

基于新安江模型的降雨不确定性传播

刘 薇¹,任立良¹,徐 静²,刘晓帆¹

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098 2. 南京大学水科学系, 江苏 南京 210093)

摘要 基于模糊隶属度理论, 结合蒙特卡罗方法, 定量分析了降雨不确定性在新安江模型中的传播特性及其对流量过程的影响。用模糊隶属度函数表示降雨量的不确定性, 用蒙特卡罗方法把 3 h 雨量随机解集为 1 h 数据, 以表征降雨时程分布的不确定性影响。应用新安江模型对褒河流域进行径流模拟。结果表明, 雨量量级大小的不确定性在降雨不确定性中占据主导地位, 降雨时程分布的影响次之。

关键词 降雨; 不确定性; 模糊隶属度函数; 蒙特卡罗方法; 新安江模型

中图分类号: P338 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2009)06-0033-03

Propagation of precipitation uncertainty through the Xinanjiang model

LIU Wei, REN Li-liang, XU Jing, LIU Xiao-fan

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Department of Hydrosociences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract The propagation of precipitation uncertainty through the Xinanjiang model and the effect on the discharge simulation were analyzed quantitatively based on the fuzzy membership grade theory and the Monte Carlo method. The fuzzy membership function was used to describe the uncertainty of precipitation magnitude, and the disaggregation of precipitation from three hours to one hour with the Monte Carlo method characterized the influence of uncertainty of the temporal-spatial distribution. The Xinanjiang model was applied to Baohe catchment for flood simulation. The results show that the effect of precipitation magnitude uncertainty was more significant than that of temporal-spatial distribution.

Key words precipitation; uncertainty; fuzzy membership function; Monte Carlo method; Xinanjiang model

洪水的发生与发展取决于气象因素和地理因素, 是一个相当复杂的动态过程^[1]。水文预报不确定性的来源复杂, 大致可分为 3 类: 输入的不确定性、水文模型结构的不确定性以及参数的不确定性。实时洪水预报中往往采用预测的降水作为输入, 降水不确定性是模型输入不确定性的主要来源。笔者将模糊隶属度理论与蒙特卡罗方法相结合, 定量分析降雨不确定性在新安江模型中的传播特性及其对径流模拟的影响。

1 模糊理论

1.1 模糊集概念

所谓“模糊性”, 是指客观事物中的不分明性和

不确定性, 其根源在于客观事物的差异之间存在着中介过渡。美国控制论专家查德教授于 1965 年首次提出模糊集合的概念, 从而形成了模糊数学这一新的数学分支^[2]。

1.2 隶属度函数的构建

隶属度、隶属度函数是模糊数学赖以建立的基础。模糊数学用隶属度、隶属度函数来描述中介过渡。经典的数学定义为:

所谓给定了论域 U 上的一个模糊集, 是指对于任意 $u \in U$, 都指定了一个数, 称为 μ 对 \tilde{A} 的隶属程度, 映射 $U \rightarrow \mu_{\tilde{A}}(u)$ 称为 \tilde{A} 的隶属度函数。

设论域 U 上的一个模糊子集 \tilde{A} , 分别赋给 \tilde{A} 处于共维条件下差异在中介过渡的两个极点(两极)以

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(2007SHZ1-1); 教育部长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0717); 教育部、国家外国专家局高等学校学科创新引智计划(111 计划)资助项目(B08048)

作者简介: 刘薇(1980—), 女, 山东德州人, 博士研究生, 研究方向为水文学及水资源。E-mail: liuwei800203@hhu.edu.cn

0 与 1 的数,在 0 到 1 中介过渡的数轴上构成一个 $[0, 1]$ 闭区间数的连续统。对于论域 U 中的任意元素 $u, u \in U$, 在该连续统上都指定了一个数 $\mu'_A(u)$, 称为 u 对 \tilde{A} 的绝对隶属度, 映射 $u \rightarrow \mu'_A(u)$ 称为 \tilde{A} 的绝对隶属函数^[3]。

笔者用模糊集理论表征 3 h 累积雨量的不确定性, 假设雨量的变化范围已知, 实测的时段雨量值用 $P_{i,mc}$ 表示, 假设其置信水平为 1, 建立隶属度函数, 见式 (1)。如图 1 所示, 给定一个置信水平 α 就可以由隶属度函数获得雨量集合的上下界 $P_{i,L}$ 和 $P_{i,U}$ 。

$$\mu(P_i) = \begin{cases} 0 & (P_i < P_{i,min}) \\ \frac{P_i - P_{i,min}}{P_{i,mc} - P_{i,min}} & (P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,mc}) \\ \frac{P_{i,max} - P_i}{P_{i,max} - P_{i,mc}} & (P_{i,mc} \leq P_i \leq P_{i,max}) \\ 0 & (P_i > P_{i,max}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{i,max}$ 为各时段雨量的最大值; $P_{i,min}$ 为各时段雨量的最小值; P_i 为实测的时段雨量值。

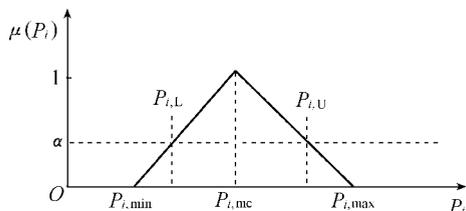


图 1 α 水平截集示意图

2 算法

2.1 蒙特卡罗方法

蒙特卡罗方法是一种应用随机数来进行模拟实验的方法。该方法通过对研究系统的随机观察抽样以及样本值的观察统计, 实现对研究系统的模拟。本文运用蒙特卡罗方法把降雨量进行模糊描述后解集到子时段, 定量分析降雨不确定性在新安江模型中的传播特性。

2.2 计算步骤^[4]

a. 设定雨量模糊集的置信水平 $\alpha \in [0, 1]$, 所有测站的雨量采用同一置信水平 α 。

b. 确定各子流域雨量水平截集的边界值 $P_{i,UB}^{(\alpha)}$ 和 $P_{i,LB}^{(\alpha)}$ 。

c. 随机生成水平截集 α 内的任一雨量值 $P_i^{(\alpha)}$, $i = 1, 2, \dots, m$, 即每个子流域都生成对应的雨量值。

d. 基于蒙特卡罗思想, 生成随机数 b_i , 使得每组 b_i 之和等于 1, 以保证解集后的总雨量保持不变。

e. 利用生成的雨量值 $P_i^{(\alpha)}$ 、系数 b_i 以及方程 (1) 将降雨解集到各子时段。

f. 解集后的雨量作为新安江模型的输入, 从而

得到模型的输出。

g. 重复计算步骤 d ~ f s 次, 即对计算步骤 c 生成的随机雨量解集 s 次, 从而得到 s 种雨量的时间分配方式, 相应的得到 s 个流量过程。

h. 重复计算步骤 c ~ g r 次, 产生 $r \times s$ 个流量值, 然后寻找输出流量的最大值和最小值, 确定流量输出的上下限。

i. 重复计算步骤 b ~ f, 可以获得不同置信水平下输出的上下限, 从而可得到用于分析降雨不确定性对径流过程影响的完整的流量隶属度函数。

3 应用

3.1 流域概况

褒河发源于汉江上游, 是汉江的主要支流, 位于陕西省西南部。褒河流域位于北纬 $33.2^\circ \sim 34.5^\circ$, 东经 $106.5^\circ \sim 107.5^\circ$, 集水面积 3415 km^2 , 海拔高度 $470 \sim 3408 \text{ m}$, 地形较复杂, 气候属于温暖带湿润气候, 具有气候温和、雨量充沛的特点。该流域年平均面雨量为 930 mm , 植被覆盖度较高, 大部分为温带落叶阔叶林和温带落叶灌丛。

3.2 资料处理

采用美国国家地球物理中心的全球 1 km DEM 数据来描述褒河流域的地形分布。运用 DEDNM (digital elevation drainage network model)^[5] 自动生成流域边界和水系, 并将该流域划分为 21 个子流域, 如图 2 和图 3 所示。



图 2 褒河流域边界和水系



图 3 褒河流域子流域

选取该流域内洪号为 8401 的洪水, 运用新安江模型进行模拟^[6], 由实测雨量模拟的流量以及实测流量如图 4 所示。假设构建隶属度函数所采用的各

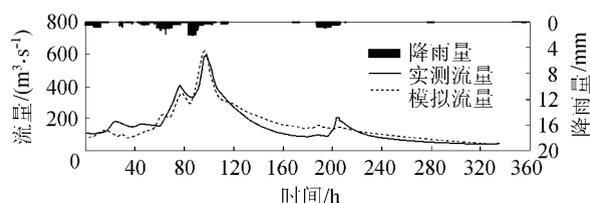


图 4 8401 次洪水实测流量与计算流量过程线比较

时段雨量最大值和最小值分别为实测雨量的 0.7 倍和 1.3 倍^[7]。对摘录的降雨资料线性内插处理成等 3h 的资料,解集到 3 个时段 ($\Delta t = 1$),来探讨降雨不确定性对其模拟流量的影响。

3.3 SCE-UA 优化算法

SCE-UA 优化算法是一种能有效解决非线性约束最优化问题的进化算法,该方法结合了单纯形法、随机搜索和生物竞争进化等优点,可以一致、有效、快速地搜索到水文模型参数的全局最优解^[8-9]。本文采用 SCE-UA 优化算法率定新安江模型的参数。该组参数将应用于各种置信水平 α 的雨量输入下的径流模拟。

3.4 结果分析

采用模糊理论与蒙特卡罗方法相结合的方法将不同置信水平 α 下的 21 个子流域上的 3h 雨量解集为 1h 雨量,并将此 1h 雨量作为新安江模型的输入,计算各种可能的流量过程,搜寻每个时段输出的流量最大值和最小值,从而获得不同置信水平 α 下各时段流量的最大可能变化,以分析降雨量级以及降雨时程分配的不确定性在新安江模型中的传播对于流量过程的影响。

在不解集的情况下,对于给定的置信水平 α ,对应的雨量模糊区间的上下限是确定的,雨量在数量上发生变化,这可以反映降雨量级的不确定性;在解集的情况下,由于解集系数 b 的不断变化,使得降雨不仅仅有数量上的变化,还有时程分布的变化,所以此种解集方法能够反映 2 种不确定性的影响。

$\alpha = 1$ 时,雨量的模糊区间变成一个固定值即降雨实测值。若不解集,则输入一个固定的雨量,得到确定且唯一的流量过程;若解集,由于每个时段每个子流域的雨量采用不同的时间解集模式,因而产生降雨的时程分布变化,虽然不能反映降雨雨量的不确定性,但是能够反映降雨时程分布的不确定性。

$\alpha = 0$ 时,雨量的模糊区间达到最大,雨量可以在最大范围内随机生成。解集后,过程线最大程度地反映了雨量和时程分布不确定性对径流过程的综合影响。

按照前面介绍的算法,随机生成 100 次水平截集 α 内的任意雨量以及 1000 次系数 B ,计算对应时刻的流量最大值与最小值之差,绘制流量之差过程线如图 5 所示。图 5 展示了 $\alpha = 0$ 和 $\alpha = 1$ 时,3h 降雨解集成 1h 后引起的流量变化情况。由上述分析可知, $\alpha = 0$ 的过程线是雨量不确定性和时程分布不确定性的综合反映, $\alpha = 1$ 的过程线只能反映降雨时程分布不确定性对流量过程的影响。由图 5 可以看出, $\alpha = 1$ 时的流量差值明显要比 $\alpha = 0$ 时的流

量差值小。这说明降雨时程分布不确定性对径流过程的影响不如雨量量级不确定性对径流过程的影响大,也就是说,雨量量级大小的不确定性在降雨不确定性中处于主导地位。

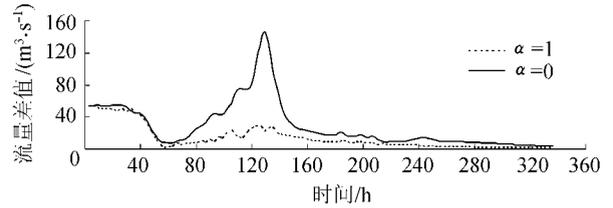
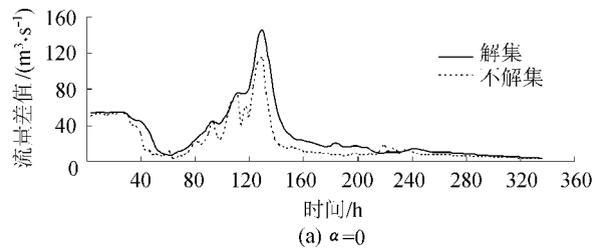
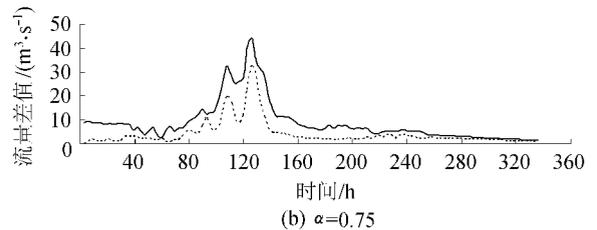


图 5 不同置信水平 α 下的雨量解集后流量差值比较

图 6 比较了 $\alpha = 0$ 和 $\alpha = 0.75$ 时,解集和不解集时洪水过程的变化情况。从图 6 可以看出:不解集的降雨不确定性传播引起的流量变化明显比解集后的小;当置信水平 α 增大时,降雨量级的不确定性逐渐降低,而降雨时程分布引起的不确定性变化不明显。



(a) $\alpha = 0$



(b) $\alpha = 0.75$

图 6 解集与不解集的预报流量不确定性范围比较

4 结论

笔者采用模糊隶属度理论与蒙特卡罗方法相结合的方法量化分析了降雨不确定性的传播及其对新安江模型径流过程的影响,运用模糊隶属度函数表示了降雨量级的不确定性,通过将 3h 雨量随机解集为 1h 雨量的方法来考虑不同时程分布的不确定性影响。结果表明:降雨雨量不确定性传播对径流过程的影响较大,降雨时程分布不确定性次之;当置信水平 α 发生变化时,降雨量级的不确定性也会发生变化,而降雨时程分布不确定性在新安江模型中的传播与置信水平 α 无关,主要受制于流域特征和洪水属性。由于洪水的发生发展是一个复杂的动态过程,不同流域的气候条件以及下垫面情况都有所不同,因此笔者运用模糊集概念表述雨量的不确定性时所假设的系数,有待进一步研究。

(下转第 75 页)

由此可见,原水作为电解质,流经合金滤料 KDF 时水的电势会发生急剧变化,在还原环境下,就会将水中的重金属离子还原为不溶性金属而去除掉,而且电极电势差越大,相应离子的去除率也越高。

4 结 论

a. 合金滤料 KDF 对自来水中微量重金属离子铅、铬和镉的去除率分别达 77.9%、86.5% 和 70.1%,其出水浓度远低于 GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》中的限值,可使处理后出水水质得到极大改善,提高了饮用水的安全性。

b. 在控制滤速为 45m/h 条件下,KDF 滤柱连续运行对自来水中铅、铬和镉有稳定的去除效果,保证了出水的安全性。

c. KDF 对水中重金属离子铅、铬和镉的去除率排序为:铬大于铅大于镉,去除率与各离子电极电势

差成正比。电极电势差越大,相应离子的去除率也越高。

参考文献:

- [1] 崔玉川,傅涛.我国城市给水发展现状与特点[J].中国给水排水,1999,15(2):52-54.
- [2] 马军,余敏,刘伟.高锰酸钾预处理去除饮用水中微量铅效能研究[J].哈尔滨建筑大学学报,2000,33(3):35-38.
- [3] ZAHIR F,RIZWI S J,HAQ S K,et al. Low dose mercury toxicity and human health[J]. Environmental Toxicology and Pharmacology,2005(20):351-360.
- [4] 张寿恺,邱梅.KDF 过滤器设计[J].给水排水,1998,24(4):56-58.
- [5] 尤朝阳,童艳,王圣.KDF 滤料处理含重金属及苯酚污染物的研究[J].给水排水,2005,31(5):58-61.
- [6] 傅献彩.物理化学[M].5版.北京:高等教育出版社,2006:485-486.

(收稿日期 2008-10-10 编辑 高渭文)

(上接第 35 页)

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 周浩亮.模糊数学基本理论及其应用[J].建井技术,1994(4):70-73.
- [3] 陈守煜.复杂水资源系统优化模糊识别理论与应用[M].长春:吉林大学出版社,1998:21-25.
- [4] 徐静.水文参量空间尺度转换方法及不确定性研究[D].南京:河海大学,2008.
- [5] MARTZ W,GARBRECHT J. Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from digital elevation models

[J]. Computers and Geosciences,1992,18(6):747-761.

- [6] 任立良.流域数字水文模型研究[J].河海大学学报:自然科学版,2000,28(4):1-7.
- [7] SHREEDHAR M,VINCENT G,ROLAND K P. Treatment of precipitation uncertainty in rainfall-runoff modeling: a fuzzy set approach[J]. Advances in Water Resources,2004,27:889-898.
- [8] DUAN Q Y,GUPTA V K,SOROOSHIAN S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization[J]. Journal of Optimization Theory and Application,1993(3):501-521.
- [9] DUAN Q Y,SOROOSHIAN S,GUPTA V K. Optimal use of the SCF-UA global optimization method for calibration watershed model[J]. Journal of Hydrology,1994(3):265-284.

(收稿日期 2009-07-05 编辑 陈吉平)

(上接第 57 页)

d. 对周边宾馆和酒店进行严格管理,严禁污水和废物直接排入湖泊,加强对游客环保意识的教育。

总之,镜泊湖水质下降,富营养严重,应引起有关部门高度重视。不能仅考虑眼前的经济利益,以牺牲环境为代价,应从长远的利益考虑,有计划、有秩序地开发,合理利用湖泊环境资源。只有这样,才能保持水资源的可持续利用。

参考文献:

- [1] 刁淑荣.白洋淀营养状况调查与研究[J].水资源保护,1996(4):50-53.

- [2] 韩小勇.巢湖水质调查与研究[J].水资源保护,1998(1):24-28.
- [3] 吕兰军.鄱阳湖富营养化评价[J].水资源保护,1994(3):47-53.
- [4] 李文奇,蔡金榜,逢勇,等.洋河水库富营养化评价及防治对策[J].水资源保护,2007,23(2):16-19.
- [5] 王建中,刘凌.坡面氮、磷流失特征分析及预测[J].河海大学学报:自然科学版,2007,33(4):359-363.
- [6] 庞清江,李白英.东平湖水体富营养化评价[J].水资源保护,2003(5):42-44.
- [7] 周祖光.海南省水资源现状与开发利用[J].水利经济,2004,22(4):35-38.

(收稿日期 2008-10-31 编辑 徐娟)