

李杰、唐廷梅、朱成林等, 2015, 郯庐断裂带及两侧地区强震异常特征分析, 中国地震, 31(1), 65 ~ 77。

郯庐断裂带及两侧地区强震异常特征分析

李杰¹⁾ 唐廷梅¹⁾ 朱成林¹⁾ 王忠民¹⁾ 冯志军¹⁾ 王雪莹²⁾

1) 山东省地震局, 济南市文化东路 20 号 250014

2) 安徽省地震局, 合肥 340100

摘要 对郯庐断裂带及两侧的山东、辽宁、河北、江苏、江西等地区 1966 ~ 2005 年发生的 24 次中强以上地震的前兆观测异常, 从异常持续时间、空间分布、时空相关性、异常形态、幅度特征、异常种类和可靠性等方面进行了系统的统计和分析, 结果表明: ① 7 级和 6 级地震中期异常最多, 短期异常其次, 临震异常最少。5 级地震短期异常最多, 其次是临震异常, 中期异常最少。② 异常具有阶段性特征, 部分中期和短期地震前兆异常在发展过程中出现了短期或临震异常。③ 异常发展具有准同步性, 越临近发震, 异常发生转折的项目越多。④ 异常主要出现在震中距 100km 范围内, 在空间上具有相对集中性, 且震中距越小, 异常台项比越高。⑤ 异常空间分布与构造走向比较一致, 显示出较好的相关性。⑥ 异常持续时间与震中距之间没有显著的相关性。⑦ 震级越大, 同一观测手段的异常幅度相对越大。⑧ 流体测项异常最多, 其次是形变、电磁测项。⑨ 不同学科的异常均表现为中、短期异常为主, 少数为短临异常。⑩ 流体、形变和电磁学科较可靠异常数量均约为可靠异常的 1 倍。

关键词: 郯庐断裂带 前兆异常特征 流体异常 形变异常 电磁异常

[文章编号] 1001-4683(2015)01-0065-13 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

郯庐断裂带是中国东部最大的巨型断裂带。该断裂带南起长江北岸的黄梅, 经安徽庐江、山东郯城、渤海, 过沈阳后分为西支的依兰-伊通断裂带和东支的密山-抚顺断裂带, 总体呈 NNE 走向(朱光等, 2001)。历史上沿郯庐断裂带有强烈的地震活动, 曾发生过 1668 年郯城 8.5 级、1888 年渤海 7.5 级、1969 年渤海 7.4 级和 1975 年海城 7.3 级等强烈地震。该断裂带分段特征比较明显, 其在山东部分被称为沂沭断裂带。

郯庐断裂带与南北地震带的地震活动有一定对应关系。1654 年天水 8.0 级和 1879 年武都 8.0 级地震表明: 南北地震带上发生的 2 次 8 级地震后的 14 年、9 年, 在郯庐断裂带上发生了 1668 年郯城 8½ 级和 1888 年渤海 7½ 级地震, 且华北地区还发生了多次 6 级以上强震。为分析判断郯庐断裂带及两侧未来强震发生前的前兆观测异常, 本文针对该带及两侧发生过的中强以上地震出现的前兆异常, 结合地质构造进行综合分析研究, 探讨该地区中强

[收稿日期] 2014-02-08; [修定日期] 2014-05-23

[项目类别] 国家重大科技支撑项目(2012BAK19B04-05-02)和中国地震局地震科技星火计划项目(XH13015)资助

[作者简介] 李杰, 女, 1963 年生, 正研级高级工程师, 主要从事地形变地震分析预报和研究工作。

E-mail: lijie2169@sina.com

地震前异常特征,以期助力未来的地震活动分析预测。

1 资料概况

以《中国震例》中汇编的郯庐断裂带及两侧地区发生的 24 次中强以上地震为研究对象(表 1、图 1)(刁守中等,2002;高建华等,2014;黄保大等,2000、2002、2003;贺楚儒等,1988a、1988b、1990、1999、2000;侯建明等,1988;刘宝恒,1990;李广鑫等,1990;卢守安,1990;季同仁等,1988;全盖道,1988;王安东等,2003;王泽皋等,1999;曾炬等,1988、1990a、1990b;张肇诚,1990、2013),统计分析这 24 次地震与电磁、形变和流体等 3 大前兆专业观测仪所记录到的地震异常的关系。研究中一般按时间阶段分为长期异常(L),即异常持续时间 $T > 5$ 年;中期异常(M), $6 \text{ 个月} < T \leq 5$ 年;短期异常(S), $30 \text{ 天} < T \leq 6$ 个月,按 30 天折算 1 个月计算;临震异常(I), $T \leq 30$ 天。按异常可靠程度划为 I(可靠)、II(较可靠)、III(参考)和 D(待研究)等 4 个等级,本文只取前两个等级的异常进行分析研究。前兆异常统计范围: $M_s \geq 7.0$ 地震震中距为 500km, $6.0 \leq M_s < 7.0$ 为 300km, $5.0 \leq M_s < 6.0$ 为 200km(张肇诚等,2013)。本文参考震例中的长期、中期、短期和临震异常定义同前所述,但分别用 L、A、B 和 C 表示。表 1 为 24 次地震的基本参数、异常比例及异常空间台项比。为了分析不同震级地震的前兆异常,清晰辨出异常空间和时间特征,表 1 按地震大小排序,相同震级按发生时间排序。

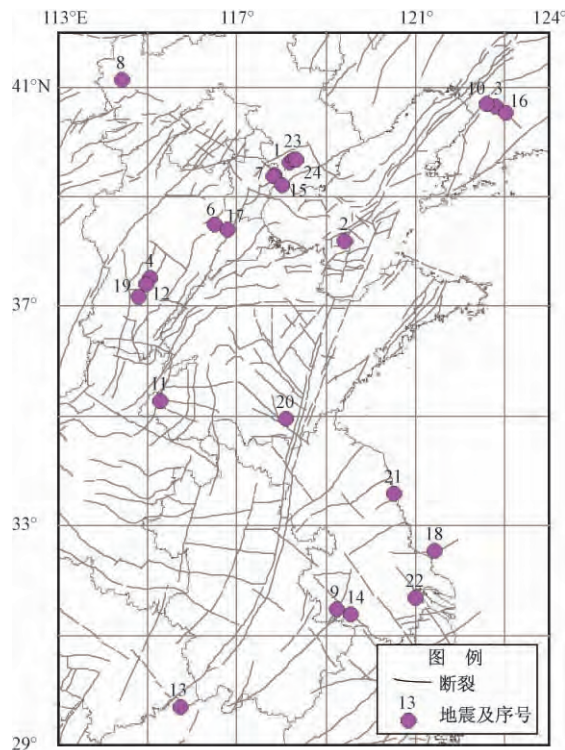


图 1 研究区中强以上地震震中分布图

表 1 地震基本参数、不同阶段的异常比例及异常空间台项比

序号	地震名称	经度 (°E)	纬度 (°N)	发震日期	M_s	异常统计范围/km	异常数量	异常台项比/%	长期异常比例/%	中期异常比例/%	短期异常比例/%	临震异常比例/%	异常空间台项比/(0km < Δ ≤ 100km)	异常空间台项比/(100km < Δ ≤ 200km)	异常空间台项比/(200km < Δ ≤ 300km)	异常空间台项比/(300km < Δ ≤ 500km)
1	唐山	118.18	39.63	1976-07-28	7.8	500	55	45.1	0	70.9	58.2	34.5	58.2	27.3	7.3	7.2
2	渤海	119.40	38.20	1969-07-18	7.4	500	14	-	7.1	64.4	7.1	21.4	0	14.3	42.9	42.8
3	海城	122.80	40.65	1975-02-04	7.3	500	30	43.5	3.3	66.7	13.3	16.7	40.0	30.0	23.3	6.7
4	邢台	115.05	37.53	1966-03-22	7.2	500	4	-	25.0	25.0	25.0	25.0	100.0	0	0	0
5	宁河	117.83	39.40	1976-11-15	6.9	300	10	18.0	0	0	50.0	50.0	50.0	40.0	10.0	0
6	大城	116.50	38.50	1967-03-27	6.3	300	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0
7	宁河	117.80	39.38	1977-05-12	6.3	300	3	6.0	0	0	67.0	33.0	100.0	0	0	0
8	张北	114.42	41.13	1998-01-10	6.2	300	53	42.4	1.80	67.3	20.0	10.9	9.4	52.9	37.7	0
9	溧阳	119.25	31.47	1979-07-09	6.0	300	12	42.3	0	16.7	33.3	50.0	83.3	16.7	0	0
10	营口	122.60	40.70	1978-05-18	5.9	200	8	38.1	0	0	87.5	25.0	50.0	50.0	0	0
11	菏泽	115.28	35.27	1983-11-07	5.9	200	3	25.0	0	0	33.3	100.0	33.3	66.7	0	0
12	隆尧	114.97	37.40	1981-11-09	5.8	200	6	13.0	0	16.7	50.0	33.3	66.7	33.3	0	0
13	九江	115.74	29.69	2005-11-26	5.7	200	4	16.0	25.0	0	75.0	0	75.0	25.0	0	0
14	溧阳	119.54	31.39	1974-04-22	5.5	200	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0
15	宁河	118.02	39.20	1977-11-27	5.5	200	13	22.0	0	0	61.5	38.5	84.6	15.4	0	0
16	岫岩	123.03	40.53	1999-11-29	5.4	200	12	18.5	0	25.0	58.3	50.0	41.7	58.3	0	0
17	河间	116.80	38.40	1973-12-31	5.3	200	8	23.1	0	12.5	0	87.5	62.5	37.5	0	0
18	郟家沙	121.43	32.54	1975-09-02	5.3	200	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0
19	任县	114.80	37.18	1985-11-30	5.3	200	2	5.10	0	0	50.0	50.0	50.0	50.0	0	0
20	苍山	118.10	34.95	1995-09-20	5.2	200	8	25.0	0	25.0	75.0	0	50.0	50.0	0	0
21	射阳	120.53	33.58	1987-02-17	5.1	200	2	-	0	0	0	100.0	0	100.0	0	0
22	常熟太仓	121.00	31.68	1990-02-10	5.1	200	15	20.8	0	60.0	46.7	0	73.3	26.7	0	0
23	唐山	118.27	39.68	1991-05-29	5.1	200	6	9.80	0	0	50.0	50.0	33.3	66.7	0	0
24	唐山	118.33	39.67	1995-10-06	5.0	200	2	2.10	0	0	50.0	50.0	100.0	0	0	0

注: 空白处为不在统计范围之内

2 研究方法

在系统梳理、统计研究区历史上发生的 24 个中强以上地震前兆异常的基础上,分 5 个方面分析前兆异常特征:

(1) 震级与异常持续时间的关系。

按长期、中期、短期和临震异常分别统计 7 级、6 级和 5 级地震不同阶段前兆异常所占的比例,分析异常的时间特征。

(2) 震级与震中距的关系。

按 7 级、6 级和 5 级地震震中距 Δ 为 500、300、200km 统计 $0\text{km} < \Delta \leq 100\text{km}$ 、 $100\text{km} < \Delta \leq 200\text{km}$ 、 $200\text{km} < \Delta \leq 300\text{km}$ 和 $300\text{km} < \Delta \leq 500\text{km}$ 范围内出现的前兆异常占有所有异常的比例,分析异常空间分布特征。

(3) 异常时间与异常空间的关系。

中期、短期和临震异常分别按月、天和小时进行统计,分析 7 级、6 级和 5 级地震中期、短期和临震异常与震中距的关系。

(4) 异常形态、幅度特征。

分析不同阶段异常的形态特征、幅值特征以及不同震级异常形态的共性和差异。

(5) 异常种类及可靠性。

统计分析不同观测手段、不同震级、不同阶段异常的可靠和较可靠情况。

3 前兆异常特征分析

3.1 震级与异常持续时间的关系

3.1.1 不同震级前兆异常时间特征不同

表 1 给出了 24 个地震长、中、短期和临震异常占地震总异常的比例。由表 1 可见,在前兆台网比较健全的情况下,7 级和 6 级地震中期异常最多,其次是短期异常、临震异常,长期异常最少,如:唐山 7.8 级和张北 6.2 级地震;5 级地震以短期异常为主,其次为临震异常,如:营口 5.9 级和岫岩 5.4 级地震。表 1 中个别地震的短期和临震异常是在中期和短期异常背景下出现的,分别按异常类型进行了个数统计。

表 2 为不同震级异常类型和可靠性统计结果,不同震级、不同类型异常个数如图 2 所示。由表 2、图 2 可见,不同震级的长期异常数量都很少,7 级和 6 级地震中期异常最多,短期异常其次,临震异常最少。5 级地震短期异常最多,其次是临震异常,中期异常最少。即震级越大,中期异常越多;反之越少。中期异常持续时间集中在 0.5~2.0 年,占中期异常的 57.7%,短期异常在 1~3 月,占短期异常的 51.7%,临震异常在 10 天以内,占短临异常的 72.4%。

3.1.2 前兆异常具有阶段性特征

部分中期和短期异常在发展过程中又出现了短期或临震异常,如唐山 7.8 级和岫岩 5.4 级地震前分别有 63.6%、33.3% 的中期和短期背景异常出现了短、临异常,说明如果在震中附近前兆台点密集且分布比较均匀时,中强以上地震前可记录到长、中、短、临前兆异常。异常的转折或恢复,可能意味着孕震过程由中期向短期或由短期向临震发展,即前兆异

表 2 异常类型及可靠性统计表

异常类型		4 个 7 级地震 异常个数		5 个 6 级地震 异常个数		15 个 5 级地震 异常个数		合计	
L	I	3	0	1	0	1	0	5	0
	II		3		1		1		5
A	I	69	32	38	1	16	4	123	37
	II		37		37		12		86
B	I	20	15	22	3	45	20	87	38
	II		5		19		25		49
C	I	11	4	17	6	27	9	55	19
	II		7		11		18		36
合计		103	51	78	10	89	33	270	94
			52		68		56		176

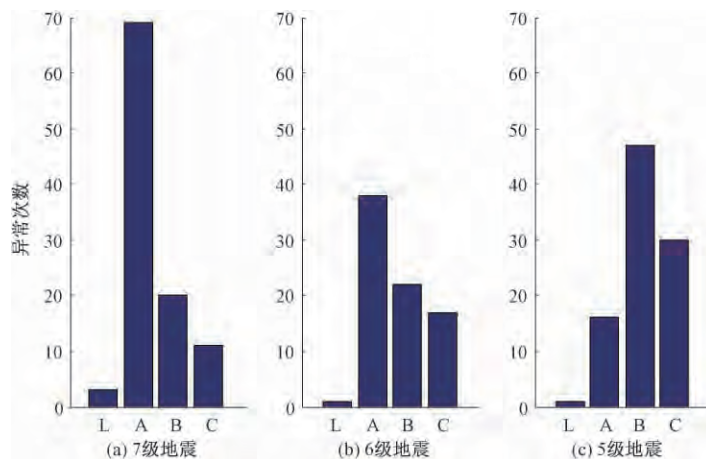


图 2 不同震级、不同类型异常个数统计

常发展具有阶段特征。

3.1.3 异常发展具有准同步性

多数震例显示出异常的出现和发展过程具有明显的准同步性,这表明异常受控于统一应力场,越临近发震,异常发生转折的项目越多。

3.2 震级与震中距的关系

3.2.1 异常在空间上相对集中

表 1 和图 3 分别给出了不同震中距内异常占总异常的比例。由表 1、图 3 可见,不同震级地震的异常在空间上相对集中,出现在震中距 100km 范围内的异常最多,即异常距离震中越近,异常点越多,异常比例越高。

3.2.2 异常点空间分布的不均匀性

24 个中强地震只有溧阳 6.0 级、隆尧 5.8 级、营口 5.9 级和太仓 5.1 级地震统计范围内前兆台点相对比较均匀,其他绝大多数地震前兆台点分布在震中一侧或两侧,导致统计范围内存在没有前兆观测项的大范围空区,该区内自然也就无前兆异常。由于前兆观测台点建设的不均匀性,导致前兆异常在空间上呈不均匀分布,台点多的地方异常也多,台点少的地

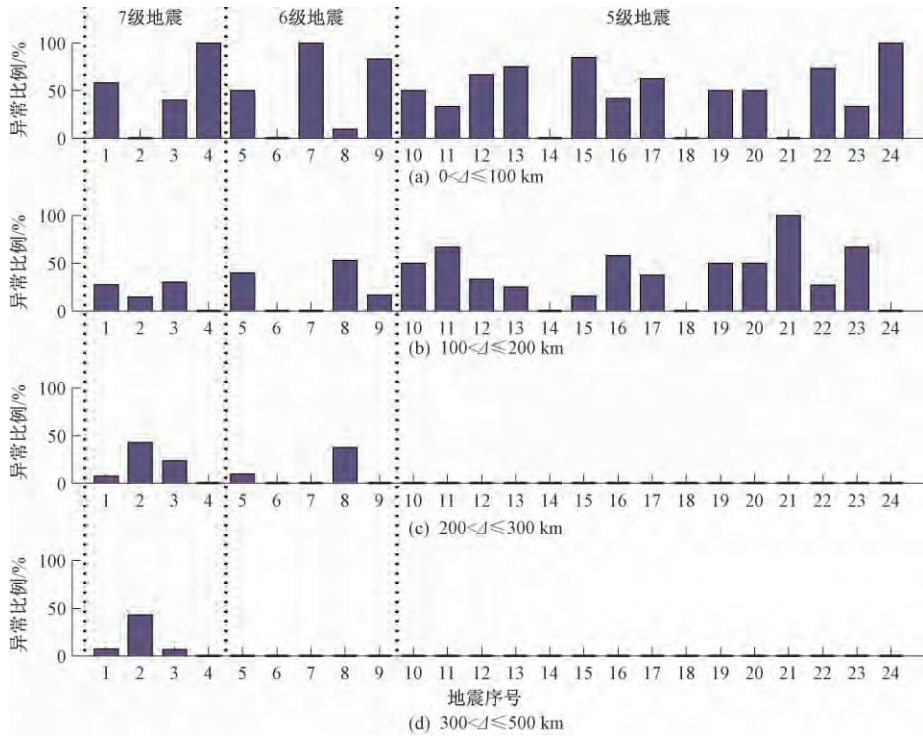


图3 不同震中距异常占总异常的比例

方异常也少。张北地震前距震中 300km 范围内的前兆台项分布非常不均,且 100km 内观测台点少,只有 9.4% 的异常在 100km 内,但该范围内的异常台项比最高,为 31%。

结合研究每个地震异常在空间上的分布后发现,异常空间分布显示出与构造较好的一致性。异常分布与构造走向比较一致,异常多时会构成前兆异常的分布条带,在断裂带上的观测点即使震中距较远也可能出现异常,表明沿构造线方向的前兆反应能力要比横跨断裂方向的大,这一特点对于认识地震前兆异常,判断未来地震活动危险区具有地点上的指示意义;但并非所有构造带上的观测点都能记录到前兆异常,在具体应用时应结合其它指标综合考虑。

3.3 异常时间与空间的关系

为了更加清晰地认识前兆异常持续时间与震中距的关系,采用一元回归分析方法(蒋骏等,2000)分别计算了 7 级、6 级和 5 级地震中期(单位为月)、短期(单位为天)和临震异常(单位为小时)与震中距的相关系数,取显著性水平 $\alpha = 0.05$,结果见表 3。其中, γ_{α} 为相关系数的临界值, a_1 和 a_2 为回归系数常数项和一次项。

由表 3 可见,不同震级地震的中、短、临异常持续时间和震中距相关系数均小于其 $\alpha = 0.05$ 水平的临界值,说明异常持续时间和震中距没有显著的相关性。但由表 3 也可见,除 5 级地震的临震异常持续时间和震中距相关系数很小外,其它地震的中、短期和临震异常持续时间与震中距均有一定的相关性,5 级中期、6 级临震、7 级中短期异常呈负相关,5 级短期、6 级中短期和 7 级临震异常呈正相关。正相关表明,震中距越远,异常持续时间越长;负相

表 3 不同震级异常持续时间与震中距一元回归分析结果

震级	异常类型	相关系数	$\gamma_{\alpha} = 0.05$ 临界值	标准差	a_1	a_2
5	中期	-0.25	0.50	4.48	11.29	-0.02
	短期	0.22	0.36	48.57	64.00	0.17
	临震	-0.02	0.36	225.34	237.65	-0.07
6	中期	0.21	0.32	15.53	18.47	0.04
	短期	0.24	0.48	51.47	58.52	0.21
	临震	-0.34	0.48	227.24	420.50	-1.55
7	中期	-0.20	0.24	16.45	28.67	-0.03
	短期	-0.26	0.60	58.35	152.20	-0.12
	临震	0.44	0.60	93.28	46.14	0.44

关表明,震中距越远,异常持续时间越短。由此可得出参考性结论:持续时间相对较短的 7 级地震中、短期异常主要出现在震中区外围,持续时间相对较长的出现在震中区;临震异常持续时间相对较短,震中距相对较近;6 级地震临震异常持续时间相对较长,震中距相对较短,中、短期异常持续时间相对较短,震中距相对较近;5 级地震中期异常持续时间相对较长,震中距相对较短,短期异常持续时间相对较短,震中距相对较近。

3.4 异常形态、幅度特征

3.4.1 异常形态

前兆异常形态非常复杂,大体上可分为趋势型、年变型和突变型。趋势型又分为缓慢和加速趋势型异常,年变型分为年变幅度和形态异常,突变型分为突跳和阶跃异常。对于趋势异常中叠加的年变和突变异常以及年变异常中叠加的突变异常没有再进一步分离进行统计。本文分析的 270 项前兆异常,趋势型异常最多,其次为突变型异常,年变型异常最少,异常形态比例如图 4 所示。

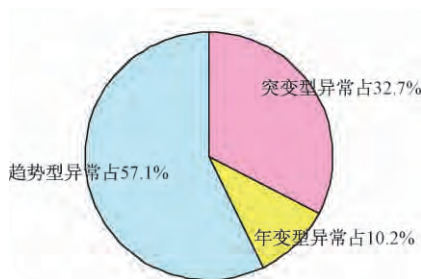


图 4 异常形态比例示意图

3.4.1.1 趋势型异常

7、6 级地震异常主要为趋势型。趋势型异常主要存在于中、短期异常中,显示观测值变化方向发生改变或在原方向出现加速或减缓变化,地震多发生在异常达最大值,或转折恢复过程中,震后观测值逐渐恢复到正常变化区间,或在新的水平上呈正常变化。中期趋势型异常显示观测值呈缓慢地系统偏离原正常变化区间,短期趋势型显示观测值呈加速地偏离原正常变化区间。水准、基线、地倾斜、地电阻率、地下水位和水氡等测项可出现趋势型异常。

3.4.1.2 年变型异常

该类型分为年变幅度异常和年变形态畸变异常,主要存在于中、短期异常中。年变幅度异常显示年变形态不变,幅值增大或变小;年变形态畸变异常显示年变形态消失,出现年畸变特征。地电阻率、地倾斜、水准、基线、水位等测项可出现年变型异常。

3.4.1.3 突变型异常

该类型异常主要存在于短、临异常中,表现为震前出现突然的上升或下降显著变化,为单点或多点突跳、阶跃变化,震后观测值迅速恢复到正常动态或在阶跃水平变化,也有些突变异常是在中、短期异常发展中出现的。地倾斜、地下水位、地应力和水化学组份可出现突变型异常。

3.4.2 异常幅度

虽然不同观测手段出现的异常量纲不一样,无法在统一基准下进行比较,但综合分析前兆各学科不同观测手段在不同地震前出现的异常幅度,可得出如下特征:

(1) 地震震级越大,同一观测手段的异常幅度相对越大。如:津2热水井的 CO_2 含量在1976年唐山7.8级、1976年宁河6.9级和1977年宁河6.3级地震前异常最大变化量分别为25%(张肇诚等,1990)、20%和20%(李广鑫等,1990)。

(2) 同一地震出现的异常,大多数表现为水化学类异常幅度最大,其次是水物理、地倾斜、地应变、跨断层形变和地电阻率异常。如:海城地震前海城车站观测点氯离子、鞍钢台二氧化碳、汤河站观测点水氡、大连水文队观测点总硬度异常幅度均达100%以上,大连水文队观测点氯离子达1400%;昌黎台视电阻率异常超出正常78%(全盖道,1988)。可见异常幅度可达正常值的几十倍,甚至上千倍。

(3) 大多数情况下,长、中、短期异常幅度相对较大,临震异常幅度相对较小。长、中、短期异常持续时间长是异常幅度大的主要原因。如:海城地震出现的水化学类异常,中、短、临异常幅度平均分别为315.2%、70.3%和56.5%(全盖道,1988);但异常变化速率则是临震异常最大。

(4) 震中距越小,异常幅度相对越大。如:马01井水位距1991年5月29日唐山4.8级地震和30日5.2级地震震中约3km,1991年5月22日前水位下降速率为40mm/d左右(黄保大等,2000),以后反向上升,在唐山4.8级和5.2级地震前,水位都呈现从快速上升至突升过程,两次共上升2.645m,属临震异常。

3.5 异常种类及可靠性

3.5.1 异常种类

异常测项出现的数目与震前一定范围内的所有观测手段数量有关,也与不同学科台点数量有关。中强地震前,不同学科的前兆异常数量差别较大,流体、形变和电磁学科异常比例分别为50%、33%和11%,这与流体观测台点建设便捷因而台点多,而形变、电磁台点相对较少有很大关系。流体学科中水化学类异常最多,占流体异常的68.8%,包括水氡、氯离子、 CO_2 、总硬度、水温等也是常见异常;水物理主要是地下水位异常,也有少量水温、油汽井异常等。形变学科主要是跨断层水准和基线、地应力、地倾斜和少数重力异常等。电磁学科主要是地电阻率和电磁异常,两类手段异常数量各占约50%。流体学科主要为中、短期异常,少数临震异常;形变学科主要为中期异常,少数短、临异常;电磁学科中、短、临异常相差

不大,各占约 1/3。

3.5.2 异常可靠性

由表 2 可见,较可靠异常(Ⅱ类)为 176 个,可靠异常(Ⅰ类)为 94 个,流体、形变和电磁学科Ⅱ类异常均约为Ⅰ类的一倍。其中,7 级地震Ⅰ类和Ⅱ类异常相差不多,6 级、5 级地震以Ⅱ类为主,说明 7 级强震异常比较好确认,5、6 级地震异常少,而且信度相对也低。

4 讨论与结论

本文分析的中强以上地震基本上包括了我国开展地震监测预报以来在郟庐断裂带及两侧地区发生的 5 级以上地震,震例资料比较丰富。因此,本研究对象及得出的结论应当能代表该地区中强地震发生前的异常特征。

异常项目包括了前兆 3 大学科的多种观测手段。系统分析郟庐断裂带及两侧地区异常特征,对认识该地区中强地震前异常的时、空、强特征以及它们之间的关系,进而指导地震监测预报工作具有一定的意义。由于所选震例均按《中国震例》的统一要求,即按规定的震中距离和异常持续时间对异常进行分类,使不同地震异常各项特征指标可以在统一的基准上进行对比分析,因此得出的结论具有一定的科学性和普适性。

由于分析的地震在发生时间上跨度近 40 年,分布范围包括了华北、华东大部分地区和辽南地区,震中周围环境及前兆观测条件相差较大,因此得出的统计结果也具有一定的不确定性。如 1966 年邢台 7.2 级地震前全国无前兆台网,因此,只在震中区附近记录到 4 项异常;1969 年渤海 7.4 级地震发生在海域,近源区无前兆观测台点,因此也无异常,虽然在京津及渤海周边地区建有部分前兆专业台点,但台点分布非常不均匀,且主要以水氡观测为主,因此该地震的异常主要为水氡异常,且主要分布在距震中 200~300km 处;1998 年张北 6.2 级地震前其震中 300km 范围的前兆观测台(点)分布非常不均,且 100km 内观测台点较少,台站主要分布在距震中 100km 以外的东南地区,震中以北 300km 范围内基本上无前兆观测台点;1975 年郎家沙 5.3 级和 1974 年溧阳 5.5 级地震没有记录到异常,主要原因是震中统计范围内前兆观测台点很少,这些都是导致异常台(点)空间分布不均的主要原因,其对异常的各项统计特征有一定的影响。前兆台网比较健全、观测手段多、仪器稳定可靠、有多测项对比观测、观测时间较长的前兆观测台点的异常信度较高,如 1975 年海城 7.3 级、1976 年唐山 7.8 级和 1978 年营口地震前辽宁、华北地区的地震专业观测台点较多,观测时间较长,因此出现了约 40% 的前兆异常,异常幅度大,大多数是正常值的几十倍。因此,其前兆异常台项比和信度都较高,这些异常的出现将预示着前兆观测点一定范围内可能发生强震。

通常情况下,与强地震发生有关的异常的发展是有阶段特征的,时间可分为长期、中期、短期、临震和震后等 5 个阶段。长期异常一般在 6 年左右,表现为震中区及附近地壳缓慢升降,主要是区域流动水准、重力和地磁观测出现了趋势性背景异常;中期异常表现为重力值趋势性上升,地下水位趋势性下降,水氡含量上升,视电阻率趋势性下降,外围地区断层形变、应变增强等;短期异常阶段,主要表现为多个测项的中期趋势性异常出现转折恢复或加速变化,或出现新的短期趋势、破年变异常,个别测项有突发性异常现象,主要出现在水准、应力、水氡、电阻率和地下水位等观测中;临震异常阶段,主要是水氡、地下水位、地应力、地

倾斜和地磁等出现突变异常;震后阶段多数异常逐渐或快速恢复到原变化水平,少数异常没有恢复或完全恢复,在新的动态水平范围逐渐稳定下来。

一般情况下,震级越大,异常越多,幅度越大,但也有例外,如1977年宁河5.5级地震较之前发生的6.9、6.3级地震异常都多(李广鑫等,1990);1990年太仓5.1级地震,异常达15个,异常种类多,幅度大,水位最大变化达2.3m,水温升温最高达95℃,地倾斜的变化幅度达2.4"(贺楚儒,2000),变化幅度最大的点位并不在近震中区,大幅度异常与1个5级地震难以“匹配”。因此,这些异常值得深入研究。

“九五”数字化前兆台网建设以来,在全国大部分地区新建设了深井水温、钻孔应变、台站重力和大地电场等多种数字化观测台点。由于此阶段研究区内仅发生了九江5.7级地震,且异常很少,故本文没有对这些观测手段的映震效果进行讨论。

由前述异常分析可见,异常数量和可靠性与震中位置、地震大小、观测点的分布范围、有效统计范围内存在的前兆观测台项和观测时间等有很大的关系。本文分析的异常属于《中国震例》中规定的统计范围,对于超过统计范围的异常均未做统计,如唐山7.8级地震清江台水氦、太原晋祠台泉异常(国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组,1982),1973年河间5.3级地震大柏舍台视电阻率异常,1987年射阳5.1级地震常熟台地倾斜、徐州台振弦应变异常,1990年常熟太仓5.1级地震安徽和县香泉台水氦异常等都超出了《中国震例》规定的异常统计范围,但这些异常数量少,对本文的研究结果影响不大。

综上所述研究得出以下结论:

(1)不同震级的长期异常数量都很少。7级和6级地震中期异常最多,其次是短期异常,临震异常最少;5级地震短期异常最多,其次是临震异常,中期异常最少。

(2)57.7%的中期异常持续时间为0.5~2.0年,51.7%的短期异常持续时间为1~3月,72.4%的临震异常持续时间在10天以内。

(3)前兆异常具有阶段性特征。部分中期和短期异常在发展过程中出现了短期或临震异常,异常转折或恢复,可能意味着孕震过程由中期向短期,或由短期向临震的发展,即异常发展具有阶段性特征。

(4)异常出现和发展过程中具有明显的准同步性,异常点受控于统一应力场,越临近发震,异常转折项目越多。

(5)异常在空间上具有相对集中性。震中距越小,异常台项比越高,异常主要出现在震中距100km内;异常空间分布显示与构造有较好的一致性;异常分布与观测台点数量和分布有关,即台点多的地方异常也多,异常多少与实际观测台点多少有直接关系。

(6)前兆观测台点不均匀,导致异常在空间上呈不均匀分布。

(7)持续时间相对较短的7级地震中、短期异常出现在震中区外围,持续时间相对较长的出现在震中区;临震异常持续时间相对较短,震中距相对较近。6级地震临震异常持续时间相对较长,震中距相对较近;中、短期异常持续时间相对较短,震中距相对较近。5级地震中期异常持续时间相对较长,震中距相对较近;短期异常持续时间相对较短,震中距相对较近。

(8)前兆异常分为趋势型、年变型和突变型。趋势型分为缓慢和加速趋势型异常,年变型分为年变幅度和形态异常,突变型分为突跳和台阶异常。

(9) 震级越大, 同一观测手段的异常幅度相对越大, 异常持续时间越长; 震中距越短, 异常幅度越大。

(10) 不同前兆学科异常数量差别较大, 流体异常数量最多, 其次是形变、电磁异常, 这与有效统计范围内不同学科的台点多少有关。流体异常主要为中、短期异常, 少数为短临异常; 形变异常主要为中期异常, 少数为短、临异常; 电磁异常中、短、临异常数量相差不大, 约各占 1/3。

(11) 流体、形变和电磁学科 II 类异常均约为 I 类的 1 倍。其中, 7 级地震异常信度较高, I 类和 II 类异常数相差不多; 6 级和 5 级地震异常数较少, 信度相对也低, 以 II 类异常为主。

参考文献

- 刁守中、华爱军、苏鸾声, 2002, 1995 年 9 月 20 日山东省苍山 5.2 级地震, 见: 陈棋福、郑大林、刘桂萍等, 中国震例 (1995 - 1996), 165 ~ 199, 北京: 地震出版社。
- 高建华、吕坚、杨雪超等, 2014, 2005 年 11 月 26 日江西省九江-瑞昌 5.7 级地震, 见: 蒋海昆、付虹、杨马陵等, 中国震例 (2003 - 2006), 630 ~ 655, 北京: 地震出版社。
- 国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组, 1982, 一九七六年唐山地震, 北京: 地震出版社。
- 贺楚儒, 1999, 1987 年 2 月 17 日江苏省射阳 5.1 级地震, 见: 张肇诚、郑大林、徐京华, 中国震例 (1986 - 1988), 156 ~ 173, 北京: 地震出版社。
- 贺楚儒, 2000, 1990 年 2 月 10 日江苏省常熟-太仓 5.1 级地震, 见: 张肇诚、郑大林、徐京华, 中国震例 (1989 - 1991), 176 ~ 202, 北京: 地震出版社。
- 贺楚儒、张德齐, 1990, 1979 年 7 月 9 日江苏省溧阳 6.0 级地震, 见: 张肇诚、罗兰格、李海华等, 中国震例 (1976 - 1980), 357 ~ 384, 北京: 地震出版社。
- 贺楚儒、张德齐、谢华章等, 1988a, 1975 年 9 月 2 日江苏省郎家沙 5.3 级地震, 见: 张肇诚、罗兰格、李海华等, 中国震例 (1966 - 1975), 211 ~ 222, 北京: 地震出版社。
- 贺楚儒、张德齐、张绍治, 1988b, 1974 年 4 月 22 日江苏省溧阳 5.5 级地震, 见: 张肇诚、罗兰格、李海华等, 中国震例 (1966 - 1975), 144 ~ 154, 北京: 地震出版社。
- 侯建明、曾炬、罗兰格, 1988, 1973 年 12 月 31 日河间 5.3 级地震, 见: 张肇诚、罗兰格、李海华等, 中国震例 (1966 - 1975), 130 ~ 143, 北京: 地震出版社。
- 黄保大、边庆凯、张子广, 2002, 1995 年 10 月 6 日河北省唐山 5.0 级地震, 见: 陈棋福、郑大林、刘桂萍等, 中国震例 (1995 - 1996), 210 ~ 221, 北京: 地震出版社。
- 黄保大、孙佩卿, 2000, 1991 年 5 月 29、30 日河北省唐山 4.8、5.1 级地震, 见: 张肇诚、郑大林、徐京华, 中国震例 (1989 - 1991), 349 ~ 363, 北京: 地震出版社。
- 黄保大、张子广、边庆凯等, 2003, 1998 年 1 月 10 日和 1999 年 3 月 11 日河北省张北 6.2 级和 5.5 级地震, 见: 陈棋福、郑大林、高荣胜, 中国震例 (1997 - 1999), 146 ~ 173, 北京: 地震出版社。
- 季同仁、刘元生、王安岳, 1988, 1969 年 7 月 18 日渤海 7.4 级地震, 见: 张肇诚、罗兰格、李海华等, 中国震例 (1966 - 1975), 19 ~ 40, 北京: 地震出版社。
- 蒋骏、李胜乐、张雁滨等, 2000, 地震前兆信息处理与软件系统 (EIS2000), 北京: 地震出版社。
- 李广鑫、卢洋, 1990, 1976 年 11 月 15 日、1977 年 5 月 12 日和 11 月 27 日天津市宁河 6.9 级、6.3 级和 5.5 级地震, 见: 张肇诚、罗兰格、李海华等, 中国震例 (1976 - 1980), 165 ~ 186, 北京: 地震出版社。
- 刘宝恒, 1990, 1978 年 5 月 18 日辽宁省营口 5.9 级地震, 见: 张肇诚、罗兰格、李海华等, 中国震例 (1976 - 1980), 235 ~ 250, 北京: 地震出版社。
- 卢守安, 1990, 1983 年 11 月 7 日山东省菏泽 5.9 级地震, 见: 张肇诚、罗兰格、李海华等, 中国震例 (1981 - 1985), 133 ~ 156, 北京: 地震出版社。

- 全釜道,1988,1975年2月4日辽宁省海城7.3级地震,见:张肇诚、罗兰格、李海华等,中国震例(1966-1975),189~210,北京:地震出版社。
- 王安东、谷光裕、黄河等,2003,1999年11月29日和2000年1月12日辽宁省海城-岫岩5.4级和5.1级地震,见:陈棋福、郑大林、高荣胜,中国震例(1997-1999),429~468,北京:地震出版社。
- 王泽皋、于书泉、孙佩卿等,1999,1967年3月27日河北省河间、大城6.3级地震,见:张肇诚、郑大林、徐京华,中国震例(1986-1988),357~371,北京:地震出版社。
- 曾炬、罗兰格、侯建明,1988,1966年3月8日、22日河北省邢台6.8、7.2级地震,见:张肇诚、罗兰格、李海华等,中国震例(1966-1975),1~18,北京:地震出版社。
- 曾炬、罗兰格、侯建明,1990a,1981年11月9日河北省隆尧5.8级地震,见:张肇诚、罗兰格、李海华等,中国震例(1981-1985),29~41,北京:地震出版社。
- 曾炬、罗兰格、侯建明,1990b,1985年11月30日河北省任县5.3级地震,见:张肇诚、罗兰格、李海华等,中国震例(1981-1985),283~294,北京:地震出版社。
- 张肇诚、陈棋福、郑大林,2013,震例总结研究探讨,北京:地震出版社。
- 张肇诚、罗咏生、郑大林,1990,1976年7月28日河北省唐山7.8级地震,见:张肇诚、罗兰格、李海华等,中国震例(1976-1980),59~104,北京:地震出版社。
- 朱光、王道轩、刘国生,2001,郟庐断裂带的伸展活动及其动力学背景,地质科学,36(3),269~278。

Abnormity characteristic analysis of microseisms at Tanlu cross-fault and its bilateral areas

*Li Jie*¹⁾ *Tang Tingmei*¹⁾ *Zhu Chenglin*¹⁾ *Wang Zhongmin*¹⁾ *Feng Zhijun*¹⁾
*Wang Xueying*²⁾

1) Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China

2) Earthquake Administration of Anhui Province, Hefei 340100, China

Abstract This article counted and analyzed the duration, spatial distribution, form, range, type and reliability of abnormities based on the abnormity observation of earthquake precursors of 24 mezzo forte earthquakes at Tanlu cross-fault and its bilateral areas such as Shandong, Liaoning, Hebei, Jiangsu, Jiangxi provinces from 1966 to 2005. Results showed that: (1) For $M1.7$ and $M6.0$ earthquakes, medium-term abnormities occurred most often, short-term abnormities occurred sometimes, and impending earthquake abnormities occurred rarely. For $M5.0$ earthquakes, short-term abnormities occurred most often, impending earthquake abnormities occurred sometimes and medium-term abnormities occurred rarely. (2) Precursory abnormities are periodical, part of the medium-term and short-term abnormities showed short-term and impending earthquake abnormities during its development. (3) The development of precursors showed prospective synchronism; the closer to earthquakes, the more changes of directions of abnormities. (4) Abnormities mainly occurred within 100km^2 distance of the epicenter. It showed relative centrality in space and the shorter the distance of epicenter, the higher the abnormity to total observation ratio. (5) The space distribution and the structure trend of abnormities were relatively correlated. It showed good interdependency with the structure. (6) There was no significant correlation of the duration of the abnormities and the distance of epicenter. (7) The higher the magnitude of the earthquake, the bigger the range of the abnormities with the same observation approach. (8) Fluid subject showed the most abnormities, followed by deformation and electromagnetism subjects. (9) For all different subjects, medium-term and short-term abnormities made up the majority and short-term and impending earthquake abnormities were the minority. (10) For fluid, deformation and electromagnetism subjects, the relative reliable abnormities were about double the reliable abnormities.

Key words: Tanlu cross-fault The characteristics of precursory anomaly Fluid anomalies
Deformation anomaly Electromagnetic anomaly