

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.01.002

考虑降雨不确定性的洪水概率预报方法

梁忠民¹, 蒋晓蕾¹, 曹炎煦², 彭顺风³, 王凯³, 王栋¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 淮河水利委员会水资源处, 安徽 蚌埠 233000;
3. 淮河水利委员会水文局(信息中心), 安徽 蚌埠 233001)

摘要: 基于流域雨量站网布设的抽站法原理, 推导以面雨量计算值为条件的面雨量真值的概率分布, 用以描述现有测站数目条件下流域面雨量计算的不确定性。在此基础上, 结合确定性预报模型, 展开洪水概率预报研究。以淮河黄泥庄流域为研究对象, 对该方法进行应用, 结果表明: 该方法不仅可以实现任一时段流域面雨量真值概率分布的估计, 描述面雨量计算的不确定性; 同时, 通过与水文模型(如新安江模型)耦合, 结合 Monte-Carlo 抽样技术, 可以实现预报流量概率分布的估计, 从而实现洪水概率预报。

关键词: 抽站法; 面雨量; 降雨不确定性; Monte-Carlo 抽样; 洪水概率预报; 新安江模型; 淮河黄泥庄流域
中图分类号: P338 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2016)01-0008-05

Probabilistic flood forecasting considering rainfall uncertainty

LIANG Zhongmin¹, JIANG Xiaolei¹, CAO Yanxu², PENG Shunfeng³, WANG Kai³, WANG Dong¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Department of Water Resources, Huaihe Water Conservancy Committee, Bengbu 233000, China;
3. Bureau of Hydrology, Huaihe Water Conservancy Committee, Bengbu 233001, China)

Abstract: Based on the principle of the rainfall station sampling method, the probability distribution of the true value of areal rainfall was deduced, using the estimated areal rainfall, in order to describe the uncertainty of areal rainfall calculation under the conditions of existing rainfall stations. Then, probabilistic flood forecasting was performed in combination with deterministic prediction models. Application of this method to the Huangnizhuang Basin of the Huaihe River shows that it can obtain estimates of the probability distribution of the true value of areal rainfall for any periods of time in the basin and describe the uncertainty of the areal rainfall calculation. Furthermore, using a hydrologic model (e.g., the Xinanjiang model) and the Monte-Carlo sampling technique, the probability distribution of the predicted flow rate can be estimated, and probabilistic flood forecasting can be carried out.

Key words: station sampling method; areal rainfall; rainfall uncertainty; Monte-Carlo sampling; probabilistic flood forecasting; Xinanjiang model; Huangnizhuang Basin of Huaihe River

洪水预报不可避免地存在着输入、模型结构和模型参数等不确定性, 这些不确定性的存在必将导致洪水预报结果也具有不确定性^[1-2]。为定量描述各种不确定性对预报结果的影响, 洪水概率预报应运而生^[3-4]。

目前洪水概率预报方法研究主要有 2 类途径^[5]: (a) 总误差分析途径, 即从确定性预报的结果入手, 寻求预报误差与预报量之间的关系, 定量分析其不确定性, 进而实现概率预报^[6-8]; (b) 全要素耦合途径, 识别降雨-径流过程各环节(输入、模型结构、模型参数)的主要不确定性要素, 对各要素进行概率描述, 再通过确

收稿日期: 2015-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(51179046); 水利部公益性行业科研专项(201301066, 201401034); 江苏省普通高校研究生科研创新计划基金(CXZZ12_0240)

作者简介: 梁忠民(1962—), 男, 辽宁凤城人, 教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: zmliang@hhu.edu.cn

定性模型进行耦合,最终实现概率预报^[9-10]。

本文在第二类概率预报途径框架下,研究降雨输入不确定性的概率预报问题。降雨输入不确定性又可以细分为预见期内降雨预报的不确定性及起报点前期面雨量(“落地雨”)计算的不确定性,本文对后者进行着重研究。借用水文站网布设中的抽站法原理,根据雨量站布设数目经验公式反推以面雨量计算值为条件的面雨量“真值”的概率分布,实现面雨量计算不确定性的定量描述;采用 Monte-Carlo 抽样方法,将面雨量计算的不确定性与新安江水文模型进行耦合,估计流量的概率分布,从而实现洪水过程的概率预报。并以淮河黄泥庄流域为对象,进行了示例研究。

1 面雨量计算不确定性概率描述

目前,水文预报中作为模型输入的面雨量是由流域内雨量站点的点雨量计算而来,虽然计算方法在不断改进^[11],但由于雨量站点布设数目有限,由点雨量推求面雨量必然存在因雨量站数目不足或代表性不高而导致的面雨量计算误差。一般可以假设面雨量的计算值 $\bar{P}(t)$ 与实际未知“真值” $\bar{P}_0(t)$ 之间的误差 $\varepsilon(t)$ 服从正态分布^[10]:

$$\varepsilon(t) = \frac{\bar{P}(t) - \bar{P}_0(t)}{\bar{P}_0(t)} \sim N(0, \sigma^2) \quad (1)$$

式中: $N(0, \sigma^2)$ ——均值为 0、方差为 σ^2 的正态分布; t ——面雨量过程的一段时间。

由式(1)可知,当 $\bar{P}(t)$ 已知时, $\varepsilon(t)$ 与 $\bar{P}_0(t)$ 是一一对应的函数关系。

进一步可以推得

$$F(\bar{P}_0(t) | \bar{P}(t)) = 1 - \Phi \left[\frac{\frac{\bar{P}_0(t)}{\bar{P}(t)} - 1}{\sigma} \right] \quad (2)$$

为了估计标准差 σ , 令 $u(t) = (\varepsilon(t) - 0)/\sigma$, 则 $u(t) \sim N(0, 1)$ 。可知(见图 1):

$$\Phi(u_{\alpha/2}(t)) = 1 - \frac{\alpha}{2} \quad (3)$$

可以推得

$$\sigma = \frac{E_\eta}{u_{\alpha/2}(t)} \quad (4)$$

式中: α ——显著性水平; $u_{\alpha/2}(t)$ ——标准正态分布的两侧 α 的分位点; E_η ——保证率为 η ($\eta = 1 - \alpha$) 的允许误差。

综合式(2)和式(4)可知,以 $\bar{P}(t)$ 为条件的 $\bar{P}_0(t)$ 的概率分布为

$$F(\bar{P}_0(t) | \bar{P}(t)) = 1 - \Phi \left[\left(\frac{\bar{P}_0(t)}{\bar{P}(t)} - 1 \right) \frac{u_{\alpha/2}(t)}{E_\eta} \right] \quad (5)$$

由式(5)可知,若得到允许误差 E_η 的估值,即可获得 $\bar{P}_0(t)$ 的条件概率分布的估计,进而实现面雨量计算不确定性的概率描述。

2 基于抽站法原理的降雨不确定性描述方法

面雨量估计误差与流域的地形、地貌、雨量站网布站数目、位置等因素有关。我国根据抽站法原理建立了一定保证率条件下面雨量计算误差与流域地形、地貌、计算时长等因子之间的定量关系,本文据此对前述的允许误差 E_η 进行估计。

2.1 抽站法经验公式

我国曾在江西建立了中国梅雨雨量站网密度试验区,经试验得出了我国湿润区站网密度公式^[12-13]:

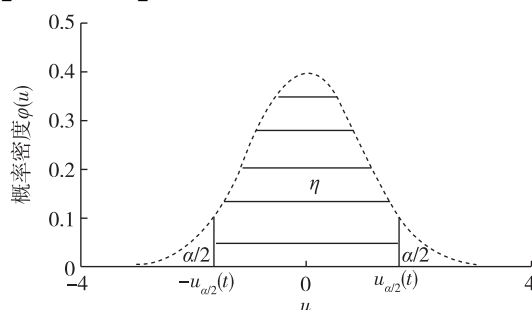


图1 标准正态分布概率密度函数示意图

Fig. 1 Probability density function of standard normal distribution

$$N = 0.137A^{0.257}H^{0.133}T^{-0.169}E_{90\%}^{-0.858} \quad (6)$$

式中: N ——布站数; A ——流域面积, km^2 ; H ——流域平均高程, m ; T ——计算时长, h ; $E_{90\%}$ ——保证率 90% 的允许误差, 取 10%~15%。

式(6)经诸多流域验证, 均得到了满意的结果, 因此, 该公式作为我国中小河流水文站 ($A \leq 2000 \text{ km}^2$) 分析计算雨量站网密度的经验公式, 被广泛使用。

2.2 面雨量“真值”概率分布的估计

利用抽站法经验公式(即式(6)), 在已知雨量站布站数目、降雨计算时长、流域地形因素等情况下, 可以反推 $E_{90\%}$ 。结合式(5), 可以推得以 $\bar{P}(t)$ 为条件的 $\bar{P}_0(t)$ 的概率分布:

$$F(\bar{P}_0(t) | \bar{P}(t)) = 1 - \Phi \left[16.7347 \left(\frac{\bar{P}(t)}{\bar{P}_0(t)} - 1 \right) A^{-0.3} H^{-0.155} T^{0.197} N^{1.166} \right] \quad (7)$$

3 考虑面雨量计算不确定性的洪水概率预报

将式(7)的面雨量概率分析与新安江模型^[14]耦合, 可以得到考虑面雨量计算不确定性的洪水概率预报。具体步骤如下: (a) 从各时段面雨量的概率分布中利用 Monte-Carlo 抽样技术分别抽取一个值, 组成一组面雨量时段序列, 将其作为一场降雨过程的估计值。(b) 将估计的这场降雨过程代入水文模型, 计算得到对应的流量过程。按照上述随机抽样方法抽取 M 次(如 $M = 10000$), 便可得到 M 场流量过程数据。(c) 将每一时段 M 个流量进行频率计算, 即可得到流量的概率分布, 实现洪水过程的概率预报。

4 研究实例

以淮河黄泥庄流域为研究区域, 推求面雨量“真值”的条件概率分布; 采用三水源新安江模型为确定性预报模型, 以 1980—2010 年间 6 场洪水为示例, 进行考虑降雨输入不确定性的洪水概率预报。限于篇幅, 对新安江模型参数的率定检验结果等不做描述。

4.1 面雨量计算不确定性的概率描述

黄泥庄流域面积 $A = 805 \text{ km}^2$, 流域高程为 $H = 479 \text{ m}$, 流域内雨量站个数 $N = 12$, 本次研究计算时长 $T = 1 \text{ h}$ 。由式(7)可得到黄泥庄流域在现有站网条件下面雨量“真值”的条件分布函数为

$$F(\bar{P}_0(t) | \bar{P}(t)) = 1 - \Phi \left(\frac{\left(\frac{\bar{P}(t)}{\bar{P}_0(t)} - 1 \right)}{0.064} \right) \quad (8)$$

对于任意一场降雨过程, 当任一时段的 $\bar{P}(t)$ 已知时, 由式(8)可以推求该时段面雨量“真值”的概率分布函数。以 19830723 号洪水为例, 已知第 6 时段面平均雨量计算值为 20.9 mm, 根据上述方法可以推求该时段面平均雨量“真值”的概率密度函数, 如图 2 所示。

4.2 基于面雨量计算不确定性的洪水概率预报

按前述方法对 6 场洪水进行概率预报, 得到洪水过程任一时段预报流量的概率分布函数。从概念上说, 概率预报的结果有无穷多个, 可以同时从 2 个方面去评价洪水概率预报的优劣: 一是采用分布函数的某一分位数(如期望值或中位数等)作为定值预报结果, 并根据现有对确定性预报的精度评定指标(如确定性系数、洪峰/量误差等)进行评价; 二是提供某一置信度(如 90%)的区间预报结果, 并采用如下指标对区间预报结果进行评价^[15]:

a. 覆盖率(R_c): 预报区间覆盖实测流量数据的比率。 R_c 是最常用的预报区间评价指标。指定置信度下, R_c 值越大, 表明概率预报效果越好。

b. 平均相对带宽(B_R):

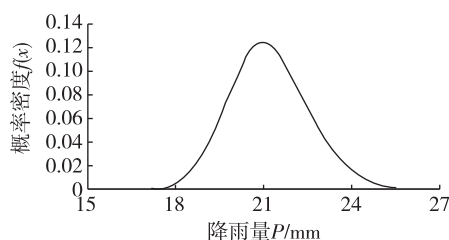


图2 19830723 号洪水降雨过程示意图

Fig. 2 Diagram of rainfall process of flood event no. 19830723

$$B_R = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \frac{q_{ui} - q_{li}}{Q_i} \quad (9)$$

式中: K ——总时段数; q_{ui} 、 q_{li} —— i 时段预报区间的上界和下界, m^3/s ; Q_i —— i 时段实测流量, m^3/s 。

对于指定的置信度,在保证有较高的覆盖率前提下,预报区间的平均相对带宽越窄,预报效果越好。

c. 平均相对偏移度 (D_R)。 D_R 是衡量预报区间的中心线偏离实测流量过程线的程度的指标,平均相对偏移度越小,表示预报区间的对称性越好,预报效果越好。计算公式如下:

$$D_R = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \left| \frac{0.5(q_{ui} + q_{li})}{Q_i} - 1 \right| \quad (10)$$

6 场洪水概率预报结果见表 1。

表 1 基于面雨量计算不确定性的洪水概率预报结果

Table 1 Results of probabilistic flood forecasting based on uncertainty of estimated areal rainfall

洪 号	实测洪峰流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	中位数预报洪峰流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	中位数预报洪峰 相对误差/%	中位数预报 确定性系数	洪峰处置信度为 90% 的 预报区间/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	R_C	B_R	D_R
19830723	2 390	2 360	-1.18	0.94	[2 240, 2 490]	0.42	0.12	0.16
19870501	651	709	8.87	0.90	[631, 790]	0.61	0.14	0.14
19890510	460	470	2.12	0.92	[415, 532]	0.81	0.14	0.04
19950519	631	567	-10.15	0.87	[525, 624]	0.58	0.07	0.03
20030506	635	638	0.45	0.92	[570, 732]	0.84	0.14	0.06
20090629	1 120	1 050	-5.91	0.92	[1 000, 1 110]	0.64	0.11	0.07

由表 1 可以看出:若以预报流量概率分布的中位数作为定值预报,其确定性系数在 0.87 以上,洪峰相对误差基本在 10% 以内,说明具有较高的预报精度。表 1 中各场洪水的 B_R 和 D_R 均较小, R_C 有一定差别,这是因为对特定的场次洪水,不同的不确定性来源对预报结果的影响不同,以表 1 中 R_C 值最大 (0.84) 和最小 (0.42) 的 2 场洪水为例,对 20030506 号洪水而言,若以 R_C 来衡量,则“落地雨”面雨量计算误差这一不确定性要素,可以涵盖预报不确定性的 84%,而 19830723 号洪水仅涵盖了其中的 42%。通过类似分析,可以发现洪水预报不确定性的主要来源,为降低不确定性指明方向。

5 结论与展望

基于抽站法原理,推导了以面雨量计算值为条件的流域面雨量“真值”的概率分布,用以描述面雨量计算的不确定性,并与确定性模型耦合得到流量概率分布的估计,实现洪水的概率预报。得出以下主要结论:

a. 对降雨过程的任一计算时段,当得到面雨量的计算值后,利用推导的公式并结合流域的雨站数量、面积、平均高程等参数,即可估计该时段流域面雨量“真值”的概率分布,以此评估现有测站数目下任一一场降雨过程面雨量计算值的不确定性。

b. 采用 Monte-Carlo 抽样方法将降雨不确定性概率描述与洪水预报模型(如新安江模型)耦合,实现洪水概率预报,不仅可以提供类似于确定性预报模型的定值预报结果(如采用概率预报的期望值或中位数),同时,还可以给出某一置信度的区间预报结果,为防洪决策提供更丰富的预报信息。

c. 虽然本文研究的仅是“落地雨”面雨量计算不确定性估计及洪水概率预报问题,但方法的思路亦可应用于预见期内降雨不确定性的估计。

参考文献:

- [1] 叶守泽,夏军. 水文科学研究的世纪回眸与展望[J]. 水科学进展,2002,13(1):93-104. (YE Shouze, XIA Jun. Century's retrospect and looking into the future of hydrological science[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(1):93-104. (in Chinese))
- [2] 张洪刚,郭生练,李超群,等. 水文预报不确定性研究进展与展望[J]. 石河子大学学报(自然科学版),2006,24(1):15-20. (ZHANG Honggang, GUO Shenglian, LI Chaoqun, et al. Recent advancement and prospect of hydrological forecasting uncertainty study[J]. Journal of Shihezi University(Natural Science), 2006, 24(1):15-20. (in Chinese))
- [3] 王善序. 贝叶斯概率水文预报简介[J]. 水文,2001,21(5):33-34. (WANG shanxu. Bayesian probability hydrological forecast

- [J]. Hydrology, 2001, 21(5):33-34. (in Chinese))
- [4] 徐静,叶爱中,毛玉娜,等. 水文集合预报研究与应用综述[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(1):82-87. (XU Jing, YE Aizhong, MAO Yuna, et al. Review of research and application of hydrologic ensemble forecast[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2014, 12(1):82-87. (in Chinese))
- [5] 梁忠民,戴荣,李彬权,等. 基于贝叶斯理论的水文不确定性分析研究进展[J]. 水科学进展, 2010, 21(2):274-281. (LIANG Zhongmin, DAI Rong, LI Binqun, et al. A review of hydrological uncertainty analysis based on Bayesian theory[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(2):274-281. (in Chinese))
- [6] KRZYSZTOFOWICZ R. Bayesian system for probabilistic river stage forecasting[J]. Journal of Hydrology, 2002, 268(1/2/3/4):69-85.
- [7] 刘章君,郭生练,李天元,等. 贝叶斯概率洪水预报模型及其比较应用研究[J]. 水利学报, 2014, 45(9):1019-1028. (LIU Zhangjun, GUO Shenglian, LI Tianyuan, et al. Comparative study of Bayesian probabilistic flood forecasting models[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(9):1019-1028. (in Chinese))
- [8] 王军,梁忠民,胡义明. BFS在洪水预报中的应用与改进[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(1):52-58. (WANG Jun, LIANG Zhongmin, HU Yiming. Application and improvement of BFS in flood forecasting[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(1):52-58. (in Chinese))
- [9] AJAMI N K, DUAN Qingyun, SOROOSHIAN S, et al. An integrated hydrologic Bayesian multi-model combination framework: Confronting input, parameter, and model structural uncertainty in hydrologic prediction[J]. Water Resources Research, 2007, 43(1):W01403.
- [10] 熊立华,卫晓婧,万民,等. 水文模型两种不确定性研究方法的比较[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(2):137-142. (XIONG Lihua, WEI Xiaojing, WAN Min, et al. Comparison between GLUE and MCMC methods for estimating hydrological model uncertainty[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42(2):137-142. (in Chinese))
- [11] HRACHOWITZ M, WRILER M. Uncertainty of precipitation estimates caused by sparse gauging networks in a small mountainous watershed [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2011, 16(5):460-471.
- [12] 水利部水文局(水利信息中心). 中小河流山洪监测与预警预测技术研究[M]. 北京:科学出版社, 2010:18-41.
- [13] 刘权授,张桂娇,王国栋,等. 江西雨量站网密度公式[J]. 水文, 1997(增刊1):9-14. (LIU Quanshou, ZHANG Guijiao, WANG Guodong, et al. Hydrology bureau of Jiangxi Province[J]. Hydrology, 1997(Sup1):9-14. (in Chinese))
- [14] 赵人俊. 流域水文模拟:新安江模型与陕北模型[M]. 北京:水利电力出版社, 1984.
- [15] XIONG Lihua, WAN Min, WEI Xiaojing, et al. Indices for assessing the prediction bounds of hydrological models and application by generalised likelihood uncertainty estimation[J]. Hydrological Sciences Journal, 2009, 54(5):852-871.

· 简讯 ·

河海大学 2 项科技成果获国家科学技术奖

2016年1月8日,2015年度国家科学技术奖励大会在北京隆重举行。河海大学共有2项成果获奖,其中国家科技进步一等奖1项、国家科技进步二等奖1项。

河海大学为第一完成单位,朱跃龙教授主持,余钟波教授、许峰教授、杨涛教授、李致家教授、冯钧教授、李士进教授等参与的“海量数据驱动的水文多要素监测预报关键技术与应用”获国家科技进步二等奖。项目将海量数据分析技术和水文机理相结合,提出了多源水文数据挖掘同化新方法,建立了智能化多要素水文预报模型,实现了基于云技术的精细化洪水预报、突发水事件连续监测,推动了水文多要素过程模拟理论发展。

河海大学为主要完成单位、顾冲时教授参与的“水库大坝安全保障关键技术研究与应用”荣获国家科技进步一等奖。

(本刊编辑部供稿)