

文章编号:1001-5485(2009)02-0023-04

# 灰关联分析方法在 NAM 模型参数敏感性分析中的应用

王振亚<sup>1</sup>, 吴德波<sup>2</sup>, 朱余生<sup>3</sup>, 王择明<sup>4</sup>, 郭西军<sup>5</sup>

(1. 河南省气象台, 郑州 450003; 2. 黄河水利委员会 水文局, 郑州 450003; 3. 机械工业第六设计研究院第五工程所, 郑州 450003; 4 河南省水文局, 郑州 450003; 5. 黄河水利委员会 上游水文水资源局, 兰州 730030)

**摘要:**应用 NAM 模型对资水水系夫夷水流域新宁水文站的洪水过程进行模拟。利用灰色系统关联分析方法来研究 NAM 模型参数对模型模拟径流深、洪峰流量和峰现时间的影响。计算实例表明:浅层蓄水容量对 NAM 模型模拟径流深的影响较大,地表径流和壤中流汇流时间常数对 NAM 模型模拟径流深的影响较小;地表径流系数、地表径流和壤中流汇流时间常数对 NAM 模型模拟洪峰流量的影响较大,壤中流出流时间对 NAM 模型模拟洪峰流量的影响较小;地表径流和壤中流汇流时间常数对 NAM 模型模拟峰现时间的影响较大。

**关键词:**NAM 模型;洪水模拟;灰色系统关联分析;敏感性分析

**中图分类号:**TV12 **文献标识码:**A

敏感性分析可以用来研究输入资料和参数变化对定量模型行为和输出结果的影响<sup>[1]</sup>。目前常用的分析方法有系统分析法、蒙特卡洛方法、GLUE 方法<sup>[2]</sup>。灰系统关联分析是系统因素作用与关联程度的序化、量化分析,在医学<sup>[3]</sup>、经济等行业得到了应用。夏军<sup>[4]</sup>将之应用到水文特征值分析上,取得了较好的效果。

## 1 流域概况

选取资水水系夫夷水流域新宁水文站以上控制面积作为研究对象,该研究流域集水面积为 2 456 km<sup>2</sup>,所属的资水流域属于中亚热季风湿润气候,多年平均降水量为 1 462 mm。该区域内设 1 个水文站、9 个雨量站和 1 个蒸发站。

## 2 NAM 降雨径流模型简介

NAM 模型是 1973 年丹麦理工大学动力工程学院的 Nielsen 和 Hansen 提出的集总参数的概念性降雨径流模型。由 DHI 开发的 Mike 系列软件较成熟,在我国的流域机构中应用较广泛。

NAM 模型分 4 层蓄水体进行流域产汇流模拟计算。NAM 模型采用 2 层蒸发模型进行蒸散发计算,基于蓄满产流机制进行产流计算,汇流计算采用线性水库模拟,融雪径流模型作为一个独立、可选的

模块嵌在 NAM 模型中<sup>[5]</sup>。

## 3 NAM 模型应用

本研究采用 NAM 模型对资水流域新宁站集水面积(1980-1985 年共 18 场洪水)进行模拟。12 场洪水作为率定洪水场次,6 场洪水作为验证洪水场次。表 1 为 NAM 模型次洪模拟参数表。次洪模拟结果表格省略。

表 1 NAM 模型次洪模拟参数表

Table 1 Parameters of the NAM model

|     |           |           |      |      |       |
|-----|-----------|-----------|------|------|-------|
| 参数  | $U_{max}$ | $L_{max}$ | CQOF | CKIF | CK1,2 |
| 参数值 | 18        | 200       | 0.8  | 500  | 15    |
| 参数  | TOF       | TIF       | TG   | CKBF |       |
| 参数值 | 0.5       | 0.5       | 0.6  | 2500 |       |

注: $U_{max}$ 为地表蓄水体蓄水容量; $L_{max}$ 为浅层蓄水体土壤蓄水容量;CQOF 为地表径流系数;CKIF 为壤中流出流时间;CK1,2 为地表径流和壤中流汇流时间常数;TOF, TIF, TG 为地表径流、壤中流、地下径流计算。

在 12 场率定洪水中,确定性系数大于 0.9,等级属于甲等的有 6 场;确定性系数大于 0.7 小于 0.9,属于乙等的有 6 场;径流深相对误差全部合格,合格率为 100%;洪峰流量相对误差有 3 场不合格,合格率为 75%;峰现时差有 6 场合格,合格率仅为 50%。在 6 场验证洪水中,确定性系数大于 0.9,等级属于甲等的有 3 场,确定性系数大于 0.7 小于 0.9,属于乙等的有 3 场;径流深相对误差全部合格,合格率为 100%;洪峰流量相对误差有 1 场不合格,合格率为 83.3%;峰现时差有 4 场合格,合格率仅为 66.7%。

收稿日期:2008-01-16; 修回日期:2008-09-10

作者简介:王振亚(1981-),男,河南正阳县人,助理工程师,硕士研究生,主要从事水灾害形成机理方面的研究。(电话)13676976601(电子邮箱)hhuwzy1981@163.com。

## 4 灰色系统关联分析方法

### 4.1 概述

灰色系统关联分析就是系统因素作用与关联程度的序化、量化分析。它反映了离散数列空间的收敛性和接近度。它具有以下特点:①可进行本征性灰色系统影响因子间的序化分析;②样本容量要求不高,小样本也可用;离散数列可以是时间序列,也可以是非时间序列;③可进行多因素间相对不同参考点的关联分析,与回归相关分析比较,具有整体性。

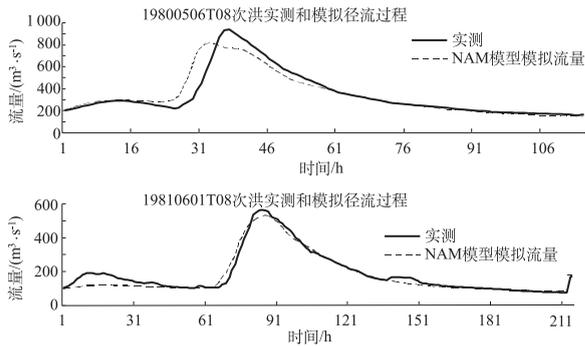


图1 NAM模型次洪模拟流量和实测流量过程线比较

Fig. 1 Comparison between the process curves of simulated and measured discharge in NAM Model

### 4.2 计算步骤

设灰色系统有  $n$  个灰因子数列,它们的长度为  $m$ ,即

$$\begin{aligned} X_1 &= \{X_1(1), X_1(2), \dots, X_1(m)\}, \\ X_2 &= \{X_2(1), X_2(2), \dots, X_2(m)\}, \\ &\vdots \\ X_n &= \{X_n(1), X_n(2), \dots, X_n(m)\}. \end{aligned}$$

若要以  $X_j$  为母序列(参考序列)分别计算序列  $X_i, i \neq j$ , 相对于  $X_j$  之间的关联度、关联序和关联矩阵,计算步骤如下:

(1) 进行数据预处理(可公度化或无因次化)。为了使数列间具有可比性,需要对数据进行无因次化处理。本文无因次化处理采用初值化变换。

$$X_i^{(1)}(k) = \frac{X_i^{(0)}(k)}{X_i^{(0)}(1)}, \quad (1)$$

数据预处理的结果常排为矩阵形式:

$$\mathbf{X}^{(1)} = \begin{bmatrix} X_{11}^{(1)} & X_{12}^{(1)} & \cdots & X_{1m}^{(1)} \\ X_{21}^{(1)} & X_{22}^{(1)} & \cdots & X_{2m}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{n1}^{(1)} & X_{n2}^{(1)} & \cdots & X_{nm}^{(1)} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

(2) 以  $X_i^{(1)}(k)$  为母线,求对应时刻与各数列的差值  $\Delta_{ij}(k)$ 。

$$\begin{aligned} \Delta_{ij}(k) &= X_{ik}^{(1)} - X_{jk}^{(1)}, \\ k &= 1, 2, \dots, n, j \neq i. \end{aligned} \quad (3)$$

(3) 找出  $|\Delta_{ij}(k)|$  的最小值  $\Delta_{\min}$  与最大值  $\Delta_{\max}$ 。

(4) 求  $X_i$  对各数列每个时刻的关联系数  $\epsilon_{ij}(k)$ 。

$$\epsilon_{ij}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \eta \Delta_{\max}}{\Delta_{ij}(k) + \eta \Delta_{\max}}. \quad (4)$$

(5) 计算各数列对  $X_i$  的关联度。取等权的形式,有

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m \epsilon_{ij}(k)}{m}, j = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

(6) 排出关联序。

(7) 依次改变母序列,按上述步骤计算,求出所有两两数列的关联度,得关联矩阵  $\mathbf{R}$ ,

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

### 4.3 计算实例

本文主要研究 NAM 模型参数的变化对次洪模拟序列的影响。本文考虑的 NAM 模型的参数有 5 个:地表蓄水层蓄水量  $U_{\max}$ 、浅层蓄水容量  $L_{\max}$ 、地表径流系数  $CQOF$ 、壤中流出流时间  $CKIF$ 、地表径流和壤中流汇流时间常数  $CK1, 2$ 。次洪模拟结果用 3 个指标来概化:模拟的径流深、模拟的洪峰流量和模拟的峰现时间。峰现时间是指以次洪开始时刻为零点,洪峰出现的时刻。

本文共选取 11 组参数(见表 2)分别对 10 场洪水进行模拟,采用灰关联方法分别分析参数的变化对 10 场洪水模拟结果的影响,通过关联序找出主要影响因子或者非主要影响因子。11 组参数中,第 1 组参数是通过洪水模拟进行参数分析得来的,分别将 5 个参数中的 1 个参数增加或减少 10%,其余 4 个参数保持不变,从而得到另外 10 组参数。采用初值化变换,  $\eta$  取 0.25。在灰关联分析过程中,8 个灰因子数列分别是地表蓄水层蓄水量  $U_{\max}$ 、浅层蓄水容量  $L_{\max}$ 、地表径流系数  $CQOF$ 、壤中流出流时间  $CKIF$ 、地表径流和壤中流汇流时间常数  $CK1, 2$ 、径流深、洪峰流量和峰现时间,先分析每场洪水 5 个参数与 3 个指标的关联度,再综合 10 场洪水的关联度,从而分析出哪个

因子对哪个指标影响最大和最小。

表 2 11 组参数表

Table 2 11 Groups of parameters

| 参数     | $U_{\max}$ | $L_{\max}$ | CQOF | CKIF | CK1,2 |
|--------|------------|------------|------|------|-------|
| 第 1 组  | 18         | 200        | 0.8  | 500  | 15    |
| 第 2 组  | 19.8       | 200        | 0.8  | 500  | 15    |
| 第 3 组  | 16.2       | 200        | 0.8  | 500  | 15    |
| 第 4 组  | 18         | 220        | 0.8  | 500  | 15    |
| 第 5 组  | 18         | 180        | 0.8  | 500  | 15    |
| 第 6 组  | 18         | 200        | 0.88 | 500  | 15    |
| 第 7 组  | 18         | 200        | 0.72 | 500  | 15    |
| 第 8 组  | 18         | 200        | 0.8  | 550  | 15    |
| 第 9 组  | 18         | 200        | 0.8  | 450  | 15    |
| 第 10 组 | 18         | 200        | 0.8  | 500  | 16.5  |
| 第 11 组 | 18         | 200        | 0.8  | 500  | 13.5  |

将 5 个参数与模拟径流深的关联度从大到小进行排序(见表 3)。浅层蓄水容量  $L_{\max}$  与模拟径流深的关联度在 19800506T08, 19810523T08 次洪水中排在第 2 位, 在 19800612T08 次洪水中排在第 3 位, 在 19840722T08, 19850428T08 次洪水中排在第 4(5)位, 在其它 5 场洪水中排在第 1 位; 地表径流和壤中流汇流时间常数  $CK1,2$  与模拟径流深的关联度在 19800506T08, 19810622T08, 19830503T08 次洪水中排在第 3 位, 在 19810523T08 次洪水中排在第 4 位, 在其它 6 场洪水中排在第 5 位; 其余的 3 个参数排序比较混乱。

表 3 10 场洪水中 5 个参数与模拟径流深的关联度

Table 3 Relational grade of five parameters and simulated depths of runoff volume in ten-time floods

| 洪号          | $U_{\max}$ | $L_{\max}$ | CQOF  | CKIF  | CK1,2 |
|-------------|------------|------------|-------|-------|-------|
| 19800506T08 | 0.681      | 0.690      | 0.732 | 0.678 | 0.681 |
| 19800612T08 | 0.684      | 0.651      | 0.675 | 0.642 | 0.640 |
| 19810523T08 | 0.644      | 0.676      | 0.680 | 0.654 | 0.646 |
| 19810622T08 | 0.631      | 0.685      | 0.636 | 0.631 | 0.635 |
| 19820910T08 | 0.595      | 0.693      | 0.613 | 0.613 | 0.583 |
| 19830503T08 | 0.627      | 0.673      | 0.612 | 0.600 | 0.620 |
| 19830909T08 | 0.588      | 0.683      | 0.593 | 0.602 | 0.556 |
| 19840722T08 | 0.681      | 0.543      | 0.574 | 0.590 | 0.543 |
| 19850428T08 | 0.691      | 0.643      | 0.714 | 0.696 | 0.643 |
| 19850523T08 | 0.653      | 0.680      | 0.644 | 0.659 | 0.640 |

将 5 个参数与模拟洪峰流量的关联度从大到小进行排序(见表 4)。地表径流和壤中流汇流时间常数  $CK1,2$  与模拟径洪峰流量的关联度在 19800506T08, 19810523T08, 19830503T08, 19850523T08 次洪水中排在第 2 位, 在 19840722T08 次洪水中排在第 3 位, 在其它 5 场洪水中排在第 1 位; 地表径流系数与模拟径洪峰流量的关联度在 19800506T08, 19810523T08, 19830503T08, 19850523T08 次洪水中排在第 1 位, 在 19820910T08 次洪水中排在第 3 位, 在其它 5 场洪水中排在第 2 位; 壤中流出流时间  $CKIF$  与模拟径洪峰流量的关联

度在 19800506T08, 19820910T08, 19830909T08, 19850523T08 次洪水中排在第 4 位, 其它 6 场洪水中排在第 5 位。

表 4 10 场洪水中 5 个参数与模拟洪峰流量的关联度

Table 4 Relational grade of five parameters and simulated flood peak discharges in ten-time floods

| 洪号          | $U_{\max}$ | $L_{\max}$ | CQOF  | CKIF  | CK1,2 |
|-------------|------------|------------|-------|-------|-------|
| 19800506T08 | 0.541      | 0.563      | 0.737 | 0.542 | 0.707 |
| 19800612T08 | 0.560      | 0.493      | 0.583 | 0.457 | 0.648 |
| 19810523T08 | 0.652      | 0.670      | 0.794 | 0.650 | 0.764 |
| 19810622T08 | 0.574      | 0.580      | 0.643 | 0.540 | 0.720 |
| 19820910T08 | 0.488      | 0.618      | 0.533 | 0.494 | 0.627 |
| 19830503T08 | 0.485      | 0.529      | 0.657 | 0.452 | 0.642 |
| 19830909T08 | 0.457      | 0.585      | 0.643 | 0.460 | 0.658 |
| 19840722T08 | 0.638      | 0.480      | 0.604 | 0.441 | 0.580 |
| 19850428T08 | 0.558      | 0.558      | 0.710 | 0.545 | 0.719 |
| 19850523T08 | 0.515      | 0.557      | 0.706 | 0.516 | 0.688 |

将 5 个参数与模拟峰现时间的关联度从大到小进行排序(见表 5)。地表径流和壤中流汇流时间常数  $CK1,2$  与模拟峰现时间的关联度在 19810622T08 次洪水中排在第 3 位, 在 19830503T08, 19850523T08 次洪水中排在第 2 位, 在其它 7 场洪水中排在第 1 位。

表 5 10 场洪水中 5 个参数与模拟峰现时间的关联度

Table 5 Relational grade of five parameters and simulated flood peak appearance time in ten-time floods

| 洪号          | $U_{\max}$ | $L_{\max}$ | CQOF  | CKIF  | CK1,2 |
|-------------|------------|------------|-------|-------|-------|
| 19800506T08 | 0.754      | 0.754      | 0.754 | 0.754 | 0.855 |
| 19800612T08 | 0.734      | 0.734      | 0.734 | 0.734 | 0.855 |
| 19810523T08 | 0.792      | 0.792      | 0.792 | 0.792 | 0.856 |
| 19810622T08 | 0.750      | 0.780      | 0.789 | 0.732 | 0.750 |
| 19820910T08 | 0.756      | 0.756      | 0.785 | 0.756 | 0.828 |
| 19830503T08 | 0.708      | 0.708      | 0.721 | 0.721 | 0.708 |
| 19830909T08 | 0.711      | 0.711      | 0.756 | 0.711 | 0.848 |
| 19840722T08 | 0.788      | 0.766      | 0.766 | 0.766 | 0.831 |
| 19850428T08 | 0.794      | 0.794      | 0.794 | 0.794 | 0.856 |
| 19850523T08 | 0.804      | 0.804      | 0.832 | 0.804 | 0.831 |

## 5 结 论

应用 NAM 模型对资水水系夫夷水流域新宁水文站的 18 场洪水过程进行模拟。模拟的洪水过程确定性系数较大, 径流深相对误差全部符合《水文情报预报规范》<sup>[6]</sup>, 洪峰流量模拟效果较好, 峰现时差模拟效果较差。

浅层蓄水容量与模拟径流深的关联度在大部分场次洪水中较大, 地表径流和壤中流汇流时间常数与模拟径流深的关联度在大部分场次洪水中较小, 则浅层蓄水容量对 NAM 模型模拟径流深的影响较大, 地表径流和壤中流汇流时间常数的影响较小; 地表径流系数、地表径流和壤中流汇流时间常数与模

拟洪峰流量的关联度在大部分场次洪水中较大,壤中流出流时间与模拟洪峰流量的关联度在大部分场次洪水中较小,则地表径流系数、地表径流和壤中流汇流时间常数对 NAM 模型模拟洪峰流量的影响较大,壤中流出流时间影响较小;地表径流和壤中流汇流时间常数与模拟峰现时间的在大部分场次洪水中较大,则地表径流和壤中流汇流时间常数对 NAM 模型模拟峰现时间的影响较大。

**参考文献:**

[1] HOWES S, ANDERSON M G. Computer Simulation in

Geomorphology [J]. Modeling Geomorphological Systems, John Wiley and Sons Ltd. 1988, 320:421-440.  
 [2] 李 胜, 梁忠民. GLUE 方法分析新安江模型参数不确定性的应用研究[J]. 东北水利水电, 2006, 24(2): 31-33, 47.  
 [3] 谭学瑞, 邓聚龙. 灰关联分析——医学多因素分析新法[J]. 数理医药学杂志, 1996, 9(1):14-16.  
 [4] 夏 军. 灰色系统水文学—理论、方法及应用[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 2000.  
 [5] 长江水利委员会水文局二队. NAM 模型及其应用[J]. 水文, 1999, (增刊):66-71.  
 [6] SL250—2000, 水文情报预报规范[S].

(编辑:刘运飞)

## Application of Grey Relation Analysis Method in Sensitivity of Parameters of NAM Hydrological Model

WANG Zhen-ya<sup>1</sup>, WU De-bo<sup>2</sup>, ZHU Yu-sheng<sup>3</sup>, WANG Ze-ming<sup>4</sup>, GUO Xi-jun<sup>5</sup>

(1. Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003, China;

2. Hydrological Bureau, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China;

3. No. 6 Institute of Project Planning & Research of Machinery Industry, Zhengzhou 450003, China;

4. Hydrological Bureau in Henan Province, Zhengzhou 450003, China;

5. Upper Bureau of YRCC, Lanzhou 730030, China)

**Abstract:** The NAM hydrological model was used to simulate the flood processes at the Xinning Hydrological Station, Zishui River. The results show that the NAM model could obtain higher accuracy. The effect of the parameters of the NAM hydrological model on the depth of runoff volume, flood peak discharge and flood peak appearance time was researched by GRA(grey relation analysis). The result obtained from an illustration indicates as follows: The influence of a shallow storage capacity on the simulated runoff depth by NAM model is greater, and that of the influx time constant for surface runoff and flow in soil on simulated runoff depth by NAM Model less. The effect of surface runoff coefficient and the influx time constant for surface runoff and flow in soil on simulated peak flood discharge by NAM model is larger, and that of the outflow time on simulated peak flow minor. The impact of the influx time constant for surface runoff and flow in soil on simulated peak appearance time is greater.

**Key words:** NAM hydrological model; flood simulation; GRA; sensibility analysis

## 热烈祝贺《水利水电工程学报》创刊 30 周年

《水利水电工程学报》系国家水利部主管,南京水利科学研究院主办的学术性科技期刊,国内外公开发行人。主要报道水利水电、水运、海洋工程和土木建筑等工程的规划,可行性研究,设计,科研,施工,监理以及管理工作中的新理论,新技术,新方法和新材料等。该刊为全国中文核心期刊和中国科技核心期刊,已被国内外多家检索机构和数据库收录,如美国《剑桥科学文摘(自然科学)》(CSA(Natural Science))等,深受水利水电、水运交通及海洋工程领域广大科技人员和院校师生的欢迎。

《水利水电工程学报》创刊于 1979 年,值此创刊 30 周年之际,衷心祝贺贵刊越办越好!

《长江科学院院报》编辑部恭贺

2009 年 1 月 15 日