

# 涞水流域无资料地区降雨径流模拟应用研究

杨学军<sup>1</sup>, 杨 邦<sup>1</sup>, 孟宪萌<sup>2</sup>, 刘玉晶<sup>1</sup>

(1. 水利部海河水利委员会水文局, 天津 300170; 2. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074)

**摘要:** 应用区域化流量历时曲线模拟无资料地区径流过程时, 模拟精度常受到有资料地区径流资料长短、回归因素及推求的流量历时曲线片段长短等因素的影响。采用中周期连续时段径流资料, 通过流量历时分位数回归法推求无资料地区流量历时曲线, 并以此率定水文模型参数, 进而实现涞水流域无资料地区降雨径流过程模拟。模拟结果表明: 综合考虑多种回归因素有利于提高流量历时曲线精度; 采用流量历时曲线片段也可实现模型参数率定, 且随着片段延长, 率定精度也相应增加; 在流量历时曲线高、中、低水三类片段中, 采用中水片段率定的精度相对高于仅用高水或低水片段, 因此率定过程中应尽可能保留流量历时曲线中水部分片段。

**关键词:** 流量历时曲线; 无资料; 降雨径流模拟; 流量历时分位数回归; 参数率定

**中图分类号:** P333.2    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2015)01-0038-03

## Application research of rainfall runoff simulation for ungauged region in the Mishui Basin

YANG Xue jun<sup>1</sup>, YANG Bang<sup>1</sup>, MENG Xian meng<sup>2</sup>, LIU Yu jing<sup>1</sup>

(1. Hydrology Bureau of Haihe River Water Conservancy Commission, MWR, Tianjin 300170, China;

2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The precision of the application of regional flow duration curve to simulate the flow hydrograph in the ungauged regions is usually influenced by the length of runoff data in the gauged regions, the regression factors, and the segment length of calculated flow duration curve. In this paper, based on the continuous runoff data in the middle cycle, the flow duration quantile regression method was used to derive the flow duration curves in the ungauged regions. The parameters of hydrological model were calibrated, and the rainfall runoff simulation for the ungauged regions in the Mishui Basin was performed. The simulation results showed that the comprehensive consideration of the multiple regression factors can improve the precision of flow duration curve; the flow duration curve segment can be used to calibrate the model parameters, and the calibration accuracy is increased with the segment extension; and among the three segments with high, middle, and low water of the flow duration curve, the calibration accuracy using the middle water segment is relatively higher than that using the high water or low water segment, so the middle water segment in the flow duration curve is better retained during the calibration process.

**Key words:** flow duration curve; ungauged; rainfall runoff simulation; flow duration quantile regression; parameter calibration

无资料地区径流预测的关键及难点在于如何有效地将有资料地区的信息转换至无资料地区, 实现从“无资料”到“有资料”的转换。无资料地区无法依据传统的思路实现水文模型参数率定<sup>[1]</sup>, Lanen 等<sup>[2]</sup>及 Smakhtin 等<sup>[3]</sup>最早使用流量历时曲线(Flow Duration Curve, 简称 FDC)率定水文模型参数, 其后游保杉<sup>[4]</sup>、黄国如<sup>[5]</sup>等人相继使用该思路进行无资料水文模型参数率定, 实现无资料地区日径流过程模拟, 取得了较好的效果。上述研究均局限于长序列日径流过程, 本研究拟应用上述方法对湖南涞水流域无资料地区中周期的时段径流(1 h)过程进行模拟。计算思路为: 首先计算各

有资料区域 FDC, 进而推求无资料地区 FDC, 以此作为水文模型的拟合目标来率定无资料地区参数, 并研究 FDC 片段对模型参数率定的影响, 为无资料地区实用预报的开展提供参考。

## 1 研究区及资料概况

作为湘水一级支流, 涞水流域地理位置为 26°01′ - 27°10′N、112°52′ - 113°56′E, 地处湖南省东南部, 气候属亚热带季风型湿润型, 降水丰盈, 植被茂盛。利用涞水干支流上 5 个水文站将流域划分为 5 个研究子区(各站以上区域,

图 1)。

本研究获取了各子区 2006 年 4 月 5 日至 9 月 5 日连续时段径流、蒸发及降水资料(均处理成连续 1 h)。假定坑口站以上区域为“无资料地区”,其余 4 区则为“有资料地区”。表 1 为各子区的特征值。



图 1 洮水流域及各研究子区分布

Fig. 1 The Mishiui Basin and its sub catchments

表 1 各子区特征值

Tab. 1 Characteristics of different sub catchments

属性	甘溪	龙家山	安仁	五里牌	坑口
面积 $A/km^2$	9995	4590	1697	803	675
选取周期降水 $R/mm$	1361	1386	1412	1425	1431
平均高程 $H/km$	417	578	382	892	760
最长河道 $L/km$	263	153	110	57	65
平均坡度 $S(^{\circ})$	3.5217	4.7425	2.7320	6.6975	5.6585

## 2 无资料地区流量历时曲线推求

流量历时曲线(FDC)是不同时间百分率与其对应保证流量的分布曲线。目前国内外推求无资料地区 FDC 的方法大致可分为以下几类:参数化法<sup>[6]</sup>、统计法<sup>[9]</sup>、图形化法<sup>[6]</sup>、流量历时分位数回归法<sup>[7-8]</sup>、地貌统计法等<sup>[9]</sup>。其中,流量历时分位数回归法是在有资料地区建立各自的流量历时曲线,然后在各流量历时曲线上取相应时间保证率的分位数所对应的流量(可取保证率为 0.1、0.2、0.3、... 0.9 所

对应的流量值  $Q_{0.1}、Q_{0.2}、Q_{0.3}、\dots、Q_{0.9}$ ),再通过多元回归分析建立各区域的分位数流量与流域特征(地貌、植被、气候因子等)的相关关系,再结合无资料地区地貌特征来推求无资料地区的 FDC。流量历时分位数回归法又可分为线性回归与非线性回归两类<sup>[8]</sup>,本研究采用的是非线性分位数回归法,公式如下:

$$Q_p = A(0, p) \times G_1^{A(1,p)} \times G_2^{A(2,p)} \times \dots \times G_n^{A(n,p)} \quad (1)$$

式中:  $Q_p$  为 FDC 相应时间保证率的分位数  $p$  所对应的流量;  $A(0, p)、A(1, p)、\dots、A(n, p)$  分别为  $p$  对应的  $n$  个回归参数;  $G_1、G_2 \dots G_n$  分别为各子区的面积、地貌、植被、气候因子等流域特征值。可将公式(1)左右两边取自然对数,即可将式(1)转换为线性回归方程,即

$$\ln Q_p = \ln A(0, p) + A(1, p) \times \ln G_1 + A(2, p) \times \ln G_2 + \dots + A(n, p) \times \ln G_n \quad (2)$$

实际计算中,可计算  $\ln Q_p$  与  $\ln G_1、\ln G_2 \dots \ln G_n$  的线性回归关系。经分析,研究区内  $Q_p$  分别与面积  $A$  及平均坡度  $S$ 、面积  $A$  及平均高程  $H$ 、面积  $A$  及流量相应降水  $R$ 、面积  $A$  及最长河道  $L$  等均存在一定的相关关系。根据是否满足显著性检验( $F$  检验和  $t$  检验,  $\alpha=0.1$ ),建立不同回归因子的回归方程。最后将坑口区间相应特征参数(回归因子)代入各回归方程,推求出不同回归因子下的坑口区间的流量历时曲线(表 2)。表 2 中最后两列分别为前面各列的均值及实际 FDC,“-”表示该分位数处的相关关系不显著,即不满足显著性检验  $F$  检验和  $t$  检验( $\alpha=0.1$ )。

分别计算不同回归因子推求的 FDC 与实际 FDC 的拟合程度,拟合程度可用确定性系数表示,公式如下

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_p (Q_p - Q_{0p})^2}{\sum_p (Q_p - \overline{Q_{0p}})^2} \quad (3)$$

式中:  $Q_p$  为计算值;  $Q_{0p}$  为实测值;  $\overline{Q_{0p}}$  为实测值的均值;  $R^2$  为确定系数,确定性系数越高,则两 FDC 拟合越好,流量过程拟合也相应较好。经计算  $A, H$  因子相关推求的 FDC 确定系数  $R^2 = 0.973662$ ,  $A, S$  因子的  $R^2 = 0.9682$ ,  $A, R$  因子的  $R^2 = 0.946689$ ,  $A, L$  因子的  $R^2 = 0.927697$ , 平均确定系数  $R^2 = 0.983214$ , 可见平均推求的 FDC 拟合程度最好。

表 2 不同回归因子下推求的坑口区间流量历时曲线

Tab. 2 Calculated FDCs of the Kengkou catchment based on different regression factors

分位数 $p$	$A, H$ 因子推求的 FDC	$A, S$ 因子推求的 FDC	$A, R$ 因子推求的 FDC	$A, L$ 因子推求的 FDC	平均推求的 FDC	实际 FDC
0.1	79.39036	79.73832	81.20498	74.65977	78.74836	73.73143
0.2	50.91110	51.42025	51.46213	42.60591	49.09985	49.00333
0.3	38.42982	39.13349	-	-	38.78166	39.66148
0.4	33.96519	34.48632	-	25.86843	31.43998	33.39442
0.5	30.53922	30.87826	30.93003	25.08794	29.35886	29.09286
0.6	28.33234	28.57316	28.77550	24.52152	27.55063	24.99750
0.7	24.72716	25.14196	-	18.15872	22.67595	21.96500
0.8	20.26124	20.72706	-	13.38684	18.12505	19.16596
0.9	-	-	-	-	-	16.90563

## 3 应用 FDC 率定水文模型参数

利用数字高程模型(DEM)提取洮水流域的水系、汇流顺序、子流域划分、泰森多边形等一系列流域参数,以划分的子流域为产流单元,建立基于新安江模型蓄满产流机制的分布

式流域水文模型<sup>[1]</sup>。整个模型计算流程包括:子流域单元按蓄满方式产流;子流域单元三水源划分;子流域单元坡面汇流(串联线性水库);河道汇流至总出口断面(分段马斯京根演算)。

以平均推求的 FDC 为拟合目标,采用遗传算法<sup>[10]</sup>率定

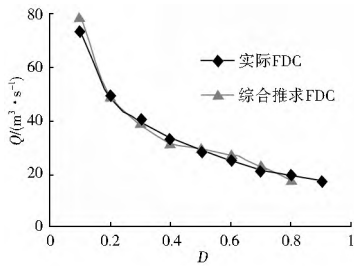


图 2 坑口站综合推求的 FDC 与实际 FDC  
Fig. 2 Comparison of the calculated and actual FDCs at the Kengkou station

坑口以上区域水文模型参数: 利用率定过程中每组参数模拟得到的流量过程线计算相应 FDC, 分别取该 FDC 上不同时间保证率的分位数所对应的流量  $Q_p$  ( $p = 0.1, 0.2, 0.3, \dots, 0.8$ , 推求的 FDC 上不含 0.9) 与区域化 FDC 上的相应流量  $Q_p$  ( $p = 0.1, 0.2, 0.3, \dots, 0.8$ ) 进行对比, 目标函数采用确定系数(同公式 3)。确定性系数越高, 表明两 FDC 拟合越好, 同时, 该 FDC 所表达的流量过程也更接近实际流量过程。通过遗传编码生成、种群产生、适应度计算、选择、交叉、变异等<sup>[11]</sup>过程推求较优参数集, 经过 1000 代(种群数 150)优化计算, 最优参数组(表 3)使两 FDC 的确定系数达 0.985, 相应流量过程线与实测流量过程线拟合较好(图 3), 确定性系数达 0.744。可见 FDC 率定法可以实现中短历时(几个月, 连续 1 h)径流过程模拟, 为无资料地区开展实时洪水预报提供实用技术手段。

表 3 坑口集水区域 FDC 率定的模型参数  
Tab. 3 The calibrated model parameters based on FDC of the Kengkou catchment

参数名称	参数值	率定范围
蒸发折算系数 $K_e$	1.018	1.000~1.300
张力水蓄量 $WM/mm$	120	120~120
上层张力水容量 $UM/mm$	20	20~20
中层张力水容量 $LM/mm$	60	60~60
不透水面积比 $IMP$	0.01	0.01~0.01
张力水曲线分布指数 $B$	0.357	0.010~0.040
深层蒸发折算系数 $C$	0.183	0.010~0.020
地下水消退系数 $CG$	0.999	0.991~0.999
壤中流消退系数 $CI$	0.980	0.979~0.991
地下水出流系数 $KG$	0.395	0.01~0.04
壤中流出流系数 $KI$	0.399	0.01~0.04
自由水蓄量 $SM/mm$	36.180	30.000~50.000
自由水曲线分布指数 $EX$	1.236	1.000~1.500
马斯京根法蓄量常数 $K(h)$	1	1~1
马斯京根法流量比重因子 $X$	0.470	0.001~0.499
河网消退系数 $CS$	0.788	0.700~0.800
特征河长 $DK$ (栅格距离)	7.908	7.000~8.000

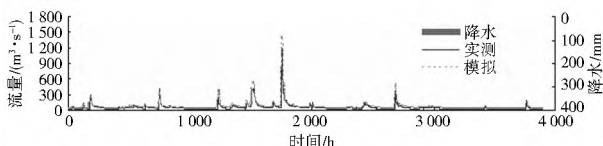


图 3 坑口站模拟径流(基于 FDC 率定)与实测径流过程线

Fig. 3 Comparison of the simulated runoff (based on FDC calibration) and observed runoff at the Kengkou Station

当 FDC 区域化条件有限(某些保证率下无法利用相关关系推求流量)时, 利用 FDC 片段进行水文模型参数(本研究不含低水  $p = 0.9$  部分)也可以较好地模拟无资料地区的流量过程, 实现水文模型在无资料地区的参数区域化。

为了进一步研究 FDC 片段对模型参数率定的影响, 采用坑口实际 FDC, 分别取高水( $p = 0.1, 0.2, 0.3$ )、中水( $p = 0.4, 0.5, 0.6$ )、低水( $p = 0.7, 0.8, 0.9$ )三部分片段进行率定参数, 采用遗传算法经过 1000 代(种群数 150)优化计算, 最优参数组使两 FDC 的确定系数分别达 0.999、0.999、0.994, 相应流量过程线与实测流量过程线确定性系数分别为 0.587、0.682、0.661; 适当延长 FDC 片段, 取高水( $p = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ )、中水( $p = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ )、中水( $p = 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ )、低水( $p = 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ )四部分片段进行率定参数, 采用遗传算法经过 1000 代(种群数 150)优化计算, 最优参数组使两 FDC 的确定系数分别达 1.0、0.994、0.996、0.988, 相应流量过程线与实测流量过程线确定性系数分别为 0.633、0.688、0.738、0.629; 进一步延长 FDC 片段, 取高水( $p = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ )、中水( $p = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ )、中水( $p = 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ )、低水( $p = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ )四部分片段进行率定参数, 采用遗传算法经过 1000 代(种群数 150)优化计算, 最优参数组使两 FDC 的确定系数分别达 0.999、0.999、0.988、0.982, 相应流量过程线与实测流量过程线确定性系数分别为 0.652、0.773、0.788、0.712。上述结果表明: 随着 FDC 片段延长, 高、中、低水段率定径流过程的精度都有所提高, 并且中水段率定的精度要高于高水及低水段, 因而率定过程中应尽可能保留 FDC 中水部分片段。

## 4 结论

本研究采用中周期的连续时段资料(1 h), 利用流量历时分位数回归分析, 推求了无资料地区的 FDC, 并率定了泇水流域无资料地区水文模型参数, 进而实现了无资料地区时段降雨径流过程的模拟。研究表明: (1) 利用中周期连续时段资料推求无资料 FDC 并进行径流过程模拟是可行的, 为无资料地区开展实时洪水预报提供了实用手段; (2) 利用 FDC 率定水文模型参数关键在于推求的 FDC 精度, 而综合考虑多种相关因素是关键; (3) 当 FDC 区域化条件有限(某些保证率下无法利用相关关系推求流量), 可采用 FDC 片段进行模型参数率定, 随着 FDC 片段延长, 信息增加, 流量历时曲线高、中、低水片段率定径流过程的精度总体上都有所提高, 但 FDC 中水片段率定的精度相对高于其他片段。

## 参考文献(References):

[1] 杨邦, 任立良, 陈福容, 等. 无资料地区水文预报(PUB)不确定性研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(4): 7-10. (YANG Bang, REN Li liang, CHEN Fu rong, et al. Uncertainty research of hydrological prediction in ungauged basin[J]. Water Resources and Power, 2009, 27(4): 7-10. (in Chinese))

(下转第 99 页)

- [2] 邢忠信, 李和学, 张熟, 等. 沧州市地面沉降研究及防治对策[J]. 地质调查与研究, 2004, 27(3): 157-1631. XING Zhongxin, LI Heshu, ZHANG Shu, et al. Surface Subsidence and its Countermeasures in Cangzhou City[J]. Geological survey and research, 2004, 27(3): 157-1631. (in Chinese)
- [3] 张熟, 刘增寿, 田小伟, 等. 沧州市降落漏斗、地面沉降发展演化规律及防治对策[J]. 工程地质学报, 2005, 13(S1): 24-291. The development and prevention of land subsidence, cone of depression in Cangzhou City[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(S1): 24-291. (in Chinese)
- [4] 易立新, 侯建伟, 李子木, 等. 河北省廊坊市地面沉降调查[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(4): 65-681. The land subsidence survey in Langfang, Hebei Province[J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(4): 65-681. (in Chinese)
- [5] 易立新, 侯建伟, 要根明. 廊坊市地面沉降灾害与城市可持续发展对策[J]. 工程地质学报, 2005, 13(S1): 30-331. Land subsidence disaster and city sustainable development in Langfang. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(S1): 30-331. (in Chinese)
- [6] 李国和, 荆志东, 许再良. 京沪高速铁路沿线地面沉降与地下水位变化关系探讨[J]. 水文地质工程地质, 2008(6): 93-98. (LI Guohe, JING Zhidong, XU Zailiang. A discussion of the correlation between land subsidence and groundwater level variation along the Jinghu high speed railway[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008(6): 93-98. (in Chinese))
- [7] 杨艳, 贾三满, 王海刚. 北京平原地区地面沉降现状及发展趋势分析[J]. 上海地质, 2010, 31(4): 23-28. (YANG Yan, JIA Saman, WANG Haigang. The status and development of land subsidence in Beijing Plain[J]. Shanghai Geology, 2010, 31(4): 23-28. (in Chinese))
- [8] 北京市地质矿产勘查开发局. 北京地下水[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008. (Beijing Bureau of geology and mineral exploration and Development. Beijing groundwater[M]. Beijing: China Land Press, 2008. (in Chinese))
- [9] 董国凤. 地面沉降预测模型及应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2006. (DONG Fengguo. Prediction model and application of land subsidence[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006. (in Chinese))
- [10] 贾莹媛, 黄张裕, 张蒙, 等. 含水组地下水位变化对地面沉降影响的多元回归分析与预测[J]. 工程勘察, 2003(1): 77-79. (JIA Yingyuan, HUANG Zhangyu, ZHANG Meng, et al. Application of multiple regression analysis and prediction in ground subsidence with water table[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2003(1): 77-79. (in Chinese))
- [11] 田芳, 郭萌, 罗勇, 等. 北京地面沉降区土体变形特征[J]. 中国地质, 2012, 39(1): 236-242. (TIAN Fang, GUO Meng, LUO Yong, et al. The deformation behavior of soil mass in the subsidence area of Beijing[J]. Geology In China, 2012, 39(1): 236-242. (in Chinese))
- [12] 郝亚东, 许加东, 张勇. 基于多影响因子计算模型在城市地面沉降监测中的应用研究[J]. 铁道工程学报, 2011(3): 20-23. (HAO Yandong, XU Jiadong, ZHANG Yong. Research on application of settlement monitoring model in the calculation of multi factors based on the city ground[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(3): 20-23. (in Chinese))
- [13] 汪冬华. 多元统计分析与SPSS应用[M]. 上海: 东华理工大学出版社, 2010. (WANG Donghua. Multivariate statistical analysis and application of SPSS[M]. Shanghai: East China Institute of Technology, 2010. (in Chinese))

(上接第40页)

- [2] Lanen H A J, Tallaksen L M, Kasperek L, et al. Hydrological drought analysis in the Hupsel basin using different physically based models[A]. Gustard A, Blazkova S, Brilly M, et al. Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management[C]. IAHS Publication, 1997, 246: 189-196.
- [3] Smakhtin V Y, Watkins D A, Hughes D A, et al. Methods of Catchment-Wide Assessment of Daily Low-flow Regimes in South Africa[J]. Water SA, 1998, 24(3): 173-185.
- [4] Yu P S, Yang T C. Using synthetic flow duration curves for rainfall runoff model calibration at ungauged sites[J]. Hydrological Process, 2000, 14: 117-133.
- [5] 黄国如. 利用区域流量历时曲线模拟东江流域无资料地区的日径流过程[J]. 水力发电学报, 2007, 26(4): 29-35. (HUANG Guoru. Daily flow hydrograph simulation using regional flow duration curves for ungauged region of Dongjiang basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(4): 29-35. (in Chinese))
- [6] Attilio Castellarin, Giorgio Galeati, Luigia Brandimarte, Alberto Montanari, Armando Brath. Regional flow-duration curves: reliability for ungauged basins[J]. Advances in Water Resources, 2004, 27(10): 953-965.
- [7] Franchini M, Suppo M. Regional analysis of flow duration curves for a limestone region[J]. Water Resour Manage. 1996, 10: 199-218.
- [8] Tseyed Teshome. Regionalization of flow duration curve for Abbay Basin using GIS[D]. Addis Ababa: Addis Ababa University, 2007.
- [9] Peter Wilderer. Treatise on Water Science[M]. Oxford: Elsevier, 2011, 479-517.
- [10] Holland J. Adaptation in natural and artificial systems[M]. Michigan: The University of Michigan Press, 1975.