

# 灰色系统在水资源预警中的应用研究

钟平安, 余丽华, 王会容, 吴善锋

( 河海大学水资源环境学院, 江苏 南京 210098 )

**摘要** :在具有境外引水的复杂水资源系统中,建立水资源丰枯定性预警,对降低供水系统联合供水成本和提高供水可靠性具有重要意义。利用灰色理论中灾变预测的原理,以深圳市典型水库年降雨量为预测因子,建立了 GM(1,1)模型,并对 75% 保证率的年降雨量  $P_{75}$  进行灾变分析。从模型模拟结果分析了灰色系统在水资源实时预警应用中的局限性。

**关键词** :灰色系统; 枯水预测; 灾变预测; 水资源

**中图分类号** :TV213.4      **文献标识码** :A      **文章编号** :1004-693X(2006)02-0039-03

## Application of grey system to water resources early warning system

ZHONG Ping-an, YU Li-hua, WANG Hui-rong, WU Shan-feng

( College of Water Resources and Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China )

**Abstract** :An early warning system is established for complex water resources system with imported water, which is important to reduce the costs and enhance the credibility of combined water supply. Based on theory of calamity forecasting in grey system, the GM(1,1) forecast model was established with annual precipitation in a typical reservoir in Shenzhen City taken as a prediction index. It was applied to the calamity forecasting of annual precipitation of 75% assurance factor. The limitations of grey system in the application of real-time early warning of water resources are discussed according to the simulation results.

**Key words** :grey system; low flow prediction; calamity forecasting; water resources

水资源紧缺已成为影响我国经济社会可持续发展的重大问题。为了缓解资源型缺水地区水资源紧张状况,兴建了大量的跨流域调水工程。在具有外部引水的水资源系统中,区域水资源需求由当地水资源与外部引水共同承担。当地水资源较丰时,外部引水过多将导致当地水资源利用率降低,经济上不合理;当地来水较少时,必须提前蓄水,控制当地水库水位的消落,以提高供水系统的可靠性。因此,建立水资源实时预警系统,利用预警系统进行未来年份或未来一段时间当地水资源丰枯状况的分析预测,进而制定当地水资源与外部引水的联合调度方案,不仅可以降低水资源系统的联合供水成本,而且可以提高联合供水的可靠性。

受不确定性因素的影响,企图从成因角度建立

物理的预测模型来定量预测长期水资源量,是十分困难的。目前,长期水资源量预测常用的有统计分析和时间序列分析方法。近年来,灰色系统理论在这一领域获得了实际应用,本文利用灰色系统中的灾变预测方法,研究区域水资源的丰枯趋势定性预测问题。

### 1 灾变预测模型<sup>[1]</sup>

#### 1.1 灾变预测概念

给定某因子的时间序列  $\{x^{(0)}(i), i=1, 2, \dots, m\}$ , 用  $\xi$  表示灾变阈值(或灾变值), 则当发生  $x^{(0)}(t_i) \geq \xi$  时称为上灾变, 当发生  $x^{(0)}(t_i) \leq \xi$  时称为下灾变。所有  $x^{(0)}(t_i) \leq \xi$  构成的集合称为下灾变集合, 可表示为  $X^{(0)} = \{x^{(0)}(t_1), x^{(0)}(t_2), \dots,$

$x^{(0)}(t_n)$ 对应的下灾变时间(灾变点) $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 称为下灾变时间集合。仿此可定义上灾变集合与上灾变时间集合。

利用灰色模型进行灾变预测,一般只预测某种“灾害事件”是否出现和何时出现,而不是预测某因子将出现的精确数值,属于一种定性预测方法。

## 1.2 GM(1,1)模型

一般认为灰色系统的输出包含了系统各种输入及环境影响所有的信息,所以在灰色预测研究中,可以直接利用灰色系统的输出序列建模。GM(1,1)模型是对灰色系统建立微分方程的动态模型。它首先将一般无规律的原始数据作累加,得到光滑离散函数,使无规律的原始数据呈现出较有规律的生成数列,之后再建模,并通过最小二乘法率定模型参数。因为灰色模型GM(1,1)是关于生成数列的模型,所以GM(1,1)模型所得计算结果必须经过逆生成做还原。

GM(1,1)模型微分方程为

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

式中: $x^{(1)}$ 为原始灾变数据序列的一次累加生成序列; $u$ 为内生变量,反映环境对系统整体的作用; $a$ 为系统参数,表明系统动态特征。

GM(1,1)模型的时间响应函数为

$$x^{(1)}(t+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{u}{a}\right)e^{(-a \cdot t)} + \frac{u}{a} \quad (2)$$

利用GM(1,1)模型进行灾变预测的主要计算步骤为:

a. 根据灾变阈值与预测因子的原始序列生成灾变集合(系列),并根据灾变集合映射生成灾变时间集合 $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$

b. 对 $\{x^{(0)}(i)/i=1, 2, \dots, n\}$ 原始数列作一次累加生成序列 $\{x^{(1)}(i)/i=1, 2, \dots, n\}$ 其中:

$$x^{(1)}(t) = \sum_{k=1}^t x^{(0)}(k) \quad (3)$$

c. 构造数据矩阵  $B$  和  $Y_n$ :

$$B = \begin{Bmatrix} -\frac{1}{2}[x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)] & \dots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)] & \dots & 1 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$Y_n = \begin{Bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

用最小二乘法求式(1)中的参数向量:

$$\theta = \begin{Bmatrix} a \\ u \end{Bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y_n \quad (6)$$

d. 将式(6)的结果代入式(2)得到预测模型:

$$\hat{x}^{(1)}(n+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{u}{a}\right)e^{(-an)} + \frac{u}{a} \quad (7)$$

e. 进行模型精度检验,模型精度检验常用“后验差检验法”,步骤如下:

①利用式(7)进行灾变系列还原,结果为 $\{\hat{x}^{(0)}(k)/k=2, 3, \dots, n\}$ ,并计算原系列与还原系列残差

$$q^{(0)}(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)$$

②计算原系列的方差和残差系列的方差

$$S_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [x^{(0)}(k) - \bar{x}^{(0)}]^2$$

$$S_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [q^{(0)}(k) - \bar{q}^{(0)}]^2$$

③求后验差比值和小误差概率

$$C = \frac{S_2}{S_1}$$

$$P = P\{|q^{(0)}(k) - \bar{q}^{(0)}| < 0.6745 S_1\}$$

根据  $C$  与  $P$  的值评价模型的等级<sup>[1]</sup>。

## 2 应用实例

深圳市是我国水资源最为紧缺的地区之一,全市多年平均降雨量高达 1 837 mm,但由于区域面积仅有 2 200 km<sup>2</sup>,降雨量空间分布及年内年际分配极不均匀,以及缺少修建大型蓄水工程条件等多种因素影响,因此,实际可利用的当地水资源量十分有限。为了解决水资源对深圳市社会经济发展的制约,深圳市已建成由境内中型水库与东深引水工程和东部引水工程共同组成的供水网络系统<sup>[2,3]</sup>。境外引水的绝大部分通过区域内中型水库转供水厂,所以根据未来的水情合理控制各调蓄水库的蓄水量,对于降低系统供水成本、提高当地水资源的利用率和供水系统的可靠性均具有实际意义。

考虑到深圳市降雨量空间分布的高度不均匀性和降雨量东多西少且不同步的基本特征,自东向西选择清林径水库、铁岗水库、罗田水库为研究对象。选择年降雨量为预测因子。取各水库 75% 保证率相应的年降雨量作为灾变值  $P_{75}$ ,预测 2000 ~ 2010 年之间出现年降雨量小于  $P_{75}$  的相应年份。为供水网络系统的优化调度提供参考。

根据对三库年降雨量系列的频率分析,确定各库的灾变值  $P_{75}$ ,映射得到用于灾变预测的灾变时间(起始年为 1)集合,如表 1。

利用表 1 中的灾变时间集合作一次累加,并用式(4)式(5)构造数据矩阵,代入式(6)计算模型参

数,最后得到三库的灾变预测模型,见表2。

表1 各库的灾变值

水库名称	灾变值/ mm	原始系列	灾变时间集合
清林径水库	1498	1960~1998	{4, 8, 10, 12, 19, 25, 30, 31, 32}
铁岗水库	1395	1965~1998	{3, 7, 13, 20, 24, 26, 27}
罗田水库	1329	1959~1998	{4, 5, 19, 22, 24, 26, 31, 32, 33, 37}

表2 各水库参数

水库名称	参数		预测模型
	$a$	$u$	
清林径水库	-0.1767	9.09	$\hat{x}(t+1) = 55.44e^{0.1767t} - 51.44$
铁岗水库	-0.1879	10.18	$\hat{x}(t+1) = 57.19e^{0.1879t} - 54.19$
罗田水库	-0.1180	14.05	$\hat{x}(t+1) = 123.1e^{0.118t} - 119.10$

利用上述模型做还原计算,计算结果见表3(表中还原结果已做四舍五入处理)。根据还原结果评价模型精度,结果见表4。根据“后验差检验法”模型精度评价标准<sup>[1]</sup>,三个模型的后验差检验均合格,其中罗田与清林径两水库评价等级为好。

表3 还原计算结果

罗田水库			铁岗水库			清林径水库		
实际 序列 (年份)	还原 序列 (年份)	模型 误差 /a	实际 序列 (年份)	还原 序列 (年份)	模型 误差 /a	实际 序列 (年份)	还原 序列 (年份)	模型 误差 /a
			1967		0	1963		
			1971	1976	5	1967	1969	2
1977	1976	-1	1977	1978	1	1969	1971	2
1980	1978	-2	1984	1982	-2	1971	1974	3
1982	1980	-2	1988	1985	-3	1978	1978	0
1984	1983	-1	1990	1989	-1	1984	1981	-3
1989	1986	-3	1991	1994	3	1989	1985	-4
1990	1989	-1	外延	2000*		1990	1990	0
1991	1993	2		2008*		1991	1996	5
1995	1998	3				外延	2003*	
外延	2003*						2011*	
	2008*							

表4 模型精度评价

参数	清林径水库	铁岗水库	罗田水库
$C$	0.3121	0.3868	0.334
$P$	1	1	1
模型等级	好	合格	好

利用表2中的模型作外延预测,得到罗田水库2003年、2008年,铁岗水库2000年、2008年,清林径水库2003年、2011年将出现年降雨量小于 $P_{75}$ 的枯水情形(表3中星号表示)。

### 3 结 语

对于具有境外引水的复杂水资源系统的管理,一方面必须降低联合供水成本,尽可能充分利用当

地水资源,减少境外引水;另一方面必须保障供水系统可靠性。因此必须进行当地水资源与境外引水的联合调度。建立水资源实时预警系统,寻找适当方法对当地水资源作中长期定性预测,有重要意义。

为了得到枯水年发生时间,科学安排境外引水与境内水库运用计划,本文利用GM(1,1)模型探讨了深圳市枯水年预测问题。GM(1,1)模型具有方法简单、操作方便等特点,但预测的精度与水文灾变事件发生规律、灾变阈值的选择等有直接关系。从表3的结果看,尽管模型精度评价较好,但还原计算的结果并不理想,除清林径水库有两年符合外,其他均有一定的错位,可见利用灰色系统进行实时预警具有局限性。尽管如此,灰色系统作为一种选择性预测方法,仍有一定的价值。

### 参考文献:

- [1] 邓聚龙. 灰色预测与决策[M]. 武汉:华中工学院出版社, 1988:97-190.
  - [2] 钟平安,刘静楠,陈凯,等. 水库资料在深圳市水资源评价中的应用研究[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22(5):24-27.
  - [3] 钟平安,王会容,刘静楠,等. 深圳市水资源系统优化调度模型研究[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2003, 31(6):616-620.
- (收稿日期 2005-09-16 编辑 徐 娟)
- +++++
- (上接第38页)
- [3] 程南宁,朱伟,张俊. 重污染水体中沉水植物的繁殖及移栽技术探讨[J]. 水资源保护, 2004, 20(6):8-11.
  - [4] 戴全裕,蔡述伟,张秀英,等. 水芹菜对黄金废水的净化与富集作用的研究[J]. 应用生态学报, 1998, 9(1):107-109.
  - [5] 司友斌,包军杰,曹德菊,等. 香根草对富营养化水体净化效果研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(2):277-279.
  - [6] 成水平. 人工湿地废水处理系统的生物学研究进展[J]. 湖泊科学, 1996, 8(3):268-271.
  - [7] 李芳柏,吴启堂. 无土栽培美人蕉等植物处理生活污水的研究[J]. 应用生态学报, 1997, 8(1):88-92.
  - [8] 戴全裕,蒋兴昌,张珩,等. 水蕹菜对啤酒及饮食废水净化与资源化研究[J]. 环境科学学报, 1996, 16(2):334-337.
  - [9] 程树培,丁树荣,胡志明. 利用人工基质无土栽培水蕹菜净化螺丝废水的研究[J]. 环境科学, 1991, 12(4):47-51.
  - [10] GB3838—2002 地表水环境质量标准[S].
  - [11] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京:中国环境科学出版社, 2002:223-279.

(收稿日期 2005-01-19 编辑 高渭文)