

基于多变量时间序列模型的大安市地下水埋深预测

张真真¹, 卞建民¹, 韩 宇¹, 张 琳²

(1. 吉林大学环境与资源学院, 吉林 长春 130021; 2. 北京中环国宏环境资源科技有限公司, 北京 100107)

摘 要: 依据大安市 2000—2009 年的降水、蒸发、地下水开采量和地下水埋深等数据资料, 首先利用主成分分析法确定了与地下水埋深相关性较大的影响因素, 然后利用多变量时间序列 CAR 模型建立了大安市地下水埋深预测模型, 并对模型进行验证, 利用模型预测了地下水埋深。结果表明, 农业用水量、降水量和蒸发量与地下水埋深的相关系数分别为: 0.56、0.46、-0.13, 三者对地下水埋深的贡献率分别为: 43.09%、27.45%、21.39%, 总贡献率达 91.93%, 是影响地下水埋深的主要因素。CAR 模型预测的承压水埋深和潜水埋深与实际观测值之间的相对误差不超过 5%。根据预测方案, 当降水量减少 10%, 蒸发量增加 9%, 农业用水量增加 11% 时, 承压水埋深将达到 8.70 m, 潜水埋深将达到 4.55 m。干旱时期应适当减少农业开采量, 增加地表水灌溉, 减小土壤沙漠化发生的可能。

关键词: 地下水埋深; 主成分分析; 多变量时间序列模型; 预测

中图分类号: TV211.1+2 **文献标志码:** A

Groundwater table forecast in Da'an City based on multivariate time series model

ZHANG Zhen-zhen¹, BIAN Jian-min¹, HAN Yu¹, ZHANG Lin²

(1. College of Environment and Resource, Jilin University, Changchun, Jilin 130021, China;

2. China Environmental Resources Technology Co., Ltd. Beijing 100107, China)

Abstract: At first, the influencing factors which had great relevance with groundwater table were determined by the principal component analysis (PCA) method, then established the groundwater table forecast model by using the multivariate time series CAR model, according to the information as rainfall, evaporation, groundwater exploitation and groundwater tables and so on from 2000 to 2009 in Da'an City. Also the model was validated and applied to forecast the groundwater tables. The result shown that: The correlation coefficients of agricultural water consumption, precipitation and evaporation with the groundwater table were 0.56, 0.46 and -0.13, respectively. The contributions of the three factors with the groundwater table were 43.09%, 27.45% and 21.39%, respectively. The total contribution rate was 91.93% and they were the major factors affecting the groundwater table. The relative error between forecasting value and measured value for confined and unconfined water tables was less than 5%. According to the forecast scheme, when the rainfall was reduced 10% and evaporation was increased 9%, and the agricultural water consumption was increased 11%, the confined water table will be reached 8.70 m, and the unconfined water table will be reached 4.55 m. So in drought period, the agricultural exploitation should be reduced properly, the surface water irrigation should be increased, to reduce the possibility of soil desertification.

Keywords: groundwater table; principal component analysis (PCA); multivariate time series model; forecasting

大安市是吉林省重要的商品粮生产基地, 该市地处我国北方干旱地区生态环境脆弱带上, 地势平坦开阔, 地貌类型简单, 气候特征表现为降水少而蒸发强烈, 受气象条件的影响加上区域不合理的地下水开采, 土地沙漠化、土壤退化问题突出, 严重影响区域生态环境和农业可持续发展^[1]。为解决由地下

水埋深变化引发的一系列生态问题, 准确估计大安市地下水埋深的变化规律, 本文即对引起水位变化的主导因素展开研究, 并据此对地下水埋深做出合理预测, 对于正确认识地下水资源开发利用现状, 制定合理的用水规划有重要意义。

地下水位动态变化是地下水对人为和自然因素

收稿日期: 2014-05-05
基金项目: 国家自然科学基金项目(41072255); 吉林省自然科学基金项目(201115035)
作者简介: 张真真(1991—), 女, 山东济宁人, 硕士研究生, 研究方向为地下水资源评价及保护。E-mail: zhangzhenzhen9101@126.com。
通信作者: 卞建民(1968—), 女, 吉林长春人, 博士, 教授, 博导, 研究方向为水资源评价及水环境与水生态效应。E-mail: bianjianmin@126.com。

共同作用下的综合响应,传统的地下水埋深预测模型主要包括相关分析模型、人工神经网络模型、灰色系统模型等,这些预测模型的建模方法要求时间序列具有平稳性和独立性^[2-4],因此,如果时间序列过于复杂得到的预测结果就会不精确,而多变量时间序列模型是通过提取多变量时间序列中的有意义的信息来描述地下水动态特征的,避免了因处理复杂的时间序列引起的误差,提高了预测的精确度。目前,CAR 模型已经在水文预报、人口预测及气候变化趋势等方面得到广泛应用,并且得到了较好的预测结果,而应用于地下水埋深预测的研究较少^[5-6]。管孝艳^[7]等建立了内蒙古河套灌区地下水埋深预测的 CAR 模型,结果表明预测效果良好,该模型具有较好的适用性。本文初步探讨了影响大安市地下水埋深变化的主导因素,并在此基础上根据 CAR 模型建模原理建立地下水埋深预测模型,以期为研究区地下水资源合理开采和沙漠化、盐碱化防治提供理论依据。

1 多变量时间序列模型的构建

1.1 CAR 模型建模原理

多变量自回归模型主要采用递推最小二乘方法进行模型参数评估的方法建模,则由 q 个时间变量组建的 p 阶带控制项的自回归时间序列模型的表达式为:

$$\begin{aligned} X_t = & \alpha_1 X_{t-1} + \alpha_2 X_{t-2} + \cdots + \alpha_p X_{t-p} \\ & + \beta_{10} Y_{1,t} + \beta_{11} Y_{1,t-1} + \beta_{12} Y_{1,t-2} + \cdots + \beta_{1p} Y_{1,t-p} \\ & + \beta_{20} Y_{2,t} + \beta_{21} Y_{2,t-1} + \beta_{22} Y_{2,t-2} + \cdots + \beta_{2p} Y_{2,t-p} \\ & + \cdots + \beta_{q0} Y_{q,t} + \beta_{q1} Y_{q,t-1} + \beta_{q2} Y_{q,t-2} + \cdots + \beta_{qp} Y_{q,t-p} \\ & + \epsilon_t \end{aligned} \tag{1}$$

式中, $\{X_t\}$ 和 $\{Y_{q,p}\}$ 为时间序列变量; $\alpha_1, \alpha_2 \cdots \alpha_p$ 和 $\{\beta_{qp}\}$ 均为自回归系数; $\{\epsilon_t, t = 1, 2, \cdots\}$ 是零均值平稳白噪声序列。

1.2 建模步骤

(1) 利用递推最小二乘法进行模型参数评估。将 CAR 模型表达式记作:

$$X_t = A_t^T B + \epsilon_t \tag{2}$$

其中, $A = (\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_p, \beta_{10}, \beta_{11}, \beta_{12}, \cdots, \beta_{1p}, \cdots, \beta_{20}, \beta_{21}, \beta_{22}, \cdots, \beta_{2p})^T$; $B = (X_{t-1}, X_{t-2}, \cdots, X_{t-p}, Y_{1,t}, Y_{1,t-1}, Y_{1,t-2}, \cdots, Y_{2,t}, Y_{2,t-1}, Y_{2,t-2}, \cdots, Y_{2,t-n})^T$

利用最小二乘法得到的矩阵 A 估计值的表达式为:

$$\begin{cases} \hat{A}_t = \hat{A}_{t-1} + \frac{P_{t-1} B}{a + B_t^T P_{t-1} B_t} (X_t - B_t^T \hat{A}_{t-1}) \\ S(p) = \sum_{t=n+1}^N \epsilon_t^2 \end{cases} \tag{3}$$

式中, $S(p)$ 表示残差平方和; a 为遗忘因子,表示对历史数据的遗忘速度,其取值范围为 $0.9 \sim 1.0$ 。

(2) 最高阶数 p 的确定。CAR 模型定阶的原理是,对于已确定的样本,建立 p 阶 CAR 模型时,是由低阶向高阶逐步依次建立多变量时间序列模型的。每建立一个模型,利用 F 检验法判断模拟模型是否是合适的模型。

当自回归系数的估计值 $\hat{\alpha}_{p+1}$ 和 $\hat{\beta}_{i,p+1}$ 全为 0 时,模型是合适的;当估计值 $\hat{\alpha}_{p+1}$ 和 $\hat{\beta}_{i,p+1}$ 至少有一个不为 0 时,模型是不合适的。其检验统计量服从 $F(n_2 - n_1, N - n_2)$ 的 F 分布,表达式为:

$$F = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \cdot \frac{N - n_2}{n_2 - n_1} \tag{4}$$

式中, M_1 为低阶模型的残差平方和; M_2 为高阶模型的残差平方和; n_1 为低阶模型的参数个数; n_2 为高阶模型的参数个数; N 为观察数据组个数。

对于逐步建立的两个临近的 CAR 模型, F 统计量的表达式为:

$$F = \frac{M_p - M_{p+1}}{M_{p+1}} \cdot \frac{N - pq - (q + 1)}{q} \tag{5}$$

式中, M_p 为低阶模型残差平方和; M_{p+i} 为高阶模型残差平方和; q 为大均方自由度; $N - pq - (q + 1)$ 为小均方自由度。

根据公式计算具体的 F 值,当设置自由度 a 为某个确定的值时,就可以求出相应的临界值 Fa ,比较 F 与 Fa 的大小,从而判断 $CAR(p)$ 是否是合适的模型。当统计量的值小于临界值时表明检验不显著,说明模型是不合适的,反之,是合适的模型。逐步建立由低阶到高阶的 $CAR(p)$ 模型,依次检验相邻两个模型,找到最合适的模型。

(3) 真实模型的参数估计

确定了模型的最高阶数 p 之后,需要对自回归系数的估计值 $\hat{\sigma}_p$ 及 $\hat{\sigma}_{qp}$ 是否为 0 进行 F 检验,可以根据模型白噪声序列 $\{\epsilon_t, t = 1, 2, \cdots\}$ 及参数估计值的误差协方差矩阵进行判断,从而确定真实模型的阶数及其时滞。模型白噪声序列的标准差的无偏估计为:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{M_p}{N - p}} \tag{6}$$

参数估计值的误差协方差矩阵为:

$$P_N = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{21} & \cdots & \rho_{qp+1,1} \\ \rho_{12} & \rho_{22} & \cdots & \rho_{qp+1,2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \rho_{1,qp+1} & \rho_{2,qp+1} & \cdots & \rho_{qp+1,qp+1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\hat{A}_i \text{ 的 } 1 - \alpha \text{ 置信区间(取置信度为 } 0.05) \text{ 为:}$$
$$\hat{A}_i(N) - 1.96 \sqrt{\rho_{ii}} \hat{\sigma} < A_i < \hat{A}_i(N) + 1.96 \sqrt{\rho_{ii}} \hat{\sigma}$$
$$(i = 1, 2, \cdots, qp + 1) \quad (8)$$

删除估计值为 0 的参数后重新利用递推最小二乘法建立多变量时间序列模型,若经 F 检验结果显著,表明重新建立的 $CAR(p)$ 模型是真实模型,反之,不是真实模型。

2 环境背景及问题

2.1 区域环境背景

大安市位于吉林省西北部,东经 $123^{\circ}08'45'' \sim 124^{\circ}21'56''$,北纬 $44^{\circ}57'00'' \sim 45^{\circ}45'51''$,属于松嫩平原腹地,地势起伏较小,东北为大赉阶地,西北为沿河川平地,西部沙丘,中南部为盐碱平川地^[8],见图 1。研究区域位于我国干旱荒漠地带,属于北温带大陆性季风气候,气候特征表现为:春节干旱多风,夏季炎热雨水集中,秋季雨少,风大晴天多,冬季严寒雪少,四季气候分明,降水少且时空分布不均匀,多年平均降雨量为 413.7 mm ,年平均蒸发量为 $1\,688.6 \text{ mm}$ ^[9]。

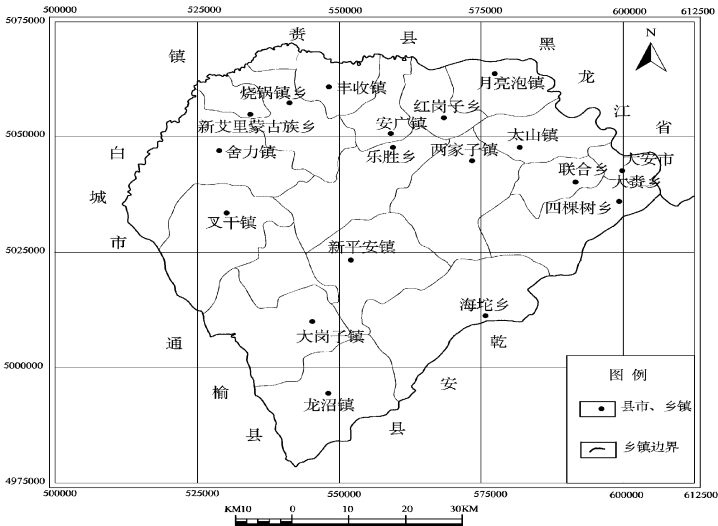


图 1 大安市地理位置图

Fig.1 The geographical position of the Da'an City

研究区内主要的含水层包括:第四系孔隙潜水与承压水含水层、第三系孔隙裂隙含水层和白垩系裂隙孔隙含水层。天然情况下,各层构成一个较完整的含水层系统。地下水类型分为孔隙潜水和孔隙承压水,全新统冲积砂和上更新统冲积细砂、黄土状黏土、黄土状壤土组成了孔隙潜水含水层,厚度为 $5 \sim 15 \text{ m}$,下更新统白土山组冰水堆积的砂、砂砾石组成了孔隙承压水含水层,分布较广,水量丰富^[10]。研究区地下水补给方式以降水入渗为主,其次为地下水的侧向径流补给。地下水径流缓慢,循环周期较长,地下水位埋藏较浅,潜水地下水位略高于承压水水位,潜水越流补给承压水。

2.2 研究区存在的主要问题

大安市地表水资源量达 $0.33 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,受水文和气象因素影响,水资源可利用量变化较大,加上不合理的地下水开采,研究区生态环境日益恶化,水资源短缺、盐碱化、荒漠化等问题严重,特别是持续干旱导致的农业用水紧缺问题严重阻碍了该区发

展。为解决农业用水严重不足的现状,研究区大强度地开采地下水,使水资源短缺问题更加严重,区域水位持续下降,地下水天然动态平衡遭到破坏。近几年研究区地下水资源开发利用情况见表 1。

表 1 2001—2009 年大安市地下水资源开发利用情况
Table 1 The exploitation and utilization of groundwater resources in Da'an city from 2000 to 2009

年份	井数/眼 Number of wells	灌溉面积/ 10^4 hm^2 Irrigation area
2001	1900	3.11
2002	5600	1.91
2003	7100	2.60
2004	7500	2.96
2004	7554	10.00
2005	6290	10.87
2006	7672	11.80
2007	7890	12.09
2008	6244	12.09
2009	6919	8.80

2001—2009 年,开动井数和灌溉面积整体上呈增加的趋势。特别是在 2004 年,开动井数增长了 4 倍,灌溉面积增长了 3 倍;2007—2008 年灌溉面积达到最大。在气候条件和人类活动的双重影响下,研究区各类土壤中,轻度盐化草甸土占 31.6%,中度盐化草甸土占 30.5%,重度盐化草甸土(含碱土和盐土)占 37.9%,草原退化明显,土壤荒漠化正以每年 1.8% 的速度扩张^[11],原本脆弱的生态环境恶化更加严重。

3 地下水埋深影响因素分析

根据大安市 2000—2009 年每年各月地下水埋深数据分别绘制月均、年均地下水埋深变化历时曲

线,见图 2 和图 3。

由图 2、3 可以看出,受降水、蒸发等气象因素的影响,地下水埋深呈明显的季节性周期变化。丰水期降雨量的增加,蒸发量减小时,潜水埋深滞后于降水变化,呈减小趋势,承压水埋深变化滞后于潜水埋深,枯水期地下水埋深逐渐增加,这些变化说明大气降水是大安市地下水的主要补给来源。2006 年之后,降水量和蒸发量都较小,潜水埋深呈增大趋势,承压水埋深增加更明显,表明地下水埋深除了受气象因素影响之外,受人工开采影响较大。因此,大安市地下水埋深主要受降水量、蒸发量和人工开采量的影响,人工开采量主要包括工、农业用水量和生活用水量。

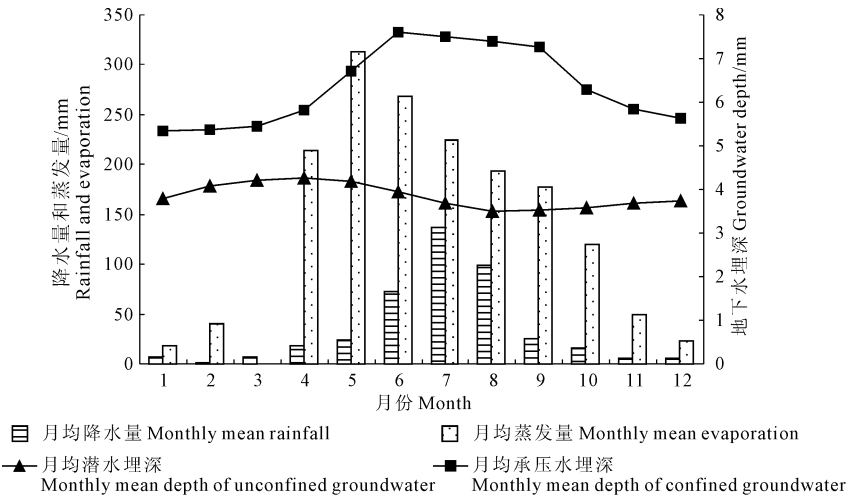


图 2 大安市 2000—2009 年月平均地下水埋深变化图

Fig.2 Change chart of average monthly groundwater tables in Da'an City from 2000 to 2009

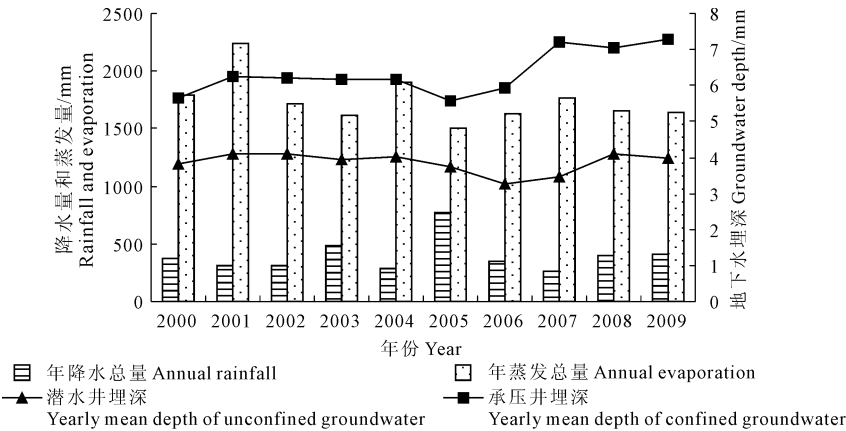


图 3 2000—2009 年年均地下水位埋深变化图

Fig.3 Change chart of average yearly groundwater tables from 2000 to 2009

为了分析出对地下水埋深变化影响较大的主导因素,采用主成分分析法进行计算和分析。选取 2000—2009 年的农业用水量(X_1)、工业用水量

(X_2)、生活用水量(X_3)、年降水总量(X_4)、年蒸发总量(X_5) 作为输入因子,利用 SPSS 建立相关方程,计算各个影响因素与地下水埋深的相关性。建立的主

成分模型见下式:

$$F_1 = 0.56ZX_1 - 0.49ZX_2 + 0.05ZX_3 - 0.41ZX_4 + 0.53ZX_5 \tag{9}$$

$$F_2 = 0.46ZX_1 + 0.01ZX_2 + 0.77ZX_3 + 0.30ZX_4 - 0.32ZX_5 \tag{10}$$

$$F_3 = -0.13ZX_1 + 0.64ZX_2 + 0.40ZX_3 - 0.60ZX_4 + 0.24ZX_5 \tag{11}$$

经计算得到累计贡献率为 91.93% 的三个主成分,其贡献率分别为:43.09%, 27.45%, 21.39%, 由式(9 - 11) 可知,对地下水埋深影响较大的三个主要因素依次为:农业用水量、降水量、蒸发量,相关系数分别为:0.56,0.46, - 0.13,农业开采对地下水的影响最大,而且随着年份增加,其影响越来越占据主导地位。

4 CAR 模型的建立与应用

4.1 参数的确定与模型建立

由以上分析可知农业用水量、降水量、蒸发量是影响研究区地下水埋深的主要因素,因此,建立模型时将以上变量作为输入变量,将潜水、承压水埋深分别作为输出变量,建立 CAR 模型。其中,检验结果为: $F = 3.478$,建模及因子检验的显著水平为 0.05,建模所用递推最小二乘法的遗忘因子为 1.00。多变量自回归 CAR 模型定阶检验结果为: $CAR(p)$ 残差平方和为 0, $CAR(p - 1)$ 残差平方和 $S(p - 1)$ 为 0.022,模型定阶的 F 检验值为 - 2402.31,检验值 F 为 3.478,选定阶次模型全参数时的残差平方和 S 为 0.022,选定阶次、剔除不显著因素后模型的残差平方和 S 为 0.024,判断是否应该剔除不显著因子

的 F 检验值为 0.137。剔除不显著的项后的 CAR 模型表达式如下。

承压水埋深:

$$Y_{(t)} = 0.69Y_{(t-1)} + 0.17X_{(1,t)} - 1.31 \times 10^{-3}X_{(2,t)} - 0.91 \times 10^{-3}X_{(2,t-1)} + 2.64 \times 10^{-3}X_{(3,t)} + 4.82 \times 10^{-4}X_{(3,t-1)} \tag{12}$$

潜水埋深:

$$Y_{(t)} = 1.31Y_{(t-1)} + 4.99 \times 10^{-2}X_{(1,t)} - 2.15 \times 10^{-3}X_{(2,t-1)} + 1.22 \times 10^{-3}X_{(3,t)} - 9.57 \times 10^{-3}X_{(3,t-1)} \tag{13}$$

其中, t 为时间序列编号。以上两个表达式即为剔除估计值为 0 的自回归系数后的地下水埋深预测模型,模型的精确度需要进一步进行检验。

4.2 模型的检验

将地下水埋深观测值与模型计算的拟合值作图,通过观察拟合情况及相对误差检验模型的精确度,模拟曲线见图 4,相对误差见表 2。

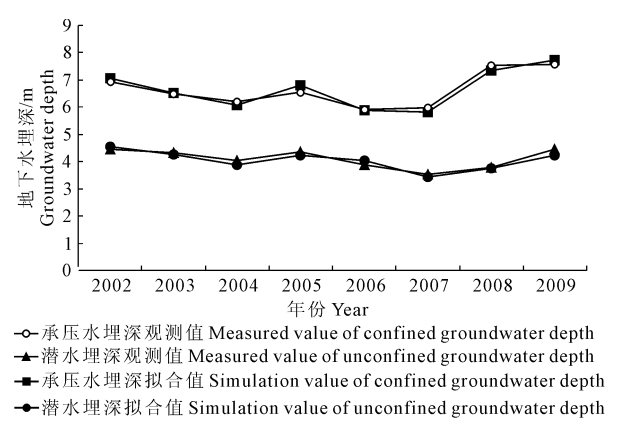


图 4 地下水埋深数值模拟曲线

Fig.4 Numerical simulated curve for groundwater tables

表 2 地下水埋深误差计算表

Table 2 The error calculated table for groundwater tables

年份 Year	承压水埋深 Confined groundwater table			潜水埋深 Unconfined groundwater table		
	观测值/m Measured value	拟合值/m Simulated value	相对误差/% Relative error	观测值/m Measured value	拟合值/m Simulated value	相对误差/% Relative error
2002	6.93	7.05	2	4.44	4.56	3
2003	6.48	6.53	1	4.33	4.26	2
2004	6.19	6.08	2	4.04	3.88	4
2005	6.57	6.81	4	4.37	4.22	3
2006	5.93	5.89	1	3.89	4.03	4
2007	5.98	5.82	3	3.54	3.44	3
2008	7.54	7.33	3	3.79	3.76	1
2009	7.58	7.72	2	4.44	4.24	4

从地下水埋深的模拟曲线及误差计算表可以看出,观测值与拟合值吻合较好,偏差较小,且地下水埋深的模拟值与实际观测值之间的相对误差不超过 5%,表明模型能够很好地反应地下水埋深的变化趋势,能够实现对地下水埋深的准确预报。

4.3 CAR 模型的实际预测

由于研究区气候比较干旱,加上近几年农田用水量不断增加,为确保区域未来发展不受限制,以 2009 年为基准年,根据降水量、蒸发量和农业用水量等数据资料,拟定两种地下水开采方案,利用预测模型计算出在两种方案下地下水未来变化趋势,见表 3。

表 3 两种用水方案下地下水埋深预测					
Table 3 Forecast groundwater table under two exploitation schemes					
项目 Items	农业用水量 Agricultural water consumption /10 ⁷ m ³	年蒸发总量 Annual total evaporation /mm	年降水总量 Annual total rainfal /mm	潜水埋深 Depth of unconfined groundwater /m	承压水埋深 Depth of confined groundwater /m
2009	18.60	1641.60	406.30	3.91	7.29
预测 1 Predicted value 1	19.53	1723.68	426.62	4.22	8.20
预测 2 Predicted value 2	20.46	1805.76	446.93	4.55	8.70

由表 3 可以看出,当降水量减少 5%,蒸发量增加 5%,农业用水量增加 5%时,承压水埋深将达到 8.20 m,潜水埋深将达到 4.22 m,当降水量减少 10%,蒸发量增加 9%,农业用水量增加 11%时,承压水埋深将达到 8.70 m,潜水埋深将达到 4.55 m。由此可见,在未来一段时间内,如果干旱比较严重,应该适当减少农业开采量,或引入地表水进行农田灌溉,合理调控水资源利用,有利于缓解区域干旱现状,防止荒漠化发生。

5 结 论

对研究区地下水埋深和各影响因素之间的相关性进行了分析,选取农业用水量、降水量、蒸发量作为输入因子,将地下水埋深作为输出因子,建立了地下水预测模型 CAR 模型,并将模型运用于大安市地下水埋深预测,得出的主要结论归纳如下:

1) 潜水埋深受气象变化影响明显,而承压水埋深变化滞后,地下水埋深随气候变化呈明显的季节性变化。利用主成分分析法提取出三个影响地下水

埋深的主要因素,每个主成分对应的贡献率分别为 43.09%,27.45%,21.39%,农业用水量与地下水埋深的相关性最大,其次分别为降水量、蒸发量,且农业开采水量对地下水埋深的影响程度呈逐年增加的趋势。

2) 建立的多变量时间序列模型 CAR 模型能够很好地预测出地下水埋深,其模拟值与真实值之间的相对误差小于 5%。地下水开采方案表明,当降水量减少 10%,蒸发量增加 9%,农业用水量增加 11%时,承压水埋深将达到 8.70 m,潜水埋深将达到 4.55 m。合理减少农业开采量,增加地表水灌溉有利于减小地下水埋深,减小土壤沙漠化发生的可能。

多变量时间序列模型的应用范围具有一定的局限性,人类活动对地下水埋深有着复杂的影响,本次研究仅从农业、工业、生活用水等开采量的角度考虑对地下水埋深的影响,因此,设置的 CAR 模型参数的精度及预测效果受到限制。进一步探讨复杂的人类活动与地下水埋深的关系,建立高精度的预测模型是未来研究的发展方向。

参 考 文 献:

[1] 林年丰,汤洁.松嫩平原环境演变与土地盐碱化、荒漠化的成因分析[J].第四纪研究,2005,25(4):474-483.

[2] 陆乐,吴吉春.地下水数值模拟不确定性的贝叶斯分析[J].水利学报,2010,41(3):264-271.

[3] 屈忠义,陈亚新,史海滨,等.地下水文预测中 BP 网络的模型结构及算法探讨[J].水利学报,2004,2(2):88-93.

[4] 刘雷,周维博,云涛,等.渭北旱塬区典型测井地下水埋深的灰色预测研究[J].水资源与水工程学报,2012,23(3):135-137.

[5] 常军,李素萍,李赟,等.CAR 和 SVM 方法在郑州冬半年大雾气候趋势预测中的试用[J].气象与环境科学,2008,31(1):16-19.

[6] 李春兰,张丽娜,乔均俭.中国入境旅游人数和外汇收入的 CAR 预测模型[J].数据统计与管理,2010,29(6):970-974.

[7] 管孝艳,王少丽,高占义,等.基于多变量时间序列 CAR 模型的地下水埋深预测[J].农业工程学报,2011,27(7):64-69.

[8] 杨占梅.大安灌区土壤盐运移的试验及模拟研究[D].吉林:吉林大学,2012.

[9] 林年丰,孙平安,汤洁,等.松嫩平原水土保持价值的量化研究[J].水土保持学报,2006,20(1):155-159.

[10] 张丽姝.引水灌溉对大安市地下水及表生生态景观的影响研究[D].吉林:吉林大学,2012.

[11] 卞建民,汤洁,林年丰,等.半干旱地区水资源承载能力研究——以松嫩平原西南部霍林河流域为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2006,36(1):73-77.