

# 汶川 $M_s8.0$ 地震的前兆异常时空演化过程及其力学分析\*

张小涛, 刘 杰, 宋治平, 薛 艳, 张永仙, 晏 锐, 苑争一

(中国地震台网中心, 北京 100045)

摘要:为了研究 2008 年汶川  $M_s8.0$  地震前 10 年前兆异常的时空演化过程,采用地震破裂区的几何中心和余震区椭圆中心线为中心的两种方法计算前兆异常的震中距。结果表明:在汶川地震前 2 年左右前兆异常逐渐增多;近源区(震源 2 倍左右尺度)异常测项比大于 25%,远源区中震源 3~5 倍尺度区域的异常测项比为 17%~24%。前兆异常时空演化过程存在三个不同的变化阶段,即  $\alpha$  阶段(包括  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ ,震前 700~3000 d)的异常主要分布在余震区以外的西南地区和西北地区,表现为远源区与近源区的前兆均存在向外扩展的特点; $\beta$  阶段(震前 300~700 d)的异常分布在余震区西南部和北部地区,表现为大范围出现异常; $\gamma$  阶段(包括  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$ ,震前 300 d 内)的异常分布范围较广,异常主要分布在余震区的西南部和东北部地区,表现为远源区的异常向震中收缩过程( $\gamma_1$ )和近源区的异常向外扩展的过程( $\gamma_2$ )。地震孕育过程的实验研究和力学分析表明,地震孕育过程中前兆异常的三阶段特征可能是受孕震体的控制,是孕震过程中的一种表现形式,是一个地震孕育过程中的普遍性特点,对地震预测具有一定指导作用。

关键词:前兆异常;汶川  $M_s8.0$  地震;时空演化;三阶段特征

中图分类号:P315.7 文献标识码:A 文章编号:1000-3274(2018)02-0072-12

## 引言

2008 年 5 月 12 日四川汶川发生  $M_s8.0$  巨大地震后,对汶川地震进行了大规模的科学反思<sup>[1]</sup>,对汶川地震前地震活动、形变、电磁、流体几大学科的异常进行了反思分析,重点清理了汶川地震前观测到不同学科的异常。近 10 年来,许多学者从不同角度进行了总结分析<sup>[2~6]</sup>,但是从汶川地震孕育过程角度看,地震活动和前兆异常的时空演化仍有待深入研究,如地震活动增强区(环形分布)、地震背景空区以及前兆异常分布关系如何?汶川余震区达 300 多 km,震中区附近前兆异常不突出,但周边的甘东南地区和川滇交界地区存在一些突出的异常,这些异常是否是汶川地震的前兆异常,还存在争议;汶川地震的前兆异

\* 收稿日期:2018-01-01;修改回日期:2018-02-25

基金项目:地震科技星火项目(XH17048);中国地震局震情跟踪定向工作任务(2018010505)

作者简介:张小涛(1982-),男,山东济宁人,助理研究员,主要从事地震预测研究。

通讯作者:刘杰,研究员。E-mail:liujie@seis.ac.cn

常范围究竟有多大，等等。针对这些问题，本文试图分析汶川地震的前兆异常的时、空演化特征，并尝试从力学角度加以理解，为建立孕震理论和预测实践积累震例资料。

## 1 前兆异常概况

在前兆异常的综合分析中，一般以震中位置计算震中距，这一做法对于震源破裂尺度在 100 km 以内的 6~7 级地震是可以的。破裂长度达 300 km 左右的汶川 8.0 级地震，初始破裂位置为北纬  $30.95^\circ$ ，东经  $103.4^\circ$ ，位于整个破裂区的西南段，而余震沿北东向龙门山断裂带分布形成长 325 km，宽 20~30 km 的“线状”分布区<sup>[7, 8]</sup>，如果以汶川地震震中（初始破裂位置）计算异常的震中距，会对前兆异常的时空演化特征的正确认识产生一定影响。为了较合理的统计前兆异常的演化特征，本文统计汶川地震前兆异常分别距离破裂区几何中心位置（北纬  $31.89^\circ$ ，东经  $104.35^\circ$ ）和汶川地震余震区最近距离（即距离余震区中心线的距离，该线段两端点位置分别为北纬  $30.93^\circ$ 、东经  $103.20^\circ$  与北纬  $32.95^\circ$ 、东经  $105.62^\circ$ ），计算这两种方式的前兆异常“震中距”（以破裂中心为圆心计算的震中距简称为圆形震中距，以余震区椭圆中心线为中心计算的震中距简称为椭圆形震中距），进一步对比研究前兆异常的时空演化特征。

图 1 给出形变、电磁、流体三大学科的前兆异常空间分布（数据引自《汶川地震科学研

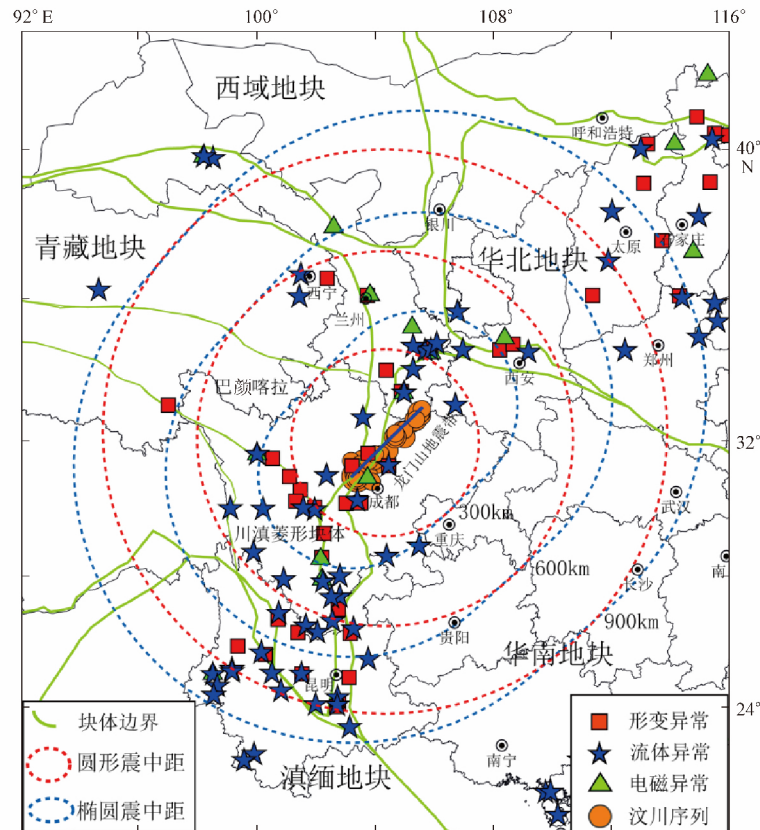


图 1 汶川地震前的前兆异常与不同震中距的空间分布  
一级、二级块体边界引自张国民等<sup>[9]</sup>

究报告》<sup>[1]</sup>，从行政区域看，汶川地震前，前兆异常主要分布于四川、云南、甘肃、陕西、青海等省，从构造块体看，前兆异常主要分布于块体边界，如震源附近的异常主要分布于巴颜喀拉二级块体与华南一级块体交会的龙门山地震带；川滇地区的异常主要分布于川滇菱形二级块体及周边；西北地区的异常主要分布于华北、华南、青藏、西域四个一级块体的交会区域。

表 1 给出了前兆异常以破裂中心为圆心和以余震区为椭圆中心线的震中距、异常开始时间以及异常位置等参数。统计显示，以破裂中心为圆心统计圆形震中距 600 km 范围内的

表 1 汶川地震前的前兆异常位置、异常开始时间以及震中距等参数

学科	台站	测项	异常 开始时间 (年-月)	圆形	椭圆形	学科	台站	测项	异常 开始时间 (年-月)	圆形	椭圆形
				震中距 /km	震中距 /km					震中距 /km	震中距 /km
电 磁	成都	地电阻率 NE	2005-05	123	39	流 体	上王	气汞	2008-03	385	218
	甘孜	地电阻率 NE	2006-02	411	311		水富	水位	2007-01	366	283
	甘孜	地电阻率 NS/NW	2006-08	411	311		天水花牛	水氡	2000-01	332	183
	兰州	地电阻率 NS	2003-11	469	385		武都殿沟	水氡	2006-01	174	73
	冕宁	地电阻率 NS/NW	2003-02	429	285		武山 1 号泉	水氡	2003-01	321	193
	乾陵	地电阻率 NS	2007-08	503	335		武山 22 井	水氡	2003-01	321	178
	天水	地电阻率 NS	2008-03	322	172		西昌	水氡	2003-10	494	356
	通渭	地电阻率	2007-10	378	252		西和	水氡	2007-09	253	122
	武都	地电阻率 EW	2008-03	174	74		乡城	水温	2008-04	554	402
	西昌	地电阻率 EW	2008-01	489	350		小金	水位	2007-04	213	79
流 体	巴塘	水温	2008-04	541	404	昭觉	CO <sub>2</sub>	2005-01	457	327	
	布拖	CO <sub>2</sub>	2005-01	523	396	安顺	水准 BA	2006-01	351	203	
	德阳	水位	2007-01	70	58	宕昌	洞体应变	2008-03	235	163	
	甘孜	水温	2007-10	411	311	道孚	水准 NS	2006-01	324	198	
	拱背	水氡	2003-01	110	108	德阳	倾斜	2008-04	70	58	
	姑咱	水氡	2007-10	335	184	东川	地倾斜	2004-01	635	518	
	贵德	水氡	2006-01	534	513	格蒨	水准 AB/AC	2006-10	363	260	
	湟源	水氡	2007-04	590	556	姑咱	倾斜 NS/EW	2006-07	306	153	
	会东	CO <sub>2</sub>	2005-04	609	480	姑咱	伸缩 NS/EW	2007-06	306	153	
	会理	水位	2007-07	659	525	泾阳	水准	2008-02	511	345	
流 体	会泽	水位	2006-01	618	502	康定	倾斜	2008-02	306	153	
	康定龙头沟	水温	2008-03	312	159	兰州	伸缩	2008-01	470	388	
	康定龙头沟	水质	2008-01	312	159	老乾宁	水准 3-1/3-5	2005-01	310	169	
	理塘	水温	2008-03	446	303	乐都	倾斜 EW	2008-05	549	491	
	理县	水氡	2007-11	659	525	龙灯坝	蠕变基线	2007-10	342	195	
	丽江	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2006-05	657	509	马兰山	倾斜	2007-12	684	543	
	丽江	水温	2007-09	657	509	茂县	倾斜	2006-12	62	16	
	临潼	气体总量	2007-11	537	373	冕宁	水准 3-1	1996-10	424	280	
	临潼	氦	2007-01	537	373	蒲江	水准 2-1	2006-04	206	89	
	泸州	水位	2006-09	350	316	乾县	倾斜	2006-02	468	301	
体	勉县	水氡	2008-04	256	103	汤家坪	短水准	2005-10	565	438	
	木里	CO <sub>2</sub>	2005-01	553	402	天水	压磁应力	2003-11	334	185	
	攀枝花	水位	2005-01	653	514	汶川	倾斜	2006-12	126	24	
	平凉附件厂	水氡	2007-01	473	317	武都	应变 EW/NW	2005-05	176	82	
	蒲江	水位	2006-12	203	78	雅安	倾斜 NS	2007-05	229	86	
	普格	CO <sub>2</sub>	2004-01	533	401	永胜	基线 3-2	2006-01	675	528	
	清水温泉	水氡	2006-01	357	204	永胜	水准 1-4	2004-01	675	528	

内的前兆异常共 63 项前兆异常, 其中形变异常 22 项, 流体异常 31 项, 电磁异常 10 项; 1 年以上的异常 39 项, 1 年至 3 个月的中短期异常 13 项, 3 个月内的短临异常 11 项。

以余震区为椭圆中心线统计椭圆形震中距 600 km 范围内的前兆异常共 74 项前兆异常, 其中形变异常 26 项, 流体异常 38 项, 电磁异常 10 项; 1 年以上的异常 46 项, 1 年至 3 个月的中短期异常 17 项, 3 个月内的短临异常 11 项。

可见, 在相同的震中距下, 由于椭圆形震中距覆盖面积更大, 所以其统计的前兆异常数量要多一些。

## 2 异常测项比随震中距的变化

由于前兆异常的空间分布不均匀性受前兆观测点的约束, 为了刻画前兆异常随震中距的关系, 定义前兆的异常测项数与背景测项数之比为异常测项比。表 2 和表 3 分别为以破裂中心为圆心和以余震区为椭圆中心线两种统计方式下每 100 km 震中距范围内前兆的异常测项数、背景测项数及异常测项比。

表 2 以破裂中心为圆心统计的每 100 km 范围内前兆异常数、背景测项数及异常测项比

距离/km	异常测项数/个	背景测项数/个	异常测项比/%
0~99	3	8	37.5
100~199	6	22	27.3
200~299	7	35	20.0
300~399	21	44	47.7
400~499	13	102	12.7
500~599	13	81	16.0
600~699	15	92	16.3
700~799	3	95	3.2
800~899	17	81	21.0
900~999	8	92	8.7
1000~1099	11	90	12.2
1100~1199	8	106	7.5
1200~1299	11	75	14.7
1300~1399	9	162	5.6
1400~1499	13	164	7.9

表 3 以余震区为椭圆中心线统计的每 100 km 范围内前兆异常数、背景测项数及异常测项比

距离/km	异常测项数/个	背景测项数/个	异常测项比/%
0~99	12	28	42.9
100~199	18	52	34.6
200~299	8	43	18.6
300~399	17	105	16.2
400~499	7	55	12.7
500~599	12	112	10.7
600~699	14	108	13.0
700~799	12	70	17.1
800~899	12	93	12.9
900~999	7	91	7.7
1000~1099	8	111	7.2
1100~1199	8	95	8.4
1200~1299	19	218	8.7
1300~1399	4	60	6.7
1400~1499	5	116	4.3

由表 2 和图 2(a)可见, 在第一种统计方式下, 震中距 400 km 范围内, 异常测项比大于 25%, 而震中距 400~900 km 地区的异常测项比在 17%~24%左右, 震中距超过 900 km 地区的异常测项比在 17%或以下。分析震中距每 100 km 范围内的异常测项比(表 2 和图 2b)可见, 异常测项比高值地区在震中距 400 km 以内, 其次是在震中距 400~900 km 地区。

由表 3 和图 3(a)可知, 在第二种统计方式下, 随着震中距的增加, 异常测项比递减, 在震中距 300 km 范围内, 异常测项比大于 30%, 而震中距 300~600 km 地区的异常测项比在 18%~24%左右, 震中距超过 600 km 地区的异常测项比在 17%以下。分析震中距每 100 km 范围内的异常测项比(表 3 和图 3b)可见, 异常测项比高值地区在震中距 200 km 以内, 异常测项比大于 30%; 而 200~400 km 区域属于次高值地区; 在震中距 400~900 km 地区测项比值存在一个高低起伏过程。

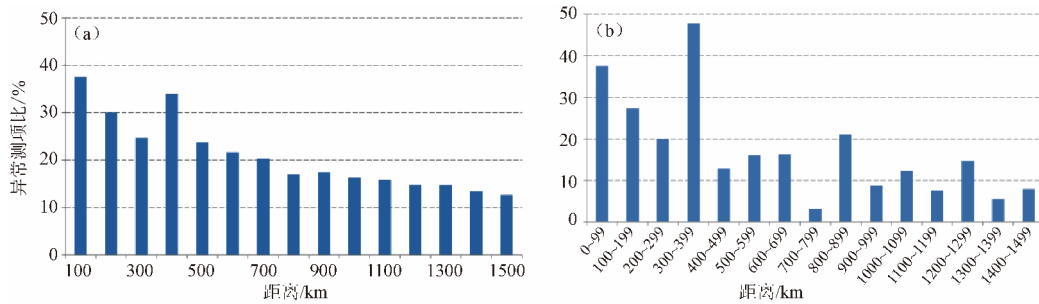


图2 以破裂中心为圆心统计的不同震中距的异常测项比

(a) 每增加 100 km 范围内的异常测项比; (b) 每 100 km 范围内的异常测项比

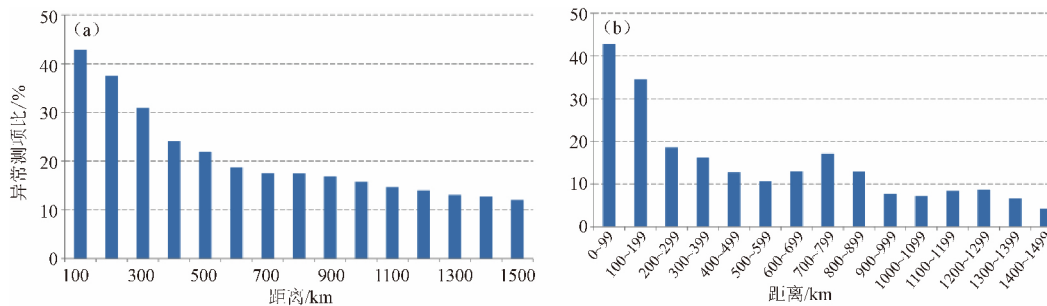


图3 以余震区为椭圆中心线统计的不同震中距的异常测项比

(a) 每增加 100 km 范围内的异常测项比; (b) 每 100 km 范围内的异常测项比

由以上可以看出,虽然两种统计方式不同,测项比数值略有差异,但趋势相同。最大差异是异常测项比最高区域为以余震区为椭圆中心线统计的椭圆形震中距 300 km 范围和以破裂中心为圆心统计的圆形震中距 400 km 范围。由于汶川地震的震源区尺度为 300~325 km,即震源区半径为 150~160 km,因此,定义震源尺度 2 倍左右以内区域(即震中距 300~400 km 以内)为近源区;震源尺度超过 2 倍区域(即震中距大于 400 km 范围)为远源区。

汶川地震前,近源区是异常测项比最高区域(异常测项比大于 25%),而远源区中震源尺度 2~5 倍区域(即震中距 400~900 km 范围)的异常测项比次之(异常测项比为 17%~24%)。

### 3 异常数量和测项比随时间的变化

分别以破裂中心为圆心和以余震区为椭圆中心线的震中距 300 km、400 km、500 km、600 km、800 km、1000 km 为统计范围,1 年为窗长,半年为步长,计算前兆异常数量和测项比随时间的变化。

两种统计方式下,从不同震中距的异常数量看,异常数量随震中距的增大而逐渐增加。但从异常数量随时间的变化可见,不同震中距范围内的异常数量在不同时间段的变化具有一定差异性,如在 2006 年下半年后(即震前 2 年)异常数量逐渐增加,在汶川地震前半年,不同震中距范围内的异常数量均显著增加(图 4)。

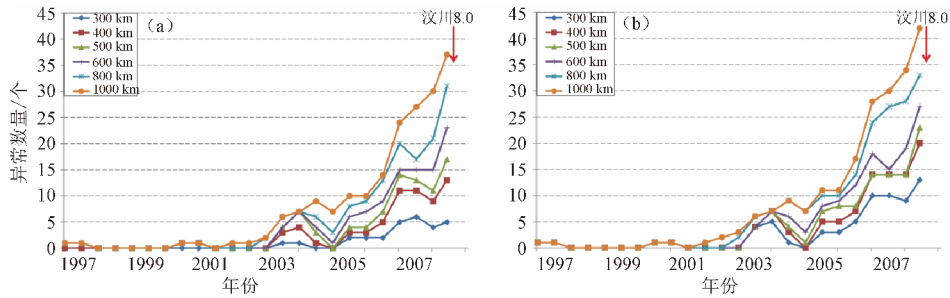


图 4 不同震中距的异常数量随时间的变化

(a) 以破裂中心为圆心的圆形震中距；(b) 以余震区为椭圆中心线的椭圆形震中距

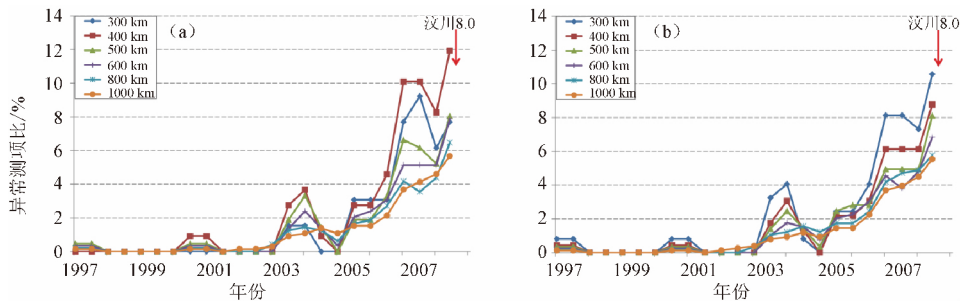


图 5 不同震中距的异常测项比随时间的变化

(a) 以破裂中心为圆心的圆形震中距；(b) 以余震区为椭圆中心线的椭圆形震中距

从异常测项比随时间的变化可见，在 2003 年下半年至 2004 年上半年震中距 800 km 范围内的异常测项比均有一个高值过程（最大测项比为 4% 左右）。之后，在 2005 年下半年开始，不同震中距范围的异常测项比开始逐渐增加，在 2006 年下半年之后显著增大。在汶川地震前半年不同震中距范围内的异常测项比存在一个急剧增大过程（图 5）。

不同之处在于异常测项比最高值区域不同，即以破裂中心为圆心的圆形震中距 400 km 和以余震区为椭圆中心线的椭圆形震中距 300 km 范围为异常测项比最高值区。

总之，汶川地震前 2 年（2006 年下半年后）异常数量逐渐增多和异常测项比逐渐增大。在汶川地震前半年不同震中距内的异常测项比存在一个急剧增大过程。异常测项比最高值区为以破裂中心为圆心的圆形震中距 400 km 和以余震区为椭圆中心线的椭圆形震中距 300 km 范围。

## 4 异常时空演化过程

### 4.1 以破裂中心为圆心的异常时空演化

图 6 给出了汶川地震前异常开始时间 ( $t$ ) 随圆形震中距 ( $d$ ) 变化的  $d-t$  图。前兆异常的时空演化存在三个阶段过程， $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  阶段均表示为前兆异常从震中向外围扩展的过程，异常出现的时间主要集中在震前 700~3000 d，即远源区与近源区的前兆均存在向外扩展的特点。 $\beta$  阶段表现为前兆分布在大范围地区，异常主要出现在震前 300~700 d，无论震中距远近区域均出现异常。 $\gamma$  阶段的异常可分为  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  两部分，异常主要出现在震前 300 d 内。 $\gamma_1$  阶段表示前兆异常从震中外围向震中区收缩的过程，而  $\gamma_2$  阶段表示前兆异常

从震中区向外围地区扩展的过程,即远源区的异常向震中收缩过程( $\gamma_1$ )和近源区的异常向外扩展过程( $\gamma_2$ )。

从异常三个阶段的空分布来看, $\alpha_1$ 阶段异常出现在震中附近,震中距小于300 km,且异常数量较少。 $\alpha_2$ 阶段的异常集中在距震中300 km以外的区域,异常数量较多且主要分布在龙门山断裂带以外的西南地区和西北地区。 $\beta$ 阶段的异常分布距震中600 km的范围内,其中震中西南部的异常震中距主要在400 km范围内,而西北地区的异常集中在震中距500~600 km范围。 $\gamma_1$ 阶段的异常主要集中在震中距200~500 km范围, $\gamma_2$ 阶段的异常以流体为主,震中距在200 km以外地区(图7)。

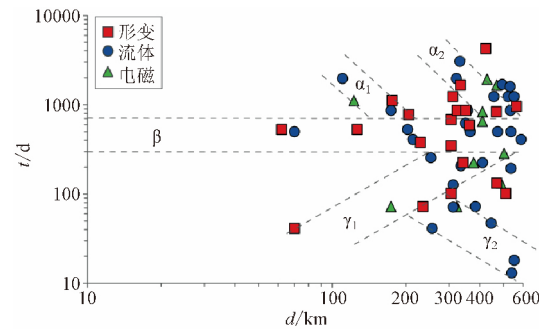


图6 汶川地震前异常开始时间随圆形震中距的三阶段变化图像

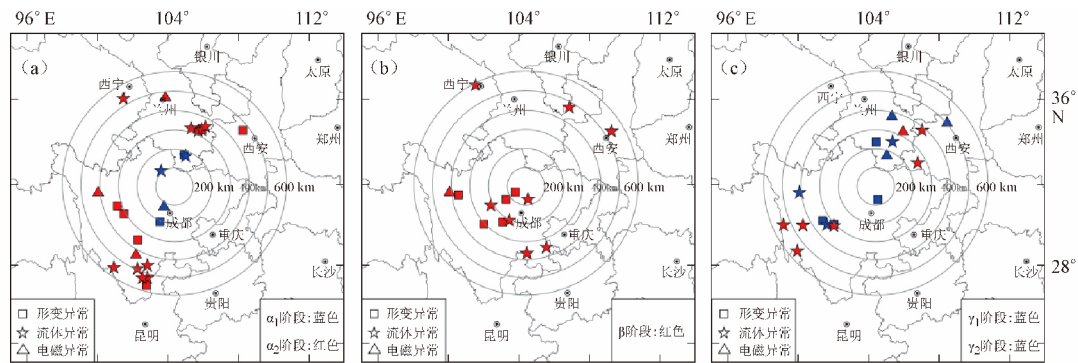


图7 以破裂中心为圆心的三阶段前兆异常空间分布

(a)  $\alpha$ 阶段(震前700~3000 d); (b)  $\beta$ 阶段(震前300~700 d); (c)  $\gamma$ 阶段(震前300 d)

#### 4.2 以余震区为椭圆中心线的异常时空演化

以余震区为椭圆中心线确定的椭圆形震中距,作出汶川地震前异常开始时间( $t$ )随椭圆形震中距( $d$ )变化图像,前兆异常的时空演化仍然存在三个阶段过程: $\alpha$ 阶段前兆异常从震中向外围扩展,异常出现时间集中在震前1000 d之前; $\beta$ 阶段出现大范围异常,异常集中出现在震前500~1000 d; $\gamma$ 阶段( $\gamma_1$ 和 $\gamma_2$ )表现为远源区的异常向震中收缩的过程( $\gamma_1$ )和近源区的异常向外扩展的过程( $\gamma_2$ ),异常集中出现在震前500 d内(图8)。

以余震区为椭圆中心线确定的震中距计算的异常三个阶段的空分布来看, $\alpha$ 阶段出现异常较少,主要分布在余震区的西南部; $\beta$ 阶段出现较大范围异常,异常

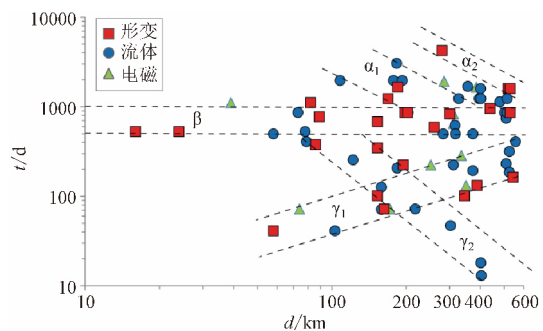


图8 汶川地震前异常开始时间随椭圆形震中距的三阶段变化图像



主要分布在余震区的南部； $\gamma$  阶段出现异常分布范围最大，异常主要分布在余震区的西南部和东北部(图 9)。

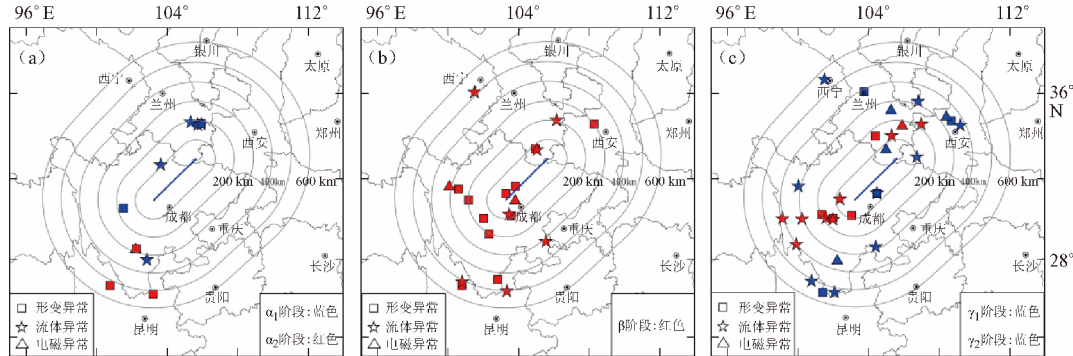


图 9 以余震区为椭圆中心线确定的三阶段前兆异常空间分布

(a)  $\alpha$  阶段(震前 1000~4000 d); (b)  $\beta$  阶段(震前 500~1000 d); (c)  $\gamma$  阶段(震前 500 d)

分别以破裂中心为圆心和以余震区为椭圆中心线确定的圆形震中距和椭圆形震中距确定出前兆异常的时空演化均存在三个阶段的不同变化过程，但也存在一定差异，如以圆形震中距确定的三个阶段形成时间晚于椭圆形震中距确定的三个阶段；在以圆形震中距确定的三个阶段变化中，在 300 km 左右存在明显的近源区和远源区的分界线，而在椭圆形震中距确定的三个阶段变化中这一分界线不明显。从两种方式确定的异常三阶段变化图像看，以破裂中心为圆心确定的异常三阶段变化更明显。

## 5 前兆异常的时空演化过程的力学解释

### 5.1 前兆异常三阶段变化的力学解释

为了解释地震前兆三阶段的物理实质，冯德益<sup>[10]</sup>提出前兆发生的三个阶段可以与地震孕育的三个阶段联系。 $\alpha$  阶段反映微破裂的发生、发展和串通。 $\beta$  阶段的前兆成因除了断层预滑外，还有其他因素，如大气压的突然变化。温度突变也可在较大范围内许多观测点引起突变异常。王新华等<sup>[11]</sup>认为前兆由震中向外围扩展是由裂纹的亚临界扩展所致。宋治平等<sup>[12]</sup>通过对三维流变介质包体模型的理论研究表明，硬包体作为孕震体，在地表产生的体应变具有三阶段特征，其中  $\alpha$  阶段为向外围扩散特征，包括近源区和远源区的 2 个前兆异常均向外围扩展的过程； $\beta$  阶段为体应变极值区，即大范围出现前兆异常； $\gamma$  阶段包含两个过程，即  $\gamma_1$  表示远源区的前兆异常向震中区收缩的特征， $\gamma_2$  为近源区的前兆异常向外围扩散的特征。许昭永等<sup>[13]</sup>给出了在常应力加载的情况下，三维介质中嵌入硬包体的岩石破裂实验的应变场的演变过程认为，地震孕育过程中存在三个阶段的变化过程。虽然实验结果与理论结果的条件并不完全相同，但两者确实存在一定的相似性。

尽管在冯德益<sup>[10]</sup>所给出的 1976 年唐山地震前兆异常的三阶段异常特征结果中没有近源区短期阶段的向外扩散过程( $\gamma_2$  阶段)，但在唐山地震前确有报道，说明其存在。例如，李宣瑚<sup>[14]</sup>与郑治真<sup>[15]</sup>的研究表明，在唐山地震前半年，水氡和水位异常均存在向外扩散过程。在龙陵、松潘地震前半年也存在这一特征<sup>[16]</sup>。宋治平等<sup>[17]</sup>据不同震级的地震前的地震前兆与张北地震前的形变异常的研究表明， $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  三阶段表现明显，特别是  $\gamma$  阶段



(相当于地震短临阶段)的前兆从外围向震中的收缩性( $\gamma_1$ )和从震中向外围的扩散性( $\gamma_2$ )特征均存在。从本文分析得到的汶川地震前的前兆特征(图6和图8),也符合这一规律。可见地震孕育过程中前兆异常的三阶段特征可能是受孕震体的控制,是孕震过程中的表现,它可能是一个普遍性的规律。

## 5.2 地震活动增强区和异常测项比集中区的力学分析

异常测项比最高区域为以余震区为椭圆中心线统计的椭圆形震中距 300 km 范围和以破裂中心为圆心统计的圆形震中距 400 km 范围。分析认为,汶川地震前,近源区(震源尺度 2 倍左右区域)是异常测项比最高区域(异常测项比大于 25%),而远源区中震源尺度 2~5 倍区域(即震中距 400~900 km 范围)的异常测项比次之(异常测项比为 17%~24%)。

另外,在汶川地震前存在 5 级地震活动增强区(也称为地震活动环形分布,包括 5 级背景空区)(图 10),环形分布的外边界由 5.5 级以上地震确定,长轴为 1300 km 左右,而内边界由 5 级地震确定即 5 级地震背景空区,其长轴为 640 km 左右,由于汶川地震的余震区长轴为 325 km 左右,即 5 级地震空区尺度为震源尺度的 2 倍左右,地震活动增强区的尺度为震源尺度的 4 倍左右。

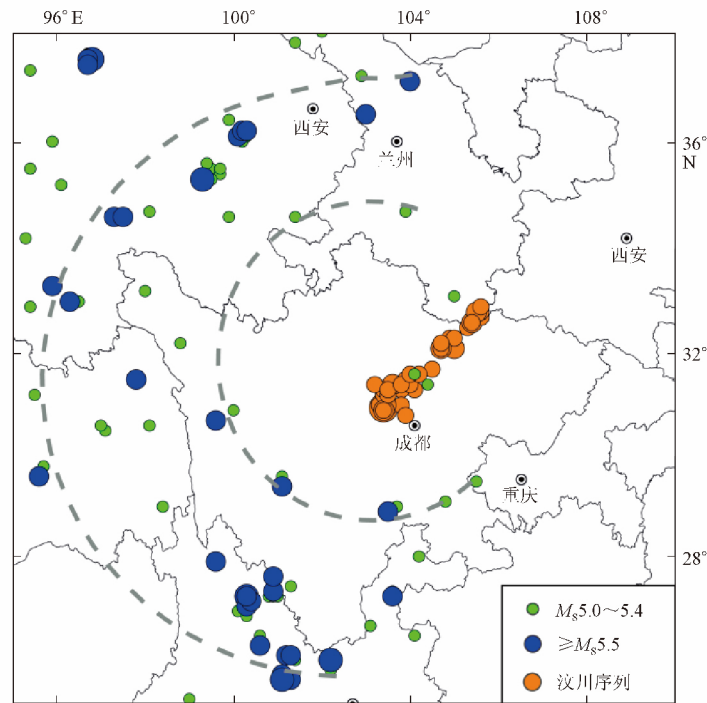


图 10 汶川地震前 5 级以上地震活动增强区(1991 年 3 月 1 日至 2008 年 5 月 11 日)

除此之外,宋治平等<sup>[17]</sup>的二维圆形包体理论研究表明,在均匀场中存在的包体能产生包体尺度 3~5 倍近似椭圆形的扰动区。宋治平等<sup>[12]</sup>的三维流变介质包体模型理论研究表明,震源 2 倍尺度区域(近源区)是体应变变化量最大区域;震源 3~5 倍区域为远源区中体应变的高值区。中国大陆  $M \geq 7.0$  地震前地震活动增强区尺度与震源尺度之比约为 3~5 倍<sup>[17]</sup>。研究表明汶川地震前的前兆异常测项比高区的尺度和地震活动增强区的尺度与理

论计算结果基本一致。

## 6 结论

通过对汶川地震前的前兆异常时空演化过程分析,得到以下几点结论:

(1) 由于汶川地震的震源区半径为 150~160 km,定义震源尺度 2 倍左右区域(即震中距 300~400 km 以内)为近源区;震源尺度超过 2 倍区域(即震中距大于 400 km 范围)为远源区。研究表明,汶川地震前,近源区是异常测项比最高区域,而远源区中震源尺度 2~5 倍区域(即震中距 400~900 km 范围)的异常测项比次之。汶川地震前 5 级地震活动增强区和 5 级地震空区尺度分别为震源尺度的 2 倍和 4 倍左右。这一特点与理论计算结果基本一致。

(2) 汶川地震前 2 年左右(即 2006 年)前兆异常逐渐增多,近源区异常测项比在 2006 年下半年后(即汶川地震前 2 年)明显高于远源区的异常测项比,表明近源区的异常较显著。

(3) 分别以汶川地震破裂中心为圆心和以余震区椭圆中心线为中心,分析汶川地震前的前兆异常时空演化均存在三个阶段的不同变化过程,分析认为,以破裂中心为圆心确定的异常三阶段变化特征更明显,即  $\alpha$  阶段(包括  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ ,震前 700~3000 d)的异常主要分布在余震区以外的西南地区和西北地区,表现为远源区与近源区的前兆均存在向外扩展的特点; $\beta$  阶段(震前 300~700 d)的异常分布在余震区西南部和北部地区,表现为大范围出现异常; $\gamma$  阶段(包括  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$ ,震前 300 d 内)的异常分布范围最大,异常主要分布在余震区的西南部和东北部,表现为远源区的异常向震中收缩的过程( $\gamma_1$ )和近源区的异常向外扩展的过程( $\gamma_2$ )。通过对地震孕育过程的实验研究和力学分析,表明地震孕育过程中前兆异常的三阶段特征可能受孕震体的控制,是孕震过程中的表现,是一个地震孕育过程中普遍性特点。

地震孕育过程中的三阶段特征在震例研究中具有一定普遍性,简单的岩石实验和力学模型理论结果只能说明简单的道理,并不能一一对应解释一次地震孕育的复杂过程,如汶川地震。如果能按照实际观测资料,设计三维模型,参数设定接近实际,应用三维体源孕震理论,既考虑场又考虑源,对汶川地震的孕育过程进行模拟,可能对实际观测的异常得到一些合理的解释。

地震孕育过程中的三阶段特征对地震预测具有一定指导作用。如在分析前兆异常演化过程中,如果了解地震孕育过程的三阶段特点,有助于把握地震孕育过程所处的状态,特别是  $\gamma$  阶段中前兆异常向震中收缩过程( $\gamma_1$ )对地震地点预测和时间把握具有较好的指导意义。

感谢中国地震台网中心的马玉川、于晨、岳冲为本研究在整理前兆异常数据方面提供的帮助。

### 参考文献:

- [1] 中国地震局监测预报司编. 汶川 8.0 级地震科学研究报告[M]. 北京:地震出版社,2009.
- [2] 张学民,李美,关华平. 汶川 8.0 级地震前的地电阻率异常分析[J]. 地震,2009,29(1):108-115.

- [3] 张燕, 吴云, 吕品姬. 汶川 8.0 级地震前定点形变异常特征[J]. 地震学报, 2009, 31(2): 153-159.
- [4] 陆明勇, 房宗绯, 赵丽葵. 汶川 8.0 级地震前地下流体长趋势变化特征讨论[J]. 地震, 2010, 30(1): 61-71.
- [5] 程万正, 官致君, 苏琴, 等. 汶川  $M_s$ 8.0 地震前四川地区前兆异常及其统计分析[J]. 地震学报, 2011, 33(3): 304-318.
- [6] 付虹, 赵小艳. 汶川  $M_s$ 8.0 地震前云南地区显著前兆观测异常分析[J]. 地震学报, 2013, 35(4): 477-484.
- [7] 陈运泰, 许力生, 张勇, 等. 2008 年 5 月 12 日汶川特大地震震源特性分析报告[R]. <http://www.csi.ac.cn/Sichuan/chenyuntai.pdf>.
- [8] 赵翠萍, 郑勇. 汶川 8.0 级地震震源参数及破裂特征[J]//中国地震局监测预报司编. 汶川 8.0 级地震科学研究报告[M]. 北京: 地震出版社, 2009.
- [9] 张国民, 马宏生, 王辉, 等. 中国大陆活动地块与强震活动关系[J]. 中国科学(D 辑), 2004, 34(7): 591-599.
- [10] 冯德益. 地震前兆三阶段发展过程的观测结果与理论(英文)[J]. 地震研究, 1983, 6(2): 211-226.
- [11] 王新华, 祁贵仲, 赵玉林. 断层失稳前的扩展及电阻率前兆[J]. 中国科学(B 辑), 1984, 11: 1026-1038.
- [12] 宋治平, 尹祥础, 梅世蓉. 包体流变模型体应变场时空演变的理论分析[J]. 地震学报, 2000, 22(5): 491-500.
- [13] 许昭永, 王彬, 赵晋明, 等. 含硬包体试样破裂特征的实验研究[J]. 地震学报, 1997, 19(1): 79-85.
- [14] 李宣瑚. 水氧异常的扩散—收缩现象[J]. 地震, 1981, 5: 340-357.
- [15] 郑治真. 根据地下水资料的数字滤波探讨唐山大地震的孕育过程[J]. 地球物理学报, 1979, 22(3): 267-280.
- [16] 梅世蓉, 冯德益, 张国民, 等. 中国地震预报概论[M]. 北京: 地震出版社, 1993.
- [17] 宋治平, 薛艳. 华北中强地震前兆特征研究[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2009.

## Temporal and Spatial Evolution of Precursory Anomalies of the 2008 Wenchuan $M_s$ 8.0 Earthquake and Mechanical Analysis

ZHANG Xiao-tao, LIU Jie, SONG Zhi-ping, XUE Yan,  
ZHANG Yong-xian, YAN Rui, YUAN Zheng-yi  
(China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

**Abstract:** In order to study the spatio-temporal evolution of the precursory anomalies 10 years before the 2008 Wenchuan  $M_s$ 8.0 earthquake, the epicentral distance of the precursory anomalies is calculated by using the geometric center of the rupture region and the elliptical centerline of the aftershock region. The result shows that precursor anomalies gradually increase about 2 years before the Wenchuan earthquake. The ratio of abnormal

items is greater than 25% in the near the source area (about 2 times the source scale). The ratio of abnormal items is 17~24% (about 3~5 times the source scale) in the remote area. There are three different stages of spatio-temporal evolution of precursory anomalies: during the  $\alpha$  stage (including  $\alpha_1$  and  $\alpha_2$ , 700 to 3000 days before the main earthquake) the anomalies are mainly distributed in the southwest and the northwest area of the Wenchuan aftershocks area. It is shown that the precursors of the far source region and the near source area have the characteristics of outward expansion. During the  $\beta$  stage (300 to 700 days before the main earthquake), the anomalies are distributed in the southwest and northern regions of the aftershock region, showing a large range of anomalies. During the  $\gamma$  stage (Including  $\gamma_1$  and  $\gamma_2$ , 300 days before the main earthquake), the range of anomaly distribution is wide, and the anomalies are distributed in the Southwest and Northeast of the aftershock area. The anomalies contract to the epicenter ( $\gamma_1$ ) in the far source region and extend outward ( $\gamma_2$ ) in the near source region. Through the experimental study and mechanical analysis of earthquake preparation process, the results indicate that the three-stage characteristics of precursory anomalies in the process of earthquake preparation may be controlled by the seismogenic body, which is a form of expression in the process of earthquake preparation and a universal feature during the earthquake preparation process.

**Key words:** The 2008 Wenchuan  $M_s8.0$  earthquake; Precursory anomaly; Spatio-temporal Evolution