

降水量与地下水埋深的小波分析

——以广饶县井灌区为例

孙海清

(北京大学资源与环境地理系, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 广饶县井灌区地下水是当地农业生产和人民生活的重要水源。随着当地国民经济的增长, 需水量不断加大, 地下水连年超采, 致使地下水位大幅度下降, 由 1984 年的 1.97 m 下降至 2001 年的 -10.79 m。该文运用小波分析的方法, 研究了井灌区 1975~2000 年逐月的地下水埋深的动态变化, 并结合 1956~1995 年 40 年的降水量小波分析探讨了地下水位下降的驱动因子, 得出在 1975 年以前和 1980 年前后地下水埋深与降水量有较好的对应关系。

关键词: 小波分析; 地下水埋深; 降水量变化; 井灌区

中图分类号: P332.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2007)02-0055-04

Wavelet Analysis on Annual Precipitation and Groundwater Depth Changes

——A Case Study on Well-irrigated Area, Guangrao

SUN Hai-qing

(Department of Resources and Environmental Geosciences,

College of Environmental Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The groundwater in well-irrigated area, Guangrao county is very important to the agriculture production and their people living. Along with the development of regional economy, the need of water resource has a rapid increase. The groundwater depth has declined due to the groundwater overexploitation. The water level has dropped from 1.97 m in 1984 to -10.79 m in 2001. The monthly groundwater depth changes from 1975 to 2000 in well-irrigated area as well as the annual precipitation changes from 1956 to 1995 were studied with wavelet analysis. The results indicated that the groundwater depth and the annual precipitation changes were both periodic and the growing trend is going on by the forecast. The conclusion is that the groundwater depth matched well with the annual precipitation before 1975 and in about 1980 while it is more and more affected by the jamming such as pump nowadays.

Key words: wavelet analysis; groundwater depth; annual precipitation changes; Guangrao county

1 引言

小波分析(Wavelets Analysis)是 20 世纪 80 年代初发展起来的新兴学科,具有深刻的理论意义和广泛的应用范围。小波分析是一种信号的时间-尺度(时间-频率)分析方法,它具有多分辨率分析的特点,而且在时频两域都具有表征信号局部特征的能力,是一种窗口大小固定不变,但其形状可以改变的时频局部化分析方法。即在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率,很适合于探测正常信号中夹带的瞬变反常信号并分析其成分,所以被誉为分析信号的显微镜。由于小波具有多分辨率分析的能力,可以对信号和图像在不同尺度上进行分解,在小波域进行去噪、压缩处理后,作反变换得到去噪和压缩后的信号和图像。小波分析用于非平稳信号和图像的处理优于传统的傅立叶变换,已被许多应用领域的事实所证实。

国外研究小波的时间较早,80 年代就有相关的文章和著作发表, Mallat 算法^[1,2](FWT)是小波理论突破性的成果,其作用相当于傅立叶分析的 FFT。1989 年 Meyer 出版的《小波与算子》^[3]是目前较权威系统的小波理论著作。美

国 Texas A & M 大学数学与电气工程教授、逼近论中心主任、小波研究的权威之一崔锦泰(Chui C. K.)著的“An introduction to wavelets”^[4]是美国科学出版社出版的一部小波分析的入门书。崔教授主编的会议论文集^[5]使得小波研究向深广方向发展。Daubechies I. 的“Ten lectures on wavelets”总结了她的研究成果,为向世界科技工作者普及小波理论做出了积极的贡献。

我国对小波的研究起步较晚,1994 年形成国内的小波研究高潮,并在信号的去噪和图像的压缩、机械故障检测等方面取得了较大的进展。目前,小波分析被广泛的应用到地质相关领域,诸如气候、水文等等。然而将小波变换方法应用于地下水位动态宏观规律研究中的文献不多,敬少群^[6]等人用小波变换对地下水位微动态进行了分析,研究了微动态与地震的关系。而用小波变换法对地下水位动态宏观周期规律进行专门研究的文献尚很少见^[7]。本文基于小波的降水和地下水埋深的动态分析也只是一个初步的尝试。

广饶县井灌区位于东营市的最南端。该灌区 342 km² 范围内是东营市内唯一有浅层地下淡水分布的区域。这里的地下水是当地农业生产和人民生活的重要水源。随着需水量的不断增大,1975 年开始过量开采地下水。1975 年井灌区浅层

* 收稿日期: 2006-03-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 40271001)

作者简介: 孙海清(1981-),女,河北唐山人,北京大学环境学院硕士研究生,主要从事资源管理与区域开发研究。

地下水平均埋深 3.74 m, 至 2000 年地下水平均埋深增至 22.54 m, 地下水位累计下降 18.8 m。目前当地的大量机井报废, 海水入侵现象日益严重, 大大制约了当地经济的发展。

研究区属山前冲击平原, 地下水的补给主要来自大气降水。地下水位大幅度持续下降, 使潜水含水层处于疏干状态, 不但加长了降水补给周期, 而且降低了表层土壤含水量, 对农作物生长带来不利影响。因而研究降水量与地下水埋深的变化关系, 探讨和解决当地的水资源危机具有极其重要的理论和实践意义。

2 小波分析的原理

2.1 小波变换

对满足一定条件的小波函数 $\phi(t)$, 时间序列 $f(t) \in L^2(R)$ 的小波变换为^[8]

$$\begin{aligned} W_f(a, b) &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \phi_{ab}^*(t) dt \\ &= \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \phi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \end{aligned} \tag{1}$$

式中: $W_f(a, b)$ ——小波变换或小波系数; ϕ_{ab}^* —— $\phi(t)$ 的复共轭函数; $a > 0$ 为尺度因子, 反应了小波的周期长度; b ——时间因子, 反应了在时间上的平移。小波变化把原始信号 $f(t)$ 转化到时间-频率平面上, 可以把原始信号中看不见的信息在时频域上显示出来。通过小波分析, 得到时间序列在任意时刻的频率特征及在时间-频率上的变化特征。上式中小波函数 $\phi(t)$ 可以取不同形式。本文采用墨西哥帽 (Mexh) 小波进行变换。

$$\phi(t) = (1 - t^2) \exp(-t^2/2) \tag{2}$$

它是高斯概率密度函数的二阶导数, 形状好似墨西哥草

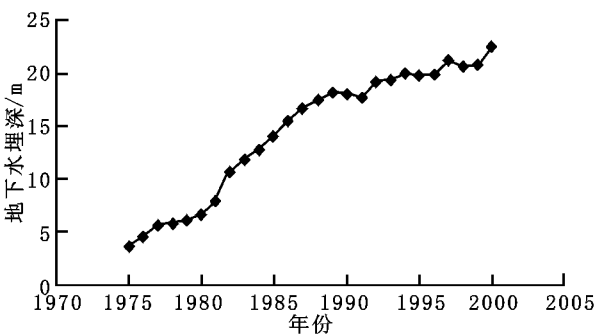


图 1 井灌区 1975~2000 地下水埋深年际变化趋势

从图 1 可以看出, 井灌区 1975~2000 年间地下水埋深一直处于增大的趋势。进一步细分可以得到 1975~1980 年段, 1981~1989 年段和 1990~2000 年段。三个阶段有不同的增长速率, 其中以 1981~1989 年段的增长速度最快, 即地下水位下降最快。

从图 2 可以看出井灌区内地下水位在 6、7 月出现极大值, 2、3 月份埋深比较浅, 这似乎与降水的年内分配不吻合, 可见当地的地下水埋深的变化不能仅仅用降水量的变化来解释, 可能更大程度上取决于人类活动的干扰, 具体分析见下文。

3.2 小波分析结果

借助 Matlab 小波工具箱, 通过 Mexh 小波变换对地下水埋深逐月数据序列 (26 年 312 个数据) 进行小波分析。提取小波系数在 Surfer 里做图如图 3:

从图中可以看出, 在大于 130 个月即大于 11 年的尺度上, 存在一个准振荡。在大概 1981~1982 年以前地下水埋深减小, 即地下水位增高; 之后地下水埋深增大, 即地下水位降低。在 4~11 年的尺度和小于 4 年的尺度上, 地下水的埋深一直处于增大的趋势。且曲线没有闭合, 可知地下水埋深还将继续增大, 即地下水位仍将继续下降。为了进一步探讨

帽, 故得名。 $W_f(a, b)$ 能同时反映时域参数 b 和频域参数 a 的特性, 它是时间序列 $f(t)$ 或 $f(k\Delta t)$ 通过单位脉冲响应的滤波器的输出。当 a 较小时, 对频域的分辨率低, 对时域的分辨率高; 当 a 增大时, 对频域的分辨率高, 对时域的分辨率低。因此, 小波变换能实现窗口的大小固定, 形状可变的时频局部化。 $W_f(a, b)$ 随参数 a 和 b 变化, 可做出以 b 为横坐标, a 为纵坐标的关于 $W_f(a, b)$ 的二维等值线图。通过此图可得到关于时间序列变化的小波特征。不同时间尺度下的小波系数可以反映系统在该时间尺度下变化特征: 正的小波系数对应于偏多期, 负的小波系数对应于偏少期, 小波系数为零对应着突变点; 小波系数绝对值越大, 表明该时间尺度变化越显著。通过小波系数的分析, 可识别降水量和地下水埋深的时间序列多时间尺度演变特性和突变特征。

2.2 小波方差

将时间域上的关于 a 的所有小波系数的平方进行积分, 即为小波方差。

$$Var(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a, b)|^2 db \tag{3}$$

小波方差反映了波动的能量随尺度 a 的分布, 可以用来确定一个时间序列中各种尺度扰动的相对强度, 对应峰值处的尺度称为该序列的主要时间尺度即主要周期^[9]。因此小波方差提供了一种确定一个时间序列中存在的主要周期的有效的客观分析方法。

3 井灌区地下水埋深的小波分析

3.1 数据及前处理

对广饶县井灌区 1975~2000 年逐月的地下水埋深的序列进行年际和年内的分析, 结果如下 (图 1、图 2):

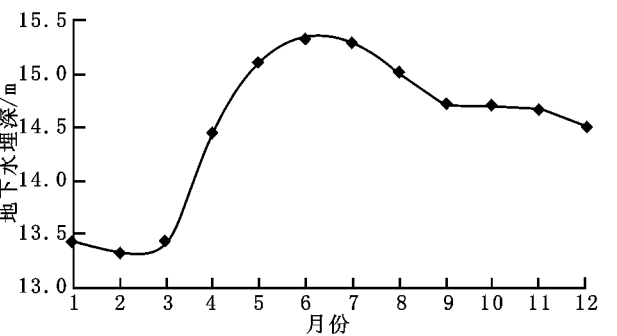


图 2 井灌区平均地下水埋深年同变化趋势

地下水埋深的细节变化, 本文就 3 个时段: 1975~1980 年, 1981~1989 年和 1990~2000 年分别进行了 Mexh 小波分析, 结果如图 4。

由图 4a 可以看出, 在 1975~1980 年段, 井灌区的地下水埋深在 4~8 年尺度上存在一个减小-增大-减小的振荡, 突变点在 1978~1979 年间; 在 1~4 年的尺度上存在 3 个增大-减小的振荡; 而在小于 1 年的尺度上存在 4 个准振荡。

由图 4b 可以看出, 在 1981~1989 年段, 井灌区的地下水埋深在 4~8 年尺度上有一个准振荡, 由减小到增大, 其中突变点在 1981~1982 年间; 在 1 年左右的尺度上, 周期变化十分频繁, 有大致 7 个准振荡。

由图 4c 可以看出, 在 1990~2000 年段, 井灌区的地下水埋深在所有尺度上都是一直增大, 且趋势一直延续。

3.3 小波方差结果

利用小波方差的定义式 (3), 我们就可以确定井灌区地下水埋深变化中存在的主要时间尺度, 即分析其中存在的主要周期。图 5 是井灌区地下水埋深三个时段变化的小波方差图。

从图 5a 可以看出, 在 1975~1980 年段, 井灌区地下水埋深存在一个近似 6 年和 2 年的主周期; 从图 5b 可以看出,

在 1981~ 1989 年段,井灌区地下水埋深存在一个近似 8~ 9 个月的主周期;而从图 5c 不能看出在 1990~ 2000 年段井灌区地下水埋深存在周期现象。这与上面的小波分析结果基本一致。

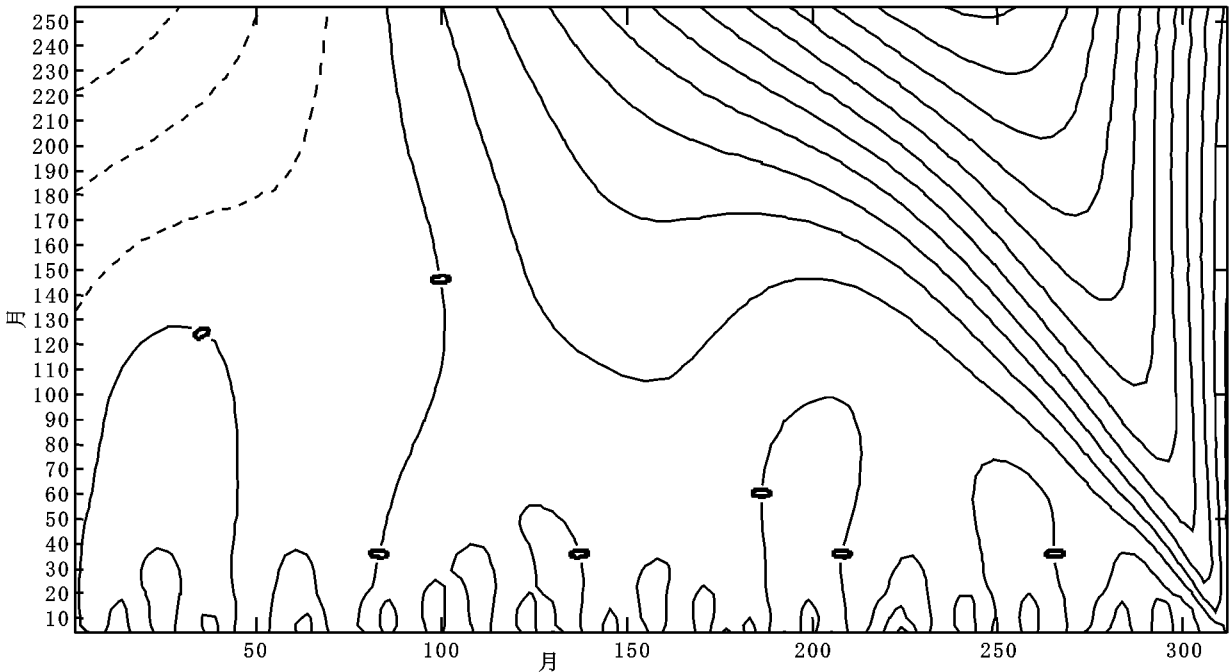


图 3 井灌区的地下水埋深的 Mexh 小波系数等值线图(虚线< 0,实线> 0)

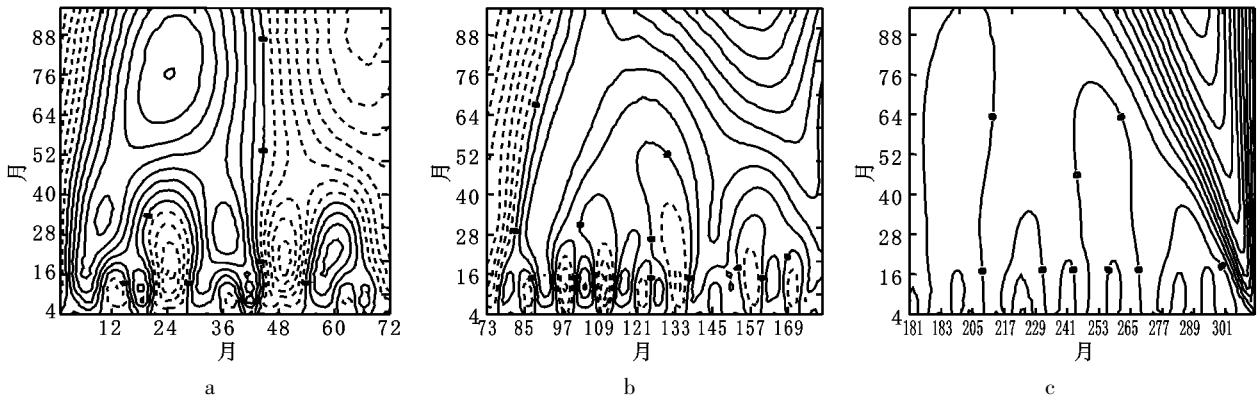


图 4 井灌区的地下水埋深的 Mexh 小波系数等值线图(a1975~ 1980, b1981~ 1989, c1990~ 2000)

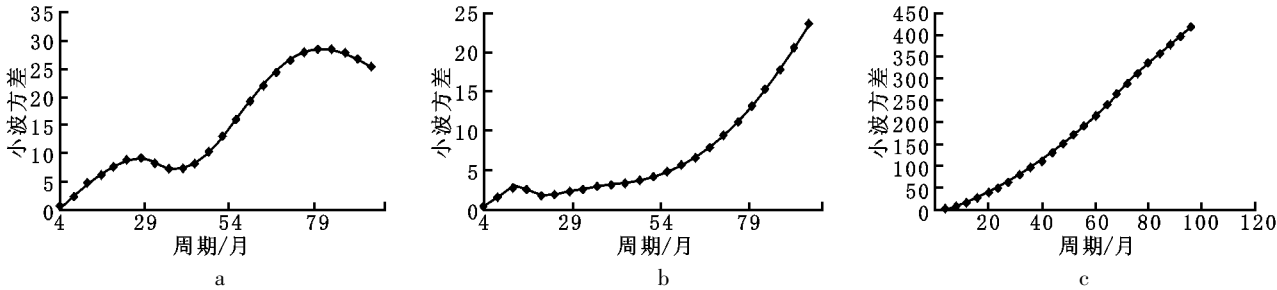


图 5 井灌区地下水埋深三个时段变化小波方差

4 井灌区降水量的小波分析

4.1 数据及前处理

对井灌区 1956~ 1995 年 40 年的降水数据进行中心化处理,之后借助 Matlab 小波工具箱,用 Mexh 小波进行分析。对中心化的降水量做图如图 6。

4.2 小波分析结果

将 Mexh 小波系数用 surfer 做图如图 7。从中可以看出在 40 年大尺度上,存在一个降水量由增加到减少的振荡,突变点在 1980 年前后;在 10~ 15 年的尺度上,存在 3 个准振荡,1956~ 1960 年减少,1961~ 1964 年增多,1965~ 1972 年

减少,1973~ 1980 年增多,1981~ 1986 年减少,1987~ 1995 年增多并且曲线没有闭合,可知该地降水量仍将处于增加的趋势;在小于 5 年的尺度上还存在更为频繁的振荡。

4.3 小波方差结果

利用小波方差,我们就可以确定井灌区降水量变化中存在的主要时间尺度,即分析其中存在的主要周期。图 8 是井灌区 1956~ 1995 年降水量变化的小波方差图,图中横坐标为相应的周期(单位为年),纵坐标为小波方差。

从图 8 可以看出,井灌区 1956~ 1995 年降水量存在 11 年和 44 年两个主周期,与上面的小波分析结果可以很好的对应起来。

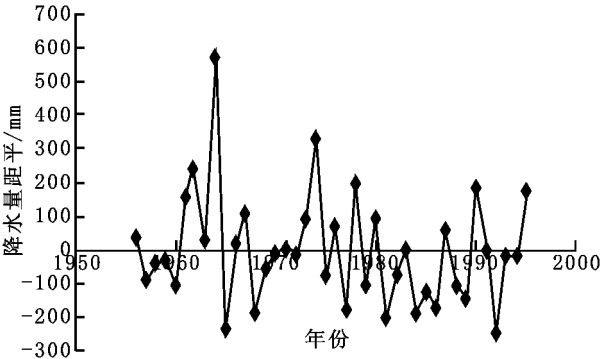


图 6 井灌区 1956~ 1995 年降水量的距平趋势图

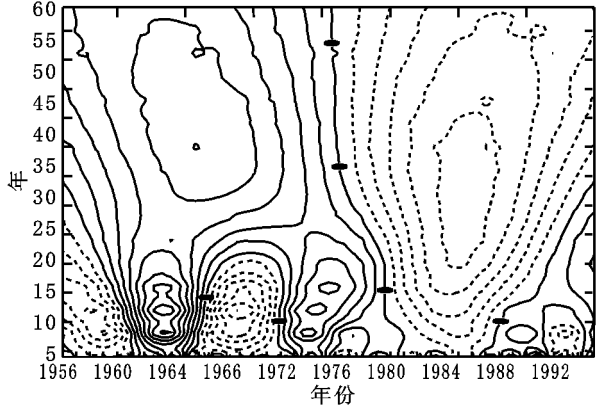


图 7 井灌区的 1956~ 1995 年降水量的 Mexh 小波系数等值线图(虚线< 0,实线> 0)

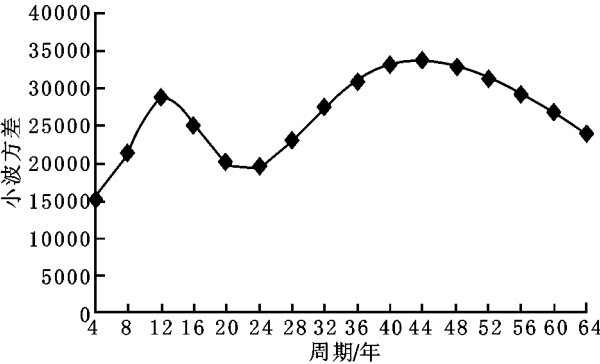


图 8 井灌区的 1956~ 1995 年降水量的 Mexh 小波系数方差图

5 广饶县井灌区地下水位下降的驱动因子分析

广饶县井灌区是东营市南部重要的农业生产基地,而当地的生产和生活用水又主要依靠地下水的开采,目前井灌区已经成为东营市乃至山东省最为严重的漏斗区之一。当地地下水位的变化不仅取决于大气降水补给的多寡,而且在很

参考文献:

大程度上与人类的过量开采使用是密不可分的。

从降水补给来看,通过前面的分析,我们知道井灌区地下水埋深在大尺度上是一直处于增大的趋势,而降水量却是周期波动的,可见当地地下水位的变化不是理想中随降水补给的多寡而变化的。进一步分析可知,当地地下水埋深在 1975 年以前是一个减小的阶段,这个时间,即 1973~ 1980 年间降水量是处于丰沛的时期,且 1975 年以前地下水还不存在超采的现象,因而地下水位的变化与降水量就有很好的对应关系。在 1981 年前后,地下水埋深经历了从减小到增大的突变,与之对应的降水量在 1981 年前后也经历了由丰沛到少雨的突变,二者也形成了呼应。

随着当地需水量的日益增加,地下水埋深的变化越来越与人类活动密切相关。在 80 年代前后地下水埋深增大的趋势加强,这与当地农业联产承包的实施以及人口的增长是相对应的,而且随着地下水超采的日益加重,这种对应逐渐占了上风,近乎抹灭了降水补给的自然影响。

此外,广饶县井灌区的地下水的补给一部分还来自山前的渗流补给,可是上游的齐鲁石化超量抽取地下水,形成了半径近 50 km 的地下漏斗而广饶南部的井灌区正好在这个漏斗的边缘。种种复杂的人为因素干扰了原本存在水文周期的地下水位变化,也使得问题的研究更加复杂。

6 结论和讨论

本文运用小波分析方法,研究了广饶县井灌区 1975~ 2000 年(进一步细分为 1975~ 1980,1981~ 1989,1990~ 2000)逐月地下水埋深序列和 1956~ 1995 年的降水序列,并通过小波方差分析了其变化的主要周期,得到了吻合的结论。

在 1975~ 1980 年段,井灌区的地下水埋深在 4~ 8 年尺度上存在一个减小- 增大- 减小的振荡,突变点在 1978~ 1979 年间;在 1~ 4 年的尺度上存在 3 个增大- 减小的振荡;而在小于 1 年的尺度上存在 4 个准振荡;在 1981~ 1989 年段,井灌区的地下水埋深在 4~ 8 年尺度上有一个准振荡,由减小到增大,其中突变点在 1981~ 1982 年间;在 1 年左右的尺度上,周期变化十分频繁,有大致 7 个准振荡;在 1990~ 2000 年段,井灌区的地下水埋深在所有尺度上都是一直增大,且趋势一直延续。

降水量在 40 年大尺度上,存在一个降水量由增加到减少的振荡,突变点在 1980 年前后;在 10~ 15 年的尺度上,存在 3 个准振荡,1956~ 1960 年减少,1961~ 1964 年增多,1965~ 1972 年减少,1973~ 1980 年增多,1981~ 1986 年减少,1987~ 1995 年增多并且曲线没有闭合,可知该地降水量仍将处于增加的趋势;在小于 5 年的尺度上还存在更为频繁的振荡。

从地下水埋深变化的驱动因子分析结果来看,在 1975 年以前和 1980 年前后地下水埋深与降水量有较好的对应关系。其他阶段主要受人为开采使用地下水的影响,且这种影响处于逐渐加强的趋势。

致谢: 北京大学环境学院资源与环境地理系李双成副教授予以本文指导,特此感谢!

[1] Mallat S. A theory for multi-resolution signal decomposition: the wavelet representation [J]. IEEE Trans on PAMI, 1989, 11(7): 674- 693.

[2] Mallat S. Multi-frequency channel decompositions of images and wavelet models[J]. IEEE Trans on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1989, 37(12): 2091- 2110.

[3] Meyer Y. Ondelettes et operateurs[M]. Paris: Hermann Press, 1990. 1- 200.

[4] Chui C K. An introduction to wavelets[M]. New York: Academic Press, 1992. 1- 432.

[5] Chui C K. Wavelet: a tutorial theory and applications[M]. New York: Academic Press, 1992. 1- 432.

[6] 敬少群,王佳卫,童迎世. 小波变换在少震弱震区地下水位数据分析中的应用[J]. 华南地震, 2002, 2(22): 9- 15.

[7] 吴东杰,王金生,滕彦国. 小波分解与变换法预测地下水位动态[J]. 水利学报, 2004, (5): 39.

[8] 牛存稳,张利平,夏军. 华北地区降水量的小波分析[J]. 干旱区地理, 2004, 27(1): 66- 67.

[9] 纪忠萍,谷德军. 广州近百年来气候变化的多时间尺度[J]. 热带气象学报, 1999, 15(1): 48- 55.