

华北强震前地下流体长趋势变化特征 及其产生机理的研究

陆明勇¹, 范雪芳², 周伟³, 房宗绯¹, 赵丽葵¹

(1. 中国地震应急搜救中心, 北京 100049; 2. 山西省地震局, 山西太原 030021;
3. 中国地震局第一监测中心, 天津 300180)

摘要:分析了华北地区自1976年以来 $M_s \geq 6.0$ 地震前地下流体长趋势变化的形态、演化特征。结果表明:地下流体长趋势变化出现时间早、范围广,具有协调性、重复性、迁移性等特性,主要沿构造带迁移,迁移方向为外围向内迁移或内部向外迁移;形态主要为趋势转折、破年变、加速等,其中绝对大多数为趋势转折变化;地下水位分析表明长趋势变化绝大部分呈现为缓慢上升或下降减缓的走势。对比研究了地壳形变与地下流体长趋势变化,发现地壳形变长趋势时间早于地下流体;形变出现张压变化与水位变化有比较密切的关系,即形变绝大部分出现缓慢压性变化或张性减缓变化,水位绝大部分出现缓慢上升或下降减缓变化。最后讨论了强震前地下流体长趋势变化产生的机理:在地震孕育过程初(早)期,构造应力的缓慢增强将使岩体所含裂缝闭合,地壳发生变形,从而改变岩体的空隙率及相应的孔隙压力和渗透率,引起诸如地下流体长趋势动态异常变化;构造应力缓慢增强并向未来震中聚集,造成地下流体长趋势动态异常变化向震中迁移;而深部物质的不断上涌和影响范围增大致使地下流体长趋势动态异常变化向外围迁移。

关键词: 地下流体; 地壳形变; 强震; 长趋势变化; 地震前兆; 机理

中图分类号: P315.72+3 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2010)02-0129-10

Study on Characteristics of Long-time Trend Change of Subsurface Fluid before Strong Earthquake in North China and Its Mechanism

LU Ming-yong¹, FAN Xue-fang², ZHOU Wei³, FANG Zong-fei¹, ZHAO Likui¹

(1. China Center for Earthquake Disaster Emergency and SAR, Beijing 100049, China;

2. Earthquake Administration of Shanxi Province, Taiyuan 030021, China;

3. First Crust Monitoring and Application Center, CEA, Tianjing 300180, China)

Abstract: The long-time trend change shape and evolutionary characteristics of subsurface fluid in North China before $M_s \geq 6.0$ earthquakes since 1976 are analysed. The results show that the begin time of long-time trend change of subsurface fluid is earlier, and the range is wider, with the characteristics of compatibility, repetition and migration etc. The migrate direction along major tectonic belt is from wide outer regions to epicenter area, or from epicenter area to wide outer region. The shape of changes show trend turn change, damage annual variation and accelerating variation etc, among them the trend turn change is majority shape. Study on level of underground water shows that the majority variation shapes of long-time trend change on level of underground water are slow elevation or descending diminution. Then long-time trend change of subsurface fluid and crustal deformation before strong earthquakes are comparatively studied. The results discover that the begin time of crustal deformation is earlier than it of subsurface fluid,

收稿日期: 2009-01-16

基金项目: “十一五”国家科技支撑项目(2006BAC01B02-03-04, 2006BAC01B02-02-01)

作者简介: 陆明勇(1965-), 男(汉族), 四川江油人, 研究员, 主要从事地球动力学、地壳形变、地下流体及其与地震预报等研究。

the tensor-pressure variation of crustal deformation is more closely related with the level variation of underground water, namely if change of crustal deformation shows mostly slow pressure or tensor diminution, the change of underground water level shows slow elevation or descending diminution. Finally, the mechanism on long-time trend change of subsurface fluid before strong earthquake is discussed. Slow incremental tectonic stress make crack of rock closure and crust deform, the crust deformation changes porosity, pore pressure and permeability, causes the long-time trend abnormal change of subsurface fluid in the early stage of preparation earthquake. The tectonic stress slowly enhancing and congregating to future seismic center cause the change to migrate into future seismic center. The continuously upwelling of deep material and increment influencing range make the change migrate from future seismic center to outlying zone.

Key words: Subsurface fluid; Crustal deformation; Strong earthquake; Long-time trend change; Seismic precursor; Mechanism

0 引言

观测资料研究表明,地震前特别是强震前地下流体经常出现长趋势变化,其范围广、时间早^[1-3],如1998年1月10日张北6.2级地震前,离震中420 km的河北昌黎井1994年观测到地下流体长趋势变化;1976年7月28日唐山7.8级大地震前,从1973年初开始地下流体在以往多年基本平稳的背景上出现大范围的趋势性转折变化,如地下水位回升或下降减缓等。然而,以前地下流体学科的研究重点为中短期和短临异常的变化^[4-9],对于地下流体长趋势变化研究甚少,如强震前地下流体长趋势变化特征及其产生机理。过去研究结果普遍认为地下流体异常的主要机制是岩石扩容,然后破裂而产生地下流体异常。但是这样远距离、大范围、早期出现的异常即长趋势变化是无法用岩石扩容破裂的机制来解释的,显然这主要是针对地震孕育的中短期或短临过程的前兆异常产生机理^[10-13]。本文在分析华北地区自1976年以来 $M_s \geq 6.0$ 地震(不含余震)前地下流体长趋势变化的特征和对比研究地壳形变与地下流体长趋势变化的基础上,给出了强震前地下流体长趋势变化产生的机理,并从资料、实验、理论上给予佐证。

1 资料收集整理

我国大规模的地下流体观测大概始于上世纪60年代末和70年代初,而华北地区(北京、河北、山西、内蒙中部等地区)是我国地下流体观测资料时间相对较长、观测井(泉)及观测项较多的地区。自1976年唐山地震以来,华北地区共发生 $M_s 6.0$ 以上地震3次(不包括余震),即1976年唐山7.8级地

震、1989年大同6.1级地震和1998年张北6.2级地震。我们收集了该地区自观测以来的地下流体资料,包括观测时间较长而目前停测的观测资料。资料时间跨度一般要求10年以上且连续。技术筛选主要依据地质构造、水文地质条件、观测工作规范、非地震因素、震例、文献以及与其他前兆观测资料(如形变)的关系等,选出具有可靠异常的水点与观测项资料。趋势改变时间的判定和形态确定全部使用原始观测资料的月均值进行,以有利于特征的确定特别是趋势改变时间的确定。

目前,华北地区共有地下流体前兆观测台项155项,其中水位71个台项,水温33个台项,水氦26个台项,水汞11个台项,其它观测(土壤气、逸出气、离子等测项)14个台项。图1(a)为华北地区地下流体井(泉)观测分布图。通过资料的收集与研究发现,3次强震前地下流体均出现了长趋势的改变(表1)。

2 地下流体长趋势变化的时空演化特征

2.1 地下流体长趋势变化特征

(1) 地下流体长趋势变化范围广。如1998年1月10日张北6.2级地震前,离震中420 km的河北昌黎井与离震中704 km的山西夏县井都观测到典型的地下流体长趋势变化。

(2) 地下流体长趋势变化出现时间早。如张北地震前昌黎井地下流体自1994年就开始出现长期趋势变化(图2);而1976年唐山7.8级大地震前从1973年初开始部分地下流体在以往多年基本平稳的背景上出现趋势性转折变化(图3)。

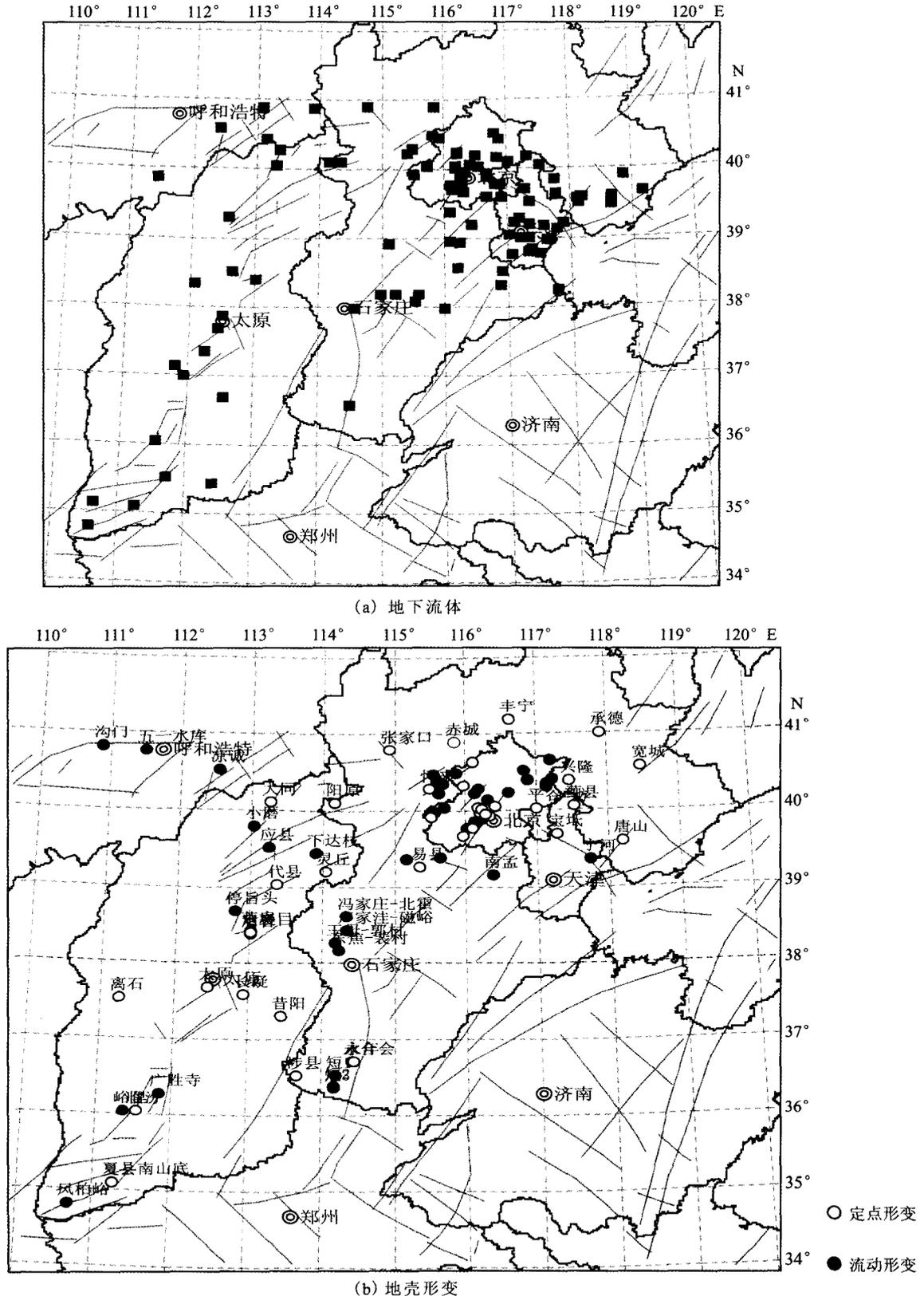


图1 华北地区地下流体、地壳形变观测场地分布图

Fig. 1 Distribution of observing sites of subsurface fluid and crustal deformation in North China.

表1 强震前地下流体长趋势变化特征表

地震			测项与数目	长趋势变化特征			地下水类型	震中距/km
时间	地点	震级/M		开始时间	超前时间/月	形态		
1976-07-28	唐山	7.8	滦县气象站、双桥等 17 项水位,管庄、文安等 2 项水氡	1973-01 ~ 1974-03	28 ~ 42	趋势改变缓慢上升或下降减缓	承压水 18 项、无压岩溶水 1 项	45 ~ 170
			八宝山、海淀等 2 项水位	1973-09 ~ 1974-07	24 ~ 34	趋势改变破年变上升变化	无压岩溶水 1 项 承压水 1 项	175 ~ 180
			丰台台水位	1973-08	35	趋势改变大幅上升即加速变化	无压岩溶水	183
1989-10-19	大同	6.1	W4 水氡,静乐、天船等 6 项水位	1985-04 ~ 1985-10	48 ~ 54	趋势改变缓慢上升或下降减缓	承压水 7 项	285 ~ 590
			定襄水氡,大灰厂、太原等 3 项水位	1985-04 ~ 1986-10	36 ~ 54	趋势改变缓慢向下	承压水 3 项、无压岩溶水 1 项	190 ~ 590
			太原水氡,丰南、唐山矿等 2 项水位	1986-07 ~ 1985-07	39 ~ 51	趋势改变大幅上升	承压水 3 项	260 ~ 370
1998-01-10	张北	6.2	凉城、海淀等 10 项水位,松山、W3 等 9 项水氡,宝坻水温,W4 水汞	1993-10 ~ 1995-09	28 ~ 51	趋势改变缓慢上升或下降减缓	承压水 21 项	136 ~ 704
			兴和、三号地等 9 项水位,清水河水氡,松山水汞	1994-06 ~ 1995-10	27 ~ 43	趋势改变大幅上升即加速变化	承压水 10 项、半承压水 1 项	26 ~ 420
			五里营、夏县等水位 3 项,怀来 4 水汞	1994-02 ~ 1995-12	25 ~ 47	趋势改变缓慢下降趋势改变	承压水 4 项	120 ~ 704
			霍州水位	1994-07	42	下降加速	承压水	650

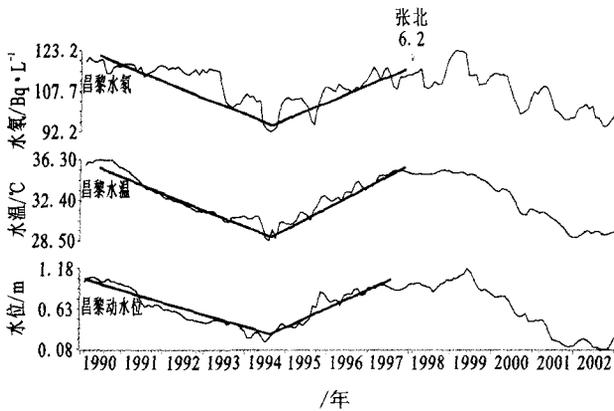


图2 张北6.2级地震前河北昌黎井地下流体变化曲线图

Fig.2 Subsurface flow variation of Changli well in Hebei province before Zhangbei M_s 6.2 earthquake.

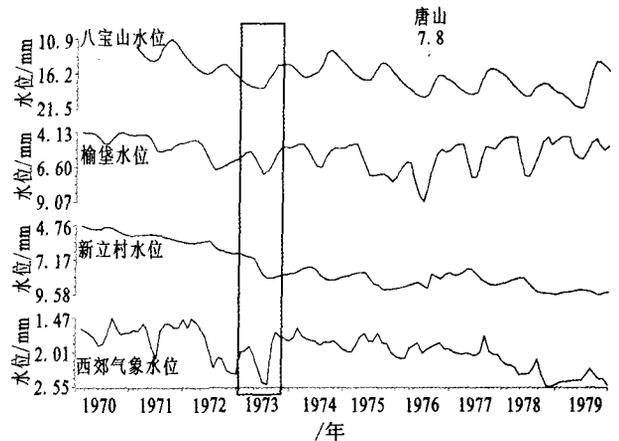


图3 唐山7.8级地震前部分地下水位长趋势变化图

Fig.3 The long-time trend changes of groundwater level before Tangshan M_s 7.8 earthquake.

(3) 地下流体长趋势变化形态主要为趋势转折、破年变、加速等变化。如图3所示唐山7.8级地震前部分地下水位长趋势变化,其形态为趋势转折、破年变等;图2也显示在张北6.2级地震前该井地下流体发生了长趋势转折变化;图4(a)为唐山7.8级地震前大灰厂水位长趋势变化图,其形态为加速变化。在3种形态变化中趋势转折形态最多,即使是最少的张北地震也占64.86%,平均占73.97%;最少为破年变变化形态,平均占4.11%(表2)。而进一步从地下水位升降变化分析表明,在唐山7.8级地震、大同6.1级地震以及张北6.2级地震前长

趋势变化大部分呈现为缓慢上升或下降减缓变化,分别为100.00%、77.78%和77.27%,平均为86.79%(表1.3)。

表2 地下流体长趋势变化形态分析表

地震时间	地点	震级/M	变化形态(数量/百分比/%)			总观测项
			趋势转折	破年变	加速变化	
1976-07-28	唐山	7.8	19/86.36	2/9.09	1/4.55	22
1989-10-19	大同	6.1	11/78.57	0/0	3/21.43	14
1998-01-10	张北	6.2	24/64.86	1/2.70	12/32.43	37
合计			54/73.97	3/4.11	16/21.92	73

(4) 地下流体长趋势变化具有协调性,即各种

表3 地壳形变张压变化与地下水位升降变化对比分析表

地震			地壳形变							地下水位		
时间	地点	震级	总场地	压性场地	张性场地	无法确定场地	压性场地/总场地	压性场地/(压性+张性)场地	总场地	上升场地	下降场地	上升场地/总场地
1976-07-28	唐山	7.8	9	8	0	1	88.89 %	100.00 %	22	22	0	100.00 %
1989-10-19	大同	6.1	22	16	1	5	72.73 %	94.12 %	9	7	2	77.78 %
1998-01-10	张北	6.2	44	21	13	10	47.73 %	61.76 %	22	17	5	77.27 %

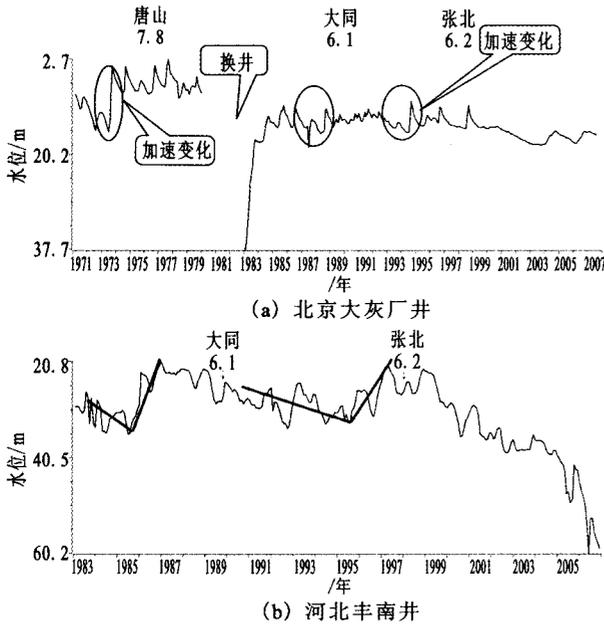


图4 地下水位月均值变化图

Fig. 4 The monthly mean change of groundwater levels.

地下流体长趋势变化的一致性。如河北的昌黎井具有多种地下流体观测手段,包括地下水位、水氡、地温等,1994年年中左右均出现长趋势变化异常(图2)。而不同的观测井在强震前长趋势变化的时间也比较一致,如1976年唐山大地震前北京地区的八宝山、榆堡以及天津地区的新立村、西郊气象站等井的地下水位从1973年初开始回升或下降减缓(图3)。

(5) 地下流体长趋势变化具有迁移性。研究发现:一些强震前地下流体长趋势变化具有向未来震中迁移的特征,如1998年张北6.2级地震,离震中704 km的山西夏县井地下流体1993年底就开始出现长期趋势改变异常,离震中313 km山西奇村井地下流体1994年年中出现长期趋势改变异常,而离震中几十公里的兴和井静水位、三号地静水位、五里营动水位、凉城静水位等1995年才出现长期趋势改变异常(图5)。而另一些强震前地下流体长趋势变化却具有未来震中向外迁移的特征,如唐山7.8级地震前的地下流体长趋势变化,在震中附近的荒草坨水位($\Delta = 90$ km)于1973年1月出现,而较远的大

灰厂水位($\Delta = 183$ km)于1973年10月出现。图6清楚的反映了这一关系:即离震中越近,长趋势变化出现时间越早,反之越晚。

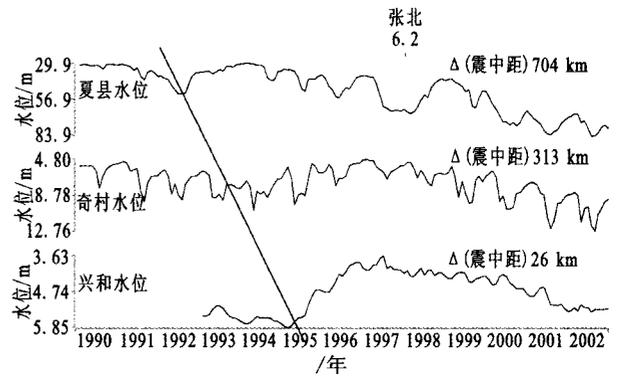


图5 张北6.2级地震前部分地下流体长趋势变化图

Fig. 5 The long-time trend changes of subsurface flow variation before Zhangbei M_s 6.2 earthquake.

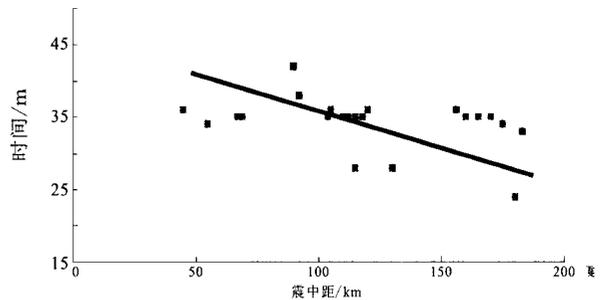


图6 唐山地震前地下流体长趋势变化时间与震中距关系图

Fig. 6 The relational graph of long-time trend change of subsurface flow between time and epicentral distance before Tangshan M_s 7.8 earthquake.

(6) 地下流体长趋势变化的重复性,即同一地下流体观测资料在不同强震前出现长趋势动态变化的特征。如北京大灰厂井地下水位在1976年唐山7.8级地震、1989年大同6.1级地震、1998年张北6.2级地震前均在震前3~4年左右出现长趋势动态变化(图4(a))。河北丰南井地下水位在1989年大同6.1级地震、1998年张北6.2级地震前也在震前3~4年左右出现长趋势动态变化(图4(b))。

2.2 地下流体长趋势变化时空演化特征

地震前特别是强地震前地下流体观测资料出现长趋势动态变化,其时空演化特征主要表现为如前所述的向震中迁移或向外迁移的特点。其中向未来震中迁移主要沿构造带进行,其交汇处就是未来地震震中。如张北地震其迁移路径主要为山西带和张渤带,张北地震就发生在两带迁移交汇处。图 5 表明了山西带上三个井(泉)的三个观测项的迁移路线。唐山 7.8 级地震地下流体长趋势变化分布于张渤构造带和华北平原构造带^[14],而唐山地震就发生在张渤构造带和华北平原构造带交汇点,其演化过程是由震中小范围向外部迁移变化,迁移路径也主要沿构造带进行的。

3 地下流体与地壳形变长趋势变化的

关系

地震前兆系地震孕育过程中发生的互为因果关系的、地壳内部发生的物理化学变化。各种前兆相互联系、相互作用、相互影响,既具有一定的相关性,也具有一定的差异性,特别是地下流体与地壳变形。我们对比研究了华北地区强震($M_s \geq 6.0$,不含余震)前地下流体与地壳形变长趋势变化。

图 1(b)是华北地区地壳形变前兆观测台项分布图。形变资料处理与流体资料处理相同,即资料时间跨度一般要求 10 年以上且连续,全部使用原始观测资料的月均值进行趋势变化时间的判定和形态确定,并尽量给出能反应观测场地或断层的构造应力变化的情况,即张压变化情况。分析发现 3 次强震前地壳形变均出现长趋势变化(表 4)。

表 4 强震前地壳形变长趋势变化特征表

地震			测项与数目	长趋势变化特征			震中距 /km
时间	地点	震级/M		开始时间	超前时间/月	形态及活动性质	
1976-07-28	唐山	7.8	香河、夏垫斜交等 12 项水准, 丰台伸缩	1972-07 ~ 1974-03	28 ~ 48	压性活动	95 ~ 235
			强子路斜交、大灰厂斜交等 4 项基线	1973-04 ~ 1974-03	27 ~ 38	反扭活动	130 ~ 235
			大灰厂直交基线	1973-08	35	张性活动	180
			丰台、牛口峪等 5 项倾斜	1972-10 ~ 1973-12	31 ~ 45	东倾、北倾、西倾等活动	183 ~ 187
1989-10-19	大同	6.1	下达枝、凉城等 22 项水准, 小水峪、大灰厂等 2 项直交基线, 丰台、房山等 2 项伸缩	1984.4 ~ 1986-11	35 ~ 66	趋势改变压性活动或张性减缓(活动)22 项; 破年变压性活动 1 项; 突变变化压性活动 3 项	50 ~ 400
			德胜口水准	1986-03	43	趋势变化缓慢张性	220
			燕家台、小水峪等 6 项斜交基线	1985-04 ~ 1986-10	36 ~ 54	趋势改变反扭活动或顺扭减缓 4 项; 破年变反扭活动 2 项	150 ~ 310
			上万、大灰厂等 2 项斜交基线	1985-06 ~ 08	50 ~ 52	趋势变化顺扭活动 2 项	205 ~ 212
			丰台、房山等 2 项倾斜, 永年等 2 项水管	1985-01 ~ 1986-01	45 ~ 57	趋势变化, 东倾 1 项、北东倾 1 项、西倾 1 项、南倾 1 项	210 ~ 390
1998-01-10	张北	6.2	小水峪斜交、大同等 21 项水准, 上万直交基线, 张家口伸缩, 张家口体应变	1993-12 ~ 1995.11	26 ~ 49	趋势改变压性活动或张性减缓(活动)23 项; 趋势改变加速压性活动 1 项	60 ~ 754
			张山营、燕家台等 17 项水准, 丰台伸缩, 小水峪直交基线	1994-04 ~ 1995-08	29 ~ 45	趋势变化张性活动或压性减缓(活动)19 项	123 ~ 321
			小水峪、施庄村等 6 项斜交基线	1994-01 ~ 1995-07	30 ~ 48	趋势改变反扭活动或顺扭减弱 5 项, 破年变反扭活动 1 项	123 ~ 237
			张家口、怀来等 15 项倾斜, 易县等 3 项短水准	1993-08 ~ 1995-10	27 ~ 53	趋势变化, 北倾 4 项、西南倾 1 项、西北倾 1 项、西倾 5 项、南倾 3 项、北东倾 1 项、东倾 3 项	60 ~ 508

根据表 1 与表 4 对比分析发现,在强震前的长趋势变化中地壳形变出现张压变化与地下水位变化有比较密切的关系,即形变绝大部分出现缓慢压性变化或张性减缓变化,水位大部分出现缓慢上升或下降减缓变化(表 4)。在 3 次强震中,能够明确确定张压性的观测场地中,观测场地压性活动最少占

61.76% (张北地震),而水位出现上升变化最少占 77.78% (张北地震)(表 3)。

地下流体与地壳形变长趋势变化时间与数量分析发现,地壳形变长趋势改变时间主要集中在震前 35 ~ 54 个月之间,占 76.74%,最早出现时间在地震发生前 66 个月,最晚出现时间为 26 个月。而地

下流体最早出现趋势变化的时间在地震发生前 54 个月,最晚为 24 个月,主要集中在震前 33 ~ 50 个月之间,占 79.45 %。所以在强震前长趋势变化中,地壳形变较早于地下流体(图 7)。

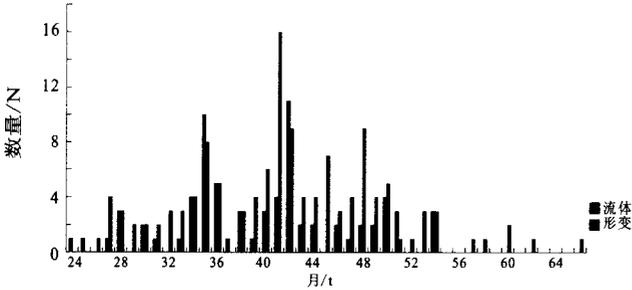


图 7 华北地区强震前地下流体与地壳形变长趋势变化时间与数量

Fig. 7 The long-time trend changes of subsurface fluid and crustal deformation in time and amount before strong earthquake in North China .

4 地下流体长趋势变化产生机理

4.1 地下流体长趋势变化产生机理

前面研究表明,强震前地下流体长趋势变化出现范围广、时间早,具有协调性、重复性、向未来震中迁移等特征,形态主要为趋势转折、破年变、加速等,其中绝对大多数为趋势转折变化形态;而进一步从地下水位分析表明,长趋势变化的改变绝大部分呈现为缓慢上升或下降减缓的走势。与此同时,地壳形变也出现了远距离与早期的长趋势动态变化且先于地下流体并以缓慢压性活动为主。在此基础上笔者提出地下流体长趋势动态变化的机制:地震孕育可以分为水平构造应力控制为主的地震孕育和垂直构造应力控制为主的地震孕育。在地震孕育过程初(早)期,构造应力缓慢增强将使岩体所含裂缝闭合,地壳发生变形,从而改变岩体的空隙率及相应的孔隙压力和渗透率,导致观测井水动力状态或条件的变化,由此引起地下流体长趋势动态异常变化,如地下水位、水温、水氡等。随着地震孕育的进行,水平构造应力控制为主的地震孕育,构造应力缓慢增强并向未来震中聚集,从而造成在此过程中地下流体长趋势动态异常变化向震中迁移;而垂直构造应力控制为主的地震孕育,随着物质的不断上涌和影响范围增大^[15-16],地下流体长趋势动态异常变化向外围迁移。

4.2 观测实例

下面进一步通过典型的观测井资料分析在强地

震前地下流体长趋势变化产生的原因。

河北昌黎井地处燕山山前平原,饮马河冲积扇上,距张北地震震中 420 km。该井为地热异常区温泉钻孔,孔深 301.04 m,地表至 76 m 有两层以粘土为隔水底板的细砂及砂砾石含水层。地下水类型为脉状裂隙水。由于该井含水层上覆两层较厚的粘土隔水层,不具备当地降水补给的条件,补给区为北部山区及北东向低山丘陵区,排泄于上覆松散层的中粗砂夹砾石含水层,为自流井,水头高度在地表以上 4.17 m,水温 38 ℃,表明该井具有低流量、高压、深循环的特征。从图 2 可以看出,该井地下流体年周变较小,从 1990 年后水位缓慢下降,水氡、水温也下降,表明该井地下水补给源较远,地下水循环深度大,不受井区降水补给的影响。1994 年年中以后地下水位、水氡、水温均开始发生趋势性转折且同步,呈现趋势性的缓慢上升。我们认为这一变化即反映了区域构造应力的缓慢增强过程。由于空隙压、热流值和渗透系数等发生变化,从而使地下水位、水温、水氡等发生变化。

4.3 实验分析

图 8(a)是典型的应力 - 应变关系曲线^[17]。在 OA 段,应力 - 应变曲线呈缓慢向上变化,表明随应力的缓慢增加应变也缓慢增长,从微观机制来看,是由于天然岩石中存在许多微裂缝在应力作用开始闭合而造成,即在应力很小的条件下发生了应变。

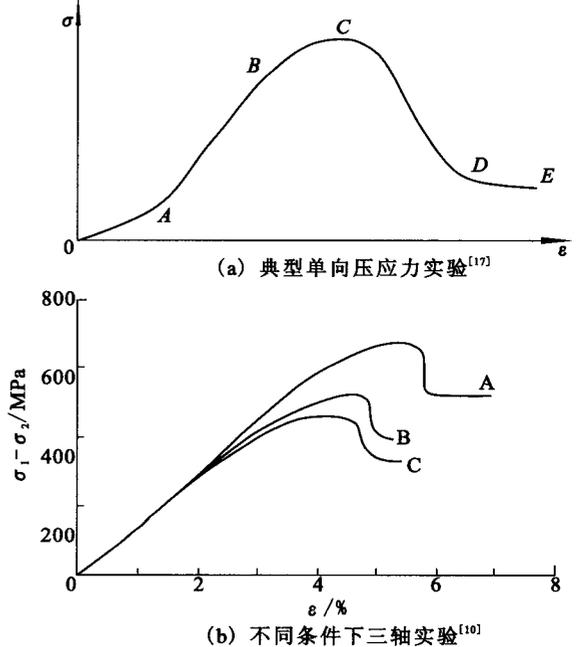


图 8 岩石应力 - 应变实验结果

Fig. 8 Results of rock stress-strain experiment.

图8(b)是不同条件下细砂岩试件的应力-应变曲线图^[10]。其中,A为干试件、无孔隙压力、常温的实验曲线;B为NaCl溶液浸泡35天试件、围压200 MPa、孔隙压力100 MPa、常温的实验曲线;C为NaCl溶液浸泡35天试件、围压200 MPa、孔隙压力100 MPa、200℃的实验曲线。发现在实验的初期即应力水平比较低的条件下,各试件均发生应变,表明许多微裂缝在低应力作用开始闭合。

4.4 理论分析

地震前兆的产生,一般认为是地壳介质的应力-应变作用及其介质变形破坏的结果。地震地下流体前兆的产生是以饱水介质中的应力、应变及其孔隙压力变化为基础的。下面通过理论分析当地震孕育过程的力学作用影响到含水层时,含水层发生变形并改变水流状态是否影响地下水位、水温、水氡等。

4.4.1 应力-应变

饱水岩石中应力-应变的本构关系,最初由Terzaghi于20世纪20年代提出,后经比奥^[18-19]、努尔和拜尔利^[20]进一步完善,1982年由Palciauskas^[21]建立了考虑热效应在内的如下表达式:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2\mu_s} \left(\sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} \right) + \frac{1}{9K_b} (\sigma_{kk} \delta_{ij}) - \frac{1}{3H} P \delta_{ij} - \alpha_r (T - T_0)$$

式中, ε_{ij} 为应变; σ_{ij} 为应力; σ_{kk} 为正应力; K_b 是饱水介质的体积模量; δ_{ij} 为Kronecker得塔数; μ_s 为剪切模量; H 是Biot系数; P 为孔隙压力; α_r 为线性热膨胀系数; T 为温度。

而在任何一种力的作用下,地下流体系统内部的压力变化时地下流体将发生运动,其运动一般方程为^[22]

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[K_{ij} \left(\frac{\partial P}{\partial x_j} + \rho g \frac{\partial z}{\partial x_j} \right) \right] = S'_s \frac{\partial P}{\partial t} - \left(\frac{S'_s B}{3} \right) \left(\frac{\partial \alpha_{kk}}{\partial t} \right) - D \frac{\partial \tau}{\partial t} - \alpha_r \varphi \frac{\partial T}{\partial t} + \rho g \frac{\partial \varphi}{\partial t}$$

该式的左边为水流的变化;右边第一项为孔隙压力变化引起的水流变化;第二项为正应力变化引起的水流变化;第三项为膨胀变形引起的水流变化;第四项为热弹性变化引起的水流变化;第五项为化学反应导致的孔隙率的变化引起的水流变化。式中 ρ 为流体的密度; g 是重力加速度; K_{ij} 为水力传导性参数(与介质的特性有和流体的粘滞性等有关); P 为孔隙压力; S'_s 为三维单位贮水率; B 为在流体不流动

的情况下,平均应力变化而引起的孔隙压力变化; τ 为最大差应力; D 为膨胀系数^[22]; α_{kk} 为正应力作用下的热膨胀系数; φ 是介质的孔隙率。

4.4.2 热迁移变化

当饱水岩体中有水流动时,水温发生变化,可以用对流、扩散-弥散引起的热迁移变化来表达,其热迁移方程为^[23]

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(L_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} (v_i \rho C_p T) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

式中 L_{ij} 为热弥散系数,即为岩石介质与流体组成的孔隙介质的热传导率; C_p 为等压热容量; T 为以 v_i 速度流动着的流体的温度; ρ 为密度。

该方程描述了地下流体在多孔介质中的渗透、流动等过程中的温度与热容量的能量迁移规律。方程中的左边第一项为热传导或热弥散引起的变化;第二项是热平流或对流引起的变化;右边一项表示温度的变化。

4.4.3 化学组分变化

当饱水岩体中有水流动时,里面包含的化学组分同样也要随之发生变化。其变化一般存在4种机制,即浓度差引起的扩散作用、水流引起的水动力弥散作用、产生新组分的水岩相互作用与新的水流混入引起的平流作用。其一般表达式写为^[24]

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (C v_i) + \sum_{k=1}^s R_k = \frac{\partial C}{\partial t}$$

式中, D 为弥散系数,该系数为机械弥散系数与分子扩散系数的总和; C 为化学组分的浓度; v 为水流速度; R_k 为第 k 次化学反应产生溶质的速度。

由于在较短的时间尺度内水-岩相互作用的影响极为微弱,在岩体变形阶段也不会产生新的水流混入,因此多数情况下化学组分的变化是扩散与弥散及水流迁移引起的。在这一种情况下化学组分的变化可以表述如下^[3]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij}^* \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (C v_i) = \frac{\partial C}{\partial t}$$

从上述分析可以看出,在地震孕育过程中,当随着应力的增强影响到含水层时,含水层发生变形并改变水流状态,从而引起地下流体发生变化,如水位、水温、水氡等。

5 前兆异常产生的机理

(1) 地震孕育可以分为水平构造应力控制为主的地震孕育和垂直构造应力控制为主的地震孕育。在地震孕育过程初(早)期,构造应力缓慢增强将使

岩体所含裂缝闭合,地壳发生变形,从而改变岩体的空隙率及相应的孔隙压力和渗透率,导致观测井水动力状态或条件的变化,由此引起地下流体长趋势动态异常变化,如地下水位、水温、水氧等。随着地震孕育的进行,水平构造应力控制为主的地震孕育,构造应力缓慢增强并向未来震中聚集即未来震中应

力逐渐增强,从而造成在此过程中地下流体长趋势动态异常变化向震中迁移;而垂直构造应力控制为主的地震孕育,随着物质的不断上涌和影响范围增大,地下流体长趋势动态异常变化向外围迁移(图9)。

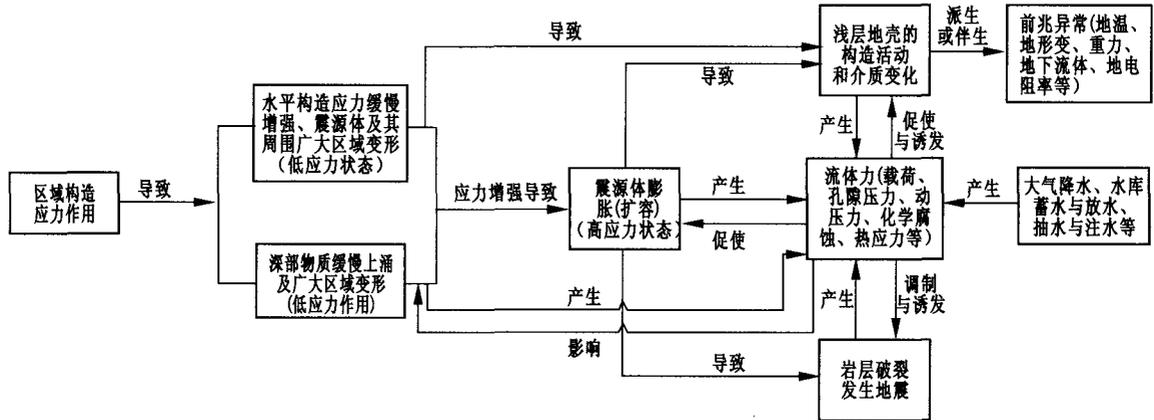


图9 前兆异常产生机理及过程示意图

Fig. 9 The mechanism and process sketch of seismic precursor anomaly.

(2) 震源体及其附近构造应力增强到一定程度时,将产生膨胀(扩容)(图9)。当震源体膨胀(扩容)波及到上方的浅层地壳时产生浅层的变形异常,同时为地壳中包含的各种流体开通其活动和流通的渠道,使流体涌入浅层,并引起地下流体、地电等前兆异常^[12-13]。

(3) 扩容区不断增大,若所产生的裂缝到达下方的深部流体处时,由于其压力相对高于上方扩容区的压力,深部流体物质就在吸与压的联合作用下侵入扩容区。而后由于深部流体温度较高,其所带来的热力学效应一方面使介质强度降低,扩容区孔隙压回升而加剧孕震过程的发展;另一方面产生的热应力使地壳浅层出现张性应力并产生一些张性裂纹,当这些张性裂纹与扩容区贯通时扩容区内的高压流体将沿裂隙上涌至地表浅层,并引起诸如地下水位、地温、形变、重力等前兆异常^[12-13]。

(4) 在地震孕育过程中,流体的异常变化(包括诸如降水、地表水等流体变化)将产生流体力。在流体力作用下引起地壳应力—应力场调整变化,促使与诱发浅层构造变动。浅层的构造变动一方面可调制与诱发深部构造活动并促进地震发生,另一方面则派生或伴生出地形变、地应力、水化学及地电阻率等浅层前兆异常(图9)^[12-13]。

通过对华北地区 $M_s \geq 6.0$ 地震前地下流体长趋势变化特征以及与地壳形变的对比分析,并结合资料、实验、理论等分析研究了强震前地下流体长趋势变化产生的机理。得到结果如下:

(1) 强震前地下流体长趋势变化的出现时间早、范围广,具有协调性、重复性、向未来震中迁移等特征,形态主要为趋势转折、破年变、加速等,其中绝对大多数为趋势转折变化形态;进一步从地下水位分析表明,长趋势变化绝大部分呈现为缓慢上升或下降减缓的走势。

(2) 不同强震前地下流体长趋势变化的迁移方向不同,一种是由外围广大地区向内迁移;另一种是由内部地区向外围广大地区迁移。迁移路径主要沿构造带进行。外围向内迁移其交汇处就是未来地震震中;内部地区向外迁移发散处就是未来地震震中。

(3) 在强震前的长趋势变化中,形变出现张压变化与水位变化有比较密切的关系。即形变绝大部分出现缓慢压性变化或张性减弱减缓变化,水位绝大部分出现缓慢上升或下降减缓变化;地壳形变长趋势时间较早于地下流体长趋势变化时间。

(4) 构造应力变化是引起诸如地下流体长趋势变化的原因。当震源体及其附近构造应力增强到一定程度时,将产生膨胀(扩容)破裂,引起地下流体、地电等前兆异常。流体异常的变化又产生流体力,引起地壳应力—应力场调整变化,促使与诱发浅层

6 结语

构造变动。浅层的构造变动一方面可调制与诱发深部构造活动并促进地震发生,另一方面则派生或伴生出地形变、地应力、水化学及地电阻率等浅层前兆异常。

致谢:山西省地震局、河北省地震局、北京市地震局、天津市地震局、内蒙古自治区地震局、中国地震局地壳应力研究所、中国地震局地质研究所及中国地震台网中心等单位提供部分地壳形变、地下流体资料,在此表示衷心感谢!

[参考文献]

- [1] 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.
- [2] 国家地震局预测预防司. 地下流体地震预报方法[M]. 北京:地震出版社,1997.
- [3] 车用太,鱼金子,刘五洲. 水氢异常的水动力学机制[J]. 地震地质,1997, 19(4):353-357.
- [4] 邵永新,李君英,李一兵,等. 地下流体动态异常分布与构造的关系[J]. 西北地震学报,2000,22(3):284-287.
- [5] 刘耀炜,施锦. 强震地下流体前兆信息特征[J]. 地震学报,2000,22(1):59-64.
- [6] 邵永新,李君英,田山,等. 唐山7.8级地震前后地下流体动态异常演化特征[J]. 西北地震学报,2001,23(1):26-29.
- [7] 黄辅琼,邓志辉,顾瑾平,等. 张北地震地下流体异常场的研究[J]. 地震,2002,22(4):114-122.
- [8] 张立,唐采,王世芹,等. 宁蒗6.2姚安6.5和水胜6.0级地震前地下流体的短期变化[J]. 地震研究,2003,26(1):149-156.
- [9] 陆明勇,黄辅琼,刘善华,等. 地壳变形与地下水相互作用及其异常关系初探[J]. 地震,2005, 25(1):67-73.
- [10] 车用太,刘五洲. 板内强震的中地壳硬夹层孕震与流体促震假设[J]. 地震学报,2000,22(1):93-101.
- [11] 陆明勇,牛安福,鲁德顺,等. 地壳形变与地下水动态异常特征研究进展[J]. 西北地震学报,2005,27(1):89-95.
- [12] 陆明勇. 地壳形变与地下水相互作用及“双力源”前兆观点[J]. 大地测量与地球动力学,2006,26(1):76-83.
- [13] 陆明勇. “双力源”地震前兆观点的进一步探讨[J]. 大地测量与地球动力学,2007,27(4):105-111.
- [14] 国家地震局一九七六年唐山地震编辑组. 一九七六年唐山地震[M]. 北京:地震出版社,1982.
- [15] 徐常芳. 壳内流体演化及地震成因(三)[J]. 地震学报,1997, 19(2):139-144.
- [16] 张永仙. 热应力三维数值模拟研究及热物质的运移在地震孕育过程中的作用探讨[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所,1999.
- [17] 陈颢. 地壳岩石的力学性能-理论基础与实验方法[M]. 北京:地震出版社,1988:30.
- [18] Biot M A. Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid[J]. Journal of Applied Physics, 1955, 26: 182-185.
- [19] Biot M A. Thermoelasticity and irreversible thermodynamics[J]. Journal of Applied Physics, 1956, 27:240-253.
- [20] Nur A, Byerlee J D. An exact effective stress law for elastic deformation of rocks with fluids[J]. Journal of Geophysical Research, 1971, 76:6414-6419.
- [21] Palciauskas V V, Domenico P A. Characterization of drained and undrained response of thermally loaded repository rocks[J]. Water Resources Research, 1982, 18:281-290.
- [22] Palciauskas V V, Domenico P A. Microfracture development in compacting sediments: Relations to hydrocarbon-maturation kinetics[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1980, 64:927-937.
- [23] Domenico P A. Transport phenomena in chemical rate processes in sediments[J]. Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences, 1977, 5:287-317.
- [24] John D, Denis L. Mass and Energy Transport in a Deforming Earth's Crust, The Role of Fluids in Crustal Processes[M]. Washington: National Academy Press, 1990:27-41.

(上接 111 页)

- [11] 张希,江在森,王双绪,等. 川滇地区地壳水平运动的弹性块体边界负位错模型与强震地点预测[J]. 地震研究,2005,28(2):119-124.
- [12] 顾国华. 形变监测网的基准与形变模型反演[J]. 地壳形变与地震,1990,10(1):21-29.
- [13] 江在森,张希,崔笃信,等. 青藏块体东北缘近期水平运动与变形[J]. 地球物理学报,2001,44(5):636-644.
- [14] 王双绪,丁平,张希,等. 利用 GPS 资料研究印尼 8.7 级地震对我国西部地震趋势的影响[J]. 西北地震学报,2005, 27(4):322-327.
- [15] 杨国华,江在森,王敏,等. 印尼地震对我国川滇地区地壳水平运动的影响[J]. 大地测量与地球动力学,2006,26(1):11-20.