

洪水预报误差置信限与误差评定方法研究

李致家¹, 菅瑞卿², 薛清敏³, 周 轶¹

(1. 河海大学水资源环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 黄河水利职业技术学院, 河南 开封 475001; 3. 故县水利枢纽管理局, 河南 三门峡 472000)

摘要 在实时洪水预报调度中,洪水预报误差的统计特性和误差置信限对调度风险的确定影响较大.为此,以三花间伊河卢氏流域为例研究了洪水预报误差的统计特性和误差置信限问题.结果表明,洪水预报误差通常具有有偏概率分布的特点,用现行水情预报精度标准及误差置信限评定方法对其进行评定时可能会出现两种不同的结果,但误差置信限评定方法比现行水情预报精度标准更为严格.

关键词 洪水预报误差 有偏概率分布 置信限 等级评定
中图分类号:P338 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2005)01-0032-05

在实时洪水预报调度中,洪水预报误差的统计特性和误差置信限对调度风险的确定影响较大.因此,本文在三花间伊河卢氏流域洪水预报的基础上研究了误差置信限及误差置信限评定方法,并将误差置信限评定结果与现行水情预报精度标准^[1]评定结果进行了比较.

1 现行洪水预报评定方法

流域洪水预报精度评定内容包括洪峰流量、峰现时间和洪量等.洪水预报误差指标有绝对误差、相对误差和确定性系数 3 种.预报误差小于许可误差时为合格预报.合格预报次数与预报总次数之比为合格率,用 QR 表示.所谓许可误差,是指根据预报成果使用要求和实际预报技术水平等综合确定的最大允许误差.

在采用降雨径流进行预报的情况下,在洪峰流量预报中,以实测洪峰流量的 20% 作为其许可误差;在峰现时间预报中,以预报洪峰时间与实测洪峰时间之差的 30% 作为其许可误差;在径流深预报中,以实测值的 20% 作为其许可误差.

根据现行水情预报精度标准^[1]划分的预报精度等级如表 1 所示.

表 1 预报精度等级划分

Table 1 Classification of forecasting precision

指标	等 级		
	甲	乙	丙
QR	$QR \geq 85.0\%$	$85.0\% > QR \geq 70.0\%$	$70.0\% > QR \geq 60.0\%$
DC	$DC \geq 0.90$	$0.90 > DC \geq 0.70$	$0.70 > DC \geq 0.50$

注:DC 为确定性系数.

2 误差置信限及采用误差置信限进行评定的标准

在研究洪水预报模型的可靠性以及将洪水预报结果应用于洪水调度时,需要知道洪水预报误差的统计特性,如均值、方差、误差概率分布以及误差的各种概率置信限等^[2].

假设洪水预报误差为正态分布,若洪峰流量误差系列为 $Q_{mi} (i = 1, \cdots, m; m \text{ 为洪水次数})$,则其均值和均方差为

$$\bar{Q}_m = \sum_{i=1}^m Q_{mi} / m \tag{1}$$

$$\sigma_{Q_m} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (Q_{mi} - \bar{Q}_m)^2}{m}} \tag{2}$$

假定洪峰流量误差系列服从正态分布,则洪峰流量常见的几种误差置信限如表 2 所示.

用误差置信限估计可以对洪水预报方案进行评定,因此本文建议采用表 3、表 4 所示的误差置信限进行误差等级评定.

表 2 洪峰流量误差的常见置信限

置信概率/%	置信下限	置信上限
68.0	$\bar{Q}_m - 1.000\sigma_{\bar{Q}_m}$	$\bar{Q}_m + 1.000\sigma_{\bar{Q}_m}$
86.7	$\bar{Q}_m - 1.500\sigma_{\bar{Q}_m}$	$\bar{Q}_m + 1.500\sigma_{\bar{Q}_m}$
90.0	$\bar{Q}_m - 1.645\sigma_{\bar{Q}_m}$	$\bar{Q}_m + 1.645\sigma_{\bar{Q}_m}$
95.6	$\bar{Q}_m - 2.000\sigma_{\bar{Q}_m}$	$\bar{Q}_m + 2.000\sigma_{\bar{Q}_m}$

表 3 置信概率为 65%,70% 和 85% 的误差置信限

置信概率/%	置信下限	置信上限
65	$\bar{Q}_m - 0.935\sigma_{\bar{Q}_m}$	$\bar{Q}_m + 0.935\sigma_{\bar{Q}_m}$
70	$\bar{Q}_m - 1.040\sigma_{\bar{Q}_m}$	$\bar{Q}_m + 1.040\sigma_{\bar{Q}_m}$
85	$\bar{Q}_m - 1.435\sigma_{\bar{Q}_m}$	$\bar{Q}_m + 1.435\sigma_{\bar{Q}_m}$

通常假设洪水预报误差系列服从正态分布,但实际上洪水预报误差系列为有偏的概率分布. 因此,本文给出了伊河故县水库入库站预报流量过程各种误差的偏态系数(表 5)及其径流深相对误差和洪峰流量相对误差的频率直方图(图 1、图 2).

表 4 采用误差置信限的预报精度等级划分

甲	乙	丙
置信概率为 85% 的误差置信限上、下限小于 20%	置信概率为 85% 的误差置信限上、下限至少有一个大于 20%,但置信概率为 70% 的误差置信限上、下限小于 20%	置信概率为 70% 的误差置信限上、下限至少有一个大于 20%,但置信概率为 60% 的误差置信限上、下限小于 20%

表 5 卢氏站大中洪水误差统计特征值

误差项目	均值	方差	偏态系数
峰现时间误差	-0.56	2.20	0.78
洪峰流量相对误差	4.24	11.18	0.52
3 d 洪量相对误差	-2.56	9.31	-0.74
5 d 洪量相对误差	-0.45	9.96	-0.44
7 d 洪量相对误差	-0.31	10.04	-0.40
总径流深相对误差	-0.36	9.54	-0.32

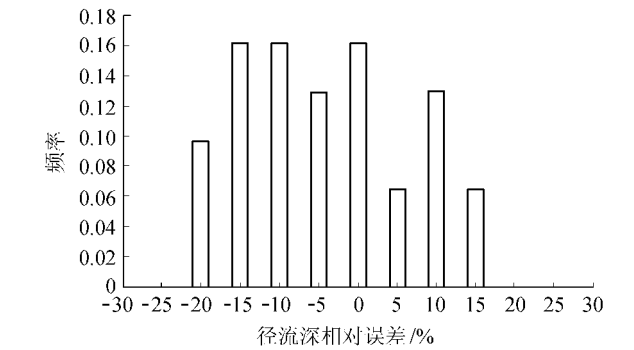


图 1 卢氏站径流深相对误差频率统计

Fig.1 Frequency distribution of relative error of runoff depth for Nushi station

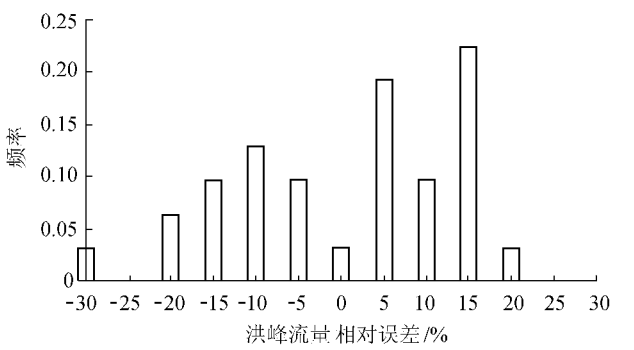


图 2 卢氏站洪峰流量相对误差频率统计

Fig.2 Frequency statistics of relative errors of peak flood for Nushi station

目前,就偏态分布而言,适用于洪水预报误差的分布难以找到. 水文学上常用的分布中,t 分布是无偏的,正态分布虽然有偏,但要求变量大于零,显然不适用于洪水预报误差概率分布;P-Ⅲ型分布虽然可以有偏,但要求有下限,也不适用. 为此,本文研究了洪水预报误差的置信限,并提出了洪水预报误差概率分布有偏性的观点.

就洪水预报精度评定而言,用现行水情预报精度标准评定的结果与用误差置信限方法评定的结果是有差别的,即按现行水情预报精度标准评定可以达到甲级预报标准的,而用置信限方法未必能达到. 这说明采用误差置信限方法进行评定更为合理. 现以实例说明误差置信限评定方法的合理性.

3 实 例

3.1 流域介绍

故县水库是黄河三花间伊河流域(面积 5 340 km²)上游的大型水库,入库站卢氏流域面积 4 623 km²,上游

站灵口流域面积 2476 km². 根据遥测站网分布,灵口以上流域分为 7 块,其中卢氏—灵口分为 5 块,故县—卢氏分为 2 块. 本文重点研究入库站卢氏的洪水预报精度的评定问题.

3.2 新安江模型的率定和检验

选择资料条件较好的 31 次洪水对新安江三水源模型^[3]进行率定和检验. 按照现行水情精度预报标准,从洪量、洪峰流量与峰现时间 3 个指标来看,率定和检验的预报精度都达到了甲级标准.

3.3 误差的统计特征

按洪峰流量 900 m³/s 进行划分,确定洪峰流量大于 900 m³/s 的洪水为大洪水,小于 400 m³/s 的洪水为小洪水,介于二者之间的为中洪水,这样共有 12 次大洪水、11 次小洪水和 8 次中洪水. 一般情况下,大洪水和中洪水可合并为一类. 因此,本文将卢氏站大中洪水合并为一类,并给出了其误差统计特征值(表 5)以及径流深和洪峰流量相对误差的频率统计(包括各种洪水)(图 1、图 2). 由图 1、图 2 可以看出,洪水预报误差呈偏态分布.

3.4 误差置信限评定方法与现行水情预报精度标准的比较

实时洪水预报误差置信限取决于预报所需的各种信息都具备的条件下模型本身率定误差的置信限以及这些信息的完整程度,因此首先研究模型率定误差的置信限.

由表 6 中 20 场大中洪水模型率定精度的统计结果可以看出,洪水预报精度达到了甲级标准,其中洪峰流量和洪量合格率达 100%,峰现时间合格率达 90%. 由表 7 可以看出,85%的置信限在合格率范围之内,置信限为 90%时洪峰误差上限超过 20%. 按误差置信限评定方法,预报精度达到了甲级标准.

表 6 卢氏流域新安江模型率定结果

Table 6 Calibrated results of Nushi watershed by use of Xin'anjiang model										
洪水编号	洪水起始时间	雨量/ mm	实测水量/ 亿 m ³	预报水量/ 亿 m ³	总水量相对 误差/%	实测洪峰流 量/(m ³ ·s ⁻¹)	预报洪峰流 量/(m ³ ·s ⁻¹)	洪峰流量相对 误差/%	峰现时间 误差/h	确定性 系数
2	19810904T08	83.0	26.941	28.211	-4.72	1110	1081.3	2.5	1	0.94
3	19820730T15	118.4	20.017	20.333	-1.58	2070	1937.6	6.3	-2	0.92
4	19831002T08	126.0	30.789	25.786	16.24	1390	1174.6	15.4	-3	0.88
6	19831016T08	27.2	11.030	10.537	4.47	424	402.1	5.1	0	0.89
7	19840920T08	63.1	10.863	11.439	-5.31	1520	1267.4	16.6	0	0.93
8	19840925T23	35.9	17.306	18.311	-5.81	830	990.2	-19.4	-1	0.33
9	19870604T08	75.3	7.562	8.025	-6.12	980	1066.0	-8.8	0	0.84
12	19790729T08	82.5	7.698	7.674	0.31	804	736.7	8.3	-5	0.54
13	19850910T08	122.3	17.600	15.606	11.33	687	575.7	16.1	-2	0.89
15	19880809T08	34.8	5.317	5.730	-7.77	424	352.7	16.7	1	0.67
16	19880813T08	39.9	10.452	11.651	-11.48	920	842.1	8.4	1	0.60
17	19880817T08	52.5	14.504	14.451	0.36	1140	1193.4	-4.7	1	0.83
18	19890709T08	103.2	12.309	10.722	12.89	1160	1172.1	-1.1	-1	0.96
20	19890817T08	40.7	8.816	7.933	10.02	472	416.9	11.6	3	0.83
28	19920811T22	32.2	5.421	6.203	-14.45	649	558.4	13.9	0	0.74
29	19920918T08	69.5	11.664	11.679	-0.13	1440	1297.3	9.9	0	0.94
30	19920921T08	23.3	11.877	13.273	-11.76	1287	1374.8	-6.9	3	0.81
34	19960731T08	79.2	11.334	10.310	9.03	536	434.7	19.0	-6	0.60
36	19960916T08	66.0	10.415	8.692	16.54	945	1062.8	-12.5	0	0.78
37	19840923T08	55.9	16.113	17.839	-10.71	1450	1616.4	-11.5	-1	0.60

注 19810904T08 表示 1981 年 9 月 4 日 8 时,其他类推.

表 7 卢氏站大中洪水各种误差的置信区间

Table 7 Confidence intervals of various forecasting errors of large and medium floods for Nushi station								
置信概率 /%	峰现时间绝对误差/h		洪峰流量相对误差/%		3 d 洪量相对误差/%		总洪量相对误差/%	
	下限	上限	下限	上限	下限	上限	下限	上限
65	-3	1.50	-5.78	15.00	-11.26	6.15	-9.28	8.57
70	-3	1.73	-6.93	16.00	-12.24	7.13	-10.28	9.57
85	-4	2.60	-11.23	19.00	-15.92	10.81	-14.05	13.34
90	-4	3.07	-13.51	22.00	-17.88	12.77	-16.05	15.34

现根据表 6 中 20 场大中洪水的洪峰流量误差对 2 种评定标准进行比较。

a. 如果把第 34 次洪水的洪峰流量误差由 19.0% 变为 25.0%, 则按现行标准, 预报精度仍可达到甲级标准, 但当置信限为 85% 时, 洪峰流量误差上限为 22%, 预报精度就达不到甲级标准。

b. 如果把第 20 次洪水的洪峰流量误差由 11.6% 变为 19.0%、第 28 次洪水的洪峰流量误差由 13.9% 变为 19.0%, 则洪峰流量的合格率为 100%, 按现行标准, 预报精度仍可达到甲级标准, 但当置信限为 85% 时, 洪峰流量误差上限为 23%, 预报精度就达不到甲级标准。

c. 如果把第 8 次洪水的洪峰流量误差由 - 19.4% 变为 - 22.0%、第 36 次洪水的洪峰流量误差由 - 12.5% 变为 - 25.0%, 则洪峰流量的合格率为 90%, 按现行标准, 预报精度仍可达到甲级标准, 但当置信限为 85% 时, 洪峰流量误差上限为 21% (> 20%), 预报精度就达不到甲级标准。

d. 如果把第 7 次洪水的洪峰流量误差由 16.6% 变为 25.0%、第 8 次洪水的洪峰流量误差由 - 19.4% 变为 - 25.0%, 则洪峰流量的合格率为 90%, 按现行标准, 预报精度仍可达到甲级标准, 但当置信限为 85% 时, 洪峰流量误差上限为 21%, 预报精度就达不到甲级标准。

3.5 实时洪水预报误差置信限与精度等级

模型率定就是在降雨资料完整的情况下模拟实际发生的水文过程, 其方案置信区间是静态的。但实时洪水预报是在降雨资料欠缺的情况下进行的, 其预报结果的置信区间是动态的, 即随预见期的变化而变化。本文以卢氏站大洪水为例进行了研究, 结果如表 8 ~ 表 10 所示。

表 8 卢氏站实时洪水预报预见期与误差

Table 8 Predicted period and error of real-time flood forecasting for Nushi station

洪水 编号	预报时间	实测峰现时间	预见期/ h	洪量相对 误差/%	峰现时间 误差/h	洪峰流量相对 误差/%	确定性 系数
2	19810907T09	19810907T15	6	3.0	1	14.86	0.89
3	19820801T06	19820801T11	5	5.9	- 2	7.44	0.90
4	19831005T01	19831005T05	4	0.0	0	6.40	0.97
7	19840922T10	19840922T18	8	16.5	0	6.86	0.97
9	19870605T08	19870605T15	7	- 8.4	0	16.81	0.85
16	19880814T12	19880814T20	8	- 1.6	- 1	- 15.66	0.50
17	19880818T12	19880818T22	10	- 7.0	0	- 1.38	0.75
29	19920920T03	19920920T10	7	9.8	0	4.51	0.98
30	19920922T01	19920922T09	8	- 7.2	2	- 9.40	0.89
36	19960917T14	19960917T19	5	- 12.8	0	10.65	0.89

a. 如果把第 2 次洪水的洪峰流量误差由 14.86% 变为 19.70%、第 9 次洪水的洪峰流量误差由 16.81% 变为 19.90%, 则洪峰流量的合格率为 100%, 按现行标准, 预报精度仍可达到甲级标准, 但当置信限为 85% 时, 洪峰流量的误差上限为 21%, 预报精度就达不到甲级标准。

b. 如果把第 2 次洪水的洪峰流量误差由 14.86% 变为 23.00%、第 16 次洪水的洪峰流量误差由 - 15.66% 变为 - 19.00%, 则洪峰流量的合格率为 90%, 按现行标准, 预报精度仍可达到甲级标准, 但当置信限为 85% 时, 洪峰流量的误差上限为 22%, 预报精度就达不到甲级标准。

表 10 卢氏站实时洪水预报特征值误差置信区间

Table 10 Confidence interval of statistical characteristics of real-time flood forecasting for Nushi station

置信概率/ %	峰现时间误差/%		洪峰流量误差/%		总量误差/%	
	下限	上限	下限	上限	下限	上限
65	- 1	0.93	- 5.00	13	- 8.28	7.91
70	- 1	1.03	- 6.02	14	- 9.19	8.82
85	- 1	1.43	- 9.86	18	- 12.61	12.24
90	- 2	1.64	- 11.91	20	- 14.43	14.06

表 9 卢氏站实时洪水预报误差统计特征值

Table 9 Statistical characteristics of real-time flood forecasting errors for Nushi station

误差项目	均值	方差	偏态系数
峰现时间误差	- 0.01	1.00	0.00
洪峰流量相对误差	4.10	9.73	0.72
总径流深相对误差	- 0.18	8.65	0.42

洪峰流量的误差上限为 22%, 预报精度就达不到甲级标准。

4 结 语

洪水预报误差是由资料误差、模型结构、模型参数、人类活动影响及预见期内降雨的不确定性等因素引起的^[4-8]。在实时洪水调度中, 洪水预报误差的统计特性和误差置信限对调度风险的确定影响较

大. 本文结合黄河支流伊河流域对该问题进行了研究, 并得到如下结论:

- a. 洪水预报误差服从正态分布的假定通常是不成立的, 洪水预报误差的概率分布通常是有偏的.
- b. 目前还没有一种适用于洪水预报误差分布的偏态概率分布线型.
- c. 现行的水情预报精度标准与误差置信限方法有一定的差别. 按现行标准评定可以达到甲级标准的方案, 用置信限方法评定未必能达到. 这说明用误差置信限方法来评定洪水预报方案则更为严格.

参考文献:

- [1] SL250—2000 水文情报预报规范[S].
- [2] 王俊德. 水文统计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1992. 11—14.
- [3] 赵人俊. 流域水文模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983. 3—10.
- [4] ANDERSON M G, BURT T P. Hydrological forecasting[M]. New York: John Wiley & Sons, 1985. 438—500.
- [5] DAVID R. Handbook of hydrology[M]. New York: McGraw-Hill, 1993. 10.1—10.20, 26.1—26.15.
- [6] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models: 1. a discussion of principles[J]. J Hydrol, 1970, 10: 282—290.
- [7] 邓孺孺, 陈晓翔, 胡细凤, 等. 遥感和 GIS 支持下的平原河网区暴雨产流模型研究[J]. 水文, 1999, (3): 19—20.
- [8] 胡彩虹, 郭生练, 彭定志, 等. 半干旱半湿润地区流域水文模型分析比较研究[J]. 水资源研究, 2003, 24(3): 1—4.

Methods for evaluation of errors and their confidence intervals for flood forecasting

LI Zhi-jia¹, GUAN Rui-qing², XUE Qing-min³, ZHOU Yi¹

- (1. College of Water Resources and Environment, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;
2. Yellow River Water Conservancy Vocational College of Technology, Kaifeng 475001, China;
3. Guxian Water Resources Bureau, Sanmenxia 472000, China)

Abstract In real-time flood forecasting and regulation, the statistical characteristics of flood forecasting errors and their confidence intervals are of great influence on the determination of risk of flood regulation. By study of the statistic characteristics of flood forecasting errors and their confidence intervals for Nushi watershed at Sanhuajian of the Yellow River and on the basis of a comparison of the precision criterion currently used for flood forecasting with the result of the error confidence interval method, it is concluded that the error of flood forecasting is of the characteristic of skew probability distribution, and that the evaluated results of forecasting errors are different by the above two methods. In the evaluation of forecasting errors, the error confidence interval method is stricter than the precision criterion currently used.

Key words error of flood forecasting; skew probability distribution; confidence interval; class assessment