

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.02.004

基于水文倒推法的中小洪水过程模拟

杨哲¹,张行南^{1,2},夏达忠^{1,2}

(1.河海大学水文水资源学院,江苏南京 210098;
2.河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心,江苏南京 210098)

摘要: 为了改善传统的中小洪水模拟方法中对洪水过程模拟精度较低的问题,用水文倒推法对研究区域出口断面的流量过程进行模拟。鉴于流域枯季径流缓慢变化的特点,基于水量平衡方程,对时段平均的径流量与径流变化量的相关关系进行推导,建立了基于水文倒推法的中小洪水模拟方程,并推出方程的适用范围。通过清江流域 1989—1995 年的场次洪水过程模拟,结果表明:洪水过程模拟效果较好,涨水和退水趋势与实测流量基本无差异,退水过程的拟合程度优于涨水过程;模拟洪峰精度符合要求。与传统洪水模拟方法和枯季径流预报方法相比,该方法计算简单,并能以过程线的方式描述中小洪水的洪峰量级,为水库调度提供科学的决策依据。

关键词: 枯季径流;水文倒推方程;中小洪水模拟;清江流域

中图分类号: P334⁺.92 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2014)02-0114-04

Simulation of small and medium-scale floods by doing hydrology backwards

YANG Zhe¹, ZHANG Xingnan^{1,2}, XIA Dazhong^{1,2}

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to improve the precision of the simulation of small and medium-scale floods when using traditional methods, we used a method of doing hydrology backwards to simulate the flow at the outlet cross-section of the study area. Based on the characteristics of slowly-varying low flow in the study basin, we deduced the relationship between the average runoff of a period and the changing rate of the average runoff using the water balance equation, established an equation for the simulation of small and medium-scale floods based on doing hydrology backwards, and deduced the application range of the equation. The simulation of floods over the Qingjiang River Basin during the period from 1989 to 1995 showed that the simulated rising and recession trends agreed with observed data, the recession curves were better fitted than the rising curves, and the precision of the simulation of flood peaks met the requirements. Compared with traditional flood simulation methods and low-flow forecasting methods, the proposed method can be easily used for calculation and can describe the magnitude of peak flows of small and medium-scale floods using flood hydrographs, providing a scientific decision-making basis for reservoir operation.

Key words: low flow; hydrology backwards; small and medium-scale flood simulation; Qingjiang River Basin

中小洪水大多数发生在非汛期,即枯季。枯季径流是指当地面径流减少、河水主要接受地下水补给时的河川流量,它是河川径流特殊情势的一种^[1-2]。我国大部分地区属季风气候区,枯季降雨较少,河川枯季径流主要依赖于流域蓄水补给,控制断面处枯季流量过程一般呈较稳定的消退规律。但由于受气候气象、自然地理、人类社会活动等影响,水文要素变化复杂,枯季流量过程具有不确定性^[3-5]。相对于中小洪水,大洪水由

于其巨大的破坏性和影响的广泛性而更加受到世人的瞩目。对防洪调度人员来讲,大洪水固然重要,中小洪水调度却是工作的难点。这是因为中小洪水更加常见,而且任何一场大洪水都是由中小洪水演化而来的。所以能够找到一种较为准确地模拟中小洪水洪峰的方法是十分重要的。中小洪水预报精度的好坏对流域、区域及水库的水资源调度与管理意义重大^[6]。

目前,大部分的研究主要集中在中小洪水径流总量的预测,主要方法有回归分析法、数理统计法、模糊数学法、灰色系统法、人工神经网络模型、遗传算法、BP 网络模型、秩相关秩相似法、Elman 神经网络以及最早的自回归模型等^[1,3, 7-10]。这些方法在实践中具有一定精度,并在一定程度上较好地描述了水文现象的不确定性,然而它们未对径流过程进行一定的描述,无法对洪水过程进行较好模拟。笔者基于水量平衡方程,提出了水文倒推方程,对方程的适用范围进行确定,扩大其应用范围,在清江流域中小洪水模拟中进行验证,旨在为该流域水资源分配与合理利用提供科学依据。

1 水文倒推法

1.1 基本原理

水文倒推法是由 Kirchner^[11]于 2009 年提出的一种以现有数据为基础来倒推历史降雨量和蒸发量的一种方法。在这种方法中,流域蓄水特性由实际出流量的波动来判断,特别是在蒸发量较小的枯季。实际上,这种方法与 Alan Lambert 提出的用 ISO 模型进行预报的方法十分相似,其基础即为式(1)所示的水量平衡方程^[12]。

$$\frac{dS}{dt} = P_t - E_t - Q_t \tag{1}$$

式中: S ——整个流域的蓄水容量,mm; t ——时刻 h; P_t ——时段平均降雨量,mm/h; E_t ——实际蒸发量,mm/h; Q_t ——流域的平均出流量,mm/h。

在 Q_t 可以由流域相应时间内的蓄水容量 S_t 任意函数确定假设下,式(1)可以表示成出流量随着时间的变化方程:

$$\frac{dQ_t}{dt} = \frac{dQ_t}{dS_t} \frac{dS_t}{dt} = \frac{dQ_t}{dS_t} (P_t - E_t - Q_t) = g(Q) (P_t - E_t - Q_t) \tag{2}$$

设方程 $g(Q) = \frac{dQ_t}{dS_t}$,即出流量随流域蓄水容量的时段变化。

水文倒推法最初的意义在于用已知的时段流量来推导逐时段的净雨量。Kirchner^[11]指出趋势方程 $g(Q)$ 可由 P_t 和 E_t 远小于 Q_t 即枯季资料来确定。进而,可通过 P_t 、 E_t 、 Q_t 和趋势方程预测流域未来的出流量过程,其预测方程的递推表示方程如下:

$$Q_{t+1} = Q_t + g(P_t - Q_t - E_t) \tag{3}$$

1.2 基于水文倒推方程推求中小洪水过程

水文倒推方程运用于流域的枯季径流或中小洪水过程模拟的前提是,流域枯季的降雨量与蒸发量之差小于该时刻出口断面的流量,但文献[12]并未对趋势方程的应用范围做出定义。笔者经过对水文倒推方程的进一步研究,进而确定出方程在洪水过程涨水段模拟的适用范围。

在实际应用中,通常会用简单的一阶积分来判断趋势方程,这样会引起方程的不稳定性,即趋势图中横纵轴的相关性较差。对此,Kirchner^[11]曾提出用更高阶的对数函数进行转型,进而得到变量之间的稳定表达式。此处,采用对数函数的二次转型对经过数据进行处理,涨水时段平均涨幅的公式(2)变为

$$\ln \left[-\ln \left(\frac{dQ_t}{dt} \right) \right] = a \ln^2 [| \ln(P_t - E_t - Q_t) |] + b \ln [| \ln(P_t - E_t - Q_t) |] + c \tag{4}$$

式中: c ——常数项。

经数学推导后可知,在 $P_t - E_t - Q_t = \exp \left[\exp \left(-\frac{b}{2a} \right) \right]$ 时, $\ln \left[-\ln \left(\frac{dQ_t}{dt} \right) \right]$ 取得极大值,则时段平均径流量随着时段 $(P_t - E_t - Q_t)$ 的增大而变大,与流域产流规律是完全吻合的。

2 实例应用

清江流域位于 30°N ~ 31°N 亚热带季风区,地处武陵山余脉向江汉平原过渡的坡阶地带,雨峡口水文站

的集水面积为 11 906 km²^[13]。流域暖湿多雨,为中亚热季风气候,多年平均降水量 1 400 mm 左右,多年平均径流深 870 mm,其分布上游略大于中下游^[14]。

将清江中上游的 47 个雨量站 1989—1995 年的雨量资料和其对应的雨峡口水文站时段径流资料作为总输入。首先,以 1989 年枯季的时段平均流量、流域面平均降雨量和面平均蒸发量作为基础,采用对数函数的二次转型对数据进行处理,得到趋势图(图 1),其拟合方程为 $y=0.133x^2+0.441x+1.6333$ 。然后,根据趋势方程的表达式,对其适用的上限范围进行确定,即 $P_t-E_t-Q_t=\exp\left[\exp\left(-\frac{b}{2a}\right)\right]=1.404$ 。这表明当时段平均降雨量、蒸发量以及出流量之差小于 1.404 mm 时,洪峰的模拟效果较好。

以所得的趋势方程为基础,选取若干场次洪水过程,按式(3)的关系对洪水过程进行递推计算,得到各场次洪水的模拟过程,结果如图 2、图 3 所示。

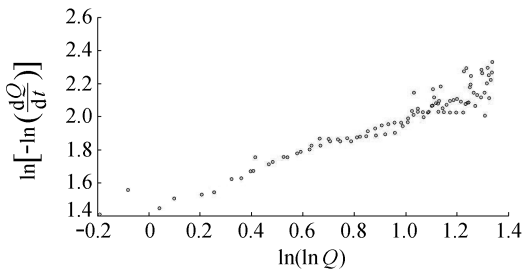


图 1 1989 年清江流域枯季径流变化关系之二次转型
Fig. 1 Second transition of variation of low flow in Qingjiang River Basin in 1989

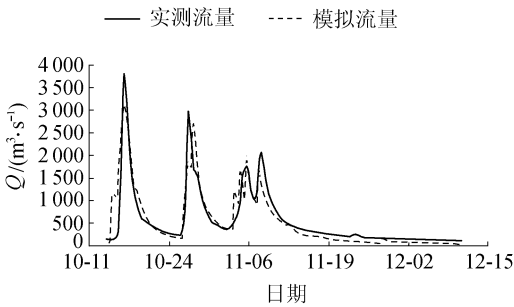


图 2 清江流域 19891016 号洪水过程模拟
Fig. 2 Simulation of flood (No. 19891016) in Qingjiang River Basin

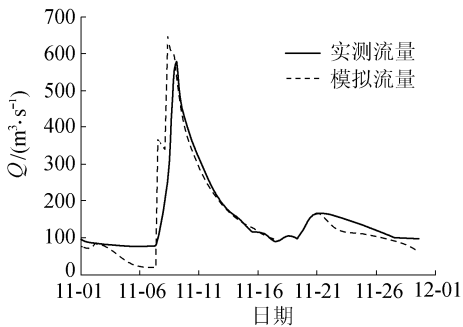


图 3 清江流域 19901108 号洪水过程模拟
Fig. 3 Simulation of flood (No. 19901108) in Qingjiang River Basin

3 模拟结果分析

表 1 为次洪过程模拟误差统计结果,洪峰模拟精度为 80% 左右。根据模拟结果可知:方程的建立是基于枯季或降雨量较小、水位过程线变化缓慢的前提,这与流域洪水退水过程的基本原理^[15]极为符合,所以水文倒推方程对退水段的模拟效果较好;在洪峰滞时上,方程对流域中由于土壤的湿润程度和河网汇流所引起的滞时没有进行明确的解释,导致预报峰现时间存在一定的误差。水文倒退方程最大的好处在于简便,而且不用进行蓄水容量估算。

4 结 语

针对现阶段枯季径流模拟的不足与中小洪水预报的独特性,提出了新的中小洪水过程的模拟方法。在考虑枯水期流域水量平衡规律的基础上,建立了水文倒推模拟方程,计算出其适用范围。与传统的中小洪水模拟方法(如用优化方法提高预报精度^[16])相比,其方法简单,整体效果较好。在实际应用中,应按照流域实际资料情况来确定对数变换的次数。随着水利

表 1 次洪过程模拟误差统计

Table 1 Error statistics of flood simulations

洪号	实测洪峰流量/ (m ³ · s ⁻¹)	模拟洪峰流量/ (m ³ · s ⁻¹)	洪峰流量评定 相对误差/%	确定性 系数	合格
19891016	3 800	3 120	-17. 89	0. 79	√
19891027	2 970	2 680	-9. 59	0. 81	√
19891108	2 060	1 760	-14. 53	0. 83	√
19901109	577	641	11. 09	0. 75	√
19931111	1 390	1 230	-11. 51	0. 76	√
19941116	999	852	-14. 71	0. 82	√
19951003	1 560	1 700	8. 93	0. 85	√
19951020	1 900	1 710	-10. 00	0. 81	√

注:评价参照 SL250—2000《水文情报预报规范》。

设施的不断建设,自然河道的流量过程不断受到人类活动的影响,所以流域相应的水文倒推方程会随年代的变化而变化,对此应采取及时修正的措施。

参考文献:

- [1] 何振奇,乔光建. 基于多项式回归模型的枯季径流预报与分析[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(5): 85-88. (HE Zhenqi, QIAO Guangjian. Polynomial regression model based on the low flow forecasting and analysis[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(5): 85-88 (in Chinese))
- [2] 李云生,齐鹏春. 应用前后期径流相关法预报枯季径流量[J]. 水土保持应用技术, 2012(2): 21-22. (LI Yunsheng, QI Pengchun. Application of runoff correlation method for the prediction of dry season runoff[J]. Technology of Soil and Water Conservation, 2012(2): 21-22 (in Chinese))
- [3] 车骞,王根绪,畅俊杰,等. 基于人工神经网络的黄河源区枯季径流预报[J]. 人民黄河, 2005, 27(3): 23-24. (CHE Qian, WANG Gengxu, CHANG Junjie, et al. Artificial neural network based runoff forecasting for dry seasons of the Yellow River Source Region[J]. Yellow River, 2005, 27(3): 23-24 (in Chinese))
- [4] 鲁帆,蒋云钟,殷峻暹. 基于BP神经网络的贝叶斯概率枯季径流预报研究[J]. 水电能源科学, 2008, 26(3): 7-10. (LU Fan, JIANG Yunzhong, YIN Junxian. Bayesian probabilistic low flow forecasting research based on BP ANN[J]. Water Resources and Power, 2008, 26(3): 7-10 (in Chinese))
- [5] 金鑫,张春洁. 大清河流域枯季径流变化规律和中期预报[J]. 地下水, 2007, 29(6): 114-116 (JIN Xing, ZHANG Chunjie. The variation and mid-forecast of low runoff in Daqing River[J]. Ground Water, 2007, 29(6): 114-116 (in Chinese))
- [6] 鲁帆,王浩,蒋云钟,等. 流域级水量调度模型研究述评[J]. 水利水电技术, 2007, 38(8): 16-18. (LU Fan, WANG Hao, JIANG Yunzhong, et al. A review of research on water resources regulation model on river basin level [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(8): 16-18. (in Chinese))
- [7] 孙仕军,李锐,谢新民,等. BP算法在辽宁观音阁水库枯季地表入库径流实时预报中的应用[J]. 沈阳农业大学学报, 2004, 35(5): 504-506. (SUN Shijun, LI Yue, XIE Xinming, et al. Application of BP network in real-time forecast of drought period surface runoff in Guanying Reservoir of Liaoning [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2004, 35(5): 504-506. (in Chinese))
- [8] 鲁帆,侯召成,蒋云钟,等. 秩相关秩相似法在枯季径流预报中的应用[J]. 水文, 2011, 31(4): 58-60 (LU Fan, HOU Zhaocheng, JIANG Yunzhong, et al. Application of rank correlation and rank similarity method to low flow forecast [J]. Hydrology, 2011, 31(4): 58-60 (in Chinese))
- [9] 牛广文. 基于Elman网络的黄河源区枯期径流预报[J]. 兰州工业高等专科学校学报, 2007, 14(3): 27-30. (NIU Guangwen. The Yellow River dry season prediction research based on Elman neural network[J]. Journal of Lanzhou Polytechnic College, 2007, 14(3): 27-30 (in Chinese))
- [10] 鲁小清,冯平. 用自回归模型预报枯季径流初探[J]. 水土保持通报, 1993, 13(6): 34-38. (LU Xiaoqing, FENG Ping. Applying the autoregressive model to predict runoff in withered season[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1993, 13(6): 34-38. (in Chinese))
- [11] KIRCHNER J W. Catchments as simple dynamical systems: catchment characterization, rainfall-runoff modeling, and doing hydrology backwards[J]. Water Resources Research, 2009, 45: 1-34.
- [12] KEITH J B. Rainfall-runoff modeling[M]. 2nd. Britain: Wiley-Blackwell, 2012: 85.
- [13] 秦蓓蕾. 清江流域水文中长期预测研究[D]. 成都: 四川大学, 2004.
- [14] 郭君. 清江流域降雨径流预报模型的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [15] 包为民,张建云. 水文预报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 24-25
- [16] 白宁. 用参数修正法提高中小洪水预报精度[J]. 东北水利水电, 2004, 22(1): 11-12. (BAI Ning. Raising forecast precision of medium and small food with revised parameter method[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2004, 22(1): 11-12. (in Chinese))