

蒋海昆, 苗青壮, 吴琼, 宋金. 2009. 基于震例的前兆统计特征分析. 地震学报, 31(3): 245-259.
Jiang Haikun, Miao Qingzhuang, Wu Qiong, Song Jin. 2009. Analysis on statistical features of precursor based on earthquake cases in China mainland. *Acta Seismologica Sinica*, 31(3): 245-259.

基于震例的前兆统计特征分析^{*}

蒋海昆^{1),*} 苗青壮²⁾ 吴 琼¹⁾ 宋 金¹⁾

1) 中国北京 100045 中国地震台网中心
2) 中国济南 250014 山东省地震局

摘要 依据《中国震例》(1966—1999 年)收录的 185 次震例的 2500 多条地震活动及前兆异常资料,研究了各学科平均异常数量、空间分布范围、异常时间等统计特征及其与主震震级的关系.结果显示,地震学、形变、流体异常数量相对较多,且平均异常数量随震级增大有加速增长的趋势,前兆平均异常数量随震级的增加尤其明显.从地震学各方法来看,频次、空区、*b* 值、条带等方法提供的异常数占总异常数量的 1/2.前兆异常分布范围数倍于地震破裂尺度,形变、流体异常平均震中距随主震震级大体上呈线性增加.各类异常出现时间与未来主震震级定性正相关,即地震越大,出现的时间越早.研究结果还显示,当目标震级不高时(例如 5—6 级地震),现有预测方法及手段可能不足以提供年时间尺度的地震预测依据.同时,流体和电磁等前兆学科在 3 年地震大形势预测研究,甚至是在年度预测研究中所能够发挥的作用,可能也不如人们所期望的那么大.本文较多震例的平均统计结果显示,随主震的临近,前兆异常空间分布向震中附近集中、收缩,同时异常数量明显增加.这一现象始于年尺度的中短期阶段而非更短时间的临震,同时本文亦未能够检测到前兆异常空间分布向外围明显的扩散过程.最后对《中国震例》前兆异常选取范围的合理性及对本文统计结果的可能影响进行了初步讨论.

关键词 中国震例 平均异常数量 平均异常震中距 平均异常时间

文章编号: 0253-3782(2009)03-0245-15

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

Analysis on statistical features of precursor based on earthquake cases in China mainland

Jiang Haikun^{1),*} Miao Qingzhuang²⁾ Wu Qiong¹⁾ Song Jin¹⁾

1) *China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China*

2) *Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China*

Abstract: Based on 185 earthquake cases with about 2500 anomalies collected in 《Earthquake Cases in China》 from 1966 to 1999, the average numbers, spatial distribution ranges, average periods of the precursors, as well as the relation-

^{*} **基金项目** 国家“十一五”科技支撑计划项目子专题(2006BAC01B03-02-02)及地震行业科研专项经费项目(200708020)资助.

收稿日期 2008-04-29 收到初稿, 2008-12-27 决定采用修改稿.

⁺ **通讯作者** e-mail: jianghaikun@sohu.com

ship between these quantities and the mainshock magnitudes, have been examined. The result shows that the seismicity, deformation and underground fluid can offer more evidences for earthquake prediction, and their average numbers of precursors increase exponentially with the mainshock magnitude, especially for deformation and fluid precursors. For seismicity, the precursor numbers of earthquake frequency, seismic gap, b value and seismic belt are about 50% of total precursor numbers. The spatial distribution range of precursors is several times of fracture size of the mainshock. Average epicentral distances of deformation and fluid precursors increase linearly with the mainshock magnitude. The anomaly periods are proportional to the magnitude of the mainshock; the larger the mainshock, the longer the anomaly period. The result also indicates that the current existing methods or observation items could not offer enough scientific evidences for yearly earthquake prediction, if the expecting mainshock is not large enough (for example, for M_s 5—6 earthquakes). At the same time, the effects of fluid and electromagnetic precursors on long-or middle-term (several years) earthquake prediction, even on yearly earthquake prediction, may not be so powerful as we expected. With the approach of the mainshock, the precursor distribution concentrated to the epicenter region gradually and the number of precursors increases quickly. This tendency began from middle-or short-term phase within about one year or more before the mainshock, but not in the immediate-term in a very short time period. Further more, the obvious diffusing process of the precursor distribution proposed by other authors could not be identified in this paper. Finally, the selected spatial range for precursors in 《Earthquake Cases in China》and its potential influence on the conclusion of this paper have also been discussed.

Key words: earthquake cases in China; average number of precursors; average distance of precursors from the mainshock; average duration of precursors before the mainshock

引言

我国丰富的震例资料及长期坚持、逐渐规范的地震预测实践活动,是世界上地震预测研究领域独一无二的宝贵财富。从资料积累的角度,已正式出版了8册《中国震例》(张肇成,1988,1990a,b,1999,2000;陈棋福,2002a,b,c)(简称《震例》,下同),包含了1966—1999年我国大陆及近海185次5级以上地震震例的系统总结。另一方面,从实际地震预测实践活动来看,我国自1966年邢台地震开始地震预测研究,1990年代以来年度预测逐渐规范,年度危险区判定的主要成果,系统地体现在由中国地震台网中心(前中国地震局分析预报中心)在全国各单位工作基础上汇总而成的年度预测“白皮书”上。总体来看,《震例》属于震后的系统总结,“白皮书”属于震前的预测实践。在当前观测及理论认识条件下,在某种程度上两者分别代表了地震预测研究在理论上能够做到的最好及实际预测中已经做到的最好。两者之间的差异对比及可能的原因探讨,是一项有意义的工作。

由于《震例》着重于单次地震事件过程的详细描述及震前异常的回溯性挖掘，从不同震例的研究结果来看，异常特征差异极大。但当前主要基于经验类比的地震预测理论及方法，重点在于震前异常共性特征的提取。基于此，本文将依据 1966—1999 年 185 次 5 级以上地震震例的研究结果，着重考察异常种类、异常数量、异常空间分布、异常时间等的统计特性及其与主震震级的关系。限于篇幅，关于“白皮书”与《震例》统计结果的对比研究将另文叙述。

1 资料概况

已正式出版的 8 册《中国震例》(张肇诚, 1988, 1990a, b, 1999, 2000; 陈棋福, 2002a, b, c), 共收录了 1966—1999 年发生在中国大陆及近海的 191 例震例的详细研究报告。其中 5 级以下地震 6 例, 5 级以上地震 185 例。在 185 例 5 级以上震例中, 5.0—5.9 级地震 123 次, 6.0—6.9 级地震 48 次, 7.0—7.9 级地震 14 次。

图 1 给出了 1966—1999 年中国大陆所有 5 级以上地震(不计余震)及该时段内 185 次震例的空间分布。可见多数已开展详细研究的震例主要分布于南北地震带、甘青地区、新疆天山及大陆东部的华北和华南地区。青藏高原尽管 5 级以上地震频繁发生, 但由于该区域地震监控能力极低, 并且几乎没有前兆观测, 因而地震资料记录不全、前兆观测资料缺乏, 详细的震例研究结果也很少。也正是由于这一原因, 青藏高原及西藏、新疆交界的西昆仑构造带, 通常被粗略地称之为“无监测能力地区”(图 1)。除青藏高原“无监测能力地区”外, 其它区域地震监测能力及前兆观测布局也不均匀, 如青海西部、新疆北部和西部以及边境地区, 观测能力较为欠缺, 因而也有较多的地震未能够开展震例研究。中国东部

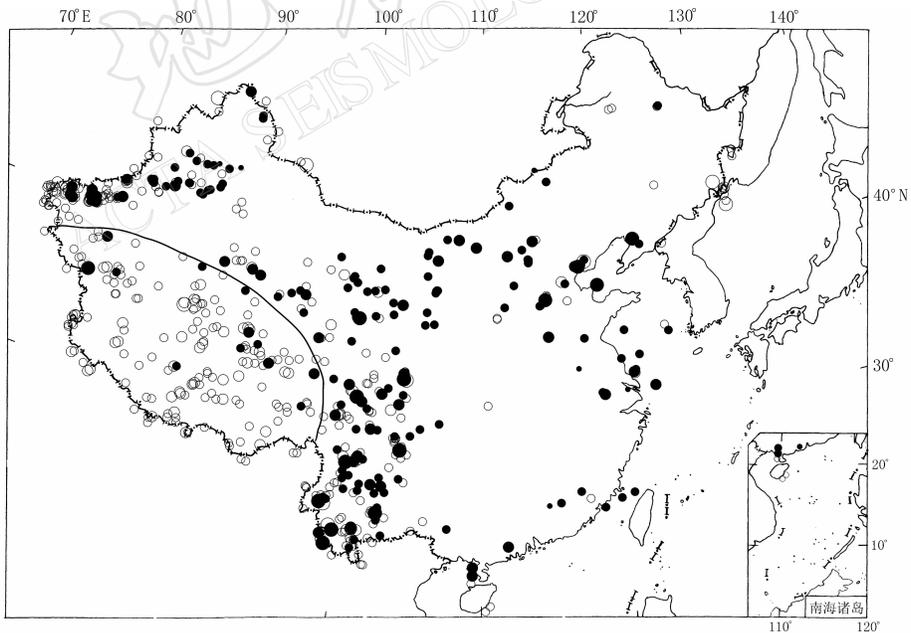


图 1 1966—1999 年中国大陆地区 5 级以上地震(空心圈)及 185 次震例分布(实心圆)

Fig. 1 Distribution of $M_s \geq 5.0$ earthquakes (open circles) in Chinese mainland from 1966 to 1999 and 185 earthquake cases (solid circles)

则大多数 5 级以上地震均编写了震例。

别出余震之后从具体所分区域来看(表 1), 1966—1999 年青藏高原及附近地区绝大多数地震未开展震例研究, 其主要原因是非常弱的地震监测能力和几乎为零的前兆观测. 极少数开展了震例研究的地震也是分布于新疆西部南天山与西昆仑交汇部位和青藏交界地区(图 1), 以地震学异常总结为主. 该区域 3 次 7 级以上地震中, 只有 1996 年 11 月 19 日新疆喀喇昆仑 7.1 级地震开展了震例研究, 另两次 7 级以上地震(西藏玛尼 1973 年 7 月 14 日 7.3 级地震和 1997 年 11 月 8 日 7.5 级地震)无震例总结.

表 1 1966—1999 年中国大陆不同区域 $M_s \geq 5.0$ 地震(不含余震)及《震例》编写情况统计
Table 1 Statistics of $M_s \geq 5.0$ earthquakes (aftershocks removed) in different regions from 1966 to 1999 and the situation of the 《Earthquake Cases in China》

| 震级范围 | 青藏高原及附近* | | | 东经 105°以西** | | | 东经 105°以东 | | |
|---------|----------|-------|-------|-------------|-------|-----------|-----------|-------|-----------|
| | N_0 | N_c | R_0 | N_0/N_1 | N_c | R_0/R_1 | N_0/N_1 | N_c | R_0/R_1 |
| 5.0—5.9 | 123 | 7 | 0.06 | 232/219 | 73 | 0.32/0.33 | 65/57 | 42 | 0.65/0.74 |
| 6.0—6.9 | 41 | 4 | 0.10 | 63/48 | 32 | 0.51/0.67 | 16/13 | 13 | 0.81/1.00 |
| 7.0—7.9 | 3 | 1 | 0.33 | 16/9 | 9 | 0.56/1.00 | 6/4 | 4 | 0.67/1.00 |

注: N_0 为删除余震后的地震数; N_1 为在 N_0 基础上将双震型序列及强震群型序列均作为 1 次事件考虑, 并删除深源地震和监测能力极低地区地震后的地震数; N_c 为震例数; $R_0 = N_0/N_c$, $R_1 = N_1/N_c$. * 表示其范围为图 1 所示的“无监测能力地区”; ** 表示不含图 1 所示的“无监测能力地区”.

大陆东经 105°以西地区(不包括“无监测能力地区”, 下同), 总体上约 31% 的 5.0—5.9 级地震、51% 的 6.0—6.9 级地震和 56% 的 7 级以上地震编写了震例(表 1). 但实际上, 除去不具备开展震例研究条件的地震外, 已编写震例的比例要大于上述统计数字. 东经 105°以西 1966—1999 年共发生 7 级以上地震 16 次(表 2). 其中 3 次是双震型序列中的第 2 主震, 与第 1 次主震之间时间间隔非常小, 与第 1 主震合并作为双震型序列编写震例; 另外 4 次发生于新疆边境地区, 这些区域地震监控能力非常低, 震中附近区域范围内无前兆观测, 没有完备的中小地震记录及翔实可靠的前兆观测资料, 因而无法开展震例研究; 除此之外的 9 次 7 级以上地震均开展了详细的震例总结. 78 次 6.0—6.9 级地震中(表 2), 若剔除 3 次双震型序列的第 2 主震及 2 次震群型序列的 12 次 6 级以上地震, 则有 67% 的 6.0—6.9 级地震编写了震例. 同样, 232 次 5.0—5.9 级地震中, 13 次双震或震群型序列各作为 1 次事件统计, 则约 33% 的 5—5.9 级地震编写了震例.

对大陆东经 105°以东地区, 总体上约 65% 的 5.0—5.9 级地震、81% 的 6.0—6.9 级地震和 57% 的 7 级以上地震编写了震例. 但事实上, 1966—1999 年吉林珲春、汪清 2 次 7 级以上、2 次 6.0—6.9 级以及 2 次 5.0—5.9 级地震不具备震例编写条件, 因为深源地震基本没有前兆异常显示; 1967 年 3 月 27 日河北大城 6.3 级地震与 1966 年邢台 7.2 级地震时空距离较近, 无法单独开展震例研究; 1984 年 5 月 21 日黄海 6.1 级和 6.2 级地震作为 1 次双震型事件考虑; 1994 年 12 月 31 日和 1995 年 1 月 10 日北部湾 6.1 级和 6.2 级地震作为 1 次双震型事件考虑; 再剔除无前兆观测的海南岛东南外海域 2 次 5 级地震, 则东经 105°以东地区 74% 的 5.0—5.9 级地震及全部 6 级以上地震均开展了震例研究(表 2).

综上所述, 就中国大陆有一定监测能力地区而言, 除深源地震、大地震的强余震、双震序列中的第 2 主震以及边境地区的地震外, 所有 7 级以上地震均开展了详细的震例研

表 2 1966—1999 年中国大陆 $M_S \geq 6.0$ 地震(不计余震)及震例编写情况统计
 Table 2 Catalog of earthquakes with $M_S \geq 6.0$ in Chinese mainland from 1966 to 1999
 (aftershocks have been removed) and the situation of the 《Earthquake Cases in China》

| 日期 年-月-日 | 震中位置 | | M_S | 地点 | 震例 | 备注 |
|-------------|--------------------|--------------------|-------|---------|----|--------------------|
| | $\varphi_N/^\circ$ | $\lambda_E/^\circ$ | | | | |
| 1966-03-22 | 37.50 | 115.10 | 7.2 | 河北邢台 | ✓ | |
| 1966-09-28 | 27.50 | 100.10 | 6.4 | 云南中甸 | | |
| 1967-03-27 | 38.51 | 116.50 | 6.3 | 河北大城 | | |
| 1967-08-30 | 31.60 | 100.30 | 6.8 | 四川炉霍 | | |
| 1969-02-12 | 41.50 | 79.30 | 6.3 | 新疆乌什 | | |
| 1969-07-18 | 38.20 | 119.40 | 7.4 | 渤海 | ✓ | |
| 1969-07-26 | 22.32 | 111.80 | 6.4 | 广东阳江 | ✓ | |
| 1970-01-05 | 24.20 | 102.68 | 7.8 | 云南通海 | ✓ | |
| 1970-02-07 | 23.08 | 101.03 | 6.2 | 云南普洱 | | |
| 1970-02-24 | 30.65 | 103.28 | 6.2 | 四川大邑 | | |
| 1971-03-23 | 41.40 | 79.30 | 6.0 | 新疆乌什 | | |
| 1971-03-24 | 41.30 | 79.40 | 6.1 | 新疆乌什 | | |
| 1971-03-24 | 35.50 | 98.10 | 6.3 | 青海都兰 | | |
| 1971-04-28 | 23.00 | 101.10 | 6.7 | 云南普洱 | | |
| 1971-09-14 | 23.00 | 100.80 | 6.2 | 云南普洱 | | 普洱双震序列的第 2 主震 |
| 1972-01-16 | 40.30 | 79.00 | 6.2 | 新疆柯坪 | | |
| 1973-02-06 | 31.30 | 100.70 | 7.6 | 四川炉霍 | ✓ | |
| 1973-06-03 | 44.20 | 83.60 | 6.0 | 新疆乌苏 | | |
| 1973-08-11 | 32.90 | 104.10 | 6.5 | 四川松潘 | ✓ | |
| 1973-08-16 | 23.10 | 101.20 | 6.3 | 云南普洱 | | |
| 1973-09-10 | 42.50 | 130.90 | 6.4 | 吉林珲春 | | 深源地震 |
| 1973-09-29 | 41.90 | 131.00 | 7.7 | 吉林珲春 | | 深源地震 |
| 1974-05-11 | 28.20 | 104.10 | 7.1 | 云南大关 | ✓ | |
| 1974-07-05 | 45.00 | 94.20 | 7.1 | 新疆巴里坤 | | 新疆东部中蒙交界, 无监测能力 |
| 1974-08-11 | 39.40 | 73.80 | 7.3 | 新疆阿克陶 | | 新疆西部中、塔、吉交界, 无监测能力 |
| 1975-01-15 | 29.40 | 101.90 | 6.2 | 四川康定 | ✓ | |
| 1975-02-04 | 40.73 | 122.72 | 7.3 | 辽宁海城 | ✓ | |
| 1976-04-06 | 40.20 | 112.10 | 6.2 | 四川九龙 | ✓ | |
| 1976-05-29 | 24.50 | 99.00 | 7.3 | 云南龙陵 | ✓ | |
| 1976-05-29 | 24.60 | 98.70 | 7.4 | 云南龙陵 | | 龙陵双震序列的第 2 主震 |
| 1976-07-28 | 39.40 | 118.00 | 7.8 | 河北唐山 | ✓ | |
| 1976-08-16 | 32.60 | 104.10 | 7.2 | 四川松潘—平武 | ✓ | |
| 1976-08-23 | 32.50 | 104.30 | 7.2 | 四川松潘—平武 | | 松潘—平武双震序列的第 2 主震 |
| 1976-09-23 | 39.90 | 106.40 | 6.2 | 内蒙阿拉善左旗 | ✓ | |
| 1976-11-07 | 27.60 | 101.10 | 6.7 | 四川盐源 | ✓ | |
| 1977-01-02 | 38.20 | 91.20 | 6.4 | 青海海西 | | |
| 1977-01-19 | 37.10 | 95.80 | 6.3 | 青海霍布逊湖 | ✓ | |
| 1977-12-19 | 39.90 | 77.30 | 6.2 | 新疆西克尔 | ✓ | |
| 1978-10-08 | 39.40 | 74.80 | 6.0 | 新疆乌恰 | | |
| 1979-03-15 | 23.20 | 101.10 | 6.8 | 云南普洱 | ✓ | |
| 1979-03-29 | 42.00 | 83.40 | 6.0 | 新疆库车 | ✓ | |
| 1979-07-09 | 31.45 | 119.25 | 6.0 | 江苏溧阳 | ✓ | |
| 1979-08-25 | 41.20 | 108.10 | 6.0 | 内蒙五原 | ✓ | |
| 1981-01-24 | 31.01 | 101.11 | 6.9 | 四川道孚 | ✓ | |

续表 2

| 日期 年-月-日 | 震中位置 | | M_s | 地点 | 震例 | 备注 |
|-------------|--------------------|--------------------|-------|---------|----|------------------|
| | $\varphi_N/^\circ$ | $\lambda_E/^\circ$ | | | | |
| 1981-09-19 | 23.02 | 101.46 | 6.0 | 云南墨江 | | |
| 1981-11-28 | 42.92 | 131.15 | 6.2 | 吉林珲春 | | 深源地震 |
| 1982-06-16 | 31.96 | 100.03 | 6.0 | 四川甘孜 | ✓ | |
| 1983-02-13 | 39.97 | 75.07 | 6.7 | 新疆乌恰 | ✓ | |
| 1983-04-05 | 40.04 | 75.23 | 6.1 | 新疆乌恰 | | 乌恰双震序列的第 2 主震 |
| 1983-11-07 | 35.17 | 115.25 | 6.0 | 山东菏泽 | ✓ | |
| 1984-05-21 | 32.60 | 121.66 | 6.1 | 黄海 | ✓ | |
| 1984-05-21 | 32.64 | 121.60 | 6.2 | 黄海 | | 黄海双震序列的第 2 主震 |
| 1985-04-18 | 25.89 | 102.93 | 6.2 | 云南禄劝 | ✓ | |
| 1985-08-23 | 39.53 | 75.32 | 7.1 | 新疆乌恰 | | 新疆西部, 监测能力弱 |
| 1986-08-26 | 37.78 | 101.63 | 6.5 | 甘肃肃南 | | |
| 1987-01-24 | 41.47 | 79.34 | 6.4 | 新疆乌什 | ✓ | |
| 1987-02-26 | 38.06 | 91.25 | 6.1 | 青海茫崖 | ✓ | |
| 1988-11-06 | 22.92 | 99.79 | 7.4 | 云南澜沧—耿马 | ✓ | |
| 1988-11-06 | 23.16 | 99.55 | 7.2 | 云南澜沧—耿马 | | 澜沧-耿马双震序列的第 2 主震 |
| 1989-04-16 | 29.99 | 99.23 | 6.6 | 四川巴塘 | ✓ | |
| 1989-04-25 | 30.05 | 99.42 | 6.6 | 四川巴塘 | | 巴塘强震群地震 |
| 1989-05-03 | 30.11 | 99.54 | 6.3 | 四川巴塘 | | 巴塘强震群地震 |
| 1989-05-03 | 30.07 | 99.55 | 6.3 | 四川巴塘 | | 巴塘强震群地震 |
| 1989-09-22 | 31.58 | 102.51 | 6.5 | 四川小金 | ✓ | |
| 1990-01-14 | 37.84 | 92.00 | 6.5 | 青海海西 | ✓ | |
| 1990-04-17 | 39.53 | 75.21 | 6.3 | 新疆乌恰 | ✓ | |
| 1990-04-26 | 36.06 | 100.33 | 7.0 | 青海共和 | ✓ | |
| 1990-06-14 | 47.90 | 85.09 | 7.2 | 新疆巴哈河 | | 新疆北部中哈交界, 无监测能力 |
| 1990-10-20 | 37.11 | 103.72 | 6.1 | 青海茫崖 | ✓ | |
| 1991-02-25 | 40.40 | 79.40 | 6.5 | 新疆柯坪 | ✓ | |
| 1992-04-23 | 22.30 | 99.10 | 6.7 | 中缅交界 | ✓ | |
| 1992-04-23 | 22.60 | 99.00 | 6.9 | 中缅交界 | | 中缅交界双震序列的第 2 主震 |
| 1993-01-27 | 23.10 | 101.10 | 6.3 | 云南普洱 | ✓ | |
| 1993-10-02 | 38.20 | 88.90 | 6.6 | 新疆若羌 | ✓ | |
| 1993-10-26 | 38.60 | 98.70 | 6.0 | 青海祁连 | | |
| 1993-12-01 | 39.40 | 75.40 | 6.0 | 新疆喀什 | ✓ | |
| 1994-01-03 | 36.10 | 100.10 | 6.0 | 青海共和 | ✓ | |
| 1994-12-31 | 21.00 | 109.40 | 6.1 | 北部湾 | ✓ | |
| 1995-01-10 | 20.50 | 109.40 | 6.2 | 北部湾 | | 北部湾双震序列的第 2 主震 |
| 1995-07-12 | 22.00 | 99.30 | 7.3 | 云南孟连 | ✓ | |
| 1995-10-24 | 25.90 | 102.20 | 6.5 | 云南武定 | ✓ | |
| 1995-12-18 | 34.60 | 97.30 | 6.2 | 青海玛多 | ✓ | |
| 1996-02-03 | 27.20 | 100.30 | 7.0 | 云南丽江 | ✓ | |
| 1996-03-13 | 48.80 | 88.00 | 6.1 | 新疆阿勒泰 | ✓ | |
| 1996-03-19 | 39.90 | 76.80 | 6.9 | 新疆阿图什 | ✓ | |
| 1996-05-03 | 40.80 | 109.60 | 6.4 | 内蒙包头 | ✓ | |
| 1996-11-09 | 31.70 | 123.10 | 6.1 | 长江口 | ✓ | |
| 1997-01-21 | 39.60 | 77.40 | 6.4 | 新疆伽师 | ✓ | |
| 1997-01-21 | 39.60 | 77.40 | 6.3 | 新疆伽师 | | 伽师强震群地震 |
| 1997-03-01 | 39.50 | 76.90 | 6.0 | 新疆伽师 | | 伽师强震群地震 |
| 1997-04-06 | 39.50 | 76.80 | 6.3 | 新疆伽师 | | 伽师强震群地震 |
| 1997-04-06 | 39.60 | 76.90 | 6.4 | 新疆伽师 | | 伽师强震群地震 |

续表 2

| 日期 年-月-日 | 震中位置 | | M_s | 地点 | 震例 | 备注 |
|-------------|--------------------|--------------------|-------|-------|----|---------|
| | $\varphi_N/^\circ$ | $\lambda_E/^\circ$ | | | | |
| 1997-04-11 | 39.70 | 76.80 | 6.6 | 新疆伽师 | | 伽师强震群地震 |
| 1997-04-16 | 39.60 | 76.90 | 6.3 | 新疆伽师 | | 伽师强震群地震 |
| 1998-01-10 | 41.10 | 114.30 | 6.2 | 河北张北 | ✓ | |
| 1998-03-19 | 40.20 | 76.80 | 6.0 | 新疆阿图什 | ✓ | |
| 1998-08-02 | 39.60 | 77.50 | 6.0 | 新疆伽师 | | 伽师强震群地震 |
| 1998-08-27 | 39.90 | 77.90 | 6.6 | 新疆伽师 | | 伽师强震群地震 |
| 1998-11-20 | 27.30 | 100.90 | 6.2 | 云南宁蒗 | ✓ | |
| 1999-04-08 | 43.40 | 130.30 | 7.0 | 吉林汪清 | | 深源地震 |

究；对 7 级以下地震，除深源地震、余震、双震序列中的第 2 主震及强震群序列中的地震，东经 105° 以东地区全部 6.0—6.9 级地震及 74% 的 5.0—5.9 级地震开展了震例研究；东经 105° 以西地区约 33% 的 5.0—5.9 级地震和 67% 的 6.0—6.9 级地震编写了震例，以下基于震例的统计研究结果也主要针对这些区域。未能够编写震例的地震大多分布于新疆西部、滇西及滇西南以及青海西部地区(图 1)，这些区域地震监测能力相对较弱，前兆观测缺乏。还有极少数地震是由于震前、震后均未发现明显的异常变化，无法进行震例编写。

2 统计结果

2.1 各学科方法的地震“预测能力”评价

《震例》总结涉及震兆异常数量及其所占异常比例的多少，在一定程度上表征了各学科、方法在地震预测中所能发挥作用的大小，亦可据此对各学科方法的地震“预测能力”进行一定的评价。需要指出的是，本文所言“前兆异常”均为仪器连续记录的地球物理或地球化学观测结果，不包括诸如井水发浑、动物习性变化等以宏观描述为主的“宏观异常”。

从地震“异常”的角度看，185 次 5 级以上震例共涉及 2516 条各类地震学或前兆异常，按大学科划分，地震学、形变、电磁、流体异常大约分别各占 32%、24%、13% 及 32%。从震例角度看，约 91% 的震例中有测震学异常，约 71%、53% 及 66% 的震例中有形变、电磁及流体异常(表 3)。总的来看，在我国现有台网各学科监测能力的条件下，地震学异常在地震预测中发挥着不可替代的作用。前兆方面则是形变、流体发挥的作用相对较大。若仅就前兆各学科对比来看，表 3 实际上包含了台网布局及不同学科观测项目数量比例的影响，如电磁异常数量较少这一现象，在一定程度上可能与电磁类观测项目相对较少有关。

从地震学方法来看(表 4)，最为直观、简单的地震频次、空区、 b 值、条带等方法具有

表 3 《中国震例》中不同学科异常数量统计

Table 3 Precursor numbers of different subjects in 《Earthquake Cases in China》

| 学科 | 地震学 | 形变 | 电磁 | 流体 | 备注 |
|--------|-----|-----|-----|-----|--------------------|
| 异常数目 | 797 | 593 | 318 | 808 | |
| 异常所占比例 | 32% | 24% | 12% | 32% | 不计“宏观异常”，异常总数 2516 |
| 震例数目 | 169 | 132 | 98 | 122 | 条。每个震例可有多种异常 |
| 震例所占比例 | 91% | 71% | 53% | 66% | |

相对较强的预测能力,这4种方法提供的异常数占地震学总异常数量的近一半(表4中, $16\%+13\%+11\%+8\%\approx 48\%$),在地震预测工作中发挥着极其重要的作用.具体从震例的角度考察,也是这几种异常出现的频次相对较高,其中51%的震例中出现频次异常,45%左右的震例中出现空区及**b**值异常,30%的震例中出现条带异常,20%左右的震例中出现平静及震情窗口异常(表4).

表4 《中国震例》中地震学科不同方法异常数量统计

Table 4 Numbers of earthquake precursors in 《Earthquake Cases in China》

| 方法 | 空区 | 条带 | 平静 | 其它 图象 | b 值 | 应变 释放 | 频次 | 其它 参数 | 地震窗 | 前兆 震群 | 前震 | 备注 |
|--------|-----|-----|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|----|----------|
| 异常数目 | 102 | 65 | 47 | 44 | 91 | 32 | 128 | 190 | 54 | 27 | 17 | 797 条异常, |
| 异常所占比例 | 13% | 8% | 6% | 6% | 11% | 4% | 16% | 24% | 7% | 3% | 2% | 169 次震例, |
| 震例数目 | 85 | 54 | 39 | 33 | 78 | 27 | 93 | 75 | 35 | 23 | 16 | 每个震例有 |
| 震例所占比例 | 46% | 30% | 21% | 18% | 43% | 15% | 51% | 41% | 19% | 13% | 9% | 多条异常 |

2.2 平均异常数量与主震震级的关系

图2为不同学科平均到每次地震的平均异常数量及其与震级的关系.图2中横坐标震级数值实际上是一个震级区间,例如5.5代表震级范围为5.5—5.9级,相应的平均震中距为5.5—5.9级范围内震例的平均统计结果,余类推.可见测震、形变和流体异常数量相对较多,并且平均异常数量随震级增大有加速增长的趋势(图3a, c, e);电磁异常数量相对较少,随震级增加不明显(图2d).但对7.5级以上巨大地震而言,各类异常数量均明显较多.

对图2a及图2b进行平均异常数量随震级增长的指数拟合,可见前兆平均异常数量随震级的增加(图2b)明显快于地震学平均异常数量随震级的增加(图2a),前者指数系数约是后者的3倍($2.38/0.77\approx 3.09$).这意味着,大规模的前兆异常数量确实与大地震的孕育

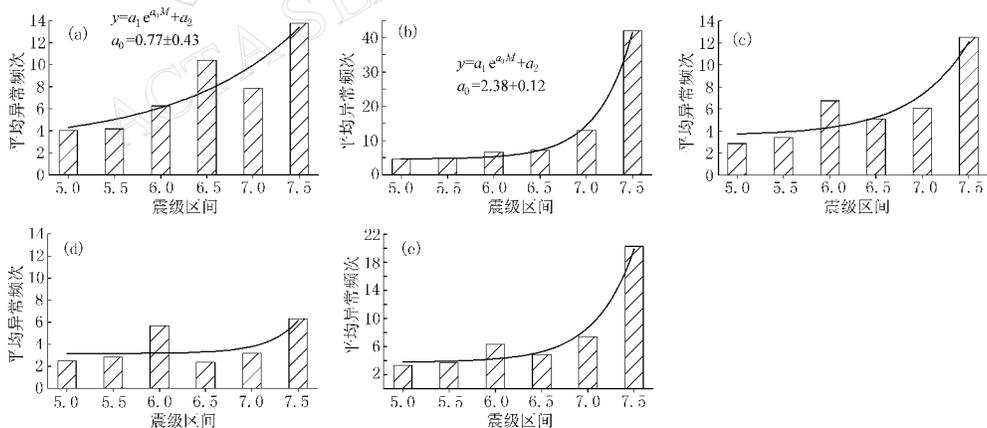


图2 平均异常数量及其随震级的变化

(a) 地震学; (b) 前兆; (c) 形变; (d) 电磁; (e) 地下流体. 直方图表示实际资料统计结果; 曲线表示指数函数拟合结果

Fig. 2 Average number of the anomalies and their relationship with mainshock magnitude

(a) Seismicity; (b) all precursors; (c) deformation; (d) electromagnetism; (e) fluid.

Histogram: actual statistical results, curve: fitted exponential function

过程相关联。

2.3 前兆异常平均震中距与主震震级的关系

图 3 直方图给出了不同学科前兆异常平均震中距随主震震级范围的变化。图 3 中横坐标震级数值的含义及解释与图 2 相同，但由于 7 级以上地震数量不多，因而图 3 中横坐标 7.0 代表的是 7.0—7.9 级震级范围。总体来看，前兆异常平均震中距随主震震级粗略地线性增加，形变、流体平均异常震中距随震级增加明显且数值分布大体一致，5.0—5.9 级地震约为 100—150 km 之间，6.0—6.9 级地震约为 150—200 km 之间，7.0—7.9 级地震约为 250 km(图 3a, c)。电磁异常平均震中距随震级的增加不显著，当震级小于 7 级时约为 150 km，震级大于 7 级时约为 200 km(图 3b)。不分学科，由图 3d 得到所有前兆平均异常震中距与主震震级之间的统计关系为

$$D(\text{km}) = (-169.8 \pm 36.1) + (54.8 \pm 6.2)M \quad (1)$$

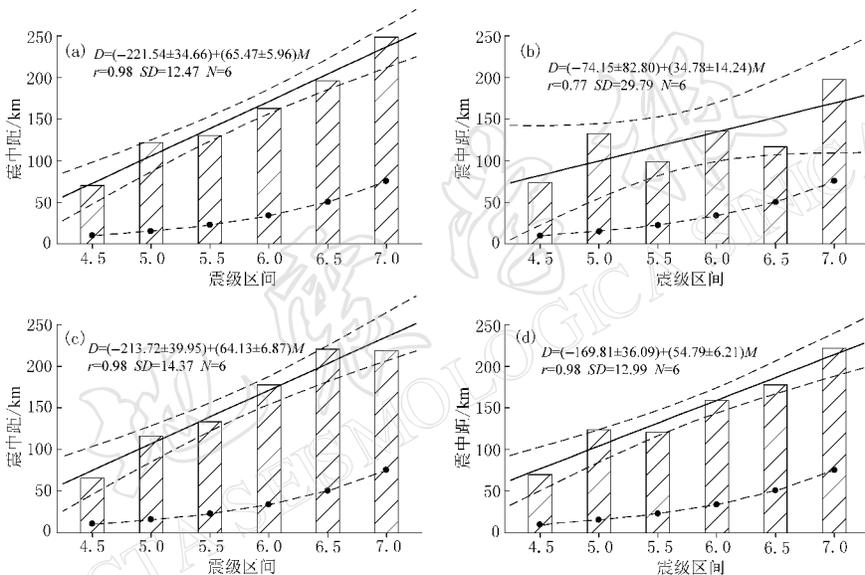


图 3 前兆异常平均震中距与主震震级关系

(a) 形变；(b) 电磁；(c) 流体；(d) 所有前兆。直方图表示平均震中距统计结果；直线表示平均震中距的线性回归结果；虚线表示 95% 置信概率下回归直线的置信区间；黑圆点表示相应震级地震的破裂尺度(吴开统等, 1990)

Fig. 3 Average epicentral distance of precursors and the relationship with mainshock magnitude

(a) Deformation; (b) electromagnetism; (c) fluid; (d) all precursors. Histogram; actual statistical results;

line: fitted linear function; broken line: confidence region with $\alpha=0.05$; dots;

rupture length of the mainshock(Wu Kaitong *et al.*, 1990)

图 3 中黑圆点表示相应震级地震的平均破裂尺度(吴开统等, 1990)，其具体数值列于表 5。可见前兆异常平均分布范围数倍于地震破裂尺度，两者比值介于 3—8 之间，亦即在中强地震孕育过程中，发生前兆性变形的区域范围一般是未来主震破裂尺度的 3—8 倍。这一尺度范围与大地震前检测到矩释放加速的空间尺度范围(Jaumè, Sykes, 1999; Keilis-Borok, Soloviev, 2003; Papazachos *et al.*, 2005)大体相当。由于震前的矩释放加速过程与临界现象相关联(Bufe, Varnes, 1993)，因而前兆异常平均分布范围可能与临界区域范围大体一致。

表 5 前兆异常平均震中距与相应震级平均破裂尺度对比

Table 5 Comparison of average epicentral distance of the precursors with the average fracture size

| 震级范围 | 平均异常震中距(L_1)/km | 平均破裂尺度(L_2)/km | L_1/L_2 | 备注 |
|---------|---------------------|--------------------|-----------|---------------------------------------|
| 4.5—4.9 | 63.7 | 10.4 | 6.1 | |
| 5.0—5.4 | 123.5 | 15.5 | 7.9 | |
| 5.5—5.9 | 120.8 | 23.0 | 5.3 | L_1 由式(1)计算得到; L_2 引自吴开统等(1990)文章 |
| 6.0—6.4 | 158.5 | 34.2 | 4.6 | |
| 6.5—6.9 | 177.6 | 50.9 | 3.5 | |
| 7 级以上 | 221.5 | 75.7 | 2.9 | |

必须指出的是,《震例总结规范》(中国地震局,2007)规定了前兆异常的选取范围(区域).这一范围与震例地震的大小有关,5.0—5.9级、6.0—6.9级和7.0—7.9级地震的前兆异常选取范围分别是震中附近200 km、300 km和500 km.依据本文最后部分的讨论,这样规定的前兆异常收集范围,基本上涵盖了绝大部分震例的前兆异常分布范围.尽管极少数震例中的极少数较远处的异常仍然可能被遗漏,但由于其占总的统计样本(震例统计样本数及前兆条目统计样本数)的比例极小,因而对各项统计结果不会产生明显的影响.该部分内容的详细讨论将在本文最后一部分进行.

2.4 异常时间及其与主震震级的关系

“异常时间”定义为异常开始出现至主震发生之间的时间.实际上对异常开始出现时间的判定存在一定的差异.由图4可见,测震异常平均在震前600—1500天开始出现,平均异常时间随震级大体上呈线性增长(图4a);前兆异常平均在震前200—400天开始出现,同样随震级范围增大而增大(图4b).从前兆各学科对比看,形变异常时间出现相对较早,

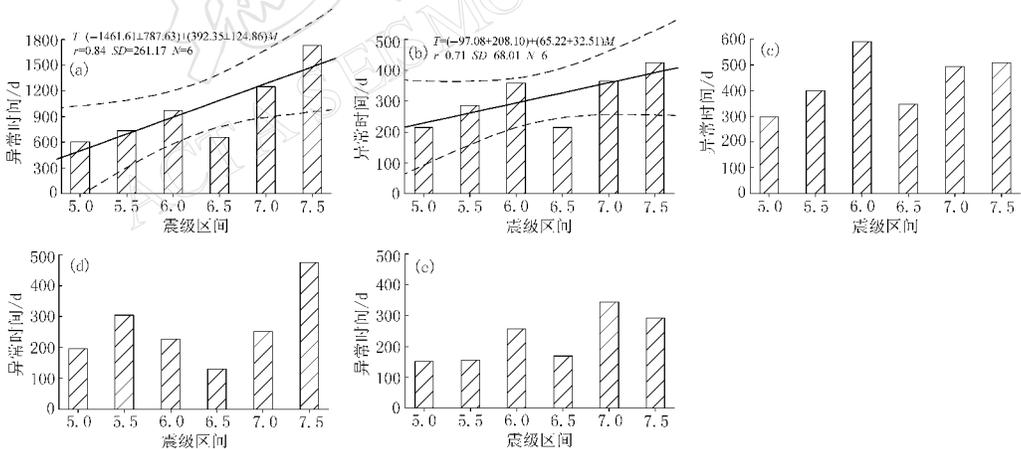


图 4 平均异常时间与主震震级关系

(a) 地震学; (b) 所有前兆; (c) 形变; (d) 电磁; (e) 流体. 直方图表示平均异常时间; 直线表示平均异常时间的线性回归结果; 虚线表示 95% 置信概率下回归直线的置信区间

Fig. 4 Average durations from anomaly appearance to mainshock occurrence (days) and their relationship with mainshock magnitude

(a) Seismicity; (b) all precursors; (c) deformation; (d) electromagnetism; (e) fluid. Histogram: actual statistical result; solid line: fitted linear function; broken line: confidence region with $\alpha=0.05$

平均为 300—500 天不等(图 4c); 流体异常出现相对较晚, 大约为 150—350 天(图 5e), 电磁异常介于二者之间(图 4d).

综上所述, 异常时间与未来主震震级正相关, 即地震越大, 异常出现的时间越早. 地震活动性异常时间最长, 当震级小于 7 级时, 平均异常时间为 2—3 年, 当震级大于 7 级时, 异常时间可达 4—5 年; 形变异常时间为 1—2 年; 流体异常当震级大于 7 级时, 一般具有 1 年尺度的异常时间, 5 级、6 级中强地震的流体异常时间则一般为 0.5—1 年; 电磁

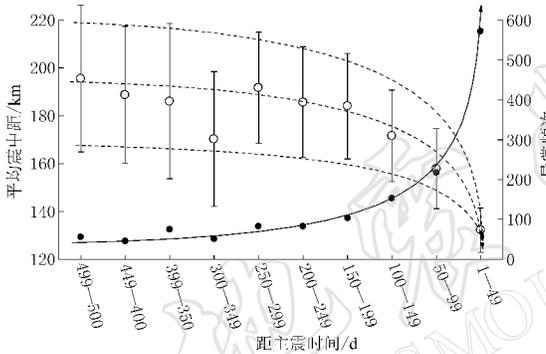


图 6 前兆异常平均震中距随时间的变化(震前 500 天内)

空心圆表示前兆异常平均震中距, 误差棒给出 95% 置信概率下震中距的波动范围; 实心圆表示前兆异常频次. 时间上图 6 是图 7 的一部分

Fig. 6 Average epicentral distance of precursors vs time (500 days before mainshock)

x axis is the time to interval earthquake (days). Open circle represents the average epicentral distance (km), error bars give the range of it under 95% confidence level, and full circle represents the abnormal frequency

非常明显. 从时间上来看, 这一过程大概开始于年尺度的中短期阶段而非更短时间尺度的短临阶段才出现. 300 天之前平均震中距随时间变化不明显, 大约分布在 180—200 km 之间. 更早时间的前兆异常尽管数量不多, 但平均震中距分布也较为稳定, 大体上介于 160—180 km 之间(图 7).

从图 6、图 7 中前兆异常数量(以实心圆表示)随时间的变化平均来看, 大约从震前 300 天开始, 异常数量逐渐增多; 200 天之后异常数量呈加速增长趋势. 这意味着, 有明确预测意义的前兆异常大多出现在震前 300 天之后, 震前 200 天之后异常数量明显增多.

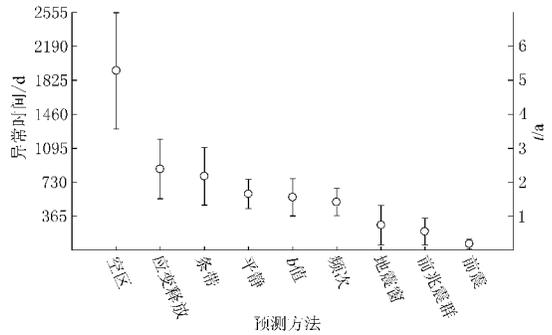


图 5 常用测震学预测方法-平均异常时间图

Fig. 5 Average durations from anomaly appearance to mainshock occurrence (days) by using several seismic forecasting methods

异常时间一般小于 1 年, 但当震级大于 7 级时, 平均异常时间接近 2 年.

若就地震学中预测效率相对较高的几种预测方法而言, 除前兆震群及前震外, 平均异常时间均大于 1.5 年. 特别是常用的空区、条带、应变能释放等方法, 其平均异常时间均大于 2 年; 平静、b 值、频次等的平均异常时间接近 2 年(图 5). 这也正是地震学方法往往被作为年度或数年尺度中长期预测主要手段的统计依据.

2.5 前兆异常平均震中距随时间的变化

基于 1697 条可计算异常震中距及异常时间的前兆异常数据, 图 6 给出了前兆异常平均震中距与平均异常时间之间的关系(以空心圆表示). 可见距主震时间小于 300 天之后, 前兆异常空间分布明显呈现向震中收缩的趋势, 即使考虑平均震中距的统计波动, 这一趋势也非常明显.

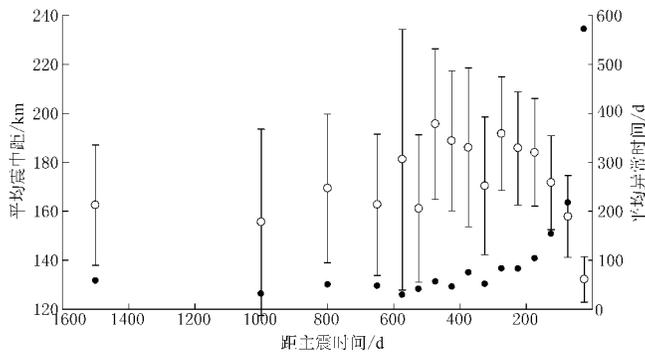


图 7 前兆异常平均震中距随时间变化(震前 1500 天内)
空心圆表示前兆异常平均震中距,误差棒给出 95%置信概率下震中距
的波动范围;实心圆表示前兆异常频次.时间上图 7 包含图 6

Fig. 7 Average epicentral distance of precursors vs time (1500 days before the mainshock)
x axis is the time to interval earthquake (days). Open circle represents the average epicentral
distance (km), error bars give the range of it under 95% confidence level,
and full circle represents the abnormal frequency

3 讨论与结论

1) 《中国震例》研究中用到的各学科异常的多少,在一定程度上表征了现阶段各学科、手段的地震预测“能力”.据此来看,在我国现有台网各学科监测能力的条件下,地震学、形变、流体发挥的作用相对较大,约 91% 的震例中有地震学异常,约 71%、53% 及 66% 的震例中有形变、电磁及流体异常.从地震学各方法来看,最直观的频次、空区、 b 值、条带等方法提供的异常数占到地震学科总异常数量的一半.这些方法或参数的地震预测能力无需讨论,如何进一步量化这些直观异常的判定,换言之如何量化研究者的宝贵经验,才是该类方法或参数当前面临的首要问题.

2) 从异常数量与主震震级的关系来看,地震学、形变、流体异常数量相对多,并且平均异常数量随震级有加速增长的趋势;电磁异常数量相对较少,随震级增加不明显.对比来看,前兆平均异常数量随震级的增加明显高于地震学平均异常数量随震级的增加.这一特点提供了根据异常数量,特别是前兆群体异常数量,估计未来地震可能规模(强度)的统计依据.

3) 平均异常时间与未来主震震级定性正相关,地震越大、异常出现时间越早.地震活动性异常出现时间最早,当震级小于 7 级时平均约为 2—3 年,震级大于 7 级时可达 4—5 年;形变异常出现时间为震前 1—2 年;流体异常当震级大于 7 级时一般具有 1 年尺度的异常时间,5 级、6 级中强地震的流体异常时间一般为 0.5—1 年;电磁异常时间一般小于 1 年,但当震级大于 7 级时,平均异常持续时间接近 2 年.

就地震学中预测效率相对较高的几种方法而言,除前兆震群及前震外,平均异常时间均明显大于 1.5 年.特别是常用的空区、条带、应变能释放等方法,其平均异常时间大于 2 年,平静、 b 值、频次等的平均异常时间接近 2 年.

上述结果提供了利用异常时间估计未来地震可能强度的统计依据.从另一方面也表明,从年度预测的角度来看,当目标震级不高时(例如 5 级多地震),年初年度会商时许多

异常可能尚未出现,特别是流体及电磁类异常,因而在年初要据此预测年内有无5—6级地震可能是不现实的.对5—6级中强地震的预测,短临跟踪可能更为重要.进而,流体、电磁等前兆学科在3年地震大形势研究,甚至是在年度会商中所能够发挥的作用,可能也并不如我们所期望的那么大.

4) 从异常数量随时间的变化来看,大约从震前300天开始,异常数量逐渐增多,200天之后异常数量呈加速增长趋势.这与以往对1976年唐山7.8级、1989年大同5.9级、1998年张北6.2级和1975年海城7.3级地震等单个震例研究所得结论相一致(中国地震局监测预报司,2005).这些震例显示,震前1—2年时间尺度上,异常数量快速增长.据此,根据本文大量震例的统计结果,平均而言,有预测意义的前兆异常大多出现在震前300天之内,而此前的平均异常数量可视为与背景“噪声”无法区分的“本底”异常,要开展地震预测研究,群体异常数量应明显高于“本底”异常数量.

5) 静态地来看,前兆异常分布范围数倍于地震破裂尺度(3—8倍),与大地震前检测到矩释放加速现象的空间尺度范围大体相当.前兆异常震中距随主震震级大体上呈线性增长,形变、流体增加明显,电磁异常的这一特征不突出.对形变及流体学科而言,5.0—5.9级地震的平均异常震中距约为100—150 km,6.0—6.9级地震约为150—200 km,7.0—7.9级地震约为250 km;电磁异常平均震中距当震级小于7级时,约为150 km,7级以上地震约为200 km.

从震前不同时段异常的空间分布变化来看,当距离主震时间小于300天之后,前兆异常平均震中距明显减小,呈现向震中收缩的趋势;300天之前平均异常震中距变化不明显,大约分布在180—200 km之间;更早时间前兆异常数量不多,平均震中距分布同样较为稳定,介于160 km附近.这一现象意味着,随着地震的临近,大约在年时间尺度上,前兆异常空间分布有向震中附近集中的趋势,同时异常数量开始明显增加.事实上,此前通过对唐山、海城、龙陵等几次典型震例的研究,梅世蓉等(1993)已经指出,中期阶段异常从震中向外围扩散,短期阶段异常在较大范围内大体同时出现,临震阶段异常自外围向震中收缩.但本文较多震例的平均统计结果显示,前兆异常向震中明显收缩、集中的趋势大多始于年尺度的中短期阶段而非更短时间的临震阶段.同时,本文亦未能够检测到前兆异常空间分布向外围明显的扩散过程.

6) 震例资料是震后总结得到的,因而它代表了当前科学水平条件下地震预测在理论上能够做到的最好水平.《震例》在异常的确定方面,比震前预测或平时的研究工作有更为严格、统一的标准,其所依据的《震例总结规范》(中国地震局,2007)是以行业规范及国标的形式发挥作用,其对前兆异常选取范围的规定及其对本文统计结果的可能影响,是一个需要认真讨论的问题.观测事实及理论研究结果显示,可以观察到前兆变化的区域范围与目标地震断层长度相关(Keilis-Borok, Malinovskaya, 1964),而地震破裂尺度与震级之间具有指数形式的正相关关系(Utsu, 1961; 吴开统等, 1990).因而定性来看,越大的地震,前兆分布范围越广,这一观点基本上属于共识.但前兆异常具体分布范围究竟如何却存在不同的看法.在《震例总结规范》中,5.0—5.9级、6.0—6.9级和7.0—7.9级地震200 km、300 km和500 km的前兆异常选取范围,主要依据以往研究中大多数地震前兆异常震中距的基本认识来确定,但事实上其大小与通常认为的震前临界区域范围尺度基本接近.大地震前矩释放加速现象的统计研究结果显示,观察到矩释放加速的区域范围可由大约5倍的

目标地震断层尺度来确定(Varnes, 1989; Bufe, Varnes, 1993; Bowman *et al*, 1998; Jaumè, Sykes, 1999). 中国大陆7级地震前具有稳定的应变加速释放特征的临界区域范围大约是260—400 km, 约是7级地震破裂尺度的3—5倍(蒋海昆等, 2009), 其它许多前兆性地震活动模式也在大体相当的距离范围内观察到(Keilis-Borok, Soloviev, 2003). 另一方面, 根据吴开统等(1990)依据中国大陆地震给出的破裂尺度与震级之间的统计关系($L=10^{0.5M-1.78}$), 5.0—5.9级、6.0—6.9级和7.0—7.9级地震的破裂尺度约为5—15 km、16—47 km和52—148 km, 其上限值的5倍约为75 km、235 km和740 km. 对照《震例总结规范》的规定, 5级、6级地震的前兆选取范围应该是足够大的; 对于7级以上地震, 当主震震级小于7.5级时, 5倍的主震破裂尺度与《震例总结规范》规定的7级以上地震500 km的前兆选取范围也基本吻合(7.5级地震的破裂尺度约为93 km, 5倍的破裂尺度约为465 km). 由于1966—1999年《中国震例》185次震例中, 大于7.5级的地震仅有1970年通海7.8级、1973年炉霍7.6级和1976年唐山7.8级等3次, 因而从理论上讲, 《震例总结规范》规定的前兆异常收集范围, 应该涵盖了绝大部分震例的前兆异常分布范围. 但毋庸讳言, 对极少数大地震, 极少数距离较远的“异常”可能会被遗漏, 尽管远距离“前兆异常”的认定及其可能的机理尚有较大争议. 即使如此, 由于其占统计样本(震例统计样本数及前兆条目统计样本数)的比例极小, 因而对本文统计结果不会产生明显的影响.

此外, 有研究者从临界阶段空间上“长程关联”的概念及理论模型出发, 认为大地震前具有相互关联属性的空间范围可达地震破裂尺度的百倍量级(Press, Allen, 1995), 若也简单地视之为前兆异常可能的空间分布范围的话, 则对“前兆”的认定将更加困难.

7) 本文在计算震前平均异常时间时未明确区分异常性质(长期、中期、短期), 这一做法有不严谨之处. 但在实际工作中, 震前根据观测现象要明确区分所谓“长、中、短”异常是非常困难的, 特别是在异常的发展过程中更是如此. 因而不如牺牲一点“精确性”, 而在合理性及易操作性方面有所倾斜, 可能更有实际意义. 还需指出的是, 本文对统计结果亦未开展太多的显著性检验, 一是许多现象都非常直观, 二是着重于实际现象的统计描述, 所给出的拟合关系也仅仅是对统计现象进一步的、粗略的定量表达, 参与拟合的统计样本数有限, 因而开展显著性检验的意义不大.

与前人的震例研究相比较, 本文最大的差异是, 以往绝大多数研究都是针对单个震例进行的, 本文却是在大量震例研究的基础上提取其统计共性特征, 因而所归纳出的现象及特性具有更为显著的统计意义. 大样本统计结果的一个显著特点是精确性降低但普适性提高, 因而即使得到相同的看法, 但支持这一看法的证据力度也不相同.

中国地震局监测预报司刘桂萍建议开展此项工作, 并与作者进行过多次有益的讨论; 陈棋福研究员提供了宝贵的电子版震例资料. 谨致谢意!

参 考 文 献

- 陈棋福(主编). 2002a. 中国震例(1992—1994)[M]. 北京: 地震出版社: 1—428.
陈棋福(主编). 2002b. 中国震例(1995—1996)[M]. 北京: 地震出版社: 1—488.
陈棋福(主编). 2002c. 中国震例(1997—1999)[M]. 北京: 地震出版社: 1—468.
蒋海昆, 苗青壮, 董祥, 吴琼, 黎明晓, 宋金. 2009. 中国大陆7级强震前中小地震应变释放特征[J]. 地震(待发表).
梅世蓉, 冯德益, 张国民, 朱岳清, 高旭, 张肇诚. 1993. 中国地震预报概论[M]. 北京: 地震出版社: 250—256.

- 吴开统, 焦远碧, 吕培苓. 1990. 地震序列概论[M]. 北京: 北京大学出版社: 138-148.
- 张肇诚(主编). 1988. 中国震例(1966—1975)[M]. 北京: 地震出版社: 1-294.
- 张肇诚(主编). 1990a. 中国震例(1976—1980)[M]. 北京: 地震出版社: 1-421.
- 张肇诚(主编). 1990b. 中国震例(1981—1985)[M]. 北京: 地震出版社: 1-294.
- 张肇诚(主编). 1999. 中国震例(1986—1988)[M]. 北京: 地震出版社: 1-394.
- 张肇诚(主编). 2000. 中国震例(1989—1991)[M]. 北京: 地震出版社: 1-453.
- 中国地震局. 2007. 震例总结规范(DB/T24-2007)[S]. 北京: 地震出版社: 4.
- 中国地震局监测预报司. 2005. 华北地区强地震短期前兆特征与预测方法研究[M]. 北京: 地震出版社: 178-190.
- Bowman D D, Ouillon G, Sammis C G, Sornette A, Sornette D. 1998. An observational test of the critical earthquake concept[J]. *J Geophys Res*, **103**: 24359-24372.
- Bufe C G, Varnes D J. 1993. Predictive modeling of the seismic cycle of the greater San Francisco Bay region[J]. *J Geophys Res*, **98**: 9871-9883.
- Jaumè R, Sykes L. 1999. Evolving towards a critical point: A review of accelerating seismic moment/energy release prior to large and great earthquake[J]. *Pure Appl Geophys*, **155**: 279-306.
- Keilis-Borok V I, Malinovskaya L N. 1964. One regularity in the occurrence of strong earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **69**(14): 3019-3024.
- Keilis-Borok V I, Soloviev A A. 2003. *Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction*[M]. Heidelberg: Springer-Verlag: 355.
- Papazachos C B, Karakaisis G F, Scordilis E M, Papazachos B C. 2005. Global observational properties of the critical earthquake model[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **95**: 1841-1855.
- Press F, Allen C. 1995. Patterns of seismic release in the southern California region[J]. *J Geophys Res*, **100**(B4): 6421-6430.
- Utsu T A. 1961. Statistical study on the occurrence of aftershocks[J]. *Geophys Mag*, **30**: 521-605.
- Varnes D J. 1989. Predicting earthquakes by analyzing accelerating precursory seismic activity[J]. *Pure Appl Geophys*, **130**: 661-686.

