

强震发生的关联性及其在地震危险性分析中的应用

黄玮琼 曹学锋 金 严

(中国北京 100081 国家地震局地球物理研究所)

摘 要

本文以华北地震区为研究区,研究一个大地震的发生对其周围地区强震的发生起什么样的影响?地震免疫性是否存在?这种免疫性在时空域上有什么样的分布图象?研究结果表明,华北地区 $M \geq 7$ 地震的发生对其后 $M \geq 6$ 地震的发生有不同程度的免疫性,其中 8 级地震的免疫范围比 7 级地震大得多,就 8 级地震而言,它对其后 7 级地震免疫的范围要比对 6 级地震的免疫范围大。

根据以上分析,运用统计方法给出了地震免疫性因子随时空的变化规律,并探讨了它在地震危险性分析中的具体应用。

关键词 关联性;免疫性;增生现象;地震危险性分析

1. 引 言

近来,在地震危险性分析中如何考虑地震活动的时空非均匀性问题,已得到普遍的重视.在我国新编的地震区划图中,我们着重研究的是某时空范围内地震群体活动的时空非均匀性特征,也即一群具有不同震级的地震在时间上呈现出相对平静与显著活跃相交替;在空间上不同震级档的地震,可能发生的面积大小不等.于是引伸出,分时段、分震级档对不同震级上限潜在震源区,分配地震年平均发生率的处理方法(黄玮琼等,1990).另外,也注意到,对有限使用年限的地震区划与重大工程,不同潜在震源区发生同一震级档地震的可能性是不等的.因此,对不同潜在震源区施以不同的权系数(常向东等,1990).由于地震发生过程的复杂性,影响权系数的因素很多,不同人选取的影响因子也不同.我们使用了图象识别、中期地震预报结果、减震作用、背景地震与小震活动、地震重复与构造空段等几个因素.这些因素并不完全独立,它们是发震构造、地震活动性、地震间的关联性等方面的具体体现.发震构造条件是不随时间变化的;地震活动特征系指某地区地震活动强度、频度随时空的变化;地震间的关联性系指单个大地震之间的相互关系.对于发震构造与地震

* 国家地震局地球物理研究所论著 93A0036.

1992 年 3 月 6 日收到本文初稿,1992 年 4 月 26 日决定采用.

活动性,我们已作了比较详细的研究(黄玮琼等,1990;环文林等,1990).就单个大地震而言,它们之间有独立的一面,又有相关联的另一面.地震重复性反映的是大地震的独立性,它是针对同一震源体而言的.人们平时从直观上感到,一个大地震的发生对周围地区强震的发生有一定的免疫作用,一个地区地震的发生与另一个地区地震的发生有呼应关系,这些反映的是大地震间的相关性.关于地震免疫作用,许绍燮在 1980 年研究强震分布的间距时提出 $M \geq 7.5$ 级地震发生部位受地壳屈曲的控制,半波长间距约 500 km,故 8 级地震后 500 km 范围内属免疫区*. 本文以华北地震区为研究范围,通过对实际地震资料的统计分析,欲探讨在一个地区内,一个大地震的发生会对其它强震的发生产生什么样的牵制作用,免疫作用(下面称为地震免疫性)是否存在,这种免疫性在时空域上的分布规律如何? 以及如何运用于地震危险性分析中.

2. 震例与资料

一个大地震发生后,在其周围地区会产生一定的免疫效应,这是个直观的感觉,也可从一些震例中体会到. 如 1668 年 $8\frac{1}{2}$ 级地震发生后,不到 100 年的时间内正是华北地区地震活动处于高潮的时期,共发生了二次 8 级大震,二次 $7-7\frac{1}{2}$ 级地震,三次 $6\frac{1}{2}-6\frac{3}{4}$ 级地震. 这 7 次地震与郯城大地震相距都在 590 km 之上. 该 $8\frac{1}{2}$ 级大地震后离它最近的地震是 1829 年山东临朐益都间 $6\frac{1}{4}$ 级地震,相距 198 km,可见 $8\frac{1}{2}$ 级巨震的“免疫”范围是很可观的.

但对不同地震,有其不同的特点. 如 1556 年华县 8 级大地震后 12 年,在相距 66 km 处发生了一次 6 级地震,一次 $6\frac{3}{4}$ 级地震. 两者相距一个半月. 除了这两个地震外,华县 8 级震后 50 年内其余 6 级以上地震都发生在 400 km 以外.

表 1 本文所采用的 $M \geq 7$ 地震目录

年·月·日	震 级	地 点	年·月·日	震 级	地 点
1303. 9. 17	8	山西洪洞	1683. 11. 22	7	山西原平
1556. 1. 23	8	陕西华县	1695. 5. 18	$7\frac{1}{2}$	山西临汾
1668. 7. 25	$8\frac{1}{2}$	山东郯城	1830. 6. 12	$7\frac{1}{2}$	河北磁县
1679. 9. 2	8	河北三河平谷	1888. 6. 13	$7\frac{1}{2}$	渤海
1739. 1. 3	8	宁夏银川平罗	1937. 8. 1	7	山东菏泽
1501. 1. 19	7	陕西朝邑	1966. 3. 22	7. 2	河北邢台
1548. 9. 12	7	渤海	1969. 7. 18	7. 4	渤海
1597. 10. 6	7	渤海	1975. 2. 4	7. 3	辽宁海城
1626. 6. 28	7	山西灵丘	1976. 7. 28	7. 8	河北唐山

为了揭示强震间这种关联性的活动规律,本文采用的大地震资料是华北地区 1303 年以来 5 次 8 级以上地震和 1500 年以来 13 次 $7-7.9$ 级地震(表 1). 为保持地震资料的独立性,对双震只保留一个,并删除大地震的余震. 如 1966 年邢台地震只保留了 3 月 22 日 7. 2 级地震;1976 年唐山地震只保留 7. 8 级主震. 下面研究这些大地震发生后,对周围地

* 许绍燮、沈佩文, 1980. 北京地区地震活动的构造特征. 北京地区地震活动特征, 3-42. 北京市地震地质会战办公室.

区 $M \geq 6$ 强震所产生的影响与牵制作用. 由于黄海地震资料明显缺失、震中位置也很不准确, 故这里不予考虑.

3. 处理方法

3.1 时空研究范围的确定

我们感兴趣的问题是一次大地震发生后, 它对其周围地区强震的发生什么样的牵制影响? 影响范围有多大? 所以首先要考虑一个时空域作为研究问题的范围. 图 1 给出华北地区 1303 年以来 5 次 8 级以上地震后 $M \geq 6$ 地震在时空域上的分布图象. 从距离轴上看, 8 级震后最早发生的 6 级以上地震出现在 400 km 左右, 600 km 范围内地震呈现出随着时间与距离的增长, 向右上方集中的趋势; 而 600 km 以外却如同满天星斗. 从时间轴上看, 在距离 500 km 范围内, 大震后 350 年以上地震稀少. 由此作如下分析, 以便确定所需的时空研究域.

对一个地区而言, 在同一应力场作用下, 当岩石中积累的应变能超过极限而产生破裂时, 所表现出来的地震群体活动要持续几十年到几百年, 通称为地震活动期. 一个地区的地震史就是由一个又一个的地震活动期所组成. 据研究, 华北地区一个地震活动期约 300 多年, 因此每个 8 级地震后经过 300 多年面临的将是下一个活动期 8 级地震的再现, 已无“免疫性”可言. 故参考图 1 上地震的分布图象, 在时间轴上, 我们认为取每个大地震后 350 年作为时间域研究范围即可. 在距离轴上, 我们取 600 km 为界. 对重大工

程场地地震危险性分析来说, 一般考虑以场点为中心, 以 300 km 为半径的范围内所有潜在震源区里地震对其所产生的影响. 600 km 相当于其直径的距离, 故以 600 km 为距离范围来研究 8 级大震对其周围地区强震的发生所产生的牵制影响足矣. 下面我们采用统计方法, 揭示大地震与其周围地区其它强震的发生之间的关联性.

3.2 8 级大震与其后强震间的关联性

从图 1 上可以看出, 8 级大震发生后 350 年 65 km 范围内没有地震; 震后 90 年内 $M \geq 6$ 地震随距离的分布较分散; 90 至 140 年范围内基本上是一个空白条带, 这大概与 8 级地震后 90 年, 地震活动进入相对平静阶段, 只发生些零星 6 级地震有关(时振梁等, 1974); 而 140 至 350 年范围内, 地震明显集中在远距离一端. 据此, 我们对震后 65 km 之外的地震分为 0—90 年和 140—350 年两个时段, 统计 8 级大地震发生后 $M \geq 6$ 的地震次数随距离的变化, 以了解 8 级大地震的发生对其后 6 级地震所产生的影响. 之所以用 $M \geq$

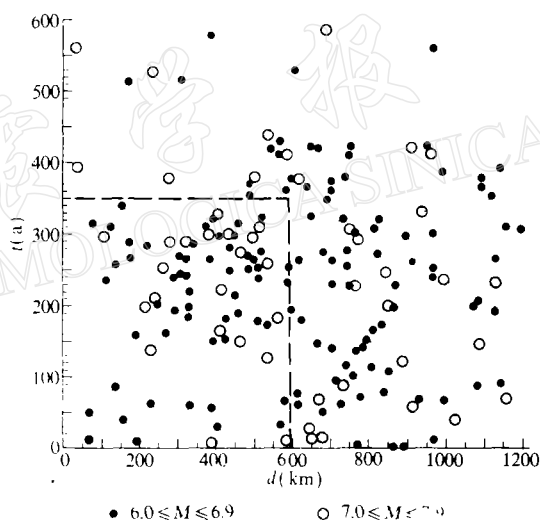


图 1 8 级大震后 $M \geq 6$ 地震在时空域上的分布

6 的地震资料,是认为能发生 7 级以上地震的地方不排除发生 6 级地震的可能性.

据《中国地震简目》中地震震中精度的规定:*

- 1 类震中 $\leq 10\text{ km}$; 2 类震中 $\leq 25\text{ km}$;
- 3 类震中 $\leq 50\text{ km}$; 4 类震中 $\leq 100\text{ km}$;
- 5 类震中 $> 100\text{ km}$.

表 2 华北地区 $M\geq 6$ 的各类精度地震次数及所占百分比

类 别	1	2	3	4—5	无类
个 数(次)	7	36	9	9	11
百分比(%)	9.7	50	12.5	12.5	15.3

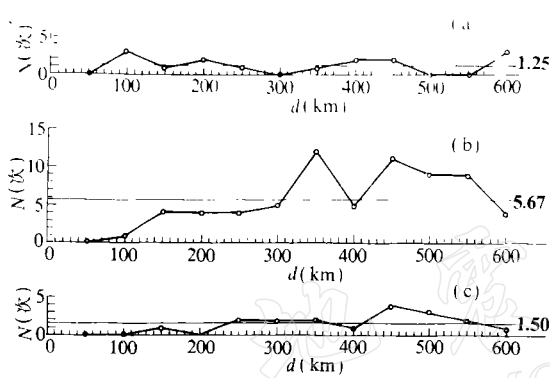


图 2 不同时段的地震数随距离变化的曲线(8 级震后). (a) 震后 90 年内(对 $M\geq 6$); (b) 震后 140—350 年(对 $M\geq 6$); (c) 震后 140—350 年(对 $M\geq 7$)

本文所用华北地区 $M\geq 6$ 的地震共 72 次,各类精度地震次数及所占百分比如表 2 所示.从表中数据可以看出,2 类震中占一半;1,2,3 类震中共占 72.2%.故我们以 50 km 作为统计单元的长度,分别作出上述两个时段各统计单元内地震数随距离变化的曲线(图 2).如果把地震看作是均匀分布的,那么可以把某时空范围内地震总数平均分配给每个统计单元,由此得到一条平均线(如图 2a,b 所示),其数值为 $N \cdot \Delta l/D$.这里 N 为 T, D 范围内地震总次数.对以上两个时段, T 分别为 90 年和 210 年, D 都取 600 km.

Δl 是统计单元的距离长度,这里为 50 km.从图上看出,8 级大震发生后 90 年内, $M\geq 6$ 的地震数随着距离基本上在围绕平均线上下摆动.而 140 年后,曲线则随距离的加大逐渐上升.在 300 km 附近与平均线相交,过后曲线陡然上升,随后又起伏式地渐趋下降,至 580 km 附近与平均线相交叉.由上述分析得出,8 级大震后 90 年内 65 km 外,它对其它强震的发生没有起到牵制作用,即没有显示出“免疫”性;而 140 年之后,在 300 km 范围内 8 级大震的发生对 6 级地震有一定的“免疫”性,随距离的增大,这种免疫性逐渐减小,到了 300 km 附近趋于 0.有意思的是过了 300 km,出现“增生”现象.这种现象可以解释为,由于 8 级大震总是发生在应变能大释放阶段,那么 8 级地震发生后 140 年基本上又进入下一个活动期的地震活跃期阶段.从地震活动地点上看,地震更容易转移到未发生过强震的其它活动断裂带上去活动的缘故.如华北地区,上一活动期强震主要在西部活动,这一活动期转移到东部来活动(高维明,1990).

从图 1 中看出,8 级大震后 350 年、100 km 范围及 140 年、400 km 范围内都无 7 级以

* 中国地震简目,1988.中国地震简目汇编组.

上强震发生, 可以认为在这两个范围内 8 级大震对 7 级以上强震有绝对“免疫”作用. 图 2c 给出 140—350 年时段内所对应的地震数随距离变化的曲线. 从该图看到, 8 级大震发生后 140—350 年间, 250 km 范围内, 8 级地震对 7 级以上强震有一定“免疫”性. 随着距离的增加, 250—400 km 范围内曲线与平均线相接近不免疫, 400—550 km 范围内曲线先升后降呈现出一个“增生”峰. 可见 8 级大震发生后对 7 级地震的免疫范围要比对 6 级地震的免疫范围大.

综上所述, 8 级大震的发生对其周围地区强震的发生, 在不同时空域其“免疫”作用的程度不同(图 3).

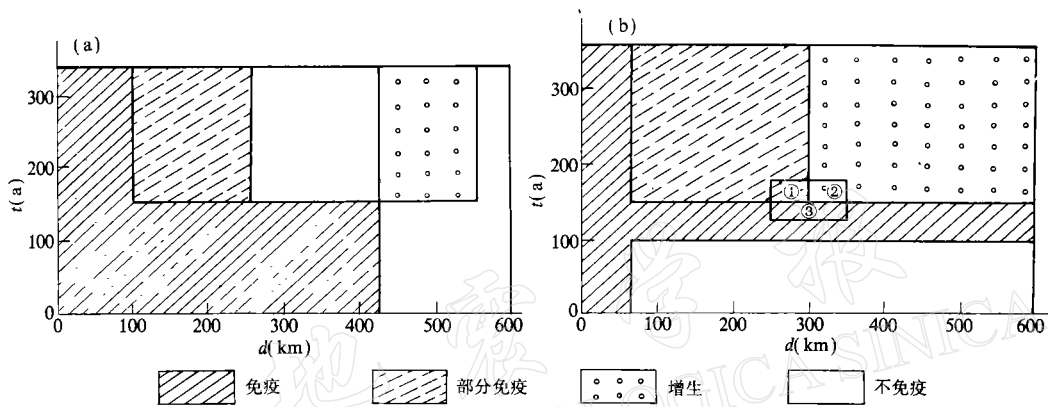


图 3 8 级地震免疫程度分区
(a) 8 级大震后对 7 级地震的免疫; (b) 8 级大震后对 6 级地震的免疫

3.3 7 级地震与其后强震间的关联性

图 4 给出华北地区 1500 年以来 13 次 7 级地震发生后 $M \geq 6$ 的地震在时空域上的分布. 从图上看, 除了渤海内 1888 年 7½ 级地震后 81 年在离震中 49 km 处又发生 1969 年 7.4 级地震外, 7 级地震后 350 年、85 km 范围内没有发生过 $M \geq 6$ 的地震. 另外, 在 7 级地震后 140—190 年间 450 km 范围内有一条空白区, 这也是与相对平静期基本上没有发生 $M \geq 6$ 的地震有关. 用类似 8 级地震的作法, 分析 7 级地震后 0—140 年与 190—350 年两时段 $M \geq 6$ 和 $M \geq 7$ 的地震各统计单元地震数随距离变化的曲线. 同理, 我们可得到 7 级地震发生后, 上述两个时段内 7 级地震对其后 6 级地震和 7 级以上地震的发生, 随着距离的增加没有明显的影响. 所以对于 7 级地震来说, 除了以上给出的两个范围以外, 不存在“免疫”现象, 如图 5 所示. 至于渤海地区, 因地震活动活跃, 重复期短, 要另作考虑.

综上所述, 8 级与 7 级地震发生后, 对其后 $M \geq 6$ 强震的发生, 在不同区域确实存在着不同程度的“免疫”性. 而 8 级大震的发生, 在某一时空段范围又存在着一定的“增生”现象. 大地震间这种关联性在地震危险性分析中要适当加以考虑和应用.

4. 应 用

由于地震活动的时空非均匀性, 不同时期地震活动水平不同; 不同震级档地震在空间

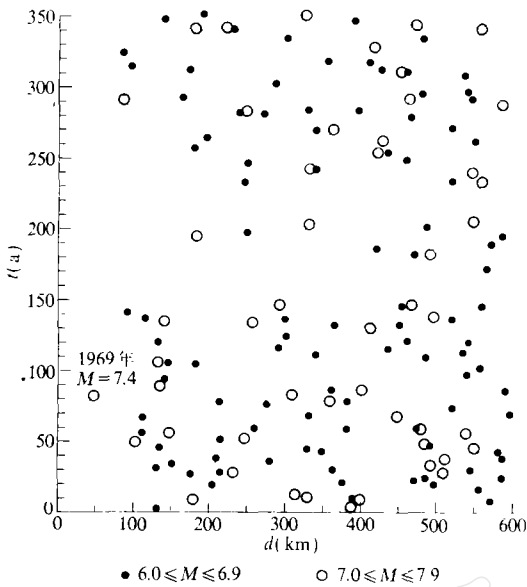


图 4 7 级地震后 $M \geq 6$ 的地震在时空域上的分布

上可能分布的面积也不同. 高活动水平时段所对应的地震年平均发生率要高, 而震级越大地震可能分布的面积越小. 于是我们可以在一个地震带上划分出若干具有不同震级上限的潜在震源区. 根据对未来感兴趣时段地震活动水平的估计, 划分震级档分配年平均发生率于相应的潜在震源区(黄玮琼等, 1990). 但由于种种因素的综合影响, 不同潜在震源区发生同一震级档地震的可能性是不等的. 在现有研究结果基础上, 我们可以用加权的形式来表示(常向东等, 1990). 在我国新编地震区划图中, 是用空间概率分布函数 f_{i,m_j} 来表示(时振梁等, 1991), 其物理含义是一次震级为 $m_j \pm 0.5 \Delta m$

的地震落在第 l 个潜在震源区单位面积上的概率. 确定 f_{i,m_j} 的因子有图象识别、中长期地震预报、地震重复与构造空段、小震活动与背景地震、大地震的免疫性等. 这几个因子之间并不完全独立, 是通过加法的形式采用先对单项因子进行归一, 然后再综合归一的办法得出 f_{i,m_j} . 对于第 m_j 档来说, 其表达式为

$$f_{i,m_j} = \left[\sum_l \frac{r_{il}}{\sum_l r_{il}} \right] / \left[\sum_l \sum_i \frac{r_{il}}{\sum_l r_{il}} \right] \quad (1)$$

其中, 角标 i 代表因子, 角标 l 代表潜在震源区. 但大地震的免疫性对某一震级档地震的发生所产生的影响是综合效应的产物, 即包括地震地质构造条件、地震应力场的作用、地震间的相互作用等, 它是个起决定性作用的因子. 例如, 唐山地震潜在区, 因 1976 年刚发生过 7.8 级地震, 未来 50 年再发生 8 级左右地震的可能性等于 0, 因此这时 $f_{i,m_j} = 0$. 故当 i 为地震免疫性这一因子时, 它与其它因子相比, 对 f_{i,m_j} 的影响有举足轻重的作用. 因此, 这个因子应与其它因子区别对待. 因此有

$$f_{i,m_j} = \left[\sum_l \frac{r_{il}}{\sum_l r_{il}} \right] / \left[\sum_l \sum_i \frac{r_{il}}{\sum_l r_{il}} \right] \cdot r_{kl} \quad (i \neq k) \quad (2)$$

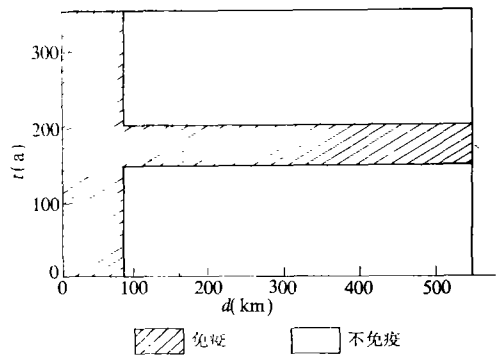


图 5 7 级地震免疫程度分区

r_{kl} 代表地震免疫性,也即地震间的关联性影响.

根据前面研究的结果,大地震间的关联性是在一个大的地震区内才有较明确的物理解释.它与地震活动期及地震的时空转移规律有关. r_{kl} 的取值范围为

$$\begin{cases} 0 \leq r_{kl} < 1 & \text{免疫或部分免疫} \\ r_{kl} = 1 & \text{不免疫} \\ r_{kl} > 1 & \text{增生} \end{cases}$$

所以在地震危险性分析中,我们要超越一个地震带的范围来考虑强震间的关联性对地震年平均发生率分配的影响.

4: 1 地震免疫性因子 r_{kl} 的确定

由图 3 和图 5 看出, $M_s \geq 7$ 地震的发生对其周围地区强震发生所产生的影响,对不同时空范围是不同的,其中空白区为不免疫区, $r_{kl} = 1$; 实斜线区为完全免疫区, $r_{kl} = 0$; 虚斜线区为部分免疫区, $0 < r_{kl} < 1$; 圆点区为增生区, $r_{kl} > 1$. 从上述分析得知, 只有 8 级大震发生后才出现部分免疫区和增生区. 这两个区域内的 r_{kl} 值是随着时空变化的. 现将图 2 所示曲线经平滑处理与计算, 得到 8 级大震后 140—350 年间 8 级地震对 6 级地震与 7 级地震的影响因子 r_{kl} 随距离变化的量板曲线(图 6), 根据该量板曲线就可得到相应距离上的 r_{kl} 值.

4. 2 在地震危险性分析中的应用例子

设某场点未来 50 年内共有 N 个不同震级档的地震潜在震源对其地震危险性有贡献. 其中, 可能发生 m_i 档地震的潜在震源区数为 n 个. 设现在的时间为 T_0 , 那么, 在 T_0 前 350 年范围内如有 $M \geq 7$ 地震出现, 那么量出每个大震震中与这 n 个潜在震源区中每个的最小和最大距离 d_1, d_2 , 算出该地震与 T_0 的时间差 t_1 及 $t_2 = t_1 + 50$. 那么, 在图 3 或图 5 上可以对应出一个

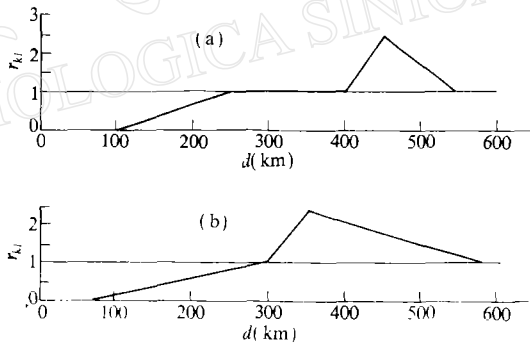


图 6 地震免疫性因子 r_{kl} 随距离的变化曲线(8 级大震后)
(a)对 7 级地震的影响; (b)对 6 级地震的影响

个时空域 $t_1 - t_2$ 及 $d_1 - d_2$. 如果该时空域落在 $r_{kl} = 0, r_{kl} = 1$ 的区内, 显然取值很简单. 如果落在几种不同免疫区的交叉处, 那么可以根据不同免疫区在该范围内所占的面积比来折算出综合的 r_{kl} 值. 举例说明, 如图 3b 中所示的小方框, 它位于 3 个不同免疫区的交界处. $t_1 = 125$ 年, $t_2 = 175$ 年, $d_1 = 250$ km, $d_2 = 350$ km, 则从图中看出, $0 < r_{kl} < 1$ 部分(①区)占 1/4 面积, $r_{kl} > 1$ 部分(②区)占 1/4 面积, $r_{kl} = 0$ 部分(③区)占 1/2 面积. 从图 6 上可查得 250—300 km 范围内 r_{kl} 从 0.8—1, 300—350 km 范围内 r_{kl} 从 1—2.35, 由于是线性关系, 所以简单的方法是取平均值, 对①区 r_{kl} 取 0.9, ②区 r_{kl} 取 1.68, 那么小方框的 $r_{kl} = 1.68 \times 1/4 + 0.9 \times 1/4 + 0 \times 1/2 = 0.65$. 将 T_0 前 350 年中所有已发生过的 $M \geq 7$ 地震, 对 n 个可能发生 m_i 档地震的潜在震源区都进行类似的处理, 再对不同震级档地震所对应的潜在震源区逐一进行类似的处理, 代入式(2)我们就可得到相应的一组 f_{i,m_j} . 把它们代入根据分段泊松模型得到的地震, 在某场点产生的地震动年超越概率公式

$$p(A > a) = 1 - \exp \left\{ - \frac{2r}{\beta} \sum_i \iiint \sum_j f_m(m_j) \operatorname{sh} \left(\frac{1}{2} \beta \backslash m \right) \cdot f_{i,m} f(\theta) p(A > a | E) dx dy d\theta \right\} \quad (3)$$

即可得到对场点地震危险性的估计.

参 考 文 献

- 常向东、环文林、黄玮琼, 1990, 地震活动不均匀性的加权分析方法. 地震危险性中的综合概率法, 58—66. 地震出版社, 北京.
- 高维明, 1990. 地震危险性区划中的时空转换原则. 地震危险性分析中的综合概率法, 94—111. 地震出版社, 北京.
- 环文林、常向东、黄玮琼, 1990. 潜在震源区划分的构造成因法(华北地区). 地震危险性分析中的综合概率法, 9—11. 地震出版社, 北京.
- 黄玮琼、环文林、常向东, 1990. 时空不均匀性的地震活动性参数选取原则与方法. 地震危险性分析中的综合概率法, 42—57. 地震出版社, 北京.
- 时振梁、环文林、曹新玲、武宜英、刘耀斌、黄玮琼, 1974. 中国地震活动的某些特征. 地球物理学报, 17, 1—13.
- 时振梁、酆家全、高孟潭, 1991. 地震区划原则和方法的研究——以华北地区为例, 地震学报, 13, 179—189.

地 震 学 报
ACTA SEISMOLOGICA SINICA