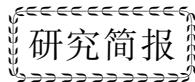


文章编号: 0253-3782(2001)04-0441-08



4 级地震平静是华北地区强震前的一个重要震兆特征^{*}

平建军 张青荣 曹肃朝 边庆凯

(中国石家庄 050021 河北省地震局)

关键词 华北地区 平静异常 短期预测指标

中图分类号: P315.75 文献标识码: A

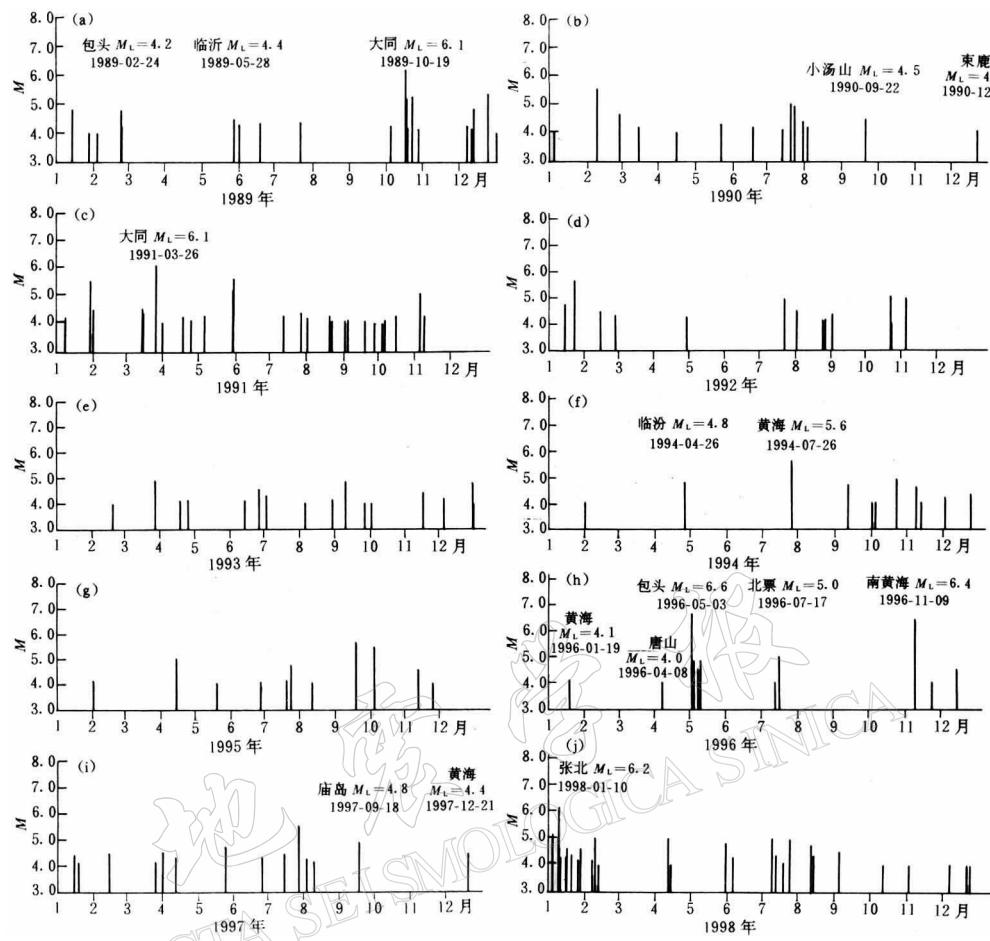
强震前区域地震活动时常会出现一个平静或“缺震”过程, 这种现象早已为国内外许多地震学者所关注(陆远忠等, 1985; Wesson, 1973)。近十几年来我国地震工作者从不同角度对某些特定地区, 对地震活动平静异常进行了专门研究。蒋淳和冯德益(1989)以华北地区每年 5 级地震的折合频次为基本特征量, 对其进行地震活动平静异常模糊识别分析。结果显示, 每当平静异常的从属函数 μ 出现局部极大值时, 在其后 1~3 年内华北地区则往往会发生 6 级以上地震; 焦远碧和丁鉴海(2000)在研究了 1990~1996 年我国大陆及边境地区所发生的 24 次 6 级以上地震前, 中等地震时序分布情况后指出, 强震前中等地震的活动特征是: 长期平静—集中活动—震前平静, 震前平静可作为强地震中期预报指标; 王林瑛(1999)则探讨了华北地区($30^{\circ} \sim 43^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ} \sim 125^{\circ}\text{E}$)剔除余震影响后, 4 级以上中等地震活动出现的平静异常, 与其后未来 30 天内该区所发生的 6 级以上地震的对应关系。结果表明, 其短期预报效能相对较高, R 评分值达 0.46。据此研究结果, 王林瑛针对华北地区从 1997 年 9 月 18 日山东长岛 $M_{\text{L}} 4.8$ 地震开始, 至 12 月 21 日黄海 $M_{\text{L}} 4.4$ 地震间所出现的 $M_{\text{L}} \geq 4.0$ 地震平静异常, 曾预测 1998 年 1 月 13 日前华北地区有发生 6 级以上地震的可能, 结果 1998 年 1 月 10 日在张北发生 6.2 级地震, 取得了较好的预测结果。此后该方法被用于日常震情分析会商中, 但该方法在使用时事先需对余震进行排除。正如王林瑛所说, 余震排除原则的不同对平静异常的判定具有一定的影响(中国地震局监测预报司, 1999)。为进一步探讨华北地区 $M_{\text{L}} \geq 4.0$ 地震平静异常与强震的关系, 寻找一种操作简便、不因人而异、规律性强、可信度高的强地震短期预测指标, 笔者在前人所做的大量研究基础上, 对华北地区取不同的研究区域, 反复研究了 1970~1998 年 $M_{\text{L}} \geq 4.0$ 地震自然时序结构分布情况, 发现当华北地区研究范围取 $30^{\circ} \sim 43^{\circ}\text{N}$, $108^{\circ} \sim 125^{\circ}\text{E}$ 时, 1989~1998 年该范围内中强以上地震前, 通常会出现 $M_{\text{L}} \geq 4.0$ 地震活动平静异常。下面我们将着重对 1989 年以来该研究范围内 $M_{\text{L}} \geq 4.0$ 地震活动平静的异常特征、异常可靠性、映震情况、映震效能及其物理意义分别进行探讨。

1 华北地区 4 级地震平静异常的特征分析

图 1 是以中国地震局分析预报中心编制的地震目录为基础资料、用李闽峰等人研制的测震学日常分析预报 CAPSeis 软件系统制作的 1989~1998 年华北地区($30^{\circ} \sim 43^{\circ}\text{N}$, $108^{\circ} \sim 125^{\circ}\text{E}$, 下同) $M_{\text{L}} \geq 4.0$ 地震的自然时序分布图。

* 中国地震局“九五”科技攻关项目(96-913-09-01-01-03)资助。

2000-06-19 收到初稿, 2001-02-16 收到修改稿, 2001-04-12 决定采用。

图 1 1989~1998 年华北地区逐年 $M_L \geq 4.0$ 地震的自然时序分布图

(a) 1989 年; (b) 1990 年; (c) 1991 年; (d) 1992 年; (e) 1993 年;
 (f) 1994 年; (g) 1995 年; (h) 1996 年; (i) 1997 年; (j) 1998 年

综观图 1 可以看出, 华北地区较强地震发生前普遍存在 $M_L \geq 4.0$ 地震平静现象, 较大地震 $M_L \geq 4.0$ 地震平静时间较长, 次大强震 $M_L \geq 4.0$ 地震平静时间相对较短, 且较大地震 $M_L \geq 4.0$ 地震平静时间规律性强, 而次大强震 $M_L \geq 4.0$ 地震平静时间则有长有短, 规律性差. 研究强震短期预测指标的目的是为了应用, 从应用研究的角度来说, 我们总是试图寻找一些规律性好、重复性强的震兆信息指标, 以期对未来强震作出最大程度的有效预测. 从图 1 可知, 如果我们把华北地区连续 3 个月无 $M_L \geq 4.0$ 地震发生作为平静异常判别指标, 那么平静异常则与中强以上地震有着较好的对应关系. 1989~1998 年华北地区共出现了 5 次 $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常, 其中有 4 次平静异常分别较好地对应了 1989 年 10 月 19 日大同 $M_L 6.1$ 、1991 年 3 月 26 日大同 $M_L 6.1$ 、1996 年 11 月 9 日南黄海 $M_L 6.4$ 和 1998 年 1 月 10 日张北 $M_L 6.2$ 地震, 1 次平静异常基本对应了 1994 年 7 月 26 日黄海 $M_L 5.6$ 地震, 仅漏报 1996 年 5 月 3 日包头 $M_L 6.6$ 地震. 第一次平静异常是从 1989 年 2 月 24 日内蒙包头 $M_L 4.2$ 地震开始, 至 1989 年 5 月 24 日达到平静异常指标, 其后时隔 4 个半月多发生 1989 年 10 月 19 日大同 $M_L 6.1$ 地震; 第二次平静异常是从 1990 年 9 月 22 日北京小汤山 $M_L 4.5$ 地震开始, 至 1990 年 12 月 22 日达到平静异常指标, 其后时隔约 3 个月发生 1991 年 3 月 26 日大同 $M_L 6.1$ 地震; 第三次平静异常是从 1994 年 4 月 26 日山西临汾 $M_L 4.8$ 地震开始, 至

1994年7月26日达到平静异常指标,这次平静异常在其后数月内,虽未对应华北中强以上地震,但打破这次平静异常的地震,即1994年7月26日黄海 $M_L \geq 5.6$ 地震本身震级就不低,与我们划定的华北地区中强以上地震的震级下限 $M_L \geq 5.8$ 很接近;第四次平静异常是从1996年7月17日辽宁北票 $M_L \geq 5.0$ 地震开始,至1996年10月17日达到平静异常指标,其后时隔半个多月发生1996年11月9日南黄海 $M_L \geq 6.4$ 地震;第五次平静异常是从1997年9月18日庙岛 $M_L \geq 4.8$ 地震开始,至1997年12月18日达到平静异常指标,其后时隔半个多月发生1998年1月10日张北 $M_L \geq 6.2$ 地震。需指出的是,用本研究确定的华北地区 $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常判别指标,虽然漏报了1996年5月3日包头 $M_L \geq 6.6$ 地震,但如果我们仔细分析图1便可发现,其实包头震前 $M_L \geq 4.0$ 地震平静情况还是存在的。从1996年1月19日黄海 $M_L \geq 4.1$ 地震开始,华北地区中等地震活动水平一直明显偏低,连续两个半月多无 $M_L \geq 4.0$ 地震发生,在即将达到平静异常指标时,于1996年4月8日发生唐山 $M_L \geq 4.0$ 地震。由于这一地震刚好达到判别地震平静异常指标所约定的震级底线,故致使我们将1996年包头 $M_L \geq 6.6$ 地震判为漏报。

由上述可知,华北地区 $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常出现后,与其对应的中强以上地震相隔时间,最长不超过5个月,最短则为半个多月,平均间隔时间约为2个月。如果我们把华北地区发生的中强以上地震前5个月内,华北地区所出现的 $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常看作是震兆信息,那么华北地区 $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常与中强以上地震($M_L \geq 5.8$)对应率为80%,短期预测效能较高。如果我们考虑地震目录中,在震级的确定上存在一定的量测及计算等不确定性因素影响,上述华北地区第三次出现的平静异常,即1994年4月26日~1994年7月26日平静异常,则可认为直接对应了1994年7月26日黄海 $M_L \geq 5.6$ 地震。由此其对震率可高达100%。

从图1还可看到,在华北地区5次 $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常所对应的5次 $M_L \geq 5.8$ 地震(考虑震级测定误差,1994年7月26日黄海 $M_L \geq 5.6$ 地震算基本对应)中,有两次地震发生在黄海海域,另外3次地震发生在华北北部。发生在黄海海域的两次地震是:1994年7月26日黄海 $M_L \geq 5.6$ 和1996年11月9日南黄海 $M_L \geq 6.4$ 地震,与其震前出现的平静异常是直接对应关系,也就是说当平静异常出现后,打破平静的地震即是其本身所发生的地震;而发生在华北北部的3次地震,当震前出现 $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常时,往往是先在华北地区发生一次中等地震来打破平静异常,尔后其地震活动水平经过“复苏”再发生中强以上地震。如1989年10月19日大同 $M_L \geq 6.1$ 地震前,华北地区从1989年2月24日开始~1989年5月24日出现 $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常,1989年5月28日山东临沂发生 $M_L \geq 4.4$ 地震打破这种平静异常状态,其后又陆续发生4次中等地震后,才发生10月19日大同 $M_L \geq 6.1$ 地震;1991年3月26日大同 $M_L \geq 6.1$ 地震前,从1990年9月22日开始~1990年12月22日出现平静异常,先由1990年12月24日河北束鹿 $M_L \geq 4.1$ 地震的发生打破这种平静异常,其后又陆续发生多次中等以上地震后,才发生3月26日大同 $M_L \geq 6.1$ 地震;1998年1月10日张北 $M_L \geq 6.2$ 地震前,1997年9月18日~1997年12月18日出现平静异常,1997年12月21日黄海发生的 $M_L \geq 4.4$ 地震首先打破这一平静异常,后又于1998年1月5日在陕西西安发生 $M_L \geq 5.2$ 地震,时隔5天发生张北 $M_L \geq 6.2$ 地震。由此可见,当华北地区出现 $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常时,在其后是否出现打破平静的中等地震活动,对于进一步缩小判断未来中强以上地震的发震地点,可能具有一定的指示意义。

为醒目起见,我们把1989~1998年华北地区所出现的 $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常,以及所发生的 $M_L \geq 5.8$ 地震一并列于表1。

2 4级地震平静异常外推预测的效果检验

根据上述总结出的4级地震平静异常特征、映震规律,我们以1999年华北地区实际自然发生的中等以上地震时序分布图象为例,来分析它的 $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常情况,并据此进行“硬性预测”检验,以验证4级地震平静异常与中强以上地震的对应关系。图2是1999年华北地区 $M_L \geq 4.0$ 地震自然时序分布图。由图可知,1999年5月20日河南范县 $M_L \geq 4.0$ 地震后,华北地区连续3个月出现 $M_L \geq 4.0$ 地震活

动空白时段, 即 1999 年 5 月 20 日~1999 年 8 月 20 日华北地区出现了明显的 $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常, 直到 1999 年 9 月 12 日山西左云 $M_L 4.7$ 地震的发生, 才打破这一平静状态。这种情况与上述分析得到的“华北地区 $M_L \geq 4.0$ 地震平静—中等地震活动—华北北部地区中强以上地震发生”的发震特征十分吻合。因此结合华北地区出现 $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常后, 在未来约 5 个月内华北地区往往会发生 $M_L \geq 5.8$ 地震的特点, 推测 1999 年 12 月底前华北北部地区可能会发生中强以上地震。事实上, 1999 年 11 月 1 日在山西大同发生 $M_L 5.7$ 地震、1999 年 11 月 29 日在辽宁岫岩发生 $M_L 5.9$ 地震。1999 年 11 月 1 日大同 $M_L 5.7$ 地震与推测意见相比, 其时间、地点预测较好, 震级预测基本正确(实际震级比预测震级低 0.1 级); 1999 年 11 月 29 日岫岩 $M_L 5.9$ 地震与推测意见相比, 其时间、地点、震级地震三要素预测均正确。由此看来, 1999 年 5 月 20 日~1999 年 8 月 20 日华北地区出现的 $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常, 可能反映了华北北部地区一组中强地震活动, 其对震情况符合我们上面对 $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常映震效能的认识(表 1)。

表 1 华北地区 $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常映震情况统计表

序号	1989~1999 年 华北地区出现的 $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常	1989~1999 年 华北地区发生的 $M_L \geq 5.8$ 地震	平静异常出现后至 $M_L \geq 5.8$ 地震发生间 隔的时间	预测占 用时间
1	1989-02-24~1989-05-24	1989-10-19 大同 $M_L 6.1$	近 5 个月	近 5 个月
2	1990-09-22~1990-12-22	(1991-01-29 忻州 $M_L 5.5$) 1991-03-26 大同 $M_L 6.1$	(1 个多月) 约 3 个月	约 3 个月
3	1994-04-26~1994-07-26	(1994-07-26 黄海 $M_L 5.6$)	(0 个月)	5 个月
4	(1996-01-19~1996-04-08)	1996-05-03 包头 $M_L 6.6$		
5	1996-07-17~1996-10-17	1996-11-09 南黄海 $M_L 6.4$	半个多月	半个多月
6	1997-09-18~1997-12-18	1998-01-10 张北 $M_L 6.2$	半个多月	半个多月
7	1999-05-20~1999-08-20	(1999-11-01 大同 $M_L 5.7$) 1999-11-29 岫岩 $M_L 5.9$	(约两个半月) 3 个多月	3 个多月

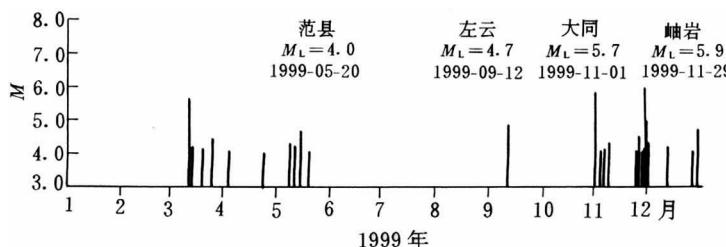
注: 带括号的数字为参考数字。

3 4 级地震平静异常预测效能评价

虽然华北地区 $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常与中强以上地震($M_L \geq 5.8$)对应关系较好, 但它毕竟不是华北地区 $M_L \geq 5.8$ 地震的必震信息, 严格地说也有虚报、漏报的情况出现。为正确认识华北地区 $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常的预测效能, 我们采用 R 值评分方法对其进行检验评价(陆远忠等, 1985)。其公式为

$$R = \frac{\text{报对的地震次数}}{\text{应预报的地震总数}} - \frac{\text{预报占用时间}}{\text{预报研究的总时间}} = \frac{n_1^1}{n_1^1 + n_1^0} - \frac{t}{T}$$

本研究 R 值评分原则是: 当华北地区出现连续 3 个月无 $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常后, 就预测华北地区将会发生 $M_L \geq 5.8$ 地震, 直到有相应的地震发生或预测期限超过 5 个月为止。这里我们把图 1 和图 2 所给出的 $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常结合在一起进行 R 值检验计算, 由此预测研究的总时间为 1989~1999 年。

图 2 1999 年华北地区 $M_L \geq 4.0$ 地震的自然时序分布图

若以1个月为单位对其进行划分, 则 $T=132$ 个月。从图1和图2可知, 1989~1999年华北地区共出现 $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常为6次, 据上述 R 值评分原则, 则预测占用的总时间为18个月(表1), 即 $t=18$ 个月, 报对的地震次数为 $n_1^1=5$, 漏报的地震数为 $n_1^0=1$, 故据上式计算的 R 值为: $R_{算}=0.697$ (表2)。由 n_1^1 和 n_1^0 查取陆远忠等(1985)有关表可得97.5%置信度, 所对应的最低 R 值为: $R_a=0.464$, $R_{算} > R_a$ 。说明华北地区 $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常对中强以上地震预测效能是显著的, 震兆信息是明显的。

表2 华北地区不同震级下限地震平静异常预测效能评价表

震级下限	报对地震次数 n_1^1	漏报地震次数 n_1^0	预测占用的总时间 $t/月$	预测研究的总时间 $T/月$	R 值
$M_L 3.8$	4	2	19.5	132	0.519
$M_L 3.9$	5	1	42.5	132	0.511
$M_L 4.0$	5	1	18	132	0.697
$M_L 4.1$	6	0	35.5	132	0.731
$M_L 4.2$	6	0	38.5	132	0.708

4 4级地震平静异常震兆信息稳定性检验

为检验华北地区中强以上地震前 $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常震兆信息的稳定性, 这里我们对其震级下限 ($M_L 4.0$) 人为给定一个0.2级的扰动值(误差), 然后对震级下限分别取3.8, 3.9, 4.1和4.2级, 来逐一分析1989年以来华北地区地震自然时序分布情况, 研究华北地区中强以上地震前它们是否亦存在平静异常震兆信息, 从而印证本研究给出的4级地震平静异常是随机显现还是稳定真实可靠。

当震级下限取 $M_L 3.8$ 时, 若以华北地区连续两个月无 $M_L \geq 3.8$ 地震发生作为平静异常判别指标, 以平静异常出现后5个月内华北地区有无发生 $M_L \geq 5.8$ 地震作为是否对应地震的判别标准, 那么从1989~1999年华北地区共出现了5组6次平静异常(限于篇幅, 这里略去其时序分布图, 下同), 其中4组5次平静异常较好地对应了4次 $M_L \geq 5.8$ 地震(即 $n_1^1=4$), 1次平静异常基本对应了预期的地震(其震级稍小, 为 $M_L 5.6$), 漏报 $M_L \geq 5.8$ 地震2次(即 $n_1^0=2$)。参照上述 R 值评分原则和方法, 则预测占用的总时间为19.5个月(表3), 由此计算得到的 $M_L 3.8$ 地震平静异常的中强以上地震预测效能 R 值为0.519(表2)。

表3 华北地区 $M_L \geq 3.8$ 地震平静异常映震情况统计表

序号	1989~1999年 华北地区出现的 $M_L \geq 3.8$ 地震平静异常	1989~1999年 华北地区发生的 $M_L \geq 5.8$ 地震	平静异常出现后至 $M_L \geq 5.8$ 地震发生 间隔的时间	预测占 用时间
1	1989-03-13~1989-05-13 1989-07-23~1989-09-23	1989-10-19 大同 $M_L 6.1$ (1991-01-29 忻州 $M_L 5.5$) 1991-03-26 大同 $M_L 6.1$	约5个月 (约两个多月) 约4个月	5个月 4个月
2	1990-09-22~1990-11-22	(1994-07-26 黄海 $M_L 5.6$)	(约4个月)	5个月
3	1994-02-01~1994-04-01	1996-05-03 包头 $M_L 6.6$	1个半月	1个半月
4	1996-01-19~1996-03-19	1996-11-09 南黄海 $M_L 6.4$	4个月	4个月

注: 带括号的数字为参考数字。

当震级下限取 $M_L 3.9$ 时, 若以华北地区连续两个月无 $M_L \geq 3.9$ 地震发生作为平静异常判别指标, 以平静异常出现后5个月内华北地区有无发生 $M_L \geq 5.8$ 地震作为是否对应地震的判别标准, 则1989~1999年华北地区共出现了10组12次平静异常, 其中5组6次平静异常较好地对应了5次 $M_L \geq 5.8$ 地震(即 $n_1^1=5$), 2组3次平静异常基本对应了预期的地震(其震级稍小, 为 $M_L 5.6$), 3次平静异常为虚报, 漏报 $M_L \geq 5.8$ 地震1次(即 $n_1^0=1$)。参照上述 R 值评分原则和方法, 则预测占用的总时间为42.5个月(表4), 由此计算得到的 $M_L 3.9$ 地震平静异常的中强以上地震预测效能 R 值为0.511(表2)。

当震级下限取 $M_L \geq 4.1$ 时, 若以华北地区连续 3 个月无 $M_L \geq 4.1$ 地震发生作为平静异常判别指标, 以平静异常出现后 5 个月内华北地区有无发生 $M_L \geq 5.8$ 地震作为是否对应地震的判别标准, 则 1989~1999 年华北地区共出现了 9 组 11 次平静异常, 其中 6 次平静异常较好地对应了 6 次 $M_L \geq 5.8$ 地震(即 $n_1^1 = 6$), 3 组 5 次平静异常基本对应了预期的地震(其震级稍小, 为 $M_L 5.6$), 无漏报 $M_L \geq 5.8$ 地震(即 $n_1^0 = 0$)。参照上述 R 值评分原则和方法, 则预测占用的总时间为 35.5 个月(表 5), 由此计算得到的 $M_L \geq 4.1$ 地震平静异常的中强以上地震预测效能 R 值为 0.731(表 2)。

表 4 华北地区 $M_L \geq 3.9$ 地震平静异常映震情况统计表

序号	1989~1999 年 华北地区出现的 $M_L \geq 3.9$ 地震平静异常	1989~1999 年 华北地区发生的 $M_L \geq 5.8$ 地震	平静异常出现后至 $M_L \geq 5.8$ 地震发生 间隔的时间	预测占 用时间
1	1989-02-24~1989-04-24			5 个月
2	1989-07-23~1989-09-23	1989-10-19 大同 $M_L 6.1$	近 1 个月	1 个月
3	1990-09-22~1990-11-22	(1991-01-29 忻州 $M_L 5.5$) 1991-03-26 大同 $M_L 6.1$	(两个多月) 约 4 个月	4 个月
4	1992-02-26~1992-04-26			5 个月
5	1994-02-01~1994-04-01 1994-04-26~1994-06-26	(1994-07-26 黄海 $M_L 5.6$)	(约 4 个月) (1 个月)	8 个月
6	1996-01-19~1996-03-19	1996-05-03 包头 $M_L 6.6$	1 个半月	1 个半月
7	1996-05-10~1996-07-10 1996-09-04~1996-11-04	1996-11-09 南黄海 $M_L 6.4$	4 个月 约 0 个月	4 个月
8	1998-02-13~1998-04-13			5 个月
9	1999-01-09~1999-03-09	(1999-03-11 张北 $M_L 5.6$)	0 个月	5 个月
10	1999-05-20~1999-07-20	(1999-11-01 大同 $M_L 5.7$) 1999-11-29 岫岩 $M_L 5.9$	(近 3 个半月) 4 个多月	4 个月

注: 带括号的数字为参考数字。

表 5 华北地区 $M_L \geq 4.1$ 地震平静异常映震情况统计表

序号	1989~1999 年 华北地区出现的 $M_L \geq 4.1$ 地震平静异常	1989~1999 年 华北地区发生的 $M_L \geq 5.8$ 地震	平静异常出现后至 $M_L \geq 5.8$ 地震发生 间隔的时间	预测占 用时间
1	1989-02-24~1989-05-24	1989-10-19 大同 $M_L 6.1$	近 5 个月	5 个月
2	1990-09-22~1990-12-22	(1991-01-29 忻州 $M_L 5.5$) 1991-03-26 大同 $M_L 6.1$	(1 个多月) 约 3 个月	3 个月
3	1993-12-31~1994-03-31 1994-04-26~1994-07-26	(1994-07-26 黄海 $M_L 5.6$)	(约 4 个月) (0 个月)	9 个月
4	1995-04-15~1995-07-15	(1995-09-20 苍山 $M_L 5.6$)	(约两个半月)	5 个月
5	1996-01-19~1996-04-19	1996-05-03 包头 $M_L 6.6$	半个月	半个月
6	1996-07-17~1996-10-17	1996-11-09 南黄海 $M_L 6.4$	半个多月	半个多月
7	1997-09-18~1997-12-18	1998-01-10 张北 $M_L 6.2$	半个多月	半个多月
8	1998-09-06~1998-12-06 1998-12-09~1999-03-09	(1999-03-11 张北 $M_L 5.6$)	(3 个多月) (0 个月)	8 个月
9	1999-05-15~1999-08-15	(1999-11-01 大同 $M_L 5.7$) 1999-11-29 岫岩 $M_L 5.9$	(约两个半月) 3 个半月	3 个半月

注: 带括号的数字为参考数字。

当震级下限取 $M_L \geq 4.2$ 时, 若以华北地区连续 3 个月无 $M_L \geq 4.2$ 地震发生作为平静异常判别指标, 以平静异常出现后 5 个月内华北地区有无发生 $M_L \geq 5.8$ 地震作为是否对应地震的判别标准, 则 1989~1999 年华北地区共出现了 9 组 11 次平静异常, 其中 6 次平静异常较好地对应了 6 次 $M_L \geq 5.8$ 地震(即 $n_1^1 = 6$), 3 组 5 次平静异常基本对应了预期的地震(其震级稍小, 为 $M_L 5.6$), 无漏报 $M_L \geq 5.8$ 地震(即 $n_1^0 = 0$)。

0). 参照上述 R 值评分原则和方法, 则预测占用的总时间约为 38.5 个月(表 6), 由此计算得到的 $M_L \geq 4.2$ 地震平静异常的中强以上地震预测效能 R 值为 0.708(表 2).

表 6 华北地区 $M_L \geq 4.2$ 地震平静异常映震情况统计表

序号	1989~1999 年 华北地区出现的 $M_L \geq 4.2$ 地震平静异常	1989~1999 年 华北地区发生的 $M_L \geq 5.8$ 地震	平静异常出现后至 $M_L \geq 5.8$ 地震发生 间隔的时间	预测占 用时间
1	1989-02-24~1989-05-24	1989-10-19 大同 $M_L 6.1$	近 5 个月	5 个月
2	1990-09-22~1990-12-22	(1991-01-29 忻州 $M_L 5.5$) 1991-03-26 大同 $M_L 6.1$	(1 个多月) 约 3 个月	3 个月
3	1993-12-31~1994-03-31 1994-04-26~1994-07-26	(1994-07-26 黄海 $M_L 5.6$)	(约 4 个月) (0 个月)	9 个月
4	1994-12-23~1995-03-23 1995-04-15~1995-07-15	(1995-09-20 苍山 $M_L 5.6$)	(5 个多月) 约两个月	9 个月
5	1995-11-13~1996-02-13	1996-05-03 包头 $M_L 6.6$	两个半月	两个半月
6	1996-07-17~1996-10-17	1996-11-09 南黄海 $M_L 6.4$	半个多月	半个多月
7	1997-09-18~1997-12-18	1998-01-10 张北 $M_L 6.2$	半个多月	半个多月
8	1998-08-15~1998-11-15	(1999-03-11 张北 $M_L 5.6$)	(约 4 个月)	5 个月
9	1999-05-15~1999-08-15	(1999-11-01 大同 $M_L 5.7$) 1999-11-29 岫岩 $M_L 5.9$	(约两个半月) 3 个半月	3 个半月

注: 带括号的数字为参考数字.

综上, 无论震级下限取 $M_L 3.8$ 、 $M_L 3.9$ 、 $M_L 4.1$ 还是 $M_L 4.2$, 它们的地震自然时序分布在华北地区中强以上地震前基本上均能出现平静异常震兆信息, 且中强以上地震的预测效能较高, 同时它们所出现的地震平静异常时段与 $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常时段大体一致. 表明 1989 年以来华北地区中强以上地震前中等地震平静异常的震兆信息基本是稳定的, 本研究所给出的 4 级地震平静异常震兆信息是可靠的.

5 讨论与结论

通过我们对华北地区取不同的研究区域, 反复研究 1970~1998 年它们的地震自然时序结构分布情况后, 发现只有当华北地区研究范围取 $30^{\circ} \sim 43^{\circ}\text{N}$ 、 $108^{\circ} \sim 125^{\circ}\text{E}$ 时, 自 1989 年以来在该区域范围内中强以上地震前, $M_L \geq 4.0$ 地震活动平静异常的短期震兆特征展示的最为充分, 表现为规律性好、重复性强、异常形态稳定可靠、映震效能高. 如果改变研究区域范围, 就会增加地震漏报或虚报次数, 降低预报效能; 如果加长研究时段, 譬如加上 1970~1988 年这一时段, 就会发现尽管在这一时段中, 华北地区中强以上地震前亦普遍存在中等地震活动平静异常现象, 但其自然活动平静时段有长有短, 不易用一个统一指标进行定量界定. 为什么自 1989 年后该区 $M_L \geq 4.0$ 地震的自然时序活动的平静异常一致性增强、有规律可循呢? 我们认为这可能与华北地区自 1989 年进入一个新的地震活动幕有关. 关于这一点我们可借鉴多点场的观点(马宗晋等, 1982)来加以分析讨论. 历史上华北地区经历多次大地震强烈的构造运动, 使地壳岩石介质产生大量纵横交错的断裂带, 若断若续的断块形成复杂的地质构造背景, 生成许多大小不等的闭锁段, 这些闭锁段的静摩擦强度的大小是不同的. 当华北地区进入一个新的地震活动幕时, 意味着华北地区在未来一段时间内受外围块体的作用力将明显加强. 华北地区受力的增强, 使得各闭锁段的应力逐步集中加大, 随后导致一些强度较弱的闭锁段陆续发生一系列中等地震活动. 此后由于较弱的闭锁段所积累的应力获得释放, 转而在断块相对变动的交叉点形成了应力集中的局部地区(即孕震体). 当应力超过其屈服点时, 由于孕震体强度的增长或破裂的闭合, 导致孕震体出现临近强震的短时平静, 此时孕震体的外围地区因经过较长时间能量的释放、应力的转移, 地震活动亦相对降低, 从而出现中小地震的平静. 孕震体和外围同时出现平静, 就会使整个华北地区在面上呈现强震前的中等地震平静异常. 当应力集中的局部地区(孕震体)发生强震后, 整个华北地区区域应力场重新进行调整, 又形成新的断裂、新的

闭锁段。由于华北地区处于新的地震活动幕，它必然会继续受到外围块体的持续作用。华北地区经过一段时间的应力积累会再次重复上述现象，从而使华北地区在这一新的活动幕中形成中等地震活动—中等地震平静—中强以上地震发生—中等地震活动—……周而复始的活动特点。

因此，针对特定的研究时段（地震活动幕）、合理地选取研究区域范围、确定震级下限是提取一个地区地震活动平静异常特征，进而开展强震预测研究的关键。

本文通过对 1989~1999 年华北地区 ($30^{\circ}\sim 43^{\circ}\text{N}$, $108^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$) $M_L \geq 4.0$ 地震自然时序分布结构的研究，得到如下一些认识：

(1) 华北地区在 1989 年以来新一轮活动幕中， $M_L \geq 4.0$ 地震平静是其中强震前一个重要的短期震兆异常信息，它不仅可信度高，且具有较明确的物理意义。

(2) 华北地区 $M_L \geq 5.8$ 地震前， $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常重复显现性强。当华北地区出现连续 3 个月无 $M_L \geq 4.0$ 地震活动时，一般在其后 5 个月内，华北地区可能会发生 $M_L \geq 5.8$ 地震。

(3) 持续发展中的华北地区 $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常，如果被中等地震活动所打破，则可能预示着华北地区地震活动将由低水平的“休眠”状态，转为“复苏”活跃，此后在华北北部地区发生 $M_L \geq 5.8$ 地震的可能性较大。

(4) 华北地区 $M_L \geq 4.0$ 地震平静异常直观明了，判别方法简便易行，且短期震兆信息突出，因此，其用于日常分析预报工作中可操作性强，具有一定的使用价值。

本文在修改过程中，得到刁桂苓研究员的热情支持与帮助，在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 蒋淳, 冯德益. 1989. 大震前地震活动平静异常的模糊识别与分析[J]. 中国地震, 5(3): 18~25
 焦远碧, 丁鉴海. 2000. 中等地震活动增强作为强震标志的研究[J]. 地震, 20(2): 15~19
 陆远忠, 陈章立, 王碧泉, 等. 1985. 地震预报的地震学方法[M]. 北京: 地震出版社, 91~94, 248~253
 马宗晋, 傅征祥, 张玉珍, 等. 1982. 1966~1976 年中国九大地震[M]. 北京: 地震出版社, 173
 王林瑛. 1999. 对张北 6.2 级地震预测的回顾和再研究[J]. 地震, 19(3): 267~272
 中国地震局监测预报司. 1999. 一九九八年张北地震[M]. 北京: 地震出版社, 53
 Wesson R J. 1973. Seismicity preceding moderate earthquakes in California[J]. *J Geophys Res*, 78: 8 527~8 546

THE QUIESCENCE OF EARTHQUAKES WITH $M_L \geq 4.0$ AS AN IMPORTANT PRECURSORY CHARACTERISTIC PRIOR TO STRONG SHOCKS IN NORTH CHINA REGION

Ping Jianjun Zhang Qingrong Cao Suchao Bian Qingkai

(Seismological Bureau of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China)

Key words: North China region; quiescence anomaly; index for short-term prediction