

# 水氡时值序列和日值序列中的潮汐波分量

王长岭 刘耀炜 陶淑芬\*

(国家地震局兰州地震研究所)

## 摘 要

本文用潮汐波最优谱分析法处理了一些水点的水氡时值资料和水氡日值资料, 结果显示兰州五泉山水点水氡时值序列中存在着与理论固体潮相一致的半日波和日波分量; 山东聊城、天津张道口、甘肃平凉等水点水氡日值序列中存在着与理论固体潮相一致的半月波、月波分量。上述事实说明, 水点条件好、观测质量高的水氡资料能反映出地壳潮汐应力的变化。

一些地震监测手段能直接观测到地球潮汐应力的变化, 如重力、倾斜、深井水位等。水氡观测数据与地壳潮汐应力之间的关系至今研究得很少〔4〕。其原因在于水氡观测规定只作日值观测, 因此缺少时值资料; 水氡观测操作过程长, 影响因素多〔1、2〕, 所得数据从直观上看不出与地壳潮汐应力之间的关系。作为一种地震前兆手段, 要研究水氡变化与地震活动之间的关系, 首先应研究水氡变化与地壳应力应变之间的关系。本文用潮汐波最优谱分析法, 处理了兰州五泉山水氡的时值资料和甘肃平凉、天津张道口、山东聊城水氡的日值资料, 从中分离出与固体潮成分有关的分波, 证实了水氡时值序列中存在着半日波和日波, 水氡日值序列中存在着半月波和月波。

## 一、潮汐波最优谱分析法的计算过程

潮汐波最优谱分析法的步骤是逐步分离水氡序列中的各潮汐波, 並做周期性 F 检验, 看其是否达到检验标准而显著存在。

### 1. 资料的处理

在进行谱分析之前, 要对时间序列  $f(t)$  做中心化和去趋势处理, 即

$$M(t) = f(t) - \bar{f} - F(t) \quad (t = 1, 2, 3, \dots, n). \quad (1)$$

式中  $f(t)$  为原时间序列;  $n$  为序列长度;  $\bar{f}$  为该时间序列的平均值;

\*参加此项工作的还有张世琴等。

$$\bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n f(t), \quad (2)$$

式中  $F(t)$  为该时间序列的趋势项,

$$F(t) = a + bt \quad (t = 1, 2, 3, \dots, n). \quad (3)$$

式中  $M(t)$  为该时间序列的平稳序列。

## 2. 潮汐分波的计算与检验

按照固体潮某一分波周期  $T_1$ , 将平稳序列  $M(t)$  以资料长度  $n$  展开成单波形式, 即

$$M(t) = C_1^0 \sin\left(\frac{2\pi t}{T_1} + \phi_1^0\right) + M'(t). \quad (4)$$

式中  $T_1$  为第一次展开的分波周期;  $M'(t)$  为余差值序列;  $C_1^0$ 、 $\phi_1^0$  分别为该展开波的振幅与初相位, 可用离散富氏级数公式求得:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{n} \sum_{t=0}^{n-1} M(t) \sin \frac{2\pi t}{T_1} \\ b_1 &= \frac{2}{n} \sum_{t=0}^{n-1} M(t) \cos \frac{2\pi t}{T_1} \\ C_1^0 &= \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \\ \phi_1^0 &= \arctg \frac{a_1}{b_1} \end{aligned} \right\} (t = 0, 1, 2, \dots, n-1). \quad (5)$$

计算该分波与平稳序列的方差参数:

$$\left. \begin{aligned} \text{总平方和: } L &= \sum_{t=1}^n M^2(t) - \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n M(t)^2, \\ \text{剩余平方和: } Q &= \sum_{t=1}^n \left[ M(t) - C_1^0 \sin\left(\frac{2\pi t}{T_1} + \phi_1^0\right) \right]^2, \\ \text{相关指数: } R^2 &= 1 - \frac{Q}{L}, \\ \text{F检验值: } F &= R^2(n-2)/(1-R^2). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

如果该分波周期性  $F$  检验值达到显著标准 ( $\alpha = 0.05$ ), 则将该波选出, 用有理插值法对其初相位  $\phi_1^0$  进行优选, 使该波与平稳序列  $M(t)$  的残差最小。然后将该波与原平稳序列进行回归运算 (回归检验  $F$  值与周期性检验  $F$  值相等), 用回归系数对其振幅  $C_1^0$  进行校正。这样, 求出第一个优选波为:

$$C_1 \sin\left(\frac{2\pi t}{T_1} + \phi_1\right),$$

而余差值序列为:

$$M'(t) = M(t) - C_1 \sin\left(\frac{2\pi t}{T_1} + \phi_1\right). \quad (7)$$

式中  $C_1$  和  $\phi_1$  为校正后和优选后的振幅与初相位。然后, 用余差序列  $M'(t)$  代替 (4)、(5)、(6) 式中的  $M(t)$ , 选取第二个周期分波  $T_2$  得:

$$M'(t) = C_2 \sin\left(\frac{2\pi t}{T_2} + \phi_2^0\right) + M''(t). \quad (8)$$

同样用有理插值法做初相位 $\phi_2^0$ 的优选, 並以这两次选入的波为两个自变量, 与原平稳系列 $M(t)$ 进行逐步回归运算, 如果两个波相互影响, 而其中有一个波达不到F检验标准, 则将其剔除。最后得到一个回归方程:

$$\hat{Y}(t) = \sum_{i=1}^P b_i \cdot C_i \sin\left(\frac{2\pi t}{T_i} + \phi_i\right) \quad (9)$$

式中 $P$ 为可能选入的分波个数,  $\hat{Y}(t)$ 为引入波的迭加值。

用回归系数 $b_i$ 对各选入波的振幅进行校正, 就会消除各分波之间的相互影响, (9)式还可以写成:

$$\hat{Y}(t) = \sum_{i=1}^P A_i \sin\left(\frac{2\pi t}{T_i} + \phi_i\right) \quad (10)$$

从原平稳序列 $M(t)$ 中扣除 $\hat{Y}(t)$ 的成份得

$$M^2(t) = M(t) - \sum_{i=1}^P A_i \sin\left(\frac{2\pi t}{T_i} + \phi_i\right) \quad (11)$$

再从 $M^2(t)$ 中选第三个分波。这样, 每选一个周期性显著的波, 对该波的初相位做一次优选, 並同其它各分波一起与原平稳序列进行一次逐步回归运算, 对各分波的振幅做一次校正, 直到固体潮的月波系列(或日波系列)检验完毕。若有 $P$ 个波达到周期性显著标准, 则最后的回归方程为:

$$\hat{Y}(t) = \sum_{i=1}^P A_i \sin\left(\frac{2\pi t}{T_i} + \phi_i\right) \quad (10)$$

上述各项是一系列与固体潮分波周期一致且相互独立的显著波,  $\hat{Y}(t)$ 为各波的迭加值。由于对每一个选入的分波都经过严格的周期检验和相关检验, 因此是客观存在的, 並且它们的合成波与原平稳序列的残差最小, 所以(10)式中的一系列周期成分就称为时间序列 $f(t)$ 的潮汐波最优谱。

## 二、对潮汐波最优谱分析法的检验

众所周知, 理论固体潮中主要存在 7 个半日波和日波分量〔5〕, 我们首先计算出在兰州地区的理论固体潮时值(1984年11月4日至13日, 共240个数据), 然后用潮汐波最优谱分析法分离此理论固体潮时值中的半日波和日波分量, 结果列于表1中。由表1可见计算结果与理论结果基本一致。计算结果中 $K_2$ 波不存在, 没有达到检验标准。其原因是 $K_2$ 波的分量最小, 且 $K_2$ 波和 $S_2$ 波周期极相近(11.97和12.00), 在数据较短的情况下难以分开。

用同样的办法, 处理了兰州地区1986年1月1日至31日的理论固体潮时值, 所得结果与表1一致。除 $K_2$ 波外, 其它6个半日波和日波显著存在。

固体潮中一般存在4个半月波和月波〔5〕, 但不同的地区或同一地区不同的年份, 各分波的强弱都有所不同, 因此对某一地区某一年而言, 上述4个分波不一定同时在。我们计算了山东聊城1980年1月1日至12月31日的理论固体潮, 用潮汐波最优谱分析法从中分离出了3个半月波和月波, 见表2。周期为31.81天的 $MS_m$ 波没有分离出来可能是由于这一年该

区理论固体潮中此波的分量弱,再则数据较短(366个数据)所致。表2的结果说明,潮汐波最优谱分析法能分离出理论固体潮中的主要半月波和月波。

上述检验结果表明,潮汐波最优谱分析法有较好的准确度和重现性,是可以应用的。

**表1 理论固体潮半日波、日波主要分波与潮汐波最优谱分析法的计算结果(五泉山时值)**

符号	相对幅度系数 D	角频率 度/小时	周期T (小时)	角频率 度/小时	周期T (小时)	振幅 (微伽)	相位 (度)	计算F值	检验F值 $\alpha=0.05$
M <sub>2</sub>	87426	28.98	12.42	28.98	12.42	46.06	4.046	175.17	2.99
K <sub>1</sub>	-53050	15.04	23.93	15.04	23.93	42.83	234.9	329.84	
O <sub>1</sub>	37089	13.94	25.82	13.94	25.81	31.29	72.61	225.52	
S <sub>2</sub>	42358	30.00	12.00	30.00	12.00	26.93	251.1	663.92	
N <sub>2</sub>	17387	28.44	12.66	28.44	12.66	4.225	262.7	3.51	
P <sub>1</sub>	11506	30.08	11.97	30.08	11.97	9.279	155.3	473.37	
K <sub>2</sub>	17584	14.95	24.07	14.95	24.07	0.3912	148.6	0.1901	

**表2 理论固体潮中的半月波、月波主要分波与潮汐波最优谱分析法计算结果(聊城日值)比较**

符号	相对幅度系数 *D	角频率 (度/小时)	周期 (天)	角频率 (度/小时)	周期 (天)	振幅 (微伽)	相位 (度)	计算F值	检验F值 $\alpha=0.05$
MS <sub>m</sub>	1578	0.4715	31.81	0.4715	31.81	0.0535	130.61	0.14	2.99
M <sub>m</sub>	8254	0.5444	27.55	0.5444	27.55	0.4713	243.76	11.75	
M*f	1370	1.0160	14.77	1.0160	14.77	1.7811	90.56	274	
Mf	15642	1.0980	13.66	1.0980	1.366	0.4395	284.04	11.02	

\*系数D乘上不同地区的大地系数才有意义

### 三、五泉山水氡时值中的日波和半日波

图1为兰州五泉山水点1984年11月4日至13日(共240个数据)的时值数据图(观测仪器为JZD—1型水氡自记仪)。此段时间的水氡时值与气温,气压显著相关,其相关系数分别为0.2284和-0.3585,均大于 $\alpha_{0.10} = 0.1389$ 。用多元逐步回归的方法排除气温、气压对水氡的影响,其结果见图2。其中气温的回归系数为2.1贝可/升度, F值=19.46,大于检验标准 $F_{0.01} = 6.64$ ;气压的回归系数为2.99贝可/升·毫巴, F值=24.93,大于检验标准 $F_{0.01} = 6.64$ 。

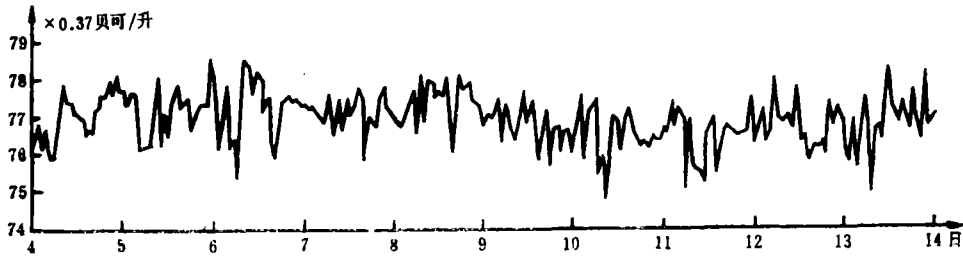


图1 五泉山水氡时值原始数据图  
Fig.1 Hourly values of radon content in groundwater measured at Wuquanshan spring

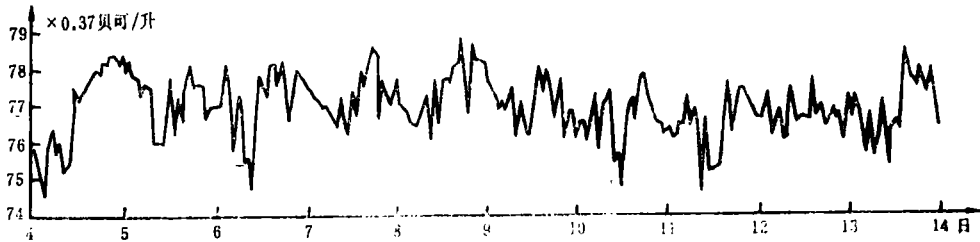


图2 排除气温、气压后水氡时值曲线  
Fig. 2 Curves of hourly values of radon content in groundwater after eliminating interferences of atmospheric temperature and pressure

将排除了气温、气压影响之后的同时段的兰州五泉山水氡时值，用潮汐波最优谱分析法处理，分离出与理论固体潮中相应的日波、半日波分量。其结果得到该水点水氡时值序列中有4个半日波和日波显著存在(表3)。这4个波的F值均大于其检验值  $F_{0.05} = 2.99$ 。将这4个分波的计算结果与理论结果分别作图(图3)，对比发现两个图形有较好的一致性。说明水氡日波和半日波的出现与固体潮汐应力有关。但由于水氡观测的影响因素较多，所以各分波及合成波的振幅和相位还不能和理论固体潮一一对应得很好。

表3 五泉山水氡时值序列的日波和半日波

符 号	角频率(度)	振 幅 (×3.7贝可/升)	周 期 (小时)	相 位 (度)	周期性F检验值
$M_2$	29.98	0.0182	12.42	77.97	7.311
$K_1$	15.04	0.0418	23.93	125.0	46.06
$O_1$	13.94	0.0182	25.81	187.5	9.049
$S_2$	30.00	0.0106	11.99	220.8	3.135

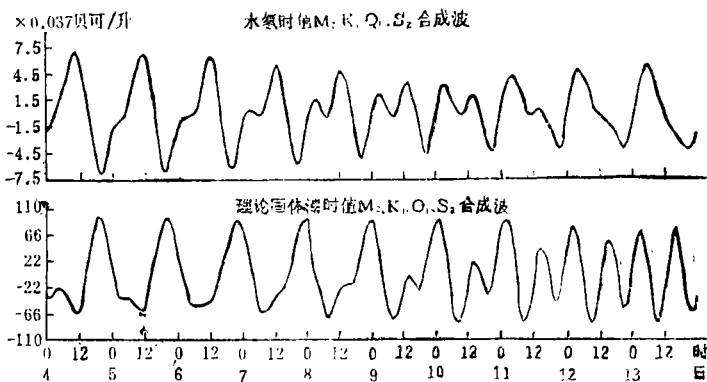


图3 兰州五泉山水氡时值和理论固体潮时值中的日波和半日波  
Fig. 3 Semidiurnal and daily waves in hourly values of radon content of groundwater measured at Wuquanshan spring and theoretical earth tide

五泉山水氡日波和半日波的起潮分量不很大，最大值约为0.555贝可/升，占水氡观测平均值(27.55贝可/升)的2%，占水氡变化值(以7.4贝可/升计)的7.5%左右。

### 四、水氡日值序列的半月波和月波

选择中国东部地区的天津张道口、山东聊城和西部地区的甘肃平凉水点作为样本，研究其日值序列中的半月波和月波。这些水点的观测资料的质量较高。

#### 1.1980年1月至12月聊城水氡日值序列

用上述方法处理该水点这一时段的水氡日值序列，得到了与理论固体潮相同的3个半月波和月波，见表4。将这3个波合成作出图4。

表4 1980年1—12月聊城水氡日值中的月波、半月波

符 号	角频率 (度/小时)	周期 T (天)	振幅 (×3.7贝可/升)	相位 (度)
M <sub>f</sub>	1.0986	13.66	0.0479	57.32
M <sub>m</sub>	0.5444	27.55	0.0919	92.22
M <sub>·f</sub>	1.0160	14.77	0.0697	204.6

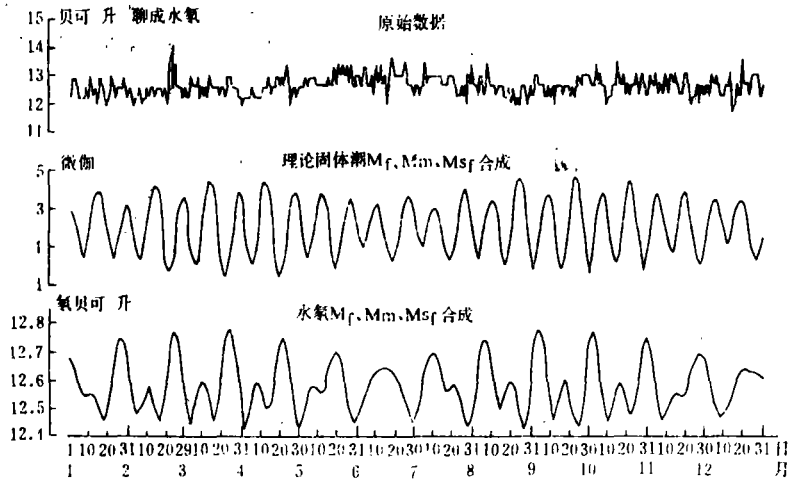


图4 聊城水氡和理论固体潮中的半月波、月波(1980年)

Fig. 4 Semimonthly and monthly waves of radon content of groundwater measured at Liaocheng drill and theoretical earth tide

#### 2.1981年1月至12月张道口水氡日值序列

在此时段中天津地区理论固体潮日值序列中共存在3个半月波和月波分量，见表5。计算得出张道口水氡日值序列中存在两个半月波和月波分量(表5)。将M<sub>f</sub>波和M<sub>m</sub>波合成作出图5。

表5 1981年天津理论固体潮中半月波、月波的分量与1981年天津张道口水氡日值序列中半月波、月波分量

符号	角频率 (度/天)	周 期 (天)	振 幅 (微伽)	相 位 (度)	符 号 (水氡)	角频率 (度/天)	周 期 (天)	振 幅 (×3.7贝可/升)	相 位 (度)
M <sub>f</sub>	26.35	13.66	1.086	152.8	M <sub>f</sub>	26.35	13.66	0.2164	55.13
M <sub>m</sub>	13.06	27.55	0.511	323.8	M <sub>m</sub>	13.06	27.55	0.1812	287.7
M <sub>·f</sub>	24.38	14.76	2.685	355.7	M <sub>·f</sub>	不存在			

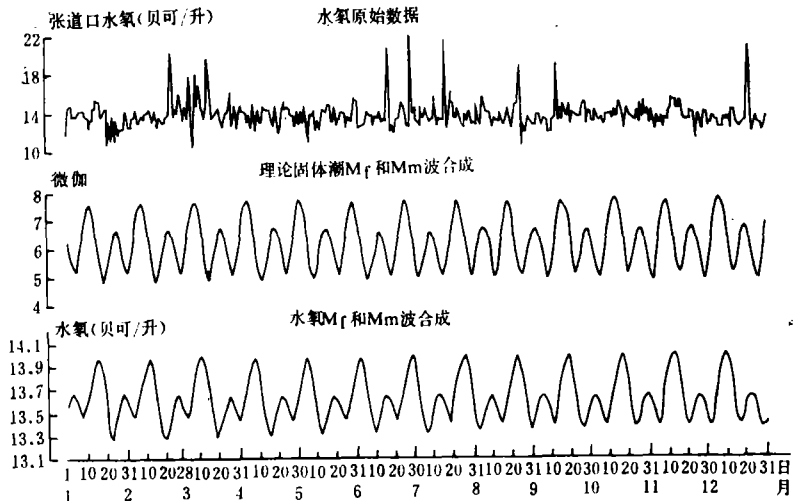


图 5 张道口水氡日值和理论固体潮中的半月波、月波(1981年)  
 Fig. 5 Semimonthly and monthly waves in daily values of radon content of groundwater measured an Zhangdaokou drill and theoretical earth tide

3. 1982年1月至12月平凉水氡日值序列

1982年平凉地区理论固体潮日值序列中存在 2 个半月波和月波, 见表 6。对同一时段排除气温影响以后的平凉水氡日值序列的计算结果表明, 该序列亦存在同样的 2 个半月波和月波(表 6)。将这两个波合成作出图 6。用同样的方法处理了平凉1984年的资料得到, 理论固体潮中存在 3 个半月波和月波(M<sub>f</sub>、M<sub>M</sub>、M<sub>Sf</sub>), 水氡日值序列中(排除气温、气压影响以后)也存在 3 个同样的半月波和月波。

表 6 1982年平凉理论固体潮中半月波、月波分量与1982年平凉水氡日值序列中半月波、月波分量

符 号	角频率 (度/天)	周 期 (天)	振 幅 (微伽)	相 位 (度)	符 号 (水氡)	角频率 (度/天)	周 期 (天)	振 幅 (贝可/升)	相 位 (度)
M <sub>m</sub>	13.06	27.55	0.3660	187.3	M <sub>m</sub>	13.06	27.55	0.2700	253.1
M <sub>f</sub>	24.38	14.76	1.777	275.5	M <sub>f</sub>	24.38	14.76	0.1652	126.1

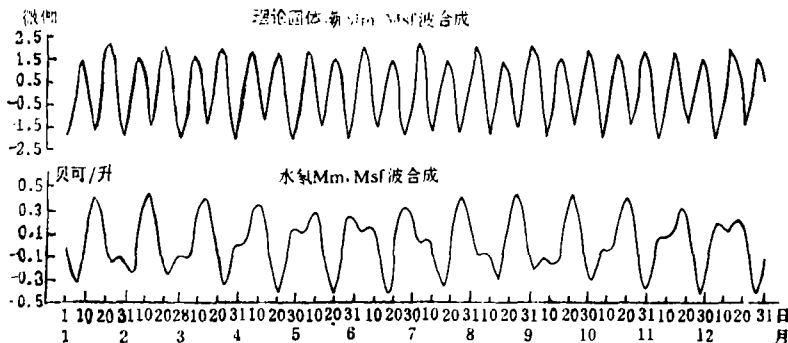


图 6 平凉水氡(排除气温影响后)和理论固体潮中的半月波、月波(1982年)  
 Fig. 6 Semimonthly and monthly waves of radon content in groundwater measured at Pingliang spring after eliminating interferences of atmospheric temperature and theoretical earth tide

#### 4.1984年1月至12月通渭水氡日值序列

1984年通渭地区理论固体潮中存在一个半月波和一个月波分量,即 $M_m$ 波和 $M_{sf}$ 波。同一时间段的通渭水氡日值序列中却不存在上述两个波。

### 五、讨 论

从以上结果可以看出,某些水点水氡日值序列中确实存在与固体潮分量有关的半月波和月波分量,但分波的数量不尽相同,有的水点存在3个与固体潮分量一致的半月波和月波分量,有的水点存在2个。还有另外一种情况,既有的水点水氡日值序列中并不存在与理论固体潮分量相一致的半月波和月波。一系列水氡数据是由若干个周期不同的分波组成的,各个周期成分应该能反映与其有关的某种客观规律的变化。例如水氡的年周期分量应该反映天体气象因素的变化,水氡的半月分量、月分量应该反映理论固体潮的变化。一个水点,在无震期间,某一年份其水氡测值能否反映上述变化,这取决于该水点的水文地质条件和观测质量的好坏。那些水点条件差、干扰因素多、条件多变、观测质量不好的水点,反映不出客观规律的变化,往往反映偶然因素的变化。因而水氡日值序列中就不存在与理论固体潮有关的各个分量。而水点条件好,观测质量高的水氡数据能够反应地壳潮汐应力的变化。另一方面,还可依据水点日值序列中是否存在与理论固体潮相一致的半月波、月波以及相一致的分波的多少,来评价该水氡测点的水文条件和观测质量的好坏。

(本文1989年2月16日收到)

### 参 考 文 献

- [1]王长岭等,南北地震带水氡正常变化的研究,西北地震学报, Vol. 5, No. 3, 1983.
- [2]国家地震局地下水影响因素研究组,地震地下水动态及其影响因素分析,地震出版社, 1985.
- [3]应怀楬,波形和频谱分析与随机数据处理,中国铁道出版社, 1983.
- [4]王国英,水氡潮,中国地震, Vol. 1, No. 1, 1985.
- [5]方便,固体潮,科学出版社, 1984.



TIDAL WAVE COMPONENTS IN HOURLY VALUE SEQUENCE  
AND DAILY VALUE SEQUENCE OF RADON  
CONTENT OF GROUNDWATER

Wang Changling, Liu Yaowei, Tao Shufen  
(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, China*)

**Abstract**

In this paper, we have computed the data of hourly values and daily values of radon content by means of the optimal spectrum-analysis method of tidal wave. The results show that there exist semidiurnal and daily wave components in hourly value sequence of radon content measured at Wuquanshan spring of Lanzhou, which are consistent with the theoretical earth tide; there exist semimonthly and monthly wave components in daily value sequences of radon content measured at Liaocheng drill of Shandong Province, Zhangdaokou drill of Tianjin City, Pingliang spring of Gansu Province, which are consistent with the theoretical earth tide. It has proved that drills and springs having good environmental conditions and the data having good quality, the change of radon content can reflect the change of tidal stress of earth crust.