险区判定的指标,即:地震综合空间危险度大于等于0.94所围成的区域,为未来华北地区可能会发生5级以上地震的地方。

2.3 西南地区

西南地区研究范围为 $N21^{\circ} \sim 34^{\circ}$, $E97^{\circ} \sim 106^{\circ}$;取先发的强震样本震级统计下限 M_a 为7级,后发的较强地震样本震级统计下限 M_b 为6.5级。由于1786年以前(公元46年至1785年)西南地区6.5级以上历史地震较少,特别是7级以上地震后10年内均无6.5级以上地震发生,故本文所取的研究时段为1786年至2007年3月。据以上参数,得到的西南地区一次7级以上地震后,10年内再次发生6.5级以上地震影响空间危险度分布见图6和表2。

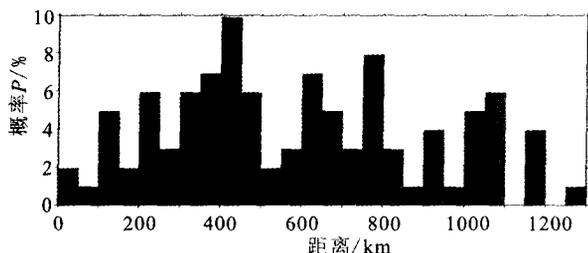


图6 西南地区地震影响空间危险度分布图

Fig. 6 Distribution of the spatial seismic effect risk degrees in Southwest China.

表2 西南地区地震影响空间危险度分布与地震背景空间危险度分布

距离 L /km	地震影响空间 M_b /次	地震影响空间危险度	地震线节点空间 M_b /次	地震背景空间危险度
$0 \leq L < 50$	2	0.020	33	0.579
$50 \leq L < 100$	1	0.010	13	0.228
$100 \leq L < 150$	5	0.050	7	0.123
$150 \leq L < 200$	2	0.020	4	0.070
$200 \leq L < 250$	6	0.059		
$250 \leq L < 300$	3	0.030		
$300 \leq L < 350$	6	0.059		
$350 \leq L < 400$	7	0.069		
$400 \leq L < 450$	10	0.099		
$450 \leq L < 500$	6	0.059		
$500 \leq L < 550$	2	0.020		
$550 \leq L < 600$	3	0.030		
$600 \leq L < 650$	7	0.069		
$650 \leq L < 700$	5	0.050		
$700 \leq L < 750$	3	0.030		
$750 \leq L < 800$	8	0.079		
$800 \leq L < 850$	3	0.030		
$850 \leq L < 900$	1	0.010		
$900 \leq L < 950$	4	0.039		
$950 \leq L < 1000$	1	0.010		
$1000 \leq L < 1050$	5	0.050		
$1050 \leq L < 1100$	6	0.059		
$1100 \leq L < 1150$	0	0		
$1150 \leq L < 1200$	4	0.039		
$1200 \leq L < 1250$	0	0		
$1250 \leq L < 1300$	1	0.010		
合计	101		57	

图6和表2显示,西南地区7级以上地震对距其400~450 km处6.5级以上地震影响危险度相对较突出。

西南地区共有地震线节点75个(图7),根据西南地区1786年至2007年3月57个6.5级以上地震,得到的6.5级以上地震背景空间危险度分布见图8和表2。

图8和表2显示,57个地震全部发生在距地震线节点200 km以内,其中 $0 \leq L < 50$ km的地震为33个,占总数的57.9%,据此认为西南地区地震线节点处50 km以内发生6.5级以上地震危险性较大,其危险度 $p_{地} = 0.579$ 。

图9是1970年以来西南地区6.5级以上地震时序图,与华北地区同样处理方法,以相邻6.5级以上地震间隔时间大于3.5年视为地震平静时段,小于3.5年视为地震成组活动时段,则可以划出3个地震相对活动小时段:1970年1月至1981年1月,1988年11月至1989年4月和1995年7月至1996年2月。由于第2个活动小时段发生的2次7级以上地震(1988年11月6日云南澜沧-耿马7.6级、

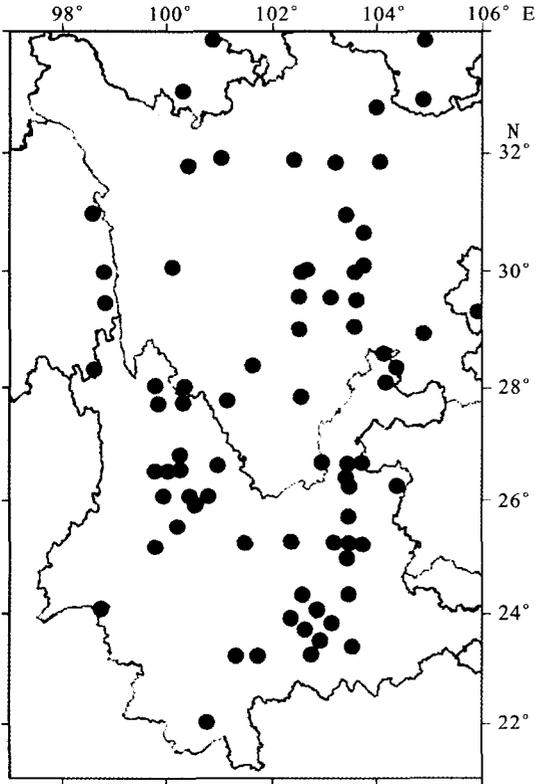


图 7 西南地区地震线节点空间分布图

Fig. 7 Distribution of seismic nodes in Southwest China.

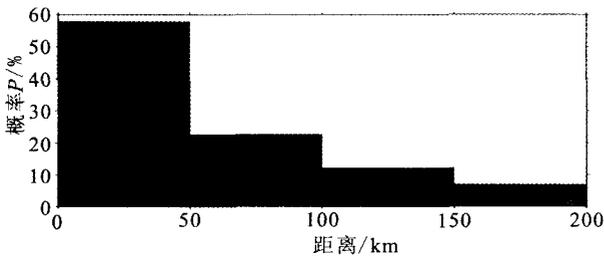


图 8 西南地区地震背景空间危险度分布图

Fig. 8 Distribution of background spatial seismic risk degrees in Southwest China.

7.2 级地震)位于同一地点,没有达到预测危险区所需的 7 级以上地震样本数的要求,我们将只对第 1 和第 3 活动小时段的 7 级以上地震后的 6.5 级以上地震综合空间危险度进行空间扫描计算。

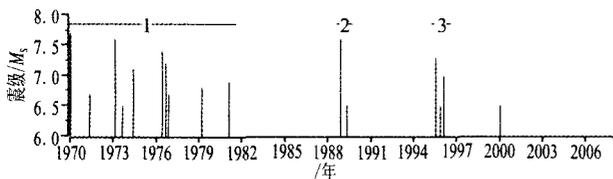
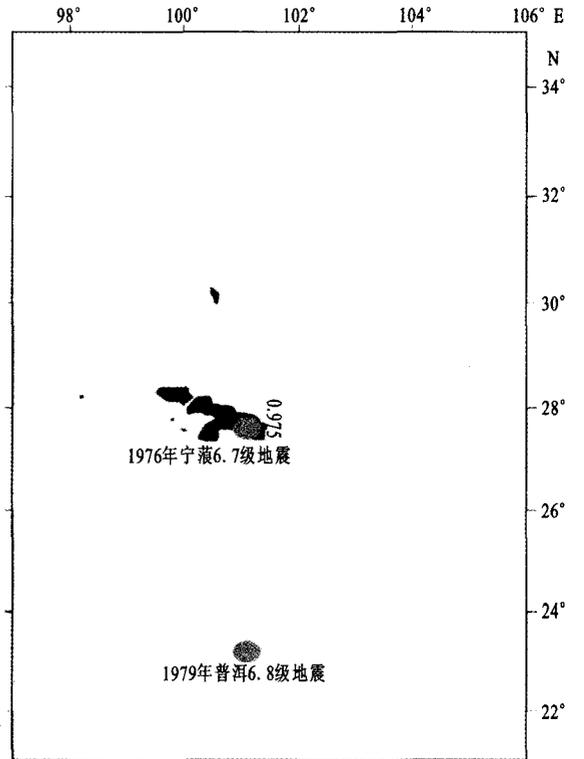
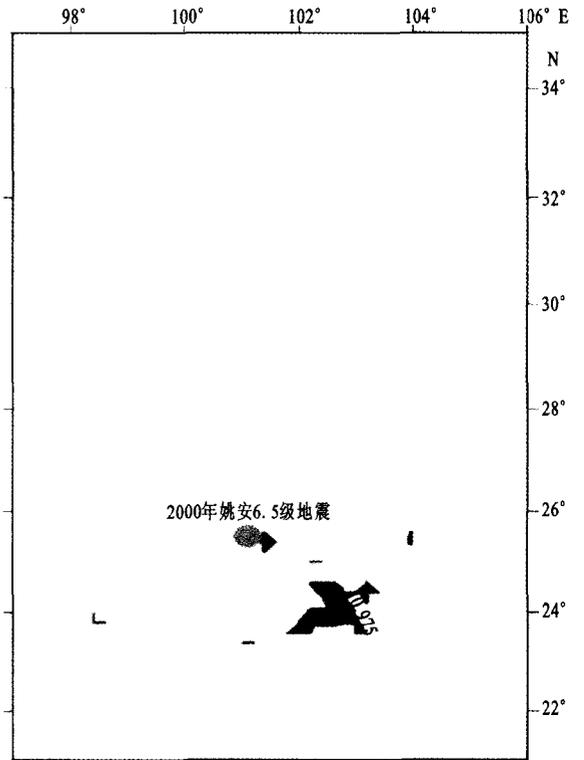


图 9 西南地区 6.5 级以上地震时序图

Fig. 9 $M - T$ diagram of earthquake with $M_s \geq 6.5$ in Southwest China.



(a) 1976年9月—1980年1月



(b) 1996年3月—2005年7月

图 10 西南地区 6.5 级以上地震综合空间危险度分布图

Fig. 10 Distribution of synthesis spatial seismic risk degree with $M_s \geq 6.5$ in Southwest China.

(1) 第1活动小时段:

由上述得到的西南地区地震影响空间危险度分布和地震背景空间危险度分布,再根据第1活动小时段发生的1970年1月5日云南通海7.7级、1973年2月6日四川炉霍7.6级、1974年5月11日云南大关7.1级、1976年5月29日云南龙陵7.3、7.4级、1976年8月16日四川松潘-平武7.2级和1976年8月23日四川松潘-平武7.2级等7次7级以上地震,按照地震危险区预测的方法步骤,扫描计算得到的1976年9月至1980年1月西南地区再次发生6.5级以上地震综合空间危险度分布如图10(a)所示,图中等值线起始值为0.975。

事实上,1976年9月至1980年1月西南地区先后发生了1976年11月7日云南宁蒗6.7级和1979年3月15日云南普洱6.8级共2次6.5级以上地震,其中宁蒗6.7级地震发生在地震综合空间危险度高值区内。

(2) 第3活动小时段:

同理,根据西南地区第3活动小时段发生的1995年7月12日云南孟连7.3级和1996年2月3日云南丽江7.0级等2次7级以上地震,扫描计算得到的1996年3月至2005年7月西南地区再次发生6.5级以上地震综合空间危险度分布如图10(b)所示,图中等值线起始值亦为0.975。

事实上,1996年3月至2005年7月西南地区发生了2000年1月15日云南姚安6.5级地震,位于地震综合空间危险度高值区边缘。

通过1970年以来的震例研究,初步提炼得到西南地区6.5级以上地震危险区判定的指标,即:地震综合空间危险度大于等于0.975所围成的区域,为未来西南地区可能会发生6.5级以上地震的地方。

3 结论与讨论

(1) 通过对华北和西南地区地震影响空间危险度和地震背景空间危险度研究,并分别取各自地区距今最近的2个地震活动时段,采取统一计算方法,据其先发生的强震对后续发生的较强地震进行“硬性”检验计算预测,表明本文给出的地震危险区预测方法具有一定预测效能,可望在地震预测中发挥作用。

(2) 在对研究区域地震综合空间危险度进行空间扫描计算时,要求至少应有2个以上先发生的强震样本(这些强震不能位于同一地点),且每相邻强震样本的发震时间间隔小于10年,因此本文方法更

适用于对研究区域地震活动高潮时段的较强地震进行预测。

(3) 从上述研究思路和研究示例可看出,地震危险区时间预测一般为数年,不超过10年,因此本文开展的是地震中长期预测。

(4) 地震综合空间危险度高值集中区通常不只是一个,在一个大的研究区域内,可能会有几个高值集中区同时存在,它们都是未来 M_b 以上地震可能发生的地点。算例表明集中区面积的大小与未来 M_b 级以上地震震级关系不明显。

(5) Biot^[7]研究认为地层受力后发生褶皱,在褶皱的波形中具有某一卓越波长的褶皱最易形成,而卓越波长的长度主要决定于该地层的尺度,以及该地层与相邻岩层的性质。在地学现象中常常见到地震在空间上以一定的间距(波长)分布。许绍燮等^[8]则把这种现象解释为地壳屈曲所致。可见地震空间分布可能具有一定区域规律性。本文研究得到的华北、西南地区的地震影响空间危险度分布,均存在某一空间间距的地震危险度显得很突出或相对突出。由此一方面印证了学者们的研究思想,另一方面也使得本文给出的地震危险区预测结果不仅具有统计意义,而且具有一定的物理意义和动力学含义。

(6) 在进行研究区域 M_b 以上强震对 M_b 以上地震影响空间危险度分布统计分析时,是以 M_b 以上强震为中心,每距其50 km为单位,按圆或圆环范围统计计算的,没有考虑构造分布与各向异性,即空间上的非均匀性,这是以后要进一步研究的问题。

[参考文献]

- [1] 张国民,刘蒲雄,陈修启.高潮期中成串强震间的相互关系及其机理探讨[J].地震,1991,(3):1-11.
- [2] 罗兰格.地震综合效应场函数及其在地震预报中的应用[J].华北地震科学,1994,12(3):11-15.
- [3] 陈绍绪,李文英.大同-阳高地震的孕育和强震的“增震作用”[J].山西地震,1995,(1):141-19.
- [4] 张德成,蒋铭.地震线[A]//丁国瑜主编.中国岩石圈动力学概论[G].北京:地震出版社,1991:251-260.
- [5] 陈绍绪,平建军.地震短临跟踪预报的综合概率方法[J].山西地震,2000,(3):15-17.
- [6] 黄玮琼,李文香,曹学锋.中国大陆地震资料完整性研究之一——以华北地区为例[J].地震学报,1994,16(3):273-280.
- [7] M A Biot. Theory of folding of stratified viscoelastic media and its implications in tectonics and orogenesis[J]. G. S. A. B., 1961, 72(11):1595-1620.
- [8] 许绍燮,沈佩文.北京周围地区地震的分布特点与地壳屈曲[J].地震学报,1980,2(2):153-168.