

暴雨洪水流域系统随机模拟*

(研究之二)

邓育仁 丁晶 杨荣富

(成都科技大学)

提 要 暴雨洪水流域系统的输入,本文首次成功地引用具有明显优点的正则展开模型随机模拟暴雨过程;流域系统的输送,采用了简便可行的产、汇流模型;各子模型及系统输出的洪水过程检验表明,流域系统随机模拟的效果是令人满意的。

关键词 正则展开模型 流域系统随机模拟 产、汇流模型 年暴雨过程 年洪水过程

一、引 言

暴雨洪水流域系统的随机模拟,是中小流域,特别是短缺洪水资料或受人类活动显著影响流域,洪水随机模拟的主要方法。

暴雨洪水流域系统,通常是指以暴雨随机模型模拟(生成)的暴雨过程为系统的输入,经过系统的输送(加工)——产汇流模型的演算,系统的输出,即为随机模拟的洪水过程。该系统所涉及的产汇流计算,在水文学中已有不少产汇流模型,在此主要是如何合理地运用于系统的随机模拟。暴雨随机模型的建立及应用是系统分析的关键环节,也是系统分析中不够成熟和较困难的课题。

国内外应用较多的暴雨随机模型有自回归类模型及暴雨特征概化和组合模型等^[1-3]正则展开模型曾尝试用于径流随机模拟,但在暴雨模拟中还未见到这方面的应用研究。本文将具有明显优点的正则展开模型引入暴雨的随机模拟中,并考虑暴雨过程的偏态特性,模型参数估计主要采用新方法——概率权重矩法。

本研究表明,正则展开模型适用于暴雨过程的随机模拟,整个流域系统的随机模拟效果也是令人满意的。本文是文献[5]研究的继续,故编为研究之二。

二、流域系统随机模拟原理与方法

(一)流域系统输入模型——年暴雨随机模型

年最大一次暴雨过程(即年最大一次洪水对应的暴雨过程,简称年暴雨过程或年暴雨)是年暴雨序列总体的一个实现(样本函数)。实测的 n 年年暴雨过程(一个实现组),即可估计年暴雨序列总体的统计特征。由于年暴雨过程在年内发生的时间多变,实际中需要对实现组进行移位分析^[6],使序列各截口的暴雨变化特征表现出较明显的统计规律。

* 王成明参加了分析计算。本文研究得到水电科学基金的资助。

年暴雨序列往往是一个非平稳的相依随机序列。本文试用正则展开模型描述这个序列。该模型是利用独立随机变量的线性组合形式来表征相依随机序列。这有利于研究相依随机序列的统计特性和便于统计上的处理。

设 $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_p$ 是年暴雨序列, 其中心化序列为 $Y_1, Y_2, \dots, Y_i, \dots, Y_p$ ($Y_i = X_i - \bar{X}_i$, X_i, Y_i 均是随机变量, \bar{X}_i 是 X_i 的均值)。按正则展开的定义, 可将 Y_i 表示⁽⁴⁾:

$$Y_i = \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} \epsilon_j + \epsilon_i \quad i=1, 2, \dots, p \quad (1)$$

式中 ϵ_i 是均值为零的独立随机变量; b_{ij} 为参数; P 为年暴雨序列的最长时段个数。将(1)式写成矩阵:

$$[Y] = [B] [\epsilon] \quad (2)$$

式中 $[Y]$ 为 $p \times 1$ 的中心化时段暴雨量矩阵; $[B]$ 为 $p \times p$ 对角元素为 1 的下三角参数矩阵; $[\epsilon]$ 为 $p \times 1$ 零均值独立随机变量矩阵。

(1)、(2)式为正则展开模型的基本形式。在考虑年暴雨序列具有偏态统计性质时, 需要估计以下参数⁽⁶⁾:

(1) 矩阵 $[B]$ 的元素 (b_{ij}):

$$b_{ij} = S_{ij} / S_{\epsilon_j}, \quad j=1 \quad (3)$$

$$b_{ij} = (S_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} b_{ik} b_{jk} S_{\epsilon_k}) / S_{\epsilon_j}, \quad j=2, 3, \dots, i-1 \quad (4)$$

(2) 矩阵 $[\epsilon]$ 元素 ϵ_i 的方差 (S_{ϵ_i}):

$$S_{\epsilon_i} = S_i - \sum_{k=1}^{i-1} b_{ik}^2 S_{\epsilon_k} \quad (5)$$

(3) ϵ_i 的偏态系数 (C_{ϵ_i}):

$$C_{\epsilon_i} = E(\epsilon_i^3) / (S_{\epsilon_i})^{3/2} \quad (6)$$

其中

$$E(\epsilon_i^3) = E(Y_i^3), \quad i=1$$

$$E(\epsilon_i^3) = E(Y_i^3) - \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij}^3 E(\epsilon_j^3), \quad i \geq 2 \quad (7)$$

(3)~(7)式中, S_{ij} 为 Y_i 与 Y_j 的协方差; S_{ϵ_j} 为 ϵ_j 的均方差; S_i 为 Y_i 的均方差。

从(3)~(7)式看出: 在已知年暴雨序列 Y_i 的协方差 S_{ij} 和方差 S_i 后, 即可由(3)~(5)式依次解出 b_{ij} 和 S_{ϵ_i} ; 在已知 $E(Y_i^3)$ 时, 由(6)、(7)式求得 C_{ϵ_i} 。

以上各式中, 除 S_{ij} 外, 其余参数 S_i 和 $E(Y_i^3)$ 等均用概率权重矩法估计。即由此法先估计年暴雨序列 X_i 的 \bar{X}_i (均值)、 C_{ϵ_i} (变差系数)、 C_{ϵ_i} (偏态系数)后, 求出:

$$S_i^2 = (\bar{X}_i \cdot C_{\epsilon_i})^2 \quad (8)$$

$$E(Y_i^3) = S_i^{3/2} \cdot C_{\epsilon_i} \quad (9)$$

为克服模拟的年暴雨序列随机扣损的困难, 还可采用净雨过程资料建立年净雨随机模型, 作为系统的输入。其建模原理和方法与年暴雨随机模型相同。

(二) 流域系统输送模型——产汇流模型

对蓄满产流为主地区, 可采用水文学方法分析年暴雨洪水过程的损失量 I 和稳渗率 f_c 。对年暴雨, 各年的 I 随机性很大, 可假定各年损失量序列为独立随机序列, 用概率模型描述, 由此随机模拟 I 。并假定年暴雨量(年暴雨过程总量)与年损失量之间相互独立, 因此, 可由随机

模拟的 I 扣除模拟的年暴雨过程的损失量。 f_c 较稳定,通常处理为常数。

汇流模型常用瞬时单位线,必要时可考虑对单位线进行非线性校正。

(三)流域系统输出

通过年暴雨随机模型模拟出大量年暴雨过程作为系统的输入,经过系统输送(加工)——产流计算,再扣除稳渗率便获得模拟的年净雨过程(或由年净雨随机模型直接模拟年净雨过程作为系统的输入),又经过汇流演算,模拟出地表径流过程,加上浅层和深层地下径流过程,即为流域系统的输出——随机模拟的年洪水过程。

(四)流域系统模型的检验

本文从模型实用角度出发,着重对系统输入——年暴雨(净雨)模型及整个系统模型(通过系统最后输出——年洪水过程加以反映)进行实用性检验,其方法有置信区间法和长序列法等。具体方法见实例。

三、实 例

本文以嘉陵江流域某站为计算实例。该站控制集水面积 519km^2 。选用 1963~1985 年 23 次年暴雨洪水资料分析计算。流域系统随机模拟方法步骤如下:

(一)流域系统输入模型

对选取的 23 次年暴雨(面暴雨)过程,采用试错移位法进行移位分析,最后截取最长公共历时为 36h,以 3h 为计算时段,共计 12 个时段。表 1 列出估计的各截口参数。

由各截口参数,按正则展开模型(1)~(9)式,估计模型参数: b_{ij} 、 S_{ij} 、 C_{i0} 、 \bar{X}_i 等。

根据初步建立的年暴雨随机模型,模拟出容量为 23(与实测样本长度相等)的 200 个样本,即 200×23 次年暴雨过程,采用置信区间法进行模型实用性检验。从表 1 看出,在显著水平

表 1 模拟与实测年暴雨序列统计参数比较表

时段	均值(mm)			C_0			C_1			r_1		
	实 测	模 拟	均方差	实 测	模 拟	均方差	实 测	模 拟	均方差	实 测	模 拟	均方差
1	1.16	1.13	0.44	2.00	2.08	0.52	3.76	4.11	1.10	0.53	0.46	0.24
2	1.89	1.93	0.54	1.45	1.51	0.32	2.64	2.86	0.84	0.37	0.36	0.19
3	2.65	2.66	0.56	1.03	1.02	0.20	1.34	1.62	0.66	0.19	0.19	0.22
4	7.74	7.87	1.71	1.20	1.18	0.23	1.81	2.09	0.70	0.73	0.62	0.15
5	10.9	11.1	1.61	0.82	0.78	0.13	0.82	0.97	0.59	0.59	0.53	0.15
6	16.6	16.5	2.09	0.61	0.61	0.10	0.44	0.59	0.40	0.32	0.28	0.20
7	31.8	31.6	3.00	0.43	0.43	0.08	0.55	0.63	0.43	0.25	0.24	0.20
8	16.3	16.5	1.86	0.57	0.56	0.10	0.83	0.49	0.33	0.41	0.43	0.19
9	7.05	7.34	1.34	0.95	0.89	0.18	1.35	1.34	0.65	0.68	0.67	0.18
10	3.58	4.03	1.06	1.31	1.20	0.24	2.07	2.05	0.74	0.84	0.75	0.21
11	1.81	2.30	0.85	1.71	1.72	0.47	3.06	3.28	1.10	0.63	0.49	0.27
12	0.65	1.18	0.67	2.56	2.41	0.92	4.97	4.64	1.78			
最大 3h	32.1	32.9	2.60	0.40	0.34	0.07	0.96	0.92	0.53			
最大 6h	53.6	53.5	3.69	0.34	0.33	0.06	0.44	0.42	0.44			
最大 12h	82.1	82.2	5.22	0.31	0.32	0.06	0.44	0.42	0.45			
最大 24h	100.5	100.5	3.42	0.33	0.33	0.05	0.49	0.41	0.45			
总 量	100.8	104.1	6.56	0.33	0.33	0.05	0.58	0.61	0.45			

注: r_1 为相邻截口相关函数,即序列的一阶自相关函数。

$\alpha=0.317$ (即一倍均方差)时,除个别截口的 C_t 外,实测年暴雨过程各接口和各种历时最大暴雨量统计参数,都落在各自的置信区间内,即所建模型通过了实用性检验,可用于年暴雨过程的随机模拟。

对 23 次相应的年净雨过程,采用与年暴雨过程相同方法建立了年净雨过程正则展开模型,而且通过了实用性检验。限于篇幅,这部分成果未列出,仅在表 2 中列出洪水模拟结果。

(二)流域系统输送模型

为便于随机扣损,采用损失量参数 $\eta(=I/h, h$ 为年暴雨过程总量)扣除损失量^[2]。在 $\alpha=0.05$ 时,假设检验表明, η 序列为独立随机序列,且近似服从正态分布。刻划 η 序列的概率模型为:

$$\eta_t = \bar{\eta} + \sigma \xi_t = 0.196 + 0.158 \xi_t \quad t=1, 2, \dots \quad (10)$$

式中 $\bar{\eta}$ 及 σ 分别为 η 序列均值和均方差, ξ_t 为标准正态随机变量。当模拟中 η_t 出现负值时,可以舍去不用。稳渗率 f_c 经资料分析可取常数 1.0mm/h 。

选用瞬时单位线模型,考虑非线性影响所建立的汇流参数 $m_1(=nK)$ 与净雨强度 R 的经验关系如下:

$$m_1 = 10.5R^{-0.544} \quad (11)$$

参数 n 取常数 2.8, $K = m_1/n$ 。用辛普生数值积分法先求出 $S(t)$ 曲线,再转换为 $\Delta t = 3\text{h}$ 的单位线。

(三)流域系统输出

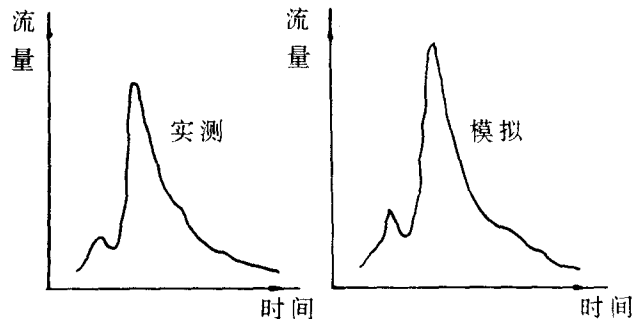
利用年暴雨随机模型模拟(生成)年暴雨过程,并求出年暴雨量 h ;由产流模型(10)式,随机模拟(生成) η ,求出损失量 $I(=h \cdot \eta)(0 \leq I \leq I_m)$,最大损失量 $I_m = 100\text{mm}$;扣除 I 及 f_c ,为模拟(生成)的年地表净雨过程;由净雨强度 R ,通过(11)式得 m_1 ,按 n, K 确定的单位线推求地表径流过程;浅层地下径流过程假定为三角形出流过程,其总量等于稳渗总量,峰值出现在地表径流终止点,过程底长为地表径流过程两倍;深层地下径流为常数,流量为 $2\text{m}^3/\text{s}$ 。这三部份过程叠加,即为流域系统的输出——随机模拟(生成)的年洪水过程。

(四)流域系统模型实用性检验

在此采用长序列法进行实用性检验^[6]。按流域系统模型模拟(生成)容量为 4600 条年洪水过程,由此估计的各种统计参数与实测年洪水过程的相同参数进行比较。从表 2 看出,流域系统输入模型,不管是年暴雨随机模型,还是年净雨随机模型,流域系统输出的年洪水过程统计特征与实测年洪水过程的相同特征比较接近,其相对误差未超过 10%。

表 2 模拟与实测洪水峰,量统计参数比较表

项 目	实 测	流 域 系 统 随 机 模 拟				说 明	
		年暴雨模 型输入	e(%)	年净雨模 型输入	e(%)		
洪峰 24h 洪量	均值(m^3/s)	1370	1310	4.4	1320	3.6	e 为实测 与模拟 统计参数 绝对误差 的绝对 值。
	C_v	0.39	0.40	2.6	0.42	7.7	
	C_s	0.73	0.71	2.7	0.78	6.8	
	均值($\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{d}$)	491	488	0.6	504	2.6	
	C_v	0.39	0.40	2.6	0.37	5.1	
	C_s	0.71	0.69	2.8	0.75	5.6	



附图 实测与模拟洪水过程线比较图

说明流域系统模型“保持”了实测年洪水过程的主要统计特性。

此外,模拟(生成)的洪水过程形状(附图)峰现时间、洪水历时等都与实测洪水过程相近。

以上分析计算及检验表明,该站建立的流域系统随机模型是成功的,用于洪水过程的随机模拟(生成)是可行的。

四、结 语

暴雨洪水流域系统随机模拟,暴雨随机模型的正确建立是系统输入的关键;产、汇流模型的合理应用是系统输送的重要环节;各种子模型及流域系统模型的实用性检验是系统输出成果可靠性的保证。

2. 正则展开模型的显著优点是,建模时无需作模型识别,因此简化了建模程序,且在径流随机模拟中有较好效果。本文用于描述非平稳暴雨(净雨)过程也获得成功,说明该模型适用性强,值得推广应用。

为避免产流计算时前期流域干湿状况的随机模拟,可以直接建立净雨随机模型作为系统输入,实践表明是可行的。

3. 流域系统的输送,宜采用简便可行的产、汇流模型。产流计算时,流域前期干湿状况多考虑为随机的,用概率模型或其他模型表征。至于采用何种模型,本文根据实测资料分析推荐暂用正态模型,显然具有很大的经验性。而稳定入渗率处理为常数。汇流计算时,若应用瞬时单位线,汇流参数为确定的,也可考虑为随机的^[5]。因此,流域系统的输送是随机的或准随机的。

4. 流域系统随机模拟较为复杂,计算环节多,各子模型之间关系密切,建模中除了对各个模型以及最后输出的洪水过程进行多方面的检验外,还应从整个系统出发,对各子模型参数进行必要的协调,以获得最佳的模拟效果。

参 考 文 献

- 1 V. T. Chow, Stochastic Modeling of Watershed System, Advances In Hydroscience, Vol. 11, Academic Pr, NeW York 1978
- 2 陈蓓玉,暴雨与洪水的随机模拟及其分析检验,水电院科研论文集,第14集,1984年
- 3 M. C. Acreman, A Simple Stochastic Model of Mournly Rarifau For Farnborough, England, Hydrological Sciences, Vol. 35, No. 2, 4, 1990
- 4 S. K. Spolia and S. Chander, Streaflow Simulation—A Model Based on Cannonical Expansions, Journal of Hydrology, Vol. 35, No. 3, 4, 1977
- 5 邓育仁,一种暴雨洪水流域系统随机模拟方法,成都科技大学学报,1988年2期
- 6 丁晶、邓育仁《随机水文学》,成都科技大学出版社,1988年11月

Stochastic Simulation of a Storm Flood System in a Basin

Deng Yuren Ding Jing Yang Rongfu

(Chengdu University of Science and Technology)

Abstract The storm hydrograph, as a input into the system of a flood from storm in a basin, has been successfully simulated stochastically with the canonical expansion model which is of a significant advantage. The throughput from such a system is simply computed by using a available runoff yield and concentration models. The verification of all submodels and output flood hydrographes from system have shown that the results obtained from the model examined in this paper are satisfactory.

Key Words canonical expansion models, stochastic simulation of a basin system, runoff yeild and concentration models of storm flood, annual storm hydrograph, annual flood hydrograph.