

甘肃东南部水氡中期异常特征研究*

杨兴悦^{1,2}, 王燕³, 缙亚江³, 杨斐³, 田文通³, 李旭生³, 姚玉霞³, 范志伟⁴

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 兰州 730000; 2. 甘肃省地震局武山地震台, 甘肃 天水 741308;
3. 甘肃省地震局, 兰州 730000; 4. 河北省地震局, 石家庄 050021)

摘要: 利用从属函数、变差率以及趋势速率方法提取甘肃东南部水氡观测资料的地震前兆异常。结果表明, 1984年1月至2009年12月, 7项水氡资料共出现47次从属函数异常、45次变差率异常和39次趋势速率异常。其中, 33次从属函数异常、35次变差率异常和30次趋势速率异常很好地对应了甘肃及邻区震中距在33~585 km范围内发生的5~8级地震。通过分析异常特征及其与地震的关系, 提出中强震和强震时间预测的指标与方法, 得出甘肃东南部水氡从属函数计算的经验常数, 以及变差率和趋势速率的异常阈值。

关键词: 水氡; 从属函数; 变差率; 趋势速率; 前兆异常; 甘肃东南部

中图分类号: P315.75 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2011)01-0008-11

0 引言

甘肃处于青藏块体的东北缘, 祁连山地震带和南北地震带横穿境内, 是我国大陆强震活动频繁的场所之一。该地区历史上曾发生过多次强烈地震, 现今地震活动仍很频繁, 地震震源浅, 频度与强度高, 危害性强。水氡测项是地震预测的主要依据之一。甘肃东南部水氡测点多, 具有良好的地震水文地球化学条件, 观测资料连续可靠(张新基等, 2005; 杨兴悦等, 2008)。为了更好地发挥其重要作用, 对其观测资料进行分析总结是十分必要的。

由于流体资料或多或少地受仪器、室温等因素的影响, 采用一般的“看图识字”方法, 很难将地震前兆异常与观测系统本身引起的变化区别开来(杨明波等, 2006; 范雪芳等, 2007, 2009)。为此, 在本研究中, 笔者使用从属函数、变差率及趋势速率3种数学方法对观测数据进行处理, 以提取明显的地震异常(杨兴悦等, 2006; 张立等, 2006), 进而系统地剖析前兆特征, 总结异常变化规律。

1 前兆资料及地震目录的选取

甘肃省地下流体观测台站主要集中在甘肃东

南部(图1), 因此笔者选用甘肃东南部的流体资料作为研究对象。在资料筛选过程中, 采用了王吉易等(2003)的“同一化”研究思路, 并遵循4个原则: ① 观测数据时间长, 时间在10 a以上; ② 无人干扰(包括仪器改变、台站改造、井(泉)装置改变、无规律抽水、渠道放水与停水等;)引起的资料台阶状变化或对台阶状变化因素比较清楚, 能进行校正, 以及无其它变化; ③ 具有明显的年动态变化; ④ 测点目前仍在正常观测。

经过严格筛选, 研究区共有7个测点的水氡观测资料满足以上4个条件, 分别为武山1号泉、武

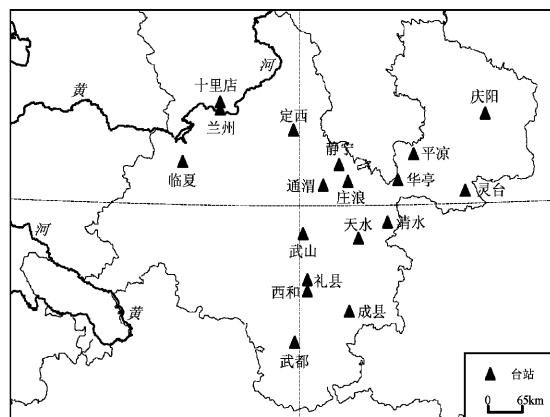


图1 甘肃东南部地下流体监测台站分布图
Fig. 1 Distribution of underground fluid monitoring stations in southeast Gansu Province

* 收稿日期: 2010-03-02.

基金项目: 中国地震局“三结合”基金项目(2008042)资助.

都殿沟、武山温泉 22 号井、平凉附件厂、通渭温泉、西和芦河和清水温泉。本文选用的连续观测资料最短为 17 a，最长为 26 a。

考虑本区地震活动的周期性和强度起伏的特点，选取距测点 33 ~ 594 km 内的甘肃及其邻区 5 级以上地震作为研究对象。在本文中，所研究的 5.0、5.2 级地震的最大震中距在 200 km 左右；5.8 ~ 6.2 级 4 次地震的震中距在 300 km 左右；共和 7.0、6.0 级地震和汶川 8.0 级地震，个别测点的震中距大于 500 km。依据本文对资料的分析认为，甘肃东南部水氡资料对共和 6 级及以上地震是有反应的。为方便统计，相邻两次地震时间间隔小于 1 a 的，只统计发生在前的地震。所选地震的参数见表 1。

表 1 1987 ~ 2009 年甘肃及邻区发生的 $M_s \geq 5.0$ 地震
Tab. 1 $M_s \geq 5.0$ Earthquakes in Gansu Province and the adjacent regions from 1987 to 2009

编号	发震时间	震中位置			震级 M_s
		$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	地点	
1	1987 - 01 - 08	34. 10	103. 40	甘肃迭部	5. 8
	1987 - 10 - 25	34. 12	105. 37	甘肃礼县	5. 0
2	1990 - 04 - 26	36. 10	100. 30	青海共和	7. 0
	1990 - 10 - 20	37. 10	103. 50	甘肃景泰	6. 2
3	1994 - 01 - 03	36. 10	100. 08	青海共和	6. 0
4	1995 - 07 - 22	36. 50	103. 00	甘肃永登	5. 8
	1996 - 06 - 01	37. 20	102. 90	甘肃天祝	5. 4
5	2000 - 06 - 06	37. 10	104. 00	甘肃景泰	5. 9
6	2003 - 11 - 13	34. 72	103. 90	甘肃岷县	5. 2
7	2006 - 06 - 21	33. 10	105. 00	甘肃文县	5. 0
8	2008 - 05 - 12	31. 00	103. 40	四川汶川	8. 0

2 异常提取方法

2.1 从属函数法

前兆观测资料的异常变化形态虽然是多种多样的，诸如突跳、转折、加速等，但其本质都是观测曲线随时间变化的斜率变化的量。从属函数就是表征一条曲线变化的斜率和跳动程度（贺仲雄，1983；叶秀薇，2004）。通过对资料的分析比较，笔者认为，对于甘肃地区，用 13 点滑动平均

值作为数据序列计算的效果较好，明显优于直接使用月均值提取异常的方法（杨兴悦等，2006）。中期异常判定方法见表 2。

表 2 甘肃东南部地区水氡中期异常判定方法
Tab. 2 Mid-term anomalies decision method of Radon in southeast Gansu Province

方法	使用数据	信息参数计算		异常判定 指标
		计算式	特定要求	
从属函数	月均值的	$\mu_i = \left[1 + \frac{\alpha}{ k_i r_i } \right]^{-1}$	求曲线上升段的	$\mu_i \geq 0.5$
	13 点滑动		从属函数，拟合	
	平均值 M_i		窗口长度 $m = 9$	

表 2 中， k_i 为观测值变化斜率； r_i 为滑动平均值 $M(t)$ 与时间 t 的相关系数，它反应了观测序列内在质量的好坏； α 为经验常数。在计算时，13 点滑动平均值、从属函数值 μ_i 均置于计算时段的右端点。

2.2 变差率法

在中短期异常判定中，观测值破年变形态被认为是地下流体参量的重要异常现象。变差率是表征一条曲线的相对变化幅度。以往分析人员只是通过多年曲线特征对比来分析破年变异常，但不能给出“破年变”的“程度”。为此，笔者引入了月变差率方法来定量描述这类异常，也就是用定量值来确定本年相对于上年在同一个月的变化程度，如果出现明显的变化差，则表明破年变程度较大，若变差率较小，则表明本年与上年的年动态相似^①。设定了合适的阈值，就可以判定异常的起始时间和持续时间。变差率方法适合于分析有年变的观测资料，但在本文中使用的资料连续时间较长，有的年份资料年变明显，有的年份无年变，因此在本研究中笔者先对资料进行平滑处理后再作分析。其具体做法如下：

（1）月均值的平滑滤波。取水氡等测项的月均值作为基本的数据序列。为抑制水氡的年变化和短期异常变化，突出中短期异常，我们采用 13 点滑动平均法，求出月均值的滑动平均值。

（2）变差率的计算。定义变差率为某个月的水氡值与前一年同月的水氡值之差再除以前一年同月的水氡值。该参量用以作为单点的中期和中短期异常的分析。其计算式为

① 刘耀炜，杜建国. 1990. 地下水化学参量中短期异常识别、标志、体系及预报方法研究.

$$\bar{R}_i = \frac{\bar{C}_i - \bar{C}_{i-12}}{\bar{C}_{i-12}} \quad (1)$$

式中, \bar{R}_i 为变差率; \bar{C}_i 和 \bar{C}_{i-12} 分别为水氡月滑动平均值和一年前同月的值。

在计算时, 13 点滑动平均值、变差率 \bar{R}_i 值均置于计算时段的右端点。

计算结果表明先平滑后再使用变差率方法提取异常的效果好于直接使用变差率。

2.3 趋势速率法

趋势变化特征是水化学参量中期和中短期异常的主要特征之一。由于不同的流体测点所处的构造、含水层岩性、井(泉)结构等物理化学性质的差异, 趋势性异常就有上升、下降和波动之分。趋势上升型中期异常和转折型中短期异常是强震及大震的前兆异常。本文中提取水氡趋势速率异常时采用以加速为主的上升异常。尽管趋势速率方法与从属函数方法都表示某一时段内时间序列斜率大小, 都是对线性相关性综合特征的描述, 但两种方法得到的结果不完全相同, 在资料分析运用中可以作为参考。具体做法是:

(1) 13 点滑动平均值的计算。以月均值为数据序列做计算, 计算值放在右端点上。

(2) 趋势速率值 (V) 的计算。选择线性窗 $Y = a + bX$ 拟合模型, 拟合窗口长度为 13。

(3) 异常判定指标。若趋势速率值 $V_i \geq 0.5$, 则为异常。

3 典型实例

甘肃东南部部分测点水氡月均值在本文所选震例的震前出现了明显的异常, 有的测点的异常却不明显(图 2), 不管明显与否, 都是定性描述, 因人而异, 带有经验性, 且很难在时间尺度上做出预测。因此, 笔者使用从属函数、变差率及趋势速率 3 种数学方法对观测数据进行处理, 提取的异常较为明显, 并对异常进行定量分析。

武山温泉 22 号井位于武山县温泉乡, 海拔 1 731 m。构造上处于西秦岭北缘深大断裂带(西起青海循化, 东至陕西宝鸡一带)的温泉—甘泉深断裂、聂河断裂及马长庄断裂的交汇部位。含水岩层为印支期似斑状花岗岩, 裂隙发育。水质类型为微矿化度重碳酸钠型。该井为自流井, 井

深 154.39 m, 水温 56.3 ℃, 水氡为主要观测项目之一(杨兴悦等, 2008)。

图 3 为武山 22 号井水氡月均值及异常曲线图。从图 3 可见, 在观测井周边 5 级以上地震发生前, 难以直接从月均值曲线上提取出异常信息, 并且对发震时间也无法作出定量预测, 但利用从属函数、变差率以及趋势速率方法提取的异常信息则较明显, 能定量地给出时间特征参量。以 2006 年 6 月 21 日甘肃文县 $M_s 5.0$ 地震为例, 从属函数、变差率、趋势速率异常持续时间分别为 16、23 及 16 个月, 异常结束至发震时间分别为 10、5 及 8 个月。

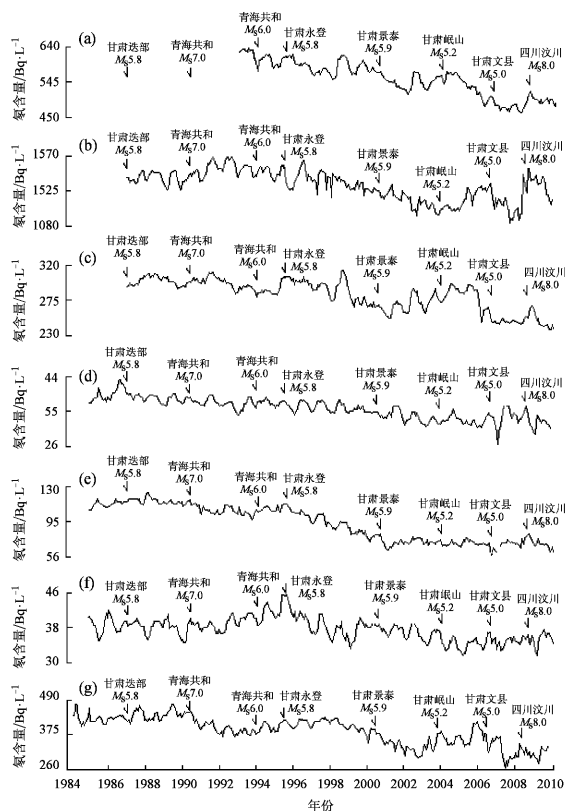


图 2 甘肃东南部水氡月均值曲线
(a) 武山 1 号泉; (b) 武都殿沟; (c) 武山 22 号井;
(d) 平凉附件厂; (e) 通渭温泉; (f) 西和芦河;
(g) 清水温泉

Fig. 2 Curves of month mean values of Radon in southeast Gansu Province
(a) No. 1 spring of Wushan station; (b) Diangou observing spot of Wudu station; (c) observing spot of No. 22 well of Wushan station; (d) Fujianchang observing spot of Pingliang station; (e) observing spot of Tongwei spring; (f) Luhe observing spot of Xihe station; (g) Qingshui spring

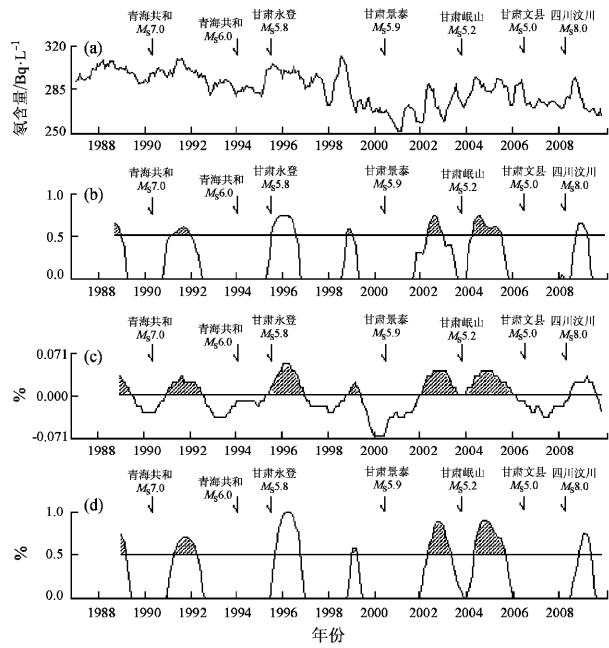


图 3 武山 22 号井水氡月均值 (a)、从属函数 (b)、变差率 (c) 及趋势速率值 (d) 异常曲线
Fig. 3 Abnormal curves of month-mean values (a), subordinate function (b), variation rate (c) and trend rate (d) of Radon in No. 22 well at Wushan station

4 前兆异常特征

4.1 从属函数中期异常特点

笔者用从属函数法分析 1984 年 1 月至 2009 年 12 月甘肃东南部 7 个测项的水氡观测资料，统计结果表明，统计时段内共出现 47 次异常（图 4），其中 33 次异常很好地对应了表 1 中所列的甘肃及其邻区距测点 33 ~ 594 km 内的 5 ~ 8 级地震。发生了地震而没有出现异常就算漏报，共 18 次；出现了异常而没发生地震属虚报，共 14 次。中期异常特征列于表 3。通过对甘肃东南部地区水氡资料的研究，笔者得到水氡从属函数中期异常的特点：

- (1) 持续时间：最短为 2 个月，最长为 20 个月，平均为 8.6 个月。
- (2) 超前时间 I：最短为 1 个月，最长 33 个月，平均为 15.6 个月。
- (3) 超前时间 II：最短为 -11 个月，最长 24 个月，平均为 7.0 个月。
- (4) 在异常持续过程中发生地震 9 次，异常结束后发生地震 24 次。

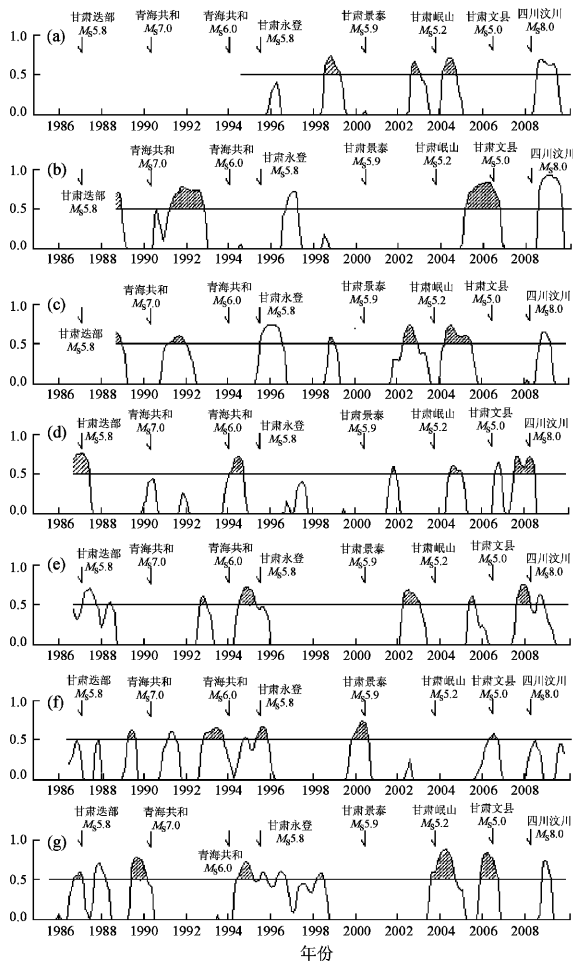


图 4 甘肃东南部水氡从属函数异常曲线
(a) 武山 1 号泉；(b) 武都殿沟；(c) 武山 22 号井；
(d) 平凉附件厂；(e) 通渭温泉；(f) 西和芦河；
(g) 清水温泉

Fig. 4 Abnormal curves of subordinate function of Radon in southeast Gansu Province

(a) No. 1 spring of Wushan station; (b) Diangou observing spot of Wudu station; (c) observing spot of No. 22 well of Wushan station; (d) Fujianchang observing spot of Pingliang station; (e) observing spot of Tongwei spring; (f) Luhe observing spot of Xihe station; (g) Qingshui spring

(5) 异常变幅：最小为 0.52，最大为 0.83，平均为 0.67。

(6) 异常对应率为 70.2%，漏报率为 35.3%，虚报率为 29.8%。

4.2 变差率中期异常特点

笔者用变差率方法分析了 1984 年 1 月至 2009 年 12 月甘肃东南部 7 个测项的水氡观测资料，统计结果表明，共出现 45 次异常，2009 年出现的两次异常视为新异常未统计（图 5），其中 35 次异常

表 3 甘肃东南部水氡从属函数中期异常特征统计表
Tab. 3 Feature of the mid-term anomalies of Subordinate
function of Radon in Southeast Gansu Province

测点 名称	序 号	异常时间					异常最大 变幅	经验常 数 μ	对应地震			
		开始	结束	持续 /月	超前时间 Ⅰ/月	超前时间 Ⅱ/月			时间	震级 (M_s)	震中	震中距 /km
武山 1 号泉	1	1998-08	1999-05	9	22	13	0.72	1.0	2000-06-06	5.9	景泰	288
	2	2002-09	2003-02	5	14	9	0.66		2003-11-13	5.2	岷县	105
	3	2004-03	2004-11	8	27	19	0.69		2006-06-21	5.0	文县	172
	4	2008-08	2009-08	12	—	—	0.67		震后效应			
武都殿沟	1	—	1989-01	>4	>19	15	0.69	2.0	1990-04-26	7.0	共和	519
	2	1991-04	1992-12	20	33	13	0.77		1994-01-03	6.0	共和	535
	3	1996-09	1997-05	8	—	—	0.71		超前时间大于 3 年不对应地震			
	4	2005-03	2006-11	20	15	-5	0.83		2006-06-21	5.0	文县	33
	5	2008-09	2009-10	13	—	—	0.91		震后效应			
武山 22 号井	1	—	1989-01	>4	>19	15	0.65	0.5	1990-04-26	7.0	共和	460
	2	1991-04	1992-01	9	33	24	0.59		1994-01-03	6.0	共和	479
	3	1995-08	1996-09	13	—	—	0.72		震后效应			
	4	1998-11	1999-02	3	19	16	0.56		2000-06-06	5.9	景泰	289
	5	2002-05	2003-01	8	18	10	0.72		2003-11-13	5.2	岷县	106
	6	2004-04	2005-08	16	26	10	0.72		2006-06-21	5.0	文县	171
	7	2008-11	2009-05	6	—	—	0.65		震后效应			
平凉附件厂	1	—	1987-06	>9	>4	-5	0.76	0.07	1987-01-08	5.8	迭部	346
	2	1994-03	1994-11	8	16	8	0.71		1995-07-22	5.8	永登	353
	3	2001-10	2002-01	3	25	22	0.58		2003-11-13	5.2	岷县	275
	4	2004-07	2005-02	7	23	16	0.59		2006-06-21	5.0	文县	316
	5	2006-10	2007-01	3	—	—	0.64		不对应地震			
	6	2007-08	2008-08	12	9	-3	0.71		2008-05-12	8.0	汶川	594
通渭温泉	1	1987-02	1987-11	9	—	—	0.69	0.2	震后效应			
	2	1988-05	1988-07	2	23	21	0.52		1990-04-26	7.0	共和	448
	3	1992-09	1993-01	4	16	12	0.59		1994-01-03	6.0	共和	467
	4	1994-07	1995-06	11	12	1	0.71		1995-07-22	5.8	永登	240
	5	2002-04	2003-03	11	19	8	0.67		2003-11-13	5.2	岷县	124
	6	2005-06	2005-10	4	12	8	0.60		2006-06-21	5.0	文县	234
	7	2007-09	2008-05	8	8	0	0.75		2008-05-12	8.0	汶川	494
	8	2008-09	2009-01	4	—	—	0.62		不对应地震			
西和芦河	1	1989-04	1989-08	4	12	8	0.61	0.11	1990-04-26	7.0	共和	495
	2	1991-03	1991-08	5	—	—	0.60		不对应地震			
	3	1992-11	1993-11	12	15	3	0.64		1994-01-03	6.0	共和	513
	4	1994-10	1994-12	2	—	—	0.53		不对应地震			
	5	1995-05	1995-12	7	2	-5	0.66		1995-07-22	5.8	永登	337
	6	1999-12	2000-09	9	6	-3	0.72		2000-06-06	5.9	景泰	359
	7	2006-05	2006-10	5	1	-4	0.56		2006-06-21	5.0	文县	101
清水温泉	1	1986-09	1987-03	6	4	-2	0.57	0.7	1987-01-08	5.8	迭部	269
	2	1987-09	1988-04	7	—	—	0.70		不对应地震			
	3	1989-06	1990-03	9	10	1	0.78		1990-04-26	7.0	共和	557
	4	1994-06	1995-04	10	13	3	0.71		1995-07-22	5.8	永登	350
	5	1995-07	1995-11	4	—	—	0.57		不对应地震			
	6	1996-05	1996-10	5	—	—	0.60		不对应地震			
	7	1998-04	1998-08	4	26	22	0.56		2000-06-06	5.9	景泰	329
	8	2003-08	2004-10	14	3	-11	0.87		2003-11-13	5.2	岷县	212
	9	2005-12	2006-11	11	6	-5	0.82		2006-06-21	5.0	文县	215
	10	2008-11	2009-05	6	—	—	0.73		不对应地震			

注：超前时间Ⅰ系异常开始时间与发震时间之间的时差；超前时间Ⅱ系异常结束时间与发震时间之间的时差。“—”表示异常未结束，例如“-1”表示地震后1月异常结束。

很好地对应了甘肃及邻区距测点 33 ~ 594 km 的 5 ~ 8 级地震，其中漏报 16 次，虚报 10 次。中期异常特征见表 4。通过对甘肃东南部水氡资料的研究，笔者总结出水氡变差率中期异常的特点：

- (1) 持续时间：最短为 2 个月，最长为 51 个月，平均为 16.9 个月。
- (2) 超前时间 I：最短为 0 个月，最长 35 个月，平均为 14.4 个月。
- (3) 超前时间 II：最短为 -39 个月，最长 25

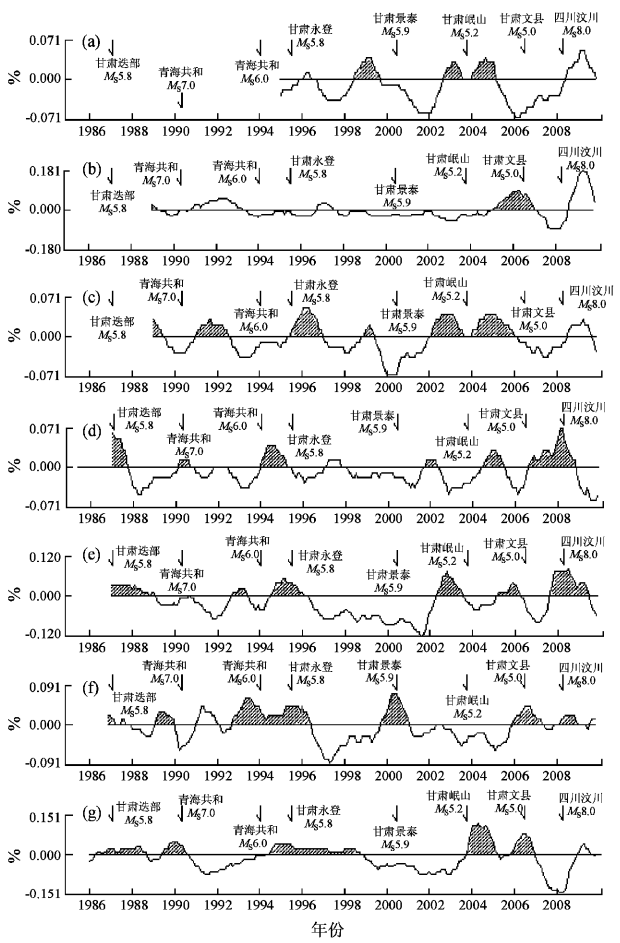


图 5 甘肃东南部水氡变差率异常曲线
(a) 武山 1 号泉；(b) 武都殿沟；(c) 武山 22 号井；
(d) 平凉附件厂；(e) 通渭温泉；(f) 西和芦河；
(g) 清水温泉

Fig. 5 Abnormal curves of variation rate of Radon in southeast area of Gansu Province
(a) No. 1 spring of Wushan station; (b) Diangou observing spot of Wudu station; (c) observing spot of No. 22 well of Wushan station; (d) Fujianchang observing spot of Pingliang station; (e) observing spot of Tongwei spring; (f) Luhe observing spot of Xihe station; (g) Qingshui spring

- 个月，平均为 0.5 个月。
- (4) 在异常持续过程中发生地震 18 次，异常结束后发生地震 17 次。
- (5) 异常变幅：最小为 1%，最大为 12%，平均为 4.4%。
- (6) 异常对应率为 77.8%，漏报率为 31.4%，虚报率为 22.2%。

4.3 趋势速率中期异常特点

笔者用趋势速率方法分析了 1984 年 1 月至

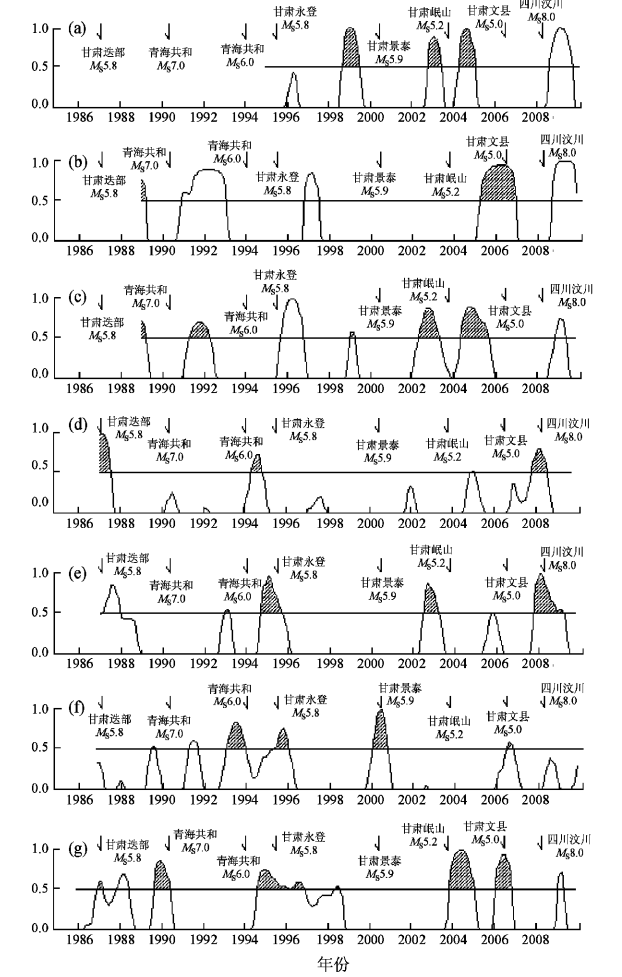


图 6 甘肃东南部水氡趋势速率异常曲线
(a) 武山 1 号泉；(b) 武都殿沟；(c) 武山 22 号井；
(d) 平凉附件厂；(e) 通渭温泉；(f) 西和芦河；
(g) 清水温泉

Fig. 6 Abnormal curves of trend rate of Radon in southeast area of Gansu Province
(a) No. 1 spring of Wushan station; (b) Diangou observing spot of Wudu station; (c) observing spot of No. 22 well of Wushan station; (d) Fujianchang observing spot of Pingliang station; (e) observing spot of Tongwei spring; (f) Luhe observing spot of Xihe station; (g) Qingshui spring

表 4 甘肃东南部水氡变差率中期异常特征统计表

Tab. 4 Features of the mid-term anomalies of variation rate of Radon in southeast Gansu Province

测点 名称	序 号	异常时间					异常最大 变幅	地震对应情况			
		开始	结束	持续 /月	超前时间 Ⅰ/月	超前时间 Ⅱ/月		时间	震级 (M_s)	震中	震中距 /km
武山 1 号泉	1	1996-03	1996-06	3	—	—	1		不对应地震		
	2	1998-07	1999-09	14	23	9	4	2000-06-06	5.9	景泰	288
	3	2002-10	2003-08	10	13	3	3	2003-11-13	5.2	岷县	105
	4	2004-02	2005-03	13	28	15	4	2006-06-21	5.0	文县	172
	5	2008-07	2009-12	18	—	—	5		震后效应		
武都殿沟	1	—	1989-04	>3	>15	12	2	1990-04-26	7.0	共和	519
	2	1990-11	1993-04	29	38	9	5		超前时间大于 3 年不对应地震		
	3	1996-10	1997-08	10	44	34	3		超前时间大于 3 年不对应地震		
	4	2005-03	2007-02	23	15	-8	9	2006-06-21	5.0	文县	33
	5	2008-09	—	>16	—	—	18		震后效应		
武山 22 号井	1	—	1989-06	>5	>15	10	3	1990-04-26	7.0	共和	460
	2	1991-02	1992-07	17	35	18	3	1994-01-03	6.0	共和	479
	3	1995-07	1997-01	18	0	-18	5	1995-07-22	5.8	永登	278
	4	1999-01	1999-06	5	—	—	2	2000-06-06	5.9	景泰	289
	5	2002-03	2003-09	18	20	2	4	2003-11-13	5.2	岷县	106
	6	2004-02	2006-01	23	28	5	4	2006-06-21	5.0	文县	171
	7	2008-08	2009-09	13	—	—	3		震后效应		
平凉附件厂	1	—	1987-10	>9	>0	-9	6	1987-01-08	5.8	迭部	346
	2	1990-03	1990-09	6	1	-5	1	1990-04-26	7.0	共和	585
	3	1994-02	1995-04	14	17	3	4	1995-07-22	5.8	永登	353
	4	1997-03	1997-11	8	39	31	1		超前时间大于 3 年不对应地震		
	5	2001-11	2002-05	6	24	18	1	2003-11-13	5.2	岷县	275
	6	2004-08	2005-07	11	22	11	3	2006-06-21	5.0	文县	316
	7	2006-10	2008-12	26	19	-7	7	2008-05-12	8.0	汶川	594
通渭温泉	1	—	1988-10	>21	>0	-21	5	1987-01-08	5.8	迭部	200
	2	1988-12	1989-02	2	16	14	1	1990-04-26	7.0	共和	448
	3	1992-10	1993-06	8	33	25	2	1994-01-03	6.0	共和	467
	4	1994-08	1996-02	18	11	5	5	1995-07-22	5.8	永登	240
	5	2002-06	2003-08	14	17	3	7	2003-11-13	5.2	岷县	124
	6	2005-04	2006-04	12	14	2	4	2006-06-21	5.0	文县	234
	7	2007-09	2009-07	22	8	-14	7	2008-05-12	8.0	汶川	494
西和芦河	1	—	1987-03	>4	>2	-2	2	1987-01-08	5.8	迭部	157
	2	1987-07	1987-09	2	—	—	1		不对应地震		
	3	1989-02	1990-01	11	14	3	3	1990-04-26	7.0	共和	495
	4	1991-02	1992-01	11	—	—	4		不对应地震		
	5	1992-10	1996-06	44	15	-29	6	1994-01-03	6.0	共和	513
	6	1999-10	2001-02	16	8	-8	7	2000-06-06	5.9	景泰	359
	7	2006-01	2007-05	16	5	-11	4	2006-06-21	5.0	文县	101
	8	2008-04	2009-01	9	1	-8	2	2008-05-12	8.0	汶川	370
清水温泉	1	1986-05	1986-08	3	—	—	1		不对应地震		
	2	1986-09	1988-09	24	4	-20	3	1987-01-08	5.8	迭部	269
	3	1989-07	1990-08	13	9	-4	5	1990-04-26	7.0	共和	557
	4	1994-07	1998-10	51	12	-39	4	1995-07-22	5.8	永登	350
	5	2003-11	2005-04	17	0	-17	12	2003-11-13	5.2	岷县	212
	6	2005-12	2007-01	13	6	-7	6	2006-06-21	5.0	文县	215

注：超前时间Ⅰ系异常开始时间与发震时间之间的时差；超前时间Ⅱ系异常结束时间与发震时间之间的时差。“—”表示异常未结束，例如“-1”表示地震后1月异常结束。

表 5 甘肃东南部水氡趋势速率中期异常特征统计表

Tab. 5 Features of the mid-term anomalies of trend rate of Radon in southeast Gansu Province

测点 名称	序 号	异常时间					异常最大 变幅	地震对应情况			
		开始	结束	持续 /月	超前时间 Ⅰ/月	超前时间 Ⅱ/月		时间	震级 (M_S)	震中	震中距 /km
武山 1 号泉	1	1998-09	1999-08	11	21	10	1.00	2000-06-06	5.9	景泰	288
	2	2002-11	2003-07	8	12	4	0.87	2003-11-13	5.2	岷县	105
	3	2004-05	2005-03	10	25	15	0.98	2006-06-21	5.0	文县	172
	4	2008-09	2009-10	13	—	—	0.99	震后效应			
武都殿沟	1	—	1989-03	>2	>15	12	0.76	1990-04-26	7.0	共和	519
	2	1990-12	1993-02	26	55	29	0.90	超前时间大于 3 年不对应地震			
	3	1996-11	1997-07	8	43	35	0.84	超前时间大于 3 年不对应地震			
	4	2005-05	2007-02	21	13	-8	1.00	2006-06-21	5.0	文县	33
	5	2008-10	—	>15	—	—	1.00	震后效应			
武山 22 号井	1	—	1989-04	>3	>15	12	0.72	1990-04-26	7.0	共和	460
	2	1991-04	1992-05	13	33	20	0.70	1994-01-03	6.0	共和	479
	3	1995-10	1996-11	13	—	—	1.00	震后效应			
	4	1999-02	1999-04	2	16	14	0.56	2000-06-06	5.9	景泰	289
	5	2002-05	2003-06	13	18	5	0.88	2003-11-13	5.2	岷县	106
	6	2004-06	2005-10	16	24	8	0.89	2006-06-21	5.0	文县	171
	7	2008-12	2009-07	7	—	—	0.74	不对应地震			
平凉附件厂	1	—	1987-08	>7	>0	-7	1.00	1987-01-08	5.8	迭部	346
	2	1994-05	1994-12	7	14	7	0.73	1995-07-22	5.8	永登	353
	3	2004-12	2005-02	2	18	16	0.51	2006-06-21	5.0	文县	316
	4	2007-11	2008-09	10	6	-4	0.80	2008-05-12	8.0	汶川	594
通渭温泉	1	1987-02	1988-01	11	—	—	0.85	震后效应			
	2	1993-01	1993-04	3	13	10	0.54	1994-01-03	6.0	共和	467
	3	1994-09	1995-10	13	10	-3	0.96	1995-07-22	5.8	永登	240
	4	2002-07	2003-05	10	16	6	0.88	2003-11-13	5.2	岷县	124
	5	2005-11	2005-12	1	8	7	0.50	2006-06-21	5.0	文县	234
	6	2007-11	2009-04	17	6	-11	1.00	2008-05-12	8.0	汶川	494
西和芦河	1	1989-07	1989-09	2	9	7	0.52	1990-04-26	7.0	共和	495
	2	1991-04	1991-09	5	—	—	0.59	不对应地震			
	3	1993-02	1994-01	11	11	0	0.83	1994-01-03	6.0	共和	513
	4	1995-05	1996-02	9	2	-7	0.76	1995-07-22	5.8	永登	337
	5	2000-02	2000-11	9	4	-5	1.00	2000-06-06	5.9	景泰	359
	6	2006-07	2006-11	4	22	18	0.57	2008-05-12	8.0	汶川	370
清水温泉	1	1986-12	1987-03	3	1	-2	0.60	1987-01-08	5.8	迭部	269
	2	1987-11	1988-06	7	—	—	0.68	不对应地震			
	3	1989-08	1990-06	10	8	-2	0.86	1990-04-26	7.0	共和	557
	4	1994-08	1996-12	28	11	-17	0.74	1995-07-22	5.8	永登	350
	5	1998-05	1998-09	4	25	21	0.54	2000-06-06	5.9	景泰	329
	6	2003-11	2005-02	15	0	-15	1.00	2003-11-13	5.2	岷县	212
	7	2006-02	2006-12	10	4	-6	0.93	2006-06-21	5.0	文县	215

注：超前时间Ⅰ系异常开始时间与发震时间之间的时差；超前时间Ⅱ系异常结束时间与发震时间之间的时差。“—”表示异常未结束，例如“-1”表示地震后1月异常结束。

2009 年 12 月甘肃东南部 7 个测项的水氡观测资料,发现该时段内共出现 39 次异常(2009 年出现的一次异常视为新异常未统计)(图 6),其中 30 次异常很好地对应了甘肃及邻区距测点 33~594 km 内的 5~8 级地震,其中漏报 21 次,虚报 9 次。中期异常特征见表 5。通过对这些资料的研究,笔者总结出甘肃东南部水氡趋势速率中期异常的特点:

- (1) 持续时间:最短为 1 个月,最长为 28 个月,平均为 9.7 个月。
- (2) 超前时间 I:最短为 0 个月,最长 33 个月,平均为 13.0 个月。
- (3) 超前时间 II:最短为 -17 个月,最长 21 个月,平均为 3.3 个月。
- (4) 在异常持续过程中发生地震 11 次,异常结束后发生地震 18 次。
- (5) 异常变幅:最小为 0.5,最大为 1.00,平均为 0.78。
- (6) 对应率为 76.9%,漏报率为 41.2%,虚报率为 23.1%。

5 中期时间预测指标

依据甘肃东南部水氡的多次异常资料,可得到中期异常的超前时间。将异常开始时间至发震时间的差记为超前时间 I,将异常结束时间至发震时间的差记为超前时间 II,从表 3、表 4 和表 5 中可得出各个测点的超前时间 I 和超前时间 II。由于本文统计的是一个地区的资料,观测点分散,异常出现和结束的时间差别较大,因此很难得出一个统一的预测指标,但可根据各测点的超前时

间 I 的最小值和超前时间 II 的最大值预测发震时间段。

当从属函数等异常达到预测指标时,可按下式算出发震时间段:

$$T_1 = t_1 + \Delta T_1,$$

(1)

$$T_2 = t_2 + \Delta T_2.$$

(2)

式中, T_1 为预测的发震开始时间; t_1 为异常开始时间; ΔT_1 为超前时间 I 的最小值; T_2 为预测的发震结束时间; t_2 为异常结束时间, ΔT_2 为超前时间 II 的最大值。

当一个测点出现异常后,可用上述方法得出一个发震时间段,如果多个测点出现异常就可得到多个发震时间段。将多个发震时间段进行优化,通过验证分析,笔者认为舍去 1/2 以下测点较早的发震开始时间和较晚的发震结束时间,这样预测的发震时间段就大大缩短了。

同样,变差率、趋势速率等异常达到预测指标后可用上述方法优化后再对这几种方法得到的发震时段进一步优化。对应的发震时段越靠近预测发震时段的中央就越可能是发生地震的时间。

下面以 2006 年 6 月 21 日甘肃文县 M_s 5.0 地震为例进行检验性计算,以得出预测时间段。首先去掉 7 个观测点中的一半(即 3 个)测点的最小发震开始时间和最大发震结束时间,得出优化后的预测发震时间段,然后再将这三种方法的预测结果进一步优化,得到综合预测的发震时间段是 2005 年 5 月至 2007 年 10 月,在这个时间段甘肃东南部各观测点的监控范围内有可能发生 5 级以上地震。

表 6 2006 年 6 月 21 日文县 5.0 级地震检验性预测结果

Tab. 6 Predictive results of M_s 5.0 earthquake in Wenxian County on June 21, 2006

水点与测项	预测发震时间段		
	从属函数法	变差率法	趋势速率法
武山 1 号泉	2004-04~2006-11	2004-02~2007-04	2004-05~2006-12
武都殿沟	2005-04~2008-11	2005-03~2009-03	2005-05~2008-11
武山温泉 22 号井	2004-05~2007-08	2004-02~2008-02	2004-06~2007-07
平凉附件厂	无异常	2004-08~2007-08	2004-12~2006-11
通渭温泉	2005-07~2007-10	2005-04~2008-05	2005-11~2007-09
西和芦河	2006-06~2008-10	2006-01~2009-06	无异常
清水温泉	2006-01~2008-11	2005-11~2009-02	2006-02~2008-09
优化后预测发震时段	2005-07~2007-10	2005-03~2008-05	2005-05~2007-07
综合预测		2005-05~2007-10	

6 结论与讨论

(1) 用从属函数、变差率、趋势速率方法提取的甘肃东南部水氡资料的异常比较明显,对应地震效果较好。

(2) 趋势异常本身并不是某一个地震的“专有”前兆,而是多个地震的“共同前兆”。因为,从成因来看,趋势异常不是来自震源的“源兆”,而是“外因性”的“场兆”(张国民等,2001;范雪芳等,2010)。这一特点决定了依据这类异常提出的发震时间,只是一个“可能的发震时段”,即说,并不是每一次异常都对应地震。一组趋势异常变化并不只对应一个地震,而是对应一个地震的活跃时段,即趋势异常为多个强震、中强震的共同前兆。

(3) 异常最大变幅的大小、异常持续时间与震级的大小没有直接关系。

(4) 汶川地震震级大,震源浅,震中距近,但震前甘东南水氡测点出现的异常较少,7个测点中只出现了2项从属函数异常、2项趋势速率异常,3项变差率异常。张培震等(2009)研究发现汶川8.0级地震发生在中国大陆内部的高角度逆冲断层上,震前龙门山断裂带的应变速率很低,形变主要发生在龙门山断裂带以西的川西高原,而同震变形主要发生在龙门山断裂带上。这些现象表明汶川地震孕育和发生的机理与其它特大逆冲型地震可能不同,因此汶川地震前兆异常少可能与其孕育特征和机理有关。

本文在撰写过程中得到了河北省地震局王吉易研究员和甘肃省地震局杨立明研究员的悉心指导。本文中使用的部分数据由甘肃省地震局预报中心张昱高级工程师提供,在此一并表示感谢!

参考文献:

- 范雪芳,刘耀炜,吴桂娥,等.2010.华北地区水位、水氡中期异常特征研究[J].地震研究,33(2):147-158.
- 范雪芳,王吉易,陆明勇.2009.汶川8.0级地震前典型流体中期前兆异常的初步研究[J].地震,29(1):132-140.
- 范雪芳,王吉易,张淑亮,等.2007.山西及其邻区地下流体强震中期和中短期预测时间方法研究[J].西北地震学报,29(2):177-182.
- 贺仲雄.1983.模糊数学及其应用[M].天津:天津科学技术出版社.
- 王吉易,宋贯一,曹志成,等.2003.地下水诱发的浅层前兆异常及其机理与有关的地震预报问题(3)[J].华北地震科学,21(1):1-10.
- 杨明波,王吉易,刘喜兰,等.2006.北京及邻近地区中等以上地震地下流体异常识别与特征研究[J].地震,26(3):53-63.
- 杨兴悦,王燕,闫万生,等.2006.武山22号井水氡中期异常与地震关系的探讨[J].西北地震学报,28(4):378-380.
- 杨兴悦,王益,王燕,等.2008.武山1号泉流量、 O_2 + Ar 、 N_2 、 He 的异常变化分析[J].西北地震学报,30(1):75-78.
- 叶秀薇.2004.粤闽地区地下流体从属函数异常与地震关系的初步研究[J].防灾减灾工程学报,24(2):195-201.
- 张国民,傅征祥,桂燮泰,等.2001.地震预报引论[M].北京:科学出版社.
- 张立,平建军,苏有锦.2006.云南地区综合地震前兆信息量及其短期映震能力分析[J].地震研究,29(4):325-331.
- 张培震,闻学泽,徐锡伟,等.2009.2008年汶川8.0级特大地震孕育和发生的多单元组合模式[J].科学通报,54(7):944-953.
- 张新基,赵仪全,刘耀炜,等.2005.甘肃省地震监测志[M].甘肃:兰州大学出版社.

Study on Mid-term Anomalies of Radon in Southeast Gansu Province

YANG Xing-yue^{1,2}, WANG Yan³, GOU Ya-jiang³, YANG Fei³, TIAN Wen-tong³,
LI Xu-sheng³, YAO Yu-xia³, FAN Zhi-wei⁴

(1. *Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China*)

(2. *Wushan Seismic Station, Earthquake Administration of Gansu Province, Tianshui 741308, Gansu, China*)

(3. *Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China*)

(4. *Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, Hebei, China*)

Abstract

Using the methods of subordinate function, variation rate and trend rate, we extract the earthquake precursory anomalies from observational data of Radon in southeast Gansu Province. The result indicates that 7 items of radon data include 47 subordinate-function anomalies, 45 variation-rate anomalies and 39 trend-rate anomalies from January 1984 to December 2009. Among them, 33 subordinate-function anomalies, 35 variation-rate anomalies and 30 trend-rate anomalies corresponded with the earthquakes $M_s 5 - 8$ that ever hit Gansu Province and the adjacent region within 33 to 585 km. By the analysis of the features of these anomalies and their relation to the earthquakes, the method of time prediction for the moderate-strong and strong earthquake were proposed, and the empirical constant, variation rate and threshold value of trend-rate anomaly are obtained from Radon in southeast Gansu Province.

Key words: Radon; subordinate function; variation rate; trend rate; precursory anomaly; Southeast Gansu Province