

## 华北地区地震学指标的定量对比筛选 及其综合预报方法研究<sup>\*</sup>

周翠英<sup>1)</sup> 朱元清<sup>2)</sup> 王红卫<sup>1)</sup> 梁凯莉<sup>1)</sup>  
李 平<sup>2)</sup> 郭爱香<sup>1)</sup>

1) 中国济南 250014 山东省地震局

2) 中国上海 200062 上海市地震局

**关键词** 对比筛选法 定量筛选 地震学 参数 综合预报

在现今的地震预报工作中, 地震学方法是首选且必不可少的方法。据粗略统计, 目前用于我国地震预报的地震学参数有上百个之多。参数繁多, 虽可任意选用, 但也带来许多麻烦。“多多益善”, 工作量太大, “择优录用”, 难以确定哪些更好。在国家地震局组织的实用化攻关和“八五”地震短临预报攻关中, 虽然对大多数地震学参数都给出了效能评价, 但由于各家研究中采用的资料、样本数以及评价原则等不尽一致, 据此也很难确定哪些可优先采用, 哪些可以摈弃。因此, 如何在诸多地震学参数中统一筛选, 以便在预报中实现少而优, 是目前地震预报工作者首先面临的问题。以往的参数选择, 多数只使用有震震例, 而无大震区情形如何常不得而知, 这就很难摈弃“虚假异常”; 其次的问题是, 由于地震孕育过程的非线性及复杂性, 其演化过程的非唯一和不确定使得其“震兆”常常因时、因地、因震而异, 这导致了使用单参数预报常常落空。为了能较好地解决上述问题, 本文探索以一种新的指标筛选法——“对比筛选法”选取地震学单项参数, 在此基础上提取地震学综合预报指标。其基本思路是: 在对各参量进行合理归一化基础上, 使用华北地区“有大震”和“无大震”两类样本, 对一些地震学单项基本参数进行定量化对比筛选, 从中获取“有震异常”和“无震正常”参量指标, 并依其映震信息强弱进行加权合成, 由此得到一种对于华北不同地区具普适意义的综合预报指标, 同时发展一种新的地震学综合预报方法, 我们简称其为 SQIP 方法。

### 1 资料的选取及预处理

#### 1.1 资料的选取和样本的确定

研究区取大华北( $30^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$ ,  $110^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$ )区, “有震”样本的下限震级为  $M_L$  (下同)。“有震”和“无震”对象选取 1973 年以后的“有大震”(含 5.5 级以上主震)和“无大震”(不含 5.5 级以上主震)区。计算参数使用的地震资料取 1970 年以来各区台网控制能力下限以上的主震目录(剔除  $M_L \geq 5.5$  地震序列余震), 所使用的“有震”震例在表 1 中列出。为增加有震样本, 还补充了  $110^{\circ}\text{E}$  以西的 3 次中强震(表 1)。

将研究区划分为以  $3^{\circ}\times 3^{\circ}$  为窗、 $1^{\circ}$  为步长, 滑动划定了 130 个子区(图 1), 抽出“有大震”区为“有震”

\* 中国地震局“九五”攻关课题(95-04-03-04-02)部分研究成果。

1998-03-27 收到初稿, 1998-09-01 收到修改稿, 1998-11-05 决定采用。

样本区，随机抽取“无大震”区为“无震”样本区。“有震”和“无震”学习对象分别取“有震”区发震前1个月和无震区基本无邻区大震影响时段(月)。

表1 本文学习和检验使用的震例( $M_L \geq 5.5$ )有关参数一览表

序号	发震时间		发震地点		震级 ( $M_L$ )	样本属性	所在子区号	检验结果
	年-月-日	北纬	东经	地名				
1	1974-04-22	31°27'	119°19'	溧阳	5.8	学习	A <sub>080</sub>	✓
2	1975-02-04	40°42'	122°42'	海城	7.4	学习	A <sub>119</sub>	✓
3	1976-04-06	40°14'	112°12'	和林格尔	6.5	学习	HELI	✗
4	1976-07-28	39°38'	118°11'	唐山	7.9	学习	A <sub>078</sub>	✓
5	1978-05-18	40°42'	122°36'	海城	6.3	学习	A <sub>119</sub>	✓
6	1979-07-09	31°27'	119°15'	溧阳	6.3	学习	A <sub>080</sub>	✓
7	1980-01-08	40°16'	124°59'	北黄海	6.0	学习	A <sub>129</sub>	✓
8	1981-08-13	40°30'	113°25'	丰镇	5.8	学习	A <sub>029</sub>	✓
9	1981-11-09	37°26'	114°58'	宁晋	6.1	学习	A <sub>036</sub>	✓
10	1983-11-07	35°16'	115°17'	菏泽	6.2	学习	A <sub>034</sub>	✓
11	1984-05-21	32°29'	121°36'	南黄海	6.2	学习	A <sub>101</sub>	✗
12	1985-11-30	37°14'	114°49'	隆尧	5.6	学习	A <sub>036</sub>	✗
13	1989-10-19	39°57'	113°49'	大同	6.1	学习	A <sub>028</sub>	✓
14	1990-02-10	31°41'	121°00'	常熟	5.5	学习	A <sub>090</sub>	✓
15	1991-01-29	38°28'	112°32'	原平	5.5	学习	A <sub>017</sub>	✓
16	1992-01-23	35°12'	121°04'	南黄海	5.6	学习	A <sub>104</sub>	✓
17	1995-09-20	34°58'	118°06'	苍山	5.6	学习	A <sub>073</sub>	✓
18	1976-09-23	40°05'	106°21'	巴音木仁	6.4	学习	BAYI	✓
19	1979-08-25	41°14'	108°07'	五原	6.3	学习	WUYA	✓
20	1996-05-03	40°47'	109°41'	包头	6.6	学习	BAOT	✗
21	1973-12-31	38°28'	116°33'	河间	5.6	检验	A <sub>057</sub>	✗
22	1975-09-02	32°54'	121°48'	南黄海	5.7	检验	A <sub>101</sub>	✓
23	1978-08-30	38°18'	124°08'	北黄海	5.4	检验	A <sub>128</sub>	✓
24	1979-05-22	31°06'	110°28'	巴东	5.5	检验	A <sub>000</sub>	✓
25	1979-06-19	37°06'	111°52'	介休	5.5	检验	A <sub>006</sub>	✗
26	1991-03-26	39°58'	113°51'	大同	6.1	检验	A <sub>028</sub>	✓
27	1991-05-30	39°41'	118°16'	唐山	5.6	检验	A <sub>078</sub>	✗
28	1994-07-26	35°02'	124°23'	南黄海	5.6	检验	A <sub>104</sub>	✓
29	1996-11-09	31°50'	123°06'	长江口东	6.4	检验	A <sub>120</sub>	✓
30	1997-07-28	33°43'	122°10'	南黄海	5.5	检验	A <sub>113</sub>	✓
31	1998-01-10	41°06'	114°18'	张北	6.2	检验	A <sub>029</sub>	✗

## 1.2 资料的预处理

选取预报中常用的几种相对独立的地震学基本参数，即频度  $N$ 、能量  $E$  和  $\lg E$ 、缺震  $QZ$ 、地震活动度  $S$  值(谷继成, 魏富胜, 1987)、震级频度关系系数  $b$  值、地震集中度  $C_1$  值(顾方琦, 1985)、地震平静参数  $\beta n$ (韩渭宾等, 1997)、地震时间熵  $qt$ (王琳瑛, 朱传镇, 1988)，以及  $\eta$  值(赵振, 1983)等作为参选参数，使用中国地震局分析预报中心地震数据库给出的目录资料，经剔除余震后，以  $\lg N = a - bM$  关系线确定各子区震级下限  $M_0$ ，使用大于  $M_0$  的主震目录参加参数计算。以周翠英等(1994)给出“对比筛选法”中的两种归一化方法对参数进行归一化：①求取参数的相对变化量，即统计时段的参量值和本区该参量长期平均水平之比，以其作为统计量；②以各参量不同时段的相对变化率作为统计量。这里的长期平均水平是经两次剔除离散点求均值获得。考虑到地震平静幕和活跃幕地震总体水平的差异，本文长期均值的取法较周翠英等(1994)给出的稍有改变，是以样本时段前5年资料求取的均值作为长期平均水平而取代以

全部资料求取的长期均值。将按以上方法归一化的两类参量的名称分别冠以 Y 和 V 以示区别, 即第 1 类归化量以  $YN_1$ ,  $YN_3$ ,  $YE_1$  等符号命名, 后一种归化量则以  $VN_{1.3}$ ,  $VN_{6.12}$ ,  $Vb_{6.12}$  等符号命名, 具体

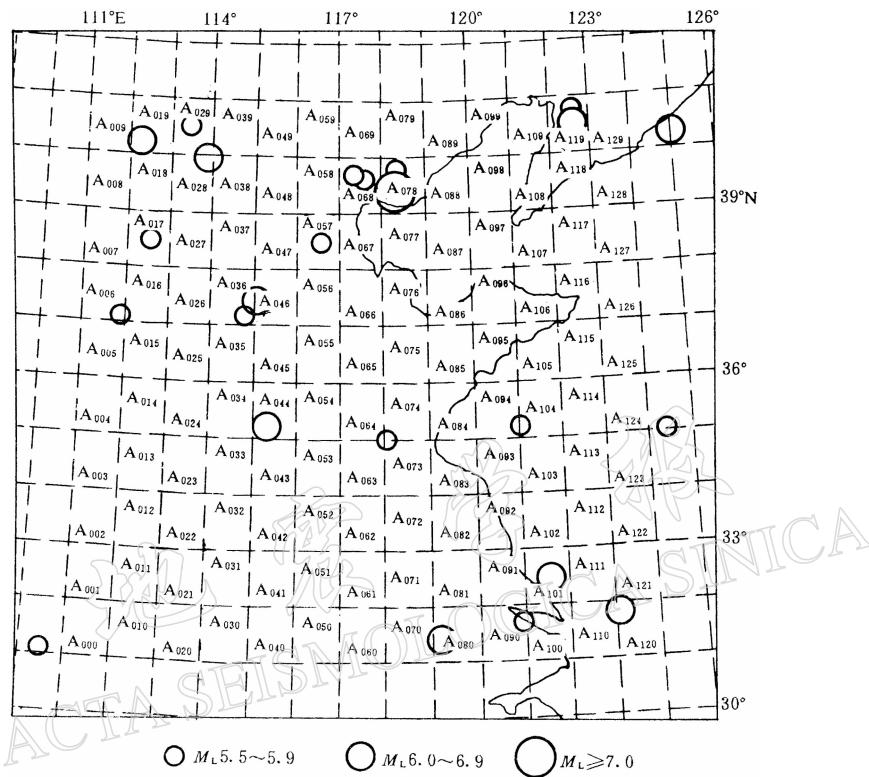


图 1 本文使用的震例( $M_L \geq 5.5$ )及研究区范围和子区划分。

图中数码为研究子区名称, 每一子区为以名称所在格子为中心的  $3^\circ \times 3^\circ$  范围

含义参见周翠英等(1994)的对比筛选法。取时间窗 1 年, 逐月滑动求取每一个研究子区由上述参数不同时间组合所得到的近 70 项单项参量值, 以备筛选。

## 2 参数的筛选及预报指标的确定

### 2.1 单项参数的筛选结果及其指标阈值的确定

确定一组研究对象(含“有震”和“无震”两类)用于指标筛选试验, 每组对象一般在 45~55 个之间。取华北地区 20 个发生  $M_L \geq 5.5$  地震的子区发震前一个月为“有震”对象, 随机选定某些“无震”区无周围大震影响时段(年、月)作为“无震”对象。对于某一参量, 每一个对象有一个取值, 所有对象的取值组成该项参量的取值组。筛选的具体做法是, 在该组参量的取值范围内找到两个阈值点, 将其划分为大、中、小 3 个区间。对已经归一化的参量, 有震对象前肯定是要取值过大或过小者居多(对应高活动或低活动异常)。因此不断调整两个阈值, 使得有震对象在大值和小值区间内足够多(占有震对象 70% 以上), 而无震对象在其间足够少(占无震对象的 30% 以下)。反之亦然, 且需有  $P_D - P_N \geq 30\%$ 。其中,  $P_D$  和  $P_N$  分别表示有震类(D类)和无震类(N类)对象在同一区间内所占各自相应类别对象总数的比例。如此处理所有参量, 将可否找到符合上述规则的阈值点作为参量的取舍标准, 逐一分析每种参量, 且不断改变试验样本组合(替换对象), 以观察所选参数及阈值的稳定性。由数十次试验结果可以看出, 大约有 20 余项参数可找到符合规则的阈值点, 其  $P_D - P_N$  一般在 30%~60% 之间。因此, 它们可作为被选中的参数得以保留, 而其

取值的两个阈值点则定量化地确定了“正常”和“异常”指标.

## 2.2 综合预报指标确定

将筛选试验中使用的各组对象作为预测样本，在筛选出来的 20 余项参量中择优选其中的 19 项、13 项和 11 项用于预测试验，以确定综合指标.

按单参量映震信息强弱(即  $P_D - P_N$  值的大小)赋于选定的参量不同权重，经改变对象、改变指标数、改变权重值多次多组试验，分析其预测检验结果，最终确定了表 2 所列 13 项参数及相应阈值和权重作为预测参量最好，并由实验得到其预测规则为：当对象前 13 项参数中有 50% 以上为异常时，该对象被判定为危险类(D)，即其后有大震危险。否则为安全类(N)，其后无大震。由此，13 项参量中异常指标比值  $P$  值被确定为综合预报参量，而  $P=50\%$  则为判断参量“异常”和“正常”的定量阈值指标。 $P$  值的具体表达式为

$$P = n_a / N \quad (1)$$

式中， $n_a$  为经加权后的异常参量数， $N$  为参量总数。 $P$  值为异常参量数占参量总数的百分比，其物理含义可理解为某一对象前所显示的有震异常信息量。

表 2 最终筛选出的单项参数及其阈值和合成综合指标使用的加权数

序号	名称	使 用 参 数 含 义	阈值(预测组使用)		加权数
			1	2	
1	YN * 1	对象前 1 个月 $M_L \geq 3$ 地震频度的相对变化量	-0.197	1.891	0.65
2	YE1	对象前 1 个月 $M_L \geq M_0$ 地震能量的相对变化量	-0.409	0.873	1.10
3	YE3	对象前 3 个月 $M_L \geq M_0$ 地震能量的相对变化量	-0.524	-0.482	1.50
4	YS1	对象前 1 个月 $M_L \geq M_0$ 地震活动度 $S$ 值的相对变化量	-0.059	0.097	1.00
5	YS3	对象前 3 个月 $M_L \geq M_0$ 地震活动度 $S$ 值的相对变化量	-0.064	0.080	0.90
6	VQZ1.12	对象前 1 个月与前 12 个月缺震值之比	0.956	1.105	1.30
7	Vb1.12	对象前 1 个月与前 12 个月 $b$ 值之比	0.819	1.837	0.20
8	YQZ3	对象前 3 个月的缺震值	-0.013	0.091	0.80
9	YQZ12	对象前 12 个月的缺震值	-0.130	0.009	0.80
10	YC1	对象前 1 个月的 $C_1$ 值	0.000	1.745	1.05
11	YC3	对象前 3 个月的 $C_1$ 值	0.000	1.699	0.95
12	VC1.12	对象前 1 个月与前 12 个月 $C_1$ 值之比	0.328	1.097	1.00
13	Ybtn12	对象前 12 个月的 $\beta n$ 值	-2.325	1.243	0.75

## 3 结果检验

### 3.1 内符检验

依据上节中确定的综合指标，对 55 组学习对象进行内符预测检验，其中 20 个有震对象报错(漏报)4 个(参见表 1)，35 个无震对象报错(虚报)1 个。以下式评分标准(许绍燮，1989)，即

$$R(\text{报准率}) = 1 - a(\text{漏报率}) - b(\text{虚报率}) \quad (2)$$

对检验结果进行评分， $R$  值为 0.771。按有震报对数和漏报数查 97.5% 置信水平下的  $R_0$  值表， $R_0$  为 0.208， $R$  值远高于  $R_0$ ，表明该综合指标有较好的预报效能。

### 3.2 外推检验

在图 1 所示的 130 个子区中，随机抽出 42 个子区，按不同时间组合组成 59 个检验对象进行外推检验。其中 11 个有震对象报错 4 个(参见表 1)，48 个无震对象报错 8 个，符合率为 0.797，计算  $R$  值为 0.468。由表 1 可见，漏报的 4 次地震中，3 次为震级偏低者，且其中有两次为超晚期强余震，这类地震一般异常信息较弱。

### 3.3 时空扫描试验

考虑到计算资料的滑动延迟作用, 试验对象从 1973 年开始。仍以  $3^\circ \times 3^\circ$  区间且滑动  $1^\circ$  计算 130 个子区的  $P$  值。每年取 6 月和 12 月两组值绘制全区  $P$  值空间等值线图, 同时也绘制了 1976 年 4 月和林格尔 6.5 级、1975 年 2 月海城 7.4 级、1983 年 11 月菏泽 6.2 级和 1984 年南黄海 6.2 级等典型地震前一个月的  $P$  值等值线图, 并在每张图上标出其后 2 年内  $M_L \geq 5.0$  地震(大于 6 级地震取 2.5 年), 分析地震与异常区的对应情况。图 2 给出了几个实例。

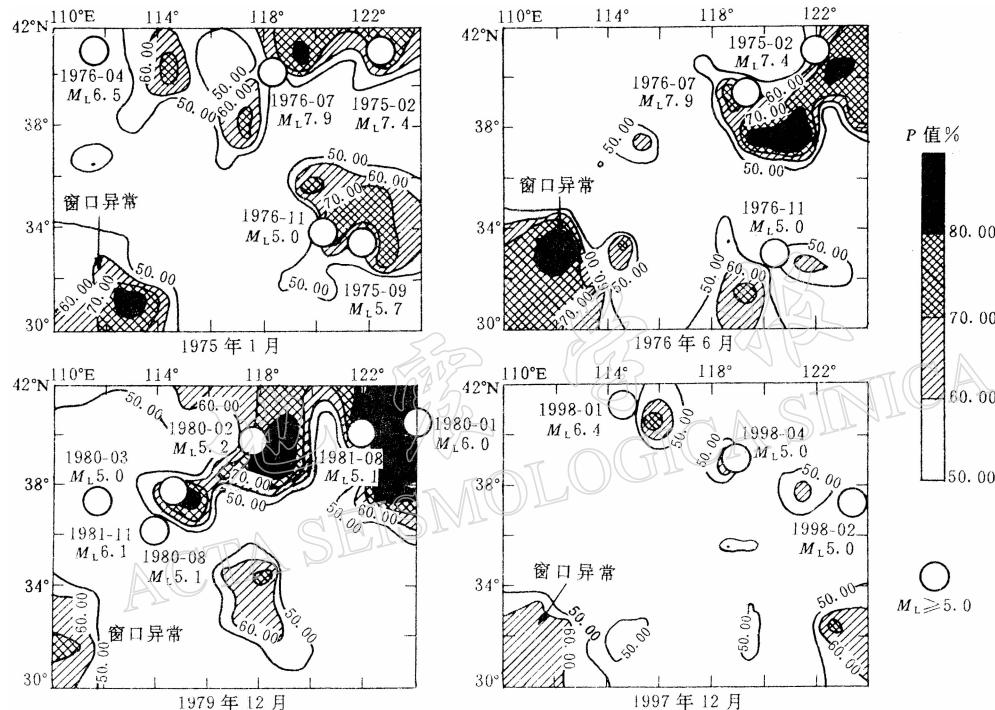


图 2 华北地区  $P$  值时空扫描实例

据粗略统计, 剔除直接余震后, 自 1973 年以来, 华北地区共发生  $M_L \geq 5.0$  地震 58 次。震前不同时间、不同程度出现异常的有 55 次, 占地震总数 95%。这些异常多在震前 2 年或 1 年内开始出现, 一般震级越大异常出现越早, 少数大地震异常开始于震前 2.9~2.5 年, 震前 1 年或半年左右开始收缩或减弱, 有的甚至结束, 但多数持续至发震。其中异常在震前半年仍持续的有 42 次, 约占有异常地震总数的 70%; 在震前 1 年到半年之间结束的有 5 次, 震前 1 年左右或 1 年前结束的有 5 次, 约各占总数的 14% 左右。

异常区确定为: ①  $P \geq 50\%$  区域大于  $2^\circ \times 2^\circ$ ; ② 若异常范围大于  $4^\circ \times 4^\circ$ 、小于  $8^\circ \times 8^\circ$  则计为 2 个区。全部 57 幅图中共出现异常区 235 个(次), 除去窗口异常区 49 个(次), 净异常区 186 个(次), 其后 2.5 年内有震对应的为 131 个(次)(在不同张图中有效时限内出现的同一次地震分别参加统计), 约占异常总数 70%, 虚报数约为 30%。仍按许氏评分, 计算上述检验结果  $R$  值约为 0.65。

大致统计 57 幅图中异常区总面积约为 2 190 平方度, 而 57 幅图累计总面积为 9 576 平方度, 异常面积约占总面积的 23%, , 除去窗口异常区, 异常区面积约占总面积的 20%。

另外, 我们还进行了部分子区的时间扫描试验, 也取得了较理想结果。

## 4 结论和讨论

(1) 关于 SQIP 方法。经多次试验筛选, 得到了应用于华北地区效能较高且较为稳定的地震学单项参

量指标，并形成了较好的综合参量  $P$  和相应的指标阈值，给出了判断规则。我们将以此规则和指标作出预报的方法称为地震学定量综合预报方法(Seismological Quantitative Integrated Prediction Method)，简称为 SQIP 方法。经内符、外推和时空扫描检验，表明 SQIP 方法所依据的综合指标  $P$  值不仅具有定量性和在华北地区较好的普适性特点，也有较好的预报效果，它可以在华北地区 90% 以上的  $M_L \geq 5.0$  地震前 2.5 年内显示出异常，预报区仅占研究区域的 20%。因此，对华北地区的中强地震预报具有较高实用价值。

(2) 关于窗口异常效应和华北区窗口异常。在实际检验中发现某些区域具有一定的窗口效应，这些区多在华北区 5.5 级以上特别是 6 级以上地震前 2 年或 1 年左右出现，在对应地震发生前较短时间内或发生后消失，但其本区长期以来很少有 5 级以上地震发生。1989 年以前，湖北巴东姊归一带( $30^{\circ} \sim 34^{\circ}$ N,  $110^{\circ} \sim 113^{\circ}$ E)、安徽霍山至湖北麻城一带( $30^{\circ} \sim 33^{\circ}$ N,  $114^{\circ} \sim 117^{\circ}$ E)窗口效应明显。1989 年大同地震前后，又增添了山西运城至临汾一带( $34^{\circ} \sim 37^{\circ}$ N,  $110^{\circ} \sim 114^{\circ}$ E)。因此，这些区可作为华北地区大地震的预报“窗口”，这比小震频度“窗口”更具稳定性，也更为实用。上节中提到的“窗口异常”即指这类异常。

(3) 关于对比筛选法。以对比筛选法使用“有震”和“无震”两类样本，可以较为有效地摈弃“虚假异常”，而将含孕震信息强的“异常”指标提取出来，因此，可以其用于其它参数甚至其它学科异常指标筛选。由于筛选中对地震学参数进行了归一化，使所获单项和综合指标至少在研究区范围内具有普适意义。同时，由于定量筛选获取了定量化的判别指标，应用中易于规范异常，因此得到的预报指标更具实用价值。

## 参 考 文 献

- 韩渭宾, 廖志和, 王维恩, 等. 1997. 川滇分带地震学短期综合预报方法的研究. 见: 国家地震局预测预防司编, 地震预报的理论与方法——“八五”攻关三级课题论文集. 北京: 地震出版社, 72~80
- 顾方琦. 1985. 地震空间集中度的另一种表示方法及其在地震预报中的应用. 地震, (4): 1~8
- 谷继成, 魏富胜. 1987. 论地震活动性的定量化: 地震活动度. 中国地震, 3(增刊): 12~22
- 王琳瑛, 朱传镇. 1988. 鄱庐断裂带地震时空分布的统计特征及其强震危险性估计. 中国地震, 4(3): 80~85
- 许绍燮. 1989. 地震预报能力评分. 见: 国家地震局科技监测司编. 地震预报方法实用化攻关文集——地震学专集. 北京: 学术期刊出版社, 586~590
- 赵振. 1983. 大震前震级-频度关系中参数  $\eta$  的减小. 地震科学实验, 14(1): 5~9
- 周翠英, 蒋海昆, 王红卫, 等. 1994. 地震学预报指标的一种提取方法——对比筛选法. 地震, 14(4): 14~22