DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2015.01.011

时间序列分析在地下水位动态预测中的应用

杨 佳, 钱 会
(长安大学,环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 运用时间序列分析理论,结合SPSS统计分析软件对贺兰县地下水位动态变化进行了模拟和预测。结果表明:研究区地下水位年际变化无明显上升或下降的趋势,这表明研究区地下水补径排条件近年来变化不大。受灌溉和降雨的影响,研究区地下水位变化主要表现为一年的显著周期。将时间序列分析方法应用于地下水位动态预测,可以了解地下水位的变化趋势和周期性。该法计算简单,所需资料较少,短期预测精度较高。但是在实际应用时,数据需要不断及时更新。同时由于没有考虑地下水流系统的动力学机制和未来突变情况,应用时受到了一定限制,还需进一步完善。

关键词: 地下水位; 时间序列分析; 地下水动态预测
中图分类号:S273.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2015)01-0058-05

Application of time series analysis in prediction of groundwater level dynamic

YANG Jia, QIAN Hui
(*College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an* 710054, *China*)

Abstract: Combined with SPSS statistical analysis software, time series analysis theory was applied to simulate and forecast the dynamic change of groundwater level in Helan. The result shows that the annual variation of groundwater level has no significant ascending or descending trend which means a little change of the condition of recharge, run-off and discharge of groundwater in the study area. Affected by irrigation and rainfall, the groundwater level mainly shows period variation of one year in the study area. It applied time series analysis method to forecast the dynamic change of groundwater level so as to know the trend and period of groundwater level. The method has simple computation and a high accuracy in short period, and needs less data. But the data should be continually and promptly updated in practical application. Its application is limited in certain degree and needs to be improved because of ignoring the hydraulic mechanism of groundwater flow system and the abrupt change of the future.

Key words: groundwater level; time series analysis; prediction of groundwater level dynamic

随着社会经济的高速发展和人民生活水平的显著提高,人们对水资源的需求量与日俱增。地下水是水资源的重要组成部分,目前我国大部分地区地下水形势不容乐观。地下水的超采引起的地下水位持续下降,自然和人为影响下的地下水位上升引发了一系列地下水环境地质问题。因此,地下水位的动态研究与预测对于科学合理地开发利用管理保护地下水有重要的意义。

地下水位预测的方法很多,包括灰色理论,小波分析,人工神经网络,时间序列分析,数值模拟、分形理论、混沌理论以及不同方法的结合等,各种方法各有特点[1-3]。时间序列分析(Time series analysis)是一种动态数据处理的统计方法。该方法基于随机过程理论和数理统计学方法,研究随机数据序列所遵从的统计规律,以用于解决实际问题。时间序列分析方法进行水位预报,是将地下水系统视为"黑箱"或"灰箱",根据地下水位动态观测资料,提取分析历史资料本身所蕴含的信息,找出其规律,并利用这些规律,达到预报未来的目的,无须进行专门的试验来获取其它参数,并且该方法易于掌握, 计算工作

收稿日期:2014-09-14; **修回日期**:2014-10-17
基金项目:国家自然科学基金项目(41172212)
作者简介:杨 佳(1991-),男,四川阆中人,在读硕士研究生,研究方向:地下水水资源可持续开发利用保护。
通讯作者:钱 会(1963-),男,陕西泾阳人,博士,教授,博士生导师,主要从事水文地质方面的研究。

量小, 易于应用推广[4-5]。

本文根据贺兰县地下水位长期观测资料,结合 SPSS 统计分析软件建立时间序列模型,将时间序列分析应用于地下水位的动态预测中。

1　时间序列分析理论

1927 年,Yule 首先提出 AR(自回归模型),并用于研究太阳黑子的时间序列,后来发展到 MA(滑动平均模型)、ARMA(自回归滑动平均移动模型),这些模型均要求时间序列平稳。近年来随着计算机水平的提高,又进一步发展为 ARIMA(差分自回归移动平均模型)以及季节 ARIMA 模型,它们主要通过差分的方法消除趋势成分和季节周期成分,进而应用于非平稳时间序列。

一个时间序列是长期趋势变动、季节(周期)变动、循环变动和随机变动等变化形式的叠加或组合。地下水水位动态序列可以看作是由趋势项、周期项、随机项组成的。一般通过某些数学方法剔除趋势和周期成分,剩余成分按平稳过程进行分析建模,从而建立时间序列加法模型:

$$H(t) = T(t) + S(t) + R(t) \tag{1}$$

式中: $H(t)$ 为地下水水位; $T(t)$ 为趋势项; $S(t)$ 为周期项; $R(t)$ 为随机项[6-7]。

1.1　趋势成分的检验和提取

识别序列趋势性的方法很多,如 Spearman 和 Kendall 秩次相关检验等。对原序列 $x_1, x_2, \cdots, x_n$,先确定所有对偶值$(x_i, x_j, j > i)$ 中的 $x_i < x_j$的出现个数(设为 p)。Kendall 秩次相关检验的检验统公式为:

$$U = \frac{\tau}{[\mathrm{Var}(\tau)]^{0.5}} \tag{2}$$

$$\tau = \frac{4p}{n(n-1)} - 1 \tag{3}$$

$$\mathrm{Var}(\tau) = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)} \tag{4}$$

式中: p 为逆序数; n 为序列长度。给定显著水平 α(一般取 5%),当$|U| > U_{\frac{\alpha}{2}}$,趋势显著;当$|U| < U_{\frac{\alpha}{2}}$,趋势不显著[3]。趋势项一般用多项式拟合:

$$T(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + \cdots c_k t^k \tag{5}$$

拟合结果用 R 表示:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{n} (H(t) - T(t))^2}{\sum_{t=1}^{n} (H(t) - \overline{H(t)})^2} \tag{6}$$

式中: n 为序列长度; $\overline{H(t)}$ 为均值。只有当 R 大于一定临界值,回归方程才有意义。趋势项的模拟是从纯数学角度来考虑的,没有明确的物理意义[8-9]。

用原序列减去趋势项得到新序列 $Y(t)$,再做周期分析。

1.2　周期成分的提取与检验

周期成分常采用谐波分析、方差分析、周期图分析等多种方法。其中谐波分析是以傅里叶级数理论为基础,用一定个数的谐波叠加估计序列值:

$$S(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{j=1}^{M} a_j \cos\frac{2\pi jt}{n} + \sum_{j=1}^{M} b_j \sin\frac{2\pi jt}{n} \tag{7}$$

$$a_j = \frac{2}{n}\sum_{t=1}^{n} Y(t)\cos\frac{2\pi jt}{n},\ j = 0,1,2,\cdots,M \tag{8}$$

$$b_j = \frac{2}{n}\sum_{t=1}^{n} Y(t)\sin\frac{2\pi jt}{n},\ j = 0,1,2,\cdots,M \tag{9}$$

式中: $M = [n/2]$ 为谐波数([ ] 表示取整); j 为谐波号, 第 j 个谐波的周期为$\frac{n}{j}$。实际应用中常选取波动显著的几个谐波来估计周期项。引入周期强度

$$S_j^2 = \frac{a_j^2 + b_j^2}{2} \tag{10}$$

相对周期强度

$$I_j^2 = \frac{S_j^2}{\sum_{j=1}^{M} S_j^2} \tag{11}$$

若

$$I_j > -\frac{2}{n}\ln a \tag{12}$$

则认为第 j 个谐波波动显著[10]。

1.3　随机项分析

时间序列在剔除了趋势项和周期项之后的剩余成分 $X(t)$ 进行必要的数据处理和变换,经过平稳性、周期性、零均值等检验后,可以近似看作是平稳的。它由平稳相依和平稳独立(纯随机) 成分组成,一般可应用自回归模型进行描述:

$$R(t) = \phi_0 + \phi_1 X_{t-1} + \phi_2 X_{t-2} + \cdots + \phi_p X_{t-p} + \varepsilon_t \tag{13}$$

式中: ϕ_i 为自回归系数; p 为模型阶数; X_{t-i} 为随机项,$i = 1,2,\cdots,p$; ε_t 为白噪声项,模型的阶数通过 AIC 准则函数确定[11]:

$$AIC(p) = \ln \sigma^2(p) + \frac{2p}{n} \tag{14}$$

式中: p 为模型阶数; $\sigma^2(p)$ 为拟合残差方差。选取不同的 p 值进行拟合,计算模型相应的 AIC 值,其值最小时即认为是最佳模型。然后根据 Yule - Wolker 方程进行参数估计,得到自回归系数。再结合残差自相关图和偏相关图的拖尾和截尾,对预测模型残

差进行白噪声检验,若不是白噪声序列,意味着残差序列还有有用信息没有被提取,需要进一步改进模型[12]。

1.4 精度检验

将上述趋势项、周期项、随机项线性叠加得到地下水位动态预测模型。一般将实测资料的一部分用于模型的建立,一部分用于模型精度的检验。精度检验采取后验差法[13],通过后验差比值 C 和最小误差频率 P 来检验:

$$C = S_2/S_1 \tag{15}$$

$$P = |\varepsilon(k) - \bar{\in}| < 0.6745S_1 \tag{16}$$

式中:S_1 为原始序列的标准差;S_2 为后验序列残差的标准差;$\varepsilon(k)$ 为后验序列残差;$\bar{\in}$ 为后验序列残差的均值。预测精度检验评价标准如表 1 所示。

表 1 后验差法评价标准

预测等级	好	良	合格	不合格
P	> 0.95	> 0.80	> 0.70	≤ 0.70
C	<0.35	<0.50	<0.65	≥0.65

根据上述评价标准判断模型预测精度,若达到一定标准,则可以进行预测,否则还需进行进一步改进[14]。

2 贺兰县地下水位动态预测

2.1 研究区概况

贺兰县位于银川平原中部,黄河入境而过,沟渠纵横交错,湖泊星罗棋布。贺兰县属于温带大陆性气候,多年平均年降水量 201 mm,降雨年内分配不均,降雨量主要集中在 6 - 9 月,占全年的 70%。地下水主要来源于引流灌溉及大气降雨入渗补给。总体说来,贺兰县的地下水埋藏较浅,其埋深又因地形及排灌情况而不同。引黄灌区地下水埋藏较浅,有的地区埋深小于 50cm;金山洪积扇地下水最大埋深达 26 m。据观察,影响地下水水位动态的主要因素是灌溉。春灌开始后,地下水位随之急剧上升,5、6 月达到高峰。秋灌、冬灌停止后,地下水位下降。每年 4 月上旬,地下水位处于最低点。

2.2 模型应用

利用 SPSS 统计软件的时间序列分析模块对贺兰县地下水位动态进行研究分析及预测。SPSS 是目前应用比较广泛的统计分析软件,将它应用于地下水位动态预报工作当中,不但能够大大减少数据分析的工作量,而且提高了预报的准确性、实用性、可信性。在利用 SPSS 时间序列分析建模前要对数据进行数据预处理,包括定义日期变量、选择样本区间、对缺失值进行插补。时间序列创建后便可以进行数据分析与建模,然后进行模型的评价及实施(预测)。根据贺兰县多个监测井(潜水井)多年地下水位实测资料,计算出逐月平均地下水位。一部分实测数据用于时间序列模型的建立,一部分用于模型精度的检验。限于篇幅,仅以代表性较好、资料完整度较高拥有最新数据的某一口监测井进行说明。其中利用 2002 - 2011 年(共 10a)实测地下水位数据,结合 SPSS 时间分析模块建立时间序列模型,而 2012 年地下水位数据则用于已建立模型精度的检验。其实测值与拟合值结果见图 1,从图中可以看出拟合效果良好。得到时间序列预测模型,对 2012 年地下水位进行预测验证,然后运用后验差法对预测值进行检验评价,结果(见表 2)显示预测效果较好,并将其与实测值进行分析比较(见表 3)。

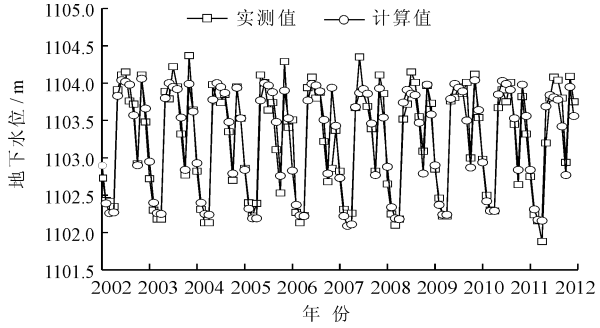

图 1 监测井地下水位动态实测值与计算值拟合曲线

表 2 后验差法评价结果

S_1	S_2	C	P	预测精度检验
0.721	0.116	0.161	1.000	好

表 3 监测井 2012 年地下水位实测值与预测值对照表 m

月 份	实测值	预测值	绝对误差
1	1102.87	1102.88	-0.01
2	1102.43	1102.36	0.07
3	1102.15	1102.23	-0.08
4	1102.35	1102.22	0.13
5	1103.57	1103.78	-0.21
6	1104.05	1103.98	0.07
7	1103.97	1103.95	0.02
8	1104.04	1103.89	0.15
9	1103.53	1103.51	0.02
10	1102.98	1102.82	0.16
11	1104.11	1103.98	0.13
12	1103.78	1103.58	0.20

2.3　模型预报

由后验差法检验结果可知,时间序列分析对该地区地下水水位动态预报精度较高。在未来短时期不发生突变以及现行开采条件不变的情况下,可以应用时间序列的方法对地下水位进行短期预报。于是利用 SPSS 建立的时间序列预测模型对该监测井 2013 年地下水位进行预报,其结果见图 2。

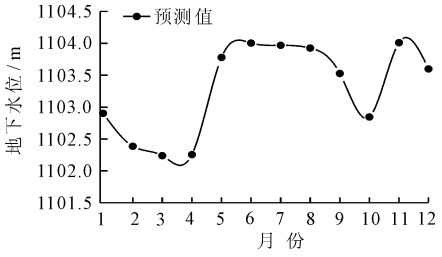

图 2　监测井 2013 年地下水位预测

3　结果分析与讨论

(1)分析发现预测值与实测值绝对误差最大为 -0.21 m,最小为 -0.01 m,并且可以看出除个别值外,大部分预测值的误差都很小(在 0.1 m 左右)。由前述评价指标等级:预测结果 $C = 0.161$, $P = 100\%$(见表 3),预测等级达到好,可以进行预测。这说明时间序列方法对该地区地下水位动态预测精度较高。

(2)趋势项分析发现:$|U| = 0.11 < 1.96$,该地区地下水水位年际变化趋势并不显著,历年地下水位的动态变化也直观反映这一点。地下水位多年平均年内变幅在 2m 左右,多年的最高水位与最低水位基本一致。总体看来,地下水位没有显著的上升或下降趋势,这说明该地区地下水开发利用模式及地下水的补径排条件在多年内没有发生较大的变化。

(3)进行周期项分析,发现第 10、20、40、60 个谐波波动显著,其中以前两个谐波波动最为显著,对应周期分别为一年和半年。由于所应用的时间序列只有 10 a,所以只发现地下水位的主要周期为一年,多年周期表现不明显。地下水位动态变化主要受灌溉、降雨等影响,季节性明显,这与地下水位动态变化也是相符的:在年内灌溉开始后,地下水位迅速上升,随后 2 -3 月又逐渐降低,地下水位在 4、10 月降到最低,在 5 月(6 月)、11 月(12 月)升至最高,在下年又出现类似特征,表现出一年的周期。由于该地区降雨主要集中在 6 -9 月份(可占全年的 70%),因此在 5 月份地下水位因灌溉迅速回升后,受大气降雨入渗补给,6 -9 月水位并没有大幅下降。

(4)与实测值对比发现:拟合值、预测值与实测值的残差在极值处较大,这是由于极值处对应随机因素的突变;其次,研究区地下水水位埋藏较浅,对外界变化响应较快,特别是在灌溉后,地下水位迅速回升,如每年在 4、10 月份水位降到最低时,随着灌溉的进行,5、11 月份地下水位迅速回升,对应月份残差较其他月份就偏大。这从侧面反映了时间序列在突变项上的处理的缺陷,因而应用受到一定限制。突变项的出现不仅受天然因素的影响,而且多方面受人类活动(如灌溉、水库的泄放)的影响。当人为影响计划性很强时,可以进行估计,然后加到时间序列模型中去,可以提高模型预测精度。

(5)模型预报:时间序列模型不适宜于长期预测,这是预测的一般通病。通过研究监测井长期(多年)的预测值与实测值的残差和短期(一年)的二者残差相比发现:除去极值点外,残差有增加的趋势。原因是多步预测是根据实测值与几步预测值进行预测的,预测误差随着预测步长增加而变大,且在预测后段误差的增加较前段更加明显,使得预报结果准确性大大降低[15]。所以在实际应用中应及时不断更新数据,创建新的模型进行预测,以提高预测精度,并且以短期预测为宜。鉴于此,利用模型只对 2013 年地下水水位进行预测,发现在目前地下水利用开发模式不变的情况下,2013 年地下水水位与历史同期水平相当,年内变化与多年平均变化也基本一致。

(6)利用时间序列分析方法进行水位预报,是根据地下水位动态资料,提取分析历史资料本身所蕴含的信息,找出其规律,并利用这些规律,达到预报未来的目的。时间序列分析方法属于随机模型,它并没有从地下水动力学成因出发,求取相关水文地质参数,然后求解由地下水运动微分方程和定解条件组成的确定型模型进而获得地下水位。但是确定性模型是在许多假设条件的基础上建立起来的,很难真实地刻画复杂的水文地质条件,而且获取水文地质参数以及查明水文地质条件花费与难度很大。因此将随机模型与确定型模型结合是今后研究的重要方向。

4　结　语

(1)结合 SPSS 软件将时间序列分析方法应用于贺兰县地下水位动态预测,结果表明研究区近年来地下水位无显著上升或下降趋势,同时也说明该地区地下水的补径排条件在近年内没有发生较大的改变。地下水位季节性周期明显,这主要是受灌溉

和降雨的影响,其中以一年为主。

(2)时间序列方法对研究区地下水位拟合和预测精度均较高,所需资料较少、计算简单,是一种较好的模拟预测方法,可以帮助人们了解地下水位的变化趋势和周期性,进而为地下水的合理开发利用保护提供一定的依据。

(3)将时间序列方法应用于地下水位动态预测时没有考虑地下水流的动力成因,应用时受到了一定限制,还需进一步完善。在今后的研究上要结合地下水动力学机制,从而加强数据说服力,提高预测精度。

(4)时间序列是对历史资料进行分析,找出变化规律,对于未来突变情况没有考虑,如人类活动对于地下水的影响。因此时间序列分析的短期预测精度较高,但对于长期预测,其误差易受到突变项因素的影响,并且误差的逐步累加,使得最终模型预测误差可能会加大,应及时把最新数据不断加入序列中建立新的模型进行预测。

参考文献:

[1] 黄 强, 赵雪花. 河川径流时间序列分析预测理论与方法[M]. 郑州:黄河水利出版社,2008.

[2] 平建华, 李 升, 钦丽娟, 等. 地下水动态预测模型的回顾与展望[J]. 水资源保护, 2006,22(4): 11 - 15.

[3] 张小娟,蒋云钟,秦长海,等. 时间序列分析在地下水位预报中的应用[J]. 南水北调与水利科技,2007,5(4): 40 - 42.

[4] 栗现文,向东进,周金龙,等. 时间序列分析方法在干旱区地下水位动态预测中的应用[J]. 工程勘察,2011(12): 28 - 32.

[5] 杨金忠,蔡树英. 一种区域地下水预报的时间序列分析方法[J]. 武汉水利电力大学学报,1996,29(4): 8 - 10.

[6] 付 强. 水资源系统分析[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.

[7] Almedeij J, Al - Ruwaih F. Periodic behavior of groundwater level fluctuations in residential areas[J]. Journal of Hydrology,2006,328(3 - 4): 677 - 684.

[8] 赵 杰,卞玉梅,周晓君. 时间序列分析法在沈阳市地下水位动态预报中的应用[J]. 东北水利水电,2007,25(8): 31 - 34.

[9] 李勇海. 时间序列分析法在延吉市地下水动态预测的应用[J]. 吉林地质,2013,32(3): 86 - 89.

[10] 崔天怀,魏晓妹. 频谱分析法在地下水动态预报中的应用[J]. 地下水,1990,12(4): 201 - 205.

[11] Yang Zhongping, Lu Wenxi, Long Yuqiao, et al. Application and comparison of two prediction models for groundwater levels: A case study in Western Jilin Province, China[J]. Journal of Arid Environments,2009,73(4 - 5): 487 - 492.

[12] 陈汉军,杨 雪,黄东卫. 时间序列在地下水位预测中的应用[J]. 天津理工大学学报,2008,24(2): 8 - 10.

[13] 李 平,卢文喜,杨忠平. 频谱分析法在吉林西部地下水动态预报中的应用[J]. 水文地质工程地质,2005,32(4): 70 - 73.

[14] 张 盼,刘文兆. 应用时间序列模型分析长武塬区地下水水位的变化特征[J]. 水土保持研究,2010,17(3): 22 - 27.

[15] 赵 莹,卢文喜,罗建男,等. 基于改进时间序列分析法的镇赉地区地下水位动态分析[J]. 水利学报,2013,44(11): 1372 - 1379.