

刘洁,季灵运,石富强,等. 2025. 中国大陆强震前地球物理场观测异常特征分析[J]. 地震研究, 48(2): 300–311, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0032.

Liu J, Ji L Y, Shi F Q, et al. 2025. Characterization of the observed geophysical anomalies prior to strong earthquakes in Chinese Mainland[J]. *Journal of Seismological Research*, 48(2): 300–311, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0032.

中国大陆强震前地球物理场观测异常特征分析*

刘洁^{1,2}, 季灵运^{3*}, 石富强^{1,3}, 呼楠^{1,2}, 祁玉萍⁴, 王光明⁵, 张丽峰⁶, 郭蕾⁷, 姜佳佳⁸

(1. 陕西省地震局, 陕西 西安 710068; 2. 陕西西安地球深部构造中国地震局野外科学观测研究站, 陕西 西安 710068;
3. 中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054; 4. 四川省地震局, 四川 成都 610041;
5. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 6. 青海省地震局, 青海 西宁 810001;
7. 河北省地震局, 河北 石家庄 050021; 8. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 050021)

摘要: 为寻求强震震前异常特征及规律, 梳理 1966—2017 年中国大陆西部 $M_s \geq 7.0$ 地震和东部 $M_s \geq 6.0$ 地震的震前异常数量和特征, 发现这 33 次强震前共有 975 项地球物理场观测异常。其中, 地下流体异常 435 项、电磁异常 153 项、形变异常 282 项、其他异常 105 项。地下流体异常以水氡、水位和水温为主, 电磁异常以地电阻率和地磁为主, 形变异常以倾斜、水准和体应变为主。分析结果表明: ① 震前各项异常呈现明显的阶段性, 中长期阶段以趋势类异常为主, 短临期阶段以突变类异常为主。② 不同地区内的地震震前异常数量和特征存在差异, 在短临阶段, 南北地震带中北段以流体和形变为主; 南北地震带南段以地下流体水化为主; 青藏地块内部以流体和电磁为主, 数量呈“持续增长”; 华北地块北缘以流体和电磁为主, 数量呈“先增后减”; 华南地块周缘以地球物理场异常的准同步特征为主。③ 结合典型异常的机理, 对长中短临各个阶段的演化模式进行了综合讨论。以水位、地电阻率和变形速度为例, 认为其各个阶段的演化特征符合亚失稳模型中应力条件发生改变的过程。

关键词: 大陆强震; 地球物理场; 时空特征; 演化模式

中图分类号: P315.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2025)02-0300-12

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0032

0 引言

中国历史地震资料中所记载的地震前后的异常现象有 1 160 条之多(刘耀炜, 2006)。国际地震学与地球内部物理学联合会在 1997 年对 37 项震前异常(前震、水氡和水温等)进行了系统评价(Wyss, 1997), 其不同阶段所呈现出来的差异性特征备受关注。近 60 年来, 我国地球物理场观测已积累了海量数据和资料, 包含但不限于地下流体、定点形变、地电地磁、跨断层形变和流动重力等测项。《中国震例》记录了 1966 年以来中国大陆及近海发生的显著地震的地质背景、地震参数

及各项震前异常(张肇诚, 1988, 1990a, b, 1999, 2000; 陈棋福, 2002a, b, 2003, 2008; 蒋海昆, 2014, 2018a, b)。特别针对每次地震前出现的测震学异常和地球物理场观测异常, 进行了系统的梳理和总结, 对后续地震预测预报工作提供了丰富的参考资料。前人基于《中国震例》对各类震前异常进行了分析统计(解滔, 卢军, 2023; 呼楠等, 2024), 总结了很多先进经验。在此基础上, 本文拟基于 1966—2017 年已出版的《中国震例》和尚未出版但已形成正式报告的震例, 以及部分已发表的文献(晏锐等, 2018; 薛艳等, 2022), 系统梳理 1966—2017 年中国大陆 33 次强震前的地球物理场观测异常时空演化特征; 分区域进行针对性

* 收稿日期: 2024-06-28.

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划项目(XH23039YA); 2024 年度震情跟踪定向工作任务(2024010311); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2024JC-YBMS-210, 2022JQ-254, 2023-JC-QN-0332).

第一作者简介: 刘洁(1989-), 副研究员, 主要从事地震预测预报研究工作. E-mail: muzixiulj_89@163.com.

通信作者简介: 季灵运(1982-), 研究员, 主要从事地壳形变与大震预测研究工作. E-mail: dinsar010@163.com.

分析，并对可能形成此类异常的机理进行讨论。

1 中国大陆强震前地球物理场观测异常特征统计

对《中国震例》中记载的 1966—2017 年中国大陆西部 $M_s \geq 7.0$ (107°E 以西) 和东部 $M_s \geq 6.0$ (107°E 以东) 共计 33 次强震 (表 1、图 1) 进行梳理，其中 $M_s 6.0 \sim 6.9$ 地震 12 次， $M_s 7.0 \sim 7.9$ 地震 19 次， $M_s 8.0 \sim 8.9$ 地震 2 次。所涉及的地球

物理场观测异常以地下流体 (435 项)、电磁 (153 项) 和形变 (282 项) 为主，还存在少量重力、海平面和宏观等其他异常 (合计 105 项)。其中：①地下流体以水氡、水位、水温为主。1966—1990 年地震以宏观异常为主，2000—2010 年增加了较多化学离子测项，2010 年以后添加了新测项，如断层气，不过震例较少。②电磁以地电阻率和地磁为主，且集中在中期、短期和短临时期出现。③形变以倾斜、水准和体应变为主。④其他主要为宏观异常。

表 1 本文统计的中国大陆强震基础信息
Tab. 1 Basic information of the strong earthquakes in Chinese Mainland selected in this study

序号	发震日期	震中位置		M_s	震源深度/km	发震地点	震源机制
		$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$				
1	1966-03-22	37.53	115.05	7.2	9	河北邢台	走滑
2	1967-03-27	38.50	116.50	6.3	30	河北河间	走滑
3	1969-07-26	21.75	111.75	6.4	5	广东阳江	走滑
4	1970-01-05	24.10	102.60	7.8	13	云南通海	走滑
5	1973-02-06	31.50	100.40	7.6	17	四川炉霍	走滑
6	1974-05-11	28.10	104.00	7.1	14	云南大关	走滑
7	1975-02-04	40.70	122.80	7.3	16	辽宁海城	走滑
8	1976-04-06	40.20	112.10	6.2	18	内蒙古和林格尔	走滑
9	1976-05-29	24.55	98.75	7.3、7.4	21	云南龙陵	走滑
10	1976-07-28	39.60	118.20	7.8	11	河北唐山	走滑
11	1976-08-16	32.70	104.08	7.2	15	四川松潘	逆冲兼走滑
12	1976-09-23	40.00	106.35	6.2	35	内蒙古巴音木仁	走滑
13	1977-05-12	39.20	117.70	6.3	19	天津宁河	走滑
14	1979-07-09	31.50	119.30	6.0	12	江苏溧阳	走滑
15	1979-08-25	41.23	108.11	6.0	30	内蒙古五原	走滑
16	1984-05-21	32.70	121.60	6.2	17	江苏南黄海	走滑
17	1985-08-23	39.58	75.60	7.4	7	新疆乌恰	逆冲兼走滑
18	1988-11-06	22.83	99.72	7.2、7.6	13	云南澜沧—耿马	走滑
19	1989-10-19	39.94	113.84	6.1	14	山西大同—阳高	正断兼走滑
20	1990-04-26	36.12	100.13	7.0	32	青海共和	逆冲兼走滑
21	1994-12-31	20.52	109.32	6.1	7	北部湾	正断兼走滑
22	1995-07-12	21.98	99.07	7.3	10	云南孟连西	走滑
23	1996-02-03	27.30	100.22	7.0	10	云南丽江	正断
24	1996-05-03	40.83	109.62	6.4	20	内蒙古包头	走滑
25	1996-11-19	35.43	78.35	7.1	16	新疆和田	走滑
26	1998-01-10	41.10	114.30	6.2	10	河北张北	走滑兼逆冲
27	2001-11-14	35.93	90.53	8.1	10	青海昆仑山西口	走滑
28	2008-03-21	35.80	81.43	7.3	33	新疆于田	走滑
29	2008-05-12	31.00	103.40	8.0	14	四川汶川	逆冲
30	2010-04-14	33.10	96.70	7.1	33	青海玉树	走滑
31	2013-04-20	30.30	103.00	7.0	13	四川芦山	逆冲
32	2014-02-12	36.10	82.50	7.3	12	新疆于田	走滑
33	2017-08-08	33.20	103.82	7.0	20	四川九寨沟	走滑

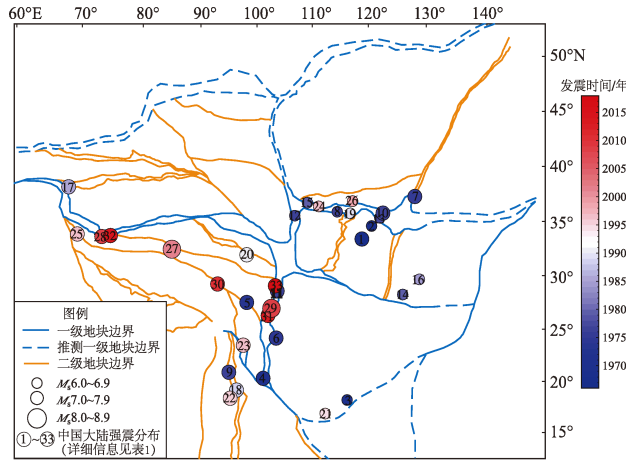


图1 中国大陆西部 $M_s \geq 7.0$ 和东部 $M_s \geq 6.0$ 强震分布
 (图中地块边界修改自张培震等, 2003)

Fig. 1 Distribution of the strong earthquakes ($M_s \geq 7.0$) in the western part and the earthquakes ($M_s \geq 6.0$) in the eastern part of Chinese Mainland (the blocks' boundary was modified according to Zhang *et al.*, 2003)

1.1 中国大陆西部 $M_s \geq 7.0$ 地震

大陆西部共发生了 18 次 $M_s \geq 7.0$ 地震, 震前异常数量分别为: 地下流体 302 项、电磁 77 项、形变 178 项以及其他 47 项。按照震级从小到大排列, 每次强震前发生的异常数量如图 2a 所示。从图中可以看出, 地下流体异常数量较为突出。此外, 由于青藏块体及新疆地区地域辽阔, 人烟稀少, 观测台项较少, 所以发生在这些区域的地震震前异常项数总体较少。

1.2 中国大陆东部 $M_s \geq 6.0$ 地震

大陆东部共发生了 15 次 $M_s \geq 6.0$ 地震, 震前异常数量分别为: 地下流体 133 项、电磁 76 项、形变 104 项以及其他 56 项。按照震级从小到大排列, 每次强震前发生的异常数量如图 2b 所示。从图中可以看出, 地下流体和形变异常数量较为突出。对于内蒙古地区及近海域等观测台项较少地区, 震前异常项数较少。

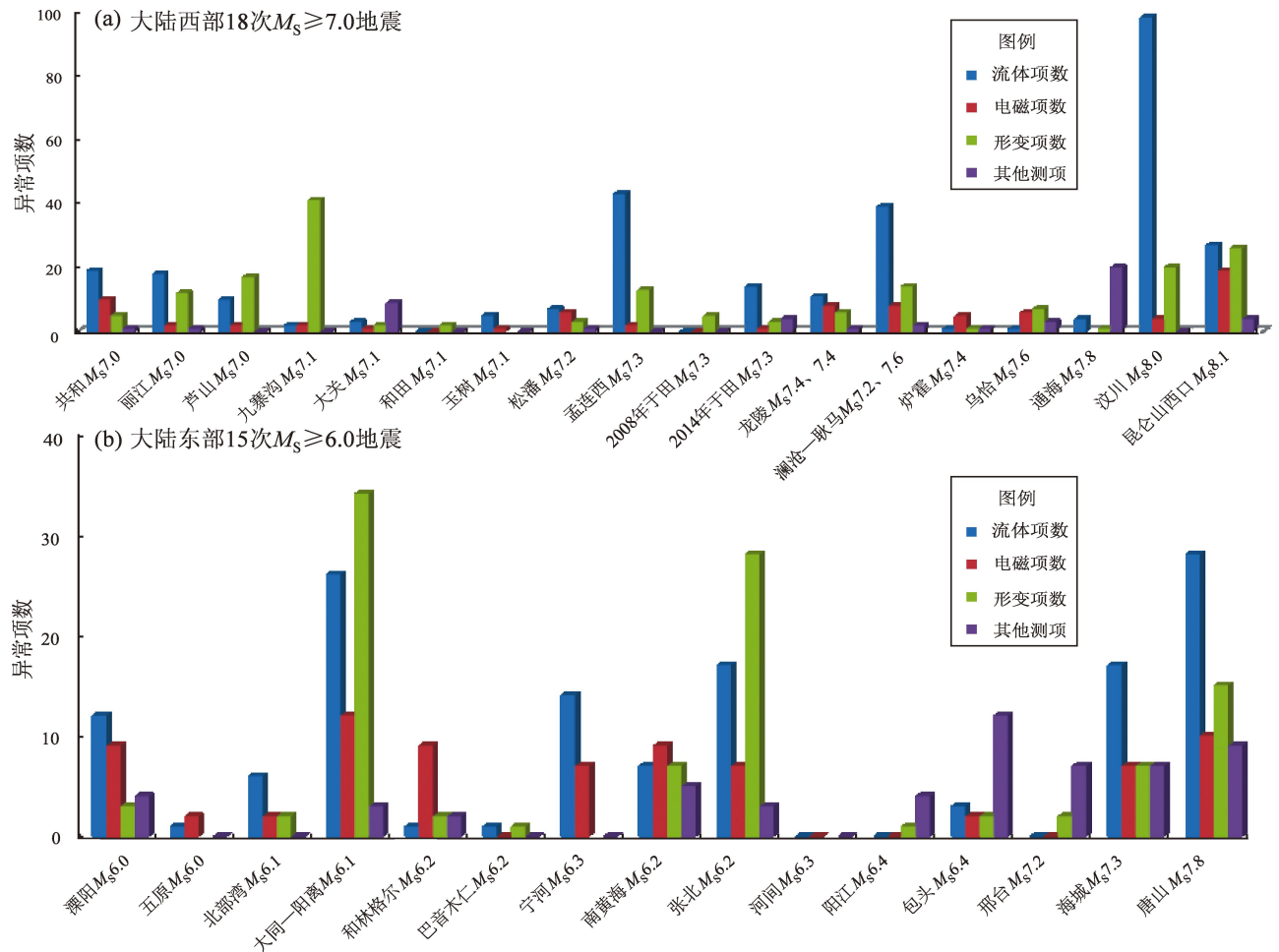


图2 中国大陆强震前地球物理场观测异常项数

Fig. 2 Number of the observed geophysical anomalies before strong earthquakes in Chinese Mainland

2 重点地球物理场观测异常分区特征分析

为了进一步分析各项异常的特征和机理, 本文将重点讨论地下流体、电磁和形变3大学科的异常。并根据地质构造的不同, 将这33次强震分别划分到5个区域: 南北地震带中北段、南北地震带南段、青藏地块内部及其西北缘、华北地块北缘以及华南地块周缘。

2.1 中国大陆西部地区

2.1.1 南北地震带中北段——青藏地块东缘

南北地震带是一条强震群集的地震带, 北段曾发生了5次 $M_s \geq 7.0$ 地震, 这5次强震前发生的异常时空分布如图3a所示。图中黑色虚线圆形表示距离震中100~300 km。

从时间序列上看: ①震前6个月以上主要为趋势性变化, 表现为趋势变化、破年变、超阈值等; ②震前6个月内主要为突变变化, 表现为超阈值、突跳、突变等; ③短临阶段流体和形变异常比较突出。

从空间分布上看: ①汶川 $M_s 8.0$ 地震前异常的分布与震源断裂走向存在一致性。②汶川地震前震源区异常较少, 异常大多分布在震源区外围, 且存在从外围向内迁移的特征。这一现象在九寨沟 $M_s 7.1$ 地震也存在, 1年以上的异常主要集中在震源区外围, 以跨断层形变异常为主; 1年以内的异常逐渐向震中方向迁移。

2.1.2 南北地震带南段——青藏地块东南缘

南北地震带南段曾发生了6次 $M_s \geq 7.0$ 地震。其中, 通海 $M_s 7.8$ 地震前存在1项趋势异常; 大关 $M_s 7.1$ 地震前存在5项趋势性异常和1项突变类异常; 其余4个强震前发生的异常时空分布如图3b所示。

从时间序列上看: ①震前3个月以上异常特征主要为趋势性变化, 表现为破年变、加速变化、大幅波动等。②震前3个月以内异常特征主要为快速变化, 表现为高值、加速变化、突升突降等。③震前3个月内的流体水化异常较为突出。

从空间分布上看: ①震前1年以上的异常主要集中在震源区外围, 而1年以内的异常逐渐向震中方向迁移, 以流体异常为主; ②震中附近(100 km范围内)以短临流体异常为主, 在龙陵

$M_s 7.3$ 、7.4, 澜沧—耿马 $M_s 7.2$ 、7.6和孟连西 $M_s 7.3$ 地震前该异常尤为明显。

2.1.3 青藏地块内部及其西北缘

青藏块体及新疆地区曾发生了7次 $M_s \geq 7.0$ 地震。由于该区域地广人稀, 地球物理场观测项较少, 所以多数地震前存在的异常数量较少。其中, 和田 $M_s 7.1$ 地震前存在1项趋势类异常和2项突变类异常; 于田 $M_s 7.3$ 地震前存在3项趋势类异常; 青海玉树 $M_s 7.1$ 地震前存在3项趋势类异常和3项突变类异常; 于田 $M_s 7.3$ 地震前存在1项趋势类异常和1项突变类异常。此外, 乌恰 $M_s 7.4$ 地震、共和 $M_s 7.0$ 地震和昆仑山口西 $M_s 8.1$ 地震前的异常时空分布如图4所示。

从时间序列上看: ①共和 $M_s 7.0$ 地震的震前3年异常共3项, 1~3年期间异常共9项, 6个月至1年期间异常共7项。昆仑山口西 $M_s 8.1$ 地震的震前3年异常共11项, 1~3年期间异常共9项, 6个月至1年期间异常共24项; ②共和 $M_s 7.0$ 地震的震前6个月内异常共计14项。昆仑山口西 $M_s 8.1$ 地震的震前6个月内异常共计36项, 并且这些异常以流体和电磁异常为主。

从空间分布上看: 共和 $M_s 7.0$ 地震和昆仑山口西 $M_s 8.1$ 地震前的异常分布较为分散。由于地球物理场观测异常数量较少, 这里结合测震学异常进行综合分析。

2.2 中国大陆东部地区

2.2.1 华北地块北缘

华北地区曾发生了11次 $M_s \geq 6.0$ 地震。其中, 邢台 $M_s 7.2$ 地震前存在2项趋势类异常和2项突变类异常; 河间 $M_s 6.3$ 地震前仅存在宏观异常; 和林格尔 $M_s 6.2$ 地震前存在12项趋势性下降异常、5项突变类异常和1项大幅变化异常; 巴音木仁 $M_s 6.2$ 地震前存在3项趋势类异常和1项突跳类异常; 宁河 $M_s 6.3$ 地震前存在6项突跳类异常(震前3个月内); 五原 $M_s 6.0$ 地震前存在2项突变类异常(震前1个月内); 大同—阳高 $M_s 6.1$ 地震前存在68项趋势类异常和10项突跳类异常(震前1个月内); 包头 $M_s 6.4$ 地震前存在5项趋势类异常和2项突跳类异常(震前1个月内)。此外, 唐山 $M_s 7.8$ 地震、张北 $M_s 6.2$ 地震和海城 $M_s 7.3$ 地震前的异常时空分布如图5a所示。

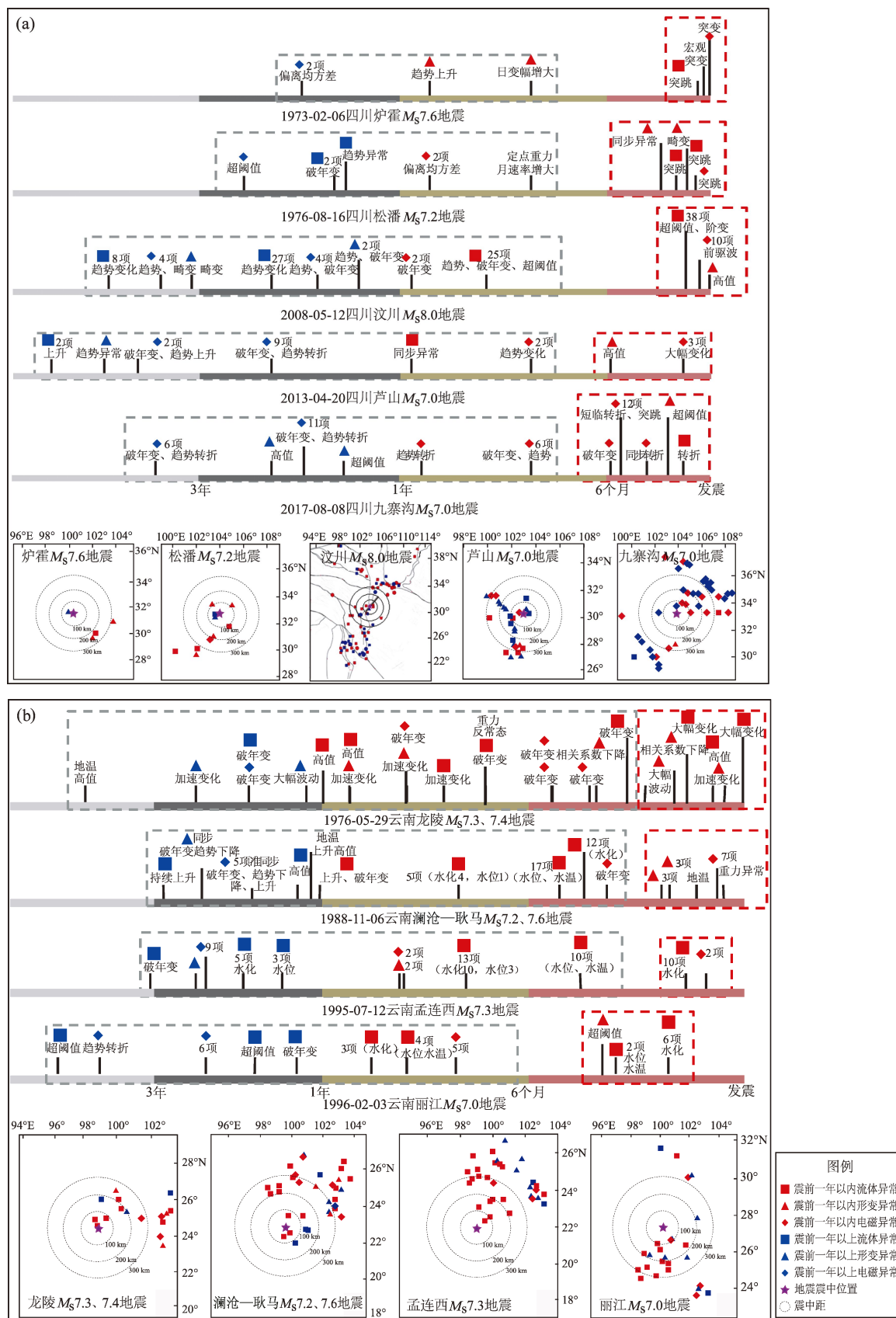


图3 南北地震带中北段 (a)、南段 (b) 典型强震前地球物理场观测异常时空演化图

Fig. 3 Temporal and spatial evolution of the observed geophysical anomalies before typical strong earthquakes in the middle and northern section (a), and the southern section (b) of the North-South Seismic Belt

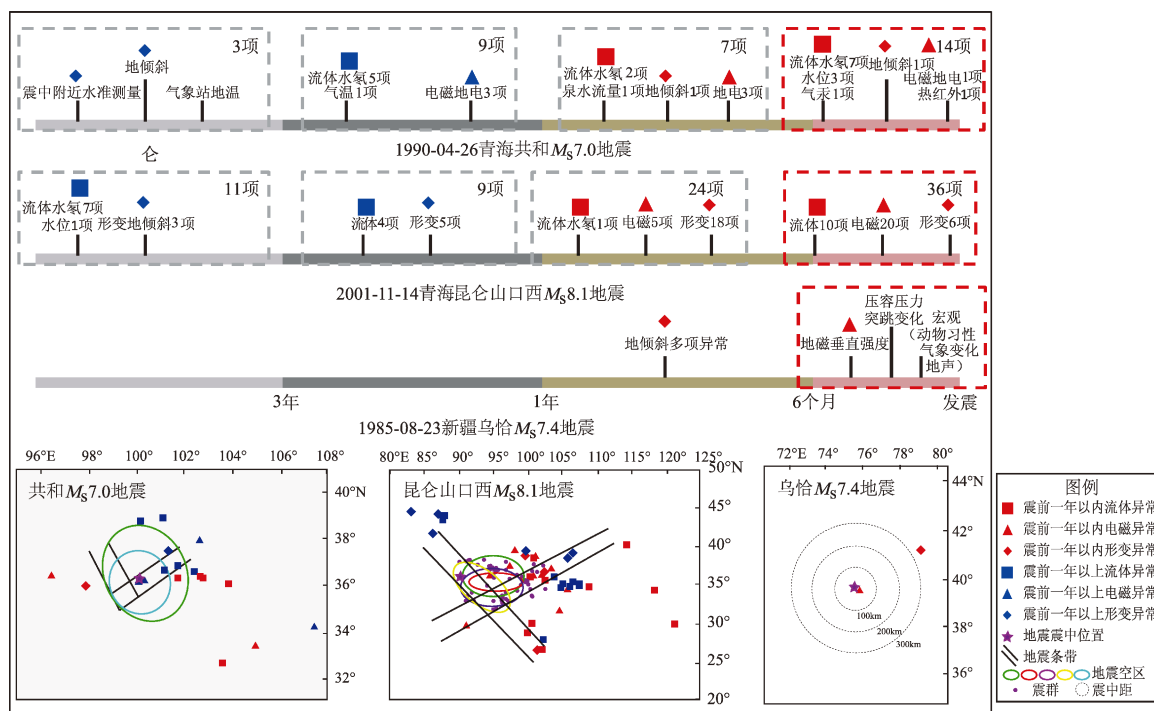


图4 青藏地块内部及其西北缘典型强震前地球物理场观测异常时空演化图

Fig. 4 Temporal and spatial evolution of the observed geophysical anomalies before typical strong earthquakes within the Qinghai Tibet Plateau and its northwest margin

从时间序列上看,唐山 $M_s 7.8$ 地震记录了一次大地震前后比较完整的多种自然现象变化的过程。长期阶段(1966—1971年),主要表现为震中区附近地壳缓慢升降及较小地震的频度减少和较大的地震开始活动。中期阶段(1972—1975年),重力值趋势性上升,地下水位趋势性下降,地下水氢含量上升,视电阻率下降,唐山外围地区断层活动加强,震源区附近地区地磁场出现异常等。短期阶段(1976年1—7月),多种测项的中期趋势性异常出现转折性加速变化,出现新的趋势异常点或项目,在个别点上有零星的突发性异常现象。临震阶段,1976年7月,水氢、视电阻率、地下水位、油井动态、地应力(电感法)等出现突发性异常,震前1周微宏观异常逐步增多,震前1~2 d,动物、地下水等宏观异常大量涌现。

从空间分布上看,唐山 $M_s 7.8$ 地震异常主要集中于距离震中 200 km 范围内,除了与地球物理场观测台网布局有关外,还与构造带分布有关。震中附近(100 km 范围内)1年以内的异常以流体和地磁异常为主。

2.2.2 华南地块周缘

华南地块周缘的沿海地区曾发生了4次 $M_s \geq 6.0$ 地震,其震前的异常时空分布如图5b所示。

从时间序列上看,这4次地震中,溧阳 $M_s 6.0$ 和南黄海 $M_s 6.2$ 地震前的异常演化模式十分相似。在震前1年以上的趋势类异常中,多数表现为趋势升降变化、年变幅变化、大幅变化准同步超阈值等特征。而在1年以内的突变类异常中,多数表现为脉冲、突跳、阶变、突升突降等,并且存在多个测项的准同步变化,特别是6个月以内的准同步变化尤为明显。

从空间分布上看,溧阳 $M_s 6.0$ 和南黄海 $M_s 6.2$ 地震前的中长期异常主要分布在距离震中 100~200 km 以外,而短临异常主要分布在距离震中 100 km 以内。以上结果较好地反映了异常从外围向震中收缩的特征。

2.3 中国大陆 $M_s \geq 6.0$ 地震前异常特征综合分析

综合中国大陆各个分区 $M_s \geq 6.0$ 地震的震前异常特征,总结了震前异常时空分布及其与目标地震的对应关系,如图6所示。

2.3.1 时间序列特征分析

(1) 震前6个月以上以趋势类异常为主,特征类型主要表现为:趋势升降变化、破年变、超阈值、偏离均方差、日变幅增大和月速率增大、加速变化、大幅波动、趋势转折、年变幅变化、大幅变化准同步超阈值等。

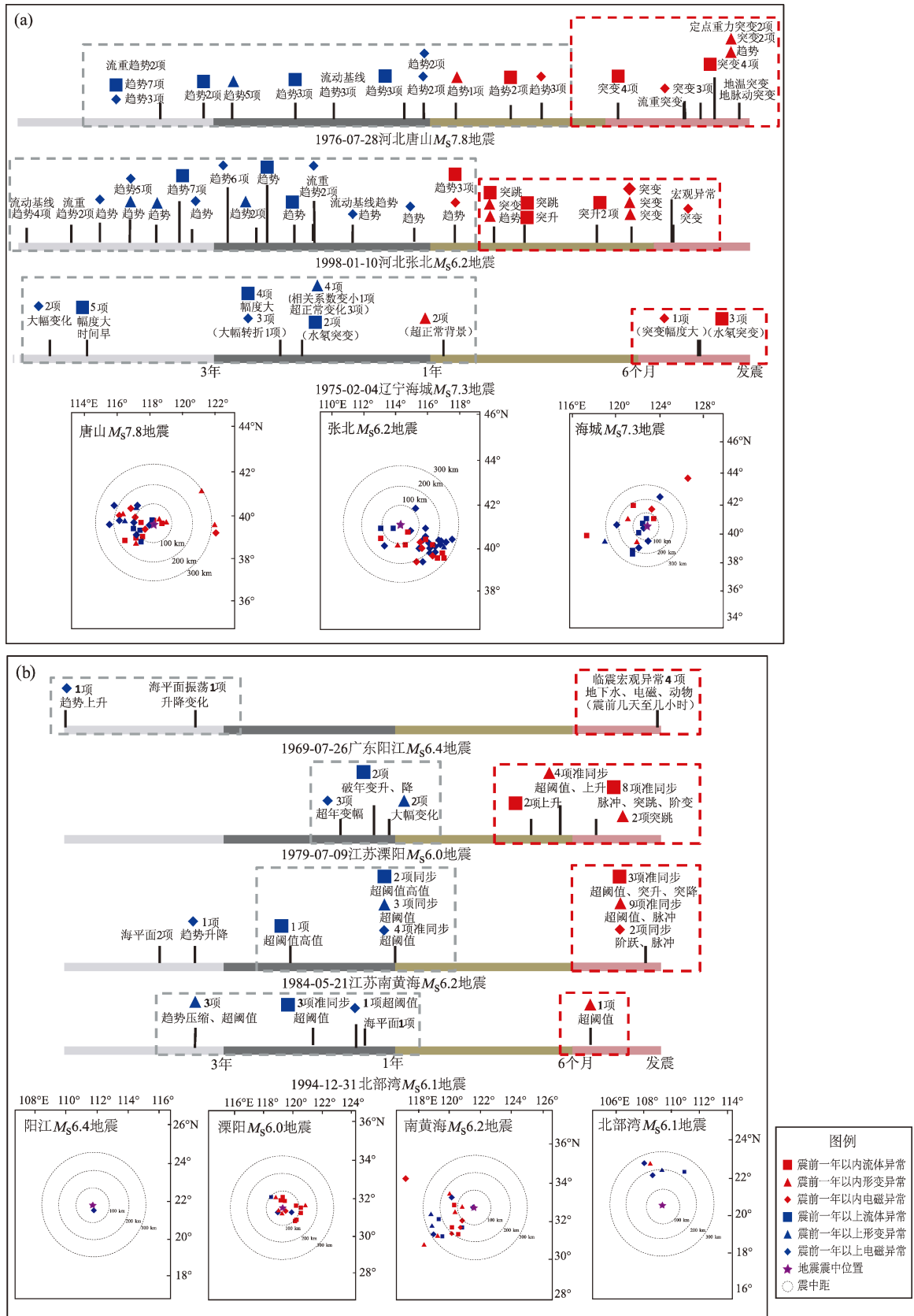


图5 华北地块北缘 (a)、华南地块周缘沿海地区 (b) 典型强震前地球物理场观测异常时空演化图

Fig. 5 Temporal and spatial evolution of the observed geophysical anomalies before typical strong earthquakes in the northern margin of the North China Craton (a) and the coastal areas of the south China craton (b)

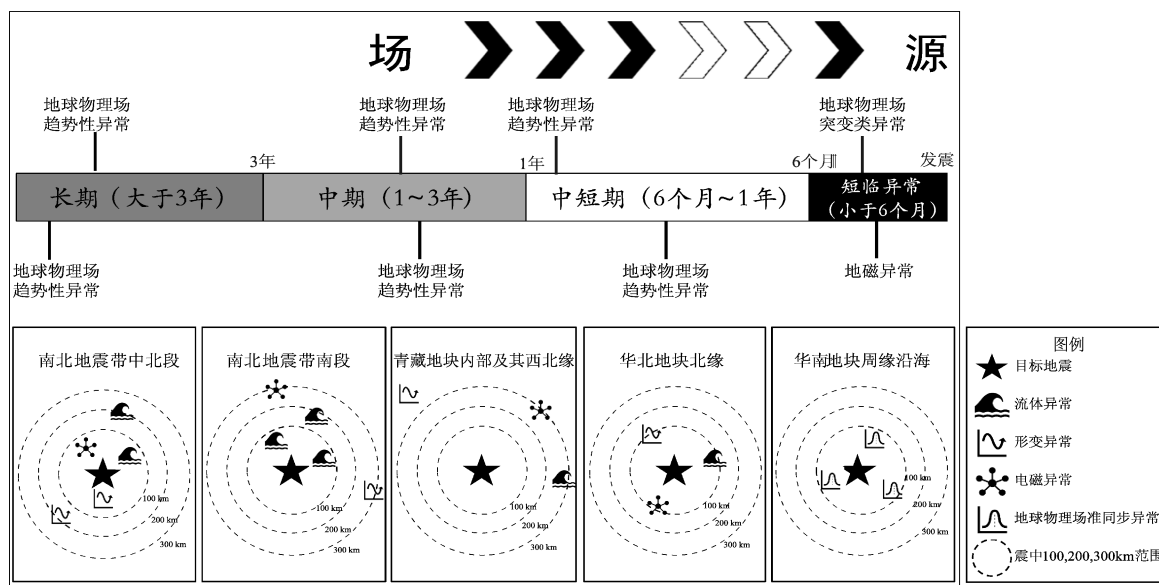


图6 中国大陆强震前异常时间序列演化模式示意图

Fig. 6 Schematic diagrams of the evolution model of abnormal time series before strong earthquakes in Chinese Mainland

(2) 震前6个月内的短临阶段以突变类异常为主,特征类型主要表现为:超阈值、突跳、突变、畸变、高值、前驱波、脉冲、同步变化、大幅变化、阶变、加速变化、突升突降、转折性加速变化等。

(3) 不同构造分区内地震的震前异常时间演化特征显示:① 南北地震带中北段地震的震前短临阶段流体和形变异常比较突出。② 南北地震带南段地震震前3个月内地下流体水化异常较为突出。③ 青藏地块内部地震震前6个月内以流体和电磁异常为主。共和地震以及昆仑山口西地震的震前异常数量主要表现为“持续增长”型。④ 华北地块北缘地震的震前短临异常以流体和电磁异常为主,其数量主要表现为“先增后减”型。⑤ 华南地块周缘的沿海地区地震的震前短临异常存在准同步性和同步性特征。

2.3.2 空间演化特征分析

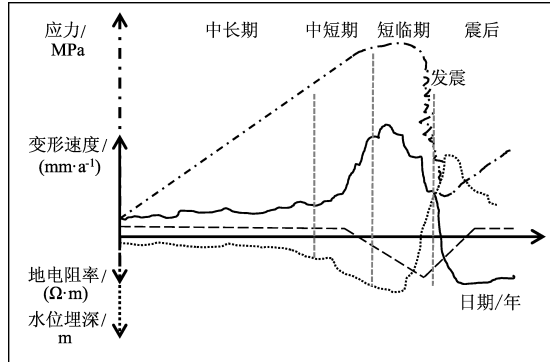
(1) 震前地下流体异常多集中于距离震中300 km范围内,汶川地震和九寨沟地震前异常主要表现为“向震中收缩”型,并且汶川地震前的异常受“构造控制”。澜沧地震、孟连西地震和唐山地震的震前地下流体异常“相对集中”。

(2) 距离震中较近(100 km)范围内,存在较多地下流体异常,以云南地区和华南地块周缘沿海地区内的地震表现最为突出。

(3) 不同构造分区内地震的震前异常空间演化特征显示:① 南北地震带中北段震源区附近的异常存在由外围向内收缩特征;异常的空间分布与发震断裂走向有一致性。② 南北地震带南段的异常集中出现在川滇菱形块体的边缘;汶川地震前,震源区附近的异常较少,其外围异常较多,且存在由外围向内迁移特征;震中附近流体异常较多。③ 青藏地块内部及西北缘,部分台站有在趋势背景异常下出现短期异常的现象;昆仑山口西地震前,在外围的四川以及青藏块体边缘出现较多短期异常。④ 华北地块北缘的震前异常集中分布在震源区周围;海城地震前的异常具有准同步、成丛特征。⑤ 华南地区的溧阳和南黄海地震的异常演化模式十分相似,流体的短期异常的空间分布比较集中;临震前,集中出现多项突变类异常,以突跳、阶变、脉冲为主,并具有良好的准同步性。

3 长中短临阶段地球物理场观测异常机理及其演化模式

结合前文阐述的各项异常特征,选取异常机理相对明确的测项(水位、地电阻率和应变)作为对比分析的对象,对地震孕育的长中短临阶段演化特征进行综合分析(图7)。



水位埋深曲线、变形速度曲线修改自 Mjachkin 等 (1975) 和王俊等 (2020); 应力曲线修改自李世念等 (2021); 地电阻率修改自解滔和卢军 (2023)

图 7 断层失稳过程中的剪应力、变形速度、水位埋深、地电阻率-时间曲线示意图

Fig. 7 Time series of the shear stress, deformation velocity, water level depth, and electrical resistivity during the process of fault instability

3.1 中长期阶段

在中长期阶段,以水位、地电阻率、应变为例,主要呈现为匀速的趋势性变化特征,只是相较于正常状态出现了异常特征。变化形态和特征较为简单,所反映的应力状态变化也相对单一。虽然存在各项异常变化,应力也处于逐渐积累的阶段,但是仍属于稳态(马瑾等,2012;李世念等,2021)。从异常数量上看,属于逐渐增多的过程,即处于“持续增长”型或“先增后减”型异常演化的前期阶段(孙小龙等,2016)。不同区域内异常出现频率高的测项各不相同,显示出区域性差异,这一现象与郑兆苾等(2006)的研究结果对应较好。其根本原因在于不同区域的地质构造环境各不相同,也属于“构造控制”型地震的基本特征。

3.2 中短期阶段

在中短期阶段,水位和应变开始出现加速变化,地电阻率开始出现异常变化。中期阶段属于亚稳态的偏离线性阶段。在区域应力场的作用下,地下介质的孔隙度、渗透系数、饱和度、温度和裂隙结构等条件发生改变,在相对挤压的环境下,孔隙度下降,孔隙水渗入井孔含水层导致井水位上升,形变速度大幅加速。短期阶段属于亚稳态的强偏离线性阶段(李世念等,2021)。震中附近的围岩孔隙度增大,井孔含水层中的地下水向孔

隙中渗透导致井水位发生下降变化,形变速度逐渐达到峰值,地电阻率也出现下降异常变化(解滔,卢军,2023)。从异常数量上看,属于快速上升的过程,即处于“持续增长”型或“新增后减”型异常演化的中期阶段。在年尺度范围内,尤其应该关注地下流体和电磁类异常的数量和形态变化(蒋海昆等,2009)。

3.3 临震阶段

在临震阶段,水位呈现大幅阶变、突变性变化特征,且以上升型变化为主。结合裂隙串通模式(Mjachkin *et al.*, 1975)和亚失稳模型(马瑾等,2012;李世念等,2021)可知,在构造应力的持续作用下,微裂隙剧烈增加,小裂隙发育成较大的裂隙,由于介质的不均匀性,大裂隙加速增大,发生不稳定变形,从而形成窄带区,在剪切应力作用下,窄带区大裂隙发育成若干小断裂,这些小断裂之间不断联通,形成主断裂,为流体上涌提供逸出通道,最终导致水位上升(晏锐等,2008;王俊等,2020;Yu *et al.*, 2023)。电阻率大多呈现下降型突变变化特征。这与区域构造应力存在直接关联,即震源区及附近区域的高应力-应变水平能引起浅层介质的微裂隙活动,导致其裂隙结构、饱和度和温度等条件发生改变(张建国,2017;解滔,卢军,2023)。随着应力的不断积累,构造环境从亚稳态进入亚失稳态,特别是从准静态变成准动态阶段(李世念等,2021),变形速度发生较大波动(杨秋野等,2020),出现突变类异常,这也预示着即将进入失稳态,属于临震阶段异常变化特征。从异常数量上看,属于加速上升或逐渐减少的过程,即处于“持续增长”型或“新增后减”型异常演化的晚期阶段。在这一阶段应重点关注各类异常是否出现准同步异常和突变类异常。这是因为在临震失稳前,震源体周围的滑动速率大幅度增加,未破裂的震源区已收缩到了一个较小的范围,而失稳时的最大断层活动就发生在最后破裂的震源体中心附近,所以震中区的临震异常出现的最晚,而且异常的突发性和强烈程度也比早期更为突出(晏锐等,2004)。地下流体、形变和电磁异常通常会出现同步或准同步的变化,这些变化对地震孕育也起到促进作用,加速地震的发生。

4 结论

中国大陆发生的33次强震分布范围较广,所涉及的地球物理场观测异常测项种类繁多,形态变化复杂,本文通过寻求其共性特征,得出以下几点结论:

(1) 震前地球物理场观测异常特征呈现明显的阶段性:中长期阶段以趋势类异常为主,如趋势升降、破年变和趋势转折等;短临期阶段以突变类异常为主,如突跳、突升突降和脉冲等。

(2) 各分区的震前地球物理场观测异常项目数量和主要特征存在差别:青藏地块内部地震的震前异常数量多为“持续增长”型,其他区域内地震的震前异常数量以“先增后减”居多;南北地震带南段的地震震中100 km范围内地下流体异常较为突出等。这与不同分区的震例数量、台网密度不同有关,更与构造环境的不同密切相关。

(3) 临震异常以水位、水氡、地磁和应力应变的突变类异常为主,尤其是在南北地震带南段和华南地块周缘出现多项地球物理异常准同步的特征。

(4) 长中短临各个阶段的异常演化特征与亚失稳模型中应力条件发生改变的过程能够相互呼应,合理利用各区域内地震的震前异常特征时空演化特征,可为今后震情趋势判定工作提供有力的参考依据。

参考文献:

- 陈棋福. 2002a. 中国震例(1992—1994)[M]. 北京:地震出版社.
- Chen Q F. 2002a. Earthquake cases in China(1992 - 1994)[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 陈棋福. 2002b. 中国震例(1995—1996)[M]. 北京:地震出版社.
- Chen Q F. 2002b. Earthquake cases in China(1995 - 1996)[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 陈棋福. 2003. 中国震例(1997—1999)[M]. 北京:地震出版社.
- Chen Q F. 2003. Earthquake cases in China(1997 - 1999)[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 陈棋福. 2008. 中国震例(2000—2002)[M]. 北京:地震出版社.
- Chen Q F. 2008. Earthquake cases in China(2000 - 2002)[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 呼楠,石富强,季灵运,等. 2024. 中国大陆强震发生前地震活动增强统计特征分析[J]. 地震学报,46(2):226 - 241.
- Hu N, Shi F Q, Ji L Y, et al. 2024. Statistical characteristics of enhanced seismicity before strong earthquakes based on earthquake cases in Chinese mainland[J]. Acta Seismologica Sinica, 46(2):226 - 241. (in Chinese)
- 蒋海昆,苗青壮,吴琼,等. 2009. 基于震例的前兆统计特征分析[J]. 地震学报,31(3):245 - 259.
- Jiang H K, Miao Q Z, Wu Q, et al. 2009. Analysis on statistical features of precursor based on earthquake cases in China mainland[J]. Acta Seismologica Sinica, 31(3):245 - 259. (in Chinese)
- 蒋海昆. 2014. 中国震例(2003—2006)[M]. 北京:地震出版社.
- Jiang H K. 2014. Earthquake cases in China(2003 - 2006)[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 蒋海昆. 2018a. 中国震例(2007—2010)[M]. 北京:地震出版社.
- Jiang H K. 2018a. Earthquake cases in China(2007 - 2010)[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 蒋海昆. 2018b. 中国震例(2011—2012)[M]. 北京:地震出版社.
- Jiang H K. 2018b. Earthquake cases in China(2011 - 2012)[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 李世念,马瑾,汲云涛,等. 2021. 亚失稳准动态及同震过程变形场时空演化特征—实验与分析[J]. 地震地质,43(1):1 - 19.
- Li S N, Ma J, Ji Y T, et al. 2021. The spatio-temporal evolution of the fault deformation during the meta-instability quasi-dynamic phase and the coseismic stage: A view from laboratory[J]. Seismology and Geology, 43(1):1 - 19. (in Chinese)
- 刘耀伟. 2006. 我国地震地下流体科学40年探索历程回顾[J]. 中国地震,22(3):222 - 235.
- Liu Y W. 2006. Review of the research progress on the seismological science of underground fluid in China during last 40 years[J]. Earthquake Research in China, 22(3):222 - 235. (in Chinese)
- 马瑾, Sherman S I, 郭彦双. 2012. 地震前亚失稳应力状态的识别——以5°拐折断层变形温度场演化的实验为例[J]. 中国科学:地球科学,42(5):633 - 645.
- Ma J, Sherman S I, Guo Y S. 2012. Identification of meta-instable stress state based on experimental study of evolution of the temperature field during stick-slip instability on a 5° bending fault[J]. Scientia Sinica Terrae, 42(5):633 - 645. (in Chinese)
- 孙小龙,王俊,向阳,等. 2016. 基于《中国震例》的地下流体异常特征统计分析[J]. 地震,36(4):120 - 130.
- Sun X L, Wang J, Xiang Y, et al. 2016. Statistical characteristics of subsurface fluid precursors based on Earthquake cases in China[J]. Earthquake, 36(4):120 - 130. (in Chinese)
- 王俊,黄显良,刘朝君,等. 2020. 2014年安徽霍山 $M_{\text{s}}4.3$ 地震前地下流体典型异常特征分析[J]. 中国地震,36(1):67 - 79.
- Wang J, Huang X L, Liu Z J, et al. 2020. Analysis of typical anomalies observed from underground fluid before 2014 Huoshan $M_{\text{s}}4.3$ earthquake[J]. Earthquake Research in China, 36(1):67 - 79. (in Chinese)
- 解滔,卢军. 2023. 中国中强地震前地电阻率中短期异常及其可能原因[J]. 中国地震,39(1):45 - 63.

- Xie T, Lu J. 2023. Middle – short term abnormal characteristics of apparent resistivity before strong earthquakes in China and its possible mechanism [J]. *Earthquake Research in China*, 39 (1): 45 – 63. (in Chinese)
- 薛艳, 张小涛, 晏锐, 等. 2022. 2022 年四川泸定 $M_s 6.8$ 地震前地震活动与地球物理场异常回顾与讨论 [J]. *中国地震*, 38 (4): 601 – 612.
- Xue Y, Zhang X T, Yan R, *et al.* 2022. Review and discussion on seismic activity and geophysical observation anomalies before the 2022 Luding $M_s 6.8$ earthquake in Sichuan, China [J]. *Earthquakes Research in China*, 38 (4): 601 – 612. (in Chinese)
- 晏锐, 黄辅琼, 顾瑾平. 2004. 中国大陆 7 级强震前地下流体前兆时空特征 [J]. *地震*, 24 (1): 126 – 131.
- Yan R, Huang F Q, Gu J P. 2004. Spatial – temporal characteristics of precursory anomaly of underground fluid before $M_s 7.0$ strong earthquakes in China's continent [J]. *Earthquake*, 24 (1): 126 – 131. (in Chinese)
- 晏锐, 田雷, 王广才, 等. 2018. 2008 年汶川 8.0 级地震前地下流体异常回顾与统计特征分析 [J]. *地球物理学报*, 61 (5): 1907 – 1921.
- Yan R, Tian L, Wang G C, *et al.* 2008. Review and statistically characteristic analysis of underground fluid anomalies prior to the 2008 Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 61 (5): 1907 – 1921. (in Chinese)
- 杨秋野, 张艳, 符力耘, 等. 2020. 应力变化与流体 (水位, 水温, 水化学, 土壤气等) 变化的耦合机理及其在川滇地区地震前兆研究中的应用 [J]. *地球物理学进展*, 35 (6): 2124 – 2133.
- Yang Q Y, Zhang Y, Fu L Y, *et al.* 2006. Coupling mechanism of stress variation and groundwater (water level, water temperature, hydrochemistry, soil gas, etc.) and its application in earthquake precursors research in Sichuan and Yunnan regions [J]. *Progress in Geophysics*, 35 (6): 2124 – 2133. (in Chinese)
- 张建国. 2017. 强震前电磁辐射异常演化特征及其机理探索研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学.
- Zhang J G. 2017. Research on anomaly characteristics of electromagnetic radiation signal and mechanism before strong earthquakes [D]. Heifei: University of Science and Technology of China.
- 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块 [J]. *中国科学: 地球科学*, 33 (增刊 1): 12 – 20.
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, *et al.* 2003. Strong earthquake activity and active blocks in Chinese Mainland [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 33 (S1): 12 – 20. (in Chinese)
- 张肇诚. 1988. 中国震例 (1966—1975) [M]. 北京: 地震出版社.
- Zhang Z C. 1988. Earthquake cases in China (1966 – 1975) [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 张肇诚. 1990a. 中国震例 (1976—1980) [M]. 北京: 地震出版社.
- Zhang Z C. 1990a. Earthquake cases in China (1976 – 1980) [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 张肇诚. 1990b. 中国震例 (1981—1985) [M]. 北京: 地震出版社.
- Zhang Z C. 1990b. Earthquake cases in China (1981 – 1985) [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 张肇诚. 1999. 中国震例 (1986—1988) [M]. 北京: 地震出版社.
- Zhang Z C. 1989. Earthquake cases in China (1986 – 1988) [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 张肇诚. 2000. 中国震例 (1989—1991) [M]. 北京: 地震出版社.
- Zhang Z C. 2000. Earthquake cases in China (1989 – 1991) [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 郑兆苾, 张国民, 何康, 等. 2006. 中国大陆地震震例异常统计与分析 [J]. *地震*, 26 (2): 29 – 37.
- Zheng Z B, Zhang G M, He K, *et al.* 2006. Statistics and analyses of the anomalies of earthquake cases in China's Mainland [J]. *Earthquake*, 26 (2): 29 – 37. (in Chinese)
- Mjachkin V I, Brace W F, Sobolev G A, *et al.* 1975. Two models for earthquake forerunners [J]. *Pure & Applied Geophysics*, 113 (1): 169 – 181.
- Wyss M. 1997. Second round of evaluations of proposed earthquake precursors [J]. *Pure & Applied Geophysics*, 149 (1): 3 – 16.
- Yu H Z, Liu L, Ma Y C, *et al.* 2023. Observed hydrological changes associated with active tectonic blocks before three consecutive earthquakes in Qinghai, China [J]. *Scientific Reports*, 13: 8988.

Characterization of the Observed Geophysical Anomalies Prior to Strong Earthquakes in Chinese Mainland

LIU Jie^{1,2}, JI Lingyun³, SHI Fuqiang^{1,2}, HU Nan^{1,2}, QI Yuping⁴,
WANG Guangming⁵, ZHANG Lifeng⁶, GUO Lei⁷, JIANG Jiajia⁸

(1. Shaanxi Earthquake Agency, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

(2. Shaanxi Xi'an Deep Earth Structure Observation and Research Station of China Earthquake Administration, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

(3. The Second Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

(4. Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, Sichuan, China)

(5. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

(6. Qinghai Earthquake Agency, Xining 810001, Qinghai, China)

(7. Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang 050021, Hebei, China)

(8. Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 050021, Gansu, China)

Abstract

In order to find out the characteristics and patterns of the anomalies before strong earthquakes, we sort out 975 geophysical anomalies before 33 strong earthquakes ($M_s \geq 6.0$) in Chinese Mainland from 1966 to 2017. Among these anomalies, there are 435 underground fluid anomalies, 153 electromagnetic anomalies, 282 deformation anomalies and 105 other anomalies. Underground fluid anomalies are mainly characterized by water radon, water level, and water temperature. Electromagnetic anomalies are mainly characterized by ground resistivity and geomagnetism. Deformation anomalies are mainly characterized by inclination, leveling, and volumetric strain. The analysis shows: ①Anomalies evolved in distinct stages before the earthquakes. Trend – type anomalies were dominant in the middle and long term, and abrupt – variation anomalies were dominant in the short term. ②The number and the feature of the anomalies in different regions differed. The fluid and deformation anomalies were dominant in the short – term stage in the northern and central parts of the North – South Seismic Belt. The Hydrogeological anomalies were dominant in the southern part of the North – South Belt. The fluid and electromagnetic anomalies were dominant in the inner part of the Qinghai – Tibetan Block. The number of these anomalies continuously grew. The fluid and electromagnetic anomalies were dominant in the northern edge of the North China Craton. The number of these anomalies increased first, then decreased. In the surrounding areas of the South China Craton, geophysical anomalies were mainly quasi – synchronous. In the light of the mechanism of typical anomalies, the evolutionary patterns of the anomalies in long term, medium term, short term, and impending period were discussed. For some anomalies like water level anomaly, earth resistivity anomaly, and deformation velocity anomaly, their evolutionary characteristics in each stage were consistent with the variation of the stress conditions according to the sub – instability model.

Keywords: strong earthquakes in Chinese Mainland; geophysical field; temporal and spatial characteristics; evolutionary patterns