

# 多项式正态变换水文频率分析方法的稳健性研究

梁忠民, 戴昌军

(河海大学水资源开发教育部重点实验室, 南京 江苏 210098)

**摘要:**采用 Monte-Carlo 模拟分析技术, 研究了多项式正态变换(PNT)法的稳健性能, 并与线性矩(L-M)法进行了比较. 结果表明: 在污染样本情况下, PNT 法无偏性优于 L-M 法, 效性略差于 L-M 法; 当污染样本比例较大时, 与 L-M 法相比, PNT 法更具稳健性. 因此, 当样本组成复杂或总体分布难以确定时, 采用 PNT 法估计水文变量的设计值, 有望提高估计精度.

**关键词:**多项式正态变换; 线性矩法; 稳健性; 污染样本

中图分类号: P333.9

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2005)03-0015-03

**Robustness of polynomial normal transforms in flood frequency analysis//**LIANG Zhong-min, DAI Chang-jun  
(Key Laboratory of Water Resources Development of Ministry of Education, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The statistical robustness of the polynomial normal transforms (PNT) was investigated by use of the Monte-Carlo simulation technique, and the comparison between the linear moment (L-M) method and the PNT method was presented. The results indicate that the PNT method is superior to the L-M method in unbiasedness, but slightly inferior to the L-M method in effectiveness for contaminated samples, and that the advantage of the PNT method is more obvious to samples with larger contaminated ratio. Therefore, if samples are contaminated or population distribution is unknown, the PNT method is more likely to provide a better estimation.

**Key words:** polynomial normal transforms; linear moment; robustness; contaminated sample

我国现行的设计洪水计算采用参数模型方法, 参数模型方法易于设计成果的标准化以及合理性论证, 因此已经以规范的形式固定下来, 该方法主要包括适线法<sup>[1]</sup>、权函数法<sup>[2,3]</sup>、概率权重矩法<sup>[4]</sup>、线性矩法<sup>[5,6]</sup>等. 理论研究及应用表明, 参数模型方法所具有的各种良好统计性能都具有一个共同的前提, 即样本完全服从某一事先假设的分布. 如果不满足这一前提, 当样本与假设的分布有偏离, 甚至是微小的偏离时, 许多参数模型方法会失去其优良性, 有些还会变得相当差<sup>[7]</sup>. 在水文频率分析中, 样本来自同一总体是一个假设, 在实际中不易被满足. 比如可能总体分布假设不正确; 另外历史洪水调查中对其量及重现期估计误差往往较大, 当将其加入实测序列后, 会使样本受到干扰; 为了扩大样本信息, 往往采用区域综合法, 然而将地区资料合并于一个单站计算, 破坏了原来样本的一致性<sup>[8]</sup>. 所有这些因素都客观存在而又不可避免, 因此真正用来计算的样本即统计中所谓的“污染样本”, 其统计分布函数表示为

$$F_t = \left(1 - \sum_{i=1}^m \epsilon_i\right) F_h + \sum_{i=1}^m \epsilon_i H_i \quad (1)$$

式中:  $F_h$  是假设的总体分布函数;  $F_t$  是实际样本总体分布函数;  $H_i$  是与  $F_h$  不同的分布函数,  $H_i(x) \neq F_h(x)$ ;  $\epsilon_i$  为污染比例, 表示实际样本中来源于总体分布函数  $H_i(x)$  的比例,  $0 \leq \epsilon_i \leq 50\%$  且  $0 \leq \sum_{i=1}^m \epsilon_i \leq 50\%$ ;  $m$  表示偏离  $F_h(x)$  的样本来源于  $m$  个不同的总体分布.

针对由式(1)表示的污染总体或样本, 本文探讨了 PNT 参数估计方法的稳健性问题. 研究中,  $F_h(x)$  假设为 P-III 型分布, 取  $m=1$ ,  $H(x)$  假设为对数正态分布, 污染比例  $\epsilon$  分别取为 10%, 20% 和 50%. 由于线性矩(L-M)法是一种统计性能优良的估计方法, 所以将多项式正态变换(PNT)法与 L-M 法的结果进行了对比分析, 并得出了一系列量化结论.

## 1 PNT 法与 L-M 法

### 1.1 PNT 法

一个偏态分布的变量  $x$ , 可以通过三阶的多项式做正态变换<sup>[9]</sup>:

$$x = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + a_3 z^3 \quad (2)$$

作者简介: 梁忠民(1962—), 男, 辽宁凤城人, 教授, 从事水文水资源研究.

式中:  $x$  是偏态分布的变量;  $z$  是标准正态分布的变量;  $a_0, a_1, a_2, a_3$  均是多项式系数, 可以采用概率权重矩法(PWM)估计。

按照 PWM, 概率权重矩  $\beta_m$  定义为

$$\beta_m = \int_0^1 x(u) u^m du \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)得:

$$\beta_m = a_0 C_{m,0} + a_1 C_{m,1} + a_2 C_{m,2} + a_3 C_{m,3} \quad (4)$$

式中:  $C_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} z^n \Phi^m(z) \varphi(z) dz$ , 其中  $\Phi(z)$  和  $\varphi(z)$  分别为正态分布的分布函数与概率密度函数。

估计  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$  后, 代入式(4), 即可求出  $a_0, a_1, a_2, a_3$ 。当系数  $a_0, a_1, a_2, a_3$  已知时, 就可以利用两种分布变换后的分位点对应相等的原则, 给定一个正态分布的分位点, 代入式(2)就可以推出偏态分布的对应设计值。

## 1.2 L-M 法

1990 年, Hosking 等定义了线性矩<sup>[5]</sup>

$$\lambda_r = \int_0^1 x(u) P_{r-1}^*(u) du \quad (5)$$

根据 PWM 的定义, 线性矩可以写为

$$\lambda_{r+1} = \sum_{k=0}^r \frac{(-1)^{r-k} (r+k)!}{(k!)^2 (r-k)!} \beta_k \quad (r = 0, 1, 2, \dots) \quad (6)$$

对于 P-III 分布, 参数  $\mu, \sigma, \gamma$  可表达为

$$\mu = \lambda_1, \sigma = \frac{\lambda_2 \pi^{1/2} \alpha^{1/2} \Gamma(\alpha)}{\Gamma(\alpha + 1/2)}, \gamma = 2\alpha^{-1/2} \text{sign}(\tau_3) \quad (7)$$

非简单样本时  $\beta_k$  的无偏估计公式见文献[4]。根据  $\beta_k$  的估计值计算出  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$  的估计值, 且有  $\tau_3 = \lambda_3 / \lambda_2$ ,  $\alpha$  的计算公式为

$$\alpha = \begin{cases} \frac{1 + 0.2906c}{c + 0.1882c^2 + 0.0442c^3} & (0 < |\tau_3| < 1/3, c = 3\pi\tau_3^2) \\ \frac{0.36067c - 0.59567c^2 + 0.25361c^3}{1 - 2.78861c + 2.56096c^2 - 0.77045c^3} & (1/3 \leq |\tau_3| < 1, c = 1 - |\tau_3|) \end{cases} \quad (8)$$

将  $\alpha, \lambda_1, \lambda_2$  代入式(7)解出  $\mu, \sigma, \gamma$ , 即可推求 P-III 分布的指定频率的设计值。

## 2 统计试验研究

### 2.1 试验方案设计

#### 2.1.1 对比方案

构造不同污染比例的污染样本, 将 PNT 法与 L-M 法进行对比, 以此考查 PNT 法的统计性能。由于我国进行洪水频率分析时往往需要考虑历史洪水的影响, 本文研究了非简单样本下不同污染比例的

污染样本情况。

#### 2.1.2 总体参数的选取

研究考虑了 8 种总体分布参数:  $C_V = 0.5, C_S/C_V = 3, 4, 5; C_V = 0.8, C_S/C_V = 3, 4, 5; C_V = 1.0, C_S/C_V = 3, 4$ 。总体期望值  $E_X$  的取值对结论没有影响, 本次统一取  $E_X = 0$ 。

$F_h(x)$  与  $H(x)$  的总体参数取为一致, 模拟样本的组数统一取  $k = 1000$  组。

#### 2.1.3 样本的选取

本研究考虑 3 种污染比例:  $\epsilon = 10\%, 20\%, 50\%$ ; 两种样本容量  $n$  与历史洪水次数  $a$  的组合:  $n = 30, a = 2$  和  $n = 50, a = 3$ ; 3 种历史洪水重现期:  $N = 100 \text{ a}, 500 \text{ a}, 1000 \text{ a}$ 。

将总体参数与样本选取组合共构成 144 种计算方案。

### 2.2 统计量比较准则

统计量(记为  $\theta$ )的比较准则为

$$b_\theta = \left( \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{\hat{\theta}_i}{\theta_0} - 1 \right) \times 100\% \quad (9)$$

$$s_\theta = \frac{\sqrt{\left[ \sum_{i=1}^k (\hat{\theta}_i - \theta_0)^2 \right] / k}}{\theta_0} \times 100\% \quad (10)$$

式中:  $b_\theta$  为无偏性指标,  $|b_\theta|$  越小, 表示估计的无偏性越好;  $s_\theta$  为有效性指标,  $s_\theta$  越小, 表示有效性越好。本研究就 L-M 法与 PNT 法相应频率的设计值  $x_P$  进行比较。水文中出于设计安全性考虑, 对于设计值  $x_P$ ,  $|b_\theta|$  相当时, 以  $s_\theta$  较小为优; 相同  $|b_\theta|$  下以  $b_\theta$  大于零为优。

### 2.3 试验结果分析

对  $P = 0.1\%, 0.2\%, 0.5\%, 1\%$  这 4 种频率的污染样本, 分别计算了 PNT 法及 L-M 法估计值, 以相应参数 P-III 分布的设计值作为总体真值( $\theta_0$ ), 采用式(9)和式(10)分别计算 PNT 法和 L-M 法的无偏性指标与有效性指标。定义新的统计量  $T_b, T_s$ , 其中  $T_b$  为 PNT 法的平均无偏绝对值减去 L-M 法的平均无偏绝对值;  $T_s$  为 PNT 法的平均有效性减去 L-M 法的平均有效性。  $T_b < 0$ , 表明 PNT 法无偏性优于 L-M 法;  $T_s < 0$ , 表明 PNT 法有效性优于 L-M 法。反之, 则是 L-M 法占优。

不同污染比例下, PNT 法与 L-M 法部分统计试验结果见表 1 和表 2。

#### 2.3.1 设计频率的影响

对  $P = 0.1\%, 0.2\%$ , PNT 法计算结果多为正偏且偏差绝对值小于 L-M 法(见表 1 和表 2), PNT 法整体无偏性优于 L-M 法。对平均有效性,  $T_s$  在



表 1 统计试验成果(部分方案)

| $\epsilon/\%$ | 总体参数与样本数 |       |       |     |     | 估计方法 | $b_{x_P}/\%$ |           |           |         | $s_{x_P}/\%$ |           |           |         |
|---------------|----------|-------|-------|-----|-----|------|--------------|-----------|-----------|---------|--------------|-----------|-----------|---------|
|               | $C_V$    | $C_S$ | $N/a$ | $n$ | $a$ |      | $P=0.1\%$    | $P=0.2\%$ | $P=0.5\%$ | $P=1\%$ | $P=0.1\%$    | $P=0.2\%$ | $P=0.5\%$ | $P=1\%$ |
| 10            | 0.5      | 1.5   | 100   | 30  | 2   | PNT  | 1.3          | 0.6       | -0.2      | 0.1     | 20.9         | 18.5      | 15.4      | 13.5    |
| 10            | 0.5      | 1.5   | 100   | 30  | 2   | L-M  | -0.7         | -0.7      | -0.6      | -0.5    | 15.2         | 14.4      | 13.2      | 12.2    |
| 10            | 0.5      | 2.0   | 500   | 50  | 3   | PNT  | 2.5          | 1.4       | 0.3       | 0.4     | 19.4         | 17.4      | 14.9      | 13.4    |
| 10            | 0.5      | 2.0   | 500   | 50  | 3   | L-M  | -2.1         | -2.0      | -1.8      | -1.6    | 15.1         | 14.4      | 13.4      | 12.5    |
| 10            | 0.8      | 2.4   | 1000  | 30  | 2   | PNT  | 3.5          | 2.1       | 0.4       | 0.4     | 35.1         | 32.1      | 28.2      | 25.6    |
| 10            | 0.8      | 2.4   | 1000  | 30  | 2   | L-M  | -0.2         | -0.3      | -0.2      | -0.3    | 27.6         | 26.6      | 25.1      | 23.8    |
| 20            | 0.5      | 1.5   | 100   | 30  | 2   | PNT  | 1.9          | 1.1       | 0.1       | 0.3     | 24.0         | 21.1      | 17.4      | 15.1    |
| 20            | 0.5      | 1.5   | 100   | 30  | 2   | L-M  | -0.2         | -0.2      | -0.2      | -0.2    | 18.0         | 17.1      | 15.6      | 14.4    |
| 20            | 0.5      | 2.0   | 500   | 50  | 3   | PNT  | 2.3          | 1.2       | 0.0       | 0.1     | 20.3         | 18.2      | 15.6      | 13.9    |
| 20            | 0.5      | 2.0   | 500   | 50  | 3   | L-M  | -1.5         | -1.3      | -1.1      | -1.0    | 15.9         | 15.2      | 14.1      | 13.1    |
| 20            | 0.8      | 2.4   | 1000  | 30  | 2   | PNT  | 3.0          | 1.6       | 0.0       | 0.0     | 34.9         | 31.9      | 27.9      | 25.3    |
| 20            | 0.8      | 2.4   | 1000  | 30  | 2   | L-M  | -1.1         | -1.1      | -0.9      | -0.9    | 27.3         | 26.3      | 24.8      | 23.4    |
| 50            | 0.5      | 1.5   | 100   | 30  | 2   | PNT  | 1.0          | 0.2       | -0.8      | -0.6    | 23.7         | 20.8      | 17.1      | 14.9    |
| 50            | 0.5      | 1.5   | 100   | 30  | 2   | L-M  | -1.3         | -1.3      | -1.0      | -0.8    | 17.5         | 16.6      | 15.2      | 14.0    |
| 50            | 0.5      | 2.0   | 500   | 50  | 3   | PNT  | 1.0          | -0.1      | -1.1      | -0.9    | 20.1         | 18.1      | 15.4      | 13.8    |
| 50            | 0.5      | 2.0   | 500   | 50  | 3   | L-M  | -4.2         | -3.9      | -3.2      | -2.6    | 15.7         | 15.0      | 13.8      | 12.9    |
| 50            | 0.8      | 2.4   | 1000  | 30  | 2   | PNT  | 1.4          | 0.1       | -1.4      | -1.2    | 35.9         | 32.8      | 28.7      | 26.1    |
| 50            | 0.8      | 2.4   | 1000  | 30  | 2   | L-M  | -6.5         | -6.0      | -5.2      | -4.5    | 28.8         | 27.8      | 26.0      | 24.5    |

表 2 不同  $P$  与  $\epsilon$  组合下的  $T_b$  及  $T_s$

| $\epsilon/\%$ | $T_b/\%$  |           |           |         |       | $T_s/\%$  |           |           |         |      |
|---------------|-----------|-----------|-----------|---------|-------|-----------|-----------|-----------|---------|------|
|               | $P=0.1\%$ | $P=0.2\%$ | $P=0.5\%$ | $P=1\%$ | 平均    | $P=0.1\%$ | $P=0.2\%$ | $P=0.5\%$ | $P=1\%$ | 平均   |
| 10            | 2.53      | 1.21      | -0.80     | -0.70   | 0.57  | 4.16      | 2.45      | 1.19      | 0.59    | 2.10 |
| 20            | -0.40     | -1.60     | -2.50     | -2.00   | -1.63 | 3.83      | 2.31      | 0.93      | 0.37    | 1.86 |
| 50            | -8.20     | -7.60     | -4.80     | -3.80   | -6.10 | 3.58      | 3.30      | 0.83      | 0.28    | 2.00 |

注:所有方案的  $T_b$  平均值为 -2.40%,  $T_s$  平均值为 1.99%。

2.31% ~ 4.16% 之间(见表2), L-M法的有效性更优。

对  $P=0.5\%$ ,  $1\%$ , PNT 法偏差绝对值均小于 L-M法负偏绝对值(见表 1 和表 2), PNT 法无偏性始终优于 L-M 法。对平均有效性,  $T_s$  在 0.37% ~ 1.19% 之间(见表 2), PNT 法的有效性略差且接近于 L-M 法。

可见,从设计频率的角度 PNT 法无偏性优于 L-M法, L-M 法有效性优于 PNT 法。但估计 200 年一遇以下的设计值时, PNT 法有效性与 L-M 法接近, 无偏性优势明显, 因而估计效果更好。

2.3.2 污染比例的影响

将 4 种概率作为一个整体分析, 无偏性与有效性的平均值取 4 种概率的加权平均。

$\epsilon=10\%$  时,  $T_b=0.57\%$ , 由于 PNT 法计算结果多为正偏, L-M 法多为负偏, 因而两种方法的无偏性能相当;  $T_s=2.1\%$ , L-M 法有效性占优, 因此, 在  $\epsilon=10\%$  时, L-M 法的统计性能更优。

$\epsilon=20\%$  时,  $T_b=-1.63\%$ ,  $T_s=1.86\%$ , PNT 法无偏性优势与 L-M 法有效性优势相当, 因此, 在  $\epsilon=20\%$  时, PNT 法与 L-M 法的统计性能相当。

$\epsilon=50\%$  时,  $T_b=-6.10\%$ ,  $T_s=2.00\%$ , PNT 法无偏性优势相对 L-M 法有效性优势更加突出, 因此在  $\epsilon=50\%$  时, PNT 法统计性能更优。

可见,  $\epsilon=10\%$  时, L-M 法占优;  $\epsilon=50\%$  时, PNT 法占优,  $\epsilon=20\%$  时, PNT 法与 L-M 法相当, 即随着污染比例增加 PNT 法的相对性能也增加。不同  $\epsilon$  时, 随着样本数的增加, 无偏性变化不大, 有效性有较大提高。

3 结 论

a. 对  $\epsilon=10\%$ ,  $20\%$ ,  $50\%$  样本的研究表明, PNT 法的整体无偏性优于 L-M 法, 并与  $\epsilon$  及  $P$  都有关。当  $P$  不变时, 随着  $\epsilon$  的增加, PNT 法的无偏性优于 L-M 法的可能性也越大; 当  $\epsilon$  不变时, 随着  $P$  的增大(重现期的减小), PNT 法的无偏性优于 L-M 法的可能性也越大。而样本容量对无偏性大小的影响较小。

b. PNT 法的整体有效性比 L-M 法略差, 也与  $P$  及样本数有关。当  $P=0.1\%$ ,  $0.2\%$  时, 有效性 L-M 法优于 PNT 法; 当  $P=0.5\%$ ,  $1\%$  时, 有效性 PNT 法比 L-M 法略差但差距较小。  $P$  不变时,  $\epsilon$  对有效性的影响较小, 以 L-M 法占优, 但两者差距较小。随着样本容量的增加, PNT 法与 L-M 法的有效性均得到较大改善。特别地, 对  $C_s$  较大的情况(如  $C_s \geq 4.0$ ), PNT 法的有效性优于 L-M 法。

c. 从稳健性的角度, PNT 法与 L-M 法都是较为稳健的估计方法。不同  $P$  与  $\epsilon$  的组合(下转第 70 页)



分控制水平,研究水肥交互作用对烟草光合、蒸腾、矿物质营养吸收、叶水势、棵间蒸发、产量和品质及土壤生态环境的影响。

通过对蒸渗仪、田间试验观测数据(土壤、水文、气象)和试验结果进行整编,建立烟草灌溉制度、施肥量与烟草产量和品质的动态模型,提出烟草高产优质和降低地下水  $\text{NO}_3^-$ -N 污染的水肥管理模式。

5 结 语

我国烟草种植为了达到丰产优质的目的,一直采用充分灌水,看天、看地、看烟施肥的传统种植方法,造成了水肥的极大浪费.将有限灌溉、调亏灌溉、控制灌溉等节水灌溉技术和方法引入烟草生产并推广运用,建立起指导烟草节水灌溉所需的土壤水分、烟草叶水势等量化指标,并进一步研究节水灌溉制度下烤烟的水肥交互作用;利用水肥耦合作用原理,将灌溉与施肥有机地协调起来,达到既节水节肥、增产增收,又能保护资源和生态环境,并进一步提高我国烟草的等级和质量,保障烟草生产的可持续发展的目的。

参考文献:

[1] 瞿天镇,郭月清.烟草栽培[M].北京:中国农业出版社,1996.  
[2] 汪德水.旱地农田肥水协同效应与耦合模式[M].北京:气象出版社,1999.  
[3] 金文华,刘金海,鲁家鑫,等.烤烟节水灌溉试验与示范[J].烟草科技,2002(11):39—41.  
[4] Sifola M I, Postiglione L. The effect of nitrogen fertilization and irrigation on dry matter partitioning, yield and quality of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) burley type[J]. Agric Med, 2002, 132: 33—34.

(上接第 17 页)情况表明: $\epsilon = 50\%$  时, PNT 法占优; $\epsilon = 10\%$  时, L-M 法占优; $\epsilon = 20\%$  时, 当  $P = 0.5\%$ ,  $1\%$  时, PNT 法占优, 当  $P = 0.1\%$ ,  $0.2\%$  时, L-M 优.按稳健性指标衡量,与 L-M 法相比, PNT 法对 200 年一遇以下或者  $\epsilon$  较大时设计值的估计,效果更好。

参考文献:

[1] 丛树铮,谭维炎,黄守信,等.水文频率中参数估计方法的统计试验研究[J].水利学报,1980(3):1—11.  
[2] 马秀峰.计算水文频率参数的权函数法[J].水文,1984(3):1—11.  
[3] 梁忠民,宁方贵,王钦钊.权函数水文频率分析方法的一种应用[J].河海大学学报(自然科学版),2001,29(4):95—98.  
[4] Ding J, Yang R F. The determination of probability weighted moments with the incorporation of extraordinary values into

[5] Cao Z H, Miner G S, Wollum. Effect of nitrogen source and soil acidity on nitrogen use efficiency and growth of flue cured tobacco[J]. Tobacco Sci, 1992, 36: 57—60.  
[6] 汪耀富,孙德梅,李群平,等.有机肥与无机肥配施及灌水对烤烟养分含量及产量、品质的影响[J].河南农业大学学报,2003,37(7):237—252.  
[7] 张秋英,刘晓冰,金剑,等.水肥耦合对大豆光合特性及产量品质的影响[J].干旱地区农业研究,2003,21(1):47—49.  
[8] Rajput R L, Kaushik J P, Verma O P. Consumptive water use efficiency and moisture extraction pattern of soybean as influenced by irrigation, phosphorus and row spacing[J]. Haryana Journal of Agronomy, 1991, 7(1): 1—6.  
[9] 钱蕴璧,李英能,杨刚,等.节水农业新技术研究[M].郑州:黄河水利出版社,2002.  
[10] 张和平,刘晓楠.黑龙江地区冬小麦生产中水肥关系及其优化灌水施肥模型研究[J].干旱地区农业研究,1992,10(1):32—38.  
[11] 孙志强.陇东旱地水肥产量效应研究[J].干旱地区农业研究 1992,10(4):57—61.  
[12] 李世清,李生秀.水肥配合对玉米产量和肥料效果的影响[J].干旱地区农业研究,1991,12(1):47—53.  
[13] 韩锦峰,史宏志,官春云,等.不同施氮水平和氮素来源烟叶碳氮比及其与碳氮代谢的关系[J].中国烟草学报,1996,3(1):19—15.  
[14] 周冀衡,朱显灵,汪邓民.不同氮肥形态、浓度对烟草生长和钾素吸收影响的研究[J].中国烟草学报,1996,3(1):70—73.  
[15] 韩锦峰,史宏志,王彦亭,等.不同氮量和氮源的烟叶高级脂肪酸含量及其与香吃味的关系[J].作物学报,1998,24(1):125—128.  
[16] 冯柱安,彭桂芬.不同氮素形态对烤烟品质影响的研究[J].中国烟草科学,1998(4):11—15.  
[17] 郭培国,陈建军,郑燕玲.氮素形态随烤烟光合特性影响的研究[J].植物学通报,1999,16(3):262—267.

(收稿日期:2004-09-17 编辑:骆超)

sample data and their application to estimating parameters for the pearson type three distribution[J]. Journal of Hydrology, 1988, 101: 63—81.

[5] Hosking J R M, Wallis J R. Regional frequency analysis—an approach based on L-Moment[M]. London: Cambridge University Press, 1997.  
[6] 陈元芳,王庆荣,沙志贵.线性矩法在长江中下游区域水文频率计算中的应用[J].河海大学学报(自然科学版),2003,31(2):207—211.  
[7] 李国英.稳健估计的发展概况[J].数理统计与应用概率,1987,2(3):368—384.  
[8] 梁忠民,许大明.洪水频率分析稳健性方法研究[J].水科学进展,1997,8(2):154—160.  
[9] Tung Y K. Polynomial normal transforms in uncertainty analysis [A]. Melcers, Stewart. Applications of Statistics and Probability [C]. Rotterdam: Balkema, 2000. 167—173.

(收稿日期:2004-04-08 编辑:骆超)