第 67 卷 第 2 期 地质学报 Vol. 67, No. 2
1993 年 5 月 ACTA GEOLOGICA SINICA May, 1993

深部含水系统水文过程线谱特征及其传递函数

陈葆仁 金培康 刘淑芸 董守玉
（南京大学地球科学系）（水利部南京水文研究所）（河北省地震局）

深部含水系统水文过程线的波动在很大程度上记录了岩石圈的流体脉动及一些地质过程的定向变化。大量实践已经证明，地下水是地壳内十分重要的信息载体。本文利用频谱分析和系统理论方法，剖析了两个深部含水系统水位动态的形成，揭示了深部不同含水系统水位（或流量）过程线与当地降水序列、气压及固体潮序列有密切关系的谱结构与谱特征。在水文地质领域引入传递函数，并提出了两类谱的结构模式。

关键词 深部含水系统 水文过程线 传递函数

1 问题的提出及研究地区的背景条件

对地下水作为可利用的资源以及环境致害因子来研究已有相当长的历史，但对它作为地壳的信息源来开发与研究，并将研究结果反馈，加深对含水系统自身的认识，是新近水文地质学的第三研究领域。

深层（一般指含水层埋深大于 500m）地下水动态，是指承压含水层受力产生形变时引起的水位（或流量）变动，是含水层应力应变状态变化的外部表现。这种动态与通常在水均衡影响下产生的地下水动态有本质的区别。近来水文地质界对深部含水系统动态领域的研究，大多在时间域中讨论问题。本文采用快速傅里叶变换（**FFT**）及其相应的谱技术，在频率域中剖析深部含水系统水位动态的形成及其特征。1974 年美国学者 L. W. Gelhar 首先利用上述方法研究了堪萨斯州一个地区地下水的时间序列，并借此估计了含水系统的水文地质参数[1]。后来前联邦德国水文学家 G. Huthmann[2] 以及加拿大学者 K. Adamowski[3] 等也先后在论文中提出在时间序列分析基础上发展含水系统输入输出模型的观点，但他们讨论的含水系统都是浅层水和地表水，本文涉及的深层水动态，还未见有报导。

我国从 1976 年发生 7.8 级唐山地震至 1986 年，已建立起全国规模的以深井为主体的地震地下水观测网，这些井的深度多在 1000—3000m 之间，至今已积累了 10 多年的水位（或流量）连续自记资料。华北井网是其中完善的井网之一。作者对河北平原多口深井的水位谱及其影响因素进行了系统分析，并对冀中坳陷的新译 5 号和马 17 深井的成果作

注：本文为国家自然科学基金资助项目（4870172）。
本文 1991 年 4 月收到，12 月改回，康易编辑。

了典型剖析。

冀中坳陷是河北平原新生代形成的断陷盆地。基底由晚元古代和早古生代海相碳酸盐岩为主体的地层构成。中生代开始形成断陷，沉积了充填式的厚达数千米的陆相碎屑岩，其中又以早第三纪砂泥岩为主。从晚第三纪开始，冀中地区由断陷转入坳陷，沉积面积扩大，掩埋了地区内新老沉积，形成了现今的河北平原。由山西高原到河北平原可划分出太行山隆起、冀中坳陷、沧县隆起等构造单元（图 1)。这些构造单元对冀中坳陷地下水的补给与排泄产生了决定性影响。

冀中坳陷在纵向上可以划分为 3 个含水岩系：上层是晚第三纪含水岩系，地下水大多属淡水，矿化度小于 3g/L 者居多，化学成分以 HCO_3-Na 型为主。中层为早第三纪含水岩系，地下水较贫乏，矿化度多数大于 10g/L，高者可达 50—70 g/L，化学成分多属

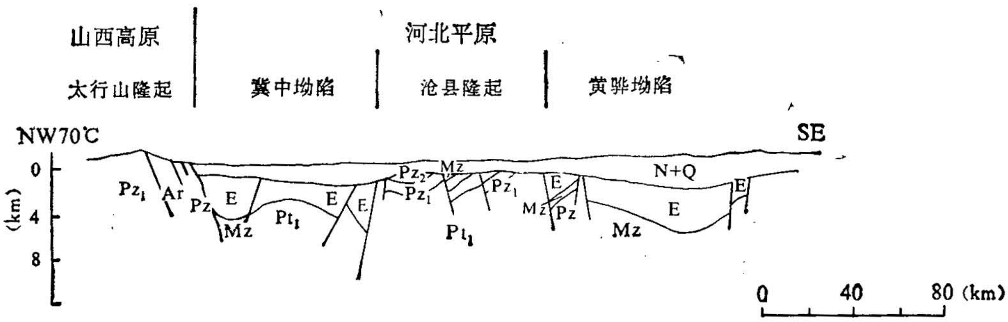

图 1　华北平原地质剖面图[4]（图中地层采用通行代号）

Fig. 1　The geological profile of the Hebei Plain

Cl-Na 型，地下水多保留着沉积水的特征。中上两层均属孔隙水。下层为早古生代及元古宙含水岩系，又称“古潜山含水岩系”，为不同时代的地层所覆盖，属喀斯特裂隙水，水质变化大[4]（图 2)。据坳陷内部由基底断裂分隔的诸岩块的空间位置、边界断裂性质和某些水文地球化学特征，可将冀中坳陷古潜山地下水进一步划分为 14 个较为独立的水文地质单元。有些古潜山水文地质单元分布于距现代补给区近的基底凸起区，地下水保持低矿化度；本文选定的马 17 井位于被厚层上第三系掩盖的隆起区——南马庄-留路水文地质单元，地下水具有中等矿化度；古潜山含水岩系另一些埋藏高矿化度水的水文地质单元，分布在埋藏很深的低凸起区，凸起顶部被上古生界覆盖，水交替条件很差，新泽 5 号井即位于这种类型的单元——刘村水文地质单元内。

采用 ^{14}C 法测定地下水年龄表明，古潜山地下水年龄为 10×10^3—30×10^3a[1)]，表明总体上古潜山的地下水水交替不强，但个别年龄较小者也只有几十年光景。

新泽 5 号井位于深县境内，井深 3364m，井孔穿越 2000 多米厚第四系、上第三系以及 500 多米厚的下第三系、石炭系；观测段设在最下部 3347—3364m 深的奥陶纪灰岩内。勘探过程所获资料证实，奥陶纪灰岩中喀斯特发育；单元纵向水化学分带明显。

马 17 井位于河间县境内，井深 2694m，该井构造位置处于冀中坳陷与沧县隆起的斜

1) 王永才，张根琛．冀中地区水文地球化学特征及其与地震关系的研究．河北省地震局，1987.

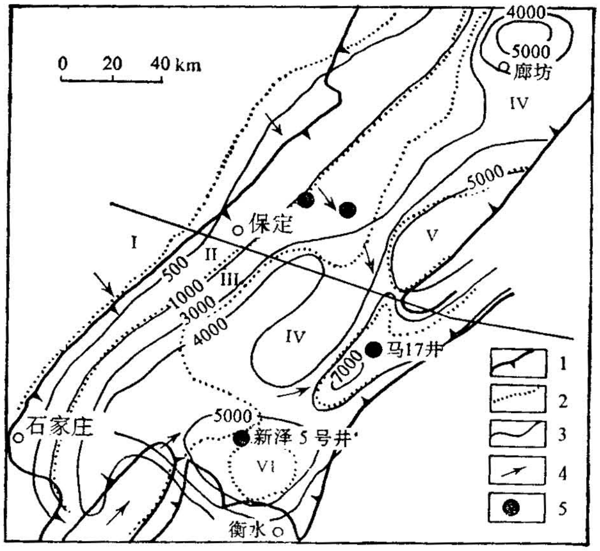

图 2 冀中坳陷古潜山水动力条件分析图①

Fig. 2 Map showing the hydranlic conditions of the aqueous system of the ancient buried hills of the Jizhong depression

1.拗陷边界； 2.分区界限； 3.矿化度高值线； 4.古潜山水流向； 5.地震观测井； I. 供水区； II. 强交替区； III. 弱交替区； IV. 承压区； V. 排水区； VI. 高矿化度异常区 1. Boundary of depression; 2. boundary of hydrogeological area; 3. TDS contour; 4. flow directions of groundwater in the pre-Tertiary bedrock; 5. deep well of seismological observation; I. recharge area; II. strong alternated area; III. weak alternated area; IV. confined water area; V. discharge area; VI. salt-water area

① 万迪堃等．冀中深井水位趋势性上升的研究．地下水预报地震选辑(2)，河北省地震局，1983．

坡带上，NE 向的边沿断裂与 WNW 向横向断裂会聚，基底破碎。井孔穿过第四系和下、上第三系后，直接进入蓟县系(石灰岩)。观测段设在 2571—2694m 蓟县系(石灰岩)中，地下水属喀斯特裂隙水(钻井过程中冲洗液大量漏失)。单元内不同深度和不同层位地下水水质差别不大，不具备明显的水化学纵向分带。完孔后，地下水能自流至地面。经同位素分析地下水中 δD 为 $-70‰$ $\delta^{18}O$ 为 $-7‰$[1)]。说明马 17 井具备迳流途径长、循环深的特点。

2 物理模型的建立

关于深部含水系统水文过程线受固体潮与气压变化影响的报导，在学术界已广为人知，我国地震水文地质界为了利用深井水位或流量观测资料预报地震，对水井的气压潮、地球固体潮进行了有效的研究[5]，并采用勒卡拉兹调和分析方法，分离了很多深井水位过程线与各潮汐分波有关的谐成分，不少井的水位过程线经过上述潮汐分量滤波之后，其剩余的波动能量几乎等于零，水位过程线成为一条平行横座标(时间轴)的直线。在大量观测

1) 王永才，张根琛．冀中地区水文地球化学特征及其与地震关系的研究，河北省地震局．1987．

实践中除了大气潮、地球固体潮影响以外，深井含水系统还能感应地面雨荷的附加应力波动。当然由于各个深井所在地地球物理参数和水文地质条件不同，各种因子作用的强度不尽相同。对此，我们采纳 L. W. Gelhar 在“地下水系统的随机模拟”著作中的观点，把深井含水系统视为线性系统，并把它假设为一个黑箱，把气压、固体潮、雨荷等影响因子作为系统输入，井水位(或流量)为系统输出[1]，如图 3 所示，组成一个多输入一单输出的线性系统模型。

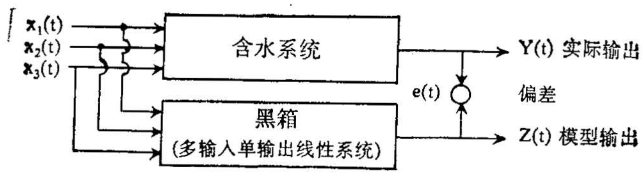

图 3　含水系统的数学模拟图

Fig. 3　The math simulation of the water-bearing system

图 3 的数学模拟可以用下式表示：

$$y(t)=\sum_{i=1}^{N}\int_{-\infty}^{+\infty}h_i(\tau)x_i(t-\tau)\mathrm{d}\tau+e(t)\quad i=1,2,3^{[6]}\tag{1}$$

式中，$h_i(\tau)$ 为脉冲响应函数，用来描述含水系统不同的性质；$x_1(t)$、$x_2(t)$、$x_3(t)$ 分别是 3 个输入因子——气压、固体潮和雨荷；$y(t)$ 为井孔水位输出；$e(t)$ 为随机成分。本文具体计算中对新泽 5 号井采用双输入单输出模型，对马 17 井采用单输入单输出模型。

为了研究各含水系统的特征，本文又引入凝聚函数 **Y** 与传递函数 G，前者可以从统计学角度，定量地评价各输入因子通过某一含水系统对输出所作贡献的大小，后者是某一系统固有的特征参数，它描述某一输入因子随频率变化传递渠道的畅通程度。传递函数 G 的严格的数学表达式如下：

$$G(\omega)=\int_{-\infty}^{+\infty}h_i(\tau)e^{-i(-\omega)\tau}\mathrm{d}\tau\tag{2}$$

从(2)可以知道，$G(\omega)$ 是系统脉冲响应函数 $h_i(\tau)$ 的傅里叶变换。下面列出本文计算传递函数及凝聚函数的计算框图：图 4 中所示的含水系统谱密度函数矩阵可表示如下（对三输入单输出线性系统）：

$$\begin{bmatrix}S_{1y}(f)\\S_{2y}(f)\\S_{3y}(f)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}S_{11}(f)&S_{12}(f)&S_{13}(f)\\S_{21}(f)&S_{22}(f)&S_{23}(f)\\S_{31}(f)&S_{32}(f)&S_{33}(f)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}G_1(f)\\G_2(f)\\G_3(f)\end{bmatrix}$$

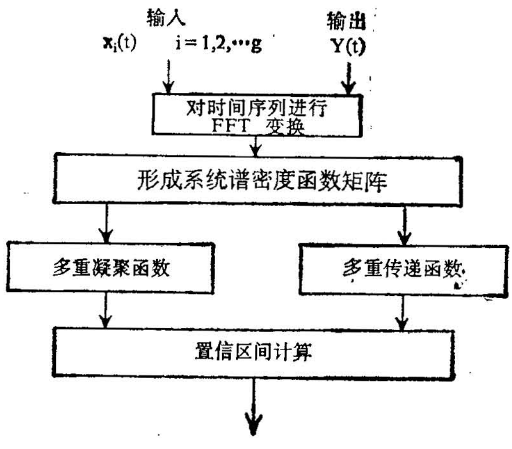

图 4　凝聚函数与传递函数的计算框图

Fig. 4　The computer program frame of coherence function and transfer function

或
$$G(f)=S_{xx}^{-1}(f)S_{xy}(f) \tag{3}$$
式中 $S_{xx}^{-1}(f)$ 为 $S_{xx}(f)$ 的逆矩阵，式(3)给出的每个 $G_i(f)$ 是输入输出互谱 $S_{iy}(f)$ 和输入输入互谱 $S_{ij}(f)$ 的函数。不论各个输入因子是否独立，式(3)均成立。如果系统属双输入单输出，则(3)式的两个传递函数 $G_1(f)$、$G_2(f)$ 可写成：
$$G_1(f)=\frac{\begin{vmatrix} S_{1y}(f) & S_{12}(f) \\ S_{2y}(f) & S_{22}(f) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} S_{11}(f) & S_{12}(f) \\ S_{21}(f) & S_{22}(f) \end{vmatrix}};\quad G_2(f)=\frac{\begin{vmatrix} S_{11}(f) & S_{1y}(f) \\ S_{21}(f) & S_{2y}(f) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} S_{11}(f) & S_{12}(f) \\ S_{21}(f) & S_{22}(f) \end{vmatrix}}$$
对单输入单输出系统，则
$$G(f)=S_{xy}(f)/S_{xx}(f) \tag{4}$$
如果各输入因子互不相关，相互独立，那末(4)式是传递函数的通式。

3 深井的特征传递矩阵

考虑到刘村含水系统中的新泽 5 号井水文过程线时域分析主要受固体潮及气压影响，我们选择无降水的 1982 年旱季观测资料[1)]，建立双输入单输出的数学模型。样本长度 N 取 256，取样间隔为 1h。首先我们用 **FFT** 方法分析了该井水位的振幅谱，并与当地

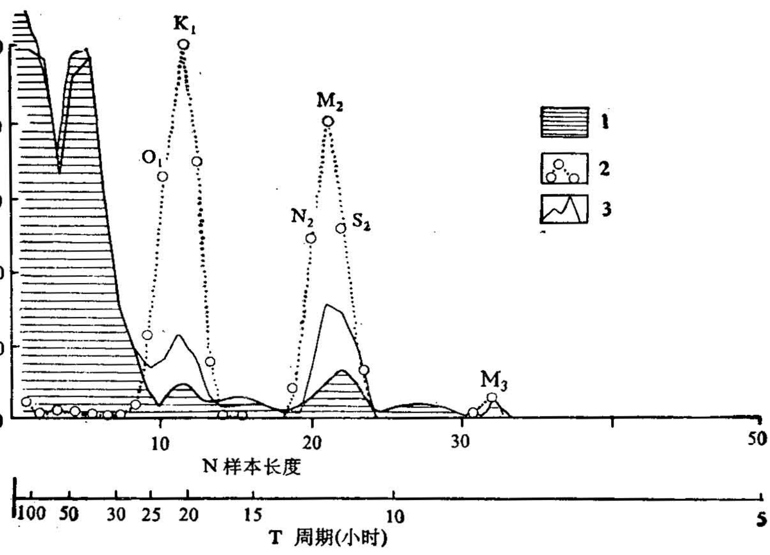

图 5 新泽 5 号井水位振幅谱与当地气压、固体潮振幅谱对比

Fig. 5 The comparison among the amplitude spectra of water table, atmospheric pressure and Earth tide of Xinze well No. 5

1.气压振幅谱(毫巴)； 2.固体潮振幅谱(微伽)； 3.水位振幅谱(厘米)

1. Amplitude spectra of barometric pressure (mb); 2. amplitude spectra of solid tide (μg); 3. amplitude spectra of water level (cm)

1) 据国家地震局．华北地震—地下水监测井网系统观测资料．

理论固体潮值与气压实测值的振幅谱相比较，发现水位振幅谱曲线上与 5 个占地球物理学潮波能量 95% 的 M_2、S_2、N_2、K_1、与 O_1 波相对应均存在峰值，这些潮波周期值位于 11.64(S_2)—25.6(O_1) 之间；在更长的周期段（>42h）又与气压波有极其密切的对应关系(见图 5)。新泽 5 号井水位的自谱密度函数曲线以及当地的气压、固体潮值的自谱密度函数曲线的结构与各自相应的振幅谱十分类似(如图 6 所示)。

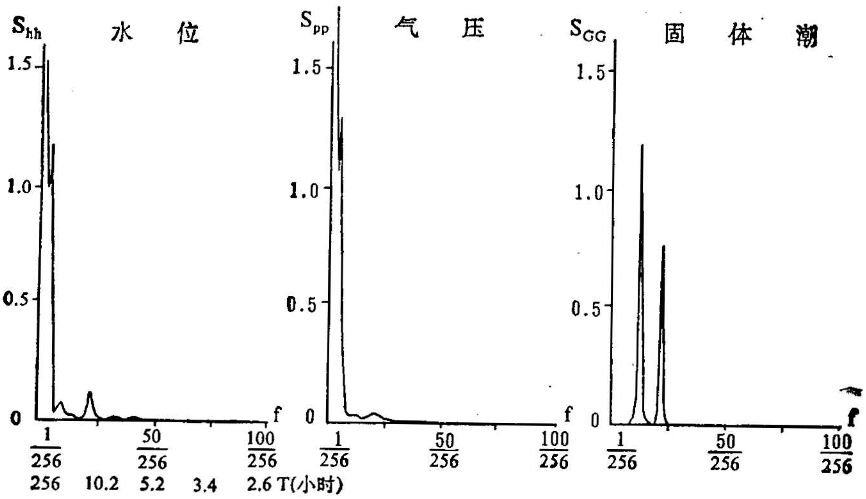

图 6　新泽 5 号井水位、气压、固体潮自谱密度函数

Fig. 6　The spectra density function of water table, atmospheric pressure and Earth tide of Xinze well No. 5

从图 7 中可以进一步看到：在固体潮—水位互谱密度曲线 $S_{Gh}(f)$ 中，半日波群能量大于日波群能量，这与固体潮自谱密度曲线中这两个波群能量大小的分布恰好相反，说明新泽 5 号井含水系统本身对半日波频段的能量传递能力(或响应能力)大于全日波频段；其次，气压—水位互谱密度曲线 $S_{Ph}(f)$ 与气压自谱密度曲线 $S_{PP}(f)$ 在结构上十分一致，可见该含水系统对气压的传递比较均匀；从 $S_{PG}(f)$ 和 $S_{GP}(f)$ 还可以看到固体潮因子与大气潮之间客观上存在一定相关性，当然应该认为，在地球固体潮引潮力的作用下，大气层中相应会产生大气压力的附加波动，十分有趣的是，在频段的传递能力方面，同样存在与上面分析结论一致的情况。

下面用数字来定量表示新泽 5 号井水位对于两个相关因子的传递矩阵[1)]

$$\begin{bmatrix} G_G \\ G_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{GG} & S_{GP} \\ S_{PG} & S_{PP} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} S_{Gh} \\ S_{Ph} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5.05 & 0.71 \\ 0.61 & 8.91 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1.72 \\ 8.27 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.21 \\ 0.91 \end{bmatrix}$$

从以上的数字传递矩阵看，新泽 5 号井含水系统对于周期在 8—30h 间的振动(固体潮能量集中频段)有一定的导通作用，而对 30—100h 之间的振动(气压潮能量集中频段)十分畅通。

1) $S_{xx}(f_1, f_n) = \sum_{i=1}^{n} S_{xx}(f_i)\Delta f_i$,　$S_{xy}(f_1, f_n) = \sum_{i=1}^{n} S_{xy}(f_i)\Delta f_i$

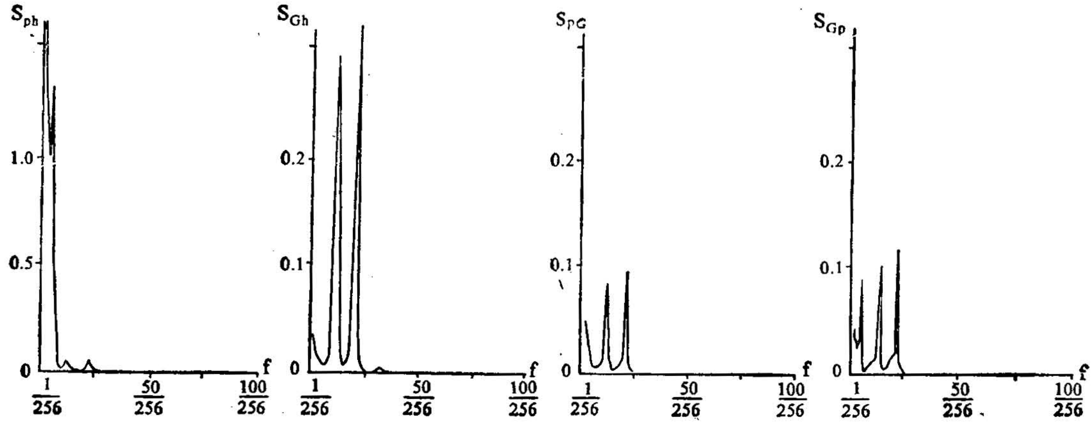

图 7　新泽 5 号互谱密度函数

Fig. 7　The cross-spectra density function of Xinze well No. 5

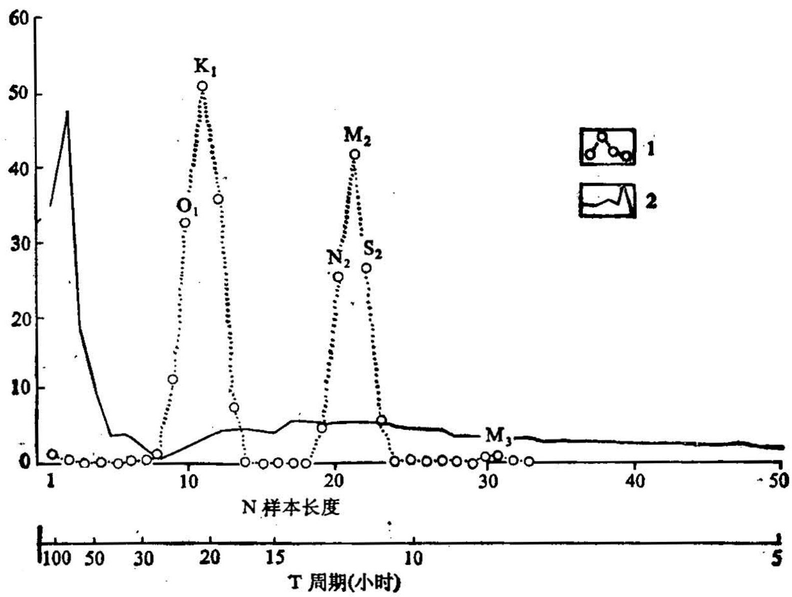

图 8　马 17 井水位振幅谱与当地固体潮振幅谱对比

Fig. 8　The amplitude spectra of water table and Earth tide of Ma well No. 17

1. 固体潮振动幅谱(微伽)，　2. 水位振幅谱(厘米)

1. Amplitude spectraof solid tide (μg); 2. amplitude spectra of water lever (cm)

对于马 17 井所在的南马庄一留路含水系统，从长期水文动态观测中已知，该井对固体潮及气压反应没有新泽 5 号井明显，为了进行两井对比，我们同样选择 1982 年旱季观测资料[1)]，建立固体潮与水位单输入单输出数学模型。样本长度和取样间隔与新泽 5 号井一样。图 8 是固体潮与水位的振幅谱对比。尽管马 17 井固体潮振幅谱也同样存在 6 个主要潮波分量，然而马17井水位振幅谱不存在与这些分量对应的周期峰值，而在相当宽的

1）据国家地震局，华北地震一地下水监测井网系统观测资料。

频域内(周期从 4.5 到 51h)能量分散，出现宽频域随机背景，对于这种水井水位过程线频谱特征形成的认识必须作多方面的努力，对此下面即将进一步讨论。对于马 17 井固体潮与水位的互谱密度曲线 $S_{Gh}(f)$ 仍然可以看到两者之间微弱的响应关系，其峰值能量只有新泽 5 号井的 1/3 左右，并且也存在半日波响应比全日波好这个在新泽 5 号井资料分

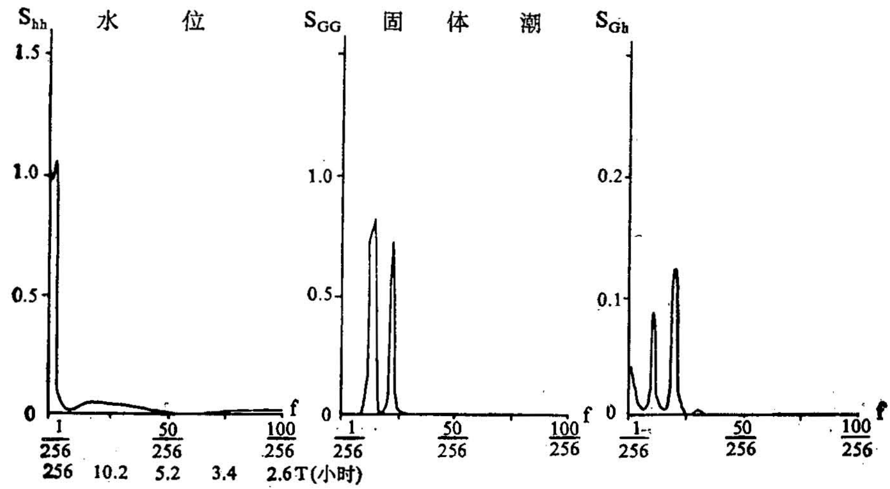

图 9　马 17 井井水位、固体潮自谱密度函数及井水位—固体潮互谱密度函数

Fig. 9　The spectra density function of water table and the cross-spectra density function between water table and Earth tide of Ma well No. 17

析中曾经提到过的现象（见图 9)。如果用数字传递矩阵元素来表示，则

$$G_G = \frac{S_{Gh}}{S_{GG}} = \frac{0.61}{4.22} = 0.14$$

说明马 17 井含水系统对固体潮的传递能力只及新泽 5 号井的 67%。

由于上述分析所用的原始资料都选自无降水的干季，所以在分析中没有考虑雨荷因子的影响。降水是一个不连续作用的因子，若取样本间隔为 1d，对降水因子进行了自谱与互谱密度函数分析，它们的结构较复杂，接着又进一步剖析了降水对深部含水系统的传递函数。分析结果见图 10。从图可以看到，马 17 井对于频率高于 0.05 周/日（w/d）即最常见的雨荷的传递能力只有新泽 5 号井的 1/10 左右。与其它因子(气压、固体潮)相比，深部含水系统对雨荷的传递能力均小得多。

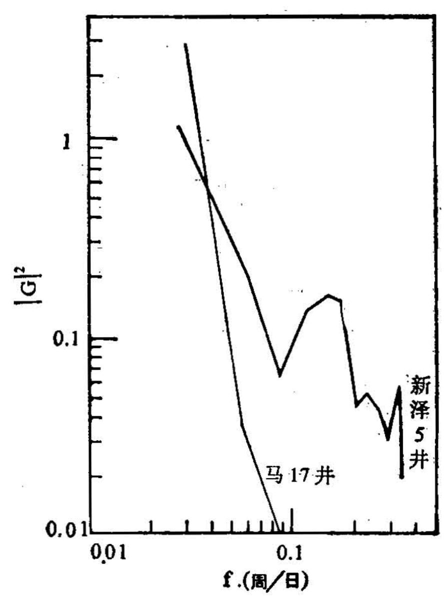

图 10　马 17 井等井孔水位对雨荷的传递函数

Fig. 10　The transfer function of precipitation to water table of Ma well No. 17

4 基本结论及存在问题的讨论

下面对新泽 5 号井与马 17 井水位过程线两种截然不同的谱特征的形成进行讨论：

新泽 5 号井含水系统相对于南马庄一留路含水系统介质弹性好；含水系统水化学纵向分带好说明水文地质单元内部水交替受阻，含水层具有一定封闭性能(或边界断层具有阻水作用)。所以新泽 5 号井对气压和固体潮波动响应能力强。这种气压效应明显、固体潮响应好的深井从长期观测经验看，反应地震信息反而不灵敏。这些深井在宏观地震场中往往位于相对独立、由能、质传输带圈闭的巨形岩块内部，它们是地震场中的“盲区”。而南马庄一留路含水系统中的马 17 井，位于河北平原沧县隆起与冀中坳陷两大构造地质单元交接的斜坡带上，附近有深断裂经过。含水单元岩石破碎，这些背景地质条件，使马 17 井地下水沟通深循环地下水。成井后井口一直保持自流条件，并且是热水井。由以上条件看来，南马庄一留路含水系统位于深部水动力场的减压带上，地下水既能在较广的空间内进行质量交换，又能在地壳应力应变场中通过自由水和结合水的交换、气体的溶解与析出赋予更多地壳含水系统的信息，使马 17 井水位过程线的谱结构占领了较宽的频段，能量相对比较分散。马 17 井在地震场中位于线性的质、能传输带附近，反映地震一水文地质信息比较灵敏。由于马 17 井含水单元与新泽 5 号井相比位于相对半开启区，所以它与开启的潜水井一样，对气压及固体潮反应不明显。对固体潮及气压响应好的新泽 5 号井，它位于岩块内部而感应不到上述信息。

如上论述，作者已建立了两种不同水位谱形成的物理模型。那么这种不同谱模式形成与新泽 5 号井的“静水位”观测条件[1)]和马 17 井的“动水位”观测条件不同是否也有关系呢？为了回答这一问题，我们除了对新泽 5 号井与马 17 井水位谱进行研究以外，还研究了不少别的井孔，如位于燕山褶断带和华北平原交界线上的滦南井，附近有宁河一昌黎超壳断裂及迁安一滦河新生代活动断裂通过，该井深度不大，仅是一口第四系地下水观测井，观测深度 206—250.5m，属孔隙承压水，是一口静水位观测井。该井水位过程线的谱结构与马17井十分类似。已知该井地下水与深部奥陶纪灰岩联系密切，受奥陶纪含水层补给，奥陶纪地下水向第四系的补给部分相当于马 17 井井口溢流部分。所以“动水位”观测井仅代表一定的井域水文地质条件，并不属于马 17 井所专有。另一方面，我们还对马 17 井的流量观测系列与“动水位”观测系列以相同的样本长度和采样间隔进行谱分析，结果发现流量系列的谱曲线包含的信息比水位系列更为丰富，总的谱结构轮廓基本一致，信息的丰富部分在频率高端比低端更大些。

本文在撰写过程中，得到了河北省地震局贾化周、万迪堃、李师群、秦清娟等同行的大力协助，在此致以诚挚的感谢。

1) 指井口不出现泄流的通常地下水动态观测井。

参　考　文　献

1 Gelhar L W et al. Stochastic Modeling of Groundwater System. MIT. 1974. Boston.
2 Huthman G, Wilke K. Time and Frequency Domain Analysis of Hydrological Systems. Hydrol J., 1982, 55: 347—369.
3 Adamowski K, Hamory T. A Stochastic Systems Model of Ground Water Level Fuctuations. Hydrol J. 1983, 62: 129—141.
4 陈墨香等. 华北地热. 科学出版社,1988.
5 汪成民等. 地下水微动态研究. 地震出版社,1988.
6 陈葆仁等. 地下水动态及其预测. 科学出版社,1988.
7 贝达特 J S. 随机数据分析方法(中译本). 国际工业出版社,1971.189.

SPECTRUM CHARACTERISTCS AND TRANSFER FUNCTION OF HYDROGRAPH OF DEEP AQUEOUS SYSTEM

Chen Baoren, Jin Peikang,

(Department of Earth Sciences, Nanjing University)

Liu Shuyun

(Nanjing Institute of Hydrology, Ministry of Water Resources)

and Dong Shouyu

(Seismological Bureau of Hebei Province)

Abstract

The fluctuation of hydrograph in deep wells records the fluid pulsation in the lithosphere and variation of the Earth's crust. Many observations have verified that groundwater is an ideal information carrier of the crust.

In this paper, the series of input (precipitation, air pressure, earth tide etc.) and output (water table, artesian flow) of the deep aqueous system are studied by using the spectrum analysis and system theory. The application concepts of transfer function and the spectrum structure of the hydrograph enrich the knowledge of the deep aqueous system.

Two typical spectrum structures of the hydrograph of the deep aqueous system are obtained by comparing with many water-bearing systems of the Jizong depression. One is from Ma well No.17 and the other is from Xinze well No. 5.

The physical models of forming the spectrum of the hydrograph are constructed on the basis of spectrum research on the deep aqueous system.

Key words deep aqueous system, hydrograph, transfer function

作　者　简　介

陈葆仁，1932 年生。1956 年毕业于北京地质学院水文地质工程地质专业，现任南京大学教授，从事地下水资源形成、评价和地下水动态预测研究。通讯地址：南京大学地球科学系，邮政编码：210008。