

# 民乐—山丹地震地下流体异常场 特征及其成因分析

张新基<sup>1</sup>, 张 慧<sup>2,3</sup>, 张 昱<sup>1</sup>, 李晓峰<sup>1</sup>

- (1. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000;  
2. 中国地震局地震预测研究所兰州基地, 甘肃 兰州 730000;  
3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:**介绍了 2003 年 10 月 25 日民乐—山丹  $M_s 6.1$  地震前地下流体异常场的时空特征及其演化, 分析了地下流体异常场的成因。研究结果表明, 民乐—山丹地震地下流体前兆场具有异常时间长、异常项次多、异常范围大的特征, 其原因是受青藏块体整体构造和地震活动水平增强以及 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 地震的影响。

**关键词:** 民乐—山丹地震; 地下流体; 异常场; 成因

**中图分类号:** P315.72<sup>+</sup>3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2005)02-0168-06

## Characteristics of Subsurface Fluid Anomaly Field and Its Genesis before Minle-Shandan Earthquake

ZHANG Xin-ji<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>2,3</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>, LI Xiao-feng<sup>1</sup>

- (1. Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou 730000, China; 2. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, China; 3. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The temporal and spatial characteristics of the subsurface fluid anomalous field and its evolution before Minle—Shandan earthquake on Oct. 25, 2003, are presented. The causing of anomalous field of subsurface fluid is analyzed. The research results show that the characteristics of subsurface fluid precursory field before Minle—Shandan earthquake are long anomalous period, much anomalies and large anomalous area. The reason for these characteristics is the increasing of tectonic and seismic activities of the whole Qinghai-Tibet Plateau and the influencing of west to Kunlunshan pass  $M_s 8.1$  earthquake on November 14 of 2001.

**Key words:** Minle—Shandan earthquake; Subsurface fluid; Anomaly field; Genesis

## 0 引言

2003 年 10 月 25 日在甘肃省民乐—山丹两县交界地区发生了  $M_s 6.1$  地震。这次地震是 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 级地震之后发生在青藏高原北部地区的 3 次主要强震之一。位于连续多年被判定为甘肃省年度重点危险区的祁连山中东段重

点危险区边界, 震前有较好的短期预报, 但没有实现临震预报。

地震之前出现了大量的流体前兆异常, 在震前确定和进行跟踪的 18 项前兆异常中占了 9 项<sup>[1]</sup>。许多台项的异常出现在昆仑山口西地震之前。通过震前的震情跟踪与异常研究, 尤其是通过震后的科

收稿日期: 2005-01-17

基金项目: “十五”地震预报科技攻关项目(2001BA601B02-02-03); 甘肃省自然科学基金资助项目。

\* 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC20050030

作者简介: 张新基(1965—), 男(汉族), 甘肃会宁人, 副研究员, 主要从事地下流体预测及相关的理论应用等研究。

学总结和反思,确认了一批信度较高的流体异常。本文以此异常为基础进行了地下流体异常场特征的研究,结果表明受青藏块体整体构造和地震活动水平的增强以及昆仑山口西8.1地震的影响,民乐地震前地下流体异常场具有异常时间长、异常项次多、异常范围大的特征。

## 1 地下流体监测及其异常

青藏高原东北缘地区各类地下流体观测的主要项目有水位(流量)、水氧、气体、水温等。本文选择

了地质构造条件好、资料连续可靠、动态稳定的44个台项的观测资料为主要研究对象,其中民乐—山丹地震前发现并跟踪的异常和震后确认的较为可靠的地下流体异常共有23个测项(表1)。按异常出现的时间统计,长期异常(3年以上)7项、中长期异常(1~3年)11项、中短期异常(3个月~1年)5项,见表2。图1为这些地下流体观测点分布图。

## 2 地下流体异常场的时空分布特征

### 2.1 地下流体异常的空间分布

表1 民乐—山丹地震地下流体观测点基本情况及趋势异常

类别	台项	位置		异常开始 时间	异常开始至 发震时间/月	震中距 /km	
		纬度	经度				
水	通渭(温泉)	35.200°	105.100°	1997-11	71	520	
	清水	34.750°	106.100°	1998-08	62	610	
	武山(22井)	34.675°	105.047°	1999-01	57	550	
	武山(1号泉)	34.678°	105.050°	1999-01	57	550	
	平凉附件厂	35.463°	106.665°	1999-03	55	600	
	灵台	35.067°	107.600°	1999-10	48	680	
	天水(花牛)	34.578°	105.752°	2000-06	40	610	
	天祝(华藏寺)	36.967°	103.133°	2001-01	33	250	
	天水(官泉)	34.567°	105.910°	200-05	29	600	
	白银(黄茂泉)	36.567°	104.013°	2001-12	22	340	
	武都(殿沟)	33.358°	104.994°	2001-07	27	670	
	庆阳镇原(三岔泉)	35.700°	107.250°	2001-08	26	640	
	贵德	36.033°	101.450°	2001-10	24	270	
	循化	35.833°	102.483°	2002-04	18	310	
	酒泉	39.750°	98.533°	2002-07	15	260	
	氧	静宁(东峡)	35.591°	105.764°	2003-03	7	530
		礼县(石岭)	34.181°	105.166°	2006-06	4	610
		靖远矿务局	36.567°	104.685°			
		红古(连城铝厂)	36.607°	102.814°			
		古浪	37.400°	102.833°			
		张掖(西武当)	38.750°	100.200°			
		平凉柳湖	35.546°	106.682°			
		西和	34.033°	105.300°			
格尔木		36.417°	97.700°				
共和		36.300°	100.600°				
湟源		36.650°	101.183°				
乐都		36.550°	102.383°				
民和		36.317°	102.800°				
西宁		36.617°	101.717°				
水位 或 流量		清水(陇07井)	34.750°	106.100°	2001-03	31	610
	静宁(陇06井)	35.348°	105.808°	2001-12	22	550	
	兰州大滩(陇18井)	36.058°	103.764°	2002-06	16	340	
	平凉(C11井)	35.463°	106.665°	2002-12	10	600	
	宁夏甘盐池	36.732°	105.410°	2003-01	9	430	
	成县(陇10井)	33.736°	105.758°				
	华亭马峡(陇05井)	35.250°	106.517°				
气 体	礼县石桥(陇09井)	34.133°	105.117°				
	庆阳	36.013°	107.875°				
	宁夏王明	36.173°	106.122°				
	嘉峪关气氧	39.813°	98.219°	2003-02	8	310	
	宁夏固原气氧	35.869°	106.140°				
水温	宁夏固原 He	35.869°	106.140°				
	宁夏固原 CO <sub>2</sub>	35.869°	106.140°				
	平凉(C11井)	35.463°	106.665°				

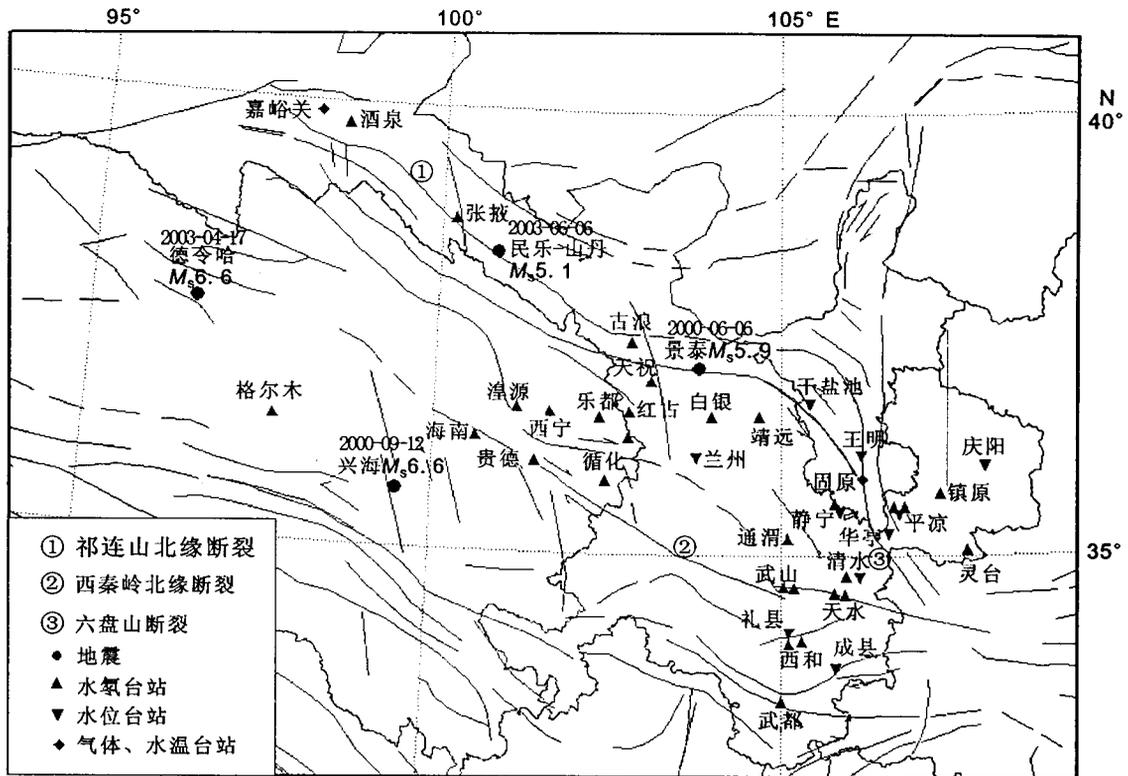


图 1 青藏高原东北缘地区地下流体观测点分布图

Fig. 1 Distribution of observation station for subsurface fluid on the northeastern margin of Qinghai-Tibet plateau.

表 2 民乐—山丹地震前青藏高原北部地区地下流体异常时间分类统计

类别	长期	中长期	中短期
水氡	7	8	2
水位	0	3	2
气体	0	0	1
水温	0	0	0
小计	7	11	5

民乐—山丹地震前地下流体异常分布较广,异常点主要沿活动断裂分布,多在祁连山断裂带、西秦岭北缘断裂带和六盘山断裂带。异常点的震中距最远可达 680 km(甘肃灵台水氡),最近为 250 km(天祝华藏寺水氡),以甘东南地区西秦岭北缘断裂带和宁夏南部地区的六盘山断裂带最为集中,23 个测项的地下流体异常中这两个地区就有 16 项,占 70%。其中有 13 项震中距在 500 km~650 km 的范围内。与以往 6 级地震相比,地下流体前兆场的分布具有明显的“远场”效应(图 2)。

2.2 地下流体异常的时间分布

民乐—山丹地震是 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 地震后,继 2003 年 4 月德令哈 6.6 级地震之后在青藏块体东北缘地区发生的又一次 6 级以上强震。从异常的时间进程上看,民乐—山丹地震前

地下流体异常场的演化可以划分为三个阶段:第一阶段从 1998 年 8 月开始,甘东南地区最早出现了多测点相对同步的地下流体异常变化,主要是一批水氡

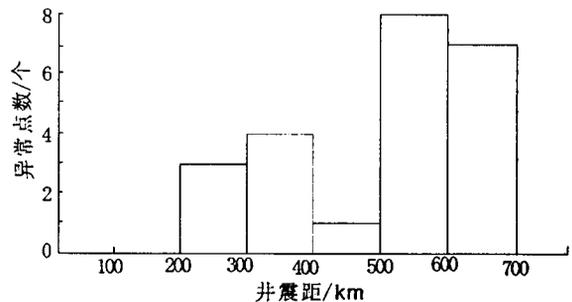


图 2 不同震中距异常井点统计

Fig. 2 Statistics for anomaly stations within different epicentral distances.

异常,包括平凉附件厂、清水温泉、武山 1 号泉、武山 22 井、通渭温泉、灵台、天水花牛水氡等 7 个测项,形态上表现为趋势下降(图 3)。第二阶段,2000 年特别是 2001 年之后又相继出现了 6 个测项的异常,包括庆阳镇原、天祝华藏寺、武都、天水官泉、青海贵德水氡和清水的流量等,与最早出现的一批异常具有相似的形态特征,除个别泉点外都表现为趋势性

下降。2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 地震之后,上述 13 个测点的异常继续保持下降趋势。除此之外又出现了 6 个新的地下流体异常测项,其中有 3 项水氡异常,分别是白银黄茂泉、酒泉、和青海循化泉;3 项水位(流量)异常,分别是静宁(陇 06 #)、兰州大滩、平凉(图 4)。第三阶段从 2002 年 12 月开始到 2003 年 7 月,昆仑山口西 8.1 地震之前出现

的 13 个测项长趋势性异常中的 11 项、8.1 地震之后出现的 6 个测项的中长期趋势性异常中的 5 项,共 16 个测项出现了准同步的转折上升变化。此外礼县石岭泉、静宁东峡水氡、宁夏甘盐池水位以及嘉峪关气氡等 4 个测项也出现了短期异常反映,主要表现为高值异常和破年变异常(图 5)。

对上述异常中甘东南地区的水氡泉点长趋势下

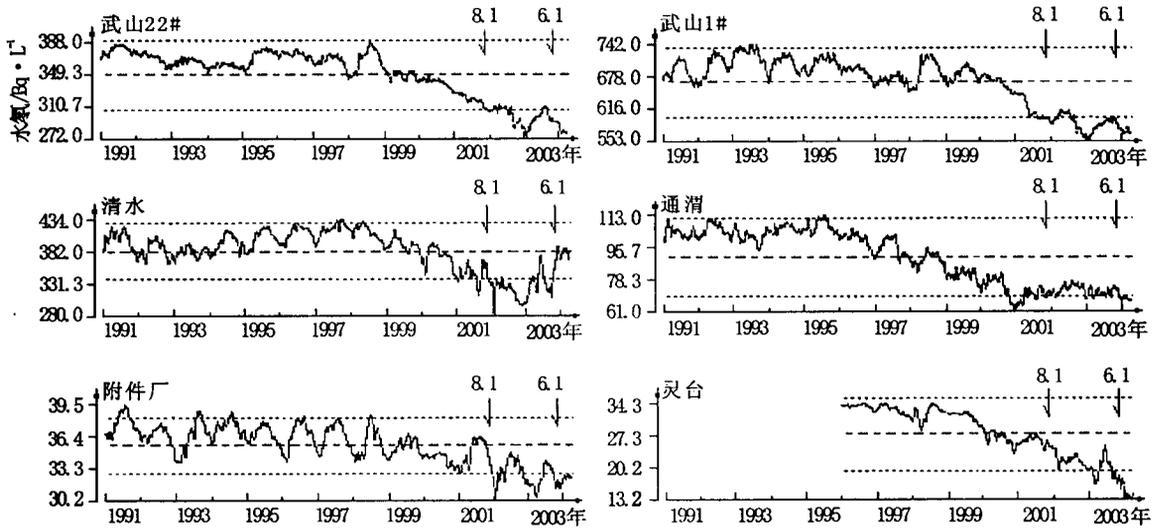
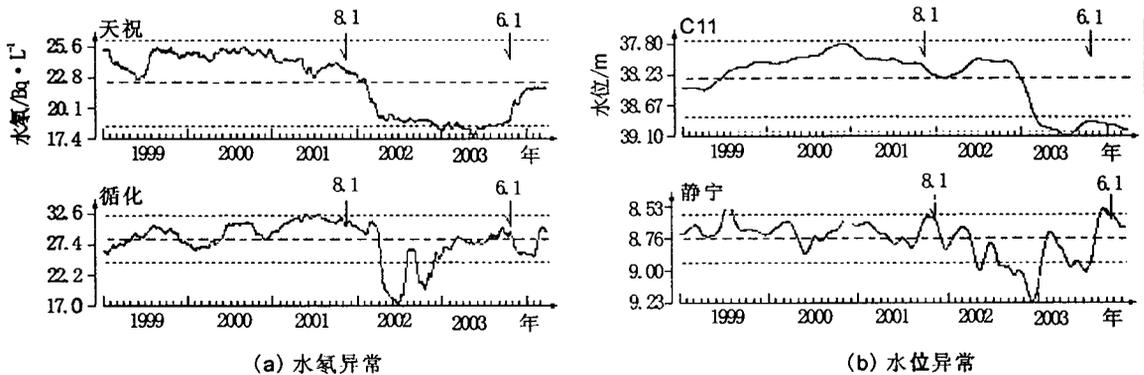


图 3 民乐—山丹地震前部分水氡长期异常

Fig. 3 Part of long-term anomalies of radon before Minle-Shandan earthquake.



(a) 水氡异常

(b) 水位异常

图 4 民乐—山丹地震前部分地下流体中期异常

Fig. 4 Part of medium-term anomalies of subsurface fluid before Minle-Shandan earthquake.

降异常曾进行了专门研究<sup>①</sup>,认为水氡下降与仪器和测试及气象因素无关。为了进一步研究异常的可靠性,我们对环境因素与水氡变化之间的关系进行了对比研究,结果表明甘东南地区水氡点自 97 年底以来相继出现的趋势性下降与室温、流量、气温、降水等环境因子及气象因素无关。图 6 为武山 1 号泉水氡趋势性变化与流量、室温、气温及降水的关系曲线。由图可见,1999 年以来水氡持续下降,而流量、室温、气温及降水并没有发生明显的变化。

### 2.3 地下流体异常的时空演化

民乐—山丹地震之前,地下流体异常空间展布随发震时间的到来表现出以下特征:(1)随发震时间的到来,地下流体异常不断由外围向震中区附近迁移,7 个测项的长期异常集中分布在甘东南地区,震中距最小 520 km,最远 680 km;到了中长期阶段异常项次明显增加,而且异常点的分布向西迁移,震中距最小为 250 km;到了中短期阶段,距离震中较近的地区异常数量进一步增加。(2)不同阶段的流体

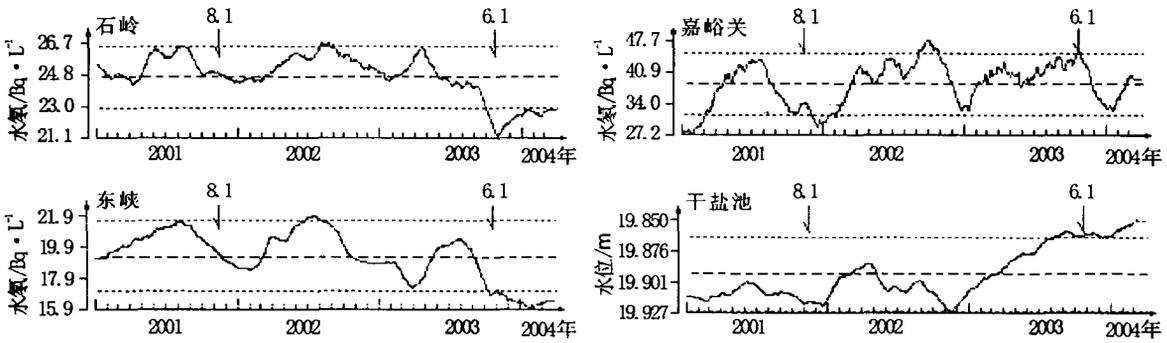


图 5 民乐—山丹地震前部分地下流体短期异常

Fig. 5 Part of short-term anomalies of subsurface fluid before Minle-Shandan earthquake.

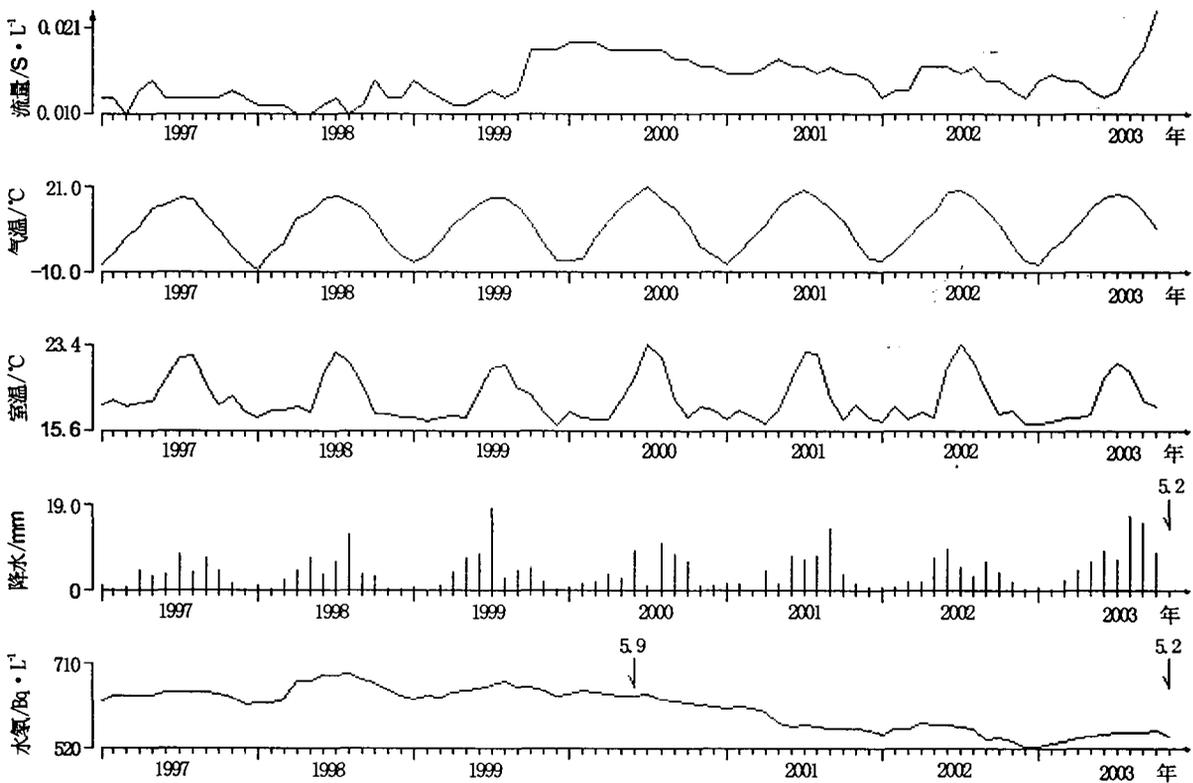


图 6 武山 1 号泉水氡趋势性变化与流量、室温、气温及降水的关系曲线

Fig. 6 The tendency anomaly of radon and the flux, room temperature, air temperature and precipitation at No. 1 spring of Wushan station.

常不仅在空间上存在迁移变化,而且异常形态也随时空变化而出现有规律性的演变,长趋势异常以缓慢下降为主,中期尤其是中短期异常则主要表现为转折上升或破年变异常。

### 3 地下流体异常成因分析

与以往发生在青藏块体内的 6 级地震相比,民乐—山丹地震地下流体前兆异常持续时间长,异常项次多,异常范围大。作者认为这次地震前兆异常场的变化主要受青藏块体整体构造和地震活动水平

的增强以及 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 地震前兆场的影响。

前人对唐山、松潘、共和等 7 级以上地震及张北—尚义等 6 级以上地震前地下流体异常场的研究表明,地下流体异常场是区域构造应力场与震源应力场共同作用的结果,并且认为地下流体异常场的主体是场兆,而不是源兆<sup>[2-6]</sup>。根据固液二相介质数值模拟研究结果<sup>[7]</sup>,地下流体趋势异常主要表现为趋势性升高,且主要分布在源兆区及其周围附近的场兆区。但是断裂破碎带与其他构造单元不

同,即使是“远场”区地下流体异常也会出现明显的异常变化,它所反映的是区域构造应力水平的增强,异常的形态表现为趋势性下降。昆仑山口西 8.1 级地震和民乐—山丹地震之前,甘东南西秦岭北缘断裂带出现大面积的地下流体长趋势异常,这些泉点多分布在活动性主干断裂、分支断裂或断层破碎带,由于地下水循环深、动态变化稳定,水化特征的变化能够反映地壳深处的构造变动及断裂活动。这些异常具有明显的同步变化,其异常形态主要表现为趋势下降,与数值模拟的结果一致。表明这些长趋势变化反映了整个青藏块体构造活动和应力水平的增强。民乐—山丹地震的趋势性地下流体异常是由断裂活动造成的,并非是震源体演化的结果。

其次,民乐—山丹地震地下流体异常中许多台项的异常出现在昆仑山口西 8.1 级地震之前,地震之后异常持续发展,2002 年 12 月开始又陆续出现了转折性变化,表明两次地震事件前兆异常场相互迭加、相互影响。由于 8.1 地震前兆场的影响范围大<sup>[8-9]</sup>,而且两次地震时间间隔短,从而使民乐—山丹地震地下流体前兆场与其他 6 级地震相比,具有异常持续时间长,异常项次多,异常范围大的特征。

#### 4 结论与讨论

(1) 民乐—山丹地震前地下流体异常分布较广,主要分布在祁连山断裂带、西秦岭北缘断裂带和六盘山断裂带,地下流体前兆场的空间分布具有明显的“远场”效应。

(2) 民乐—山丹地震之前,地下流体异常空间

展布随发震时间的到来不断由外围向震中区附近迁移。

(3) 不同阶段的流体异常不仅在空间上存在迁移变化,而且异常形态也随时空变化而出现有规律性的演变:长趋势异常以缓慢下降为主,中期尤其是中短期异常则主要表现为转折上升或破年变异常。

(4) 受青藏块体整体构造和地震活动水平的增强以及 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 地震的影响,民乐—山丹地震地下流体前兆场具有异常时间长,异常项次多,异常范围大的特征。

#### [参考文献]

- [1] 杨立明,王兰民. 民乐—山丹 6.1 级地震短期预报的科学总结[J]. 西北地震学报,2004,26(1):1-9.
- [2] 国家地震局编辑组. 一九七六年唐山地震[M]. 北京:地震出版社,1982.
- [3] 国家地震局科技监测司. 地震监测与预报方法清理成果汇编:地下水分册[M]. 北京:地震出版社,1988.
- [4] 王长岭,陶淑芬,张世琴,等. 强震水化学前兆场特征[J]. 西北地震学报,1996,18(1):1-7.
- [5] 张慧,王长岭. 大震水化学参量“场兆”与“源兆”判别指标的研究[J]. 地震,1999,19(2):155-160.
- [6] 车用太,鱼金子,刘武洲,等. 张北—尚义地震的地下流体异常场及其成因分析[J]. 地震学报,1999,17(3):194-201.
- [7] 张慧,梁子斌. 坚固体孕震模式下地下流体异常时空演化的数值模拟[J]. 地震学报,2000,22(2):176-182.
- [8] 张敏,昆仑山口西 8.1 级地震前兆场异常的综合演化特征[J]. 高原地震,2002,14(1):48-51.
- [9] 杜方,吴江. 昆仑山口西 8.1 级地震远场异常[J]. 高原地震,2002,14(1):52-60.