

三江平原地下水埋深灰色自记忆预测模型

吕萍¹, 刘东^{1,2}, 赵菲菲¹

(1. 东北农业大学 水利与建筑学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学 农林经济管理博士后科研流动站, 哈尔滨 150030)

摘要:地下水资源是支撑区域粮食生产的重要基础资源。针对三江平原水田面积迅速增加、地下水水位持续下降问题,以建三江分局七星农场为例,依据1997—2007年地下水埋深监测资料,运用灰色微分方程与自记忆原理构建地下水埋深灰色自记忆预测模型。结果表明:该模型简洁实用,精度较高,当地未来地下水水位具有持续下降趋势。研究成果揭示了当地地下水埋深的时间变化规律,为七星农场乃至三江平原地下水资源可持续开发利用提供依据。

关键词:三江平原; 地下水埋深预测; 灰色微分方程; 自记忆

中图分类号:P332.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2011)05-0239-04

Grey Self-memory Model for Groundwater Depth Prediction in Sanjiang Plain

LÜ Ping¹, LIU Dong^{1,2}, ZHAO Fei-fei¹

(1. School of Water Conservancy & Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Postdoctoral Scientific Research Mobile Station of Agriculture and Forestry Economic Management, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Groundwater resources play an important role in supporting the regional grain production. In view of the problems of paddy field area increasing rapidly and groundwater level decreasing continuously, this study took Farm Qixing in Jiansanjiang branch bureau as an example. According to the groundwater depth monitoring data from 1997 to 2007, the paper established the grey self-memory model for groundwater depth prediction based on grey differential equation and self-memory theory. The results show that the model is feasible, has high accuracy, and the future local groundwater depth has a tendency of continuously decreasing. The study results indicate the temporal variation regulation of local groundwater depth. It provides basis for sustainable development and utilization of groundwater resources in Farm Qixing and even in the entire Sanjiang Plain.

Key words: Sanjiang Plain; prediction of groundwater depth; grey differential equation; self-memory

三江平原是我国重要的商品粮基地,对我国粮食生产起着重要的保障作用。1986—2005年,三江平原水稻种植面积从57.7万 hm^2 增加到150.9万 hm^2 ^[1]。由于水田面积的迅速扩大,地下水开采量也迅速增加,加之人为浪费严重及管理不善,使得三江平原多年平均地下水埋深持续增加,“吊泵”和局部超采现象时有发生^[2],地下水资源平衡遭到了严重的破坏。

地下水埋深由于受诸多自然和人为因素的影响而呈现复杂的非线性变化过程^[3],预测和分析研究地下水动态变化过程,有助于正确估算及合理开发利用

地下水资源。地下水埋深动态预测传统的方法有确定性模型和随机性模型,其中确定性模型的求解主要有解析法、数值法和物理模拟法;随机性模型有回归分析法、频谱分析法等,但由于这些模型本身复杂或大量的物理参数难以获得,因而不便在实际中应用^[4-5]。

本研究采用灰色微分方程与自记忆原理相结合的方法建立自记忆方程预报模型,并应用于三江平原七星农场地下水埋深序列的模拟及预测。该方程避免了多种影响因素数据的收集整理,只涉及地下水埋深观测序列本身,方便实用且具有较好的预测精度。

收稿日期:2011-03-09

修回日期:2011-03-25

资助项目:黑龙江省教育厅科学技术研究项目(11541024)

作者简介:吕萍(1985—),女,吉林龙井人,硕士生,主要研究方向为农业水土资源系统分析与优化利用。E-mail:pingping.85@163.com

通信作者:刘东(1972—),男,黑龙江安达人,副教授,博士,主要研究方向为农业水土资源系统分析与优化利用。E-mail:liudong22@126.com

1 建模思路

诸多自然现象和社会经济现象都是有规律的辩证发展过程,其运动变化都有一定的惯性,这种惯性就表现为系统的记忆性^[6]。自记忆性强调系统的变化总是与其历史行为相联系,或者说系统总会记得它的过去,因此可以通过引入记忆函数建立系统的自记忆方程,从而预测系统未来的变化^[7]。对于有微分方程描述的动力系统,可以建立相应的自记忆模型,通过实际应用^[7-10],证明它能显著提高预报准确率。对于地下水系统一般只有一系列动态观测值,这时可把现有的许多观测资料看作是描述实际非线性动力系统动力模式的一系列特解,通过一定的方法反演出描写系统的非线性动力模式后,便可建立自记忆模型进行模拟或预报^[7]。

2 灰色自记忆模型

2.1 灰色 GM(1,1)微分方程

地下水埋深时间序列受众多因素影响,具有很大的不确定性,因此可用灰色系统方法进行分析研究^[9]。GM(1,1)是用一阶线性常微分方程来描述灰色系统单序列动态情况的模型,可以对水文单因素进行中长期预报^[6,10-11]。

设地下水埋深观测序列为 $x(t), t=1, 2, \dots, n$ 。为消除数据量级上的差别影响,首先对序列进行归一化预处理^[12],本文采用除以序列最大值方法得到处理数据序列:

$$x_t^{(0)} = x(t) / x_{\max} \quad (1)$$

式中: x_{\max} ——序列原始数据的最大值。

对序列 $x_t^{(0)}$ 作一次累加生成:

$$x_t^{(1)} = \{x_t^{(1)}\}, t=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

其中, $x_t^{(1)} = x_1^{(0)}$; $x_t^{(1)} = \sum_{i=2}^t x_i^{(0)} = x_{t-1}^{(1)} + x_t^{(0)}, t=2, \dots, n$ (3)

得到的新数据序列与原始数据序列相比较,其随机程度大大弱化,平稳程度大大增加。其变化趋势可用一阶微分方程描述为

$$dx^{(1)} / dt + ax^{(1)} = u \quad (4)$$

式中,参数 a 和 u 可通过最小二乘法得到,即

$$[a, u]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y_N \quad (5)$$

其中, $B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)] & 1 \end{bmatrix}$

$$Y_N = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}$$

在式(4)中,令 $dx^{(1)} / dt = F(x, t)$, 移项后得 GM(1,1)微分方程式为

$$F(x, t) = u - ax^{(1)} \quad (6)$$

2.2 自记忆模型

将导出的灰色微分方程作为动力核,运用自记忆性原理建立月地下水埋深时间序列的自记忆模型^[6,9,12-13]。

对时间序列的多个时次 $t_i (i = -p, -p+1, \dots, 0, 1), t_0$ 为初始时次, t_1 为预测时次, p 为回溯阶,引进记忆函数 $\beta(t)$, 对 $F(x, t)$ 求 t_{-p} 至 t_1 的加权积分,运用分部积分和微积分中值定理得出一个差分-积分方程:

$$\beta_i x_i^{(1)} - \beta_{-p} x_{-p}^{(1)} - \sum_{i=-p}^0 x_i^{(1)m} (\beta_{i+1} - \beta_i) = \int_{t_{-p}}^{t_1} \beta(\tau) F[x^{(1)}, \tau] d\tau \quad (7)$$

其中, $x_i^{(1)m} = x^{(1)}(t_m), t_i < t_m < t_{i+1}$, 称式(7)为 p 阶自记忆性方程。

取近似值 $x_i^{(1)m} = [x_i^{(1)} + x_{i+1}^{(1)}] / 2$, 积分用求和替代,并记 $\alpha_i = \beta_i / (\beta_1 + \beta_0) (i = -p, \dots, 0, 1)$, 得自记忆性方程的近似表达式^[6,9,14-15]:

$$x_i^{(1)} = \alpha_{-p} [x_{-p}^{(1)} - x_{-p+1}^{(1)} + 2F_{-p}\Delta t] + \sum_{i=-p+1}^{-1} [x_{i-1}^{(1)} - x_{i+1}^{(1)} + 2F_i\Delta t] \alpha_i + (x_{-1}^{(1)} + 2F_0\Delta t) \alpha_0 + x_0^{(1)} \alpha_1 \quad (8)$$

式中: Δt ——序列时间间隔,一般取为 1; F_i ——式(6)中的 $F(x, t)$ 。

若令 $A_{-p} = x_{-p}^{(1)} - x_{-p+1}^{(1)} + 2F_{-p}\Delta t$; $A_i = x_{i-1}^{(1)} - x_{i+1}^{(1)} + 2F_i\Delta t, (i = -p+1, -p+2, \dots, -1)$; $A_0 = x_{-1}^{(1)} + 2F_0\Delta t$; $A_1 = x_0^{(1)}$ 式(8)可写成

$$x_1^{(1)} = A_{-p} \alpha_{-p} + \sum_{i=-p+1}^{-1} A_i \alpha_i + A_0 \alpha_0 + A_1 \alpha_1 \quad (9)$$

式(9)即灰色自记忆模型预测方程。模型记忆系数 α_i 可用最小二乘法估算,顺次取累加生成序列式(2)中 $p+2$ 个数据为一组,则有 $L = n - (p+1)$ 组数据,将每组数据代入式(9),则可得到一个 L 行 $p+2$ 列矩阵:

$$X_1^{(1)} = M \alpha \quad (10)$$

$$\text{其中, } X_1^{(1)} = \begin{bmatrix} x_{1,1}^{(1)} \\ x_{1,2}^{(1)} \\ \vdots \\ x_{1,L}^{(1)} \end{bmatrix}, \alpha = \begin{bmatrix} \alpha_{-p} \\ \alpha_{-p+1} \\ \vdots \\ \alpha_1 \end{bmatrix}$$

$$M=\begin{bmatrix} A_{-p,1} & A_{-p+1,1} & \cdots & A_{0,1} & A_{1,1} \\ A_{-p,2} & A_{-p+1,2} & \cdots & A_{0,2} & A_{1,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{-p,L} & A_{-p+1,L} & \cdots & A_{0,L} & A_{1,L} \end{bmatrix}$$

式(10)中, α 的最小二乘解为: $\alpha=(M^T M)^{-1} M^T X_1^{(1)}$ 。

3 应用实例

3.1 数据资料

根据三江平原七星农场 1997—2007 年 132 个月的月地下水埋深观测资料, 从中选取前 120 个月(1997—2006 年)的资料进行建模, 用 2007 年 12 个月的资料对模型进行试报检验, 并预测 2008 年 12 个月的地下水埋深。

3.2 灰色自记忆模型建立

首先求得归一化处理后地下水埋深时间序列的微分方程为:

$$F(x, t)=0.4731+0.005407 x^{(1)}$$

然后按照式(9)建立灰色自记忆预测方程, 取回溯阶数 p 为 11, 则有:

$$x_1^{(1)}=A_{-11} \alpha_{-11}+\sum_{i=-10}^{-1} A_i \alpha_i+A_0 \alpha_0+A_1 \alpha_1$$

表 1 七星农场月地下水埋深实测值与灰色自记忆模型预测值的比较(2007 年 1—12 月)

编号	实测值/m	预测值/m	相对误差/%	编号	实测值/m	预测值/m	相对误差/%
121	7.45	8.01	7.46	127	11.35	10.42	-8.24
122	7.31	7.67	4.98	128	11.10	10.29	-7.33
123	7.19	7.89	9.75	129	9.99	9.93	-0.61
124	7.66	8.67	13.23	130	9.44	9.38	-0.69
125	9.86	9.58	-2.83	131	9.03	9.07	0.46
126	10.64	10.26	-3.54	132	8.81	8.89	0.87

应用上述数据资料及模型对 2008 年 12 个月地下水埋深预测结果见图 2。

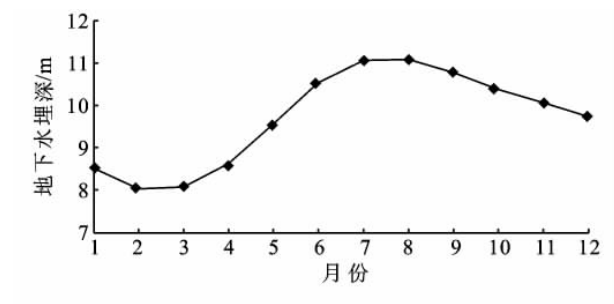


图 2 2008 年七星农场月地下水埋深预测结果

3.3 模型结果分析

由图 1 可看出, 模型拟合效果较好, 能很好地拟合变化趋势和序列中的极值, 体现出时间序列的波动特征。计算结果表明, 在拟合的 107 个月中, 相对误差在 20% 以上的有 7 个, 占拟合月份的 6.54%; 相对误差在 10% 以下的有 85 个月, 占拟合月份的 79.44%; 平均相对误差为 7.31%。预测结果(表 1)

经计算, 模型记忆系数: $\alpha_{-11}=-16.648, \alpha_{-10}=16.71, \alpha_{-9}=-16.956, \alpha_{-8}=17.378, \alpha_{-7}=-17.392, \alpha_{-6}=17.447, \alpha_{-5}=-17.254, \alpha_{-4}=17.378, \alpha_{-3}=-17.478, \alpha_{-2}=17.783, \alpha_{-1}=-17.475, \alpha_0=16.626, \alpha_1=-15.626$ 。

将计算结果乘以最大值并进行累减还原, 用所建模型模拟 1998 年 2 月至 2006 年 12 月的 107 个月地下水埋深(对应编号为 14—120), 因回溯阶及累减原因, 1997 年 1 月至 1998 年 1 月无拟合值(对应编号为 1—13); 对 2007 年 12 个月的地下水埋深(对应编号为 121—132)进行试报, 模型拟合值、预测值和实测值见图 1, 预测结果与实测值的比较见表 1。

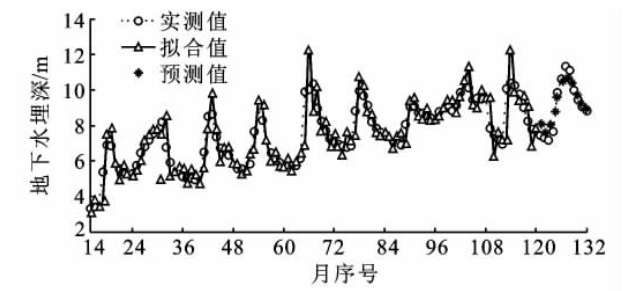


图 1 七星农场月地下水埋深实测值与拟合值、预测值的比较

表明, 在试报的 12 个月中, 只有一个月相对误差在 10% 以上, 占预测月份的 8.33%, 58.33% 的月份相对误差在 4% 以内, 平均相对误差为 5%。

编号 65, 66, 113 和 114 的 4 个月份分别对应为 2002 年 5 月、6 月和 2006 年 5 月、6 月, 这几个月份的拟合值与实测值有较大偏差。经分析认为, 以上 4 个月份受当时气候影响, 干旱严重, 用于灌溉的地下水量激增, 导致地下水埋深在短时期内急剧增加, 地下水位在这几个月份有较大波动, 所以在预测时出现了滞后和偏离的情况。

2008 年地下水埋深的预测值较好地体现了地下水埋深的季节性波动特征, 反映了地下水埋深逐年加深的变化趋势。

4 结论

(1) 灰色自记忆模型是一种确定性与不确定性相结合的方法, 具有简洁实用的优点。模型计算只涉及

地下水埋深观测序列本身,无需其它影响因素的观测资料,将由灰色理论导出的 $GM(1,1)$ 微分方程作为动力核较其他方法简单方便,模型结构简单,易于编程计算。

(2)通过实例验证,灰色自记忆模型充分利用了多个历史观测值信息,能够显著提高预报的准确率,具有较好的模拟和预测效果。其预测结果比较科学合理,可为三江平原水资源合理开发利用提供参考依据。

(3)研究结果表明,三江平原七星农场的地下水埋深逐年加深趋势显著,不利于区域的可持续发展,建议当地严格控制地下水开采量,兴建地表水控制工程,开源节流,防止地下水资源进一步恶化,同时应大力推广节水灌溉技术,以提高有限水资源的利用效率。

参考文献:

- [1] 黄妮,刘殿伟,王宗明. 1986—2005 年三江平原水田与旱地的转化特征[J]. 资源科学, 2009, 31(2): 324-329.
- [2] 刘东,付强,孟军. 集对分析法在三江平原井灌区地下水资源承载力评价中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2009(2): 1-4.
- [3] 李荣峰,沈冰,张金凯. 考虑周期性变化的地下水埋深预测自记忆模型[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 34-37.
- [4] 张蔚榛,沈荣开. 地下水文与地下水调控[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1998.
- [5] 周维博. 人工神经网络理论在井渠结合灌区地下水动态预测中的应用[J]. 西北水资源与水工程, 2003, 14(2): 5-9.
- [6] 曹鸿兴. 动力系统自忆性原理: 预报和计算应用[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- [7] 李荣峰. 地下水动态预测的自记忆性模型及其应用研究[J]. 山西水利科技, 2005(1): 6-8.
- [8] 沈冰,李荣峰,黄领梅,等. 年径流预测的灰色自记忆模型[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2005, 33(4): 132-134, 138.
- [9] 解苗苗,王文圣,王红芳. 灰色自记忆模型在年径流预测中的应用[J]. 水电能源科学, 2007, 25(2): 8-9, 4.
- [10] 沈冰,刘敏,黄领梅. 灰色自记忆模型及其在新疆和田地下水埋深预测中的应用[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(11): 223-226.
- [11] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [12] 李荣峰,沈冰,张金凯. 作物生育期降雨量预测的灰色自记忆模型[J]. 武汉大学学报, 2005, 38(3): 19-21, 53.
- [13] 曹永忠,封国林,曹鸿兴,等. 区域气候预报自记忆模式的研究与计算[J]. 南京气象学院学报, 1999, 22(3): 387-391.
- [14] 陆君安,夏军,陈士华,等. 动力系统的自记忆数值预报[J]. 数学杂志, 1998, 18(增刊): 11-14.
- [15] 李荣峰. 水文非线性时间序列分析的自记忆模型研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.

欢迎订阅 2012 年《中国水土保持》杂志

《中国水土保持》是水利部主管、黄河水利委员会主办的全国性水土保持业务与技术综合性期刊,全国中文核心期刊、全国水利系统优秀科技期刊、河南省第一届自然科学二十佳期刊、《中国学术期刊综合评价数据库》来源期刊。本刊紧密围绕全国水土保持中心工作,贯彻水土保持方针政策,报道水土保持科技成果,推广生态建设新鲜经验,剖析监督执法案例,介绍开发建设项目生态恢复技术,探讨水土保持监测方法,普及水土保持基础知识,提供水土保持动态信息。近 30 年来,杂志形成了融政策性、技术性、新闻性和实用性为一体的独特风格,开设了 20 多个栏目,深受读者欢迎。读者对象为从事水土保持管理、规划、设计、施工与科研的业务人员,有关农、林、水、牧、地理、生态行业的管理者与科研、教学人员,以及关心我国水土保持生态建设的社会各界人士。

本刊为大 16 开,每月 5 日在郑州出版,每册定价 8.00 元,全年定价 96.00 元。本刊为杂志社自办发行(请直接汇款到杂志社),订阅款可电汇也可邮汇。

电汇开户行: 郑州交行政二街支行; 银行户名: 黄河水利委员会新闻宣传出版中心

账号: 411060200010149028852

邮汇地址: 郑州市金水路 11 号; 收款人: 《中国水土保持》杂志社; 邮政编码: 450003

联系电话: 0371-66022619, 66022338(含传真)

E-mail: swcc2000@sina.com

QQ: 838347450