

改进非参数解集模型在月经流随机模拟中的应用

谢萍萍, 宋松柏, 赵丽娜

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

[摘要] **【目的】**研究改进非参数解集模型在陕北地区月经流随机模拟中的适用性,为该区域水资源规划、开发利用和保护等提供决策依据。**【方法】**采用非参数核密度估计模型模拟年径流,利用改进非参数解集模型将年径流分解为月经流,对月经流进行随机模拟,并探讨改进非参数解集模型中不同正定型矩阵的分解方法。**【结果】**改进非参数解集模型考虑了分量与总量以及分量与各分量前期值的关系,克服了首尾自相关不一致的问题,对月经流实测序列的均值、均方差、 C_v 、 C_s 、最大值、最小值以及一、二阶自相关系数等统计特性保持较好,模拟效果比较理想。交口河站、张村驿站和绥德站 S' 矩阵为正定矩阵,可采用 Cholesky 分解法进行分解;刘家河站、志丹站、安塞站和杏河站 S' 矩阵为非正定矩阵,宜采用 Schur 分解法进行分解。**【结论】**利用改进非参数解集模型进行月经流的随机模拟是可行的。

[关键词] 月经流随机模拟;改进非参数解集模型;核密度估计模型;带宽系数;Cholesky 分解;Schur 分解

[中图分类号] P333.1;P333.9

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2010)03-0199-07

Application of improved nonparametric disaggregation model for stochastic simulation of monthly runoff

XIE Ping-ping, SONG Song-bai, ZHAO Li-na

(College of Water Resource and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】** Applicability of improved nonparametric disaggregation model is researched to simulate stochastic monthly runoff in Shaanbei area, which provides an important basis for regional water resources planning, development, utilization and protection. **【Method】** This paper simulated annual runoff by kernel density estimation model, decomposed it into monthly runoff with improved nonparametric disaggregation model and did the stochastic simulation of monthly runoff, in addition, explored the decomposition method for the different positive-type matrixes. **【Result】** Improved nonparametric disaggregation model considers the relation of total and component, as well as the relation of component and its previous value, overcomes the discord of autocorrelation from beginning to end, and maintains good statistical properties of the measured sequences on mean, square deviation, C_v , C_s , maximum, minimum, first-order autocorrelation coefficient, et al. When S' is positive definite matrix, Cholesky decomposition can be used at Jiaokouhe station, Zhangcunyi Station and Suide Station. While, when S' is nonpositive definite matrix, Schur decomposition can be used at Liujiahe Station, Zhidan Station, Ansai Station and Xinghe Station. **【Conclusion】** The result shows that improved nonparametric disaggregation model is practical to simulate stochastic monthly runoff.

Key words: simulation of monthly runoff; improved nonparametric disaggregation model; kernel density estimation model; bandwidth coefficient; cholesky decomposition; schur decomposition

* [收稿日期] 2009-09-11

[基金项目] 国家自然科学基金项目(50879070, 50579065);西北农林科技大学青年学术骨干支持计划和优秀博士论文基金项目(Z2007)

[作者简介] 谢萍萍(1984—),女,陕西岐山人,在读硕士,主要从事水文水资源研究。E-mail:gnipgnipeix@163.com

[通信作者] 宋松柏(1965—),男,陕西永寿人,教授,博士,博士生导师,主要从事水文水资源研究。E-mail:ssb6533@yahoo.com.cn

20 世纪 70 年代初, Valencia 和 Schaake^[1] 提出了线性相关解集模型。此后, 多种不同结构和参数估计方法的参数解集模型及其方法相继出现, 并在水文水资源系统的随机模拟中得到了广泛应用^[2-3]。参数解集模型 (Parametric disaggregation model, PDM) 是对水文序列的相依结构和概率密度函数形式作某种假定后, 采用有限个参数描述的模型, 其概念清晰、结构简单, 但难以反映真实水文系统的非线性、多峰形态以及边际特性。鉴于此, Tarboton^[4] 提出了非参数解集模型 (Nonparametric disaggregation model, NPDM)。NPDM 是基于核密度估计理论构造的数据驱动模型, 其不需要假定序列的相依结构和概率密度函数形式, 在描述变量相依性和分布形式以及统计特性方面较 PDM 更为优越, 克服了参数太多的缺点, 能反映真实水文系统的非线性、多峰形态以及边际特性。王文圣等^[5] 将非参数解集模型应用于月径流随机模拟并取得了良好的效果。袁鹏等^[6] 将非参数解集模型应用于金沙江流域屏山站汛期日径流随机模拟, 验证了该模型的实用性。但是, NPDM 不能克服一般参数解集模型带来的首尾自相关不一致问题。因此, 王文圣等^[7] 提出了改进非参数解集模型 (Improved non-parametric disaggregation model, INPDM), 并将其应用于屏山站月径流随机模拟, 结果表明, INPDM 克服了首尾自相关不一致的问题, 能较好地保持实测序列的统计特性。但 INPDM 在其他地方是否适用, 尚需要做进一步验证; 同时, 在模型模拟过程中, 对不同正定型矩阵如何进行分解, 也需要研究探讨。本研究利用 INPDM, 对陕北地区交口河站、张村驿站、绥德站、刘家河站、志丹站、安塞站和杏河站的月径流进行随机模拟, 以期为该地区水资源规划、开发利用及保护提供决策依据。

1 NPDM 模型的改进

NPDM 模型存在首尾自相关不一致问题, 原因是因为它仅仅考虑了分量与总量的关系, 而实际水文系统中, 分量 $\mathbf{X}_t$ 不仅与总量 Z_t 有关, 而且与各分量的前期值 $\mathbf{X}_{t-1}$ 有关^[7-8]。

设总量为 Z , 分量为 $\mathbf{X} = (\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_d)^\top$, $\mathbf{X}_t = (\mathbf{X}_{t1}, \mathbf{X}_{t2}, \dots, \mathbf{X}_{td})^\top$ 。其中 $t=1, 2, \dots, n; d$ 为样本分量 $\mathbf{X}$ 的分量数; $Z = \mathbf{X}_1 + \mathbf{X}_2 + \dots + \mathbf{X}_d$ 。在已知 Z_t 和 $\mathbf{X}_{t-1}$ 的条件下, $\mathbf{X}_t$ 的条件概率密度函数 $f(\mathbf{X}_t/\mathbf{X}_{t-1}, Z_t)$ 为:

$$f(\mathbf{X}_t/\mathbf{X}_{t-1}, Z_t) = f(\mathbf{X}_t/\mathbf{V}_t) =$$

$$\frac{f(\mathbf{X}_t, \mathbf{V}_t)}{\int f(\mathbf{X}_t, \mathbf{V}_t) d\mathbf{X}_t} = \frac{f(\mathbf{X}_t, \mathbf{V}_t)}{f_v(\mathbf{V}_t)} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{V}_t = (\mathbf{X}_{t-1}, Z_t)^\top$, $f(\mathbf{X}_t, \mathbf{V}_t)$ 为 $2d+1$ 维联合密度函数, $f_v(\mathbf{V}_t)$ 为 $d+1$ 维边缘密度函数。

从实测样本中构造 $\mathbf{X}_i$ 和 $\mathbf{V}_i = (\mathbf{X}_{i-1}, Z_i)^\top$ ($i=1, 2, \dots, n$), 由核密度估计理论可知:

$$\hat{f}(\mathbf{X}_t, \mathbf{V}_t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{(2\pi h^2)^{(2d+1)/2} \det(\mathbf{S})^{1/2}} \cdot \exp \left[-\frac{\begin{pmatrix} \mathbf{X}_t - \mathbf{X}_i \\ \mathbf{V}_t - \mathbf{V}_i \end{pmatrix}^\top \mathbf{S}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{X}_t - \mathbf{X}_i \\ \mathbf{V}_t - \mathbf{V}_i \end{pmatrix}}{2h^2} \right] \quad (2)$$

$$\hat{f}(\mathbf{V}_t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{(2\pi h^2)^{(2d+1)/2} \det(\mathbf{S}_v)^{1/2}} \cdot \exp \left[-\frac{(\mathbf{V}_t - \mathbf{V}_i)^\top \mathbf{S}_v^{-1} (\mathbf{V}_t - \mathbf{V}_i)}{2h^2} \right] \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_x & \mathbf{S}_{xv} \\ \mathbf{S}_{xv}^\top & \mathbf{S}_v \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{S}_x$ 为 $\mathbf{X}_t$ 的 $d \times d$ 阶对称样本方差矩阵, $\mathbf{S}_{xv}$ 为 $\mathbf{X}_t$ 与 $\mathbf{V}_t$ 的 $d \times (d-1)$ 阶样本协差矩阵, $\mathbf{S}_v$ 为 $\mathbf{V}_t$ 的 $(d-1) \times (d-1)$ 阶对称样本方差矩阵。矩阵 $\mathbf{S}$ 由实测样本用矩法估计, 反映各种滞时为 0、1 的自相关和互相关关系。

将式(2)、(3)代入式(1), 整理得:

$$\hat{f}(\mathbf{X}_t/\mathbf{V}_t) = \frac{1}{(2\pi)^{d/2} \det(\mathbf{S}')^{1/2}} \sum_{i=1}^n W_i \cdot \exp \left[-\frac{(\mathbf{X}_t - \mathbf{b}_i)^\top \mathbf{S}'^{-1} (\mathbf{X}_t - \mathbf{b}_i)}{2} \right] \quad (5)$$

式中:

$$W_i = \exp \left[-\frac{(\mathbf{V}_t - \mathbf{V}_i)^\top \mathbf{S}_v^{-1} (\mathbf{V}_t - \mathbf{V}_i)}{2h^2} \right] / \sum_{j=1}^n \exp \left[-\frac{(\mathbf{V}_t - \mathbf{V}_j)^\top \mathbf{S}_v^{-1} (\mathbf{V}_t - \mathbf{V}_j)}{2h^2} \right] \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1.0, \mathbf{b}_i = \mathbf{X}_i + \mathbf{S}_{xv} \mathbf{S}_v^{-1} (\mathbf{V}_t - \mathbf{V}_i),$$

$$\mathbf{S}' = h^2 (\mathbf{S}_x - \mathbf{S}_{xv} \mathbf{S}_v^{-1} \mathbf{S}_{xv}^\top) \quad (7)$$

由式(5)可知, 条件概率密度函数 $\hat{f}(\mathbf{X}_t/\mathbf{V}_t)$ 为 n 个 d 维高斯函数 (均值向量为 $\mathbf{b}_i$, 方差矩阵为 $h^2 \mathbf{S}'$) 的加权 (权重为 W_i) 平均和。利用式(5)可随机模拟 $\mathbf{X}_t$, 其模拟表达式为:

$$\mathbf{X}_t = \mathbf{b}_i + \mathbf{A} \mathbf{E}_i \quad (8)$$

式中: $\mathbf{A}$ 为 $d \times d$ 阶标准差矩阵, 根据 $\mathbf{S}' = \mathbf{A}^\top \mathbf{A}$ 分解而得; $\mathbf{E}_i$ 为均值为 0、方差为 1 的 d 维独立高斯随机变量。在已知条件 Z_t 和 $\mathbf{X}_{t-1}$ 的情况下, 模拟序列 $\mathbf{X}_t$ 是来自条件概率密度函数式(5)的一个样本。

模型算法如下^[7]:①计算分量 $\mathbf{X}$ 的样本协方差矩阵 $\mathbf{S}$;②用最小二乘交叉识别法 (LSCV) 寻求最优带宽系数 $h^{[9-10]}$;③分解 $\mathbf{S}'=\mathbf{A}^T\mathbf{A}$ 得奇异矩阵 $\mathbf{A}$;④由总量模型模拟 Z_i ;⑤用式 (6) 计算每个实测值的贡献权重 $W_i(i=1,2,\cdots,n)$;⑥根据 W_i 抽取 i ,令 $W_i=W_{i-1}+W_i$,生成一个服从均匀分布的随机数 $u(u$ 满足 $u\geqslant W_1$),如果 u 在 W_{i-1} 与 W_i 之间,则 i 即为所求;⑦生成 $d-1$ 维独立单位高斯分布随机向量 $\mathbf{E}_i$;⑧获得模拟值 $\mathbf{X}_i=b_i+\mathbf{A}\mathbf{E}_i$;⑨将 $\mathbf{X}_i$ 赋给 $\mathbf{X}_{i-1}$,转向第⑤步,继续模拟,直至满足模拟数时为止。

一般情况下,分量 $\mathbf{X}$ 的样本协方差矩阵 $\mathbf{S}$ 为正定矩阵, $\mathbf{S}'$ 也为正定矩阵,故可直接采用 Cholesky 分解法分解 $\mathbf{S}'=\mathbf{A}^T\mathbf{A}$ 。但在某些情况下,协方差矩阵也可能为非正定矩阵。Dykstra^[11] 曾经证明,独立且服从同一正态分布的样本协方差矩阵概率为 1,且为正定矩阵的充要条件是 $n>p$,其中, n 为抽样个数, p 为变量个数。缪建群^[12] 指出,离散型样本协方差矩阵为正定矩阵的充要条件是样本资料阵的各随机列向量是非 I -线性组合。而对于离散样本而言,由于所有的变量都以相同的概率取某一固定范围内的离散数据,因而样本资料阵就能以一定的概率构成 I -线性组合,并且其协方差矩阵为正定矩阵的概率,等于随机列向量不构成 I -线性组合的样本资料阵个数与总体样本资料阵个数之比^[12-13]。此时, $\mathbf{S}$ 为非正定矩阵, $\mathbf{S}'$ 为非正定矩阵。对于非正定矩阵,可采用 Schur 分解,使得 $\mathbf{S}'=\mathbf{A}\mathbf{T}\mathbf{A}^T$,其中 $\mathbf{A}$ 为正交矩阵, $\mathbf{T}$ 为 Schur 矩阵^[14-15]。

采用改进非参数解集模型模拟出的大量模拟序列中有负值出现。一般情况下,少量的负值不会影

响实际应用,但是负值较多时,必须对模型进行修正或更换^[16]。为了扩大模型的适用性,本研究对模型进行了修正,即将模拟序列中的负值用实测序列中的相应值代替,以增加模型的可靠性。

2 模型的应用

2.1 资料审查

本研究选取陕北地区交口河站(1956—2003 年)、张村驿站(1964—2003 年)、绥德站(1968—2003 年)、刘家河站(1959—1998 年)、志丹站(1965—1992 年)、安塞站(1981—2003 年)和杏河站(1980—2003 年),共 7 个水文站的年、月径流资料进行月径流的随机模拟研究。通过对各站年径流系列资料的审查分析可知,上述各站的年径流资料具有较好的可靠性、一致性和代表性,可以用作模拟计算。

2.2 改进非参数解集模型的建立

改进非参数解集模型在分解年径流为月径流之前,必须首先模拟年径流 Z_t 。年径流模拟选用单变量非参数核密度估计模型进行随机模拟,模型阶数 P 根据 AIC 准则确定^[17-18]。经计算,单变量非参数核密度估计模型的阶数为 $P=1$ 。因此,本研究构造 1 阶非参数核密度估计模型 NP(1)进行年径流 Z_t 的模拟,经计算可得陕北各水文站年径流的优化带宽系数 h_1 如表 1 所示。

根据改进非参数解集模型的算法,可将各站年径流 Z_t 分解成月径流 $\mathbf{X}_t=(\mathbf{X}_{t1},\mathbf{X}_{t2},\cdots,\mathbf{X}_{td})^T$ 。改进非参数解集模型的关键是寻求最优全局带宽系数,经优化计算,得到陕北各水文站月径流的优化带宽系数 h_2 如表 1 所示。

表 1 陕北地区 7 个水文站年、月径流的优化带宽系数

Table 1 The bandwidth coefficient of annual and monthly runoff of 7 stations in Shaanbei area

带宽系数 Bandwidth coefficient	交口河站 Jiaokouhe station	张村驿站 Zhangcunyi station	绥德站 Suide station	刘家河站 Liujiahe station	志丹站 Zhidan station	安塞站 Ansai station	杏河站 Xinghe station
h_1	0.54	0.56	0.56	0.56	0.60	0.62	0.61
h_2	0.75	0.64	0.67	0.62	0.80	0.80	0.76

2.3 Cholesky 分解法和 Schur 分解法的比较

水文站不同,计算出的正定型也不同。经计算,利用交口河站、张村驿站和绥德站径流量资料计算出的 $\mathbf{S}'$ 均为正定矩阵,可采用 Cholesky 分解法进行分解;而利用刘家河站、志丹站、安塞站和杏河站资料计算出的 $\mathbf{S}'$ 均为非正定矩阵,应采用 Schur 分解法进行分解。当然,正定矩阵同样也可以采用 Schur 分解法进行分解。采用 2 种分解方法随机模

拟交口河站、张村驿站和绥德站的月径流量,并对模拟结果进行综合比较,结果表明,对于交口河站和张村驿站,Cholesky 分解法优于 Schur 分解法;对于绥德站,Schur 分解法较优于 Cholesky 分解法。由于测站少,资料系列较短,目前尚无法确定采用哪种分解法更能反映实测系列的统计特征,因而该问题还有待于进一步研究。为此,本研究对交口河站和张村驿站采用 Cholesky 分解法,对绥德站、刘家河

站、志丹站、安塞站和杏河站采用 Schur 分解法。

2.4 模型的适用性检验

采用短序列法(模拟组数为 100 组),对该模型的适用性进行检验,检验的内容是月径流过程的截口统计参数,包括截口均值 F_{mean} 、均方差 D 、 C_v 、 C_s 、

最大值 F_{max} 、最小值 F_{min} 及滞时为 1,2 时的自相关系数 R_1 和 R_2 。本研究仅列出刘家河站和杏河站的月径流统计参数检验结果,如表 2~5 所示,其余 5 个站的月径流统计参数检验结果与刘家河站和杏河站的检验结果一致。

表 2 刘家河站月径流 F_{mean} 、 D 、 C_v 、 C_s 的检验

月份 Month	$F_{\text{mean}}/10^6\text{ m}^3$				D				C_v			C_s		
	实测值 Meas- ured	模拟值 Simu- lation	σ	相对误差/% Relative error	实测值 Meas- ured	模拟值 Simu- lation	σ	相对误差/% Relative error	实测值 Meas- ured	模拟值 Simu- lation	σ	实测值 Meas- ured	模拟值 Simu- lation	σ
1	4.43	4.50	0.27	1.58	1.74	1.69	0.20	2.87	0.39	0.38	0.04	1.08	0.77	0.41
2	8.00	7.21	0.39	9.88	2.20	2.27	0.23	3.18	0.27	0.32	0.03	0.16	0.08	0.25
3	20.70	20.90	0.70	0.68	4.29	4.10	0.56	4.43	0.21	0.20	0.03	-0.68	-0.33	0.42
4	14.10	12.90	0.46	8.70	2.98	2.88	0.37	3.36	0.21	0.22	0.03	0.43	0.27	0.45
5	12.20	12.00	1.01	2.20	6.49	5.92	1.15	8.80	0.53	0.49	0.07	2.15	1.55	0.54
6	18.40	20.60	1.97	11.90	13.72	12.70	1.39	7.30	0.75	0.62	0.05	1.33	1.10	0.31
7	55.00	48.60	5.58	11.70	36.70	33.20	4.35	9.40	0.67	0.69	0.08	1.27	0.88	0.33
8	68.60	58.60	7.95	14.70	62.30	46.60	9.59	25.20	0.91	0.79	0.11	2.27	1.35	0.62
9	22.00	24.90	1.57	13.30	11.80	10.62	1.41	10.00	0.54	0.43	0.04	1.39	1.17	0.32
10	13.20	14.90	0.80	12.70	4.37	5.18	1.15	18.50	0.33	0.35	0.07	1.89	1.50	0.58
11	10.30	10.70	0.30	4.28	1.82	2.11	0.22	15.90	0.18	0.20	0.02	0.30	0.28	0.30
12	6.87	6.82	0.36	0.73	1.90	2.02	0.20	6.32	0.28	0.30	0.03	0.39	0.30	0.30

注: σ 为 100 组模拟序列中每一种截口统计参数的标准差,下同。

Note: σ is the standard deviation of each sectional statistical parameter of 100 analog sequences,the same below.

表 3 杏河站月径流 F_{mean} 、 D 、 C_v 、 C_s 的检验

月份 Month	$F_{\text{mean}}/10^5\text{ m}^3$				D				C_v			C_s		
	实测值 Meas- ured	模拟值 Simu- lation	σ	相对误差/% Relative error	实测值 Meas- ured	模拟值 Simu- lation	σ	相对误差/% Relative error	实测值 Meas- ured	模拟值 Simu- lation	σ	实测值 Meas- ured	模拟值 Simu- lation	σ
1	3.91	3.72	0.35	4.86	1.66	1.78	0.26	7.23	0.42	0.48	0.06	0.8	0.97	0.41
2	5.61	5.24	0.58	6.60	2.47	2.45	0.32	0.81	0.44	0.47	0.06	0.49	0.41	0.35
3	14.50	13.50	0.74	6.37	3.81	3.83	0.60	0.52	0.26	0.28	0.04	0.93	0.83	0.41
4	11.70	10.70	1.19	8.54	5.41	4.99	1.21	7.76	0.46	0.46	0.08	2.02	1.14	0.62
5	8.68	8.41	1.31	3.11	6.47	5.98	1.79	7.57	0.75	0.70	0.15	2.55	1.65	0.63
6	18.40	21.30	4.97	15.60	24.10	24.10	7.11	0.10	1.310	1.12	0.21	2.58	2.01	0.72
7	38.20	46.80	6.95	22.50	28.60	30.80	6.40	7.80	0.75	0.66	0.10	2.02	0.83	0.52
8	45.20	46.30	5.97	2.52	37.50	29.20	4.61	22.10	0.83	0.63	0.09	1.45	0.67	0.45
9	15.50	13.30	2.27	14.00	12.10	10.60	2.43	12.50	0.78	0.79	0.12	1.78	1.50	0.46
10	8.96	8.74	0.57	2.46	2.79	2.81	0.41	0.72	0.31	0.32	0.04	0.74	0.52	0.34
11	6.30	5.98	0.45	5.08	1.65	2.22	0.30	34.60	0.26	0.37	0.05	0.56	0.32	0.39
12	4.02	4.17	0.32	3.73	1.29	1.51	0.17	17.10	0.32	0.36	0.04	0.29	0.26	0.30

表 4 刘家河站月径流 F_{max} 、 F_{min} 、 R_1 、 R_2 的检验

月份 Month	$F_{\text{max}}/10^6\text{ m}^3$				$F_{\text{min}}/10^6\text{ m}^3$				R_1			R_2		
	实测值 Meas- ured	模拟值 Simu- lation	σ	相对误差/% Relative error	实测值 Meas- ured	模拟值 Simu- lation	σ	相对误差/% Relative error	实测值 Meas- ured	模拟值 Simu- lation	σ	实测值 Meas- ured	模拟值 Simu- lation	σ
1	10.10	9.10	1.22	9.99	2.06	2.12	0.09	2.91	0.11	0.30	0.22	-0.12	-0.07	0.15
2	12.20	11.90	0.77	3.02	4.30	2.94	0.49	31.60	0.39	0.27	0.19	-0.17	-0.11	0.15

续表 4 Continued table 4

月份 Month	$F_{\max}/10^6\text{ m}^3$				$F_{\min}/10^6\text{ m}^3$				R_1			R_2		
	实测值 Meas- ured	模拟值 Simu- lation	σ	相对误差/% Relative error	实测值 Meas- ured	模拟值 Simu- lation	σ	相对误差/% Relative error	实测值 Meas- ured	模拟值 Simu- lation	σ	实测值 Meas- ured	模拟值 Simu- lation	σ
3	29.0	28.9	1.49	0.31	8.12	10.5	2.79	29.8	0.49	0.3	0.18	0.12	-0.1	0.14
4	22.6	20.1	1.96	11.1	7.78	7.06	1.12	9.25	0.26	0.29	0.2	-0.19	-0.1	0.15
5	36.7	31.5	5.27	14.4	5.56	4.44	1.12	20.1	0.39	0.25	0.22	0.25	-0.09	0.15
6	55.2	50.5	2.76	8.4	5.09	5.63	1.48	10.6	0.56	0.27	0.22	0.01	-0.09	0.15
7	152	139	23.8	8.7	11.0	5.05	2.58	54.0	0.02	0.26	0.21	-0.57	-0.11	0.13
8	323	208	58.4	35.7	12.8	5.23	3.08	59.0	0.49	0.3	0.17	-0.14	-0.12	0.14
9	52.0	54.8	3.84	5.4	8.15	9.89	2.43	21.3	0.25	0.26	0.21	-0.16	-0.09	0.15
10	30.2	31.0	3.72	2.52	6.72	7.42	1.52	10.4	0.36	0.29	0.21	-0.2	-0.09	0.16
11	14.5	15.5	0.9	6.60	7.08	6.68	0.7	5.65	0.06	0.28	0.21	-0.1	-0.09	0.15
12	10.9	11.4	0.8	4.40	3.02	2.95	0.53	2.32	0.13	0.27	0.21	-0.18	-0.09	0.16

表 5 杏河站月径流 $F_{\max}$ 、 $F_{\min}$ 、 R_1 、 R_2 的检验

Table 5 Checked results of $F_{\max}$, $F_{\min}$, R_1 and R_2 of monthly runoff at Xinghe station

月份 Month	$F_{\max}/10^5\text{ m}^3$				$F_{\min}/10^5\text{ m}^3$				R_1			R_2		
	实测值 Meas- ured	模拟值 Simu- lation	σ	相对误差/% Relative error	实测值 Meas- ured	模拟值 Simu- lation	σ	相对误差/% Relative error	实测值 Meas- ured	模拟值 Simu- lation	σ	实测值 Meas- ured	模拟值 Simu- lation	σ
1	7.77	8.19	1.08	5.41	1.48	1.51	0.11	2.03	0.13	0.24	0.21	0.23	-0.11	0.16
2	11.2	10.4	1.28	6.81	1.37	1.57	0.31	14.6	0.21	0.28	0.18	-0.12	-0.16	0.12
3	24.5	22.9	1.57	6.34	8.53	7.92	0.95	7.15	0.37	0.26	0.2	-0.3	-0.14	0.15
4	30.4	24.6	5.15	19.1	5.96	4.06	1.21	31.9	0.4	0.24	0.23	-0.33	-0.12	0.15
5	31.5	26.3	6.74	16.7	3.43	2.07	0.55	39.7	0.21	0.3	0.18	-0.19	-0.14	0.13
6	102	96.2	25.0	6.0	2.88	2.45	0.70	14.9	0.34	0.25	0.22	0.09	-0.12	0.15
7	127	125	31	1.2	6.81	5.77	3.64	15.3	0.35	0.26	0.2	-0.07	-0.13	0.13
8	142	114	21.7	19.9	8.76	6.9	3.96	21.2	0.34	0.27	0.18	-0.24	-0.13	0.16
9	48.5	41.9	6.95	13.6	5.60	2.62	0.86	53.2	0.39	0.25	0.2	-0.2	-0.12	0.16
10	15.1	14.8	1.04	2.05	5.12	4.33	0.74	15.4	-0.01	0.26	0.19	-0.15	-0.14	0.14
11	10.5	10.6	1.1	0.76	3.23	2.26	0.56	30.0	0.07	0.24	0.22	-0.09	-0.10	0.14
12	6.55	7.19	0.71	9.77	1.88	1.77	0.27	5.85	-0.14	0.28	0.18	-0.14	-0.13	0.14

表 2 和表 3 显示,INPDM 对各月径流量均值、均方差均能保持实测序列的统计特性,模拟值与实测值的相对误差大多为 0~20%;除个别 C_v 、 C_s 控制在 2 个均方差检验标准下外,其余都控制在 1 个均方差检验标准下。从表 4 和表 5 可以看出,INPDM 模拟的月径流最大值和最小值与原始序列的最大值和最小值比较相近,模拟值与实测值的相对误差大多为 5%~35%;各月份的一、二阶自相关系数

均保持较好。

表 6 列出了各站年径流量统计参数的检验成果,包括年径流的均值 F_{mean} 、均方差 D 、 C_v 、 C_s ,最大值 $F_{\max}$ 、最小值 $F_{\min}$,一、二阶自相关系数 R_1 和 R_2 。从表 6 可以看出,除各站一、二阶自相关系数和 C_s 外,一阶非参数核密度估计模型 NP(1)对其他统计特性均保持较好,可以表征年径流的统计特性。

表 6 陕北地区 7 个水文站年径流统计参数的检验

Table 6 Statistical parametrics of annual runoff of 7 stations in Shaanbei area

站名 Station	类别 Item	$F_{\text{mean}}/10^6\text{ m}^3$	D	C_v	C_s	$F_{\max}/10^6\text{ m}^3$	$F_{\min}/10^6\text{ m}^3$	R_1	R_2
交口河 Jiaokouhe	实测值 Measured	474	155	0.33	2.05	1 160	283	-0.14	0.24
	NP(1)	442	161	0.36	1.36	1 140	140	0.01	0
张村驿 Zhangcunyi	实测值 Measured	116	46	0.40	2.04	314	60	0.01	0.22
	NP(1)	112	38	0.34	0.20	213	24	-0.02	0
绥德 Suide	实测值 Measured	138	45	0.33	0.84	262	76	0.19	-0.05
	NP(1)	155	52	0.34	0.01	272	42	-0.01	-0.01
刘家河 Liujiahe	实测值 Measured	254	88	0.35	1.21	532	133	-0.32	0.31
	NP(1)	219	93	0.43	0.72	511	34	0	-0.01

续表 6 Continued table 6

站名 Station	类别 Item	$F_{\text{mean}}/10^6\text{ m}^3$	D	C_v	C_s	$F_{\text{max}}/10^6\text{ m}^3$	$F_{\text{min}}/10^6\text{ m}^3$	R_1	R_2
志丹	实测值 Measured	33	13.5	0.41	0.77	65	13	-0.02	-0.12
Zhidan	NP(1)	36	13.2	0.37	0.22	72	6	0.01	0.01
安塞	实测值 Measured	55	17.3	0.32	0.93	95	25	-0.23	0.14
Ansai	NP(1)	50	17.0	0.34	0.57	106	10	-0.05	-0.02
杏河	实测值 Measured	18	6.0	0.33	0.53	33	10	-0.2	0.06
Xinghe	NP(1)	17	6.2	0.37	0.30	35	3	-0.04	0

以上适用性检验结果表明,将改进非参数解集模型应用于陕北地区交口河站、张村驿站、绥德站、刘家河站、志丹站、安塞站、杏河站月径流的随机模拟是可行的,且模拟效果比较理想。

3 结 语

改进非参数解集模型不仅考虑了分量与总量的关系,而且考虑了分量与各分量前期值的关系,克服了一般参数解集模型带来的首尾自相关不一致问题,同时又避免了变量相依结构和概率密度函数形式的假定,保留了非参数解集模型的优点。本研究的实践表明,将改进非参数解集模型用于陕北地区交口河站、张村驿站、绥德站、刘家河站、志丹站、安塞站、杏河站月径流的随机模拟是可行的,其结果能充分反映实测月径流系列的变化情况,符合该流域的水文特性。

改进非参数解集模型也存在不足之处,非正定矩阵只能采用 Schur 分解法,而正定矩阵可采用 Cholesky 分解法和 Schur 分解法。但是,由于研究测站少,资料系列较短,对于协方差矩阵正定的测站而言,目前还无法确定采用哪种分解法更能充分反映实测系列的统计特性,因而对此还有待于进一步研究。

[参考文献]

[1] Valencia D R, Schaake J L. Disaggregation processes in Stochastic hydrology [J]. Water Resources Research, 1973, 9(3): 580-585.

[2] 丁 晶, 邓育仁. 随机水文学 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1988.

Ding J, Deng Y R. Stochastic hydrology [M]. Chengdu: University of Electronic Science & Technology Press, 1988. (in Chinese)

[3] Koutsoyiannis D. Simple disaggregation accurate adjusting procedures [J]. Water Resources Research, 1996, 32(7): 2105-2117.

[4] Tarboton D G. Disaggregation procedures for stochastic hydrology based on nonparametric density estimation [J]. Water Resources Research, 1998, 34(1): 107-119.

[5] 王文圣, 丁 晶, 袁 鹏. 非参数解集模型及其在水文随机模拟

中的应用 [J]. 四川水力发电, 1999, 18(1): 60-62.

Wang W S, Ding J, Yuan P. Nonparametric disaggregation model and it's application in hydrologic stochastic simulation [J]. Sichuan Water Power, 1999, 18(1): 60-62. (in Chinese)

[6] 袁 鹏, 王文圣, 丁 晶. 非参数解集模型在汛期日径流随机模拟中的应用 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2000, 32(6): 11-14.

Yuan P, Wang W S, Ding J. Application of nonparametric disaggregation model for stochastic simulation of daily runoff time series in flood period [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2000, 32(6): 11-14. (in Chinese)

[7] 王文圣, 金菊良, 李跃清, 等. 水文水资源随机模拟技术 [M]. 成都: 四川大学出版社, 2007.

Wang W S, Jin J L, Li Y Q, et al. Stochastic simulation technology for hydrology and water resources [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 2007. (in Chinese)

[8] 王文圣. 非参数随机模拟及其在水文水资源随机模拟中的应用 [D]. 成都: 四川大学, 1999.

Wang W S. Nonparametric Stochastic simulation and it's application in hydrologic and water resources [D]. Chengdu: Sichuan University, 1999. (in Chinese)

[9] Rajaopalan B, Lall U, Tarboton D G. Evaluation of kernel density estimation method for daily precipitation resampling [J]. Stochastic Hydrology and Hydraulics, 1997, 11: 523-547.

[10] 董 洁. 非参数统计理论在洪水频率分析中的应用研究 [D]. 南京: 河海大学, 1995.

Dong J. Application and research on nonparametric statistics theory in flood frequency [D]. Nanjing: Hehai University, 1995. (in Chinese)

[11] Dykstar R L. Establishing the positive definiteness of the sample covariance matrix [J]. Ann Math Statist, 1970, 41(6): 2153-2154.

[12] 缪建群. 多元离散型样本协方差阵的正定型 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2006.

Miao J Q. The positive definiteness of covariance matrix of multivariate discrete sample [D]. Guiyang: Guizhou University, 2006. (in Chinese)

[13] 陈 永, 缪建群, 赵 明. 分析离散型与连续型样本协方差矩阵的正定性 [J]. 民营科技, 2007, (11): 4, 103.

Chen Y, Miao J Q, Zhao M. Analyzing the difference of positive defined matrix of discrete and continuous sample [J]. Min ying Keji, 2007(11): 4, 103. (in Chinese)

[14] 王正林, 龚 纯, 何 倩. 精通 MATLAB 科学计算 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.

Wang Z L,Gong C,He Q. Mastering MATLAB scientific calculation [M]. Beijing,Publishing House of Electronic Industry,2007. (in Chinese)

[15] 叶庆凯. 奇异广义特征问题的计算 [J]. 系统仿真学报,1992,4(3):41-44.

Ye Q K. The calculation ot singular general eigen-problem [J]. Acta Simulata Systematica Sinica,1992,4(3):41-44. (in Chinese)

[16] 王文圣,金菊良,李跃清,等. 水文随机模拟进展 [J]. 水科学进展,2007,18(5):768-775.

Wang W S,Jin J L,Li Y Q,et al. Advances in stochastic simulation of hydrology [J]. Advances in Water Science,2007,18(5):768-775. (in Chinese).

[17] 王文圣,丁 晶,袁 鹏. 单变量核密度估计模型及其在径流随机模拟中的应用 [J]. 水科学进展,2001,12(3):367-372.

Wang W S,Ding J,Yuan P. Kernel density estimation model and its application to stochastic generation in hydrology and water resources [J]. Advances in Water Science,2001,12(3):367-372. (in Chinese)

[18] 王文圣,丁 晶. 基于核估计的多变量非参数随机模拟模型初步研究 [J]. 水利学报,2003(2):9-14.

Wang W S,Ding J. Preliminary study on multivariate non-parametric model based on kernel estimation theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2003(2):9-14. (in Chinese)

(上接第 198 页)

[16] 张洪刚,王 辉,徐德龙,等. 汉江上游降水与径流变化趋势研究 [J]. 长江科学院院报,2007,24(5):27-30.

Zhang H G,Wang H,Xu D L,et al. Changing tendency of water resources for upper Hanjiang River [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2007,24(5):27-30. (in Chinese)

[17] Hamed K H. Enhancing the effectiveness of prewhitening in trend analysis of hydrologic data [J]. Journal of Hydrology,2009,368:143-155.

[18] 王文圣,丁 晶,金菊良. 随机水文学 [M]. 2 版. 北京:中国水利水电出版社,2008.

Wang W S,Ding J,Jin J L. Stochastic hydrology [M]. 2nd Ed. Beijing:China Water Conservancy and Hydropower Press,2008. (in Chinese)

[19] 王文圣,金菊良,李跃清,等. 水文水资源随机模拟技术 [M]. 成都:四川大学出版社,2007.

Wang W S,Jin J L,Li Y Q,et al. Stochastic simulation technology for hydrology and water resource [M]. Chengdu:Sichuan University Press,2007. (in Chinese)

[20] Khaliq M N,Ouarda T B M J,Gachon P,et al. Identification of hydrological trends in the presence of serial and cross correlations;A review of selected methods and their application to annual flow regimes of Canadian rivers [J]. Journal of Hydrology,2009,368:117-130.