

时间序列模型在北京西山地区岩溶地下水 水位预测中的应用

孙雪^{1,2}, 王小松³, 程莉蓉^{1,2}, 李世君³

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 地下水污染控制与修复教育部工程研究中心, 北京 100875; 3. 北京市地质工程勘察院, 北京 100037)

摘要: 作为北京水资源储备区,北京西山地区地下水位动态变化对北京市水资源管理具有重大意义。时间序列模型是研究预测地下水水位动态变化特征的有效方法。为了解北京西山地区地下水位未来变化趋势,本文选用北京西山地区地下水位长观序列,通过拟合序列的趋势项、周期项及随机项分量,建立地下水位动态变化模型。模型精度检验表明模型拟合程度良好,预测结果显示西山地区未来五年内地下水位呈现动态平衡状态。

关键词: 地下水位; 动态变化; 时间序列模型; 地下水位预测

中图分类号: P641.8

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)03-0161-04

Application of time series model in prediction of karst groundwater level in Xishan region of Beijing

SUN Xue^{1,2}, WANG Xiaosong³, CHENG Lirong^{1,2}, LI Shijun³

(1. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Engineering Research Center of MOE for Groundwater Pollution Control and Remediation, Beijing 100875, China;

3. Institute of Geological Engineering Investigation of Beijing, Beijing 100037, China)

Abstract: As a reserve area of water resources in Beijing, the dynamic change of groundwater level in Xishan region is of great significance to water resources management. Time series analysis is an effective tool to predict the dynamic change of groundwater level. In order to investigate the variation trend of groundwater level in Xishan region, the paper built the dynamic variation model of groundwater level by use of long monitoring data series of groundwater level in Xishan region of Beijing through fitting the trend component, periodic component and stochastic component of the series. The accuracy test of model indicated that fitting degree of model is good and the groundwater level in this region will appear the state of dynamic balance in the following five years.

Key words: groundwater level; dynamic change; time series model; prediction of karst groundwater

地下水水位变化特征是研究区域地下水的基础,合理预测地下水位可以全面了解区域地下水动态变化趋势,为地下水开采利用及管理提供参考依据。时间序列模型基于数理统计原理,根据地下水位动态观测资料,提取动态资料内部包含的历史及周期变化信息,建立数理统计模型,预测地下水位动态变化,相对于数值模拟法,时间序列模型应用简单直观,适合大区域范围内地下水动态变化预测^[1]。

北京地区为水资源严重紧缺地区,水资源紧缺程度制约着城市经济的发展。西山地区作为北京水

资源储备区,其岩溶地下水是北京水源储备地之一^[2]。本文利用时间序列模型对现有开采量条件下西山地区地下水位进行模拟预测,为北京市水资源管理规划提供参考依据。

1 时间序列模型基本原理

1.1 时间序列模型组成部分

时间序列模型根据地下水位变化的特点,分别建立不同性质的模型分项并进行线性叠加建立地下水位预报模型^[3-4],其基本组成为:

收稿日期:2013-12-26; 修回日期:2014-01-14

基金项目:北京岩溶水资源勘查评价工程项目(BJYRS-KC-05)

作者简介:孙雪(1988-),女,河北丰润人,硕士研究生,主要研究方向为地下水数值模拟。

$$H(t) = X(t) + P(t) + R(t) \quad (1)$$

式中: $H(t)$ 为地下水位观测序列; $X(t)$ 为趋势项; $P(t)$ 为周期项; $R(t)$ 为随机项。

1.2 模型各分项参数确定^[5-10]

(1) 趋势项^[3-5]。趋势项的确定可采用多项式拟合法, 即:

$$X'(t) = c_0 + c_1t + c_2t^2 + c_3t^3 + \dots + c_kt^k + \dots + c_nt^n = \sum_{k=0}^n c_k t^k \quad (2)$$

式中: $X'(t)$ 为随机项 $x(t)$ 的估值; c_k 为多项式参数。

利用多元回归统计法, 确定上式各项待定参数值。通过计算趋势拟合曲线的相关系数 R 对拟合精度进行检验, R 值越接近 1, 趋势项拟合精度越高, 若无最佳拟合函数则认为时间序列无趋势项或趋势项不显著, 即 $X(t)$ 。

(2) 周期项^[5-7]。模型趋势项确定后, 时间序列数据扣除趋势项即为模型的周期项, 表征数据内部存在的周期性变化, 即

$$P(t) = H(t) - X(t) \quad (t = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

应用谐波分析法, 利用傅里叶级数将周期序列用 L 个谐波叠加的形式表示, 其估值为:

$$P'(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^L (a_k \cos \frac{2\pi kt}{n} + b_k \sin \frac{2\pi kt}{n}) \quad (4)$$

式中: $P'(t)$ 为 $P(t)$ 的估值; L 为谐波个数, 一般取 $2/n$ 的整数; k 为谐波个数, 一般认为第 k 个谐波的周期为 n/k ; a_0, a_k, b_k 分别为傅里叶级数, 计算式为:

$$a_0 = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n P(t); a_k = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n P(t) \cos \frac{2\pi kt}{n}; b_k = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n P(t) \sin \frac{2\pi kt}{n} \quad (5)$$

通常选取 L 个谐波中前 6 个显著波即可表征序列的周期性, 显著性检验可见文献[5-6]。

(3) 随机项^[4-5]。消除了趋势项与周期项之后的序列为地下水位序列的随机项, 即

$$R(t) = H(t) - X(t) - P(t) \quad (6)$$

$R(t)$ 为平稳随机系列, 可利用自回归模型拟合随机项序列, 其模型表示为:

$$R'_t = \varphi_0 + \varphi_1 r_{t-1} + \varphi_2 r_{t-2} + \dots + \varphi_p r_{t-p} \quad (7)$$

式中: R'_t 为 R_t 的估值; φ 为自回归模型系数; P 为模型阶数, 一般采用 AIC 准则^[5-7] 进行确定。

(4) 精度检验^[8-10]。将拟合的趋势项、周期项及随机项进行线性叠加, 可得地下水位动态预测模型, 即

$$H'(t) = X'(t) + P'(t) + R'(t) \quad (8)$$

应用模型预测地下水位动态变化前, 常采用后

验差检验法^[7-8] 进行精度检验, 评价标准参考表 1。

表 1 后验差法评价标准表

预测等级	好	一般	合格	不合格
c	<0.35	<0.5	<0.65	≥0.65
p	>0.95	>0.8	>0.7	≤0.7

2 西山地区地下水位预测

2.1 研究区地下水位动态变化

本次研究选取了北京西山玉泉山 189 孔的岩溶地下水动态观测资料, 包括 1990-2012 年间月序列水位观测值(图 1)。(资料来源于北京市地质工程勘察院及北京市水文地质工程地质大队)

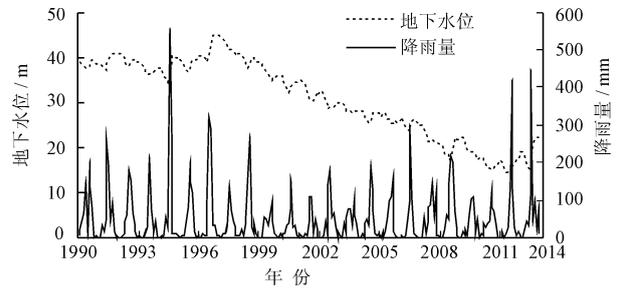


图 1 189 号井地下水位动态变化曲线图

自 1990-1997 年, 研究区内地下水位波动变化不大, 由于降雨量、人工开采量等因素持平, 地下水位呈现采补动态平衡的状态; 连续丰水年的出现, 降水量增加, 地下水补给量增大, 地下水位自 1997 年开始呈现小幅度的上升, 基本保持自然平衡状态; 自 1997 年开始, 连续枯水年的出现导致降水量下降, 并且人工开采量的增加, 区域地下水开采量增加, 补给量减小, 水位持续下降; 当降雨量增加时, 水位出现短期小幅度回升, 整体仍呈现下降趋势。2011 年及 2012 年丰水期降雨量骤增, 地下水补给量增加, 水位出现回升的现象, 但较 1990 年, 水位仍处于下降的趋势。

2.2 建立时间序列模型

选用玉泉山 189 号孔 1990-2008 年 19 年间月平均水位值共 228 个数据建立模型, 利用 2009-2012 年 4 年间月平均水位共 48 个数据进行模型精度检验。

(1) 趋势项拟合。根据多元回归分析原理, 确定趋势项各参数见表 2。

表 2 趋势项方程参数

C_0	C_1	C_2	C_3	R
36.1528	0.16316	-0.00179	-3.3×10^{-6}	0.956

拟合方程相关系数 $R = 0.956$, 表明方程拟合程度良好, 其趋势项方程为:

$$H'(t) = -0.0000033t^3 - 0.00179t^2 + 0.16316t + 36.15238 \quad (9)$$

(2) 周期项拟合。原始序列剔除趋势项后进行周期性分析, 经显著性检验得, 当 $k = 2, 3, 4, 9, 19$ 时, 满足显著性检验要求, 各傅式系数计算结果见表 3。

表 3 周期项傅式系数结果表

	0	2	3	4	9	19
a_k	0.012	0.99711	0.30061	-0.82209	0.23370	0.86005
b_k		-1.35795	1.13159	0.51475	0.59015	-0.49482

拟合模型周期项可得

$$P'(t) = 0.012 + 0.99711\cos\frac{\pi t}{57} - 1.35795\sin\frac{\pi t}{57} + 0.30061\cos\frac{\pi t}{38} + 1.13159\sin\frac{\pi t}{38} - 0.82209\cos\frac{2\pi t}{57} + 0.51475\sin\frac{2\pi t}{57} + 0.2337\cos\frac{3\pi t}{38} + 0.59015\sin\frac{3\pi t}{38} + 0.86005\cos\frac{\pi t}{6} - 0.49482\sin\frac{\pi t}{6} \quad (10)$$

(3) 随机项拟合。利用自回归模型对随机项序列进行拟合, 根据 AIC 准则计算当 $p = 1$ 时, $AIC(p)$ 最小, 此时随机项方程为:

$$R'(t) = -0.00505 + 0.82669r_{t-1} \quad (11)$$

将趋势项、周期项及随机项线性组合, 得到地下水位动态变化的时间序列模型为:

$$H(t) = 36.15933 - 0.0000033t^3 - 0.00179t^2 + 0.16316t + 0.99711\cos\frac{\pi t}{57} - 1.35795\sin\frac{\pi t}{57} + 0.30061\cos\frac{\pi t}{38} + 1.13159\sin\frac{\pi t}{38} - 0.82209\cos\frac{2\pi t}{57} + 0.51475\sin\frac{2\pi t}{57} + 0.2337\cos\frac{3\pi t}{38} + 0.59015\sin\frac{3\pi t}{38} + 0.86005\cos\frac{\pi t}{6} - 0.49482\sin\frac{\pi t}{6} + 0.82669r_{t-1} \quad (12)$$

2.3 模型精度检验

利用模型对 1990 - 2008 年的地下水位进行计算, 并与真实水位序列进行对比, 对比曲线可见图 2。结果表明, 模型拟合结果良好, 误差较小。

选取未参与建模的 2009 - 2012 年实测水位动态数据, 采用后验差法判定模型拟合精度(见表 4), 后验差比值 c 和小误差概率分别为 0.18 和 0.96, 表明模型拟合程度良好, 可以应用于预测地下水位动态变化。

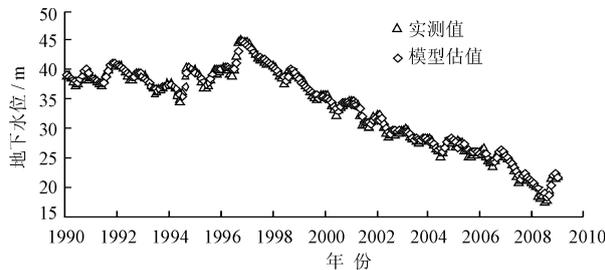


图 2 189 号井地下水位实测值与模拟结果曲线图

表 4 后验差精度检验结果表

S_1	S_2	C	P	评定结果
6.785794	1.220934	0.179925	0.956	好

$t = 229 \sim 276$ 时, 可计算出 2009 - 2012 年地下水位模拟值(图 3), 对比可知, 模型在 2009 - 2011 年 6 月期间, 计算值与实测值拟合情况较好, 相对误差均小于 5%; 从 2011 年 7 月开始, 模拟曲线的趋势走向同实测曲线相符, 但模拟结果数值整体小于实测值, 偏离程度在极值处达到最大。导致这种差异性存在的原因可能有两点: ①降水的随机性和建模数据序列较长。2011 年及 2012 年连续两年月降雨量峰值约为 400 mm, 而在建模的长观序列中, 这种降雨量峰值仅在 1994 年发生一次, 其发生的概率很小, 存在一定的突发性与偶然性; ②本次研究选取研究区 19 年月观测序列数据建模, 时间序列较长, 减小了统计模型的精度。

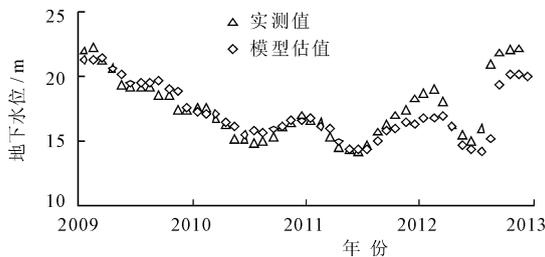


图 3 2009 - 2012 年 1 月份水位实测值与模拟结果动态曲线

2.4 地下水位预测

取 $t = 277 \sim 336$, 对西山 189 号井 2013 - 2017 年月平均地下水位进行预测, 预测结果见表 5 及图 4。

预测结果显示, 相较于模型初始时间 1990 年水位, 西山地区水位整体仍呈现下降趋势。由于 2012 年出现的降雨量峰值, 地下水补给量增加, 由于地下水系统反应的时效性及延后性, 在 2013 年 1 月出现了预测期内地下水位的峰值, 约为 19.69 m; 随时间推移, 水位逐渐下降, 在 2014 年 5 月达到峰谷, 约为 10.99 m; 自 2015 年开始, 水位基本持平并呈现小范围的波动, 年际变化较小。

表5 2013-2017年月平均水位预测值

年份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
2013	19.69	17.65	15.94	14.61	13.71	13.23	13.11	13.21	13.38	13.48	13.40	13.09
2014	12.60	12.00	11.45	11.08	10.99	11.21	11.71	12.40	13.14	13.79	14.25	14.47
2015	14.49	14.38	14.26	14.27	14.48	14.92	15.55	16.26	16.92	17.39	17.57	17.44
2016	17.03	16.45	15.84	15.34	15.07	15.06	15.29	15.67	16.08	16.37	16.47	16.33
2017	15.98	15.51	15.06	14.74	14.65	14.81	15.19	15.67	16.13	16.42	16.45	16.18

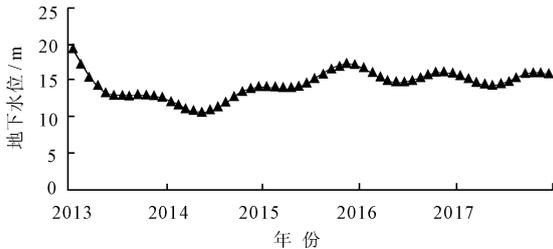


图4 2013-2017年1月平均水位预测曲线图

3 模拟结果分析

通过对模型的建立及分析可知,研究区内地下水位在1998年之前变化较为平缓,呈现动态平衡状态,年际变化呈现小范围内的波动;自1998年以来,开采量增加,降雨量减少,地下水位逐年下降,且下幅度逐渐增加;分析预测结果可知,在维持现有开采量的基础上,地下水位在未来一段时间内会呈现小范围的下降,而在一定范围内持平并产生波动,呈现动态平衡状态。根据预测结果,地下水位在未来5年内下降幅度会逐渐减小,应加强管理机制,控制研究区人工开采量,涵养地下水量,增加西山后备水源地储备水量。

分析模型周期项可知,研究区水位变化存在两个显著的周期性变化。当 $k=2$ 时,变化周期为9.5年,根据图2可知,水位在拟合期前9.5年间水位呈现动态平衡的状态;而在拟合期后9.5年间,地下水位持续性下降,反映了水位的多年变化特征。当 $k=19$ 时,周期为1年,反映出地下水位年内周期变化,即水位随降雨量的季节性变化。

模型拟合精度和预测精度虽然较高,仍存在局限性。时间序列模型是基于数理统计原理,分析数据的数学变化关系的统计模型,忽略了地下水复杂的运动机制及赋存环境变化及对水位的影响;模型能够反应拟合数据序列内的随机因素对水位的影响,但无法考虑预测序列内降雨量、开采量等因素突变的随机性对模型产生的影响;作为统计模型,建模数据序列的选取影响着模型精度,如何选取适合的时间序列建立模型,仍需要进一步研究讨论。

4 结语

应用时间序列模型能够全面了解研究区内地下

水位动态变化趋势及特征,拟合精度和预测精度均较高,相对于其他研究方法原理简单可行,所需资料较少,能够快速预测研究区内水位变化特征及趋势。

时间序列模型是以数理统计原理为基础,探索数据内部的统计变化规律进而预测水位的变化趋势,未考虑到地下水动力学变化机制,无法反应降雨、开采量等因素对水位变化的影响机制,当预测数据中出现因素的突发性变化时,其预测精度会下降;作为统计模型,建模序列长度的选取对模型预测精度存在一定影响。在实际应用中,当降雨量或人工开采量等因素出现连续性突变时,可考虑将突变因素的发生概率同模型相结合,合理选择建模序列,提高模型预测的精度。

参考文献:

- [1] 束龙仓, 杨建青, 王爱平, 等. 地下水动态预测方法及其应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [2] 王晓红, 刘文臣, 沈媛媛, 等. 北京西山岩溶水应急水源地水文地质特征及开采潜力分析[J]. 中国岩溶, 2011, 30(2): 216-221.
- [3] 杨志霞. 用时间序列模型预测深层地下水位[J]. 河北水利, 2007(12): 26-27.
- [4] 董殿伟, 刘久荣, 林沛. 时间序列分析法在地下水水位预测中的应用[J]. 城市地质, 2007, 2(4): 29-31.
- [5] 杨忠平, 卢文喜, 李平. 时间序列模型在吉林西部地下水动态变化预测中的应用[J]. 水利学报, 2005, 36(12): 1475-1479.
- [6] 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.
- [7] 刘派, 卢文喜, 徐威. 基于频谱分析法的锦州市地下水动态预报[J]. 人民黄河, 2011, 33(2): 62-63+68.
- [8] 赵杰, 卞玉梅, 周晓君. 时间序列分析法在沈阳市地下水动态预报中的应用[J]. 东北水利水电, 2007, 25(8): 31-34.
- [9] 张盼, 刘文兆. 应用时间序列模型分析长武源区地下水水位的变化特征[J]. 水土保持研究, 2010, 17(3): 22-27.
- [10] 鲁魁锋, 熊黑钢, 冒静, 等. 两种不同时间序列模型在地下水动态变化预测中的比较研究[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(1): 1-6;